



## Paper Type: Original Article



# Enhancing Agricultural Water Productivity in the Urmia Lake Basin: A Network Assessment of Irrigation Systems

Azam Pourhabib Yekta<sup>1,\*</sup> , Monireh Zorrieh Habib<sup>2</sup>, Mahnaz Maghbouli<sup>3</sup> , Jafar Asadpour Astyar<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematics, Sowmesara Branch, Islamic Azad University, Guilan, Iran; [ayekta220@gmail.com](mailto:ayekta220@gmail.com).

<sup>2</sup> Department of Mathematics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran; [zorriehhabib@gmail.com](mailto:zorriehhabib@gmail.com).

<sup>3</sup> Department of Mathematics, Aras Branch, Islamic Azad University, East Azerbaijan, Iran; [mmaghbouli@gmail.com](mailto:mmaghbouli@gmail.com).

<sup>4</sup> Department of Mathematics, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran; [jafar\\_asadpour@yahoo.com](mailto:jafar_asadpour@yahoo.com).

### Citation:



Pourhabib Yekta, A., Zorrieh Habib, N., Maghbouli, M., & Asadpour Astyar, J. (2026). Enhancing agricultural water productivity in the Urmia Lake Basin: A network assessment of irrigation systems. *Management: Modeling, Analysis and Applications*, 3(1), 79-88.

Received: 01/01/2026

Reviewed: 10/02/2026

Revised: 15/03/2026

Accepted: 17/05/2026

## Abstract

**Purpose:** The growing water crisis and the continued decline in Lake Urmia's water level have highlighted the urgent need to improve water use and irrigation management practices in the agricultural sector. Since agriculture accounts for the majority of water withdrawals in the basin, evaluating irrigation system efficiency is essential to identify resource waste and improve water productivity. Although numerous studies have examined the hydrological and environmental conditions of Lake Urmia, limited attention has been paid to assessing groundwater-based irrigation systems from a network perspective while also considering undesirable environmental outcomes. Therefore, this study aims to evaluate the efficiency of irrigation systems powered by agricultural wells and identify efficient water-use patterns in the Shabestar region.

**Methodology:** This applied research employed a Network Data Envelopment Analysis approach. The irrigation system was modeled as a two-stage process: The first stage represented water extraction and delivery, while the second reflected agricultural utilization of water resources. Data from 24 active wells in the Shabestar region were considered as decision-making units. Variables including well depth, annual water extraction, maximum discharge rate, cultivated area, irrigated land, and annual operating hours were incorporated into the analysis. Efficiency scores were calculated using auxiliary-variable network DEA models, and efficient units were ranked through a super-efficiency framework.

**Findings:** The results indicate that only a limited number of wells operate efficiently, while most units exhibit inefficiencies in one or both stages of the irrigation system. The findings further reveal that excessive groundwater extraction, unbalanced resource utilization, and a predominant focus on short-term economic gains are among the primary factors contributing to inefficiency and worsening water scarcity in the region. Moreover, the considerable variation between stage-specific efficiency scores highlights the importance of adopting a system-wide perspective toward water extraction and agricultural consumption processes.

**Originality/Value:** This study advances irrigation performance evaluation by modeling water utilization systems as two-stage network processes that simultaneously incorporate desirable and undesirable outputs. Its main contribution lies in moving beyond isolated well-level assessments to examine interactions among different stages of water use, thereby enabling the identification of sources of inefficiency throughout the system. The findings provide practical insights for sustainable water governance, agricultural productivity improvement, and restoration planning within the Lake Urmia basin.

**Keywords:** Data envelopment analysis, Two-stage system, Undesirable data, Hyperefficiency model, Cross-efficiency.



Corresponding Author: [ayekta220@gmail.com](mailto:ayekta220@gmail.com)



<https://doi.org/10.22105/mmaa.v3i1.121>



Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## ارتقای بهره‌وری مصرف آب کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه: ارزیابی شبکه‌ای سامانه‌های آبیاری

اعظم پور حبیب یکتا<sup>۱\*</sup>، منیره ذریه حبیب<sup>۲</sup>، مهناز مقبولی<sup>۳</sup>، جعفر اسدپور استیار<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه ریاضی، واحد صومعه سرا، دانشگاه آزاد اسلامی، گیلان، ایران.

<sup>۲</sup> گروه ریاضی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

<sup>۳</sup> گروه ریاضی، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، آذربایجان شرقی، ایران.

<sup>۴</sup> گروه ریاضی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.

### چکیده

**هدف:** بحران فزاینده منابع آب و افت مستمر تراز دریاچه ارومیه، ضرورت بازنگری در الگوهای بهره‌برداری و مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی را بیش از پیش آشکار ساخته است. از آنجا که بخش عمده برداشت آب در این حوضه به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص دارد، ارزیابی کارایی سامانه‌های آبیاری می‌تواند نقش مهمی در شناسایی نقاط اتلاف منابع و بهبود بهره‌وری ایفا کند. با وجود انجام مطالعات متعدد درباره وضعیت هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی دریاچه ارومیه، بررسی عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی با رویکرد شبکه‌ای و در نظر گرفتن پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی سامانه‌های آبیاری مبتنی بر چاه‌های کشاورزی و شناسایی الگوهای بهره‌برداری کارآمد در منطقه شبستر انجام شد.

**روش‌شناسی پژوهش:** این پژوهش با استفاده از رویکرد تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای انجام شد. سامانه آبیاری به صورت یک فرایند دومرحله‌ای مدل‌سازی گردید که در آن مرحله نخست شامل استخراج و انتقال آب و مرحله دوم شامل بهره‌برداری کشاورزی از منابع آب بود. داده‌های ۲۴ حلقه چاه فعال در منطقه شبستر به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهایی نظیر عمق چاه، تخلیه سالانه، دبی حداکثری، سطح زیر کشت، مساحت آبیاری و ساعات کارکرد سالانه در مدل لحاظ شدند. برای سنجش کارایی از مدل‌های شبکه‌ای مبتنی بر متغیرهای کمکی و برای رتبه‌بندی واحدهای کارا از مدل ابرکارایی استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد تنها تعداد محدودی از چاه‌های مورد بررسی از کارایی مطلوب برخوردار هستند و بخش عمده واحدها با ناکارایی در یک یا هر دو مرحله سامانه مواجه‌اند. یافته‌ها همچنین بیانگر آن بود که برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری نامتوازن و تمرکز صرف بر منافع اقتصادی کوتاه‌مدت از عوامل اصلی کاهش کارایی و تشدید بحران آب در منطقه هستند. علاوه بر این، اختلاف قابل توجه میان کارایی مراحل مختلف نشان داد که بهبود عملکرد نیازمند نگاه سیستمی به کل زنجیره استخراج و مصرف آب است.

**اصالت/ارزش افزوده علم:** این پژوهش با مدل‌سازی سامانه آبیاری به عنوان یک فرایند شبکه‌ای دومرحله‌ای و لحاظ هم‌زمان خروجی‌های مطلوب و نامطلوب، دیدگاهی جامع‌تر نسبت به ارزیابی بهره‌وری منابع آب ارائه می‌دهد. ارزش افزوده اصلی مطالعه در آن است که به جای ارزیابی صرف عملکرد چاه‌ها، تعامل میان مراحل مختلف بهره‌برداری آب را مورد تحلیل قرار می‌دهد و امکان شناسایی گلوگاه‌های ناکارایی را فراهم می‌سازد. نتایج پژوهش می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری در زمینه مدیریت پایدار آب، بهبود بهره‌وری کشاورزی و طراحی برنامه‌های احیای حوضه دریاچه ارومیه باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل پوششی داده‌ها، سیستم دومرحله‌ای، داده‌های نامطلوب، مدل ابرکارایی، کارایی متقاطع.

### ۱- مقدمه

گرمایش زمین، بحران جهانی آب، تغییرات اقلیمی، افزایش روزافزون جمعیت و پیشرفت حیرت‌انگیز تکنولوژی، منجر به استفاده بی‌رویه از منابع فعلی آبی شده است. از این رو در دهه‌های اخیر، ضرورت تامین و نگهداری منابع آبی یکی از چالش‌های مهم بشر است. باتوجه به نیاز مبرم و غیرقابل انکار انسان به مایه حیات و اینکه مدیریت صنعت آب می‌تواند روی تمامی شاخه‌های علوم تاثیرات مثبت و یا حتی مخربی بگذارد، لذا یادگیری مبانی و مباحث مهندسی آب و ابزارهای مربوطه برای برنامه‌ریزان، متخصصان و دانشجویان حوزه آب، امری بدیهی محسوب می‌شود.

بررسی روند کاهش منابع آب در کشورهای مختلف از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۵ میلادی با بررسی سوابق تاریخی و مدل‌های پیش‌بینی، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه بسیار قابل توجه و بحرانی است [1]. علی‌رغم ورشکستگی آبی و بحران حاد در نحوه مدیریت این منابع، توانایی ما در ارزیابی صحیح و پیش‌بینی میزان آب قابل دسترس هنوز محدود است؛ بنابراین جهت حل این مشکل نه تنها کارشناسان و مدیران منابع آبی بلکه تمام ذی‌نفعان نیز باید همکاری فعالی در زمینه جبران کمبود کمی و تخریب کیفی آب داشته باشند. از سویی دیگر، محدودیت موجودی قابل برداشت و اشتراک در حق بهره‌مندی از منابع آبی مشترک، زمینه‌ساز افزایش رقابت و بروز مناقشه بین ذی‌نفعان می‌شود. در چنین شرایطی، افراد بدون توجه به پیامدهای رفتارهای خود و با ترجیح دادن منافع شخصی کوتاه‌مدت به بهره‌برداری بیش از اندازه بهینه روی می‌آورند که ضمن به بار آوردن خسارات محیط زیستی در بلندمدت، موجب زیان اجتماعی و اقتصادی نیز می‌شود [2-4].

دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه کشور و دومین دریاچه شور در دنیا است که باتوجه به تغییرات الگوی بارش ناشی از تغییرات اقلیمی و همچنین وقوع خشک‌سالی ناشی از احداث بدون کارشناسی و بی‌رویه سدها و چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در حوضه آبریز این دریاچه، تراز آب دریاچه دچار تغییرات زیادی شده است. بحران وخامت حال دریاچه ارومیه، موجب توجه سیاست‌گذاران و تمایل تصمیم‌گیرندگان برای یافتن راه‌حل شده است. از جمله تحقیقات داخلی که در زمینه حوضه آبریز دریاچه ارومیه و نحوه مدیریت سیستم آبی این دریاچه انجام شده است می‌توان به مطالعات ابدی و همکاران [5]، ناصری [6]، [7] حاجیان و همکاران [8]، بنی طالبی و رضایی [9]، دین‌پژوه و همکاران [10]، ناظری تهرودی و همکاران [11] و دارند و مرادی [12] و نظایر آن اشاره نمود.

جباری قره‌باغ و همکاران [13] در مقاله خود با تاکید بر مفهوم امنیت آبی در دو بخش به مطالعه حفظ و احیا این حوضه آبریز اصلی پرداخته است. مفهوم امنیت آبی در این پژوهش، عبارت است از دسترسی پایدار به آب برای انجام فعالیت‌های اقتصادی و مصارف شرب به نحوی که وضعیت معیشتی و رفاه ساکنان ارتقا یافته و اکوسیستم دریاچه ارومیه حفظ و احیا گردد. در بخش اول با تاکید بر معیارهای عمومی هیدرولوژیکی و اقتصادی، طبقه آبی-اقتصادی حوضه برای دوره تاریخی و به تفکیک استان به‌منظور تعیین روند تغییرات وضعیت امنیت آبی حوضه در مقایسه با دیگر نقاط جهان تعیین می‌شود. در بخش دوم، برای ارزیابی دقیق‌تر وضعیت سیستم منابع آب حوضه، امنیت آبی حوضه دریاچه ارومیه باتوجه به تعاریف موجود از امنیت آبی در ادبیات موضوع و چالش آبی خاص حوضه تعریف و یک چارچوب ارزیابی شاخص‌محور به این منظور طراحی می‌گردد.

نتایج تحقیقات صوفی و همکاران [14] با عنوان بررسی ارتباط نوسان‌های تراز آب دریاچه ارومیه با پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی سه عامل اصلی موثر در خشکی دریاچه ارومیه شامل برداشت بیش از حد از منابع تجدیدپذیر حوضه، توسعه نامتوازن بخش کشاورزی در حوضه و تغییرات اقلیمی و استمرار خشک‌سالی‌ها می‌باشد. درواقع این مجموعه عوامل با اثرات تشدیدکنندگی روی یکدیگر، منجر به خشکی دریاچه ارومیه گردیده‌اند. البته عواملی همچون احداث میان‌گذر نیز می‌تواند در تشدید شرایط کنونی دریاچه نقش داشته باشد.

با مرور مطالعات اخیر، چنین به نظر می‌رسد که باتوجه به شرایط و وضعیت موجود دریاچه ارومیه، بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز اصلی نظیر دریاچه ارومیه با رویکرد مدیریت منابع آب، ضروری و مهم است. اولین گام برای آغاز استفاده پایدار، مدل‌بندی کمی وضعیت موجود مصرف و گام بعدی آینده‌نگری بهره‌برداری از منابع آب است. باتوجه به قابلیت و توانمندی روش‌های ریاضی و مدل‌سازی، علوم ریاضی و تصمیم‌گیری به‌عنوان یک ابزار مدیریتی بر اساس نگرش سیستماتیک می‌تواند سبب تسریع پیش‌بینی یادگیری رفتار سیستم‌ها باشد. وابستگی مدیریت منابع آبی با جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی سیستمی را ایجاد می‌کند که رابطه بین کارایی سیستم مدیریت آب و بهبود این سیستم را ایجاد می‌کند و اینکه این عملکرد چگونه می‌تواند منعکس‌کننده اندازه جمعیت و دسترسی‌پذیری برای آب‌های بازیافتی و استفاده مجدد از منابع هدررفت باشد.

برای تحلیل مدیریت سیستم آب، در این پژوهش متکی بر روش‌های ناپارامتری ریاضی از جمله روش تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۱</sup> هستیم. عمده مطالعات که در حوضه منابع آبی انجام شده است مبتنی بر آزمون‌های آماری و رگرسیون است؛ اما مدل‌های *DEA* روشی است غیر پارامتری که کارایی واحد تصمیم‌گیرنده<sup>۲</sup> را در مقایسه با هم ارزیابی می‌کند.

<sup>1</sup> Data Envelopment Analysis (DEA)

<sup>2</sup> Decision Making Unit (DMU)

چارنز و همکاران [15] به معرفی مدل موسوم به  $CCR^1$  با بازده به مقیاس ثابت پرداختند و بنکر و همکاران [16] مدل پیشنهادی را به حالت بازده به مقیاس متغیر توسعه دادند؛ اما امروزه ارزیابی واحدها تنها وابسته به بردارهای ورودی و خروجی نیست بلکه داده‌های میانی نیز در این ارزیابی تاثیر به‌سزایی دارند. در امتداد رشد چشمگیر  $DEA$ ، موضوع سیستم‌های دومرحله‌ای موردتوجه قرار گرفت در توسعه مدل‌های شبکه دومرحله‌ای، چن و همکاران [17]، لیانگ و همکاران [18] فرایند دومرحله‌ای را برای ارزیابی‌های شرکت‌های بیمه و زنجیره‌تامین مورد استفاده قرار دادند. کوک و همکاران [19] بررسی سیستم‌های دومرحله‌ای را در چهار کلاس رده‌بندی کرده و معایب و مزایای هر روش را مورد مقایسه قرار دادند. در زمینه مطالعات مربوط به سیستم مدیریت منابع آب با استفاده از مفهوم  $DEA$  می‌توان به مطالعات اوکیل [20]، والنسیا و همکاران [4]، لیو و همکاران [21]، وانگ و همکاران [22] اشاره کرد.

افشاریان و همکاران [23] در یک مطالعه مروری اهمیت نقش مدل‌های  $DEA$  و ارزش آن را در معیارگذاری جدید برای بررسی ارزیابی و عملکرد ارایه می‌دهد. همچنین این مطالعه، کاوش و اصلاح مداوم مدل‌های  $DEA$  را در چالش‌های بهره‌وری سیستم‌های آب و فاضلاب و تلاش برای تدوین چهارچوب‌های مناسب در تحقیقات آتی را به چالش می‌کشد.

کاسترو-پدرو و همکاران [3] با استفاده از مفاهیم  $DEA$ ، نه شاخص از چهار بعد متفاوت را برای ارزیابی امنیت آبی مورد استفاده قرار داده است. مدل پیشنهادی روی داده‌های ۱۵ کشور اروپایی اعمال شد و کشورهای دانمارک، بریتانیا و فنلاند عملکرد بالایی را از خود نشان دادند.

والنسیا و همکاران [4] با استفاده از مدل دومرحله‌ای  $DEA$ ، به ارزیابی کارایی مدیریت سیستم آب در کشور مکزیک پرداختند. مرحله‌ی اول شامل سیستم مدیریت آب و مرحله دوم بهبود سیستم آب به‌ترتیب با ورودی‌های مرحله اول شامل هزینه کل و تعداد کل پرسنل و خروجی نهایی توسعه شبکه آب، گسترش شبکه آبیاری بارانیو ظرفیت استخراج بهره‌برداری شده در مرحله دوم است. اندازه‌های میانی به‌ترتیب شامل میزان مصرف آب و درآمد کل می‌باشد. با استفاده از مدل‌های متمرکز<sup>۲</sup> کارایی سیستم آب شهر مکزیکوسیتی در سال ۲۰۱۹ ارزیابی شد. نتایج تحقیقات حاکی از عدم وجود رابطه مستقیم بین کارایی مدیریت آب و بهبود سیستم آب است. همچنین رابطه مستقیمی بین اندازه جمعیت و دسترسی به آب در هر منطقه از شهر شناسایی نشد. با نتایج حاصل از این مطالعه، نویسندگان تاکید بر استفاده از تکنولوژی‌های به‌روز برای بهبود سیستم آب کشور مکزیک باتوجه‌به شرایط جمعیتی، اقتصادی و جغرافیایی هر منطقه پیشنهاد دادند.

لوزانو و مارین [24] در مطالعه خود تحت عنوان ارزیابی کارایی سیستم‌های آبی با هدف دستیابی به توسعه پایدار، از مدل‌های شبکه‌ای  $DEA$  استفاده کردند. این مطالعه با داده‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد<sup>۳</sup> ارزیابی مصرف آب را در ۱۲۶ کشور دنیا انجام می‌دهد. در این مطالعه یک سیستم دومرحله‌ای با دو مرحله برداشت آب (به‌عنوان مرحله آغازین) و مرحله بهره‌وری آب (به‌عنوان مرحله دوم) و ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب، نامطلوب، قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل و با رویکرد مدل‌های جهت‌دار شعاعی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. فاضلاب شهری که به‌عنوان خروجی نامطلوب در این سیستم موردنظر است، با شرط دسترسی‌پذیری ضعیف در مدل شبکه موردنظر وارد می‌شود. اندازه‌های میانی که همان خروجی مرحله اول و ورودی مرحله دوم هستند به‌عنوان عامل غیرقابل‌کنترل در مدل وارد شده و هدف‌گذاری برای هر دو مرحله کاهش اندازه‌های میانی است. مدل علاوه‌بر محاسبه کارایی کل، کارایی هر مرحله را با اختصاص وزن‌های هر مرحله محاسبه می‌کند. با استفاده از مدل فوق هم در سطح جهانی و هم در سطح منطقه‌ای، نسبت شکاف فناوری برای هر دسته از کشورها فراهم می‌شود.

پیشینی و همکاران [25] برای ارزیابی کارایی سازمان که مدیریت منابع آبی را بر عهده دارند، ابتدا با روش‌های موجود متغیرها و داده‌های در دسترس را غربالگری کرده و با کاهش تعداد متغیرهای تعریفی، از مدل‌های پایه‌ای  $DEA$  برای ارزیابی استفاده می‌کند. نتایج تحقیق حاکی از آن است که برخی واحدها با ورودی‌های کمتر و خروجی‌های بیشتر، نمره کارایی بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. یافته‌های مساله جهت‌گیری آگاهانه را در راستای مدیریت پایدار منابع آبی و امنیت آبی منابع در حال اتمام بهینه‌سازی می‌کند.

ویلازینهو و همکاران [26] مدلی با رویکرد ادغام ترجیحات تصمیم‌گیرنده در سراسر مراحل ارزیابی، ارایه می‌کند. در مدل پیشنهادی، معیار جدیدی به نام دسترسی به کیفیت خدمات با ترکیب شاخص‌های موردنظر تصمیم‌گیرنده که اولویت‌های تصمیم‌گیرنده را در مدل وارد می‌کند، معرفی شده

<sup>1</sup> Charnes, Cooper and Rhodes (CCR)

<sup>2</sup> Centralized

<sup>3</sup> Food and Agriculture Organization (FAO)

<sup>4</sup> Directional Distance Function (DDF)

است. در گام اول، مدل وزنی پیشنهاد شده اندازه بهبود نظیر هر شاخص را ارزیابی می‌کند. در گام دوم، کارایی هزینه محاسبه شده و در نهایت با اندازه‌های کارایی به دست آمده از هر دو مدل، تنش بین اهداف متضاد در سیستم تامین آب را اندازه‌گیری می‌کند. نتایج حاصل روی شرکت‌های تامین آب و برق در کشور پرتقال نشان می‌دهند که بهره‌وری هزینه و کیفیت خدمات همیشه همسو نیستند. این امر بر نیاز به یک رویکرد تنظیمی متعادل تاکید می‌کند که بهبود کیفیت خدمات را تقویت می‌کند و در عین حال کنترل هزینه را حفظ می‌کند و مدیریت پایدار و موثر این بخش را ارتقا می‌دهد.

پورحبيب يكتا و همكاران [27] با استفاده از داده‌های حلقه‌های چاه‌های حفر شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، روشی برای ارزیابی عملکرد چاه‌های منطقه با رویکرد تلفیقی کارایی ارزش و مدل  $DEA$  ارائه کردند. نویسندگان از روش‌های پسر-پیشرو برای مطالعه سیستم دومرحله‌ای معرفی شده استفاده نمودند.

در این مقاله قصد داریم مطالعه‌ای روی داده‌های در دسترس از چاه‌های حفر شده در منطقه شبستر و حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام دهیم. در این مطالعه سیستم موردنظر یک سیستم دومرحله‌ای با داده‌های نامطلوب است که با روش متمرکز به بررسی کارایی کلی سیستم پرداخته می‌شود. مدل‌های  $DEA$  مبتنی بر اندازه کمکی در این مطالعه موردنظر است. همچنین اولویت‌بندی واحدها با استفاده از مدل‌های ابر کارایی و کارایی متقاطع، گام بعدی در تعیین واحدهایی است که می‌تواند منجر به جهت‌گیری درست برای مدیریت منابع آبی در این حوضه آبریز باشد. با تعیین این اولویت‌بندی، رتبه‌بندی علمی و واقعی ایجاد می‌شود که در فرایند استانداردسازی و درجه‌بندی اصولی منابع در دسترس می‌توان از آن بهره برد. علاوه بر این، با اجرای این مدل می‌توان برای مساله آسیب‌زا و پرمخاطره عناصر نامطلوب در سیستم‌های دومرحله‌ای پاسخی قابل تحلیل ارائه نمود که علاوه بر حفظ و نگهداری منابع فعلی، نه تنها امنیت آبی به مخاطره نیفتد بلکه راهکارهایی جهت افزایش کارایی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی در این حوضه آبریز نیز ارائه شود. ساختار مقاله به شرح زیر است.

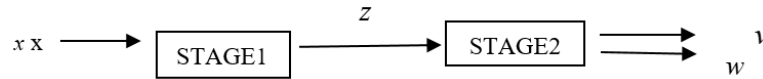
در بخش دوم، به مفاهیم ساختار شبکه دومرحله‌ای و مدل مبتنی بر متغیرهای کمکی می‌پردازیم. سپس مدل ابر کارایی در مدل‌های شبکه دومرحله‌ای با داده‌های نامطلوب پیشنهاد می‌شود. در خاتمه مدل ارائه شده بر روی بیست و چهار حلقه چاه حفر شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و در منطقه شبستر پیاده‌سازی و نتایج تحلیل می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

در این بخش، مفاهیم اولیه کارایی مبتنی بر متغیرهای کمکی و سیستم دومرحله‌ای با داده‌های نامطلوب به صورت مختصر ارائه می‌شود.

### ۲-۱- سیستم دومرحله‌ای

$DEA$  رویکردی است برای اندازه‌گیری کارایی نسبی  $DMUs$  همگن که دارای چندین ورودی و خروجی می‌باشند. در این جا هر  $DMU$  بیانگر فرایند دومرحله‌ای است. مرحله اول ورودی‌ها را برای تولید خروجی‌هایی که به عنوان ورودی مرحله دوم مصرف می‌شوند، استفاده می‌کند. از این رو خروجی‌های مرحله اول، مقادیر میانی نامیده می‌شوند. سپس مرحله دوم این مقادیر میانی را برای تولید خروجی‌های مطلوب و نامطلوب استفاده می‌کند مرحله دوم در این سیستم تنها با استفاده از مقادیر میانی که عبارت است از خروجی‌های مطلوب مرحله اول، تغذیه می‌شوند. فرض کنید  $K$ ،  $DMU$  وجود دارد و در مرحله اول، بردارهای ورودی و خروجی مطلوب برای واحد تحت ارزیابی  $k (k=1, \dots, K)$  به ترتیب به صورت بردارهای غیر صفر و نامنفی  $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{N_k}) \geq 0, z = (z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{M_k}) \geq 0$  نمایش داده می‌شود. در مرحله دوم، بردار ورودی  $z = (z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{M_k}) \geq 0$  برای تولید خروجی مطلوب و نامطلوب نهایی  $v = (v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{S_k}) \geq 0, w = (w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{J_k})$  استفاده می‌شود. شکل ۱، ساختار سیستم دومرحله‌ای موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار سیستم دومرحله‌ای در حالت کلی.

Figure 1- General structure of a two-stage system.

مدل متمرکز مبتنی بر متغیرهای کمکی برای سیستم‌های تعریف شده در شکل ۱ با در نظر گرفتن رفتار خروجی نامطلوب همانند ورودی (کاهش خروجی نامطلوب مورد نظر است) به صورت زیر خواهد بود [28].

$$\rho_o^{overall} = \text{Min} \frac{1 - \frac{1}{N+M+J} \left( \sum_{n=1}^N \frac{d_n^- + \varepsilon s_n^-}{x_{no}} + \sum_{j=1}^J \frac{d_j^- + \varepsilon s_j^-}{w_{jo}} + \sum_{m=1}^M \frac{d_m^- + \varepsilon s_m^-}{z_{mo}} \right)}{1 + \frac{1}{S+M} \left( \sum_{m=1}^M \frac{d_m^- + \varepsilon s_m^-}{z_{mo}} + \sum_{r=1}^S \frac{d_r^+ + \varepsilon s_r^+}{v_{ro}} \right)},$$

*s.t.*

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{nk} + s_n^- + d_n^- &= x_{no}, \quad n=1, \dots, N, \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k z_{mk} - s_m^- - d_m^- &= z_{mo}, \quad m=1, \dots, M, \\ \sum_{k=1}^K \mu_k z_{mk} + s_m^- + d_m^- &= z_{mo}, \quad m=1, \dots, M, \\ \sum_{k=1}^K \mu_k v_{rk} - d_r^+ - s_r^+ &= v_{ro}, \quad r=1, \dots, S, \\ \sum_{k=1}^K \mu_k w_{jk} + s_j^- + d_j^- &= w_{jo}, \quad j=1, \dots, J, \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k &= 1, \\ \sum_{k=1}^K \mu_k &= 1, \\ \lambda_k, \mu_k, s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^-, d_r^+, d_n^-, d_j^-, d_m^- &\geq 0 \quad \forall k, n, r, j, m. \end{aligned} \quad (1)$$

در مدل (۱)، متغیرهای  $\lambda_k$  و  $\mu_k$  به ترتیب متغیرهای مربوط به مرحله اول و مرحله دوم ارزیابی می‌باشد. متغیرهای نامنفی  $d_n^-, d_j^-, d_m^-, d_r^+$  متغیرهای کمکی مربوط به مازاد ورودی و خروجی نامطلوب و کمبود خروجی مطلوب است. اندازه‌های میانی به عنوان خروجی مرحله اول و بدون تغییر به عنوان ورودی مرحله دوم در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه مدل مبتنی بر متغیرهای کمکی در این ارزیابی متمرکز است، اندازه‌های میانی بدون تغییر باقی می‌ماند و همان‌طور که محدودیت دوم و سوم در مدل (۱) اشاره می‌کند در مرحله اول با متغیر  $\lambda_k$  و در محدودیت سوم با متغیر  $\mu_k$  در مدل وارد می‌شود. همان‌طور که محدودیت پنجم در مدل (۱) اشاره دارد با خروجی نهایی نامطلوب همانند ورودی رفتار می‌شود. متغیرهای کمکی  $s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^-, d_r^+, d_n^-, d_j^-, d_m^-$  نقش مشابه با متغیرهای نامنفی  $d_n^-, d_j^-, d_m^-, d_r^+$  را بازی می‌کند عدد غیر ارشمیدسی  $\varepsilon$  با انتخاب مقادیر مثبت و به اندازه کافی کوچک، تاثیر متغیرهای کمکی  $s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^-, d_r^+, d_n^-, d_j^-, d_m^-$  را به ازای هر  $DMU$  بی‌اثر می‌کند به عبارت دیگر مقادیر متغیرهای کمکی  $s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^-, d_r^+, d_n^-, d_j^-, d_m^-$  به ازای هر واحد برابر صفر است. تعریف متغیرهای نامنفی  $s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^-, d_r^+, d_n^-, d_j^-, d_m^-$  در مدل (۱) نشان می‌دهد که تصویر تعریف شده همواره کارای قوی است. در ارزیابی با مدل (۱) واحدهایی در حالت کلی کارا هستند که  $\rho_o^* = 1$ . مدل (۱) در ارزیابی سیستم‌های دومرحله‌ای، کارایی کلی سیستم را نشان می‌دهد. برای رتبه‌بندی واحدهای کارای کل، از ایده مدل‌های ابرکارایی استفاده می‌شود. در این مدل‌ها واحد تحت ارزیابی از مجموعه امکان تولید حذف شده و سپس مدل با حذف واحد، ارزیابی می‌شود. مدل ابر کارایی مبتنی بر متغیرهای کمکی در مدل (۲) ارائه می‌شود.

$$\varphi_o = \text{Min} \frac{1 + \frac{1}{N+M+J} \left( \sum_{n=1}^N \frac{e_n^- - \varepsilon s_n^-}{x_{no}} + \sum_{j=1}^J \frac{e_j^- - \varepsilon s_j^-}{w_{jo}} + \sum_{m=1}^M \frac{e_m^- + \varepsilon s_m^-}{z_{mo}} \right)}{1 - \frac{1}{S+M} \left( \sum_{m=1}^M \frac{e_m^- - \varepsilon s_m^-}{z_{mo}} + \sum_{r=1}^S \frac{e_r^+ - \varepsilon s_r^+}{v_{ro}} \right)},$$

*s.t.*

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \lambda_k x_{nk} + s_n^- - e_n^- = x_{no}, \quad n = 1, \dots, N,$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \lambda_k z_{mk} - s_m^- + e_m^+ = z_{mo}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \mu_k z_{mk} + s_m^- - e_m^+ = z_{mo}, \quad m = 1, \dots, M,$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \mu_k v_{rk} + e_r^+ - s_r^+ = v_{ro}, \quad r = 1, \dots, S,$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \mu_k w_{jk} + s_j^- - e_j^- = w_{jo}, \quad j = 1, \dots, J, \tag{۲}$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \lambda_k = 1,$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq o}}^K \mu_k = 1,$$

$$e_r^+ \leq v_{ro}, \quad e_m^+ \leq z_{mo},$$

$$-M\sigma \leq e_n^- \leq M(1-\sigma),$$

$$-M\sigma \leq e_m^+ \leq M(1-\sigma),$$

$$-M\sigma \leq e_r^+ \leq M(1-\sigma),$$

$$-M\sigma \leq e_j^- \leq M(1-\sigma),$$

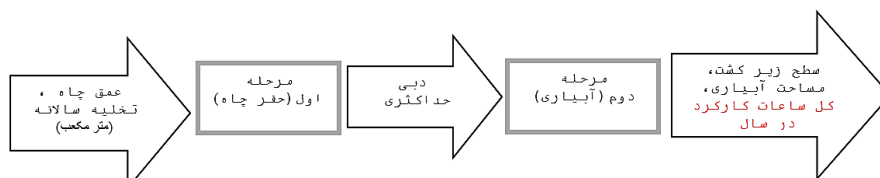
$$\lambda_k, \mu_k, s_r^+, s_n^-, s_j^-, s_m^- \geq 0 \quad \forall k, n, r, j, m,$$

$$\sigma \in \{0, 1\}.$$

در مدل (۲)،  $M$  عدد بسیار بزرگ مثبت و تمام متغیرها به جز  $e_n^-, e_m^+, e_r^+, e_j^-$  و  $e_r^+, e_m^+, e_n^-, e_j^-$  همگی نامنفی هستند. معرفی متغیر دودویی  $\sigma \in \{0, 1\}$ ، علایم متغیرهای آزاد در علامت  $e_n^-, e_m^+, e_r^+, e_j^-$  را کنترل می کند. اگر  $\sigma = 0$ ، متغیرهای  $e_n^-, e_m^+, e_r^+, e_j^-$  مقادیر نامنفی را اختیار می کند و اگر  $\sigma = 1$  متغیرهای آزاد در علامت  $e_n^-, e_m^+, e_r^+, e_j^-$  مقادیر نامثبت را اختیار می کند. در بررسی با مدل ابرکاری فوق، اگر  $\varphi_o^* > 1$ ، واحد تحت ارزیابی کارای راسی است. اگر  $\varphi_o^* < 1$  واحد تحت ارزیابی ناکاراست و اگر  $\varphi_o^* = 1$  واحد تحت ارزیابی کارای غیرراسی است. نقطه قوت مدل فوق این است که مشکلاتی عمده روش ابرکاری از جمله نشدنی بودن و بی کرانی را ندارد. البته مدل (۲) مدل غیرخطی است اما با تبدیلات چارن-کوپر [29] تبدیل به مدل خطی شود.

### ۳- یافته ها

مدل های پیشنهادی روی اطلاعات حاصل از چاه های با مصارف عمدتاً کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه که در منطقه شبستر حفز شده است، پیاده سازی می شود. در مرحله اول اطلاعات ورودی عبارت اند از عمق چاه حفز شده و تخلیه سالانه برحسب مترمکعب. خروجی مرحله اول شامل دبی حداکثری "برحسب لیتر بر ثانیه" است. در مرحله دوم با اطلاعات شامل خروجی های مرحله اول، سطح زیر کشت و مساحت آبیاری به عنوان نتیجه نهایی مطلوب و کل ساعات کارکرد در سال به عنوان خروجی نامطلوب ثبت می شود. باتوجه به اینکه در منطقه شبستر، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، بیشتر از دویست و پنجاه حلقه چاه شناسایی شده است؛ اما برخی از این چاه ها متروک شده اند و از گرده فعالیت خارج شده اند. در حال حاضر، هشتاد و دو حلقه چاه در این منطقه و روستاهای اطراف جهت انجام امورات کشاورزی و تامین آب شرب روستایی و شهری به صورت فعال شناسایی شده اند. از بین داده های در دسترس، بیست و چهار حلقه چاه شناسایی شده و اطلاعات ورودی و خروجی در شکل ۲ و جدول ۱ خلاصه شده است. شکل ۲، سیستم دومرحله ای مربوط به فعالیت حفر چاه را نشان می دهد.



شکل ۲- سیستم دومرحله‌ای حفر و آبیاری با چاه.

Figure 2- Two-stage system of drilling and irrigation with a well.

جدول ۱ خلاصه اطلاعات آماری مربوط به بیست و چهار حلقه چاه حفر شده در این حوضه آبریز را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه اطلاعات آماری مربوط به چاه‌های حفر شده در منطقه شبستر.

Table 1- Summary of statistical information related to wells drilled in the Shabestar region.

| ورودی مرحله اول<br>(تخلیه سالانه<br>(مترمکعب)) | ورودی مرحله اول<br>(عمق چاه) | اندازه میانی (دبی)<br>حداکثری) بر حسب<br>لیتر بر ثانیه | خروجی مطلوب اول<br>(سطح زیر کشت) | خروجی مطلوب دوم<br>(مساحت تحت آبیاری) | خروجی نامطلوب مرحله دوم<br>(کل ساعات کارکرد در سال) |
|------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| میانگین                                        | 142.083                      | 13.75                                                  | 20.87                            | 10.22                                 | 2800.33                                             |
| واریانس                                        | 1503.5                       | 24.9                                                   | 147.08                           | 76.63                                 | 1825977.71                                          |
| میان                                           | 150                          | 13                                                     | 23                               | 11                                    | 2506.5                                              |

با به کارگیری مدل (۱) و مدل (۲) روی داده‌های جدول ۱، کارایی کل سیستم دومرحله‌ای در شکل ۲ و امتیاز رتبه‌بندی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از کارایی کل مبتنی بر متغیرهای کمکی و رتبه‌بندی آن.

Table 2- Results of total efficiency based on auxiliary variables and its ranking.

| اندازه کارایی مرحله دوم | اندازه کارایی مرحله اول | نوع واحدها     | امتیاز رتبه‌بندی با مدل (۲) | اندازه کارایی کل با مدل (۱) | واحدها |
|-------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| 0.69                    | 1                       | ناکارا         | 0.73                        | 1                           | 1      |
| 1                       | 0.43                    | ناکارا         | 0.64                        | 0.75                        | 2      |
| 1                       | 0.56                    | ناکارا         | 0.61                        | 0.79                        | 3      |
| 1                       | 1                       | ناکارا         | -1.00E+10                   | 1                           | 4      |
| 1                       | 0.87                    | کارای راسی     | 1.28                        | 0.95                        | 5      |
| 0.59                    | 0.85                    | ناکارا         | 0.55                        | 0.93                        | 6      |
| 0.59                    | 0.54                    | ناکارا         | 0.08                        | 0.77                        | 7      |
| 1                       | 1                       | کارای راسی     | 1.06                        | 1                           | 8      |
| 0.61                    | 0.89                    | کارای راسی     | 1.5                         | 0.95                        | 9      |
| 0.62                    | 0.73                    | ناکارا         | 0.45                        | 0.87                        | 10     |
| 0.69                    | 0.82                    | ناکارا         | 0.71                        | 0.91                        | 11     |
| 0.55                    | 0.68                    | ناکارا         | 0.34                        | 0.84                        | 12     |
| 0.85                    | 0.69                    | ناکارا         | 0.45                        | 0.87                        | 13     |
| 0.8                     | 0.62                    | ناکارا         | 0.62                        | 0.82                        | 14     |
| 0.78                    | 1                       | کارای راسی     | 3.07                        | 1                           | 15     |
| 0.85                    | 0.79                    | ناکارا         | 0.68                        | 0.89                        | 16     |
| 1                       | 0.73                    | ناکارا         | 0                           | 0.87                        | 17     |
| 0.75                    | 0.68                    | ناکارا         | 0.28                        | 0.84                        | 18     |
| 0.83                    | 0.58                    | ناکارا         | 0.24                        | 0.79                        | 19     |
| 0.86                    | 0.51                    | کارای غیر راسی | 1                           | 0.75                        | 20     |
| 1                       | 0.61                    | کارای راسی     | 1.01                        | 0.8                         | 21     |

جدول ۲- ادامه.  
Table 2- Continued.

| اندازه کارایی<br>مرحله دوم | اندازه کارایی<br>مرحله اول | نوع واحدها | امتیاز رتبه‌بندی<br>با مدل (۲) | اندازه کارایی کل<br>با مدل (۱) | واحدها |
|----------------------------|----------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|
| 0.75                       | 0.82                       | ناکارا     | 0                              | 0.91                           | 22     |
| 1                          | 0.4                        | کارای راسی | 1.32                           | 0.7                            | 23     |
| 1                          | 1                          | ناکارا     | 0                              | 1                              | 24     |
| 0.026                      | 0.035                      |            |                                | 0.008                          | Ave    |
| 0.825                      | 0.741                      |            |                                | 0.875                          | Var    |

باملاحظه جدول ۲، واحدهای ۴، ۸، ۱۵، ۲۴ و یک واحدهای کارای کل با مدل (۱) شناسایی می‌شوند. اما مدل ابرکارایی یا مدل (۲) در رتبه‌بندی، تنها واحدهای ۵ و ۸ را کارای کلی شناسایی شده بودند به‌عنوان واحدهای کارای راسی شناسایی می‌کند. با مدل رتبه‌بندی (۲) واحدهای ۵، ۹ و ۲۳ نیز به‌عنوان واحدهای کارای راسی شناسایی می‌شوند درحالی‌که این واحدها در ارزیابی با مدل متغیرهای کمکی در حالت کلی کارا محسوب نمی‌شود. در دو واحد ۵ و ۹ امتیاز کارایی نزدیک به ۱ است اما عدد ۱ نیست. در صورتی‌که مدل (۲) این واحد را به‌عنوان کارای راسی اعلام می‌کند. تنها یک واحد کارای غیرراسی در جدول ۲ گزارش شده است که واحد بیستم است. این نتایج می‌توانند به‌عنوان نتایج برای تعیین واحدهای ارجح‌تر و استفاده در مدل‌هایی که تصمیم‌گیرندگان علاقه‌مند به تعیین واحدهای ارجح دارند، می‌تواند راهگشا باشد. کارایی مرحله اول و کارایی مرحله دوم به تفکیک در دو ستون آخر جدول ۳ آورده شده است. در مرحله اول، ۱، ۴، ۸، ۱۵ و ۲۴ واحدهای کارا هستند. در مرحله دوم واحدهای ۲، ۳، ۴، ۵، ۸، ۱۷، ۲۳ و ۲۴ کارا هستند. واحد هشتم که هم در حالت کلی و هم در هر دو مرحله کارا هست و در مدل (۲) هم به‌عنوان کارای راسی معرفی شده است، دارای عمق متر ۱۱۰ و میزان تخلیه سالانه  $53737/2$  مترمکعب و دبی حداکثری ۱۱ می‌باشد. سطح زیر کشت و مساحت آبیاری این چاه به ترتیب ده مترمربع و سه مترمربع می‌باشد. کل کارکرد ساعت دینام این چاه در سال نیز ۱۳۵۷ ساعت می‌باشد. این چاه برای مزرعه‌ای که کشت غالب آن گندم است حفر شده است و از سال ۱۳۸۱ در حال بهره‌برداری است. میانگین کارایی کل در مقایسه با کارایی مرحله اول و دوم، کمترین مقدار و واریانس آن بیشترین مقدار ممکن گزارش شده است. در مقایسه با سایر چاه‌هایی که در این حوضه آبریز حفر شده و عمدتاً برای مصارفی به‌جز کشت گندم به‌کار می‌رود، به‌نظر می‌رسد تعدد چاه‌ها در این منطقه و نیز عدم مدیریت اصولی و صحیح یکی از عوامل تاثیرگذار بر خشکی دریاچه ارومیه است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با روش‌های غیرپارامتری شامل مدل‌های متمرکز شبکه‌ای *DEA* به بررسی کارایی و عملکرد بیست‌وچهار حلقه چاه حفر شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و در منطقه شبستر پرداخته شده است. باتوجه به بررسی‌های به عمل آمده ۸۴ حلقه چاه فعال با زمینه مصرفی عمدتاً کشاورزی در منطقه شبستر شناسایی و اطلاعات موردنیاز اخذ شد. از بین این ۸۴ حلقه چاه، ۲۴ حلقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، حفر چاه به‌صورت سیستم دومرحله‌ای در نظر گرفته شده است که ورودی مرحله اول شامل عمق چاه حفر شده و تخلیه سالانه چاه موردنظر است. اندازه میانی، دبی حداکثری چاه برحسب لیتر بر ثانیه است. خروجی مطلوب نهایی نیز مساحت زیر کشت و سطح آبیاری و خروجی نامطلوب نهایی، کل ساعات کارکرد در سال، در نظر گرفته شده است. برای تحلیل کارایی شبکه دومرحله‌ای در این مطالعه از روش متمرکز برای بررسی سیستم‌های دومرحله‌ای استفاده شده است. باتوجه به اینکه ارزیابی متمرکز است، در مرحله اول ارزیابی، افزایش اندازه میانی به‌عنوان خروجی و کاهش آن به‌عنوان تنها ورودی مرحله دوم در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم ارزیابی، افزایش خروجی‌های مطلوب نظیر سطح زیر کشت و مساحت تحت آبیاری با کاهش ساعات کارکرد در سال است. ارزیابی مبتنی بر متغیرهای کمکی در مرحله اول، پنج واحد کارا را شناسایی می‌کند. درحالی‌که در مرحله دوم ارزیابی مبتنی بر متغیرهای کمکی، نه واحد کارا ارزیابی شده است. واحدهایی که در حالت کلی کارا هستند شامل پنج واحد ۴، ۸، ۱۵، ۲۴ و ۱ می‌باشد. رتبه‌بندی واحدها با استفاده از مدل بهبودیافته مبتنی بر متغیرهای کمکی که مشکل مدل‌های ابرکارایی نظیر نشدنی بودن و نامحدود بودن را ندارد، نشان می‌دهد واحد هشتم با عمق چاه ۱۱۰ متر و دبی حداکثری ۱۱ به‌عنوان واحد کارای راسی شناخته شده و می‌تواند به‌عنوان معیار ارجح در نظر گرفته شود. ضمن اینکه سطح زیر کشت و مساحت آبیاری این چاه در مرحله دوم به ترتیب ۱۰ و ۳ مترمربع است. در این ارزیابی واحد ۲۰ واحد کارای غیرراسی شناسایی شده است و به‌جز شش واحد کارای راسی، بقیه واحدها ناکارا قلمداد می‌شوند. واحد کارای غیر راسی، واحد ۲۰، دارای عمق چاه ۱۸۵ "چاه عمیق" و دبی حداکثری ۱۱ به‌عنوان واحد کارای غیرراسی شناسایی شده است. سطح زیر کشت و

مساحت تحت آبیاری با این چاه با کل ساعات کارکرد ۲۳۱۰ ساعت تنها ۱۶ مترمربع سطح زیر کشت و تنها برای محصول گندم دارد. از این‌رو در این مطالعه به‌عنوان واحد کارای غیررأسی شناسایی شده است. باتوجه‌به اینکه مطالعات صورت‌گرفته از منظر بررسی ریاضی در این حوضه آبریز اندک است، به نظر می‌رسد مطالعاتی از این‌دست چه از منظرهای فنی-مدیریتی، صنعت-خدمات، هم‌به‌منظور کاهش مصرف آب و جلوگیری از تداوم خشک‌سالی دریاچه ارومیه، مهم و ضروری به نظر می‌رسد. با دخالت معیارهای دیگری نیز در این ارزیابی می‌توان با آرایه تحلیل‌های مناسب اقتصادی، راه‌حل قابل قبول و مشترکی برای تمام ذی‌نفعان آرایه کرد.

## منابع

- [1] Salavitarab, A., Zarghami, M., & Abrishamchi, A. (2006). System dynamics model in Tehran urban water management. *Water and wastewater journal*, 59, 12-27. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/377723>
- [2] Safaei, A., & Malek Mohammadi, B. (2014). Game theory guidelines for sustainable governance of shared water resources (Case study: Lake Urmia Water Conflict). *Environmental quarterly*, 40(1), 121-138. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1578307>
- [3] de Castro-Pardo, M., Martinez, P. F., & Zabaleta, A. P. (2022). An initial assessment of water security in Europe using a DEA approach. *Sustainable technology and entrepreneurship*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100002>
- [4] Morán-Valencia, M., Flegl, M., & Güemes-Castorena, D. (2023). A state-level analysis of the water system management efficiency in Mexico: Two-stage DEA approach. *Water resources and industry*, 29, 100200. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100200>
- [5] Abdi, B., Jalali, M., & Mousavi, S. B. (2018). Analysis of the behavior path of water resources conservation in the agricultural sector and the restoration of Lake Urmia: A case study of farmers in the southern basin of Lake Urmia. *Iranian agricultural extension and education sciences journal*, 13(2), 251-268. (In Persian). [https://www.iaeej.ir/article\\_59611.html?lang=fa](https://www.iaeej.ir/article_59611.html?lang=fa)
- [6] Naseri, A. (2020). Future study of wheat water requirement with time series patterns in the east of Lake Urmia. *Iranian irrigation and drainage journal*, 14(4), 1211-1226. (In Persian).
- [7] Naseri, A. (2022). Evaluation of several gene expression models and time series for setting a groundwater level adjustment scenario for the Shabestar Plain (margin of Lake Urmia). *Irrigation and drainage of iran*, 17(2), 321-335. (In Persian).
- [8] Hajian, R., Jalali, M. R., & Mastouri, R. (2022). Evaluating the performance of advanced machine learning models in predicting the Urmia Lake Water Level. *Publication of iranian water resources research*, 19(2), 39-53. (In Persian). <https://dor.isc.ac.ir/dor/20.1001.1.17352347.1402.19.2.3.0>
- [9] Banitalebi Dehkordi, M., & Rezaei, H. (2019). Evaluation of renewable water in the Urmia Lake Basin using the GLEAM model. *Iranian water resources research quarterly*, 15(3), 144-154. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1605444>
- [10] Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh Asl, S., & Mosavi Jahani, L. (2023). Evaluation of the efficiency of three empirical models in estimating potential evapotranspiration (Case study: Lake Urmia basin). *Knowledge of water and soil*, 33(3), 21-32. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/ws.2021.46416.2419>
- [11] Nazeri Tahrudi, M., Ramezani, Y., Mielke, C. De, & Mir Abbasi Najafabadi, R. (2020). Investigating changes in water resource scarcity signals in the Lake Urmia basin. *Iranian irrigation and drainage journal*, 14(3), 918-929. (In Persian).
- [12] Darand, M., & Moradi, M. (2021). Analysis of surface urban heat island in Urmia and Tabriz cities and the relationship with water extent variation of Urmia Lake. *Journal of physical geography research*, 53(3), 415-430. (In Persian). <https://sid.ir/paper/1061743/fa>
- [13] Jabbari Qarabagh, S., Rezaei, H., & Bagheri, A. (2021). Application of an indicator-based approach in assessing water security in the Urmia Lake Basin. *Iran's water resources research*, 100-113. (In Persian). <https://manuscript.isc.ac.ir/Inventory/8/1244890.htm>
- [14] Sofi, M., Alijani, B., Borna, R., & Asadi, F. (2020). Hydroclimatic modeling of Lake Urmia level fluctuations. *Iranian water resources research journal*, (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/2146614>
- [15] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [16] Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- [17] Chen, Y., Liang, L., & Yang, F. (2006). A DEA game model approach to supply chain efficiency. *Annals of operations research*, 145(1), 5-13. <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0022-y%0A%0A>
- [18] Liang, L., Cook, W. D., & Zhu, J. (2008). DEA models for two-stage processes: Game approach and efficiency decomposition. *Naval research logistics (NRL)*, 55(7), 643-653. <https://doi.org/10.1002/nav.20308>
- [19] Cook, W. D., Zhu, J., Bi, G., & Yang, F. (2010). Network DEA: Additive efficiency decomposition. *European journal of operational research*, 207(2), 1122-1129. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.05.006>
- [20] Oukil, A., Soltani, A. A., Zeroual, S., Boutaghane, H., Abdalla, O., Bermad, A., ... , & Boulassel, M. R. (2022). A DEA cross-efficiency inclusive methodology for assessing water quality: A Composite Water Quality Index. *Journal of hydrology*, 612, 128123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128123>
- [21] Liu, Y., Alnafra, I., & Zhou, Y. (2024). A systemic efficiency measurement of resource management and sustainable practices: A network bias-corrected DEA assessment of OECD countries. *Resources policy*, 90, 104771. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104771>
- [22] Wang, M., Huang, Y., & Li, D. (2021). Assessing the performance of industrial water resource utilization systems in China based on a two-stage DEA approach with game cross efficiency. *Journal of cleaner production*, 312, 127722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127722>
- [23] Afsharian, M., Ahn, H., Kamali, S., & Vilela, B. (2025). DEA-based benchmarking of water and wastewater Utilities: A comprehensive literature review. *Utilities policy*, 97, 102024. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.102024>

- [24] Lozano, S., & Borrego-Marin, M. M. (2024). A metafrontier network DEA approach for water usage efficiency assessment in the light of SDG target 6.4. *Environmental science & policy*, 160, 103857. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103857>
- [25] Pishini, K., Abdolazimi, O., Shishebori, D., Rezaee, M. J., & Sepehrifar, M. (2025). Evaluating efficiency in water and sewerage services: An integrated DEA approach with DOE and PCA. *Science of the total environment*, 959, 178288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178288>
- [26] Vilarinho, H., Pereira, M. A., D'Inverno, G., & Camanho, A. S. (2025). A composite indicator framework integrating regulator perspectives for assessing water service quality. *Omega*, 103435. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2025.103435>
- [27] Pourhabib Yekta, A., Maqbouli, M., Zarieh Habib, M., & Fatehi Nobarian, B. (2023). Evaluating the performance of a water management system with data coverage analysis and value performance. *The first national conference on new ideas and solutions in the sustainable development of the lake urmia watershed*. Tabriz, Iran. Civilica. (In Persian). <https://civilica.com/doc/2093423>
- [28] Liu, P., & Xu, H. (2023). Integrated one-stage models considering undesirable outputs and weighting preference in slacks-based measure of efficiency and superefficiency. *Journal of the operational research society*, 74(6), 1587–1599. <https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2100723>
- [29] Charnes, A., & Cooper, W. W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval research logistics quarterly*, 9(3–4), 181–186. <https://doi.org/10.1002/nav.3800090303>