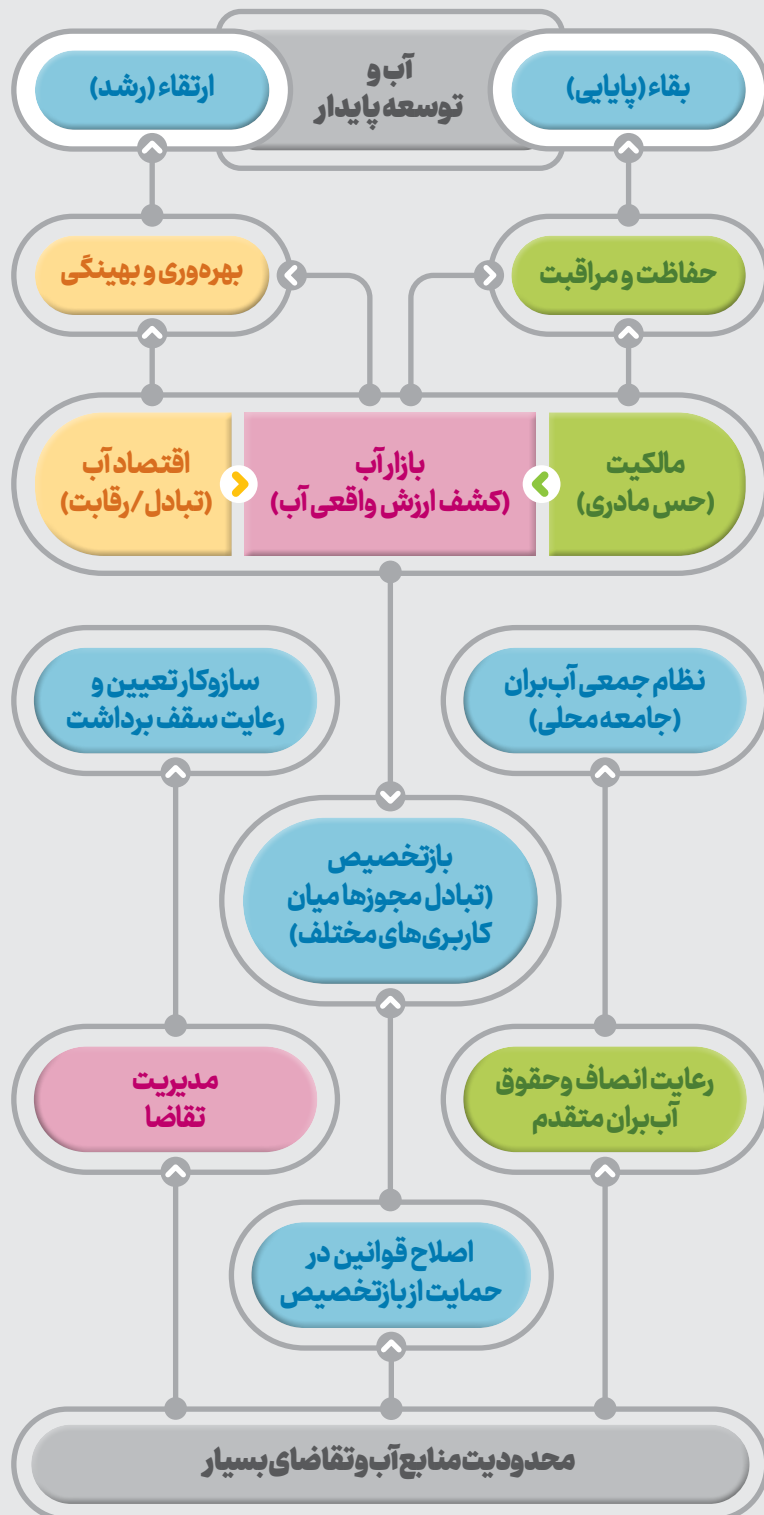


سال یازدهم. شماره ۲ (پیاپی ۳۲). شهریور ۱۴۰۳



فهرست مقالات

- واكاوٰى نشانگرهاى ظرفيت سازگارى واحدهاى بهره‌بردارى كشاورزى در شرايط ناامنى آبى در استان همدان مهسا معتقد، شهلا چوبچيان
- مقياس كاهى آمارى مدل‌هاى گردش كلّى (GCMs)؛ تاريخچه، اصول و روش‌ها دينا يزدانى، آذر زرّين، عباسعلى داداشى رودبارى
- امكان سنجى استحصال آب از مه در منطقه آبى بيگلو، اردبيل امين كانونى، محمدرضا كهن
- مرورى بر كاربرد علم داده و يادگيرى ماشين در مديريت آب كشاورزى رضا دلباز، حامد ابراهيميان
- تجربه طراحي وساخت سامانه آبگير شناور در سد دوستى اكبر شهابى، محمود نادريان، محسن مغربى، رضا قاسمى
- تحليلى بر مديريت دفع سپتاز در مشهد و ارائه راه حل عملى مناسب رضوان سلاجقه، مهدى راى نائى، كاظم اسماعيلى
- بررسى آلودگى‌هاى تهديد كننده شبكه توزيع آب شرب (مطالعه موردى: شهرستان آستارا) محمد گلشن
- بررسى عملكرد پيل سوختى ميكروبي در تصفيه فاضلاب حاوى رنگ آرزو با استفاده از متاآناليز سينا يارسابان، شبنم صدرى مقدم



آب و توسعه پایدار

سال یازدهم- شماره دوم (پیاپی ۳۲)- شهریور ۱۴۰۳

این نشریه طبق نامه شماره ۳/۱۸/۱۲۶۶۳۱ مورخ ۱۳۹۴/۰۶/۲۹ از کمیسیون بررسی نشریات علمی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، اعتبار علمی دریافت نموده است. همچنین در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۰۵ موفق به دریافت پروانه انتشار نشریه از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی به شماره ثبت ۷۶۷۶۶ شده است. این نشریه حاصل فعالیت علمی مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن هیدرولیک ایران است.

دانشگاه فردوسی مشهد

ناصر شاهنوشی فروشانی / استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
کامران داوری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

صاحب امتیاز

مدیر مسئول

سردبیر

اعضای هیئت تحریریه

کاظم اسماعیلی / دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
حسین انصاری / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
علی باقری / دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس
محمد جلیلی / دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
حسین علی دادی / استاد گروه مهندسی بهداشت محیط و حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی مشهد
سعید مرید / استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس
حمیدرضا ناصری / استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی

شورای سیاست‌گذاری

مجید قنادی (ریاست شورا) / مدیر کل مرکز تحقیقات، توسعه فناوری و ارتباط با صنعت شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
حسین اسماعیلیان / مدیر عامل و رئیس هیأت مدیره شرکت آب و فاضلاب مشهد
محمدعلی نعمت‌نژاد / مدیر عامل شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
سیدیحیی موسوی / دبیر اندیشگاه آب شرکت مدیریت منابع آب ایران
ناصر شاهنوشی فروشانی / مدیر مسئول نشریه
کامران داوری / سردبیر نشریه

مشاوران هیئت تحریریه

انوش نوری اسفندیاری / اندیشکده تدبیر آب ایران
سید حسین سجادی‌فر / شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
غلامرضا کلائی / شرکت آب و فاضلاب مشهد
فریبا قنبری / شرکت آب و فاضلاب مشهد
سیدحمید میرقاسمی / شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی
رضا براتی / شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

کارشناس اجرایی

ویراستاری

صفحه آرایی / طراحی

ترتیب انتشار / ناشر

شماره شاپاچاپی / الکترونیکی

تارنما / رایانامه

آدرس

حامی مالی

پایگاه‌های نمایه شده

مهری شاهی، فاطمه طالبی حسین‌آباد
مرجان قوچانیان، مهری شاهی، فاطمه طالبی حسین‌آباد (فنی و ادبی) / مائده اسکوهی (لاتین)
فاطمه طالبی حسین‌آباد / محمدرضا شیخی
فصلنامه / انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

۲۷۱۷-۳۳۲۱ / ۲۴۲۳-۵۴۷۴

<https://jwsd.um.ac.ir/> / Email: jwsd@um.ac.ir

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دفتر نشریه، کد پستی ۹۱۷۷۵۱۱۶۳

شرکت آب و فاضلاب مشهد

پایگاه استنادی علوم ایران (ISC)، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات

نشریات کشور (Magiran)، google scholar، DOAJ، CABI، Agris



۱	سرمقاله: بازار آب و حکمرانی / انوش نوری اسفندیاری
۱	واکاوای نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی در استان همدان مهسا معتقد؛ شهلا چوپچیان
۱۵	مقیاس‌کاهی آماری مدل‌های گردش کلی (GCMs)؛ تاریخچه، اصول و روش‌ها دینا یزدانی؛ آذر زرین؛ عباسعلی داداشی رودباری
۲۷	امکان‌سنجی استحصال آب از مه در منطقه آبی‌بیگلو، اردبیل امین کانونی؛ محمدرضا کهن
۳۹	مروری بر کاربرد علم داده و یادگیری ماشین در مدیریت آب کشاورزی رضا دلباز؛ حامد ابراهیمیان
۵۷	تجربه طراحی و ساخت سامانه آبگیر شناور در سد دوستی اکبر شهابی؛ محمود نادریان؛ محسن مغربی؛ رضا قاسمی
۶۵	تحلیلی بر مدیریت دفع سیتاژ در مشهد و ارائه راه حل عملی مناسب رضوان سلاجقه؛ مهدی راعی نائی؛ کاظم اسماعیلی
۷۷	بررسی آلودگی‌های تهدیدکننده شبکه توزیع آب شرب (مطالعه موردی: شهرستان آستارا) محمد گلشن
۸۷	بررسی عملکرد پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب حاوی رنگ آزو با استفاده از متآنالیز سینا پارسایان؛ شبنم صدری مقدم
۱۰۲	یادداشت تحلیلی: آب برای صلح مائده اسکوهی، کاظم اسماعیلی
۱۰۶	مدیریت تقاضای آب: مفاهیم، سیاست‌های اجرایی و چارچوب پیاده‌سازی پروین مرادی اندرزی، فریبا قنبری
۱۱۶	یادداشت تحلیلی: سیر تکوین نهاد بازار آب محمد ارشدی
۱۱۸	یادداشت تحلیلی: اجرای آزمایشی بازار آب در محدوده مطالعاتی خواف استان خراسان رضوی حسین حیدرزاده؛ سید حمید میرقاسمی؛ مجتبی برغم‌دی
۱۲۰	گزارش برگزاری کارگاه: آشنایی با علم داده کاوی و کاربردهای آن در صنعت آب و فاضلاب به نقل از فریبا قنبری
۱۲۲	کنکاشی در انگاشت‌های بازار آب ایران کاظم اسماعیلی؛ وحیده مرتضوی امیری؛ مائده اسکوهی



بازار آب و حکمرانی

بی‌تردید سیاستگذاری آب در سراسر دنیا به طور روزافزونی به سمت تدابیر مدیریت تقاضا - برای اثرگذاری بر پیشران‌های توسعه - جهت‌گیری پیدا می‌کند. مانند وضع و اعمال انواع مقررات مصرفی و رفتاری - چون اندازه‌گیری و تعیین حد برداشت - آموزش و توسعه ظرفیت‌ها و ایجاد انگیزش‌های مختلف اقتصادی - چون قیمت‌گذاری آب، حقوق مالکیت، مالیات و یارانه. تشویق به خرید و فروش آب هم سیاستی مهم در همین راستا محسوب می‌شود. بازار آب را از منظر مدیریت تقاضا بهتر می‌توان بررسی و تحلیل کرد. کارکرد بازار آب با فرمان و دستور سازگار نیست و با مشخص کردن علامت قیمتی، بازار آب، آب را به با ارزش‌ترین نوع مصرف یا استفاده از آب تخصیص می‌دهد، قیمت‌ها در واکنش به علامت‌های تقاضا و عرضه نوسان می‌کنند. بنابراین در پاسخ به مسایل کمیابی یا مدیریت کیفیت، بازار آب می‌تواند با خود منافعی را از نظر انعطاف و آزادی انتخاب و کارایی به ارمغان بیاورد. بازار آب بر اساس خرید و فروش مجوز برداشت - مانند آب دائمی، پروانه یا حقابه - شکل می‌گیرد. این مجوز حقوق مالکیت در جریان آب را به صورت نسبت یا مقدار مشخص آب در دسترس از منبع معین و مجوز تحویل آب - حق تقدم در دریافت آب در زمان مشخص - تعیین می‌کند. اگر نهادهای رسمی عمدتاً بر معاملات انجام شده حاکمیت داشته و از آن پشتیبانی کنند به آن بازار رسمی و اگر این پشتیبانی به طور عمده توسط نهادهای غیررسمی و فرایندها و هنجارهای اجتماعی انجام شود، به آن بازار غیررسمی می‌گویند. بازارهای غیررسمی که در ایران و بسیاری از کشورهای کهن و با سابقه کشاورزی چند هزار ساله، ممکن است در حد نوعی به اشتراک‌گذاری بخشی از منابع آب در دسترس میان همسایه‌ها و مناطق یا مصارف همجوار برای تطبیق بهتر نیازها با منبع در دسترس، باقی مانده باشند و از آن فراتر نروند. ممکن هم هست این بازارها مانند بازار آب مچن عمق و وسعت بیشتری پیدا کنند و به بازارهای رسمی پهلوی بزنند و با آن رقابت کنند.

تشویق به خرید و فروش رسمی آب در جهان از سال‌های ۱۹۶۰ به عنوان سیاستی در زمینه مدیریت تقاضا آغاز شد. استرالیا و به دنبال آن ایالات متحد - ایالات غربی - چین و سایر کشورهای مواجه با محدودیت زیاد آب چون شیلی، خاورمیانه و شمال آفریقا، آفریقای جنوبی، هند و نظایر آن، از این نظر در کانون

برنامه‌ریزی، توجه و پژوهش قرار گرفته‌اند. در ایران گرچه این موضوع مراحل مقدماتی خود را طی می‌کند، اما در ۴ برنامه توسعه - از سوم تاکنون - درباره آن گفت و شنود، پژوهش و آزمون انجام شده است. موضوعات مورد پژوهش در سطح جهانی و ایران عبارت بودند از شرایط و چارچوب‌های نهادی، مسایل خصوصی‌سازی و بازسازی، ارزیابی سیاست‌ها، تمایل به پرداخت کشاورز، هزینه‌های مبادله، پیشران‌های قیمتی و حجمی، کارایی مصرف آب، پیامدهای محیط‌زیستی، نااطمینانی، خطرات، سرفت و مبادله غیررسمی.

سیاست تشویق بازار رسمی آب، با مجادله‌ها و مطالباتی همراه است که نمی‌توان و نباید از آن‌ها صرف‌نظر کرد. مواردی چون خطر ایجاد ناپایداری و تعارض با بهره‌برداری امن از منابع آب، بی‌انصافی به ضرر مالکین کوچک، شکل‌گیری اشرافیت آب سالار و ورشکستگی کشاورزان، نگرانی زارعین و رها کردن کشاورزی به عنوان شغل و یا حتی این ایراد که آب یک نیاز اساسی است و شأن آب ویژه‌تر از آن است که خرید و فروش شود. نباید فراموش کرد که بازار آب - هر چند که به طور معمول اقتصاددان‌ها از نظر تأثیرش بر فایده‌های کارایی از نظر کارایی اقتصادی و رعایت انصاف طرفدار آن هستند اما - همچون دیگر بازارهای منابع طبیعی مستعد بروز کاستی در تعیین و تعریف حقوق مالکیت، آثار معطف به غیر (Externalities) فراوان و محدودیت در اطلاعات دانشی است. اما نمی‌توان از این سیاست پیچیده و دارای پیامدهای احتمالی نامطلوب، بخاطر مزیت‌های آشکارش بر سایر روش‌های تخصیص، چشم‌پوشی کرد. مزیت‌هایی چون بازتخصیص نرمش‌پذیر در طول زمان نسبت به متغیرهای اقتصادی، جمعیتی و ارزش‌های اجتماعی؛ اولویت تمایل فروشنده و خریدار و آزادی عمل آن‌ها - یعنی ایجاد شرایط مناسب برای فراهم‌کردن تضمین نظام‌مند امنیت حقوق مالکیت - و لحاظ کردن هزینه فرصت واقعی آب. این مزیت‌ها به سه شکل مشخص کارایی اقتصادی می‌تواند بروز پیدا کند: (۱) تخصیصی: مبادله موقت آب که تصمیم‌گیری‌های کوتاه‌مدت منابع آب را برای لحاظ کردن شرایط فصلی، بهبود می‌بخشد - مانند سازگاری با شرایط آب و هوایی، تطبیق با تغییرات قیمت محصولات و انتخاب نوع محصول. (۲) پویایی: مبادله دایمی که ساختار منابع آب یا تصمیم‌گیری درازمدت را با منظور کردن فرصت‌های سرمایه‌گذاری بهبود می‌بخشد و (۳) بازدهی: تغییرات قیمت آب - موقت و دائم - باعث ایجاد انگیزه برای استفاده کارآمد منابع آب می‌شود، چه به عنوان سرمایه‌گذاری و یا نهاده برای نتیجه‌ای با بازده بهتر. اما برای ممکن کردن این منافع بسیاری از اقتصاددان‌ها بر تقدم اهمیت تحقق بازسازی و اصلاح «حکمرانی فراگیر» (Meta-governance) لازم برای راه اندازی بازار آب رسمی، تأکید دارند.

ممکن است این سؤال پیش بیاید که چرا علی‌رغم مزیت آشکار بازار آب در تخصیص و بازتخصیص آب به مصارف باارزش‌تر، دستاوردهای اجرایی و عملی آن در سطح جهان چنین محدود یا حتی ناچیز است؟ برای این سؤال می‌توان پاسخ‌های متفاوتی در نظر گرفت، اما اغلب صاحب‌نظران دلیلش را ترتیبات پیچیده‌ای می‌دانند که باید برقرار شود تا فضا و محیط مناسبی برای کارکرد بازار فراهم شود. طراحی، توسعه، اجرا، پایداری و قدرت تطبیق با شرایط مختلف این ترتیبات با دشواری‌های مهمی روبروست. پژوهش‌های متعددی در این باره برای تهیه چارچوب یا خطوط راهنمای پیاده‌سازی این ترتیبات (همان حکمرانی فراگیر) انجام شده است. برای نمونه Wheeler (۲۰۲۲) نتایج مطالعه تطبیقی خود درباره وسعت بازار آب ۲۰ کشور و ۲۸ ناحیه را در سال ۲۰۲۱ منتشر کرد و یافته‌هایش نشان می‌دهد که به جز ایالات متحد و استرالیا، در سایر مناطق توسعه بازار آب رسمی-برخلاف بازار غیررسمی- به کندی پیش می‌رود. بررسی نتیجه چنین مطالعاتی قبول این فرضیه را تقویت می‌کند که درباره انتقادات نسبت بازار آب شاید با سوءبرداشتی روبرو هستیم که می‌تواند برطرف شود. یعنی در نقد بازار، بین بازار آب و ساختار نهادی حکمرانی فراگیر که این بازار را تعریف می‌کند، می‌بایست تفکیک قائل شد. شکست‌ها و ناکامی‌های تجربه شده در زمینه توسعه رسمی بازار، معمولاً به خاطر مسائل حکمرانی و نه خرید و فروش آب، بروز پیدا می‌کنند.

این به معنی نفی شکست بازار نباید تلقی شود، بلکه کاستی‌ها وجود دارد و باید به آن‌ها پرداخته شود، نظیر توجه به آثار توزیعی بسیار جدی بازار (برای نمونه از طریق صدور مجوز مالکیت آب برای گروداران بومی و محلی). بنابراین از دیدگاه تکوینی، طراحی بازار رسمی و حکمرانی همزمان با بروز مسایل و رشد بازار، نیاز به تطبیق و کامل‌تر شدن دارند. در ازای این زحمات، در زمانه‌ای که مدیریت کمیابی آب دشوارتر شده، توسعه بازار رسمی کماکان به عنوان مهم‌ترین سیاست به اشتراک‌گذاری و بازتخصیص آب و تطبیق مدیریت مزرعه با تغییرات اقلیمی، جایگاه خود را بر روی میز سیاست‌گذاران، حفظ خواهد کرد.

منابع

- Wheeler, S. A. (2022). Debunking Murray-Darling Basin water trade myths. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 66(4), 797-821. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12490>
- Garrick, D., O'Donnell, E. Moore, M. S., Brozovic, N. & Iseman, T. (2019). Informal Water Markets in an Urbanising World: Some Unanswered Questions. Washington, D.C., World Bank Group.

Analyzing Indicators of Adaptive Capacity of Agricultural Units in Water Insecurity Conditions in Hamedan Province

M. Motaghd^{1*}, Sh. Choobchian^{2*}

1, 2- Postdoctoral Researcher and Associate Professor, Department of Agricultural Extension and Education, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: shchoobchian@modares.ac.ir)

Received: 13-02-2024

Revised: 17-04-2024

Accepted: 23-04-2024

Available Online: 29-08-2024

واکاوای نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی در استان همدان

مهسا معتقد^۱، شهلا چوبچیان^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب پس‌دکتری و دانشیار، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: shchoobchian@modares.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

Abstract

Over the past decade, the increase in population, pollution of water sources, climate change, excessive extraction of underground water have fueled the reduction of water resources, and Hamedan province has experienced severe water insecurity conditions. Therefore, the present study was conducted to analyze indicators of the adaptive capacity of agricultural units in water insecurity conditions in Hamedan province using the Delphi method. The statistical population of the research was formed by experts in the field of agricultural water management at the university level. By using the purposeful and chain sampling method, 16 experts and experienced specialists from the universities of Tehran University (3 experts), Tarbiat Modares University (8 experts), Bu-Ali Sina University (3 experts), University of Shahrekord (1 expert), Payam-e Noor University of Hamedan (1 expert) were selected as a sample. This selection was made based on their expertise and cognition of the region. The results showed that 17 categories are the most important indicators agreed by experts in this field, categorized into 5 social, agricultural, economic-financial, technical-infrastructure, and institutional components. Based on the results obtained from the principal component analysis, respectively; social (0.473), agricultural (0.236), institutional (0.127), economic (0.088), and technical-infrastructure (0.077) components as the first to fifth important components in adaptive capacity had high importance and weight. Leveraging knowledge as a social component significantly contributes to enhancing adaptive capacity in addressing water scarcity. The greater the farmers' comprehension and awareness of the water scarcity challenge, the higher their adaptive capabilities. Based on the findings, suggestions were made for improving the capacity to adapt to water insecurity in agricultural units.

Keywords: Climate Change, Reduction of Water Resources, Agriculture, Adaptation.

چکیده

طی یک دهه گذشته افزایش جمعیت، آلودگی منابع آبی، تغییرات اقلیم، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به افت توان منابع آبی دامن زده است و استان همدان شرایط سخت ناامنی آبی را تجربه کرده است. از همین‌رو پژوهش حاضر با هدف واکاوای نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی در استان همدان و به روش دلفی انجام شد. جامعه آماری پژوهش را کارشناسان حوزه مدیریت آب کشاورزی در سطح دانشگاهی تشکیل دادند. با بهره‌گیری از روش نمونه‌گیری هدفمند و زنجیره‌ای ۱۶ نفر از کارشناسان و متخصصان مجرب از دانشگاه‌های تهران (۳ متخصص)، تربیت‌مدرس (۸ متخصص)، بوعلی‌سینا (۳ متخصص)، شهرکرد (۱ متخصص)، پیام‌نور همدان (۱ متخصص) به‌عنوان نمونه انتخاب شدند و این انتخاب براساس تخصص و شناخت نسبت به منطقه آنها انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۷ مقوله به‌عنوان مهمترین شاخص مورد توافق متخصصان این حوزه هستند که در ۵ مولفه اجتماعی، زراعی، اقتصادی-مالی، فنی-زیرساختی و نهادی دسته‌بندی شدند. براساس نتایج بدست‌آمده از تحلیل مولفه اصلی به ترتیب مولفه‌های اجتماعی (۰/۴۷۳)، زراعی (۰/۲۳۶)، نهادی (۰/۱۲۷)، اقتصادی (۰/۰۸۸) و فنی-زیرساختی (۰/۰۷۷) به‌عنوان اولین تا پنجمین مولفه مهم در ظرفیت سازگاری اهمیت و وزن بالایی داشتند. بکارگیری دانش بعنوان یک زیرمولفه اجتماعی نقش مهمی در سازگاری با کم‌آبی ایفا می‌کند. یعنی کشاورزانی که درک و دانش بیشتری از بحران کم‌آبی داشته باشند، توانایی سازگاری بیشتری دارند. براساس یافته‌های پژوهش، پیشنهاداتی برای ارتقای ظرفیت سازگاری با ناامنی آبی در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، کاهش منابع آبی، کشاورزی، سازگاری.

این تحقیق مستخرج از طرح پژوهشی دوره پس‌دکتری بوده که مخارج مالی آن توسط بنیاد ملی نخبگان و دانشگاه تربیت مدرس تأمین شده است.

برپایه مطالعات صورت گرفته مولفه‌های ظرفیت سازگاری در سطح مزرعه شامل موارد زیر است:

حضور در کلاس‌های آموزشی و مهارت (درک و دانش از تغییر اقلیم) به دنبال افزایش دانش و مهارت‌های کشاورزان درباره تغییرات اقلیمی و آشناسازی آنها با راهبردهای سازگاری و برآوردهای اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی پیامدهای تغییرات اقلیمی، سازگاری کشاورزان با آثار زیان‌بار تغییرات اقلیمی را بهبود می‌دهد. همچنین کشاورزان مسن‌تر دانش بهتری از شیوه‌های محلی دارند و اثرات اقلیمی بیشتری را شاهد بوده‌اند؛ لذا نسبت به کشاورزان جوان سازگارتر می‌باشند (Nguyen و همکاران، ۲۰۲۱). **بازدید از مزارع نمایشی**، به تغییر شیوه و روش‌های متداول تولید علوفه و جایگزین کردن روش‌هایی جدید، مناسب، پایدار و سازگار منجر می‌شود (Gameda و همکاران، ۲۰۲۲). **تغییر در رژیم و عادات غذایی**، همچون اصلاح الگوی مصرف و جایگزین کردن مواد غذایی با آب مجازی بالا است که منجر به سازگاری می‌شود (Hawkins و همکاران، ۲۰۲۲). **ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب**، همراه با فناوری‌های بوم‌سازگار موجب کاهش مصرف آب، کاهش مصرف عناصر غذایی گیاه و کود شیمیایی، کاهش اثرات منفی کاربرد آب و عناصر شیمیایی بر محیط‌زیست، کاهش انتقال ترکیب‌های شیمیایی به آب‌های سطحی و زیرزمینی و غیره شده و نقشی کلیدی در امنیت آبی ایفا می‌کنند (Leal Filho و همکاران، ۲۰۲۲). **عضویت در تشکلهای آب‌بران**، موجب مدیریت آب و بهبود ظرفیت سازگاری می‌شود (Hailu و همکاران، ۲۰۲۲). **اندازه زمین تحت زراعت، اندازه مزرعه تحت آبیاری و تعداد قطعات زمین کشاورزی**، به گونه‌ای که کشاورزان دارای زمین دیم و آبی بزرگتر، کیفیت خاک زراعی دیم بیشتر و درآمد کشاورزی بیشتر، به میزان بیشتری نیز حساس به مسائل کشاورزی و عواملی که بر درآمد کشاورزی آنها اثر می‌گذارد باشند و در نهایت تغییرات اقلیمی ایجاد شده را بیشتر درک و با آنها سازگاری می‌کنند (Wu و همکاران، ۲۰۲۲؛ Awazi، ۲۰۲۲؛ Asch و Schneider، ۲۰۲۰). **مدیریت هرز آب‌ها**، و بازگرداندن این گونه آب‌ها به چرخه تولید، به‌عنوان راهکاری مهم برای مدیریت آب کشاورزی است (Koop و همکاران، ۲۰۲۲). **بهره‌گیری از روش‌های کشاورزی ارگانیک**، گزینه‌ای پیشرو در مقابله با تغییر اقلیم و سازگاری با آن محسوب می‌شود. کشاورزی ارگانیک با استفاده از شیوه‌های مدیریت خاک، شرایطی مناسب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ساخت کربن آلی خاک و تثبیت کربن اتمسفری ایجاد می‌کند که بدین ترتیب اثرات سوء تغییر اقلیم در سطح وسیع می‌کاهد (Murmu و همکاران، ۲۰۲۲). **آبیاری در زمان مناسب**، کاهش عملکرد محصول را به حداقل رسانده و موجب افزایش سازگاری با تغییر اقلیم می‌شود (Kelly و همکاران، ۲۰۲۳). **کاشت ارقام مقاوم به شوری**، باتوجه به اینکه شوری خاک یک مشکل عمده در تولید محصولات زراعی در سراسر جهان بوده و تغییر اقلیم و عدم مدیریت صحیح منابع از مهمترین علل شوری خاک است می‌توان با کاشت ارقام مقاوم به شوری موجبات سازگاری با کم‌آبی

کمبود آب یکی از مهمترین چالش‌های قرن اخیر و از مهمترین تنگناهای توسعه پایدار کشاورزی به‌شمار می‌آید که موجب شده آسیب‌پذیری واحدهای تولیدی در برابر تغییر اقلیم افزایش یابد. این امر به‌تدریج توان و ظرفیت سازگاری افراد، خانوارها و نظام‌های تولیدی را برای امرار معاش و امنیت آبی در مزارع کاهش داده است. ظرفیت سازگاری توانایی سیستم‌ها، نهادها، انسان‌ها و دیگر موجودات برای انطباق در برابر تغییر اقلیم از طریق استفاده از فرصت‌ها یا پاسخ به پیامدهای موجود است (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). **بعبارت دیگر** ظرفیت سازگاری توانایی و قابلیت یک سیستم برای سازگار شدن با تنش‌های واقعی یا موردانتظار و مقابله با پیامدها است (Basel و همکاران، ۲۰۲۰). در بخش کشاورزی، ظرفیت سازگاری کشاورزان را می‌توان از طریق سرمایه انسانی (آموزش و مهارت)، سرمایه اجتماعی (تشکلهای آب‌بران)، سرمایه مالی، سرمایه فیزیکی، استفاده از محیط طبیعی و اجتماعی، بهره‌گیری از بازار و تاب‌آوری در مقابل بحران آب بهبود بخشید که از مصادیق آن می‌توان به افزایش بهره‌وری آب از طریق بهبود مدیریت منابع آب در سطح مزرعه (افزایش عملکرد، کاربرد کم آبیاری و کاهش مصرف فعلی آب متناسب با نیاز آبی گیاه، اصلاح تاریخ شخم به‌منظور کاهش تبخیر و تعرق، افزایش نفوذ آب در خاک، انتخاب محصولات باارزش بالاتر با توجه به بهره‌وری اقتصادی آب و کاربرد تکنولوژی‌های نوین آبیاری)، گسترش هشدار زودهنگام، حفاظت آب و خاک و خرید بیمه‌نامه محصولات کشاورزی اشاره نمود (کشاورز، ۱۳۹۷). هرگونه مشکل در سازگاری با ناامنی آبی به‌دنبال خود فقر منابع آب کشاورزی، آلودگی و تخریب محیط‌زیست را به‌همراه دارد و آسیب‌پذیری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی را افزایش می‌دهد (Nhamo و همکاران، ۲۰۲۰). واحدهای بهره‌برداری کشاورزی به واحدهایی گفته می‌شود که در آنها با چارچوب مدیریت ویژه و برنامه‌های معینی، فعالیت‌های کشاورزی انجام می‌شود (شعبانعلی‌فمی و همکاران، ۱۳۹۱) و بعنوان یکی از مهمترین نظام‌های بخش کشاورزی نسبت به تغییر اقلیم که اهمیت بسیاری دارد، بررسی شده است (کریمی و همکاران، ۱۴۰۰). واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی، مسائل مربوط به آب را کاهش می‌دهد. از همین‌رو ظرفیت سازگاری راهکاری جدید جهت مقابله با بحران آبی و کم‌آبی موردتوجه مجامع علمی جهان و ایران قرار گرفته است (Mugejo و Ncube، ۲۰۲۲). ظرفیت سازگاری موجب توانمندسازی جوامع روستایی، پایداری تولید و ثبات در عرضه مواد غذایی در بخش کشاورزی و به‌ویژه در واحدهای تولیدی می‌شود. سازگاری در واحدهای تولیدی کشاورزی به‌معنای هماهنگ کردن رفتار با تغییرات محیط، برای رفع آسیب‌های کشاورزی و فعالیتی به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری و مقاوم شدن در برابر مخاطرات طبیعی است (سواری و شوکتی آملانی، ۱۳۹۸).

را فراهم آورد (Parmar و Vaghela، ۲۰۲۳). **کاشت ردیفی درختان**، درختان نقش مهمی در سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات آن بازی می‌کنند (Zeleeke و همکاران، ۲۰۲۲). **تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی**، زمان کاشت از جمله مهم‌ترین تاریخ‌ها در تقویم زراعی یک گیاه است؛ زیرا سایر فعالیت‌های کشاورزی متناسب با آن تعیین می‌شود. کشت زود و یا دیر هنگام با به‌همراه داشتن اثراتی چون سرمازدگی، شیوع آفات و بیماری‌ها، افزایش طول دوره‌ی رشد گیاه و کاهش فرصت لازم برای آماده‌سازی زمین در کشت‌های نوبت دوم می‌تواند خسارت‌های بسیاری را برای گیاهان به‌همراه داشته باشد. بنابراین تنظیم زمان کشت به‌منظور مقابله با موارد مذکور و بهبود سازگاری با تغییر اقلیم مطرح است (Zobeidi و همکاران، ۲۰۲۲). **استفاده از وارپته‌های جدید مقاوم به خشکی**، کاشت محصولات مقاوم به خشکی، ضمن تأمین امنیت غذایی تاحدی خطرات تغییرات آب و هوایی را تعدیل و کاهش می‌دهد (Seleiman و همکاران، ۲۰۲۱). **کاشت محصولات زراعی دارای قابلیت تولید سوخت زیستی**، می‌تواند میزان تولید آلاینده‌ها در بخش کشاورزی را به‌حداقل رساند و ذخیره کربن موجود در خاک را به میزان زیادی افزایش دهد. همچنین علاوه بر ایجاد درآمد حاصل از فروش تولیدات به بهبود ساختمان خاک کمک نماید (Munir و همکاران، ۲۰۲۲). **کاشت شبدر**، نه تنها موجب افزایش ماده آلی موجود در خاک می‌شود بلکه به کاهش مصرف کودهای شیمیایی به‌خصوص اوره و افزایش عملکرد محصولات کمک می‌نماید (Zarei و همکاران، ۲۰۲۰). **بهره‌گیری از کشاورزی دیم**، به‌معنای استفاده بهینه از منابع آب در شرایط کمبود آب و وجود آب نامناسب است و در تولید محصولات غذایی و حفظ محیط زیست نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. این روش کشاورزی توانمندی دارد تا در شرایط کم‌آبی و شدت تغییرات اقلیمی، مانع از تخریب خاک و افت کیفیت آب شود و درعین حال، عملکرد محصولات را بهبود بخشد (Rosa، ۲۰۲۲). **کنترل آفات (قبل از ظهور و نظام‌مند)**، باعث افزایش تولید محصولات، محافظت از منابع آب و خاک و افزایش ضریب امنیت غذایی می‌شود (Akinyemi و همکاران، ۲۰۲۲). **استفاده از کود و سموم شیمیایی**، به افزایش تولید در واحد سطح و کاهش آسیب‌پذیری از تغییر اقلیم می‌انجامد (Bhusal و همکاران، ۲۰۲۲). **کاشت درخت در حاشیه مزارع**، می‌تواند از فرسایش خاک جلوگیری کند، حاصلخیزی خاک را برگرداند، سایه‌ای برای سایر گیاهان باشد و ساختار خاک را به‌گونه‌ای بهبود بخشد که قادر به نگهداری آب بیشتری باشد. بنابراین یکی از راه‌های مؤثر افزایش ظرفیت سازگاری با تغییر اقلیم، بهینه‌سازی استفاده از آب کمیاب باران از طریق زراعت جنگلی و اصلاح زمین‌های لم‌یزرع می‌باشد (Burgess و همکاران، ۲۰۲۲). **بهره‌گیری از تسهیلات و اعتبارات**، هرچه‌قدر کشاورزان منابع مالی و اعتباری بیشتری داشته باشند، قادر خواهند بود از تمامی اطلاعات در دسترس به‌منظور مدیریت عملیات کشاورزی خود در پاسخ به تغییرات ایجاد شده در اقلیم بهره ببرند (Shokati Amghani و Savari، ۲۰۲۲). **درآمد مکفی**، موجب

می‌شود تا اقدامات مربوط به سازگاری با تغییرات اقلیمی استفاده شود (Awazi، ۲۰۲۲). **مدیریت ریسک**، راهی مؤثر برای کاهش عواقب مضر رویدادهای حادث است و نقش مهمی در سازگاری با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (Zobeidi و همکاران، ۲۰۲۲). **استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت**، دسترسی به این فناوری‌ها توان سازگاری را افزایش می‌دهد (Sathre و همکاران، ۲۰۲۲). استان همدان باتوجه به شرایط آب و هوایی مناسب، تنوع در محصولات مختلف، وجود ۱۴۹۸۷۲ بهره‌بردار زراعی و ۱۴۷۴۶۱ واحدهای بهره‌برداری کشاورزی، یکی از استان‌های مهم بخش کشاورزی در کشور است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱-۱۴۰۰). اخیراً خشکسالی، دخل و تصرف بی‌رویه از منابع آبی و برداشت‌های بی‌رویه از ذخایر زیرزمینی و همچنین مدیریت نادرست مصرف آب، منجر به بحران‌های جبران‌ناپذیر در ذخایر آب، کم‌آبی (شرکت آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۹) و بروز ناامنی آبی در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی استان شده است. بنابراین کم‌آبی در استان یکی از موانع توسعه کشاورزی پایدار است (معتقد و همکاران، ۱۴۰۱). از همین‌رو این منطقه جهت بررسی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی با ناامنی آبی انتخاب شده است. چنانچه ظرفیت سازگاری موردتوجه قرار نگیرد، ممکن است چالش‌های حادث‌تری در زمینه ناامنی آبی شکل گیرد. پرواضح است که با اتخاذ رویکرد مدیریت بحران و عدم واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری جوامع محلی در برابر ناامنی آبی و غیره، کنش برنامه‌ریزان روستایی در شناخت وضعیت موجود مبهم شده و ائتلاف منابع را با اختصاص آن به کلیه کشاورزان در طیف‌های مختلف آسیب‌پذیری فارغ از ظرفیت سازگاری آنان، به دنبال دارد. پیامد این امر آن است که افق دید برنامه‌ریزان مذکور در ترسیم وضعیت مطلوب جهت مدیریت اثر بخش و کارآمد امنیت آبی نیز کوتاه می‌گردد؛ چرا که طیف‌های متنوع روستاییان و کشاورزان آسیب‌پذیر شناسایی نشده و ماهیت ظرفیت سازگاری آنان ادراک و تبیین نشده است. باتوجه به ضرورت پژوهش برای شناخت دقیق مسئله و جستجوی راه‌حل‌های سازگار با منطقه، هدف این پژوهش واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی در استان همدان است. سوال کلی پژوهش بر این نکته استوار است که در شرایط ناامنی آبی، چه نشانگرهایی در ظرفیت سازگاری کشاورزان در سطح مزرعه تأثیرگذار می‌باشند؟ مطالعات متعددی در خصوص ظرفیت سازگاری کشاورزان با ناامنی آبی صورت گرفته که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است. در پژوهشی محمودی‌ممتاز و همکاران (۱۳۹۹) عوامل مؤثر بر ادراک و رفتار سازگاری کشاورزان در واکنش به تغییرات اقلیمی استان همدان را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که از بین متغیرهای مورد مطالعه، دانش، ادراک و باور بیشترین تأثیر را بر رفتار سازگاری داشتند. بدین‌منظور برای سهولت ارتباط برای کشاورزان و تسهیل در انتقال اطلاعات در مورد تغییرات اقلیمی، سازمان‌های مبتنی بر جامعه پیشنهاد شد. یک

مطالعه نشان داد کاهش ظرفیت سازگاری با ناامنی آبی به دنبال خود تخریب بیشتر منابع طبیعی، کاهش درآمد و آسیب پذیری کشاورزان را موجب می شود (Khalili و همکاران، ۲۰۲۰). مهمترین عوامل و نیروهای موثر بر افزایش سازگاری با ناامنی آبی تحت تأثیر عوامل مختلف اقتصادی و اجتماعی (مانند منابع آب بخصوص آب کشاورزی، توجه مسئولان دولتی به توسعه بخش کشاورزی با نیاز آبی کمتر، تغییر الگوی کشت، مشارکت و اندازه مزرعه و ...) قرار می گیرد (Karimi و همکاران، ۲۰۱۸). در يك مطالعه یزدان پناه و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که تحصیلات، فاصله زمین تا مرکز خدمات کشاورزی، تعداد محصولات، خودکارآمدی و ریسک پذیری از عوامل مؤثر بر تنوع شغلی و به عنوان رفتار سازگاری با کم آبی می باشند. همچنین براساس این مطالعه وضعیت تأهل، تحصیلات، عضویت در تعاونی، تمایل به حفاظت از آب، درک خطر اجتماعی، خودکارآمدی، ریسک پذیری، نگرش زیست محیطی، تعاملات اجتماعی و پیوند اثر معنی داری بر رفتار سازگاری خرید آب اضافی دارد. از طرف دیگر، متغیرهای وضعیت تأهل، ریسک زیست محیطی، برجستگی خطر، اعتماد کاری و پیوند بر تعمیر کانال های آب و متغیرهای تعداد محصولات، تمایل به حفاظت از آب، ریسک پذیری، اعتماد کاری و تعاملات اجتماعی بر استفاده از منابع آب نامتعارف اثر معنی داری دارد. متغیرهای سن، عضویت در تعاونی، تمایل به حفظ آب، درک ریسک محیطی، درک ریسک اقتصادی، درک ریسک زیست محیطی، خودکارآمدی، برجستگی خطر، انجمن غیررسمی اعتماد کاری و اعتماد نهادی بر انتخاب رفتار سازگاری

مؤثر می باشند. در تحقیقی دیگر Trinh و همکاران (۲۰۱۸) عوامل تأثیرگذار بر تصمیم گیری کشاورزان در سازگاری با تغییر اقلیم را ارزیابی نمودند. حضور در کلاس های آموزشی، اندازه زمین تحت زراعت، سطح خسارت، سطح تحصیلات، تجربه کشاورزی، دسترسی به اعتبارات و جنسیت به عنوان عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت سازگاری در مواجهه با تغییر اقلیم تعریف شده است که حضور در کلاس های آموزشی و اندازه زمین تحت زراعت بیشترین تأثیر را در سازگاری کشاورزان داشته است. همچنین؛ مدیریت هرز آب ها، استفاده از پیش بینی های اقلیمی، تغییر زمان کاشت یا برداشت محصول، بهبود سیستم انتقال آب، تغییر زمان آبیاری، استفاده از کود و سموم شیمیایی، بیمه محصولات کشاورزی، استفاده از واریته های جدید مقاوم به خشکی، افزایش اعتبارات، تسهیلات و آموزش، تولید گاز زیستی از کودهای حیوانی، کاشت درخت در حاشیه مزارع، کاشت محصولات زراعی دارای قابلیت تولید سوخت زیستی، کاشت شیدر، کاهش استفاده از سوخت های فسیلی، کاهش تردد ماشین آلات کشاورزی در مزرعه، کاربرد حداقلی کود و سموم شیمیایی از مهمترین عوامل بهبود ظرفیت سازگاری بودند (Singh و همکاران، ۲۰۱۷). بطور کلی بهبود ظرفیت سازگاری در مزرعه موجب تأمین امنیت آبی، حفظ تنوع زیستی، کاهش فقر و تولید پایدار می شود (Feliciano و همکاران، ۲۰۱۴). با بررسی مطالعات گوناگون شاخص های اصلی بهبود ظرفیت سازگاری واحدهای بهره برداری کشاورزی با ناامنی آبی به پنج مولفه انسانی-مدیریتی، اجتماعی، زراعی، فنی-زیرساختی و اقتصادی دسته بندی شدند (جدول ۱).

جدول ۱- شاخص های بهبود ظرفیت سازگاری واحدهای بهره برداری کشاورزی با ناامنی آبی

بعد	شاخص های بهبود ظرفیت سازگاری	منبع
انسانی-مدیریتی	حضور در کلاس های آموزشی و مهارت، بازدید از مزارع نمایشی، دسترسی به خدمات ترویجی، تغییر در رژیم و عادات غذایی، حفظ و بهبود برنامه های مدیریتی نظارت و قرنطینه، مدیریت هرز آب ها، ترویج شیوه های نوین مدیریت آب در مزرعه	رمضانی و همکاران (۱۴۰۰) تقی پور و همکاران (۱۳۹۸) شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) Trinh و همکاران (۲۰۱۸)
اجتماعی	عضویت در تشکلهای آب بران، اندازه زمین تحت زراعت، اندازه مزرعه تحت آبیاری، تعداد قطعات زمین کشاورزی، عضویت در گروه های اجتماعی	رمضانی و همکاران (۱۴۰۰) تقی پور و همکاران (۱۳۹۸) Jamshidi و همکاران (۲۰۲۰)
زراعی	بهره گیری از روش های کشاورزی ارگانیک، کاشت ارقام مقاوم به شوری، کاشت ردیفی درختان، کشت سبزیجات در فاصله بین ردیف های درختان، تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی، استفاده از واریته های جدید مقاوم به خشکی، کاشت درخت در حاشیه مزارع، کاشت محصولات زراعی دارای قابلیت تولید سوخت زیستی، کاشت شیدر، آگاهی از آبیاری در زمان مناسب	تقی پور و همکاران (۱۳۹۸)
اقتصادی	بهره گیری از بازار، فروش دام و زمین، بیمه محصولات، بهره گیری از تسهیلات و اعتبارات، درآمد مکفی، مدیریت ریسک، منطقی شدن تدریجی بهای آب در بخش کشاورزی	تقی پور و همکاران (۱۳۹۸) رمضانی و همکاران (۱۴۰۰) Trinh و همکاران (۲۰۱۸)
فنی-زیرساختی	فناوری های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت، بهره گیری از پیش بینی های اقلیمی، استفاده از کود و سموم شیمیایی، کاهش تردد ماشین آلات کشاورزی در مزرعه، پوشش محصولات زراعی، خاکورزی حفاظتی، بهره گیری از کشاورزی دیم، کنترل آفات (قبل از ظهور و نظام مند)، افزایش راندمان سیستم آبیاری، بازسازی نهرهای فرسوده و سنتی، احداث بندهای ذخیره ای و انحرافی تغذیه مصنوعی آبخوان و پخش سیلاب (جلوگیری از هدررفت سیلاب ها)، استفاده از پساب در آبیاری اراضی	سواری و شوکتی آقانی (۱۳۹۸) شفیعی و همکاران (۱۳۹۹)

در يك جمع‌بندی و باتوجه به مرور ادبیات صورت گرفته به‌ویژه از مطالعات قبلی می‌توان دریافت که درخصوص واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی تحقیقات بسیاری انجام نشده و دیگر مطالعاتی که در این زمینه انجام شدند از جامعیت کامل برخوردار نیستند. بنابراین مسئله اصلی در تحقیق حاضر واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی در استان همدان است که نتایج حاصل نیز می‌تواند به تدوین راهبردهای مدیریت پایدار آب و توسعه کشاورزی پایدار استان کمک کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر ماهیت، کیفی، از نظر هدف، کاربردی و از نظر شیوه گردآوری داده‌ها، توصیفی-پیمایشی است. در این پژوهش به منظور واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری (با ناامنی آبی) در سطح مزرعه از روش دلفی بهره گرفته شد. دلفی یکی از پرکاربردترین روش‌های تحقیق کیفی محسوب می‌شود که در مراحل اجرای آن میزگردهایی از متخصصان موضوعی تشکیل می‌شود. مبنای این روش، جمع‌آوری نظرات و رسیدن به اجماع گروهی بین شرکت‌کنندگان در میزگرد است (Stitt-Gohdes و Crews، ۲۰۰۴). روش دلفی با جلب مشارکت متخصصان و خبرگان انجام می‌پذیرد. در پژوهش حاضر جامعه آماری را کارشناسان و متخصصان خبره حوزه مدیریت آب کشاورزی در سطح دانشگاهی تشکیل دادند. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند و زنجیره‌ای تعداد ۱۶ نفر از کارشناسان و متخصصان خبره و باتجربه دانشگاه تهران (۳ نفر)، دانشگاه تربیت‌مدرس (۸ نفر)، دانشگاه بوعلی‌سینا (۳ نفر)، دانشگاه شهرکرد (۱ نفر) و دانشگاه پیام‌نور همدان (۱ نفر) به‌عنوان نمونه انتخاب شدند. ابزار اصلی جمع‌آوری داده‌ها پرسشنامه نیمه‌ساختارمند و ساختارمند بود. محققان از سه مرحله برای پرسشگری استفاده نمودند. به‌طورمعمول برای تجزیه و تحلیل نتایج دلفی در اولین مرحله، موضوع‌های اصلی در پرسشنامه اولیه‌ای که بدون ساختار است شناسایی می‌شوند که نتایج پرسشنامه بدون ساختار را به پرسشنامه‌ای ساختارمند تبدیل نموده و پایه مراحل بعدی را تشکیل می‌دهد. دومین مرحله، شروع بکارگیری روش‌های کمی است که طیف لیکرت استفاده می‌شود و در سومین مرحله شاخص‌های مرکزی (میانگین) بکار می‌روند (McKenna و همکاران، ۲۰۰۲). در مرحله اول ۵۱ سوال به‌منظور اثرگذاری (۱-بله؛ ۲-خیر) نشانگرهای مذکور در واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی و تعدادی سوال باز مطرح شد. با استفاده از محاسبات توافق سنجی (توافق ۷۰ درصد به بالا) نشانگرهای باقیمانده و نشانگرهایی که امتیاز لازم را کسب نکردند از پرسشنامه حذف و نشانگرهای جدیدی که متخصصان اشاره داشتند به پرسشنامه اضافه شده تا پرسشنامه ساختارمندی برای مرحله دوم تنظیم شود

(گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷). در مرحله دوم از اعضای میزگرد خواسته شد تا نظرات خود را با استفاده از طیف لیکرت ۵ سطحی (۱=خیلی کم؛ ۲=کم؛ ۳=متوسط؛ ۴=زیاد؛ ۵=خیلی زیاد) نسبت به ۳۸ مقوله استخراج شده از مرحله قبل مشخص کنند و هرگونه اختلاف نظر با آن را ذکر نمایند که بالای ۷۰ درصد میانگین نمرات کسب شده (نمره ۳/۵ به بالا) در محاسبات اعمال شد. نتایج مرحله دوم و نظرات پاسخگویان مقوله‌ها اولویت‌بندی شده و برای رسیدن به اجماع، مرحله سوم اجرا شد. در مرحله سوم پرسشنامه اصلاح شده بار دیگر برای متخصصان خبره ارسال شد. با این تفاوت که در این مرحله کارشناسان از میانگین نمرات در مرحله قبل مطلع شده و نمره جدید خود را براساس این آگاهی وارد نمودند. در این مرحله خبرگان به اجماع نظر رسیده و محاسبات تکمیل و تحلیل تمام شد. همچنین در این مرحله دیگر نه نشانگری اضافه و نه نشانگری از پرسشنامه کم شد. نشانگرهای بدست آمده مهمترین معیارهایی هستند که از نظرات متخصصان حاصل شدند. در مرحله آخر از طریق اجماع کارشناسی، قوی‌ترین مولفه‌ها و نشانگرها انتخاب و همزمان با قضاوت در مورد بهترین آنها وزن‌دهی نیز صورت گرفت. در پژوهش حاضر اجماع بالای ۷۰ درصد لحاظ شد که ۱۷ مقوله استخراج شده در قالب ۵ مولفه اجتماعی، زراعی، اقتصادی-مالی، فنی-زیرساختی و نهادی دسته‌بندی شدند و هر یک از مقوله‌ها در طبقه‌ای با ویژگی‌های مشابه قرار گرفت. برای بررسی و وزن‌دهی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی نیز از روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شد که در ادامه و در جدول (۴) به آن پرداخته شده است.

نتایج و بحث

- ویژگی‌های فردی کارشناسان و متخصصان مجرب

براساس نتایج، اکثر کارشناسان و متخصصان مجرب ۴۱ تا ۵۰ ساله (۵۰ درصد) با تحصیلات دکتری (۹۳/۸ درصد) بودند. همچنین ۶۸/۸ درصد از کارشناسان پاسخگوی مرد و ۸۱/۳ درصد از آنها متاهل بودند. در ارتباط با سازمان محل فعالیت؛ حدود ۵۰ درصد در دانشگاه تربیت‌مدرس و نیمی دیگر در دانشگاه تهران، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشگاه یاسوج و پیام‌نور مشغول به فعالیت بوده‌اند. در ارتباط با نوع استخدامی؛ حدود ۸۰ درصد رسمی قطعی و ۲۰ درصد رسمی آزمایشی بودند. در ارتباط با سابقه کار؛ حدود ۴۳/۸ درصد سابقه کمتر از ده سال، ۳۱/۳ درصد سابقه‌ای بین ۱۱-۲۰ سال و ۲۵ درصد سابقه بیش از ۲۰ سال داشتند.

- نتایج مرحله اول دلفی

واکاوی نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی در استان همدان به‌عنوان هدف اول این مطالعه مطرح بود. در راستای دستیابی به این هدف اولین مرحله روش

دلفی اجرا شد و از طریق پرسشنامه ۳۸ سوال بسته و تعدادی سوال باز مطرح شد و از متخصصان مجرب خواسته شد تا نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی را بیان نمایند. پس از جمع‌آوری پرسشنامه در این مرحله، ۲۱ مقوله به عنوان نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی شناسایی شدند.

جدول ۱- مرحله اول: درصد موافقت با تأثیرگذاری نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

نشانگرها	تأثیرگذاری	وزن	رتبه‌بندی
درک و دانش از تغییر اقلیم	۱۰۰	۱۶	۱
تغییر در تاریخ کشت	۱۰۰	۱۶	۱
استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت	۱۰۰	۱۶	۱
ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه	۹۳/۷۵	۱۵	۲
مدیریت هرز آب‌ها	۹۳/۷۵	۱۵	۲
آگاهی از آبیاری در زمان مناسب	۹۳/۷۵	۱۵	۲
تنوع کشت (کشت مخلوط)	۹۳/۷۵	۱۵	۲
کاشت ارقام مقاوم به شوری	۹۳/۷۵	۱۵	۲
تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی	۹۳/۷۵	۱۵	۲
استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی	۹۳/۷۵	۱۵	۲
مدیریت ریسک	۹۳/۷۵	۱۵	۲
بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های اقلیمی	۹۳/۷۵	۱۵	۲
اصلاح مکانیکی و بیولوژیکی خاک	۹۳/۷۵	۱۵	۲
بازسازی نهرهای فرسوده و سنتی	۹۳/۷۵	۱۵	۲
احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی تغذیه مصنوعی آبخوان و پخش سیلاب	۹۳/۷۵	۱۵	۲
عضویت در تشکلهای آب‌بران	۸۷/۵	۱۴	۳
اندازه زمین تحت زراعت	۸۷/۵	۱۴	۳
اندازه مزرعه تحت آبیاری	۸۷/۵	۱۴	۳
تعداد قطعات زمین کشاورزی	۸۷/۵	۱۴	۳
کاشت ردیفی درختان	۸۷/۵	۱۴	۳
پوشش محصولات زراعی	۸۷/۵	۱۴	۳
بهره‌گیری از کشاورزی دیم	۸۷/۵	۱۴	۳
درآمد مکفی	۸۷/۵	۱۴	۳
بازدید از مزارع نمایشی	۸۱/۲۵	۱۳	۴
دست‌رسی به خدمات ترویجی	۸۱/۲۵	۱۳	۴
کشت سبزیجات در فاصله بین ردیف‌های درختان	۸۱/۲۵	۱۳	۴
کاشت محصولات زراعی دارای قابلیت تولید سوخت زیستی	۸۱/۲۵	۱۳	۴

ادامه جدول ۱- مرحله اول

کاشت درخت در حاشیه مزارع	۸۱/۲۵	۱۳	۴
بیمه محصولات	۸۱/۲۵	۱۳	۴
بهره‌گیری از تسهیلات و اعتبارات	۸۱/۲۵	۱۳	۴
کاهش تردد ماشین‌آلات کشاورزی در مزرعه	۸۱/۲۵	۱۳	۴
حفظ و بهبود برنامه‌های مدیریتی نظارت و قرنطینه	۷۵	۱۲	۵
کاشت شبدر	۷۵	۱۲	۵
کنترل آفات (قبل از ظهور و نظام‌مند)	۷۵	۱۲	۵
بهره‌گیری از روش‌های کشاورزی ارگانیک	۶۲/۵	۱۰	۶
تغییر در رژیم و عادات غذایی	۵۶/۲۵	۹	۷
استفاده از کود و سموم شیمیایی	۵۶/۲۵	۹	۷
فروش دام و زمین	۵۶/۲۵	۹	۷

- نتایج مرحله دوم دلفی

مناسب بودن نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی، هدف دوم مطالعه بود. در راستای رسیدن به این هدف، پس از بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج در مرحله اول، پرسشنامه ساختارمندی برای مرحله دوم تنظیم شد و از متخصصان خواسته شد تا میزان مناسب بودن (خیلی زیاد تا خیلی کم) را نسبت به مقوله با استفاده از طیف لیکرت (پنج سطحی) را اعلام نمایند. موثرترین نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی از دیدگاه بیش از ۷۰ درصد متخصصان در این مرحله مشخص شده و نشانگرهایی که از نظر متخصصان موثر نبودند حذف شدند.

جدول ۲- مرحله دوم: اولویت‌بندی نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

نشانگرها	تأثیرگذاری	وزن	رتبه‌بندی
احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی تغذیه مصنوعی آبخوان و پخش سیلاب	۴/۳۱	۰/۷۰۴	۱
تغییر در تاریخ کشت	۴/۲۵	۰/۶۸۳	۲
آگاهی از آبیاری در زمان مناسب	۴/۱۸	۰/۶۷۸	۳
مدیریت هرز آب‌ها	۴/۱۸	۰/۶۵۵	۴
استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت	۴/۱۲	۱/۰۸۷	۵
تنوع کشت (کشت مخلوط)	۴/۱۲	۰/۷۱۸	۶
مشارکت در فعالیتهای سازمان‌های محلی	۴/۰۶۲	۰/۹۹۷	۷
بکارگیری دانش سنتی کشاورزی	۴	۱/۰۳۲	۸
تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی	۴	۱/۰۹۵	۹

ادامه جدول ۲- مرحله دوم			
۱۰	۰/۸۹۴	۴	استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی
۱۱	۰/۷۳۰	۴	نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی بهره‌برداران
۱۲	۱/۰۶۲	۳/۹۳	اعتماد کشاورزان جهت هشدارهای مربوط به تغییر اقلیم توسط دولت
۱۳	۰/۹۹۷	۳/۹۳	بهبود همکاری‌های سازمانی در سطح نهادهای دولتی به ویژه وزارت نیرو و جهاد کشاورزی
۱۴	۰/۸۵۳	۳/۹۳	ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه
۱۵	۰/۹۵۷	۳/۸۷	بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های اقلیمی
۱۶	۰/۷۱۸	۳/۸۷	دلبستگی مکانی بهره‌برداران به واحدهای بهره‌برداری خود
۱۷	۱/۱۶۷	۳/۸۱	اصلاح مکانیکی و بیولوژیکی خاک
۱۸	۱/۰۱۴	۳/۶۸	بیمه محصولات
۱۹	۰/۸۸۵	۳/۶۲	درک و دانش از تغییر اقلیم
۲۰	۱/۰۳۰	۳/۵۰	آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا و کشاورزی
۲۱	۰/۸۸۵	۳/۳۷	استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی

طیف لیکرت: (۱=خیلی کم ۲=کم ۳=متوسط ۴=زیاد ۵=خیلی زیاد)

- نتایج مرحله سوم دلفی

پس از بررسی و تحلیل نتایج مرحله دوم نشانگرهایی که میانگین بالای ۳/۵ را دارا بودند (۱۷ مقوله) انتخاب و به مرحله سوم وارد شدند و به‌عنوان نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی در نظر گرفته شدند. همانطور که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود اعضای میزگرد ۱۷ مقوله را به‌عنوان نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی شناسایی نمودند.

جدول ۳- مرحله سوم: نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

نشانگرها	درصد موافقت با تأثیرگذاری	رتبه بندی
آگاهی از آبیاری در زمان درست	۱۰۰	۱
مشارکت در فعالیت‌های سازمان‌های محلی	۸۱/۳	۲
درک و دانش از تغییرات آب و هوایی	۷۵/۱	۳
بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های آب و هوایی	۶۲/۶	۴
نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی کشاورزان	۶۲/۵	۵
بکارگیری دانش سنتی کشاورزی	۶۲/۵	۶

ادامه جدول ۳- مرحله سوم			
۷	۵۶/۳		استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی
۸	۵۶/۳		ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه
۹	۵۰		مدیریت هرز آب‌ها به منظور آبخویی و کنترل نمک در خاک
۱۰	۵۰		آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا
۱۱	۵۰		استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت
۱۲	۴۳/۸		احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی جهت پخش سیلاب
۱۳	۴۳/۸		بیمه محصولات
۱۴	۴۳/۸		بهبود همکاری سازمانی در سطح نهادهای دولتی (وزارتخانه نیرو و جهاد)
۱۵	۳۸/۵		استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی
۱۶	۳۸/۵		تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی
۱۷	۳۰		وابستگی بهره‌برداران به واحدهای بهره‌برداری خود

جدول ۴- طبقه‌بندی نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

طبقه‌بندی	نشانگرها
اجتماعی	درک و دانش از تغییرات آب و هوایی
	ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه
	بکارگیری دانش سنتی کشاورزی
	نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی کشاورزان دلبستگی مکانی بهره‌برداران به واحدهای بهره‌برداری خود مشارکت در فعالیت‌های سازمان‌های محلی
زراعی	مدیریت هرز آب‌ها به منظور آبخویی و کنترل نمک در خاک
	آگاهی از آبیاری در زمان مناسب
	تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی
اقتصادی	بیمه محصولات
	استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی
فنی- زیرساختی	استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت
	بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های آب و هوایی
نهادی	احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی جهت پخش سیلاب
	آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا و کشاورزی
	بهبود همکاری‌های سازمانی در سطح نهادهای دولتی به ویژه وزارت نیرو و جهاد کشاورزی

سازماندهی و طبقه‌بندی نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی استان همدان، هدف نهایی این مطالعه بود. در این راستا به همه مواردی که معانی و مفاهیم مشابهی را منتقل می‌کنند، کد مشابهی اختصاص داده شد و موارد مشابه در یک طبقه جای گرفت. ۱۷ نشانگر شناسایی شده در پنج طبقه جای گرفتند (جدول ۴).

- محاسبه نمره کل شاخص ترکیبی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

در بررسی و وزن‌دهی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی همانطور که جدول (۵) نشان می‌دهد از روش تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده شد که بعنوان یک روش قوی شناخته می‌شود. در این روش که مبتنی بر همبستگی شاخص‌ها با مولفه‌ها است، هرچه همبستگی یک شاخص با شاخص دیگر در مولفه بالاتر باشد وزن بیشتری دریافت می‌کند. برای

دستیابی به ضرایب نهایی ابتدا با اجرای تحلیل مولفه‌های اصلی در نرم‌افزار SPSS بارهای عاملی و اشتراکی محاسبه و با توجه به ترجیح استفاده از بارهای اشتراکی در تبیین بیشتر واریانس شاخص ترکیبی از این داده برای ادامه کار استفاده شد. سپس در نرم‌افزار Excel بارهای اشتراکی به عنوان وزن‌های خام اولیه منتقل و سپس وزن خام هر مولفه محاسبه شد. سپس برای دستیابی به وزن‌های نرمال یا نسبی محاسبات لازم صورت گرفت و وزن‌های استاندارد شده برای هر مولفه و شاخص‌های ذیل آن به تفکیک محاسبه و از طریق ضرب وزن نرمال مولفه در وزن نرمال شاخص‌های مربوطه وزن نهایی هر شاخص بدست آمد. در مورد شاخص‌هایی که وزن نهایی معادل صفر قرار گرفت، این شاخص‌ها حذف و وارد بخش بعدی تحلیل یعنی محاسبه شاخص ترکیبی نشدند. با اعمال ضرایب در نمرات استاندارد هر شاخص (رفع اختلاف مقیاس شده با روش تقسیم بر میانگین) شاخص ترکیبی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی محاسبه شد.

جدول ۵- وضعیت وزن‌های تخصیص داده شده به ابعاد و نشانگرهای ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی

ابعاد (وزن نرمال)	نماد	نشانگر	وزن خام نشانگر	وزن نرمال نشانگر	وزن نهایی نشانگر
اجتماعی (۰/۴۷۳)	ADSO۱	درک و دانش از تغییرات آب و هوایی	۰/۷۵۳	۰/۳۹۹	۰/۱۸۹
	ADSO۲	ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه	۰/۲۲۴	۰/۱۱۹	۰/۰۵۶
	ADSO۳	وابستگی بهره‌برداران به واحدهای بهره‌برداری خود	۰/۰۴۸	۰/۰۲۶	۰/۰۱۲
	ADSO۴	نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی کشاورزان	۰/۲۲۸	۰/۱۲۱	۰/۰۵۷
	ADSO۵	بکارگیری دانش سنتی کشاورزی	۰/۶۱۸	۰/۳۲۸	۰/۱۵۵
	ADSO۶	مشارکت در فعالیت‌های سازمان‌های محلی	۰/۰۱۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴
		جمع	۱/۸۸۷	۱	۰/۴۷۳
زراعی (۰/۲۳۶)	ADFA۱	مدیریت هرز آب‌ها به منظور آبیویی و کنترل نمک در خاک	۰/۰۳۸	۰/۰۴۰	۰/۰۰۹
	ADFA۲	آگاهی از آبیاری در زمان درست	۰/۳۰۷	۰/۳۲۶	۰/۰۷۷
	ADFA۴	تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی	۰/۲۹۴	۰/۳۱۴	۰/۰۷۴
	ADFA۵	استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی	۰/۳۰۱	۰/۳۲	۰/۰۷۶
		جمع	۰/۹۴۰	۱	۰/۲۳۶
اقتصادی (۰/۰۸۸)	ADECO۱	بیمه محصولات	۰/۰۱۰	۰/۰۳۰	۰/۰۰۳
	ADECO۲	استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی	۰/۳۴۰	۰/۹۷۰	۰/۰۸۵
		جمع	۰/۳۵۱	۱	۰/۰۸۸
فنی- زیرساختی (۰/۰۷۷)	ADITEC۱	استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱
	ADITEC۲	بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های آب و هوایی	۰/۲۱۵	۰/۷۰۳	۰/۰۵۴
	ADITEC۴	احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی جهت پخش سیلاب	۰/۰۸۸	۰/۲۸۵	۰/۰۲۲
		جمع	۰/۳۰۷	۱	۰/۰۷۷
نهادی (۰/۱۲۷)	ADNGO۱	آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا	۰/۲۶۷	۰/۵۲۸	۰/۰۶۷
	ADNGO۲	بهبود هماهنگی بین دستگاه‌های دولتی مسئول در ارائه خدمات به کشاورزان	۰/۲۳۹	۰/۴۷۲	۰/۰۶۰
		جمع	۰/۵۰۶	۱	۰/۱۲۷

براساس نتایج جدول (۵)، مولفه اجتماعی به عنوان اولین مولفه مهم در ظرفیت سازگاری از اهمیت و وزن بالایی (۰/۴۷۳) برخوردار است. در میان زیرمولفه‌های اجتماعی «درک و دانش از تغییرات آب و هوایی» با ضریب اهمیت (۰/۱۸۹) بیشترین وزن و اهمیت را داشته است. بنابراین به اندازه‌ای که کشاورزان درک و دانش بیشتری از بحران کم‌آبی داشته باشند توانایی سازگاری بیشتری دارند. این یافته در دیگر تحقیقات نیز تأیید شد (Ricart و همکاران، ۲۰۲۲). مولفه زراعی به عنوان دومین مولفه مهم در ظرفیت سازگاری اهمیت بالایی با وزن ۰/۲۳۶ دارد. در میان زیرمولفه‌ها اهمیت «آگاهی از آبیاری در زمان درست» با وزن ۰/۷۷۰ بیشتر از سایرین بوده است. این یافته در تعدادی از دیگر تحقیقات تأیید شد (Sikka و همکاران، ۲۰۲۰؛ Holman و Knox، ۲۰۲۳). مولفه نهادی با وزن ۰/۱۲۷ سومین مولفه مهم در ظرفیت سازگاری استان همدان بدست آمد. در میان زیرمولفه‌ها اهمیت «آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا» با وزن ۰/۶۷ بیشتر از سایرین بوده است. این یافته در تعدادی از تحقیقات دیگر تأیید شد (Fahad و همکاران، ۲۰۲۳؛ Marengo و همکاران، ۲۰۲۲). مولفه اقتصادی نیز با وزن ۰/۰۸۸ به عنوان چهارمین مولفه مهم در ظرفیت سازگاری استان همدان تعیین شد. در میان زیرمولفه‌ها نیز اهمیت «استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی» با وزن ۰/۰۸۵ بیشتر از سایرین بوده است. این یافته در تعدادی از تحقیقات دیگر تأیید شد (رمضانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Jamshidi و همکاران، ۲۰۲۰). مولفه فنی-زیرساختی نیز با وزن ۰/۰۷۷ به عنوان پنجمین و آخرین مولفه در ظرفیت سازگاری استان همدان تعیین شد. در میان زیرمولفه‌های آن نیز اهمیت «بهره‌گیری از پیش بینی‌های آب و هوایی» با وزن ۰/۰۵۴ بیشتر از سایرین بوده است. این یافته نیز در تعدادی از تحقیقات دیگر تأیید شد (Streefkerk و همکاران، ۲۰۲۳؛ Pathak، ۲۰۲۳).

بحث

در تحقیق حاضر مهمترین نشانگرهای واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی‌آبی با استفاده از تکنیک دلفی در ۳ مرحله از دیدگاه ۱۶ نفر از کارشناسان ملی و خبرگان مجرب دانشگاهی برحسب تخصص (مدیریت آب کشاورزی، توسعه کشاورزی و روستایی و ترویج و آموزش کشاورزی) به صورت هدفمند شناسایی و انتخاب شدند. در مجموع ۱۷ مقوله به عنوان مهمترین نشانگرهای مورد اجماع نظر متخصصان این حوزه شناسایی شد که در ۵ مولفه اجتماعی، زراعی، اقتصادی-مالی، فنی-زیرساختی و نهادی طبقه‌بندی شدند.

مولفه اجتماعی: این مولفه با یافته‌های رضانی و همکاران (۱۴۰۰) و Jamshidi و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. براساس دیدگاه

متخصصان درک و دانش از تغییرات آب و هوایی، ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه، دلبستگی مکانی بهره‌برداران به واحدهای بهره‌برداری خود، نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی کشاورزان، بکارگیری دانش سنتی کشاورزی و مشارکت در فعالیت‌های سازمان‌های محلی از نشانگرهای مولفه اجتماعی واکاوی ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی با شرایط ناامنی‌آبی استان همدان هستند. نقش دانش در ظرفیت سازگاری کشاورزان حائز اهمیت است. بدین معنی که به هر میزان کشاورزان دانش بالاتری نسبت به علل، اثرات و روش‌های سازگاری داشته باشند، ظرفیت سازگاری‌شان نیز افزایش می‌یابد (Van Eck و همکاران، ۲۰۲۰). می‌توان گفت کشاورزانی که دانش و آگاهی بالاتری دارند تلاش بیشتری برای کاهش اثرات نامطلوب و آسیب‌ها خواهند داشت. بعبارت دیگر بکارگیری دانش، نقش مهمی در بهبود ظرفیت سازگاری در مقابله با کم‌آبی ایفا می‌کند (برزرگ و همکاران، ۱۳۹۷). ترویج شیوه‌های نوین مدیریت آب در مزرعه (آبیاری مدرن) سبب می‌شود تا زمینه بهبود ظرفیت سازگاری با شرایط ناامنی‌آبی در بخش کشاورزی مهیا شده و سازگاری بهتر از گذشته افزایش یابد. بسیاری از بهره‌برداران کشاورزی حس تعلق و دلبستگی مکانی بالایی دارند؛ چرا که آنان خاطرات خوبی از محل زندگی و مزرعه خود داشته و به راحتی حاضر به تغییر مکان خود نیستند. همین موضوع موجب بهبود ظرفیت سازگاری آنان و باقی ماندن در محیط روستایی می‌شود (Zobeidi و همکاران، ۲۰۲۲). نگرش‌ها، باورها و هنجارهای مساعد زیست‌محیطی کشاورزان یکی دیگر از مولفه‌های مهم ظرفیت سازگاری است. نگرش و باورهای کشاورزان و روستاییان در مورد محیط‌زیست همچون موفقیت در بخش کشاورزی، در آینده در گرو بکارگیری روش‌هایی از کشاورزی است که سازگار با طبیعت مزرعه باشد. لذا مزارع باید به شیوه‌ای کشت شوند که توانایی تولید آنها در درازمدت حفظ شود. بهره‌برداری از اراضی کشاورزی باید با توجه به حقوق نسل‌های آینده انجام شود تا ظرفیت سازگاری مناسبی از خود نشان دهند. مشارکت کشاورزان در فعالیت سازمان‌های محلی موجب درک عوامل و شرایطی می‌شود که افزایش روابط بین بخش‌های مختلف برای تبادل اطلاعات را در پی دارد و در نهایت بر توانمندسازی و ظرفیت سازگاری کشاورزان و روستاییان اثرات دوچندانی دارد. بنابراین مشارکت کشاورزان در غلبه بر مشکل کم‌آبی در رسیدن به اهداف مدیریت پایدار آب کشاورزی اثربخش خواهد بود.

مولفه زراعی: مولفه دیگری است که از دیدگاه متخصصان، حیاتی لحاظ شده است که با یافته‌های Zobeidi و همکاران (۲۰۲۲) و Dolan و همکاران (۲۰۲۱) منطبق است. آگاهی از آبیاری در زمان درست، تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی، مدیریت هرس آب‌ها به منظور آبشویی و کنترل نمک در خاک و استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی از نشانگرهای واکاوی ظرفیت

سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی در شرایط ناامنی آبی می‌باشند. مدیریت هرز آب‌ها به منظور آبشویی و کنترل نمک در خاک و بازگرداندن این گونه آب‌ها به چرخه تولید، راهکاری گریزناپذیر برای مدیریت آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. تنظیم زمان کشت براساس شرایط آب و هوایی با بروز رفتار سازگاری در ارتباط است. در صورتی که کشاورزان نسبت به نشانه‌های وقوع تغییرات آگاه باشند، رفتار سازگارتری را از خود نشان خواهند داد (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۲). بعبارت دیگر کشاورزانی که آگاهی بیشتری نسبت به تنظیم زمان کشت و تغییرات آب و هوایی دارند، نسبت به اثرات و نتایج آن آگاه بوده و خود را آماده مقابله با آن می‌کنند و در نهایت آمادگی ذهنی و عملی بیشتری برای پذیرش و اجرای روش‌های سازگاری در مقابله با ناامنی آبی در مزارع خواهند داشت (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۴۰۰). بسیاری از کشاورزان بر این باورند که استفاده از بذره‌های مصرفی در گذشته، باتوجه به کمبود شدید باران و آب‌های زیرزمینی، در شرایط موجود ممکن نیست و نیاز است از فناوری‌های جدید کشت بهره‌برد تا از ریسک کاسته شود؛ بنابراین استفاده از واریته‌های جدید مقاوم به خشکی ظرفیت سازگاری در مقابله با ناامنی آبی در مزرعه را افزایش می‌دهد (ارشادحسینی و همکاران، ۱۴۰۰). ضمن اینکه آگاهی از آبیاری در زمان درست و استفاده از روش‌های نوین آبیاری می‌تواند به کاهش مصرف آب و نهاده‌ها در سطح مزرعه بینجامد (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۷).

مولفه اقتصادی: مولفه دیگری است که با یافته‌های تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) و رمضان و همکاران (۱۴۰۰) هماهنگی دارد. براساس دیدگاه کارشناسان مجرب و متخصصان، بیمه محصولات استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی منجر به ظرفیت سازگاری با ناامنی آبی در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی می‌شود. بیمه محصولات کشاورزی یکی از موارد مهم کاهش ریسک در بخش کشاورزی محسوب می‌شود. بیمه محصولات کشاورزی از طریق جمع‌آوری حق بیمه‌های تولیدکنندگان و بهره‌گیری از یارانه دولت، اقدام به تأمین منبع مالی نموده و از آن برای پرداخت خسارت‌های احتمالی (بحران کم‌آبی) کشاورزان بیمه‌گذار استفاده می‌کند. بعبارت دیگر بیمه محصولات، ریسک ناشی از بروز بحران‌ها همچون ناامنی آبی در مزرعه را به حداقل رسانیده و بدین ترتیب ظرفیت سازگاری افزایش می‌یابد. علاوه بر موارد مذکور حمایت کشاورزان برای استفاده از تسهیلات و اعتبارات مرتبط با مدیریت خشکسالی کمک خواهد کرد تا شیوه‌های مدیریتی متفاوتی را برای مقابله با انواع مخاطرات در نظر بگیرند و ظرفیت سازگاری خود را در برابر ناامنی آبی افزایش دهند. در واقع، دسترسی به تسهیلات و اعتبارات، به کشاورزان و روستاییان کمک می‌کند تا بتوانند نهاده‌هایی از قبیل ارقام مقاوم و اصلاح‌شده را خریداری نمایند، قدرت خطرپذیری کشاورزان را برای سرمایه‌گذاری در بخش فناوری‌های جدید بالاتر خواهد برد و از طرفی کشاورزان از طریق بهره‌گیری از تسهیلات و

اعتبارات، راحت‌تر و به موقع قادر خواهند بود از خدماتی استفاده نمایند که توسط شرکت‌های مشاوره فنی و خدماتی کشاورزی ارائه می‌شوند (Jamshidi و همکاران، ۲۰۲۰).

مولفه فنی-زیرساختی: این مولفه با یافته‌های شفيعی و همکاران (۱۳۹۹) مطابق است. نشانگرهای مولفه فنی-زیرساختی در مزرعه شامل استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت، بهره‌گیری از پیش‌بینی‌های آب و هوایی و احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی جهت پخش سیلاب می‌باشند. دسترسی به اعتبارات عاملی مهم در استفاده از فناوری‌های مناسب در زمان کاشت، داشت و برداشت است؛ چرا که با منابع مالی بیشتر و سایر منابع در اختیار کشاورزان، آنها قادر به بهره‌گیری از فناوری‌های مناسب در پاسخ به تغییرات اقلیمی، ناامنی آبی و دیگر شرایط هستند که احتمال بکارگیری راهبردهای سازگاری در مزرعه بیشتر خواهد شد (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۱). اطلاع زارعان از شرایط آب و هوایی در فصل رشد، سازگاری با تغییرات اقلیمی (ناامنی آبی) در مزرعه را آسان‌تر می‌کند. این اطلاعات در صورتی می‌توانند کمک شایانی در تصمیم‌گیری‌ها داشته باشند که علوم کشاورزی و هواشناسی در کنار یکدیگر اقدام به پیش‌بینی کنند که جوابگوی بهتری برای نیاز آنان باشد (گودرزی، ۱۳۹۹). احداث بندهای ذخیره‌ای و انحرافی جهت پخش سیلاب را می‌توان در یک مخزن بسیار وسیع برای سال‌های متمادی و با تلفات تبخیر ناچیز ذخیره کرد و در سال‌های خشکسالی بعنوان یک منبع اضافی تأمین آب از آن استفاده نمود و ظرفیت سازگاری را در سال‌های مواجه با خشکسالی در مزارع ارتقاء بخشید (نکوئی و همکاران، ۱۳۹۹).

مولفه نهادی: مولفه دیگری است که از دیدگاه متخصصان ضروری لحاظ شده است که با یافته‌های Gilrein و همکاران (۲۰۲۱) و Thanvisitthpon و همکاران (۲۰۲۰) منطبق است. نشانگرهای مولفه نهادی شامل آگاهی کشاورزان و روستاییان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا و بهبود همکاری‌های سازمانی در سطح نهادهای دولتی به‌ویژه وزارت نیرو و جهاد کشاورزی است. آگاهی کشاورزان از سیاست‌ها و قانون‌های متعدد در حوزه آب و غذا بسیار اندک و اساساً هیچ معیار مشخصی ندارد. در نتیجه متولیان امور در حوزه‌های کشاورزی، روستایی و منابع آبی علاوه بر اجرای پروژه‌های زیربنایی برای تأمین، انتقال و مصرف آب بایستی ضمن در نظر گرفتن دانش بومی کشاورزان، تدابیر و برنامه‌هایی برای افزایش دانش آنها داشته باشند. در صورتی که کشاورزان آگاهی لازم را داشته باشند از هدررفت آب داخل مزرعه جلوگیری نموده و باعث اثربخشی و به نوعی بهبود ظرفیت سازگاری آنان می‌شود. بهبود همکاری‌های سازمانی در سطح نهادهای دولتی به‌ویژه وزارت نیرو و جهاد کشاورزی موجب بهبود ظرفیت سازگاری با ناامنی آبی در مزارع می‌شود؛ به این دلیل که وزارت نیرو در بخش حفاظت و حراست از منابع آبی نقش کلیدی ایفا می‌کند و وزارت

جهاد کشاورزی در جنبه مدیریت مصرف و بهره‌وری آب و توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در اراضی نقش اصلی را برعهده دارد. بنابراین این دو سازمان مکمل هم به‌منظور بهبود بهره‌وری آب می‌باشند (قطبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

توسعه هرچه بیشتر بخش کشاورزی و به‌تبع گام برداشتن در مسیر توسعه پایدار مستلزم استفاده درست و بهینه از منابع موجود می‌باشد. در این بین آب به‌عنوان منبع اصلی بخش کشاورزی جایگاهی ویژه و اهمیتی دوچندان دارد؛ چرا که بر توسعه کشاورزی پایدار بسیار تأثیرگذار است. بنابراین امنیت آبی، مهمترین راهبرد توسعه پایدار است. از راهکارهای بسیار مهم بهبود امنیت آبی در مزرعه، ظرفیت سازگاری است که به ظرفیت یک سامانه برای سازگارشدن در زمانی که موجودیت سامانه در حال تغییر است گفته شده و به ظرفیت سامانه‌های انسانی برای دستیابی به راهبردهای سازگار موفق اشاره دارد (Shikwambana و Malaza، ۲۰۲۲). باتوجه به نتایج مذکور، پیشنهادهای زیر به‌منظور بهبود ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی با شرایط ناامنی آبی ارائه می‌شود:

- به‌منظور بهبود ظرفیت سازگاری واحدهای بهره‌برداری کشاورزی با شرایط ناامنی آبی باید مهارت‌ها و دانش لازم برای بکارگیری روش‌ها و فناوری‌های جدید را به کشاورزان آموخت و از آنها حمایت‌های لازم را در ابعاد مالی و زیرساختی بعمل آورد. همچنین با توسعه و احیاء زیرساخت‌های مناسب و متناسب با شرایط محیطی و ارتقاء دانش فنی و تکنولوژیکی کشاورزان، می‌توان ظرفیت سازگاری کشاورزان نسبت به تغییر اقلیم را افزایش داد. بنابراین کلاس‌های آموزشی و عملیاتی به‌منظور آشناکردن کشاورزان با شیوه‌های مدیریت مزرعه و سازگاری با تغییر اقلیم از سوی سازمان‌های ذیربط برگزار شود. همچنین اطلاعات درست و دقیق هواشناسی از روش‌های مختلف ارتباطی برای کشاورزان ارائه شود. - به‌منظور حمایت از معیشت کشاورزان در واحدهای بهره‌برداری کشاورزی استفاده از اعتبارات خرد و اعطای تسهیلات سازگاری با ناامنی آبی همچون اعتبارات خشکسالی بطور مستقیم به کشاورزان یا تشکلهای آنها در قالب پروژه‌های تعریف شده توسعه روستایی، تأسیس صندوق‌های اعتباری خرد و تخصیص اعتبارات کم‌بهره توصیه می‌شود.

- روی آوردن به کشت فراسرزمینی و واردکردن برخی محصولات پرآب بر تنوع‌بخشی به فعالیت‌های مرتبط با بخش کشاورزی، ایجاد هم‌افزایی و هماهنگی بین دستگاه‌های اجرایی، تحقیقاتی، ترویجی و آموزشی جهت کاربردی نمودن نتایج حاصل از تحقیقات، اصلاح ساختار و بازاریابی و توسعه عرضه مستقیم تولیدات روستائیان با هدف حذف افراد سودجو و تفکیک حدود وظایف سازمان‌های

دست‌اندرکار آب با هدف جلوگیری از موازی‌کاری و هدررفت سرمایه‌های مالی و انسانی و اصلاح برخی قوانین مربوط به منابع طبیعی از دیگر پیشنهادات است که به بهره‌برداری پایدار از منابع آب در بخش کشاورزی کمک می‌کند.

- ترغیب کشاورزان به کشت گیاهان کم‌آب‌بر و سازگار با کیفیت آب و خاک منطقه، توسعه کشت گیاهان دارویی به‌دلیل سازگاری و ارزش افزوده بالا، کشت گیاهان با ارزش صادراتی بالا با هدف افزایش درآمد و بهبود وضعیت اقتصادی کشاورزان می‌تواند بسیار راهگشا باشد. از طرفی پرورش دام و طیور متناسب با شرایط منطقه از جمله پرورش شترمرغ که مصرف آب کمتری داشته و درآمدزایی بالایی نیز دارند را می‌توان توصیه کرد.

- کشاورزان می‌توانند با استفاده از تجربیات، آگاهی و دانش بومی در زمینه آبیاری بهینه، اقدام به مدیریت بهینه منابع آب به‌صورت کاملاً خودجوش و مردمی نموده که در نهایت منجر به کاهش مصرف و اتلاف آب (ناامنی آبی) و افزایش تولید، اشتغال و درآمد شود.

منابع

- ابراهیمی، ثریا، رحمانی‌فضلی، عبدالرضا، و عزیزپور، فرهاد. (۱۴۰۱). عوامل موثر بر سازگاری سکونتگاه‌های روستایی با بحران آب دریاچه ارومیه (مورد مطالعه: شهرستان میاندوآب). مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، ۱۲(۱)، ۱۲-۱. [doi: 10.52547/gasma.2.1.1](https://doi.org/10.52547/gasma.2.1.1)
- ارشادحسینی، محدثه، کشتکار، امیررضا، حسینی، سیدموسی، وافضلی، علی. (۱۴۰۰). تجزیه و تحلیل روند تغییرات زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از آزمون ناپارامتری من‌کندال و روش تخمین گر شیب سن (نمونه پژوهش: دشت یزد-اردکان). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۲(۴)، ۸۷-۱۰۶. <https://doi.org/10.22108/gep.2021.127620.1404>
- برزگر، مریم، قربانی، مهدی، و حسینی گزیز، عبدالواحد. (۱۳۹۷). تحلیل دانش بومی و ابتکارات محلی سازگاری در مدیریت منابع آب (منطقه مورد مطالعه: دشت گزیز). پژوهش‌های انسان‌شناسی ایران، ۸(۲)، ۹۹-۱۲۱. <https://doi.org/10.22059/ijar.2019.71600>
- تقی‌پور، مهدی، خلیقی سیگارودی، شهرام، و علم بیگی، امیر. (۱۳۹۸). سنجش و اولویت‌بندی مؤلفه‌های ظرفیت سازگاری جوامع محلی در مواجهه با تغییر اقلیم (منطقه مورد مطالعه: شهرستان گناباد). مرتع و آبخیزداری، ۷۲(۲)، ۵۴۳-۵۵۶. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.246184.1192>
- رحمانی، صادق، یزدان پناه، مسعود، فروزانی، معصومه، و عبدشاهی، عباس. (۱۳۹۷). بررسی باورها و راهبردهای سازگاری کشاورزان با شرایط کمبود آب و عوامل موثر بر آنها در شهرستان ممسنی. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۲(۲)، ۳۲۱-۳۴۰. <https://doi.org/10.22092/jwra.2018.116973>
- رمضانی، محمدحسین، افخمی، مریم، و زهرائی، بنفشه. (۱۴۰۰). ارزیابی ظرفیت سازگاری کشاورزان در برابر افت کمی و کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دهستان قنات). مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۲)، ۳۷۵-۳۸۹. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.327436.902>

زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۲). بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر امنیت آبی در ایران. آب و توسعه پایدار، ۱۰(۱)، ۳۷-۴۴. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i1.2301-1210>

سواری، مسلم، و شوکتی آملانی، محمد. (۱۳۹۸). شناسایی راهکارهای سازگاری کشاورزان خرده‌پا در مقابله با خشکسالی در استان آذربایجان غربی. برنامه‌ریزی فضایی، ۹(۴)، ۱۷-۴۲. <https://doi.org/10.22108/sppl.2019.116467.1373>

شعبانعلی فمی، حسین، قارون، زهرا، و قاسمی، جواد. (۱۳۹۱). مدیریت نظام‌های بهره‌برداری کشاورزی در ایران. انتشارات سرو، تهران، ایران. شفیعی، فاطمه، جعفری صیادی، فاطمه، و نوری درزیکلایی، پریسا. (۱۳۹۹). شناسایی چالش‌ها و الزامات مدیریت بهینه آب در کشاورزی (مورد مطالعه: استان مازندران). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۴)، ۲۷۲-۲۸۸. <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.110310>

قطبی‌زاده، مهسا، باقری، علی، و عباسی، عنایت. (۱۳۹۷). ارزیابی ظرفیت سازگاری نهادهای سازمان‌های محلی در برابر کمبود منابع آب در حوضه آبریز طشک-بختگان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۴)، ۲۵-۳۱. https://www.iwrr.ir/article_60134.html

کریمی، مصطفی، شریفی، لیلا، و ترکمن، مرتضی. (۱۴۰۰). ارزیابی آثار اقتصادی تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی استان فارس. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۲(۱)، ۱۱۹-۱۳۶. <https://doi.org/10.22108/gep.2021.122484.1290>

کشاورز، مرضیه. (۱۳۹۷). واکاوی میزان انطباق راهبردهای مدیریت کشاورزی با تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان فارس. علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، ۱۴(۲)، ۱۰۷-۱۳۳. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0558-8>

گودرزی، زهرا، عباسی، عنایت و فرهادیان، همایون. (۱۳۹۷). دستیابی به اجماع برای مسائل روش شناختی در تکنیک دلفی. مجله بین‌المللی مدیریت و توسعه کشاورزی، ۸(۲)، ۲۱۹-۲۳۰.

گودرزی، مصطفی. (۱۳۹۹). آشنایی با تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر مصرف آب در کشاورزی. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، دفتر شبکه دانش و رسانه‌های ترویجی، موسسه آموزش و ترویج آموزش کشاورزی.

محمودی ممتاز، اعظم، چوپچیان، شهلا، و فرهادیان، همایون. (۱۳۹۹). عوامل موثر بر ادراک و رفتار سازگاری کشاورزان در پاسخ به تغییرات اقلیمی در استان همدان، ایران. مجله بین‌المللی علوم و فناوری کشاورزی، ۲۲(۴)، ۹۰۵-۹۱۷.

معتقد، مهسا، اسدی، علی، شعبانعلی فمی، حسین، و کلانتری، خلیل. (۱۴۰۱). مطالعه درک معنایی کشاورزان از تغییر اقلیم در واحدهای بهره‌برداری کوچک مقیاس در استان همدان. توسعه محلی (روستائی-شهری)، ۱۴(۱)، ۲۳۳-۲۵۳. <https://doi.org/10.22059/jrd.2022.340861.668711>

نکوئی، ریحانه، جمالی، سعید، و آقایی، محمد مهدی. (۱۳۹۹). بررسی برخی تجربیات در پخش سیلاب به عنوان روشی موثر در استفاده از آب‌های نابهنگام. نخبگان علوم و مهندسی، ۲۳، ۹۹-۱۰۸.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۱-۱۴۰۰). سیمای کشاورزی ایران. ظرفیت‌ها،

تولیدات و اهم اطلاعات کشاورزی کشور و استان‌ها در یک نگاه. انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. <https://www.areeo.ac.ir>

یزدان‌پناه، مسعود، میرزایی، عباس، زبیدی، طاهره، سواری ممینی، آمنه، و همایون، سیده کبری. (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی و روان‌شناختی بر پذیرش رفتارهای سازگاری با کم‌آبی. تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۳(۳)، ۱-۱۷. <https://doi.org/10.30495/jae.2021.4533>

Akinyemi, P. A., Afolabi, O. T., & Aluko, O. O. (2022). The effects of seasonal variations on household water security and burden of diarrheal diseases among under 5 children in an urban community, Southwest Nigeria. BMC Public Health, 22(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-13701-z>

Awazi, N. P. (2022). Assessing the role of irrigation as an adaptive measure to climate change induced water insecurity: A case study of the market gardening sector in parts of the northwest and west regions of Cameroon. Frontiers in Water, 4, 902438. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.902438>

Basel, B., Goby, G., & Johnson J. (2020). Community-based adaptation to climate change in villages of Western Province. Solomon Islands. Marine Pollution Bulletin, 156. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111266>

Bhusal, K., Udas, E., & Bhatta, L. D. (2022). Ecosystem-based adaptation for increased agricultural productivity by small-holder farmers in Nepal. Plos one, 17(6), 269586. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269586>

Burgess, A. J., Cano, M. E. C., & Parkes, B. (2022). The deployment of intercropping and agroforestry as an adaptation to climate change. Crop and Environment, 1(2), 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.05.001>

Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P., & Edmonds, J. (2021). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. Nature communications, 12, 1915. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>

Fahad, S., Su, F., & Wei, K. (2023). Quantifying households' vulnerability, regional environmental indicators, and climate change mitigation by using a combination of vulnerability frameworks. Land Degradation & Development, 34(3), 859-872. <https://doi.org/10.1002/ldr.4501>

Feliciano, D., Hunter, C., Slee, B., & Smith, P. (2014). Climate change mitigation options in the rural land use sector: Stakeholders' perspectives on barriers, enablers and the role of policy in north east Scotland. Environmental Science & Policy, 44, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.07.010>

Gameda, C., Gelata, F. T., & Jiqin, H. A. N. (2022). Review of

- world: Global solutions. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104137. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03475-3>
- Leal Filho, W., Totin, E., Franke, J. A., Andrew, S. M., Abubakar, I. R., Azadi, H., & Global Adaptation Mapping Initiative Team. (2022). Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa. *Science of the Total Environment*, 806, 150420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150420>
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. D. S., & Bender, F. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1), e17. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>
- Mc Kenna, H., Hasson, F., & Smith, M. (2002). A Delphi survey of midwives and midwifery students to identify non-midwifery duties. 18, 314-322. <https://doi.org/10.1054/midw.2002.0327>
- Mugejo, K., & Ncube, B. (2022). Determinants of water security in smallholder farming systems in South Africa: A review. *Fundamental and Applied Agriculture*, 7(3), 235–249. <https://doi.org/10.5455/faa.81266>
- Munir, N., Hasnain, M., Roessner, U., & Abideen, Z. (2022). Strategies in improving plant salinity resistance and use of salinity resistant plants for economic sustainability. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(12), 2150-2196. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1877033>
- Murmu, K., Das, P., Sarkar, A., & Bandopadhyay, P. (2022). Organic agriculture: as a climate change adaptation and mitigation strategy. *Zeichen J*, 8(3), 171-187. <https://doi.org/10.12944/CARJ.1.1.06>
- Nguyen, T. H., Sahin, O., & Howes, M. (2021). Climate change adaptation influences and barriers impacting the Asian agricultural industry. *Sustainability*, 13(13), 7346. <https://doi.org/10.3390/su13137346>
- Nhamo, L., Ndlela, B., Mpandeli, S., & Mabhaudhi, T. (2020). The water-energy-food nexus as an adaptation strategy for achieving sustainable livelihoods at a local level. *Sustainability*, 12(20), 8582-8596. <https://doi.org/10.3390/su12208582>
- Parmar, L.D. & Vaghela, G.K. (2023). Winter School on Water Productivity Enhancement in Scarcity Zones: Approaches and Applications. Conference: Biotechnological Interventions in agriculture for enhancement of water productivity. Sardarkrushinagar, Banaskantha, Gujarat, India. <https://www.researchgate.net/publication/368831859>
- Pathak, H. (2023). Impact, adaptation, and mitigation of climate change in Indian agriculture. *Environmental Monitoring*
- adoption and impact assessment on conservation agriculture in Ethiopia. *International Journal of Marketing & Human Resource Research*, 3(4), 203-210. <https://doi.org/10.47747/ijmhrrv3i4.858>
- Gilrein, E. J., Carvalhaes, T. M., Markolf, S. Chester, M. V., Allenby, B. R., & Garcia, M. (2021). Concepts and practices for transforming infrastructure from rigid to adaptable. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 6(3-4), 213-234. <https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1599608>
- Hailu, R., Tolossa, D., & Alemu, G. (2022). Household water security index: development and application in the Awash Basin of Ethiopia. *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 185-201. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1755300>
- Hawkins, P., Geza, W., Mabhaudhi, T., Sutherland, C., Queenan, K., Dangour, A., & Scheelbeek, P. (2022). Dietary and agricultural adaptations to drought among smallholder farmers in South Africa: a qualitative study. *Weather and Climate Extremes*, 35, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100413>
- Holman, I. P., & Knox, J. W. (2023). Research and policy priorities to address drought and irrigation water resource risks in temperate agriculture. *Cambridge Prisms: Water*, 1, e7. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.7>
- Jamshidi, O., Asadi, A., Kalantari, Kh., Moghaddam, S. M., Dadrass, J. F., Azadi, H., Van Passel, S., & Witlox, F. (2020). Adaptive capacity of smallholder farmers toward climate change: Evidence from Hamadan province in Iran. *Climate and Development*, 12(10), 923– 933. <https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1710097>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Kelly, T. D., Foster, T., & Schultz, D. M. (2023). Assessing the value of adapting irrigation strategies within the season. *Agricultural Water Management*, 275, 107986. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107986>
- Khalili, N. M., Arshad, Z., Farajzadeh, H., Kächele, K., & Müller, Y. (2020). Effect of drought on smallholder education expenditures in rural Iran: policy Implications. *Journal of Environmental Management*, 260, 110136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110136>
- Koop, S. H., Grison, C., Eisenreich, S. J., Hofman, J., & van Leeuwen, K. (2022). Integrated water resources management in cities in the

- nique: A research strategy for career and technical education. *Journal of Career and Technical Education*, 20(2), 55-67. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1069510.pdf>
<https://doi.org/10.21061/jcte.v20i2.636>
- Streefkerk, I. N., De Bruijn, J., Haer, T., Van Loon, A. F., Quichimbo, E. A., Wens, M., Hassaballah, K., & Aerts, J. C. J. H. (2023). A coupled agent-based model to analyse human-drought feedbacks for agropastoralists in dryland regions. *Frontiers in Water*, 4, 1037971. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.1037971>
- Thanvisitthpon, N., Shrestha, S., Pal, I., Ninsawat, S., & Chaowiwat, W. (2020). Assessment of flood adaptive capacity of urban areas in Thailand. *Environmental Impact Assessment Review*, 81, 106363. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106363>
- Trinh, T. Q., Rañola, R. F., Camacho, L. D., & Simelton, E. (2018). Determinants of farmers' adaptation to climate change in agricultural production in the central region of Vietnam. *Land Use Policy*, 70, 224-231. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.023>
- Van Eck, G., Brands, T., Wismans, L. J. J., Pel, A. J., & van Nes, R. (2020). Model complexities and requirements for multimodal transport network design: Assessment of classical, state-of-the-practice, and state-of-the-research models. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1, 2429. <https://doi.org/10.3141/2429-19>
- Wu, H., Guo, S., Guo, P., Shan, B., & Zhang, Y. (2022). Agricultural water and land resources allocation considering carbon sink/source and water scarcity/degradation footprint. *Science of the Total Environment*, 819, 152058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152058>
- Zarei, Z., Karami, E., & Keshavarz, M. (2020). Co-production of knowledge and adaptation to water scarcity in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 262, 110283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110283>
- Zelege, T., Beyene, F., Deressa, T., Yousuf, J., & Kebede, T. (2022). Smallholder farmers' perception of climate change and choice of adaptation strategies in East Hararghe Zone, Eastern Ethiopia. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 15(4), 515-536. <https://doi.org/10.1108/ijccsm-01-2022-0014>
- Zobeidi, T., Yaghoubi, J., & Yazdanpanah, M. (2022). Farmers' incremental adaptation to water scarcity: An application of the model of private proactive adaptation to climate change (MPPACC). *Agricultural Water Management*, 264, 107528. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107528>
- and Assessment, 195, 52. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10537-3>
- Ricart, S., Castelletti, A., & Gandolfi, C. (2022). On farmers' perceptions of climate change and its nexus with climate data and adaptive capacity. A comprehensive review. *Environmental Research Letters*, 17(8), 083002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac810f>
- Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: Biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6), 63008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>
- Sathre, R., Antharam, S. M., & Catena, M. (2022). Water security in South Asian cities: a review of challenges and opportunities. *CivilEng*, 3(4), 873-894. <https://doi.org/10.3390/civileng3040050>
- Savari, M., & Shokati Amghani, M. (2022). SWOT-FAHP-TOWS analysis for adaptation strategies development among small-scale farmers in drought conditions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102695. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102695>
- Schneider, P., & Asch, F. (2020). Rice production and food security in Asian Mega deltas A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(4), 491-503. <https://doi.org/10.1111/jac.12415>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shikwambana, S., & Malaza, N. (2022). Enhancing the resilience and adaptive capacity of smallholder farmers to drought in the Limpopo Province, South Africa. *Conservation*, 2(3), 435-449. <https://doi.org/10.3390/conservation2030029>
- Sikka, A. K., Alam, M. F., & Mandave, V. (2022). Agricultural water management practices to improve the climate resilience of irrigated agriculture in India. *Irrigation and Drainage*, 71, 7-26. <https://doi.org/10.1002/ird.2696>
- Singh, R.K., Zander, Kk., Kumar, S., Singh, A., Sheoran, P., Kumar, A., & Padung, E. (2017). Perceptions of climate variability and livelihood adaptations relating to gender and wealth among the Adi community of the Eastern Indian Himalayas. *Applied Geography*, 86(4), 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.06.018>
- Stitt-Gohdes, W. L., & Crews, T. B. (2004). The Delphi tech-

Statistical Downscaling of General Circulation Models (GCMs); History, Principles, and Methods

D. Yazdani¹, A. Zarrin^{2*}, A. A. Dadashi-Roudbari³

1, 2, 3- MSc student, Associate Professor and Postdoctoral Researcher of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: zarrin@um.ac.ir)

Received: 16-01-2024

Revised: 06-04-2024

Accepted: 17-04-2024

Available Online: 29-08-2024

مقیاس‌کاهی آماری مدل‌های گردش کلی (GCMs): تاریخچه، اصول و روش‌ها

دینا یزدانی^۱، آذر زرین^{۲*}، عباسعلی داداشی‌رودباری^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشیار اقلیم‌شناسی و پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: zarrin@um.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

Abstract

The climate system is very complex and has made the modeling and predicting/projecting face many challenges. Although climate variability may be detected and identified through a time series of observations, it cannot express the interaction of various components of the Earth's climate system. General circulation models (GCMs) are essential for simulating the physical processes governing the atmosphere and the interaction of the components involved in the Earth's climate system. Statistical downscaling extracts empirical relationships between small-scale observational variables (often at the station level) and the direct GCM output by applying three approaches: Perfect Prognosis (PP), Model Output Statistics (MOS), and Weather Generators (WGs). Bias correction, widely used in climate change studies, is the MOS statistical downscaling approach. To clarify the role of using the inappropriate method and software in increasing uncertainty, two scaling methods from the model output statistics (MOS) approach are compared to correct the bias of the minimum and maximum temperatures. In this research, the outputs of R and CMhyd software are compared to check the uncertainty caused by using inappropriate software. The output of the EC-Earth3-CC model for two variables of the minimum and maximum temperatures was examined using CMhyd and R software. Examining the results showed that the CMhyd software has a significant error in both extracting the direct model output and the bias correction method. For example, the PBIAS of direct output of maximum temperature in Abadan was 2.10%, while CMhyd software gives 5.10%. The result of this research shows the need to use the correct methods and software for processing the output of GCMs.

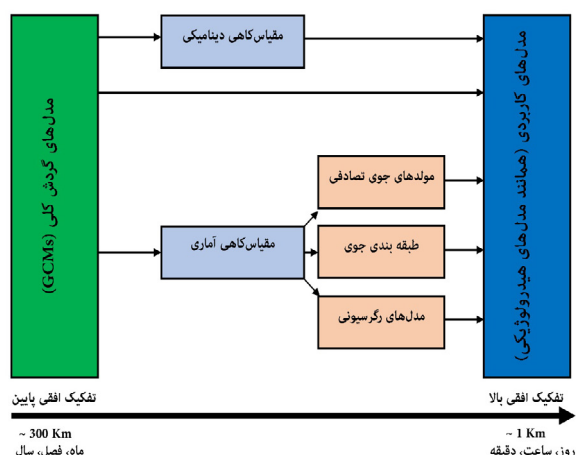
Keywords: Statistical Downscaling, Model Output Statistics (MOS), Bias Correction, CMhyd Software.

چکیده

مقیاس‌کاهی روشی برای برآورد اقلیمی با تفکیک افقی بالا از برون‌داد مدل‌های گردش کلی (GCM) با تفکیک نسبتاً پایین است. مقیاس‌کاهی آماری، روابط آماری بین متغیرهای مشاهداتی در مقیاس کوچک (اغلب در سطح ایستگاه) و برون‌داد مستقیم مدل‌ها در مقیاس بزرگتر را با استفاده از سه رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP)، آماره‌های برون‌داد مدل (MOS) و مولدهای جوی (WGs) استخراج می‌کند. تصحیح اریبی که به شکل گسترده در مطالعات تغییر اقلیم استفاده می‌شود رویکرد MOS از مقیاس‌کاهی آماری است. باید توجه داشت که ارزش افزوده‌ای که در مقیاس‌کاهی‌ها به دست می‌آید، توسط روش‌های تصحیح اریبی به دست نمی‌آید. فارغ از عدم قطعیت ذاتی مدل‌ها، به‌کارگیری یک روش و یا یک نرم‌افزار نامناسب نیز ممکن است باعث افزایش اریبی در برون‌داد مدل‌ها شود. در پژوهش حاضر برون‌داد مدل EC-Earth3-CC برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه با نرم‌افزار CMhyd و زبان برنامه‌نویسی R مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد نرم‌افزار CMhyd چه در استخراج برون‌داد مستقیم و چه پس از انجام فرایند تصحیح اریبی، خطای قابل توجهی دارد. برای نمونه درصد اریبی برون‌داد مستقیم دمای بیشینه در آبادان ۲/۱۰ درصد بوده است در حالی که در نرم‌افزار CMhyd، ۵/۱۰ درصد به دست آمد. نتیجه این پژوهش لزوم به‌کارگیری صحیح روش‌ها و نرم‌افزارهای پردازش برون‌داد GCMs را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مقیاس‌کاهی آماری، آماره‌های برون‌داد مدل (MOS)، تصحیح اریبی، نرم‌افزار CMhyd.

و منطقه‌ای نیستند. همچنین این مدل‌ها نمی‌توانند به طور دقیق فرایندهای کوچک مقیاس همانند همرفت^۴ را شبیه‌سازی کنند، لذا در مقیاس‌های کوچک با چالش‌های زیادی همراه هستند (Schoof, ۲۰۱۳). چالش‌های فوق سبب شده است تا ایده مقیاس‌کاهی^۵ (همچنین در برخی از منابع با عنوان ریزمقیاس‌نمایی نیز شناخته می‌شود) به‌عنوان روشی برای پر کردن شکاف بین تفکیک افقی پایین مدل‌های گردش کلی و مقیاس‌های کوچک‌تر (برای ارزیابی منطقه‌ای و پیامدهای اقلیم) شده است. به عبارت ساده‌تر مقیاس‌کاهی روشی برای تبدیل خروجی GCMs به مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی است. به‌طورکلی مقیاس‌کاهی شامل دو رویکرد بنیادین آماری و دینامیکی است. شکل (۱) دو نوع مقیاس‌کاهی آماری و دینامیکی را به همراه مهمترین روش‌های مقیاس‌کاهی آماری نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، مقیاس‌کاهی می‌تواند از دو جنبه مکانی و زمانی بر برون‌داد مستقیم مدل‌های گردش کلی تأثیر بگذارد.



شکل ۱- رویکردهای مقیاس‌کاهی آماری و دینامیکی

مقیاس‌کاهی آماری یک روش تجربی بر اساس روابط آماری بین برون‌داد مستقیم مدل‌های گردش کلی و اقلیم محلی (عموماً ایستگاه) است که برای انجام آن می‌توان از نرم افزارهای متداول در این حیطه مانند نرم افزار SDSM^۶ استفاده کرد. مقیاس‌کاهی آماری، فرایندهای فیزیکی جو و شرایط جغرافیایی منطقه را در برون‌داد مقیاس‌کاهی در نظر نمی‌گیرد و تنها از داده‌های اقلیمی مشاهداتی در مکان‌های منتخب (در سطح یک ایستگاه) استفاده می‌کند که یکی از محدودیت‌های این رویکرد نسبت به مقیاس‌کاهی دینامیکی است. این روش به دلیل سهولت به‌کارگیری، هزینه محاسباتی پایین‌تر و دانش فنی کمتر نسبت به مقیاس‌کاهی دینامیکی، بیشتر مورد توجه است.

مقیاس‌کاهی دینامیکی از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM)^۷

سامانه اقلیم^۱ بسیار پیچیده است و این ویژگی باعث شده مدل‌سازی آن با چالش‌های بسیاری مواجه باشد. اگرچه بسیاری از پژوهشگران قادر به تشخیص و شناسایی تغییرات در سری زمانی متغیرهای اقلیمی از طریق مشاهدات هستند، اما مشاهدات به‌تنهایی نمی‌توانند بیانگر بر همکنش مولفه‌های مختلف زیرسامانه‌های اقلیم باشند. سامانه اقلیم صرفاً به بررسی متغیرهای اقلیمی جو (به‌عنوان یکی از زیر سامانه‌ها) محدود نمی‌شود، بلکه بررسی متغیرهای چهار زیر سامانه دیگر شامل سنگ‌سپهر، یخ سپهر، زیست‌سپهر و آب‌سپهر ضروری است (Trenberth, ۱۹۹۲). از طرف دیگر، شناسایی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای آن نیازمند پیش‌نگری اقلیم آینده است. برای شناسایی سامانه اقلیم و تغییرات آن در آینده به‌کارگیری مدل‌های گردش کلی (GCMs)^۲ ضروری است. در دهه ۱۹۵۰ با گسترش رایانه‌ها، مدل‌های اقلیمی قادر به شبیه‌سازی پاسخ گردش جو در کنار توسعه سامانه‌های پیش‌بینی عددی وضع جوی شدند. مدل‌های اقلیمی شبیه‌سازی‌هایی را از جو به‌واسطه قوانین بنیادی فیزیک ارائه می‌کنند. این مدل‌ها جو، اقیانوس‌ها، خشکی‌ها، زیست‌سپهر و یخ سپهر را به نقطه شبکه‌های مختلفی تقسیم می‌کنند و سپس از معادلات مختلف برای شبیه‌سازی هر یک از مولفه‌های فوق استفاده می‌کنند. شبیه‌سازی‌ها در مقیاس زمانی مختلف برای هر نقطه شبکه طی ساعت‌ها تا دهه‌ها اجرا و بررسی می‌شود (Society, ۲۰۲۱).

مدل‌های گردش کلی به طور گسترده برای مطالعات سامانه اقلیم زمین، وردایی^۳ و پاسخ آن به واداشتهای مختلف به کار می‌روند (Boer و Lambert, ۲۰۰۱). این مدل‌ها ضمن ارائه فرمول‌بندی‌های عددی و طرح‌واره‌های فیزیکی پیچیده از جو، اقیانوس، یخ سپهر و زمین، در حالت جفت شده (جو-اقیانوس) با یکدیگر بر همکنش دارند که از آن‌ها برای شبیه‌سازی سامانه سه بعدی اقلیم استفاده می‌شود (Meehl و همکاران ۱۹۹۷). مدل‌های گردش کلی در چند دهه اخیر علاوه بر توسعه قابل‌توجه ساختار فیزیکی، پیشرفت زیادی را در گام زمانی (روزانه تا فصلی و دهه‌ای) داشته‌اند. این پیشرفت‌ها علاوه بر اینکه کمک شایان توجهی را به تصمیم‌گیری‌ها، تدوین استراتژی‌ها و سیاست‌گذاری‌های مناسب کرده است، پایه و اساس مباحث کلیدی تغییر اقلیم، همانند تعدیل و سازگاری را نیز فراهم کرده‌اند (Navarra, ۲۰۲۱).

بیشتر دانش ما از اقلیم آینده حاصل پیش‌نگری‌های مدل‌های گردش کلی است. باوجوداینکه این مدل‌ها منبع اصلی اطلاعات ما از اقلیم آینده هستند، اما به دلیل تفکیک افقی پایین، قادر به فراهم کردن اطلاعات دقیق در مقیاس محلی

برای شبیه‌سازی جو و جفت‌شدن آن با مولفه‌های سطح زمین با تفکیک افقی بالا، اما در یک قلمرو^۸ محدود استفاده می‌کند. در این رویکرد شرایط مرزی می‌تواند از یک GCM یا حتی یک مجموعه داده بازتحلیل گرفته شود. به عبارت دیگر مقیاس‌کاهی دینامیکی با اجرای مجدد یک مدل اقلیمی در منطقه‌ای محدود، سعی دارد از طریق لحاظ نمودن شرایط آغازگری به این فرایند ارزش‌افزوده داده و خروجی‌های نسبتاً نزدیک به مشاهدات را فراهم آورد. شرایط آغازگری شامل ارائه جغرافیای دقیقی از منطقه با درنظرگرفتن داده‌هایی همچون توپوگرافی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، دمای سطح آب و نوع و رطوبت خاک است (Neelin, 2010). هر چند که مقیاس‌کاهی دینامیکی ارزش افزوده زیادی برای استفاده از GCMs تولید می‌کند؛ اما به دلایل بسیاری از جمله دانش فنی پیچیده و هزینه محاسباتی سنگین، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شایان‌ذکر است که مقیاس‌کاهی دینامیکی در ابتدا بیشتر توسط هواشناسان برای پیش‌بینی عددی جو (NWP)^۹ مورد استفاده قرار گرفت و سپس به تدریج توسط اقلیم‌شناسان با استفاده از مدل‌هایی همانند RegCM^{۱۰} و WRF^{۱۱} به کار گرفته شد.

تاریخچه مقیاس‌کاهی

اولین روش‌های مقیاس‌کاهی در اواخر دهه ۱۹۴۰ توسط Klein (۱۹۴۸) ابداع و همگام با سال‌های اولیه توسعه مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع جو (NWP) در اواخر دهه ۱۹۵۰ عملیاتی شد. قبل از عملیاتی شدن مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع جو، تفکیک افقی این مدل‌ها برای پیش‌بینی اقلیم پایین‌تر از آن بود که بتوان به واسطه آن‌ها متغیرهای مورد نظر را پیش‌بینی نمود، لذا این نسل از مدل‌ها تعداد محدودی از متغیرها، مانند فشار و دما را ارائه می‌دادند. در اواخر دهه ۱۹۵۰، داده‌های مشاهداتی نسبتاً خوبی به شکل سری‌های زمانی در دسترس بود. Klein و همکاران (۱۹۵۹) از این داده‌ها برای کشف روابط آماری بین گردش بزرگ مقیاس شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی در مقیاس منطقه‌ای استفاده کردند. ایشان از یک مدل آماری برای مقیاس‌کاهی برون داد پیش‌بینی گردش بزرگ مقیاس شبیه‌سازی شده و تعمیم نتایج آن به مقیاس منطقه‌ای استفاده کردند. فرض کلیدی این رویکرد این بود که پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس، کاملاً به واسطه مدل عددی پیش‌بینی می‌شود و از این‌رو، این رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP)^{۱۲} نامیده شد. جمع‌آوری این پیش‌بینی‌ها بعدها پایگاه داده نسبتاً خوبی را فراهم کرد که تحلیل آن‌ها کلیدی برای مطالعات بعدی شد. تحلیل پیش‌بینی‌ها نشان داد:

۱- پیش‌بینی‌های عددی کامل نیستند و ۲- این پیش‌بینی‌ها نسبت به مشاهدات، اریبی سیستماتیک دارند (Maraun و Widmann, 2018). یک پرسش اساسی مطرح شد که چگونه می‌توان اریبی سیستماتیک مدل‌ها را تا حد امکان کاهش داد و یا تصحیح کرد.

Lowry و Glahn (۱۹۷۲) رویکرد جدیدی را توسعه دادند. در این رویکرد از آرشیو پیش‌بینی‌های عددی برای واسنجی^{۱۳} پیش‌بینی‌کننده‌ها استفاده شد. از آنجایی‌که این رویکرد یک پس پردازش از مدل‌های عددی است، با عنوان آماره‌های برون داد مدل (MOS)^{۱۴} نامیده شد. مزیت کلیدی رویکرد MOS، اعمال تصحیح اریبی^{۱۵} بر روی برون داد GCM است. سامانه‌های پیش‌بینی جوی فعلی از رویکردهای پیچیده MOS با چندین پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌کنند که به‌طور مداوم برای افزایش مهارت پیش‌بینی استفاده می‌شوند.

به موازات رویکرد آماره‌های برون داد مدل (MOS)، رویکردهای عددی دیگری برای بهبود تفکیک افقی و دقت در پیش‌بینی‌ها توسعه داده شد. اولین مدل منطقه محدود در مرکز ملی تحقیقات علوم جوی ایالات متحده آمریکا توسعه یافت و در سال ۱۹۷۱ عملیاتی شد. این مدل در بر گیرنده ایالات متحده آمریکا، کانادا و اقیانوس منجمد شمالی بود. تفکیک افقی این مدل ۱۹۰/۵ کیلومتر و تا عرض ۶۰ درجه شمالی را پوشش می‌داد. یک دهه بعد Gates (۱۹۸۵) اولین بحث مفهومی را از مقیاس‌کاهی منتشر نمود. وی اولین کسی بود که واژه Downscale یا مقیاس‌کاهی را ارائه کرد. با مطرح شدن ایده مقیاس‌کاهی توسط گتس در سال ۱۹۸۵ این رویکرد از آغاز تا به امروز به دو گروه مقیاس‌کاهی‌های دینامیکی و آماری تقسیم بندی شده‌است که پیش‌تر مورد بحث قرار گرفت.

اولین پیش‌نگری‌های اقلیمی بر پایه مدل‌های گردش کلی (GCMs) توسط Manabe و Wetherald (۱۹۷۵) منتشر شد که بیشتر برای درک پاسخ اقلیم جهانی به واداشت‌های خارجی طراحی شده بود. در دهه ۱۹۸۰ با شروع به کار برنامه تحقیقات جهانی اقلیم (WCRP)^{۱۶}، توجه به پیش‌نگری‌های اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای هم‌زمان با آگاهی پژوهشگران از پیامدهای احتمالی تغییر اقلیم شکل گرفت. درک تغییرات بالقوه اقلیم و پیامدهای آن در مقیاس منطقه‌ای و برنامه‌ریزی برای سازگاری با تغییر اقلیم به‌عنوان محرکی جدی باعث شد تا رویکردهای مقیاس‌کاهی برای پیش‌نگری‌های اقلیمی توسعه پیدا کنند (Manabe و Wetherald, 1975). مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییر اقلیم، به‌عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی توسط بسیاری از پژوهشگران مورد توجه قرار گرفت، به‌طوری‌که امروزه بخش قابل‌توجهی از ادبیات پژوهشی اقلیم در سطح جهانی به تغییر اقلیم و مدل‌های اقلیمی اختصاص دارد.

مقیاس‌کاهی آماری اساساً به طور مستقل با دو رویکرد متفاوت شامل رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP) در دهه ۱۹۵۰ و رویکرد آماره‌های برون‌داد مدل (MOS) در اوایل دهه ۱۹۷۰ برای تولید پیش‌بینی‌های جوی محلی بر پایه پیش‌بینی عددی وضع جوی با تفکیک افقی بالا توسعه یافت. این دو رویکرد حتی بعدها جهت شبیه‌سازی‌های مدل اقلیمی نیز به کار برده شده‌اند. از سوی دیگر علاوه بر این دو رویکرد، رویکرد دیگری با عنوان مولدهای جوی (WGs)^{۱۷} توسعه یافت که بیشتر در پژوهش‌های هیدرولوژیکی کاربرد دارد (Maraun و Widmann، ۲۰۱۸).

هر مدل اقلیمی به طور خاص فقط برای نمایش برخی از جنبه‌های دنیای واقعی طراحی شده است. این مسئله به‌خصوص برای رویکردهای مقیاس‌کاهی آماری با روش‌های مختلف که تنها قادر به بازتولید بخش محدودی از سامانه اقلیم هستند، صادق است. درحالی‌که به‌کارگیری یک رویکرد مقیاس‌کاهی توسط یک کاربر ممکن است مناسب باشد، همین رویکرد ممکن است توسط کاربر دیگری کاملاً نامناسب باشد. برای آگاهی از اینکه چگونه یک رویکرد مقیاس‌کاهی ممکن است علاوه بر اینکه نیازهای یک کاربر خاص را برطرف کند، چارچوب مناسبی را برای ارزیابی معقول پیامدهای تغییر اقلیم ارائه دهد، باید در نظر بگیریم که رویکرد مورد نظر قادر به پاسخگویی به چه جنبه‌هایی از سامانه اقلیم است.

هر یک از رویکردهای مقیاس‌کاهی آماری روش‌های متعددی دارد، لذا باید هر یک از روش‌ها در چهار جنبه اساسی مانند: جنبه‌های حاشیه‌ای^{۱۸}، جنبه‌های زمانی^{۱۹}، جنبه‌های مکانی^{۲۰} و جنبه‌های چند متغیره^{۲۱} مورد مطالعه قرار گیرند (Maraun، ۲۰۱۹). این مقاله به‌طور مشخص رویکردهای مقیاس‌کاهی‌های آماری را بررسی کرده و بر همین اساس در ادامه به طور کامل در خصوص این رویکردها بحث شده است.

۱- رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP)

مدل‌های گردش کلی (GCMs) علاوه بر اینکه قادر به شبیه‌سازی فرایندهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای نیستند، توانایی محدودی برای نمایش فرایندهای متوسط مقیاس دارند. این مدل‌ها اغلب مهارت‌های قابل ملاحظه‌ای در شبیه‌سازی تغییرپذیری در مقیاس همدید مانند عبور سیکلون‌ها و آنتی سیکلون‌ها دارند. مقیاس‌کاهی آماری با رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP): از این مهارت برای شبیه‌سازی اقلیم منطقه‌ای استفاده می‌کند. رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP)، به‌واسطه به‌کارگیری یک مدل آماری، پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ مقیاس را که از طریق داده‌های مشاهداتی واسنجی (کالیبره) شده‌اند به پیش‌بینی‌شونده‌های مقیاس محلی مرتبط می‌کند. این رویکرد سه فرض‌بنیادی دارد که در ادامه بررسی می‌شود:

۱- پیش‌فرض کامل: پیش‌بینی‌کننده‌ها باید به‌طور واقع‌بینانه و بدون هر نوع اریبی توسط مدل گردش کلی شبیه‌سازی شوند. علاوه بر این در زمینه تغییر اقلیم، پاسخ پیش‌بینی‌کننده‌ها به واداشت خارجی باید با اطمینان شبیه‌سازی شود.

۲- فرض اطلاع‌رسانی: پیش‌بینی‌کننده‌ها بخش بزرگی از وردایی منطقه‌ای را در مقیاس‌های زمانی مورد نظر منعکس می‌کنند. در زمینه تغییر اقلیم، تمام پیش‌بینی‌کننده‌های مرتبط باید گنجانده شوند به گونه‌ای که تغییرات آینده در متغیر پیش‌بینی‌شونده مشخص شود.

۳- فرض ساختار مدل: مدل آماری باید ساختار مناسبی داشته باشد. این فرض بیان می‌کند که تأثیر پیش‌بینی‌کننده‌ها بر پیش‌بینی‌شونده‌ها باید به‌طور منطقی لحاظ شود (Maraun و Widmann، ۲۰۱۸).

روش‌های مورد استفاده برای مقیاس‌کاهی با رویکرد (PP) بسیار متنوع هستند. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته شامل روش‌های رگرسیون^{۲۲}، روش‌های طبقه‌بندی جوی^{۲۳} و روش‌های قیاسی و بازگونه‌گیری^{۲۴} تقسیم‌بندی کرد. روش‌های رگرسیون را می‌توان به چندین دسته دیگر همانند مدل‌های خطی^{۲۵}، مدل‌های خطی تعمیم یافته^{۲۶}، مدل‌های رگرسیون غیرخطی^{۲۷} و مدل‌های رگرسیون چندگانه^{۲۸} تقسیم‌بندی کرد.

- محدودیت‌های رویکرد پیش‌آگاهی کامل (PP): هر یک از روش‌های مذکور در این رویکرد محدودیت‌های مختلفی دارد. به‌عنوان مثال روش‌های قیاسی برای نمایش دما محدودیت‌هایی دارند. آن‌ها همبستگی مکانی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده و حتی برآورد دقیقی از میانگین‌های اقلیمی ندارند. همچنین از دیگر اشکالات این روش این است که قادر به شبیه‌سازی رخداد‌های فرین^{۲۹} نیستند و تغییرات دما همانطور که بالاتر نیز گفته شد به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. زیرا هیچ قیاسی از آینده وجود ندارد که وضعیت ترمودینامیکی^{۳۰} اقلیم آینده را بتوان با آن توصیف نمود (Maraun، ۲۰۱۹).

۲- رویکرد آماره‌های برون‌داد مدل (MOS)

این رویکرد در واقع به هر روشی که به‌نوعی یک تابع آماری بین داده‌های مشاهداتی و مدل را فراهم آورد و سپس این تابع را برای برون‌داد مستقیم مدل در آینده اعمال نماید، گفته می‌شود. به‌عبارت دیگر در رویکرد آماره‌های برون‌داد مدل (MOS)، یک روش آماری بین پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ مقیاس شبیه‌سازی شده توسط یک مدل اقلیمی و پیش‌بینی‌شونده‌های مقیاس منطقه‌ای مشاهداتی در طی یک دوره تاریخی واسنجی می‌شود. این مدل آماری سپس جهت مقیاس‌کاهی پیش‌بینی‌کننده‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل مذکور به کار می‌رود. استفاده از داده‌های مدل اقلیمی تحت واسنجی، کلید اساسی در رویکرد MOS است

که به طور ذاتی ارزیابی مدل را تصحیح می‌کند. در برنامه‌های کاربردی تغییر اقلیم معمولاً این محدودیت دیده می‌شود که برون‌داد مستقیم مدل با داده‌های مشاهداتی هماهنگ نیست؛ بنابراین فقط سری‌های بلندمدت از یک متغیر شبیه‌سازی شده و متغیر مشاهداتی متناظر آن را می‌توان با یکدیگر مقایسه کرد. این روش به طور گسترده‌ای به عنوان تصحیح ارزیابی یا تعدیل ارزیابی^{۳۱} شناخته می‌شود که در سال‌های اخیر از سوی اقلیم‌شناسان به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. رویکرد آماره‌های برون‌داد مدل (MOS) دارای سه فرض بنیادی است که در ادامه این سه فرض بررسی می‌شود.

۱- به طور معمول، تنها یک فرض تغییرناپذیر کلی در زمینه MOS در پژوهش‌های تغییر اقلیم اعمال می‌شود. Maraun و Widmann (۲۰۱۸) مطابق با مفروضات پیش‌آگاهی کامل این فرض را به صورت زیر بیان کردند:

- پیش‌بینی‌کننده‌های MOS باید با اطمینان شبیه‌سازی شوند. این فرض تبیین‌کننده این امر است که در دوره مشاهداتی شبیه‌سازی‌ها باید واقع‌بینانه باشند. در زمینه تغییر اقلیم، تغییرات پیش‌بینی‌کننده‌ها باید با اطمینان شبیه‌سازی شوند.

- پیش‌بینی‌کننده‌های MOS باید نماینده متغیر هدف باشند؛ یعنی باید قادر به ارائه الگوی تغییرات زمانی-مکانی صحیح باشند. تابع انتقال باید ساختار مناسبی داشته باشد که تحت شرایط اقلیمی در حال تغییر قابل اجرا باشد.

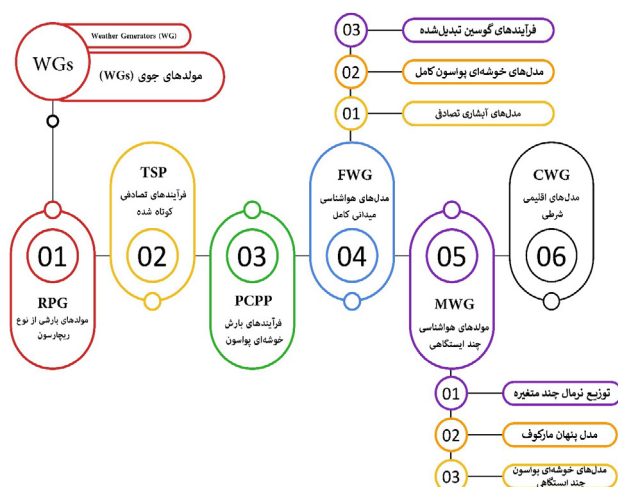
۲- فرض دوم، طبق این فرض تصحیح ارزیابی برای مقیاس‌کاهی به مقیاس‌های کوچک‌تر (یعنی در سطح ایستگاه‌ها) محدود می‌شود. ۳- فرض سوم، این فرض با تغییرات روند بلندمدت در ارتباط است. به‌طور کلی روش‌های مورد استفاده برای مقیاس‌کاهی با رویکرد MOS را می‌توان به چهار دسته رویکرد تغییر عامل^{۳۲}، رویکرد تصحیح افزودنی و نسبت‌گیری^{۳۳}، رویکرد تصحیح واریانس و نگاشت چندق^{۳۴} و تصحیح ارزیابی چندمتغیره^{۳۵} تقسیم‌بندی کرد.

- **محدودیت‌های رویکرد آماره‌های برون‌داد مدل (MOS):** روش‌های تصحیح ارزیابی رویکرد MOS دو محدودیت عمده دارند. نخستین محدودیت این روش‌ها بیشتر در مقیاس‌کاهی به مقیاس‌های ریز^{۳۶} و دوم عدم توانایی این روش‌ها در شبیه‌سازی نشانگرهای منطقه‌ای تغییر اقلیم است. لذا برای حل این دو مسئله علاوه بر توسعه روش‌های جدید نیاز به مدل‌سازی آماری پیشرفته، همراه با درک فیزیکی صحیح از فرایندهای سامانه اقلیم است (Maraun, ۲۰۱۹).

۳- مولدهای جوی (WGs)

مولدهای جوی، مدل‌های تصادفی از متغیرهای هواشناسی هستند. این گروه از روش‌ها برای مطالعات تغییر اقلیم می‌توانند در دو روش مختلف باشند: روش اول شرطی کردن مولد جوی بر

روی مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌کننده‌ها به شکل روزانه است. این رویکرد به نوعی شکل پیچیده‌ای از مقیاس‌کاهی آماری از نوع پیش‌آگاهی کامل است. در روش دوم، متغیرهای مولد جوی از برون‌داد مستقیم مدل (DMO)^{۳۷} با روش تغییر عامل تصحیح می‌شوند. روش‌های مورد استفاده برای مقیاس‌کاهی با رویکرد مولدهای جوی (WGs) بسیار است که می‌توان به روش‌های مولدهای بارشی از نوع ریچارسون (RPG)^{۳۸}، فرایندهای تصادفی کوتاه شده (TSP)^{۳۹}، فرایندهای بارش خوشه‌ای پواسون (PCPP)^{۴۰}، مولدهای اقلیمی چندمتغیره (MVG)^{۴۱}، مدل‌های اقلیمی شرطی (CWG)^{۴۲}، مولدهای هواشناسی چند ایستگاهی (MWG)^{۴۳}، مدل‌های هواشناسی میدانی کامل (FWG)^{۴۴} و مولدهای اقلیمی روزانه اشاره کرد. برخی از این روش‌ها به چند روش دیگر تقسیم‌بندی می‌شوند که در شکل (۲) نشان داده شده است. نرم‌افزارهای مختلفی برای روش‌های مولدهای تصادفی اقلیم توسعه داده شده‌اند که یکی شناخته‌شده‌ترین آن‌ها نرم‌افزار LARS-WG است.



شکل ۲- روش‌های مورد استفاده برای مقیاس‌کاهی با رویکرد مولدهای جوی (WGs)

- **محدودیت‌های رویکرد مولدهای جوی (WGs):** در رویکرد مولدهای جوی، هر متغیری که واسنجی می‌شود در اصل باید اقلیم فعلی را به خوبی نمایش دهد. کارایی این رویکرد از مقیاس‌کاهی، به دلیل در دسترس نبودن مدل‌های آماری مناسب برای بازتولید پیچیدگی اقلیم در مقیاس منطقه‌ای محدود می‌شود. این محدودیت زمانی اهمیت بیشتری دارد که برای مدل‌سازی در دوره‌های طولانی، شبیه‌سازی وردایی درون سالی و وابستگی مکانی دشوار است. همچنین باید توجه داشت که برای مولدهای جوی، تغییرات شبیه‌سازی شده از اقلیم باید نماینده آن اقلیم در مقیاس منطقه‌ای باشد (Maraun, ۲۰۱۹).

بر اساس آنچه که مطرح شد یک پرسش کلیدی پیش می‌آید که آیا مقیاس‌کاهی و یا تصحیح اریبی ارزش افزوده^{۲۵} ایجاد می‌کند یا خیر؟

برای پاسخ صحیح به این پرسش ابتدا باید ارزش افزوده را تعریف کرد. ارزش افزوده یک پل بر شکاف بین تفکیک افقی پایین مدل‌های گردش کلی و مقیاس‌های منطقه‌ای اقلیم است. به عبارت ساده‌تر ارزش افزوده یعنی تولید شبیه‌سازی‌هایی که نماینده اقلیم منطقه‌ای هستند (Rummukainen, ۲۰۱۶). با این تعریف باید دو فرض کلیدی را در ارزش افزوده برای مدل‌های گردش کلی در نظر گرفت. نخست، ممکن است مقیاس‌کاهی باعث ایجاد ارزش افزوده در پرونداد مدل موردنظر شود تا فرایندهای پارامترسازی شده بهبود یابد. به عنوان مثال رشته کوه‌ها معمولاً در GCMها نسبتاً هموارتر از واقعیت در نظر گرفته می‌شوند. این امر بر جریان بزرگ مقیاس تأثیر نمی‌گذارد و درعین حال با لحاظ نمودن توپوگرافی دقیق در مقیاس‌کاهی سبب ایجاد ارزش افزوده می‌شود. دوم، در GCMها اقلیم در مقیاس منطقه‌ای به خوبی نمایش داده نمی‌شود. به عنوان مثال میانگین بارش روزانه یک GCM حتی اگر انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی داشته باشد ممکن است از نظر ویژگی‌های بارش همانند شدت و تداوم نسبت به داده‌های مشاهداتی اریبی داشته باشد.

مقیاس‌کاهی با ایجاد ارزش افزوده، شکاف بین تفکیک افقی پایین مدل‌های گردش کلی و مقیاس‌های منطقه‌ای اقلیم را از بین می‌برد؛ درحالی‌که روش‌های تصحیح اریبی ارزش افزوده‌ای برای مدل‌های گردش کلی ایجاد نمی‌کنند. استفاده از روش‌های تصحیح اریبی زمانی که پیش‌بینی شونده در مقیاس کوچکتری نسبت به پیش‌بینی‌کننده باشد به دو دلیل مشکل ساز است: ۱- وردایی زمانی در مقیاس کوچک معمولاً به‌طور کامل توسط وردایی در مقیاس بزرگ تعیین نمی‌شود، مانند بارش. در اینجا تصحیح اریبی می‌تواند منجر به بالا رفتن واریانس، تغییرپذیری غیرواقعی و در نتیجه تولید فرین‌های غیر واقعی و ایجاد خطا در روندهای بلندمدت شود. ۲- فرآیندهای منطقه‌ای ممکن است به‌درستی نمایش داده نشوند. لذا برای پرداختن به این مشکل پیشنهاد می‌شود از تصحیح اریبی در همان مقیاس استفاده شود و مقیاس‌کاهی به‌طور جداگانه در مرحله بعدی انجام شود (Neelin, ۲۰۱۰).

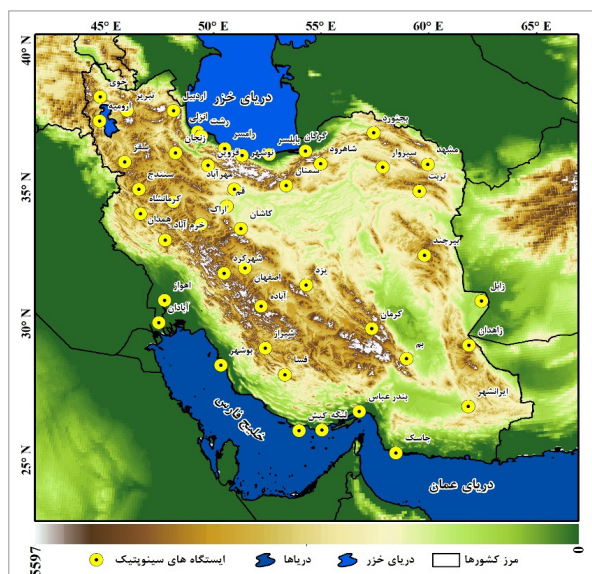
جنبه دیگری که در بحث مقیاس‌کاهی آماری و تصحیح اریبی بسیار اهمیت دارد مسئله عدم قطعیت است. در یک تعریف ساده عدم قطعیت درک ناقص سامانه اقلیم زمین و برهمکنش مولفه‌های آن است که می‌تواند شامل وردایی طبیعی سامانه اقلیم، محدودیت‌های مدل‌های اقلیمی، اریبی، و خطاهای اندازه‌گیری از ابزارها، انتخاب روش‌های نامناسب و در نهایت به‌کارگیری نرم‌افزارهای نامناسب باشد (Cho, ۲۰۲۳)؛ بنابراین

برای روشن شدن تأثیر به‌کارگیری روش و نرم‌افزار نامناسب در افزایش عدم قطعیت، در ادامه دو روش نسبت‌گیری از رویکرد آماره‌های پرونداد مدل (MOS) برای تصحیح اریبی متغیرهای دمای کمینه و بیشینه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین خروجی با استفاده از نرم‌افزار CMhyd و زبان برنامه‌نویسی R با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا عدم قطعیت ناشی از به‌کارگیری نرم‌افزار بررسی شود. براین‌اساس، این پژوهش در دو بخش سازماندهی شده است. در بخش نخست معرفی کوتاهی از داده‌ها و روش‌های به‌کار رفته شرح داده می‌شود. سپس پرونداد مستقیم مدل (DMO) و تصحیح شده اریبی با روش‌های نسبت‌گیری خطی (LS)^{۲۶} و نسبت‌گیری واریانس (VST)^{۲۷} با CMhyd و R مقایسه می‌شود.

داده‌ها و روش تحقیق

• داده‌های مورد استفاده

در بخش ابتدایی این پژوهش، مقیاس‌کاهی آماری به‌عنوان ارتباط آماری بین مقیاس‌های محلی و بزرگ مقیاس تعریف شد و بیان شد این رویکرد مقیاس‌کاهی از داده‌های اقلیمی مشاهداتی در مکان‌های منتخب (در سطح یک ایستگاه) استفاده می‌کند؛ لذا روشن است که داده‌های مشاهداتی کنترل کیفی شده و بدون شکاف آماری مبنای مقیاس‌کاهی آماری هستند. براین‌اساس در این پژوهش از داده‌های ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدید برای متغیر دمای کمینه و بیشینه طی دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۰) در ایران استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدید مورد بررسی در دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۰

• مدل EC-Earth3-CC مشارکت یافته در CMIP6

برونداد مستقیم مدل EC-Earth3-CC از سری مدل‌های مشارکت یافته در CMIP6 است که در این پژوهش استفاده شده است. مدل EC-Earth یک مدل سامانه زمین ماژولاری (MESM)^{۴۸} است که به طور مشترک توسط انجمن اروپایی با همین نام توسعه یافته است. مدل EC-Earth3-CC به همراه بسیاری از مدل‌های EC-Earth3 توسعه یافت تا ابزاری یکپارچه، برای مطالعات سامانه زمین ارائه دهد. این مدل یک مدل منحصربه‌فرد از میان مدل‌های EC-Earth3 قلمداد می‌شود که پیکربندی‌های متعددی دارد. تنوع در پیکربندی‌های

مدل EC-Earth3 ضمن اجراهای کارآمدتر، زمینه را برای شناسایی واداشتهای مناسب فراهم می‌آورد (Döscher و همکاران، ۲۰۲۱). مدل EC-Earth3-CC با مدل جو-سطح زمین، اقیانوس-یخ دریا، دینامیک پوشش گیاهی، مدل ترکیبات جوی با در نظر گرفتن CO₂ و بیو ژئوشیمی دریا با لحاظ نمودن نسبت اختلاط و شار CO₂ اجرا می‌شود (جدول ۱). همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است مدل EC-Earth3-CC یکی از کامل‌ترین مدل‌های مشارکت یافته در CMIP6 است که تفکیک افقی ۰/۷ درجه قوسی دارد. در این پژوهش از برونداد این مدل برای دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ استفاده شده است.

جدول ۱- پیکربندی‌های مدل EC-Earth مشارکت یافته در CMIP6 (Döscher و همکاران، ۲۰۲۱)

پیکربندی مدل‌ها	جو+سطح زمین	اقیانوس + یخ دریا	دینامیک پوشش گیاهی	ترکیبات جوی	بیوژئوشیمی دریا	صفحه یخی گرینلند
	IFS 36r4+HTESSEL	NEMO3.6+LIM3	LPJ-GUESS	TM5	PISCES	PISM
EC-Earth3	•	•				
EC-Earth3-Veg	•	•	•			
EC-Earth3-AerChem	•	•		•		
EC-Earth3-CC	•	•	•	X(CO ₂ only)	X(CO ₂ fluxes and mixing ratio only)	
EC-Earth3-GrIS	•	•	•			•

• روش تحقیق

در این تحقیق رویکرد آماره‌های برونداد مدل MOS که به‌عنوان تصحیح‌اریبی شناخته می‌شود، بررسی شد. برای این منظور از برونداد متغیر دمای کمینه و بیشینه مدل EC-Earth3-CC مشارکت یافته در CMIP6 استفاده شد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد رویکرد MOS به چهار دسته رویکرد تغییر عامل، رویکرد تصحیح افزودنی و نسبت‌گیری، رویکرد تصحیح واریانس و نگاشت چندک و رویکرد تصحیح‌اریبی چند متغیره تقسیم می‌شود. در این پژوهش از رویکرد نسبت‌گیری استفاده شد. برای رویکرد نسبت‌گیری نیز روش‌های مختلفی توسعه یافته است که می‌توان به روش‌های نسبت‌گیری خطی (LS) و نسبت‌گیری واریانس (VST) اشاره کرد. یکی از نرم‌افزارهایی که در سال‌های اخیر در ایران برای تصحیح‌اریبی مورد توجه قرار گرفته است، نرم‌افزار CMhyd است که تحت سیستم‌عامل ویندوز توسعه یافته است (Rathjens و همکاران، ۲۰۱۶). هر چند، این نرم‌افزار برای CMIP6 توسعه داده نشده است اما از این نرم‌افزار به‌منظور تصحیح‌اریبی برونداد مدل‌های پروژه CMIP6 در ایران استفاده شده است. در ادامه شرح دو روش نسبت‌گیری خطی (LS) و نسبت‌گیری واریانس (VST) ارائه شده است که این دو روش برای دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ یکبار با

استفاده از نرم‌افزار CMhyd و بار دیگر توسط برنامه نوشته شده در محیط زبان برنامه نویسی R اجرا شده و نتایج بررسی شد. روش نسبت‌گیری خطی با هدف منطبق کردن کامل میانگین ماهانه مقادیر تصحیح شده با مقادیر مشاهداتی است (Lenderink و همکاران، ۲۰۰۷). این روش با تصحیح مقادیر روزانه / ماهانه بر اساس تفاوت بین داده مشاهداتی و برونداد مستقیم مدل DMO عمل می‌کند که معمولاً دما با یک مقدار افزایشی اصلاح می‌شود. روش نسبت‌گیری خطی را می‌توان بر اساس روابط (۱) و (۲) تعریف کرد.

$$T_{his}(d)^* = T_{his}(d) + [\mu_m\{T_{obs}(d)\} - \mu_m\{T_{his}(d)\}] \quad (۱)$$

$$T_{sim}(d)^* = T_{sim}(d) + [\mu_m\{T_{obs}(d)\} - \mu_m\{T_{his}(d)\}] \quad (۲)$$

در روابط ارائه شده T دما، d مخفف روزانه، μ_m میانگین بلندمدت ماهانه، علامت ستاره (*) بیانگر اریبی تصحیح شده است که به برونداد مستقیم مدل طی دوره تاریخی اشاره دارد. Obs بیانگر داده‌های مشاهداتی و sim بیانگر برونداد مستقیم GCM و his دوره تاریخی مدل است.

روش نسبت‌گیری واریانس یک رویکرد متناظر برای تصحیح میانگین و واریانس سری‌های زمانی به‌صورت گام‌به‌گام است که

توسط Chen و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شد. از آنجایی که متغیر دما دارای توزیع نرمال است، برای تصحیح میانگین و واریانس متغیرهایی با توزیع نرمال مانند دما، از روش نسبت گیری واریانس برای تصحیح اریبی استفاده می شود (Seibert و Teutschbein, ۲۰۱۲). روش نسبت گیری واریانس را می توان همانند رابطه (۳) نوشت. در این رابطه، Tsim دمای مدل بر اساس برون داد مدل گردش کلی است. Tobs نشان دهنده دمای مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک است. به همین ترتیب μ میانگین و σ انحراف معیار است.

$$T_{cor,m,d} = [T_{sim,m,d} - \mu(T_{sim,m})] \times \frac{\sigma(T_{obs,m})}{\sigma(T_{sim,m})} + \mu(T_{obs,m}) \quad (3)$$

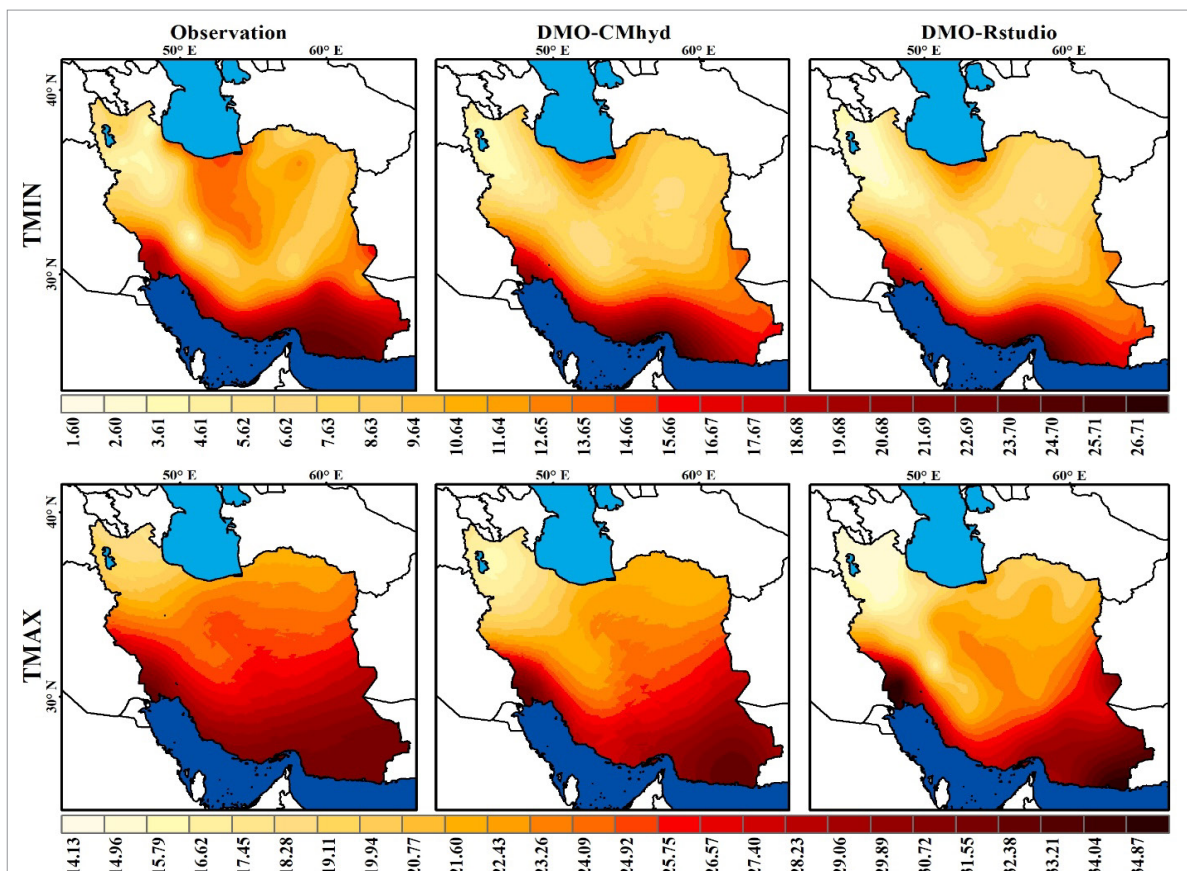
نتایج

تغییرات سالانه دمای کمینه و بیشینه ایران براساس داده های ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۱۴ نشان می دهد که دما در ایران تابع عرض جغرافیایی و ارتفاعات است (شکل ۴). کمینه های دمایی در سراسر ایران در ارتفاعات و مناطقی با عرض جغرافیایی بالا دیده می شود. بیشینه های دمایی نیز در هر دو متغیر مورد بررسی در سواحل جنوبی ایران از خلیج فارس تا دریای عمان مشاهده می شود. همین قاعده کلی در برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC مشارکت یافته در CMIP6 نیز مشخص است. با این تفاوت که برون داد مدل به دست آمده از نرم افزار CMhyd به شکل سیستماتیک مقادیر دما را هم برای متغیر دمای کمینه و هم متغیر دمای بیشینه، بیشتر از مقدار واقعی مدل برآورد می کند. این نتیجه با بررسی نزدیک ترین نقطه شبکه ها و روی هم انداختن شبکه های ۰/۷ درجه قوسی EC-Earth3-CC در برون داد CMhyd و R مشخص شده است. برای مثال برون داد مستقیم دمای بیشینه مدل EC-Earth3-CC در میانگین بلند مدت (۱۹۸۰-۲۰۱۴)، در نزدیک ترین نقطه شبکه به ایستگاه های آبادان، سنجند، اصفهان و خرم آباد به ترتیب ۳۴/۲۲، ۱۵/۵۹، ۲۱/۲۸ و ۲۰/۳۰ درجه سلسیوس است. این مقدار برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC برای میانگین این سری زمانی بدون هیچ گونه تغییری است. کاملاً روشن است که برون داد مستقیم یک مدل در یک نقطه شبکه معین باید یک مقدار یکسان باشد. اما نرم افزار CMhyd همین مقادیر را به ترتیب ۳۵/۲۳، ۱۶/۴۰، ۲۲/۲۹ و ۲۱/۳۱ درجه سلسیوس به دست آورده است. این نتیجه به روشنی نشان دهنده آن است که نرم افزار CMhyd حتی مقدار واقعی برون داد مستقیم یک مدل را به درستی استخراج نمی کند. همین امر باعث خطای قابل توجه در برون داد این نرم افزار خواهد شد. این اختلاف بیش از یک درجه سلسیوس در برون داد مستقیم مدل (DMO) توسط نرم افزار CMhyd باعث می شود تا نتوان اریبی سیستماتیک مدل ها را به درستی تشخیص داد. این نتیجه زمانی مورد توجه ویژه قرار می گیرد که درستی سنجی

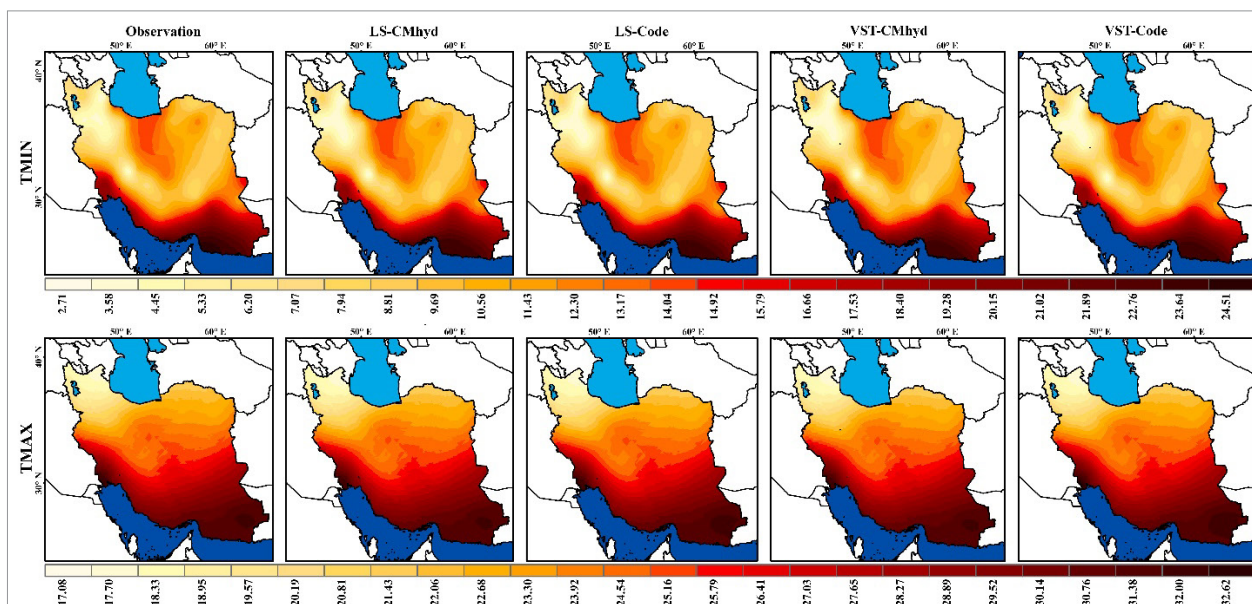
متغیرها نیز تحت تأثیر قرار می گیرند. برای مثال اریبی ایستگاه آبادان در مقیاس سالانه برای برون داد مستقیم مدل که بدون هیچ دستکاری توسط زبان برنامه نویسی R استخراج شده ۰/۶۹- درجه سلسیوس است در صورتی که با برون داد مستقیم به دست آمده از نرم افزار CMhyd این مقدار ۱/۷۰- درجه سلسیوس محاسبه شد. همین نتیجه برای سنجه های دیگر نیز صادق است. به طوری که ضریب توافق (d) بین برون داد مستقیم به دست آمده از زبان برنامه نویسی R مقدار ۰/۶۵ و برای نرم افزار CMhyd، ۰/۴۸ است. این اختلاف با درصد اریبی به شکل بهتری خود را نمایش می دهد. درصد اریبی بین داده های مشاهداتی و برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC تنها ۲/۱۰ درصد است. در حالی که نرم افزار CMhyd این مقدار را به شکل غیر واقعی ۵/۱۰ درصد نشان می دهد. این نتایج به روشنی نشان می دهد که نرم افزار CMhyd به شکل غیرواقعی مدل EC-Earth3-CC را مدلی با اریبی بالا و ضریب توافق پایین نشان می دهد که باعث گمراه شدن کاربر در انتخاب صحیح مدل و حتی نتایج دور از واقعیت به خصوص برای فرین های اقلیمی خواهد شد. از منظری دیگر این مقدار غیرواقعی نرم افزار CMhyd باعث افزایش عدم قطعیت در برون داد مدل می شود. به طوری که گفته شد مدل ها منابع مختلفی از عدم قطعیت را دارند. برای کاهش عدم قطعیت پیشنهاد می شود که از کاربردی ترین و مرتبط ترین داده های اقلیمی از نظر مقیاس، متغیر، روش آماری، دوره زمانی و تفکیک افقی استفاده شود. لذا این پنج فاکتور که برای کاهش عدم قطعیت مدل ها باید با دقت کافی توسط کاربر متخصص در نظر گرفته شوند، در صورت عدم دانش کافی توسط کاربر می توانند عدم قطعیت را به شکل مضاعفی افزایش دهند. برای مثال نرم افزار CMhyd به دلیل آنکه برون داد مستقیم مدل DMO را برای مدل های مشارکت یافته در CMIP6 به شکل غیرواقعی گزارش می دهد باعث افزایش عدم قطعیت در خروجی نهایی خواهد شد. همچنین این بیش برآوردی غیر واقعی که از خروجی CMhyd در دوره تاریخی مشاهده شده است می توان در آینده نرخ غیر واقعی از گرمایش را تولید کرده و به شکل نمایی خطا را تا پایان قرن افزایش دهد (شکل ۴).

تصحیح اریبی برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC مشارکت یافته در CMIP6 برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه با دو روش نسبت گیری خطی (LS) و نسبت گیری واریانس (VST) از رویکرد آماره های برون داد مدل بررسی شد. نتایج نشان داد نرم افزار CMhyd پس از تصحیح اریبی نیز به دلیل خطایی که در استخراج برون داد مستقیم مدل به آن اشاره شد، مجدداً بیش از یک درجه سلسیوس نسبت به برون داد تصحیح شده اریبی توسط R خطا دارد. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل (۵) برای تصحیح اریبی با دو روش نسبت گیری خطی (LS) و نسبت گیری واریانس (VST) با CMhyd و R، نشان دهنده اختلاف حداقل یک درجه سلسیوس بین خروجی تصحیح اریبی شده CMhyd با R در همان روش

است. این نتایج در مجموع نشان می‌دهند در دسترس بودن و سهولت به‌کارگیری یک نرم‌افزار دلیل خوبی برای استفاده از آن در یک تحقیق علمی نمی‌باشد و همانطور که نشان داده شد می‌تواند باعث افزایش خطا در نتایج به‌دست آمده شود.



شکل ۴- پراکنش مکانی دمای کمینه و بیشینه سالانه ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدید و برونداد مستقیم مدل EC-Earth3-CC با استفاده از نرم‌افزار CMhyd و زبان برنامه‌نویسی R برای دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۰ (درجه سلسیوس)



شکل ۵- پراکنش مکانی دمای کمینه و بیشینه تصحیح اریبی شده با دو روش نسبت‌گیری خطی (LS) و نسبت‌گیری واریانس (VST) مدل EC-Earth3-CC با استفاده از نرم‌افزار CMhyd و زبان برنامه‌نویسی R برای دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۰ (درجه سلسیوس)

(LS) و نسبت گیری واریانس (VST) با CMhyd و R نیز نتایج به دست آمده توسط برون داد مستقیم مدل DMO را تأیید کرد. به طوری که پس از تصحیح اریبی با دو روش مذکور نرم افزار CMhyd مجدد خطای بیش از یک درجه سلسیوس را نشان داد. تصحیح اریبی دمای کمینه و بیشینه با دو روش LS و VST با رویکرد MOS با زبان برنامه نویسی R مقدار خطای برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC را به شکل قابل توجهی در ایران کاهش داده است این نتیجه یافته های یزدانی و همکاران (۱۴۰۲) را در کاهش خطای مدل را پس از تصحیح اریبی تأیید می نماید. کاهش اریبی پس از تصحیح اریبی با رویکرد MOS برای پیش بینی های اقلیمی همانند مدل CFSv2 توسط شعبان پور و همکاران (۱۳۹۹) نیز گزارش شده است.

روش های تصحیح اریبی نسبت گیری خطی (LS) و نسبت گیری واریانس (VST) که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند به همراه روش هایی همانند تغییر عامل (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹)، روش تصحیح واریانس و نگاشت چندک (یزدانی و همکاران، ۱۴۰۲) و نسبت گیری خطی (LS) و تبدیل توانی (Ptr) (شعبان پور و همکاران، ۱۳۹۹) که در مطالعات تغییر اقلیم به شکل گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند هر چند که باعث بهبود برون داد مستقیم مدل در برابر داده های مشاهداتی می شوند اما باید توجه داشت که ارزش افزوده ای که در مقیاس کاهی ها به دست می آید توسط این روش ها کسب نمی شود. نتایج این پژوهش ضرورت انتخاب رویکرد صحیح و علمی در مطالعات تغییر اقلیم و همچنین به کارگیری نرم افزارها و روش های مناسب را نشان می دهد.

پی نوشت ها

- 1-Climate System
- 2-General circulation models (GCMs)
- 3-Variation
- 4-Convection
- 5-Downscaling
- 6-Statistical DownScaling Model
- 7-Regional Climate Models (RCMs)
- 8-Domain
- 9-Numerical Weather Prediction (NWP)
- 10-Regional Climate Model (RegCM)
- 11-Weather Research and Forecasting (WRF)
- 12-Perfect Prognosis (PP)
- 13-Calibration
- 14-Model Output Statistics (MOS)

مقیاس کاهی آماری به دلیل سهولت در به کارگیری و هزینه محاسباتی بسیار پایین تر نسبت به مقیاس کاهی دینامیکی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در این پژوهش تاریخچه ای از روش های مقیاس کاهی را ارائه داده و در نهایت رویکردهای مختلف مقیاس کاهی آماری را شرح داده است.

تصحیح اریبی برون داد مستقیم مدل DMO یک نوع مقیاس کاهی آماری از رویکرد آماره های برون داد مدل MOS است که به شکل گسترده ای در مطالعات تغییر اقلیم از آن استفاده می شود. در این پژوهش از دو روش نسبت گیری خطی (LS) و نسبت گیری واریانس (VST) برای تصحیح اریبی مدل EC-Earth3-CC از سری مدل های مشارکت یافته در CMIP6 با استفاده از نرم افزار CMhyd و زبان برنامه نویسی آماری R استفاده شد. مهمترین یافته های این پژوهش به شرح زیر است:

نتایج نشان داد نرم افزار CMhyd برون داد مستقیم مدل را با خطای یک درجه سلسیوس برای دمای کمینه و بیشینه استخراج می کند. برای نمونه برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC در ایستگاه های آبادان، سنج، اصفهان و خرم آباد به ترتیب ۳۴/۲۲، ۱۵/۵۹، ۲۱/۲۸ و ۲۰/۳۰ درجه سلسیوس است. در حالی که نرم افزار CMhyd برای این چهار ایستگاه مقادیر ۳۵/۲۳، ۱۶/۴۰، ۲۲/۲۹ و ۲۱/۳۱ درجه سلسیوس را نشان داد. این اختلاف در برون داد مستقیم مدل توسط نرم افزار CMhyd می تواند در نتیجه درون یابی نقطه شبکه های مجاور و یا نزدیک ترین نقطه شبکه به ایستگاه باشد.

پراکنش مکانی دمای کمینه و بیشینه برون داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC از سری مدل های مشارکت یافته در CMIP6 در برابر داده های مشاهداتی (ایستگاه های هواشناسی همدیدی) نشان دهنده کارایی بالای این مدل در بازتولید دمای ایران است. کارایی بالای مدل های CMIP6 در باز تولید دما توسط پژوهش های مختلفی همانند زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) و یزدانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز گزارش شده است.

خطای نرم افزار CMhyd در برون داد مستقیم مدل باعث تولید نتایج غیرواقعی سنجه های آماری درستی سنجی همچون اریبی و ضریب توافق شده است. به طوری که اریبی مدل EC-Earth3-CC در ایستگاه آبادان ۰/۶۹- درجه سلسیوس است. در حالی که نرم افزار CMhyd اریبی ۱/۷۰- درجه سلسیوس را برای این ایستگاه نشان داد. ضریب توافق به دست آمده بین برون داد مدل و مقدار مشاهداتی در ایستگاه آبادان برای برون داد نرم افزار CMhyd، ۰/۴۸ محاسبه شد، در صورتی که برون داد مستقیم این مدل با داده های مشاهداتی دارای ضریب توافق ۰/۶۵ است. نتایج مربوط به تصحیح اریبی با دو روش نسبت گیری خطی

ارزیابی تاثیر روش‌های تصحیح اریبی بر مهارت پیش‌بینی فصلی بارش مدل اقلیمی CFSv2. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۲)، ۳۰۳۳-۳۰۱۷. doi: [10.22059/ijswr.2020.306717.668680](https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.306717.668680)

یزدانی، دینا، زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۳). بررسی کارایی روش‌های تصحیح اریبی در بهبود برون‌داد مستقیم دمای مدل‌های CMIP بر روی ایران. فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۲)، ۴۲۹-۴۵۰. doi: [10.22059/jesphys.2024.363498.1007547](https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.363498.1007547)

Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>.

Cho, R. (2023). What uncertainties remain in climate science? Columbia Climate School. Retrieved March 26, 2024, from <https://news.climate.columbia.edu/2023/01/12/what-uncertainties-remain-in-climate-science/>. Columbia, USA.

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth, A., Arsouze, T., & Zhang, Q. (2021). The EC-earth3 Earth system model for the climate model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1-90. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

Gates, W. L. (1985). The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change. *Climatic Change*, 7(3), 267-284. <https://doi.org/10.1007/BF00144171>

Glahn, H. R., & Lowry, D. A. (1972). The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 11(8), 1203-1211. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011%3C1203:TUOMOS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011%3C1203:TUOMOS%3E2.0.CO;2)

Klein, W. H. (1948). Winter precipitation as related to the 700-mb circulation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 29(9), 439-453.

Klein, W. H., Lewis, B. M., & Enger, I. (1959). Objective prediction of five-day mean temperatures during winter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 16(6), 672-682. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1959\)016%3C0672:OPOFDM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1959)016%3C0672:OPOFDM%3E2.0.CO;2)

Lambert, S., & Boer, G. (2001). CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Climate*

- 15-Bias correction
- 16-World Climate Research Programme (WCRP)
- 17-Weather Generators (WGs)
- 18-Marginal Aspects
- 19-Temporal Aspects
- 20-Spatial Aspects
- 21-Multivariate Aspects
- 22-Regression Models
- 23-Weather Type Method
- 24-Analog and Resampling Methods
- 25-Linear Models
- 26-Generalised Linear Models
- 27-Nonlinear Regression Models
- 28-Multisite Regression Models
- 29-Extreme Events
- 30-Thermodynamic State
- 31-Bias-Adjustment
- 32-Delta Change Approach
- 33-Additive Corrections and Scaling
- 34-Variance Correction and Quantile Mapping
- 35-Multivariate Bias Correction
- 36-Fine
- 37-Direct Model Output (DMO)
- 38-Richardson-Type Precipitation Generators
- 39-Truncated Stochastic Processes
- 40-Poisson Cluster Precipitation Processes
- 41-Multivariable Weather Generators
- 42-Conditional Weather Generators
- 43-Multisite Weather Generators
- 44-Full-Field Weather Generators
- 45-Added-Value
- 46-Linear Scaling
- 47-Variance scaling of Temperature
- 48-Modular Earth System Model

منابع

زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲. doi: [10.22059/jesphys.2020.304870.1007226](https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.304870.1007226)

شعبان‌پور، فاطمه، بذرافشان، جواد، و عراقی‌نژاد، شهاب. (۱۳۹۹).

- Society, T. R. (2021). Next generation climate models: a step change for net zero and climate adaptation. Royal Society. <https://policycommons.net/artifacts/1724705/next-generation-climate-models/>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Trenberth, K. E. (Ed.). (1992). *Climate system modeling*. Vol.1. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Dynamics, 17, 83–106. <https://doi.org/10.1007/PL00013736>
- Lenderink, G., Buishand, A., & Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>
- Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1975). The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 32(1), 3–15. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032%3C0003:TEODTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032%3C0003:TEODTC%3E2.0.CO;2)
- Maraun, D. (2019). Statistical downscaling for Climate Science. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.712>
- Maraun, D., & Widmann, M. (2018). Statistical downscaling and bias correction for climate research. Vol.1. Cambridge University Press. Cambridge, England. <https://doi.org/10.1017/9781107588783>
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (1997). Intercomparison makes for a better climate model. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78(41), 445–451. <https://doi.org/10.1029/97EO00276>
- Navarra, A. (2021). The role of systematic errors. *National Science Review*, 8(10), nwab082. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab082>
- Neelin, J. D. (2010). *Climate change and climate modeling*. Vol.1. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). CMhyd user manual. Doc. Prep. Simulated Clim. Change Data Hydrol. Impact Study, 1413. <https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>
- Rummukainen, M. (2016). Added value in regional climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 145–159. <https://doi.org/10.1002/wcc.378>
- Schoof, J. T. (2013). Statistical downscaling in climatology. *Geography Compass*, 7(4), 249–265. <https://doi.org/10.1111/gec3.12036>

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Feasibility of Fog Water Harvesting in Abi-beyglu, Ardabil

A. Kanooni^{1*}, M. R. Kohan^{2*}

1, 2- Associate Professor and PhD Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

*(Corresponding Author Email: amin.kanooni@uma.ac.ir)

Received: 03-02-2024

Revised: 22-05-2024

Accepted: 26-05-2024

Available Online: 08-08-2024

امکان سنجی استحصال آب از مه در منطقه آبی بیگللو، اردبیل

امین کانونی^{۱*}، محمدرضا کهن^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*(نویسنده ی مسئول، (E-Mail: amin.kanooni@uma.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

Abstract

The decrease in rainfall and the increase in demand for limited water resources show the necessity of supplying water from non-conventional sources. In this research, the possibility of harvesting water from fog in the Abi-beyglu region, which is the main place where moist winds from the Caspian Sea enter the Ardabil plain, was investigated. First, by examining local observations and meteorological parameters, the possibility of harvesting fog water was investigated in terms of different geographical and climatic factors, and then by installing a standard fog collector, the amount of extracted water was measured daily. The results of the investigation of meteorological parameters indicate suitable conditions for the implementation of the fog water harvesting system in the region. The high average relative humidity (more than 70%) throughout the year, the high number of foggy days (more than a third of the year), as well as the appropriate wind speed (4.6 m/s on average) and its high frequency showed that there is a high potential in collecting fog entering the region. The average daily water collected during the foggy period was equal to 3.6 liters per square meter, which shows an acceptable value compared to the results of similar projects. In general, according to the quantitative and qualitative values of collected water, the implementation of fog water harvesting plans in the region is justified and therefore part of the water needs of the region can be provided.

Keywords: Non-conventional Water, Abi-beyglu, Fog Collector, Raschel.

چکیده

کاهش نزولات جوی و افزایش تقاضا برای منابع محدود آب، ضرورت تامین آب از منابع نامتعارف را بیش از پیش نشان می دهد. در این پژوهش امکان استحصال آب از مه در منطقه آبی بیگللو که محل اصلی ورود بادهای حاوی رطوبت دریای خزر به دشت اردبیل می باشد بررسی شد. ابتدا با بررسی مشاهدات محلی و پارامترهای هواشناسی، امکان استحصال آب مه از نظر عوامل مختلف جغرافیایی و اقلیمی بررسی و سپس با نصب جمع کننده مه استاندارد، مقادیر آب استحصال شده به صورت روزانه اندازه گیری شد. نتایج بررسی پارامترهای هواشناسی نشان داد شرایط اجرای سامانه استحصال آب از مه در منطقه مناسب می باشد. بالا بودن میانگین رطوبت نسبی (بیش از ۷۰ درصد) در طول سال، بالا بودن تعداد روزهای مه آلود (بیش از یک سوم سال) و همچنین سرعت مناسب باد (به طور میانگین ۴/۶ متر بر ثانیه) و فراوانی بالای آن نشان داد پتانسیل زیادی در جمع آوری مه ورودی به منطقه وجود دارد. میانگین روزانه آب جمع شده در دوره وقوع مه برابر با ۳/۶ لیتر در متر مربع به دست آمد که در مقایسه با نتایج پروژه های مشابه مقدار قابل قبولی را نشان می دهد. به طور کلی باتوجه به نتایج کمی و کیفی آب جمع آوری شده، اجرای طرح های استحصال آب از مه در منطقه توجیه پذیر بوده و می توان برای تامین بخشی از نیازهای آبی منطقه مورد توجه قرار داد.

واژه های کلیدی: آب نامتعارف، آبی بیگللو، جمع کننده مه، راشل.

قطرات مه به دلیل اندازه کوچک خود سرعت سقوط بسیار کمی دارند (۱ تا ۵ سانتی متر بر ثانیه). بنابراین با وزش باد به صورت افقی حرکت می کنند (Tav و همکاران، ۲۰۱۸). به این ترتیب، با نصب جمع کننده می توان به راحتی قطرات مه را جمع آوری کرد. استحصال آب از مه در ابعاد عملیاتی غالباً توسط جمع کننده های مه بزرگ (LFC)^۲ انجام می پذیرد اما به منظور انجام پروژه های تحقیقاتی و امکان مقایسه با مطالعات مشابه از جمع کننده های استاندارد (SFC)^۳ استفاده می شود (Schemenauer و Cereceda، ۱۹۹۴b). سابقه تاریخی استحصال آب از مه به امپراتوری اینکا^۴ در آمریکای جنوبی بازمی گردد. جایی که در آن، آب مه توسط درختان جمع آوری و در مخازن ذخیره می شدند (Ismail و Go، ۲۰۲۱). در چند دهه گذشته پژوهش های بسیاری به منظور استحصال آب از مه انجام شده است. پژوهش های انجام شده شامل مطالعات میدانی برای امکان سنجی تأمین آب مورد نیاز یک منطقه (Algarni، ۲۰۱۸؛ Khalil و همکاران، ۲۰۲۲)، پژوهش های آزمایشگاهی به منظور افزایش راندمان جمع آوری آب (Shi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Elshennawy و همکاران، ۲۰۲۲) و پژوهش های مربوط به شبیه سازی و مدل سازی عددی برای تعیین پارامترهای موثر در استحصال مه و تخمین مقدار آب جمع شده می باشد (Regalado و Ritter، ۲۰۱۶؛ Carvajal و همکاران، ۲۰۲۰). پروژه کامانچاکا^۵ در شیلی بزرگ ترین پروژه استحصال مه برای تأمین آب شرب یک جامعه روستایی است که اجرای آن در سال ۱۹۸۷ آغاز و نتایج آن برای اولین بار در متون علمی توصیف و مستند شد. در این پژوهش تعداد ۱۰۰ جمع کننده از نوع LFC در ارتفاعات ال توفو در رقوم ۷۵۰ متری نصب شدند. مقدار آب استحصالی در این پروژه ۳ لیتر در متر مربع در روز به دست آمد. نتایج نشان داد مه یک منبع آب پایدار بوده و می تواند نیاز شرب جامعه ای با بیش از ۵۰۰ نفر را تأمین کند (Cereceda و همکاران، ۲۰۰۰). از پژوهش های دیگر می توان به پروژه استحصال آب از مه در منطقه لیام^۶ نیال اشاره کرد که با نصب شش SFC، امکان سنجی برداشت مه در سکونتگاه های کوچک واقع در ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متری از سطح دریا بررسی شد. عملکرد جمع کننده ها از فوریه ۱۹۹۸ تا آوریل ۲۰۰۰ به صورت دوازده ساعته پایش شد. میانگین آب جمع آوری شده برابر ۷/۱ لیتر در متر مربع در روز به دست آمد. همچنین، از آنجایی که در مناطق دورافتاده انرژی لازم برای پمپاژ آب بسیار پرهزینه است، استحصال مه به عنوان یک منبع جایگزین برای توسعه اقتصادی و اجتماعی این جوامع دورافتاده پیشنهاد شد (MacQuarrie و همکاران، ۲۰۰۱). وجود مه پیاپی در برخی از مناطق کوهستانی رشته کوه آندس^۷ در کلمبیا لزوم انجام آزمایشاتی برای استحصال آب از مه به عنوان یک منبع آب جایگزین و سالم را نشان داد. به همین منظور ۱۲ جمع کننده SFC بر اساس شرایط توپوگرافی در ارتفاعات ۱۶۸۰ تا ۱۸۵۰ نصب شدند. نتایج به دست آمده نشان دهنده پتانسیل بالای منطقه برای اجرای پروژه جمع آوری آب از مه در مقیاس بزرگ بود، به طوری که

کاهش نزولات جوی و افزایش نیاز روزافزون جمعیت روبه رشد به آب سالم، فشار زیادی بر دولت ها برای یافتن راه حل های پایدار تأمین آب وارد می کنند. مشکلات مربوط به تأمین آب به ویژه در کشورهای در حال توسعه با مناطق خشک و نیمه خشک و منابع محدود آب، روبه روز در حال افزایش است (He و همکاران، ۲۰۲۱؛ Al-Mandhari، ۲۰۱۹). افزون بر این، گزینه های موجود تأمین آب نیز با محدودیت های زیادی همراه است. به عنوان مثال، جریان ورودی از رودخانه های مرزی به دلیل گستره جهانی تغییر اقلیم و خشکسالی، با کاهش قابل ملاحظه ای روبه رو شده است (میان آبادی، ۱۳۹۱). استفاده از آب های زیرزمینی نیز به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب، به دلیل کاهش سطح تراز آبخوان ها محدود شده است. همچنین، نمک زدایی وسیع آب دریا، به دلیل هزینه بالای تولید و انتقال و مسائل محیط زیستی آن توجیه پذیر نیست (Zolghadr-Asli و همکاران، ۲۰۲۳). در این شرایط، استحصال منابع آب های نامتعارف و بهره برداری از آن ها می تواند گامی موثر در راستای مقابله با پیامدهای جبران ناپذیر بحران آب باشد. یکی از روش های تولید آب شیرین و سالم، استحصال آب از مه است (Qadir و همکاران، ۲۰۲۱). از دیدگاه هواشناسی، مه نوعی ابر استراتوس است که از سطح زمین عبور می کند (Pauli و همکاران، ۲۰۲۰). با افزایش رطوبت هوا و کاهش دما به نقطه شبنم، بخار آب موجود در هوا متراکم شده و قطرات آب معلق به قطر ۱ تا ۴۰ میکرومتر تحت عنوان "مه" تشکیل می شوند (Tu و همکاران، ۲۰۱۸). مه تشعشعی، فرارفتی و کوهستانی از جمله رایج ترین انواع مه می باشند که با توجه به نحوه و مکان تشکیل آن، نام گذاری می شوند. مه تشعشعی از یک وارونگی دما در مجاورت سطح زمین تشکیل می شود. با خنک شدن لایه سطحی اتمسفر در شب، بخار آب موجود در هوا روی ذرات آئروسل جو شروع به متراکم شدن کرده و در نتیجه قطرات کوچک آب تشکیل می شود. این نوع مه، بسیار کم عمق و محلی بوده و عمر آن معمولاً به یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه محدود می شود. مه فرارفتی به طور عمده در مکان های ساحلی و به دلیل اختلاف شدید دما بین خشکی و دریا تشکیل می شود و با وزش افقی باد در مجاورت سطح زمین حرکت کرده و در نهایت با افزایش دما از بین می رود. در مناطق ساحلی این مه به نام مه ساحلی نیز شناخته می شود. مه کوهستانی معمولاً از ابرهایی تشکیل می شوند که از پایین ترین سطح تراکم خود در ابتدای شیب کوهستان به سمت بالا امتداد می یابند (Lakra و Avishek، ۲۰۲۲). با جابه جایی عمودی ابر از سطح زمین در امتداد شیب کوهستان و کاهش دمای محیط، مه متراکم تر می شود. در واقع با افزایش تراکم مه، مقدار آب در واحد حجم (LWC)^۱ آن افزایش می یابد که مقدار آن بسته به نوع مه از ۰/۱ تا ۰/۷ گرم بر مترمکعب متفاوت است.

میانگین سالانه نرخ جمع‌آوری آب برابر با ۴/۲ لیتر در هر متر مربع در روز به‌دست آمد. از اثرات مثبت سامانه جمع‌آوری مه در این منطقه می‌توان به تامین آب شرب جوامع روستایی منطقه، رونق کشاورزی و باغبانی در مقیاس کوچک و بهبود شرایط زندگی و در نهایت بازگشت مهاجران به محل زندگی خود اشاره کرد (Molina و Escobar، ۲۰۰۸). از پژوهش‌های دیگر در زمینه استحصال آب از مه با هدف تامین نیاز آبی جنگل‌کاری و کشاورزی می‌توان به بررسی امکان استفاده از مه برای احیاء جنگل‌های سوخته در منطقه والنسیا اسپانیا اشاره کرد. بارش اندک و مشکلات تامین آب از چالش‌های مهم در این منطقه عنوان شدند. مه مکرر در منطقه زمینه انجام آزمایش‌هایی برای امکان‌سنجی برداشت آب از مه به‌منظور آبیاری و بازیابی جنگل‌ها را فراهم کرد. به‌این‌منظور یک LFC متصل به سه مخزن هزار لیتری، در منطقه مورد مطالعه مستقر شد. در این مطالعه از آب استحصالی برای آبیاری قطره‌ای نهال‌های موجود استفاده شد. نتایج نشان داد نرخ سالانه جمع‌آوری آب مه برابر ۳/۳ لیتر در متر مربع در روز بوده و با آبیاری به‌موقع و استفاده از کمپوست، شرایط احیای جنگل در منطقه فراهم می‌شود (Estrela و همکاران، ۲۰۰۹). بارش اندک و تبخیر و تعرق بالا در منطقه گالات^۹ اکوادور واقع در ارتفاع ۳۵۰۰ متر از سطح دریا چالشی اساسی برای تامین آب شرب و کشاورزی منطقه به‌شمار می‌رفت. به همین دلیل، پروژه‌ای با هدف جمع‌آوری آب از مه برای کمک به رفع نیاز آبی جوامع ساکن در منطقه و برآورد نیاز آبی محصولات کشاورزی به اجرا درآمد. به‌این‌ترتیب جمع‌کننده‌های مه SFC در منطقه مستقر شدند. میانگین آب جمع شده در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵ بین ۵ تا ۱۰ لیتر در متر مربع در روز در طول کل سال و حدود ۲۰ لیتر در متر مربع روز در طول فصل بارش بود. نتایج نشان داد سامانه جمع‌آوری مه می‌تواند حدود ۵ درصد از نیاز آبی محصولات کشاورزی منطقه را تامین کند (Carrera-Villacres و همکاران، ۲۰۱۷).

کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی در سال‌های اخیر موجب افت سطح تراز آبخوان در منطقه آبی‌بیگلو شده است که می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری بر کشاورزی و جامعه روستایی وارد کند. با توجه به رشد جمعیت و نیاز روزافزون به آب، در صورت ادامه چنین وضعیتی، بیکاری، کوچ اجباری و گسترش حاشیه‌نشینی شهرها در سال‌های آینده دور از انتظار نیست. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و تشکیل مه پیاپی در آن، لزوم توجه به استحصال آب از مه به‌عنوان یک منبع آب پایدار و استفاده از آن برای مقاصد شرب و کشاورزی بیش از پیش احساس می‌شود. با استحصال آب مه عبوری از این منطقه می‌توان مقدار قابل توجهی آب را ذخیره و برای تامین قسمتی از آب مورد نیاز بخش کشاورزی و یا حتی تامین آب شرب اهالی روستاهای منطقه استفاده کرد. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد قبل از اجرای هر نوع پروژه استحصال آب از مه، لازم است پتانسیل جمع‌آوری مه بررسی شود. برای این منظور در این پژوهش با تهیه

و نصب جمع‌کننده استاندارد از نوع راشل، مقدار آب استحصالی در منطقه آبی‌بیگلو برآورد و نتایج کمی و کیفی آن بررسی شد.

مواد و روش‌ها

• سازوکار جمع‌آوری مه

در شرایط مه، مقدار نظری آب جمع شده توسط جمع‌کننده را می‌توان با رابطه (۱) تخمین زد (Ritter و همکاران، ۲۰۰۸).

$$q = 3.6 \times LWC \times u \times A \times \eta_{Coll} \quad (1)$$

که در آن، q آب جمع شده (Lit/hr)، LWC محتوای آب مایع (gr/m³)، A سطح مقطع جمع‌کننده (m²)، η_{Coll} راندمان جمع‌کننده (بی‌بعد)، u سرعت باد (m/s) و $3/6$ ضریب تبدیل واحد است.

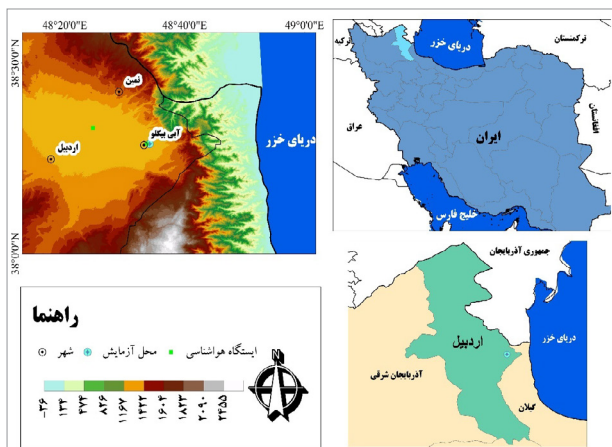
یک جمع‌کننده هرگز قادر به گرفتن کل قطرات مه عبوری نمی‌باشد. برای بیان مقدار شار عبوری جذب شده توسط جمع‌کننده از راندمان جمع‌کننده (η_{Coll}) استفاده می‌شود که به‌صورت نسبت مقدار آب جمع شده در واحد سطح جمع‌کننده (q) به شار عبوری از سطح مقطع تعریف می‌شود (Azeem و همکاران، ۲۰۲۰a). قطرات مه ممکن است به دلیل هندسه یا شکل صفحه جمع‌کننده از مسیر مستقیم منحرف شده و از اطراف آن عبور کنند. کسری از قطرات مه که بدون انحراف از مسیر مستقیم، خود را به صفحه جمع‌کننده می‌رساند با راندمان آیرودینامیکی بیان می‌شود. از طرف دیگر، تنها کسری از جریان مه که توانسته خود را به صفحه جمع‌کننده برساند به صفحه برخورد کرده و جذب می‌شود (راندمان جذب) و مابقی بدون برخورد به صفحه از قسمت‌های خالی آن عبور می‌کند. قطراتی که به سطح جمع‌کننده برخورد می‌کنند پس از رسوب در سطح جمع‌کننده به یکدیگر پیوسته و قطرات بزرگ را تشکیل می‌دهند. وقتی که حجم این قطرات به اندازه بحرانی برسند تحت تاثیر نیروی گرانش به داخل ناودان تعبیه شده در زیر پرده جمع‌کننده سقوط کرده و در نهایت به داخل مخزن هدایت می‌شوند. بخشی از قطرات جذب شده ممکن است قبل از سقوط به ناودان به دلیل اعوجاج صفحه یا سرعت زیاد باد دوباره به جریان هوا بازگردد و یا به علت وجود نشی در سامانه زهکشی به مخزن منتقل نشود (راندمان زهکشی). بنابراین راندمان کل جمع‌آوری به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود (Azeem و همکاران، ۲۰۲۰b).

$$\eta_{Coll} = \eta_{AC} \times \eta_{Capt} \times \eta_{dr} \quad (2)$$

که در آن، η_{AC} راندمان آیرودینامیکی، η_{Capt} راندمان جذب و η_{dr} راندمان زهکشی هستند.

• مشخصات منطقه مورد مطالعه

شهر آبی‌بیگلو با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۵۶ درجه شرقی و با ارتفاع متوسط ۱۳۱۸ متر از سطح دریا در بخش ویلکیج شهرستان نمین و در ۲۰ کیلومتری اردبیل واقع



شکل ۱- موقعیت منطقه و محل اجرای سامانه استحصال مه

• روش انجام تحقیق

قبل از اجرای پروژه‌های استحصال آب از مه لازم است امکان‌سنجی اجرای آن باتوجه به عوامل مختلف جغرافیایی، اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی بررسی شود. سپس با نصب جمع‌کننده‌ای مناسب مقدار آب جمع‌آوری شده در دوره وقوع مه، اندازه‌گیری و پس از تحلیل نتایج، پیشنهاد عملیاتی مناسب ارائه شود. در ادامه روش انجام تحقیق به ترتیب اولویت تشریح می‌شود.

- بررسی پارامترهای هواشناسی: پس از بررسی عوامل جغرافیایی (وجود مناطق مرتفع) موثر در تشکیل مه و ضرورت اجرای پروژه جمع‌آوری آب از مه، پارامترهای هواشناسی موثر بر تشکیل مه و جمع‌آوری آب بررسی شد. ایستگاه هواشناسی آبی بیگلر نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل انجام طرح است که تحت مدیریت شرکت آب منطقه‌ای اردبیل پارامترهای هواشناسی مورد نظر را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. این ایستگاه در موقعیت جغرافیایی $54^{\circ} 16' 38''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 33' 29''$ طول شرقی قرار دارد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز پژوهش شامل رطوبت نسبی، بارش، سرعت و جهت باد غالب به‌صورت ماهانه از سال ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۰ از ایستگاه آبی بیگلر دریافت شد. همچنین باتوجه به اینکه وقوع مه در این ایستگاه اندازه‌گیری و ثبت نمی‌شود، داده‌های مربوط به تعداد روزهای وقوع مه به‌صورت ماهانه از سال ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰ از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ} 19' 50''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 24' 57''$ طول شرقی که در فاصله کوتاهی از محل انجام طرح واقع شده، تهیه و استفاده شد.

- نصب سامانه استحصال مه و اندازه‌گیری آب جمع‌شده: به‌منظور اجرای سامانه استحصال آب از مه، محل مناسب ورود مه از دریای خزر به دشت اردبیل شناسایی و سه جمع‌کننده مه استاندارد (SFC) در مختصات 38° درجه و $17'$ دقیقه و 17° ثانیه شمالی و 48° درجه و $34'$ دقیقه و $11''$ ثانیه شرقی مستقر شدند. در این مقاله نتایج مربوط به جمع‌کننده نوع راشل (ساخته شده از الیاف پلی‌پروپیلن) با ضریب سایه ۳۵ درصد به‌منظور امکان مقایسه آن با پژوهش‌های

شده است. بخش خاوری منطقه (رشته کوه باغروداغ) با بهره‌گیری از رطوبت مستقیم دریای خزر، جزء مناطق مرطوب خزری بوده و دامنه‌های باختری آن به دلیل نزدیکی به این پهنه و تأثیرپذیری از آن، به‌عنوان منطقه گذار بین آذربایجان و گیلان محسوب می‌شود. استقرار درخت‌زارهای کم ارتفاع در این منطقه، به‌ویژه گونه‌های مشخص فندق و بلوط، جنگل‌های خزان‌شونده منحصربه‌فردی را در انتهای خاوری استان اردبیل به نام منطقه فندقلو ایجاد کرده است. وضعیت طبقات ارتفاعی منطقه فندقلو تأثیر مستقیمی در میزان رطوبت دریافتی از دریای خزر به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین رطوبت و بارندگی دارد. بخش‌های مرکزی منطقه با ارتفاع حدود 1300 متر از سطح دریا، کمترین میانگین ارتفاعی را در منطقه داشته و محل اصلی عبور ابرها و ریزش آن به دشت اردبیل است. از سوی دیگر مناطق شمالی و جنوبی منطقه فندقلو، با ارتفاع بیشتری که نسبت به منطقه مرکزی دارند، به کانالیزه کردن رطوبت دریافتی، کمک بیشتری می‌کنند (صمدزاده، ۱۳۸۸). براساس آمار ایستگاه باران‌سنجی آبی بیگلر (آمار ۲۴ ساله)، حداقل و حداکثر دمای ثبت شده به ترتیب 34° و $39/5^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب $3/37^{\circ}$ و 13° درجه سانتی‌گراد و میانگین کلی دما $9/6^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. متوسط رطوبت نسبی سالانه منطقه 76 درصد و متوسط بارندگی سالانه آن نیز $347/4$ میلی‌متر است. آب‌وهوای آبی بیگلر سرد و مرطوب بوده و به دلیل نزدیکی به جنگل حیران اغلب پوشیده از مه غلیظ می‌باشد. این منطقه به دلیل موقعیت خاص آن از لحاظ جغرافیایی، آب‌وهوایی و برخورداری از منابع غنی خاک حاصلخیز، اهمیت خاصی در زمینه تولیدات کشاورزی دارد. خشکسالی سال‌های گذشته، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و کشت محصولات کشاورزی پرمصرف مانند سیب‌زمینی، باعث افت شدید سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در منطقه شده است. به همین دلیل کمبود آب زراعی به‌عنوان مهمترین چالش منطقه بوده که نه تنها کشاورزی منطقه بلکه اقتصاد متکی به آن را به طور جدی تهدید می‌کند. با این حال کشاورزی دیم، شامل محصولاتی چون گندم، جو، عدس و سایر محصولات زراعی همچنان نقش مهمی در امرار معاش مردم بومی منطقه دارد. باتوجه به موقعیت جغرافیایی منطقه و به دلیل هجوم بادهای حاوی رطوبت دریای خزر و کشیدن ابرهای استراتوس (ارتفاع پایین) به سطح زمین که با افت نسبی دمای هوا همراه است تشکیل مه محلی در منطقه شایع می‌باشد، به‌طوری‌که حدود یک سوم روزهای هر ماه با مه همراه است. همین موضوع لزوم توجه به روش‌های مختلف استحصال آب از مه را نشان می‌دهد. با استحصال آب از مه‌های عبوری می‌توان مقدار زیادی از رطوبت هوا را که قسمت اعظم آن پس از عبور از منطقه تبخیر می‌شود، ذخیره و در رشد و نمو گیاهان زراعی منطقه و یا حتی تأمین آب شرب اهالی روستاهای منطقه استفاده کرد. (شکل ۱) موقعیت منطقه آبی بیگلر و محل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

پیشین ارائه شده است. توری پلی پروپیلن به دلیل قیمت پایین، در دسترس بودن و مقاومت بالا در برابر تابش آفتاب در اکثر پروژه‌های استحصال مه استفاده می‌شود. از این نوع جمع کننده، به عنوان معیاری برای مقایسه نتایج به دست آمده از پروژه‌های اجرا شده در نقاط مختلف جهان و مقایسه عملکرد آن با جمع کننده‌های دیگر استفاده می‌شود. جمع کننده مه طبق استاندارد ذکر شده توسط Schemenauer و Cereceda (۱۹۹۴) با ابعاد 1×1 متر و ارتفاع ۲ متر تهیه و عمود بر جهت باد غالب منطقه نصب شد. برای هدایت آب از جمع کننده به مخزن ذخیره از یک ناودان که برشی از یک لوله پلی اتیلن با شیب ۲ درصد بود استفاده شد. اندازه گیری آب جمع آوری شده از تاریخ ۱۴۰۰/۱/۲۱ تا ۱۴۰۰/۸/۳۱ به صورت روزانه و در ساعت ۹ صبح انجام شد. همزمان با اندازه گیری آب جمع شده، وقوع و یا عدم وقوع مه توسط اپراتور ثبت شد. با بررسی وقوع مه در محل جمع کننده و کنترل آن با داده‌های دریافتی از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه، مشخص شد همخوانی کاملی از نظر زمان‌های وقوع مه در دو منطقه وجود دارد. لازم به ذکر است به دلیل مسائل امنیتی و همچنین دسترسی آسان به محل انجام پژوهش، جمع کننده در اراضی نزدیک شهر آبی بیگلو مستقر شد تا اندازه گیری‌های لازم به راحتی انجام شود. در شکل (۲) جمع کننده‌های مه نصب شده در منطقه و مخازن جمع آوری آب مشاهده می‌شود.



شکل ۲- جمع کننده‌های مه نصب شده در منطقه آبی بیگلو

نتایج و بحث

اجرای موفق پروژه استحصال آب از مه، نیازمند مطالعه‌ای دقیق شامل: مشاهدات محلی، بررسی پارامترهای هواشناسی و در نهایت برآورد مقدار جمع آوری آب با استفاده از جمع کننده استاندارد (SFC) می‌باشد. بدون در نظر گرفتن هر یک از پارامترهای ذکر شده، امکان شکست پروژه افزایش می‌یابد. مشاهدات محلی مورد نیاز برای ارزیابی مقدار آب استحصال شده از مه عبارتند بودند از:

الف) ضرورت تامین نیاز آبی منطقه: کمبود آب در هر منطقه، اجرای سامانه جمع آوری مه را توجیه پذیر می‌کند. خشکسالی‌های اخیر و کاهش نزولات جوی و در نتیجه کاهش سطح تراز آب‌های زیرزمینی،

کشاورزی دیم و آبی منطقه آبی بیگلو را شدیداً تحت تأثیر قرار داده است. در صورت تداوم خشکسالی‌ها امکان وارد شدن آسیب به طبیعت و حیات وحش منطقه نیز وجود دارد. با چنین دورنمایی، احتمال بروز مشکل در تأمین آب شرب مردم در سال‌های آینده بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، استحصال آب از مه می‌تواند به عنوان یکی از راه‌حل‌های مقابله با کم‌آبی در منطقه مطرح باشد.

ب) وجود ارتفاعات مشرف به محل عبور مه: وجود کوه‌های مرتفع که بستر لازم برای تشکیل مه را فراهم می‌کند اهمیت زیادی در مکان‌یابی استقرار سامانه‌های جمع آوری مه دارد. مه تشکیل شده در نقاط مرتفع علاوه بر LWC زیاد، سرعت زیادی نسبت به مناطق پست و هموار دارد. در مشاهدات محلی، امتداد مناطق مرتفع نیز باید مد نظر قرار گیرد، به طوری که عمود بودن محور طولی کوهستان بر جهت بادهای غالب، شرایط بهینه‌ای در استفاده هر چه بیشتر از پتانسیل مه به وجود می‌آورد. طبق مشاهدات انجام شده، منطقه آبی بیگلو رشته کوه‌های مرتفع با ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا دارد و محور طولی رشته کوه، عمود بر جهت بادهای شرقی است (شکل ۱). این موارد نشان دهنده شرایط بالقوه منطقه در جمع آوری مه و استحصال آب می‌باشد.

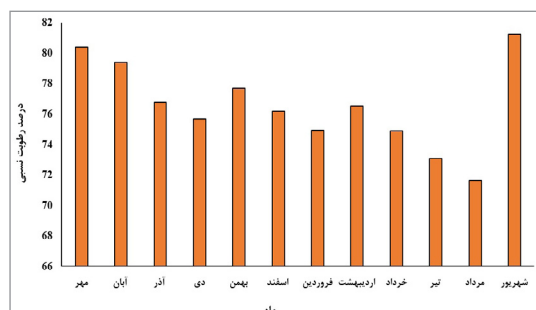
ج) پوشش گیاهی: در صورتی که تراکم پوشش گیاهی در یک منطقه بیشتر از مناطق اطراف باشد و هیچ عامل دیگری نتواند این ویژگی‌ها را توصیف کند، مشخص می‌شود بقا و پایداری اکوسیستم محلی وابسته به وجود مه پایدار است. براساس مشاهدات انجام شده، ارتفاعات مشرف به آبی بیگلو پوشش گیاهی با تراکم بالایی نسبت به مناطق دیگر دارند که نشان دهنده وجود مه مکرر با LWC بالا است.

• تحلیل پارامترهای هواشناسی

الف) رطوبت نسبی: رطوبت نسبی به عنوان یکی از اصلی ترین پارامتر هواشناسی در تشکیل مه محسوب می‌شود. در واقع، وجود رطوبت بالا در منطقه آبی بیگلو که حاصل تبخیر از سطح آب‌های دریای خزر و هدایت آن به منطقه می‌باشد، بستر تشکیل مه را فراهم می‌سازد. باتوجه به میانگین ماهانه درصد رطوبت نسبی ایستگاه آبی بیگلو (شکل ۳)، ماه‌های شهریور و مرداد با ۸۱ و ۷۱ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار رطوبت نسبی را در طول سال داشتند. با بررسی تغییرات رطوبت نسبی در ماه‌های مختلف، می‌توان گفت که ماه‌های شهریور، مهر و آبان شرایط مناسبی را برای تشکیل مه در منطقه دارند.

ب) تعداد روزهای مه آلود: جدول (۱) میانگین و درصد ماهانه و فصلی تعداد روزهای مه آلود در منطقه را نشان می‌دهد. ماه‌های مهر، شهریور و آبان به ترتیب با ۱۲/۷، ۱۱/۷ و ۱۱/۶ درصد، بیشترین فراوانی وقوع روزهای مه آلود و همچنین ماه‌های خرداد، تیر و مرداد به ترتیب با ۵/۶، ۶/۱ و ۵/۶ درصد، کمترین فراوانی وقوع روزهای مه آلود را دارد. تشکیل مه همواره به رطوبت نسبی هوا همبستگی دارد. به

همین دلیل، در ماه‌هایی از سال مانند خرداد، تیر و مرداد که کمترین مقدار رطوبت نسبی را دارد، فراوانی وقوع مه اندک است. برعکس، در ماه‌های با رطوبت نسبی بالا مانند شهریور، مهر و آبان، فراوانی وقوع مه نیز افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داد به طور متوسط ۱۴۶ روز سال (بیش از یک سوم)، در منطقه مه‌آلود است. تعداد روزهای مه‌آلود به خوبی ورود جبهه رطوبتی از دریای خزر را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً بیان شد هجوم بادهای حاوی رطوبت دریای خزر که با افت نسبی دما همراه است باعث تشکیل مه محلی می‌شود. قابل ذکر است نتایج مربوط به وقوع مه (جدول ۱)، بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاه بوده و درحالی‌که منطقه آبی‌بیگلو (منطقه مورد مطالعه) در ابتدای محل ورود جبهه رطوبتی دریای خزر قرار دارد و مشاهدات محلی حاکی از بالا بودن شدت و مدت وقوع مه در آن، نسبت به ایستگاه سینوپتیک فرودگاه می‌باشد.



شکل ۳- میانگین ماهانه درصد رطوبت نسبی در ایستگاه آبی‌بیگلو (۱۳۷۶-۱۴۰۰)

جدول ۱- میانگین و درصد ماهانه و فصلی تعداد روزهای مه‌آلود در ایستگاه سینوپتیک فرودگاه در دوره آماری ۱۳۷۶-۱۴۰۰

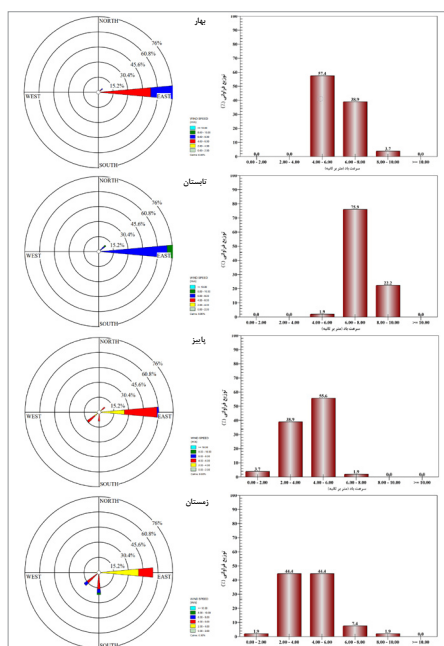
تعداد روزهای مه‌آلود				
فصل	ماه	میانگین	درصد ماهانه	درصد فصلی
پاییز	مهر	۱۸	۱۲/۳	۳۲/۸
	آبان	۱۷	۱۱/۶	
	آذر	۱۳	۸/۹	
زمستان	دی	۱۰	۶/۹	۲۳/۳
	بهمن	۱۱	۷/۵	
	اسفند	۱۳	۸/۹	
بهار	فروردین	۱۳	۸/۹	۲۰/۶
	اردیبهشت	۱۰	۶/۹	
	خرداد	۷	۴/۸	
تابستان	تیر	۸	۵/۵	۲۳/۳
	مرداد	۹	۶/۲	
	شهریور	۱۷	۱۱/۶	
مجموع		۱۴۶	۱۰۰	۱۰۰

ج) بارش: بارش به‌عنوان یکی از پارامترهای هواشناسی، سهم قابل توجهی در افزایش مقدار آب استحصالی دارد. سامانه جمع‌کننده مه، علاوه بر قطرات مه، توانایی جمع‌آوری قطرات باران را نیز دارد. جدول (۲) میانگین و درصد بارش ماهانه در ایستگاه آبی‌بیگلو را نشان می‌دهد. ماه‌های اردیبهشت و آبان هر یک با ۱۴/۴ درصد، بیشترین و مرداد ماه با ۲ درصد، کمترین بارش ماهانه را در منطقه دارند. همچنین فصل پاییز با ۳۴/۲ درصد و فصل تابستان با ۱۱/۶ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین بارش فصلی منطقه را دارد.

جدول ۲- میانگین و درصد بارش ماهانه و فصلی ایستگاه آبی‌بیگلو (۱۳۷۶-۱۴۰۰)

بارش				
فصل	ماه	میانگین (میلی‌متر)	درصد ماهانه	درصد فصلی
پاییز	مهر	۳۸/۳	۱۱	۳۴/۲
	آبان	۵۰/۴	۱۴/۴	
	آذر	۳۰/۹	۸/۸	
زمستان	دی	۲۰/۵	۵/۹	۲۴/۳
	بهمن	۳۵/۵	۱۰/۱	
	اسفند	۲۹	۸/۳	
بهار	فروردین	۳۴/۲	۹/۸	۲۹/۹
	اردیبهشت	۵۰/۲	۱۴/۴	
	خرداد	۲۰/۱	۵/۷	
تابستان	تیر	۱۰/۱	۲/۹	۱۱/۶
	مرداد	۷/۲	۲/۰	
	شهریور	۲۳/۲	۶/۶	
مجموع		۳۴۹/۸	۱۰۰	۱۰۰

د) سرعت و جهت باد: باد یکی از پارامترهای هواشناسی است که تاثیر مهمی در انتقال رطوبت و مه از نقطه‌ای به نقطه دیگر دارد. از این رو، بررسی رفتار آن اهمیت زیادی در مطالعات امکان‌سنجی استحصال آب مه دارد. به‌منظور اطلاع از وضعیت باد در منطقه، داده‌های بلندمدت سرعت و جهت باد از ایستگاه آبی‌بیگلو تهیه و تحلیل شد. جدول (۳) میانگین ماهانه سرعت باد غالب در جهات مختلف را در طول دوره آماری نشان می‌دهد. میانگین سرعت باد غالب در طول سال برابر با ۴/۶ متر بر ثانیه است. باد شرقی (بادی که از طرف شرق به غرب می‌وزد) نیز بیشترین سرعت سالانه را دارد. همچنین، به‌منظور تحلیل بادهای غالب از نمایش گرافیکی باد (گلباد) که در محیط نرم‌افزار WRPLOT ترسیم شد استفاده شد. نتایج نشان داد باد غالب منطقه، شرقی است که حدود ۷۰ درصد فراوانی بادهای سالانه را دارد. این باد که به باد خزری معروف است، رطوبت دریای خزر را با خود



شکل ۴- گلباد و توزیع فراوانی باد در فصول مختلف سال بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی آبی بیگلو

به دشت اردبیل می‌آورد. اصلی‌ترین علت وزش این باد، جبهه پرفشار سبیری در نیمه سرد سال و فرابار خزری در نیمه گرم سال است. گلباد فصلی ایستگاه آبی بیگلو برای فصول مختلف در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه فصول، باد شرقی باد غالب منطقه است. باد شرقی در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب با ۹۵، ۹۰، ۶۰ و ۵۵ درصد فراوانی، همچنان به عنوان باد غالب منطقه به حساب می‌آید. در فصل پاییز اگرچه باد غالب، همچنان شرقی است ولی از فراوانی بادهای شرقی کاسته شده و بر فراوانی بادهای جنوب غربی، شمال شرقی و جنوبی افزوده می‌شود. این روند چرخش در وضعیت بادهای فصل زمستان قوت بیشتری پیدا می‌کند و بادهای جنوبی و جنوب غربی فراوانی بیشتری پیدا می‌کنند. از طرف دیگر سرعت وزش بادهای شرقی در فصل تابستان به مراتب بیشتر از سرعت آن در فصل بهار، پاییز و زمستان است. در فصل زمستان نیز سرعت بادهای جنوب و جنوب غربی بیشتر از بادهای شرقی می‌شود.

جدول ۳- میانگین سرعت باد غالب (متر بر ثانیه) در ماه‌های مختلف و جهت‌های جغرافیایی در ایستگاه آبی بیگلو (۱۴۰۰-۱۳۷۶)

ماه / جهت جغرافیایی	شمالی	شمال شرقی	شمال غربی	شرقی	جنوبی	جنوب شرقی	جنوب غربی	غربی
مهر	۲/۹۴	۵/۴۵	۳/۳۵	۵/۹۰	۴/۸۳	۳/۰۶	۵/۷۸	۳/۷۷
آبان	۲/۸۴	۴/۹۰	۳/۴۵	۵/۲۰	۶/۰۸	۲/۸۹	۵/۴۵	۳/۴۲
آذر	۲/۷۱	۴/۱۱	۳/۱۱	۴/۹۲	۶/۷۹	۳/۰۵	۶/۰۴	۳/۵۸
دی	۳/۳۳	۴/۷۲	۳/۲۶	۴/۶۰	۷/۲۹	۳/۰۵	۶/۵۱	۳/۵۹
بهمن	۳/۱	۵/۱۱	۳/۶۲	۵/۱۸	۷/۱۴	۳/۳۵	۶/۳۸	۳/۴۷
اسفند	۳/۲۳	۵/۹۶	۳/۹۱	۶/۱۲	۶/۸۴	۳/۵۶	۷/۱۱	۴/۳۱
فروردین	۴/۰۹	۶/۰۷	۴/۲۹	۶/۳۶	۵/۹۲	۳/۳۷	۶/۴۷	۳/۹۹
اردیبهشت	۳/۶۳	۶/۱۱	۴/۰۲	۶/۴۳	۵/۰۹	۳/۱۹	۵/۶۷	۴/۱۳
خرداد	۳/۵۰	۷/۱۰	۳/۳۴	۷/۴۷	۳/۳۹	۳/۰۲	۴/۱۸	۳/۴۳
تیر	۲/۸۳	۷/۷۱	۲/۸۴	۷/۸۳	۲/۵۸	۲/۹۵	۲/۹۲	۲/۷۰
مرداد	۳/۱۹	۷/۶۲	۲/۸۹	۷/۷۲	۲/۹۵	۲/۷۵	۲/۷۳	۲/۹۴
شهریور	۲/۸	۶/۸۷	۳/۶	۶/۹۹	۳/۷۶	۲/۶۶	۴/۷۶	۳/۶۵
میلگین	۳/۱۸	۵/۹۸	۳/۴۷	۶/۲۳	۵/۲۲	۳/۰۷	۵/۳۳	۳/۵۸

• تحلیل مقدار آب جمع‌آوری شده توسط جمع کننده

همزمان با نصب جمع کننده، اندازه‌گیری آب جمع شده به‌طور روزانه از تاریخ ۱۴۰۰/۱/۲۱ شروع و تا ۱۴۰۰/۸/۲۹ ادامه یافت که در مجموع ۲۲۵ روز را شامل شد. از این مقدار، ۸۱ روز هوا مه‌آلود بود (جدول ۱). همان‌طور که در جدول (۴) نیز مشاهده می‌شود، آب جمع شده در طول دوره اندازه‌گیری توسط جمع کننده راشل برابر با ۲۸۹ لیتر بر متر مربع بوده است. حداکثر و حداقل مقدار آب جمع‌آوری شده در دوره اندازه‌گیری به ترتیب ۱۶ و ۰/۰۲ لیتر بر متر مربع بر روز به‌دست

آمد. همچنین، باتوجه به تعداد روزهای مه‌آلود در دوره اندازه‌گیری، میانگین روزانه آب جمع شده ۳/۶ لیتر بر متر مربع در روز برآورد شد. در شکل (۵) مقدار ماهانه آب جمع‌آوری شده توسط جمع کننده راشل و بارندگی در روزهای مه‌آلود مشاهده می‌شود. کل بارندگی از شروع تا پایان دوره اندازه‌گیری برابر ۲۰۹/۵ میلی‌متر بوده و مقدار بارندگی در روزهای مه‌آلود برابر با ۱۷۳ میلی‌متر بوده است. بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های مرداد و مهر اتفاق افتاده است. مشاهده می‌شود که مقدار آب استحصال در زمان‌های مختلف، متفاوت

است. در بعضی از دوره‌ها، باوجود عدم بارش، استحصال آب وجود داشته که نشان‌دهنده وجود مه در منطقه است. از طرف دیگر، در دوره‌ای با وجود بارندگی، آب جمع شده کمتر و یا بیشتر از مقدار بارندگی بوده است. بیشتر بودن آب جمع شده نسبت به بارندگی، به دلیل وقوع همزمان بارندگی و مه در منطقه است که باعث شده تا آب بیشتری استحصال شود. از طرف دیگر، ممکن است آب جمع شده کمتر از مقدار بارندگی باشد (مرداد ماه)، که می‌تواند به دلیل تاثیر

عوامل مختلف دیگر ازجمله سرعت وزش باد باشد. زیرا سرعت زیاد باد، فرصت جذب رطوبت و زهکشی مناسب آن توسط جمع‌کننده را نمی‌دهد. لازم به ذکر است در دو مورد از اندازه‌گیری‌ها با وجود بارندگی زیاد، آب جمع شده کمتر گزارش شده است که به دلیل سرریز شدن ظرف جمع‌آوری آب، خطایی در اندازه‌گیری آب وجود داشت. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود مه‌رماه بیشترین مقدار بارندگی و آب جمع شده در جمع‌کننده را داشته است.

جدول ۴- مقادیر آب استحصال شده (بارش و مه) با جمع‌کننده راشل در منطقه آبی‌بیگلو (لیتر بر مترمربع بر روز)

روز	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان
۱	-	۰/۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	-	۰/۲۸	۰/۲۴	۰	۰/۵۷	۰	۴/۹	۰
۳	-	۰/۳۷	۴	۰	۰/۵۵	۲/۳۵	۰	۴/۹
۴	-	۰/۰۸	۵	۰	۰/۴۶	۰	۰	۸/۲
۵	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶/۲
۶	-	۰	۰	۰	۴/۴۸	۰	۶	۰
۷	-	۵	۳	۰	۷/۵۲	۰	۹/۶	۱/۹۵
۸	-	۲/۸۴	۳/۵	۰	۱۱/۸۴	۰	۱۴/۰۶	۳/۸
۹	-	۰/۲۴	۰	۰	۵/۲۸	۰	۸/۵	۴
۱۰	-	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۴/۰۵	۰
۱۱	-	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲/۵	۰
۱۲	-	۳/۵	۰/۶۴	۰	۰	۳/۱	۴	۰
۱۳	-	۰	۰/۸	۰	۰	۴/۲	۱۵/۲	۰/۴۷
۱۴	-	۴	۰/۸۸	۰	۰	۰/۰۲	۱۶	۰
۱۵	-	۱/۷	۰/۹	۰	۰	۰/۵۲	۹/۱	۰
۱۶	-	۴/۵	۱/۴	۰	۰	۵/۱	۷/۳	۰
۱۷	-	۰	۱/۵	۱/۱۵	۰	۹/۰۶	۶/۲	۰
۱۸	-	۰	۲/۱	۰/۸۵	۰	۲/۱	۷/۵	۰
۱۹	-	۰	۲/۷	۰/۲۱	۰	۰/۶	۰/۲۸	۰
۲۰	-	۰/۵۵	۱/۱	۰	۰	۰	۰	۰
۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۳
۲۲	۰/۵	۰	۰	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰/۱۴
۲۳	۰	۰	۱/۲	۰	۰	۰	۲/۸	۰
۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۶	۰
۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۹	۰
۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۰
۲۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۶	۰
۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۰
۲۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۰/۰۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۱	۰/۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
مجموع	۰/۷۳	۲۳/۲۴	۲۸/۹۶	۲/۳۶	۳۰/۷	۲۷/۰۵	۱۴۵/۹۹	۲۹/۸۹

(۶) مقادیر پارامترهای کیفی آب مه مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد آب جمع شده بسیار خالص و غلظت‌های بسیار کم سولفات، نیترات، فسفات، سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم دارد. باتوجه به نتایج آزمایشات کیفی، می‌توان بیان کرد آب استحصال، مناسب نیازهای بخش شرب و کشاورزی می‌باشد. بااین حال به منظور جلوگیری از آلوده شدن آب پس از جمع‌آوری مه و برای استفاده ایمن از آن برای مصارف شرب، ممکن است نیاز به فیلتراسیون و تصفیه آب باشد.

جدول ۵- مقادیر واقعی و پتانسیل آب استحصال شده در ماه‌های مختلف

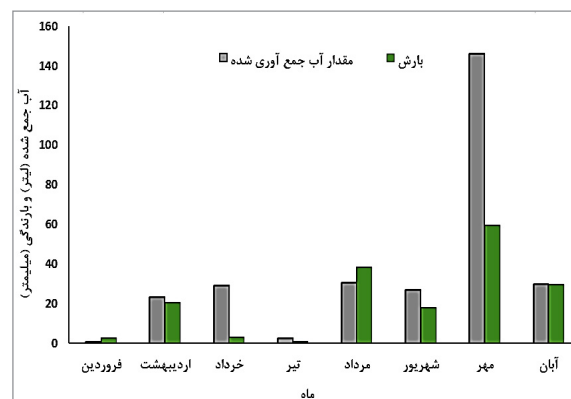
ماه	میلگین سرعت باد (متر بر ثانیه)	مقدار واقعی آب استحصالی (لیتر)	پتانسیل استحصال آب (لیتر) حداقل	حداکثر
فروردین	۳/۸	۰/۷	۵۳	۳۶۹
اردیبهشت	۳/۵	۲۳/۲	۷۷	۵۳۷
خرداد	۴/۱	۲۹	۸۲	۵۷۴
تیر	۴/۵	۲/۴	۱۱۷	۸۱۸
مرداد	۴/۳	۳۰/۷	۱۹۴	۱۳۵۸
شهریور	۳/۷	۲۷/۱	۳۲۱	۲۲۴۹
مهر	۳/۳	۱۴۶	۳۸۴	۲۶۹۰
آبان	۳/۰	۲۹/۹	۲۴۱	۱۶۸۸

جدول ۶- نتایج آنالیز کیفیت آب مه

پارامترهای کیفی	حداکثر مقدار مجاز (میلی گرم بر لیتر)	مقدار به دست آمده (میلی گرم بر لیتر)
pH	۶/۸-۵	۶/۸۱
EC	-	۰/۰۰۶۵
TDS	۱۰۰۰	۴۵
SO ₄ ²⁻	۵۰	۲/۴۳
NO ₃ ⁻	۵۰	۲/۱۲
PO ₄ ³⁻	-	۱/۰۲
Na ⁺	۲۰۰	۱/۸
K ⁺	-	۰/۸۹
Ca ²⁺	۲۰۰	۴/۴
Mg ²⁺	۱۲۵	۳/۲
HCO ₃ ⁻	-	۱/۶
Cl ⁻	۲۵۰	۳

۵-۳- تحلیل اقتصادی

در مطالعات امکان‌سنجی انجام طرح‌های استحصال آب از مه که قبل از شروع اجرای هر پروژه‌ای انجام می‌شود علاوه بر مسائل



شکل ۵- مقادیر ماهانه بارندگی و آب جمع‌آوری شده در جمع‌کننده راشل

• پتانسیل استحصال آب از مه

پتانسیل استحصال آب از مه در یک منطقه بیانگر مقدار کل آب موجود در هوا (به صورت قطرات مه) است که توسط باد منتقل می‌شود. پتانسیل استحصال آب توسط جمع‌کننده SFC به ازای مقادیر حداقل و حداکثر LWC و با فرض راندمان جمع‌آوری ۱۰۰ درصد با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد. نتایج حداقل و حداکثر آب قابل استحصال به همراه مقادیر واقعی آن در ماه‌های مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. بر این اساس بیشترین مقدار آب قابل استحصال مربوط به ماه‌های شهریور و مهر بوده و کمترین آن مربوط به ماه فروردین می‌باشد. یک جمع‌کننده، هرگز قادر به جمع‌آوری همه محتوی آب مایع عبوری نمی‌باشد. از مهمترین دلایل کاهش آب قابل استحصال می‌توان به راندمان پایین جمع‌کننده اشاره کرد. به طور کلی راندمان جمع‌کننده‌های مه سنتی، در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد است (De Dios Rivera, ۲۰۱۱; Azeem و همکاران, ۲۰۲۰b). از عوامل دیگر موثر در پایین بودن راندمان استحصال آب جمع‌کننده‌ها می‌توان به کاهش سرعت و تغییر جهت وزش باد و کاهش تراکم قطرات مه اشاره نمود. بااین حال، در سال‌های اخیر پژوهش‌های مناسبی در خصوص جمع‌آوری آب مه با استفاده از نیروی الکترواستاتیک شروع شده است که نشان‌دهنده امکان جمع‌آوری مه با راندمان بالای ۹۰ درصد می‌باشد (Cruzat و Varanasi, ۲۰۱۸; Damak و Hanckes, ۲۰۱۸; Jiang و Yan, ۲۰۲۱).

• کیفیت آب مه

ارزیابی دقیق کیفیت آب مه و استفاده از آن برای اهداف مختلف، نیازمند انجام آزمایش‌های کیفی و تحلیل شیمیایی آن است. با بررسی این تحلیل‌ها می‌توان نوع مصرف آب استحصال را نیز تعیین کرد. به منظور بررسی کیفیت آب استحصال شده در این پژوهش، ضمن آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب جمع‌آوری شده، نتایج آن با استاندارد سازمان جهانی بهداشت مقایسه شد. در جدول

پژوهش حاضر به منظور امکان‌سنجی استحصال آب از مه در منطقه آبی‌بیگلو در شمال غرب ایران انجام شد. در بخش اول پژوهش، با مشاهدات محلی و تحلیل آمار بلندمدت پارامترهای هواشناسی، امکان استحصال آب مه از نظر عوامل مختلف جغرافیایی و اقلیمی بررسی شد. در بخش دوم پژوهش، به صورت میدانی و با استفاده از جمع‌کننده مه استاندارد، مقادیر آب استحصال شده به صورت روزانه اندازه‌گیری و با نتایج پژوهش‌های گذشته مقایسه شد. نتایج بررسی پارامترهای هواشناسی شامل رطوبت نسبی، فراوانی وقوع مه، بارش، سرعت و جهت باد نشان دهنده شرایط مناسب اجرای سامانه استحصال آب از مه در منطقه می‌باشد. میانگین رطوبت نسبی بالای ۷۰ درصد در طول سال، بیانگر تشکیل مه پایدار در منطقه است. بالا بودن تعداد روزهای مه‌آلود (بیش از یک سوم سال) نشان داد پدیده مه در منطقه مورد مطالعه مقطعی و فصلی نیست. همچنین، وجود سرعت باد مناسب (به طور میانگین ۴/۶ متر بر ثانیه) می‌تواند مه حاصل از دریای خزر را به حرکت درآورد و به منطقه منتقل کند. باتوجه به اینکه سرعت باد غالب در بازه ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه، فراوانی بالایی دارد، بنابراین پتانسیل زیادی در جمع‌آوری مه ورودی به منطقه با راندمان قابل قبول و بدون آسیب رسیدن به سامانه جمع‌کننده وجود دارد. همچنین به دلیل غالب بودن باد شرقی با فراوانی ۷۰ درصد، استفاده از جمع‌کننده‌های تخت با هزینه کم و نصب آسان توجیه‌پذیر است. باتوجه به این که سامانه جمع‌کننده می‌تواند علاوه بر مه، آب حاصل از بارش را نیز جمع‌آوری و ذخیره کند، لذا باتوجه به میانگین بارش سالانه منطقه (۳۵۰ میلی‌متر)، می‌توان استحصال مقدار آب قابل توجهی را انتظار داشت. میانگین روزانه آب جمع‌شده در دوره وقوع مه که در بخش مطالعه میدانی برابر با ۳/۶ لیتر در متر مربع به دست آمد در مقایسه با نتایج پروژه‌های مشابه مقدار قابل قبولی را نشان می‌دهد. به طور کلی باتوجه به نتایج کمی و کیفی آب جمع‌آوری شده می‌توان به منظور تامین بخشی از نیاز شرب منطقه یا نیاز آبیاری قسمتی از اراضی کشاورزی، اجرای طرح‌های استحصال آب از مه را مورد توجه قرار داد.

با وجود پتانسیل قابل قبول استحصال آب از مه در منطقه، وجود برخی از محدودیت‌ها می‌تواند در روند اجرای سامانه مشکل‌ساز باشد. از جمله محدودیت‌های موجود در این پژوهش می‌توان به عدم امکان نصب جمع‌کننده‌ها در ارتفاعات منطقه (به دلایل حفاظتی) نام برد. این مسئله باعث کم‌برآوردی پتانسیل واقعی استحصال آب از مه در پروژه‌های تحقیقاتی و کاهش راندمان جمع‌آوری آب در پروژه‌های عملی می‌شود. تفکیک سهم آب استحصالی مه از بارش یکی دیگر از محدودیت‌ها است. حتی با وجود دسترسی به داده‌های بارش، امکان تفکیک آن با دقت

فنی، ملاحظات اقتصادی نیز در نظر گرفته می‌شود. یک طرح پژوهشی بدون داشتن توجیه اقتصادی، امکان شکست پروژه را افزایش می‌دهد. به همین دلیل لازم است سامانه جمع‌آوری مه از دیدگاه اقتصادی نیز بررسی شود. در این پژوهش به منظور تحلیل اقتصادی، هزینه اجرای سامانه استحصال آب از مه در مقیاس بزرگ (LFC) برآورد و سپس باتوجه به حجم آب استحصال شده در طول یک سال، هزینه واحد آب استحصال شده محاسبه شد. هزینه سامانه استحصال آب با لحاظ تجهیزات فلزی و پایدار آن برابر با ۵۷/۲ میلیون ریال بود، بنابراین هزینه واحد آب استحصال شده برابر با ۲۲۶۷/۳ ریال در لیتر به دست آمد. لازم به ذکر است هزینه واحد آب به ازای حجم آب استحصال شده در یک سال بوده است. درحالی که سامانه، قابلیت بهره‌برداری در طول چندین سال را دارد.

• مقایسه نتایج پژوهش با مطالعات پیشین

میانگین آب جمع‌شده توسط جمع‌کننده SFC در منطقه آبی‌بیگلو برابر با ۳/۶ لیتر بر مترمربع در روز به دست آمد که با نتایج مطالعات در نقاط مختلف دنیا قابل مقایسه است. بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد میانگین آب استحصال شده از مه در جمع‌کننده نوع SFC برابر با ۶ لیتر در مترمربع در روز بوده است که بیشترین مقدار آن با ۳۰ لیتر در مترمربع در روز مربوط به عمان (Schemenauer و Cereceda, ۱۹۹۴b) و کمترین آن مربوط به شیلی با ۰/۱۶ لیتر در مترمربع در روز (Carvajal و همکاران، ۲۰۲۲) بوده است. یکی از دلایل پایین بودن میانگین استحصال آب از مه در منطقه مورد مطالعه نسبت به متوسط جهانی، عدم نصب جمع‌کننده در نقاط ارتفاعی محل جبهه ورودی مه به دشت اردبیل می‌باشد. در این پژوهش به دلیل سهولت دسترسی و اندازه‌گیری دقیق و مطمئن، جمع‌کننده‌ها در نزدیکی آبی‌بیگلو و در ارتفاع ۱۳۴۰ متری نصب شدند، درحالی که ارتفاعات منطقه ورودی به دشت اردبیل حداکثر رقومی برابر با ۱۷۰۰ متر دارند. لذا در صورتی که جمع‌کننده‌ها در رقوم بالاتری نصب شوند می‌توان انتظار داشت مقدار بیشتری آب استحصال شود. نکته دیگر مربوط به مدت انجام اندازه‌گیری‌ها است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اندازه‌گیری‌های انجام شده بخشی از ماه‌های فروردین و آذر و کل زمستان را پوشش می‌داد (به دلیل نامناسب بودن شرایط جوی). باتوجه به این که بخش قابل توجهی از رخدادهای مه و بارش در این بازه زمانی رخ می‌دهد، بنابراین به نظر می‌رسد پتانسیل جمع‌آوری آب مه بیش از مقدار به دست آمده می‌تواند باشد. به بیان دیگر نرخ استحصال آب ۳/۶ لیتر در مترمربع در روز مربوط به مدت زمان دوره وقوع مه است. براساس داده‌های بلند مدت (۱۴۰۰-۱۳۷۶)، دوره وقوع مه در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۴۶ روز در سال است که بیش از یک سوم سال را شامل می‌شود. بنابراین باتوجه به دوره طولانی مدت وقوع مه، برای استحصال آب از مه در منطقه مورد مطالعه می‌توان پتانسیل بالایی را انتظار داشت.

Al-Mandhari, A. (2019). Achieving" Health for All by All" in the Eastern Mediterranean Region. *Eastern Mediterranean Health Journal*, 25(9), 595-596. doi: [10.26719/2019.25.9.595](https://doi.org/10.26719/2019.25.9.595)

Azeem, M., Guérin, A., Dumais, T., Caminos, L., Goldstein, R. E., Pesci, A. I., de Dios Rivera, J., Josefina Torres, M., Wiener, J., Luis Campos, J., & Dumais, J. (2020a). Optimal design of multilayer fog collectors. *ACS applied materials & interfaces*, 12(6), 7736-7743. doi: [10.1021/acsami.9b19727](https://doi.org/10.1021/acsami.9b19727)

Azeem, M., Noman, M. T., Wiener, J., Petru, M., & Louda, P. (2020b). Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101169. doi: [10.1016/j.eti.2020.101169](https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101169)

Carrera-Villacres, D. V., Robalino, I. C., Rodriguez, F. F., Sandoval, W. R., Hidalgo, D. L., & Toulkeridis, T. (2017). An innovative fog catcher system applied in the Andean communities of Ecuador. *Transactions of the ASABE*, 60(6), 1917-1923. doi: [10.13031/trans.12368](https://doi.org/10.13031/trans.12368)

Carvajal, D., Silva-Llanca, L., Larraguibel, D., & González, B. (2020). On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*, 245, 105123. doi: [10.1016/j.atmosres.2020.105123](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123)

Carvajal, D., Mora-Carreño, M., Sandoval, C., & Espinoza, S. (2022). Assessing fog water collection in the coastal mountain range of Antofagasta, Chile. *Journal of Arid Environments*, 198. doi: [10.1016/j.jaridenv.2021.104679](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104679)

Cereceda, P., Larrain, H., Lázaro, P., Osses, P., Schemenauer, R. S., & Boroevic, X. (2000). La niebla, agua potable para zonas rurales. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 45, 143-160.

Cruzat, D., & Jerez-Hanckes, C. (2018). Electrostatic fog water collection. *Journal of Electrostatics*, 96, 128-133. doi: [10.1016/j.elstat.2018.10.009](https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.009)

Damak, M., & Varanasi, K. K. (2018). Electrostatically driven fog collection using space charge injection. *Science advances*, 4(6), eaao5323. doi: [10.1126/sciadv.aao.5323](https://doi.org/10.1126/sciadv.aao.5323)

De Dios Rivera, J. (2011). Aerodynamic collection efficiency of fog water collectors. *Atmospheric Research*, 102(3), 335-342. doi: [10.1016/j.atmosres.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005)

مناسب میسر نمی‌باشد و این به دلیل زاویه متفاوت جبهه بارش و جمع‌کننده است که در سرعت‌های مختلف باد تغییر می‌یابد. اگر چه از دیدگاه بهره‌برداری، منشا آب استحصال شده چندان اهمیتی ندارد، اما تفکیک سهم بارش و مه به منظور انجام مطالعات و توسعه سامانه‌های جمع‌کننده مه، امری ضروری است. باتوجه به این که تحقیق حاضر زمینه را برای انجام مطالعات بعدی در این منطقه فراهم می‌کند، پیشنهاد می‌شود محیطی مناسب با تهیدات حفاظتی با کمک مردم بومی و یا سازمان‌های مربوط به آن در ارتفاعات منطقه ایجاد شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود برای به حداقل رساندن خطا در تفکیک سهم مه و بارش در آب استحصال شده، از سامانه‌های کنترلی و اینترنت اشیا به جای قرائت روزانه آب جمع‌آوری شده، استفاده شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی به شماره قرارداد ۹۹-د-۹-۱۳۷۷ انجام شده است. نویسندگان همچنین از شرکت آب منطقه‌ای اردبیل برای در دسترس قرار دادن مجموعه داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش تقدیر و تشکر می‌کنند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Liquid Water Content (LWC)
- 2-Large Fog Collector (LFC)
- 3-Standard Fog Collector (SFC)
- 4-Inca 5-Camanchaca
- 6-El Tofo 7-Liam
- 8-Andes 9-Galat

منابع

صمدزاده، رسول. (۱۳۸۸). تحلیل سیستم‌های محیطی دامنه‌های باختری ارتفاعات باغ‌وداغ و نقش آن‌ها در پیدایش بیوم جنگلی فندقلو. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۶(۲۲)، ۸۵-۱۰۵.

میان‌آبادی، حجت. (۱۳۹۱). آب، امنیت و رودخانه‌های مرزی. همایش ملی شهرهای مرزی و امنیت، چالش‌ها و رهیافت‌ها. دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Algarni, S. (2018). Assessment of fog collection as a sustainable water resource in the southwest of the Kingdom of Saudi Arabia. *Water and environment journal*, 32(2), 301-309. doi: [10.1111/wej.12330](https://doi.org/10.1111/wej.12330)

- water harvesting. *Frontiers in Water*, 3, 675269. doi: [10.3389/frwa.2021.675269](https://doi.org/10.3389/frwa.2021.675269)
- Regalado, C. M., & Ritter, A. (2016). The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*, 178, 45-54. doi: [10.1016/j.atmosres.2016.03.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006)
- Ritter, A., Regalado, C. M., & Aschan, G. (2008). Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model. *Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 920-935. doi: [10.1175/2008JHM992.1](https://doi.org/10.1175/2008JHM992.1)
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994a). A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33(11), 1313-1322. doi: [10.1175/1520-0450](https://doi.org/10.1175/1520-0450)
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994b). Fog collection's role in water planning for developing countries. In *Natural Resources Forum*, 18(2), 91-100. doi: [10.1111/j.1477-8947.1994.tb00879](https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1994.tb00879)
- Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., & Boreyko, J. B. (2018). Fog harvesting with harps. *ACS applied materials & interfaces*, 10(14), 11979-11986. doi: [10.1021/acsami.7b17488](https://doi.org/10.1021/acsami.7b17488)
- Tav, J., Masson, O., Burnet, F., Paulat, P., Bourriane, T., Conil, S., & Pourcelot, L. (2018). Determination of fog-droplet deposition velocity from a simple weighing method. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(1), 103-113. doi: [10.4209/aaqr.2016.11.0519](https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.11.0519)
- Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y., & Wang, J. (2018). Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2, 1452-1475. doi: [10.1016/j.joule.2018.07.015](https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015)
- Yan, X., & Jiang, Y. (2021). Numerical evaluation of the fog collection potential of electrostatically enhanced fog collector. *Atmospheric Research*, 248, 105251. doi: [10.1016/j.atmosres.2020.105251](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105251)
- Zolghadr-Asli, B., McIntyre, N., Djordjevic, S., Farmani, R., Pagliero, L., Martínez-Alvarez, V., & Maestre-Valeiro, J. F. (2023). A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(56), 118161-118174. doi: [10.1007/s11356-023-30662-x](https://doi.org/10.1007/s11356-023-30662-x)
- Estrela, M. J., Valiente, J. A., Corell, D., Fuentes, D., & Valdecantos, A. (2009). Prospective use of collected fog water in the restoration of degraded burned areas under dry Mediterranean conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 149(11), 1896-1906. doi: [10.1016/j.agrformet.2009.06.016](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.016)
- Elshennawy, A. A., Abdelaal, M. Y., & Hamed, A. M. (2022). Fog collection-materials, techniques and affecting parameters-A review. *Seafic Engineering Research Journal*, 2(2), 102-127. doi: [10.14744/seafic.2022.0009](https://doi.org/10.14744/seafic.2022.0009)
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature communications*, 12(1), 1-11. doi: [10.1038/s41467-021-25026-3](https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3)
- Ismail, Z., & Go, Y. I. (2021). Fog-to-Water for Water Scarcity in Climate-Change Hazards Hotspots: Pilot Study in Southeast Asia. *Global Challenges*, 5(5). doi: [10.1002/gch2.202000036](https://doi.org/10.1002/gch2.202000036)
- Khalil, M. M., Kara-Ali, A., & Assad, M. (2022). Potential of harvesting water from fog and dew water over semi-arid and arid regions in Syria. *Water Supply*, 22(1), 874-882. doi: [10.2166/ws.2021.229](https://doi.org/10.2166/ws.2021.229)
- Lakra, K., & Avishek, K. (2022). A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 33(2), 319-353. doi: [10.1007/s12210-022-01060-1](https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1)
- MacQuarrie, K., Shrestha, Y., Schemenauer, R. S., Vitez, F., Kowalchuk, K., & Taylor, R. (2001). Results from a high elevation fog water supply project in Nepal. In *Proceedings of 2th International Conference on Fog and Fog Collection*. St. John's, Canada.
- Molina, J. M., & Escobar, C. M. (2008). Fog collection variability in the Andean Mountain range of Southern Colombia. *Die Erde*, 139, 127-140.
- Pauli, E., Andersen, H., Bendix, J., Cermak, J., & Egli, S. (2020). Determinants of fog and low stratus occurrence in continental central Europe—a quantitative satellite-based evaluation. *Journal of Hydrology*, 591, 125451. doi: [10.1016/j.jhydrol.2020.125451](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125451)
- Qadir, M., Jiménez, G. C., Farnum, R. L., & Trautwein, P. (2021). Research history and functional systems of fog

A Review of the Application of Data Science and Machine Learning in Agricultural Water Management

R. Delbaz^{1*}, H. Ebrahimian^{2*}

1, 2- PhD Candidate and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*(Corresponding Author Email: ebrahimian@ut.ac.ir)

Received: 08-02-2024

Revised: 27-04-2024

Accepted: 11-05-2024

Available Online: 29-08-2024

مروری بر کاربرد علم داده و یادگیری ماشین در مدیریت آب کشاورزی

رضا دل‌باز^۱، حامد ابراهیمیان^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، (E-Mail: ebrahimian@ut.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

Abstract

New technologies and innovations can improve water management in agriculture. Data science and machine learning are emerging technologies. Data science is a growing field in the world of technology that helps analyze, extract information, and understand patterns and relationships in big data. It plays a pivotal role in a wide range of industries, including agriculture and environmental science. One field in which data science has a significant impact is water science and engineering. The aim of this research is to provide a comprehensive definition of data science and review existing studies in this field. According to the results, 10% of the studies conducted in the field of machine learning in agriculture are related to water management. Furthermore, among all studies conducted in this field from 2018 to 2020, Iran accounted for 5.62% of the total. This field of research has primarily focused on determining crop evapotranspiration, predicting yield, and assessing water quality. However, given the novelty of this technology, there are still gaps in studies in this field, which is expected to be attracted by researchers in the future. On the other hand, like other emerging technologies, there are challenges in the implementation and execution of data science that require collaborative efforts among policymakers, researchers, and farmers to address. To resolve these challenges, it is necessary for these stakeholders to propose solutions that can optimally leverage the benefits of data science while simultaneously addressing the existing challenges and problems.

Keywords: Irrigation, Data Mining, Remote Sensing, Water Management, Artificial Intelligence.

چکیده

مدیریت آب در کشاورزی از طریق فناوری‌ها و نوآوری‌های جدید قابل ارتقا است. از جمله فناوری‌های رو به رشد، علم داده و یادگیری ماشین است. علم داده یک حوزه رو به رشد در دنیای فناوری اطلاعات است که به تحلیل، استخراج اطلاعات، و فهم الگوها و روابط در داده‌های بزرگ کمک می‌کند. این حوزه در صنایع مختلف و بخصوص در زمینه‌های کشاورزی و محیط‌زیست نقش مهمی ایفا می‌کند. یکی از زمینه‌هایی که علم داده در آن تأثیر بسزایی دارد، زمینه علوم و مهندسی آب است. هدف این پژوهش ارائه یک تعریف جامع از علم داده و بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ۱۰ درصد مطالعات انجام شده این حوزه در کشاورزی، به موضوع مدیریت آب اختصاص یافته‌اند. همچنین در بین کل مطالعات انجام شده در این حوزه بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، ایران سهم ۵/۶۲ درصدی بین این مطالعات داشته است. تمرکز پژوهشگران نیز، بیشتر در موضوعات تعیین تبخیر-تعرق گیاه، پیش‌بینی عملکرد و تعیین کیفیت آب بوده است. با این حال با توجه به نوظهور بودن این فناوری، هنوز خلاءهای مطالعاتی در این حوزه وجود دارد که انتظار می‌رود در آینده نظر محققین به آن‌ها جلب شود. از طرف دیگر، همانند سایر فناوری‌های جدید، مشکلاتی در زمینه اجرا و پیاده‌سازی آن وجود دارد که برای حل این مشکلات، لازم است تا سیاستمداران، محققین، و کشاورزان با همکاری یکدیگر، راهکارهایی را ارائه کنند که بتوانند از مزایای علم داده به شکل بهینه استفاده کنند و در عین حال به چالش‌ها و مشکلات موجود پاسخ دهند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، داده‌کاوی، سنجش از دور، مدیریت آب، هوش مصنوعی.

آب راهبردی‌ترین کالای روی کره زمین است و اگر از آن محافظت نشود، کمیاب می‌شود. به طور متوسط، ۷۰ درصد آب برداشتی در کشاورزی مصرف می‌شود (Wang و همکاران، ۲۰۰۲). به گفته فائو (FAO)، کشاورزی باید با چالش‌های پیچیده‌ای که به دلیل افزایش جمعیت، رشد اقتصادی، تغییر ترجیحات مصرف‌کنندگان و رقابت برای آب به وجود آمده، سازگار شود (FAO، ۲۰۲۰). چالش‌هایی مانند افزایش جمعیت و تقاضا برای غذا، تخریب خاک‌ها و اکوسیستم‌های مرتبط با آب، آلودگی، و تغییرات آب و هوایی عدم قطعیت‌هایی را در مورد دسترسی به منابع آب به همراه دارد (Rosegrant و همکاران، ۲۰۰۹؛ Tilman، ۲۰۱۷؛ Sundmaecker و همکاران، ۲۰۲۲). این چالش‌ها شامل عدم قطعیت بالا در مورد اثرات تغییر آب و هوا و همچنین افزایش هزینه‌های استخراج آب است (Rosegrant و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین گزارش برنامه توسعه سازمان ملل در سال ۲۰۲۱ درباره "استفاده از فناوری دیجیتال برای کشاورزی پایدار" بیان می‌کند که تولید جهانی غذا باید ۹۸ درصد افزایش یابد تا نیاز جمعیت رو به رشد انسانی (۹/۹ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰) را تأمین کند (Burra و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، چگونگی مدیریت و کاهش مصرف آب بدون به خطرانداختن بهره‌وری، حیاتی است. اگر از فناوری‌ها و نوآوری‌های جدید استفاده شود، می‌توان به شیوه‌های مناسب کشاورزی دست یافت (Sundmaecker و همکاران، ۲۰۲۲). از جمله فناوری‌های رو به رشد در مطالعات مختلف، علم داده^۲ و یادگیری ماشین^۳ است.

اصطلاح علم داده در اواخر دهه ۱۹۹۰ در بحث‌های مربوط به نیاز آماردانان به پیوستن به دانشمندان رایانه برای ایجاد دقت ریاضی در تجزیه و تحلیل محاسباتی مجموعه داده‌های بزرگ مطرح شد. در سال ۲۰۰۱ ویلیام اس. کلیولند^۴ برنامه عملیاتی را برای تأسیس دانشگاهی در زمینه علم داده منتشر کرد. این برنامه بر لزوم درک علم داده به عنوان یک مبحث چند رشته‌ای تأکید داشت. علم داده نشان‌دهنده بهینه‌سازی فرآیندها و منابع است (Tierney و Kelleher، ۲۰۱۸). علم داده بینش‌های داده را تولید می‌کند؛ نتیجه‌گیری‌ها یا پیش‌بینی‌های عملی و مبتنی بر داده‌ها که می‌توان از آن‌ها برای درک و بهبود حوزه‌های مختلف علمی استفاده کرد. گفته می‌شود استفاده از بینش علم داده مانند توانایی دیدن در تاریکی است (Pierson، ۲۰۲۱). به طور کلی هدف علم داده بهبود تصمیم‌گیری بر مبنای بینش‌هایی است که از مجموعه داده‌های بزرگ استخراج شده‌اند.

بر این اساس، علوم داده حوزه نسبتاً جدیدی است که بسیاری از صنایع از جمله کشاورزی را متحول می‌کند. کشاورزی دقیق که اکنون کشاورزی دیجیتال نیز نامیده می‌شود، به عنوان زمینه‌های

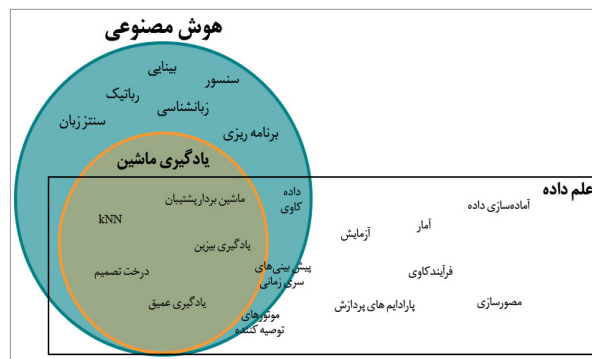
علمی جدیدی مطرح شده است که از رویکردهای مبتنی بر داده‌ها برای افزایش بهره‌وری کشاورزی و در عین حال به حداقل رساندن اثرات محیط‌زیستی آن استفاده می‌کنند. داده‌های تولید شده در کشاورزی مدرن که توسط انواع حسگرهای مختلف فراهم و تولید می‌شوند سبب درک بهتر محیط عملیاتی (تعامل پویا با محصول، خاک و شرایط آب و هوایی) می‌شود و در نهایت، منجر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و سریع‌تر می‌شود. با این وجود مدیریت آب در کشاورزی به تلاش‌های قابل توجهی نیاز دارد و این موضوع نقش مهمی در تعادل هیدرولوژیکی، اقلیمی و کشاورزی ایفا می‌کند (Liakos و همکاران، ۲۰۱۸). به طور کلی هدف از این پژوهش، تعریف دقیق علم داده و سایر اصطلاحات مشتق شده از آن و یا مشابه آن مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در مدیریت آب کشاورزی است. معمولاً این تعاریف به اشتباه به جای همدیگر استفاده می‌شوند. در این پژوهش همچنین ابزارهای کلی مورد استفاده در علم داده معرفی و مورد بحث قرار گرفته و در انتها مطالعات انجام شده نیز در این حوزه بررسی خواهد شد.

مروری بر تعاریف هوش مصنوعی^۵، علم داده، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق^۶

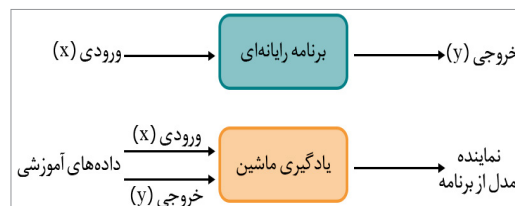
امروزه در کنار واژه علم داده، معمولاً واژه‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نیز به کار برده می‌شود. در شکل (۱) وجوه تمایز و اشتراک هوش مصنوعی، علم داده، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نشان داده شده است. هوش مصنوعی در واقع اصطلاحی است برای توصیف عواملی که به طور مستقل عمل می‌کنند. در برخی موارد عوامل هوش مصنوعی روبات‌ها و در برخی دیگر برنامه‌های کاربردی نرم‌افزاری هستند (Pierson، ۲۰۲۱). به طور کلی در تعریف هوش مصنوعی می‌توان گفت هر عملی که به ماشین قابلیت تقلید از رفتار انسانی به خصوص عملکردهای شناختی را بدهد، در حیطه هوش مصنوعی قرار خواهد گرفت. به عنوان مثال تشخیص چهره، زبان‌شناسی، رانندگی خودکار و سایر مواردی که در شکل (۱) مشاهده می‌شود در زمره هوش مصنوعی قرار می‌گیرند (Kotu و Deshpande، ۲۰۱۸). یادگیری ماشین که زیرمجموعه هوش مصنوعی است، در واقع ابزارهایی هستند که از آن‌ها برای انتقال تجربیات انسانی به ماشین استفاده می‌شوند. این تجربیات در واقع همان داده‌ها هستند. داده‌هایی که برای یادگیری ماشین استفاده می‌شوند اصطلاحاً «داده‌های آموزشی»^۷ گفته می‌شوند.

یادگیری ماشین مدل برنامه‌نویسی سنتی را وارونه می‌کند (شکل ۲). در یک برنامه رایانه‌ای، مجموعه‌ای از قوانین و روابط به رایانه داده شده و سپس رایانه داده‌های ورودی را با استفاده از روابط از پیش تعیین شده به خروجی تبدیل می‌کند. اما الگوریتم‌های

یادگیری ماشین که یادگیرندگان نیز نامیده می‌شوند، هم ورودی و هم خروجی شناخته شده (داده‌های آموزشی) را گرفته تا مدلی را برای برنامه‌ای که ورودی را به خروجی تبدیل می‌کند، پیدا کنند (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸).



شکل ۱- تفاوت‌ها و اشتراک‌های هوش مصنوعی، علم داده و یادگیری ماشین (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸)



شکل ۲- تفاوت برنامه‌های سنتی رایانه‌ای در مقابل یادگیری ماشین (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸)

در ده سال گذشته پیشرفت‌های عمده‌ای در یادگیری ماشین، به‌ویژه یادگیری عمیق، ایجاد شد که در نحوه پردازش رایانه‌ها به منظور پردازش داده‌های زبان و تصویر، تغییرات اساسی را ایجاد کرد. اصطلاح یادگیری عمیق خانواده‌ای از مدل‌های شبکه عصبی را توصیف می‌کند که از لایه‌های متعددی از واحدهای موجود در شبکه تشکیل شدند. شبکه‌های عصبی از دهه ۱۹۴۰ وجود داشتند؛ اما این شبکه‌ها با مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده بهترین عملکرد را داشتند و از منابع محاسباتی زیادی برای آموزش استفاده می‌کنند. بنابراین، ظهور یادگیری عمیق با رشد کلان داده^۸ و قدرت محاسبات مرتبط است. با این تفاسیر می‌توان گفت، یادگیری عمیق، در زیرمجموعه یادگیری ماشین قرار گرفته و به عنوان یکی از ابزارهای خارق‌العاده آن شناخته می‌شود (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸). حال آن‌که علم داده، براساس آن‌چه که پیش‌تر تعریف شد به مجموعه‌ی روش‌ها و فعالیت‌هایی گفته می‌شود که بر روی داده‌ها انجام می‌شود. در علوم داده، تحلیل اولیه داده‌ها، پیش‌پردازش داده‌ها و تفسیر و نمایش داده‌ها وجود دارد. واکنشی داده‌ها و ذخیره‌سازی آن‌ها نیز جزو فعالیت‌های علوم داده قرار می‌گیرد. در تعریف دیگر برای علم داده آمده است که علم داده کاربرد تجاری یادگیری ماشین،

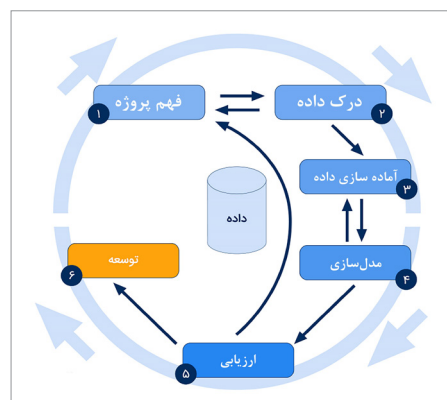
هوش مصنوعی و سایر زمینه‌های کمی مانند آمار، مصورسازی و ریاضیات است. در حقیقت علم داده یک زمینه بین رشته‌ای است که ارزش را از داده‌ها استخراج می‌کند. علم داده امروزه، به شدت به یادگیری ماشین متکی است (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸).

روش‌شناسی علم داده

• تهیه و آماده‌سازی داده

علم داده اساساً به داده وابسته است. یک مجموعه داده از داده‌های مربوط به مجموعه‌ای از موجودیت‌ها^۹ شکل می‌گیرد که هر موجودیت بر اساس مجموعه‌ای از ویژگی‌ها^{۱۰} توصیف می‌شود. یک مجموعه داده در ابتدایی‌ترین شکل در یک ماتریس $n \times m$ به نام رکورد تحلیل‌ها^{۱۱} (مجموعه داده‌ها) سازمان یافته است که در آن n تعداد موجودیت‌ها (سطرها) و m تعداد ویژگی‌ها (ستون‌ها) هستند. ساخت رکورد تحلیلی پیش نیاز انجام علم داده است. در واقع بیشترین زمان و تلاش در پروژه‌های علم داده صرف ایجاد، متناسب کردن و به‌روزرسانی رکورد تحلیلی می‌شود (Kelleher و Tierney، ۲۰۱۸). در پروژه‌های علم داده در این زمینه که چه ویژگی‌هایی را می‌توان انتخاب کرد و چه ویژگی‌هایی بر اساس دانش متخصص انتخاب می‌شوند، محدودیت‌هایی وجود دارد. ویژگی‌ها انواع مختلفی داشته و برای هر نوع ویژگی تجزیه و تحلیل مختلفی وجود دارد. بنابراین، آگاهی و شناخت انواع مختلف ویژگی، مهارت اصلی دانشمند داده است. ویژگی‌های عددی^{۱۲}، اسمی^{۱۴} و ترتیبی^{۱۵} انواع استاندارد ویژگی هستند (Kelleher و Tierney، ۲۰۱۸). ویژگی‌های عددی مقادیر قابل اندازه‌گیری را توصیف می‌کنند. به عنوان مثال، عملکرد گیاه، مقدار آب آبیاری، مقدار کود و موارد این چنینی که با مقادیر صحیح یا واقعی نشان داده می‌شوند. ویژگی‌های اسمی (که به دسته‌ای نیز معروف است) مقادیر را از مجموعه متناهی می‌گیرد. این مقادیر برای دسته‌ها، کلاس‌ها یا حالت‌های اسمی هستند. به عنوان مثال نوع سامانه آبیاری، نوع کود و نام منطقه مزرعه در این دسته از ویژگی‌ها قرار می‌گیرند. ویژگی‌های ترتیبی مشابه ویژگی‌های اسمی هستند با این تفاوت که اعمال ترتیب روی دسته‌های ترتیبی اعمال می‌شود. به عنوان مثال نظر کارشناس در مورد عملکرد یک مجموعه زراعی می‌تواند به صورت خوب، بد و متوسط باشد. داده‌ها نیز به شکل دیگری دسته‌بندی می‌شوند. داده‌ها می‌توانند ساختاریافته، نیمه ساختاریافته و بدون ساختار باشند. داده‌های ساختاریافته، که تنها ۵ درصد از کل داده‌های موجود را تشکیل می‌دهد، به داده‌های جدولی موجود در صفحات گسترده یا پایگاه داده‌های رابطه‌ای اشاره دارد. متن، تصاویر، صدا و ویدئو نمونه‌هایی از داده‌های بدون ساختار هستند که گاهی فاقد سازماندهی ساختاری مورد نیاز ماشین‌ها برای تجزیه و تحلیل هستند. داده‌های نیمه ساختاریافته

زنجیره‌ای بین داده‌های کاملاً ساختاریافته و بدون ساختار را در بر می‌گیرد. زبان نشانه‌گذاری توسعه‌پذیر (XML^{۱۶}), یک زبان متنی برای تبادل داده‌ها در وب, یک نمونه معمولی از داده‌های نیمه ساختاریافته است. اسناد XML حاوی تگ‌های داده تعریف شده توسط کاربر هستند که آنها را برای ماشین قابل خواندن می‌کند. این تفاوت‌ها باعث شده است تا انتخاب بهترین و بهینه‌ترین روش‌های بررسی داده‌ها بسته به نوع پروژه دشوار باشد. به همین منظور متخصصین حوزه علم داده برای رسیدن به نتیجه نهایی, شیوه‌نامه‌های مختلفی را ارائه کرده‌اند که معروف‌ترین آن فرآیند کریسپ^{۱۷} است (Chapman, ۱۹۹۹). فرآیند کریسپ در ابتدا توسط کنسرسیومی از سازمان‌ها متشکل از فروشندگان برجسته علم داده, شرکت‌های مشاور و محققان در کارگاهی با حمایت مالی کمیسیون اروپایی تحت برنامه ESPRIT ارائه شد. از آن زمان تاکنون اقدامات متعددی برای به‌روزرسانی این فرآیند انجام شد؛ با این حال هنوز هم غالباً از نسخه اصلی استفاده می‌شود. این فرآیند شامل شش مرحله است که تحت عنوان چرخه عمر کریسپ شناخته می‌شود. این چرخه عمر شامل فهم پروژه, درک و آماده‌سازی داده, مدل‌سازی, ارزیابی, توسعه و بازبینی است (شکل ۳).



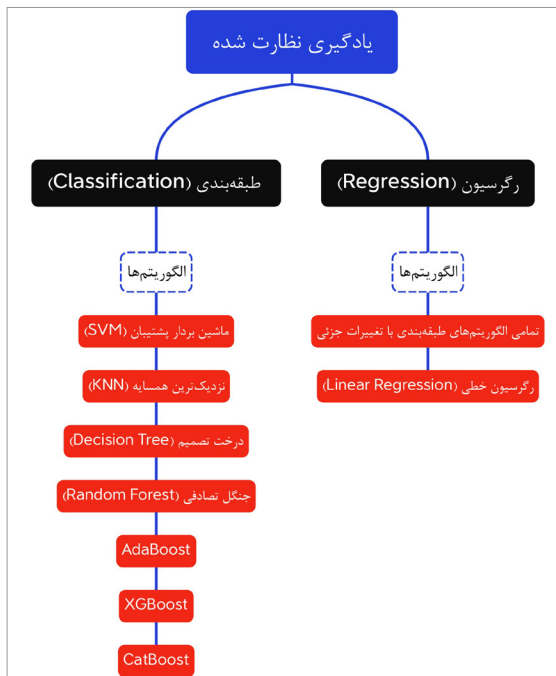
شکل ۳- چرخه عمر کریسپ (Chapman, ۱۹۹۹)

در این چرخه, داده‌ها در مرکز فعالیت‌های علم داده قرار دارند. پیکان‌های بین مراحل مختلف جهت معمول این فرآیند را نشان می‌دهند. این فرآیند نیمه ساختاریافته است یعنی دانشمند داده بسته به نتیجه یک مرحله خاص می‌تواند به یکی از مراحل قبلی برگشته, مرحله فعلی را تکرار یا به مرحله بعدی حرکت کند. در فهم پروژه, دانشمند داده بایستی پروژه‌ای که می‌خواهد بر روی آن کار کند را به خوبی بشناسد. در این مرحله, بایستی زوایای مختلف آن پروژه, محدودیت‌ها, شرایط موجود و اهداف آن را بررسی نماید. در مرحله درک داده‌ها, متخصص علم داده, به سراغ داده‌های موجود رفته و آن را به لحاظ کمیت و کیفیت برای شروع پروژه بررسی می‌کند. در این مرحله, عملیاتی مانند خلاصه‌سازی داده‌ها و ساخت گزارش‌های اولیه از داده‌ها می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد. با فهم

داده‌ها و درک ابعاد و ویژگی‌های مختلف آن, می‌توان ایده‌های مختلف را مطرح کرد و ساختار اصلی پروژه را تعیین نمود. در مرحله آماده‌سازی داده‌ها, هدف ایجاد مجموعه داده‌ای است که برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود. معمولاً ایجاد مجموعه داده شامل ادغام منابع داده از تعدادی پایگاه داده است. بعد از این که مجموعه داده‌ها ایجاد شد, کیفیت داده‌ها باید بررسی شود. مشکلاتی که معمولاً در کیفیت داده‌ها وجود دارند شامل مقادیر پرت و مفقود شده است. از آنجایی که خطاهای موجود در داده‌ها بر عملکرد الگوریتم‌ها تأثیرگذار هستند, بررسی کیفیت داده‌ها بسیار مهم است. معمولاً دانشمند داده در مرحله مدل‌سازی از تعدادی الگوریتم مختلف یادگیری ماشین برای آموزش تعدادی از مدل‌های مختلف در مجموعه داده استفاده می‌کند. هر مدل با نوع خاصی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین آموزش دیده و هر الگوریتم در جستجوی انواع مختلفی از الگوها در داده‌ها است. معمولاً دانشمند داده در این مرحله نمی‌داند که بهترین الگوها برای جستجوی داده‌ها کدامند, بنابراین منطقی است که الگوریتم‌های مختلفی را در این زمینه امتحان نماید تا متوجه شود کدام الگوریتم هنگام اجرا روی داده‌ها بیشترین بازده را دارد. در ادامه الگوریتم‌های مهم در عرصه علم داده و یادگیری ماشین معرفی خواهند شد. انجام یک بررسی کلی به منظور تضمین کیفیت اعمال پروژه در مرحله ارزیابی ضروری است. در این مرحله سؤالاتی همچون: آیا چیزی جا مانده است؟ آیا می‌توان کار بهتری انجام داد؟ بررسی می‌شود و بر اساس ارزیابی کلی مدل‌ها, تصمیم اصلی که گرفته می‌شود این است که آیا هیچ یک از این مدل‌ها مناسب پروژه خواهند بود یا اینکه نیاز است به منظور ایجاد مدل‌های مناسب, فرآیند کریسپ مجدداً تکرار شود. در نهایت, مرحله توسعه شامل بررسی نحوه توسعه مدل‌های انتخاب شده برای رسیدن به یک نرم‌افزار است. این نرم‌افزار به کاربران معمولی نیز این امکان را می‌دهد تا با استفاده از آن, بتوانند مشکلی را که به دنبال آن هستند, بررسی و رفع نمایند (Tierney and Kelleher, ۲۰۱۸).

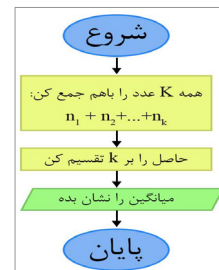
• معرفی الگوریتم‌های پرکاربرد یادگیری ماشین در حوزه علوم و مهندسی آب

در یادگیری ماشین, الگوریتم‌هایی ایجاد می‌شود که رایانه به منظور شناسایی و استخراج الگوها از داده‌ها, آن‌ها را درک می‌کند. الگوریتم یک روش منطقی گام به گام برای حل یک مسئله است. در واقع, چگونگی حل یک مشکل خاص با استفاده از داده‌ها مشخص می‌شود. بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری بازگشتی هستند؛ یعنی در آن مجموعه‌ای از مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا زمانی که یک شرط محدودکننده برآورده شود. هر الگوریتم دارای ورودی, خروجی و دستورالعمل‌های قطعی انجام‌پذیر است. به عنوان مثال, در شکل (۴) یک الگوریتم ساده برای محاسبه میانگین K عدد نمایش داده شده است.



شکل ۶- الگوریتم‌های مختلف در روش یادگیری نظارت شده (کاویانی، ۱۴۰۱)

- **الگوریتم رگرسیون خطی:** وقتی مجموعه داده‌ای از ویژگی‌های عددی تشکیل شده باشد، غالباً از مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر رگرسیون استفاده می‌شود. اولین مرحله در تحلیل رگرسیون، فرضیه‌پردازی ساختار رابطه بین ویژگی‌های ورودی و هدف است. سپس مدل ریاضی پارامتری^{۲۳} از رابطه فرضی تعریف می‌شود. به این مدل پارامتری شده تابع رگرسیون می‌گویند. می‌توان تابع رگرسیون را به عنوان ماشینی که ورودی‌ها را به مقدار خروجی تبدیل می‌کند و پارامترها را به عنوان تنظیماتی که رفتار این ماشین را کنترل می‌کند در نظر گرفت (Tierney و Kelleher، ۲۰۱۸). ممکن است با استفاده از تحلیل رگرسیون بتوان انواع بسیار متفاوتی از روابط بین ویژگی‌ها را فرضیه‌پردازی و مدل‌سازی کرد. در برخی حوزه‌ها، دلایل علمی فراوانی برای اثبات نوع خاصی از رابطه بین متغیرها وجود دارد؛ اما در غیاب این دلایل علمی، بهتر است که با فرض ساده‌ترین شکل رابطه یعنی "رابطه خطی" شروع کرده و سپس در صورت لزوم روابط پیچیده‌تر مدل‌سازی شود. دلیل دیگر برای شروع با روابط خطی این است که تفسیر نسبتاً راحتی دارند (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸). هنگامی که رابطه‌ای خطی فرض شود به تحلیل رگرسیون، رگرسیون خطی گفته می‌شود. ساده‌ترین کاربرد رگرسیون خطی، مدل‌سازی رابطه بین دو ویژگی ورودی (X) و ویژگی هدف (Y) است. اما همیشه مسائل صرفاً دارای یک متغیر وابسته (Y) و یک متغیر مستقل (X) نخواهند بود؛ بلکه ممکن است چندین متغیر مستقل به صورت همزمان بر روی متغیر وابسته اثر بگذارند. در این حالت باید رگرسیون خطی چندگانه^{۲۴} استفاده شود (Deshpande و Kotu، ۲۰۱۸).

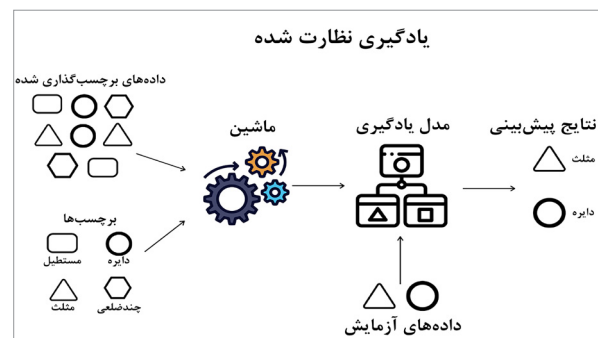


شکل ۴- نمونه یک الگوریتم ساده برای محاسبه میانگین (نیکخواه، ۱۳۹۷)

در ادامه الگوریتم‌های پرکاربرد در علوم و مهندسی آب به صورت مختصر معرفی می‌شوند. در یک دسته‌بندی کلی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سه دسته یادگیری نظارت شده^{۱۸}، یادگیری بدون نظارت^{۱۹} و یادگیری نیمه نظارت شده^{۲۰} تقسیم‌بندی می‌شوند (کاویانی، ۱۴۰۱).

۱- یادگیری نظارت شده:

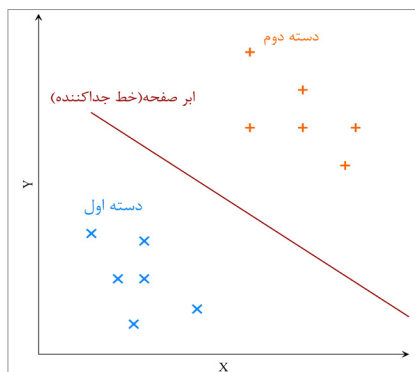
روش‌ها یا الگوریتم‌های نظارت شده، دسته‌ای از الگوریتم‌های یادگیری ماشین هستند که از نمونه داده شناخته شده (که مجموعه داده‌های آموزشی نیز نامیده می‌شود) و خروجی مرتبط (که برچسب یا ستون هدف نیز معروفند) با هر نمونه داده، در فرآیند یادگیری مدل استفاده می‌کنند. هدف اصلی یادگیری، نگاشت یا کشف ارتباط بین نمونه داده‌های ورودی (x) با خروجی‌های متناظر آن‌ها (y) بر مبنای نمونه داده‌های آموزشی است. سپس، الگوریتم آموزش داده شده برای پیش‌بینی خروجی (y) از هر نمونه داده جدید (x)، که قبلاً در فرآیند آموزش مدل دیده نشده و ناشناس است، به کار می‌رود (شکل ۵).



شکل ۵- طرح شماتیک از روش یادگیری نظارت شده (برگرفته از تارهای lenjoyalgorithms.com (Raj، ۲۰۲۱))

روش‌های یادگیری نظارت شده در دو دسته کلی طبقه‌بندی^{۲۱} و رگرسیون^{۲۲} قرار می‌گیرند (نیکخواه، ۱۳۹۷). برای هر دو روش ذکر شده، الگوریتم‌های مختلفی معرفی شده‌اند که از این بین می‌توان به الگوریتم‌های رگرسیون خطی، ماشین ÷÷ بردار پشتیبان، درخت تصمیم و جنگل‌های تصادفی اشاره کرد (شکل ۶). با توجه به اهمیت این الگوریتم‌ها در کشاورزی (به علت وجود داده‌های برچسب‌گذاری شده در این حوزه) در ادامه به معرفی اجمالی برخی از الگوریتم‌های پرکاربرد پرداخته می‌شود.

بایستی از آبرصفحه برای جداسازی نمونه‌ها استفاده شود. ابرصفحه در واقع همان خط یا صفحه در فضاهایی با n بُعد است (کاویانی، ۱۴۰۱). الگوریتم SVM سعی می‌کند خط، صفحه یا ابرصفحه را به گونه‌ای رسم کند که بیشترین فاصله را با مرز نمونه‌ها داشته باشد. به این کار در اصطلاح پیشنه‌سازی حاشیه^{۳۳} در الگوریتم می‌گویند.

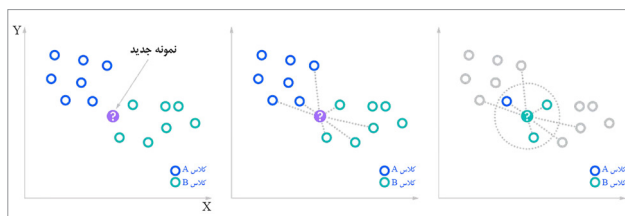


شکل ۸- شکل شماتیک از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان

- **الگوریتم درخت تصمیم:** الگوریتم درخت تصمیم یکی از الگوریتم‌های ساده و پر کاربرد در داده کاوی و یادگیری ماشین است. پیش درآمد اکثر الگوریتم‌های مدرن برای یادگیری درخت تصمیم، الگوریتم ID3^{۳۴} است (Quinlan, ۱۹۸۶). ID3 یک درخت تصمیم را به صورت بازگشتی و عمقی ایجاد می‌کند و هر بار یک گره را اضافه می‌کند. درخت تصمیم با گره ریشه شروع می‌شود. سپس با انتخاب یک ویژگی برای آزمایش در گره ریشه، فرآیند رشد درخت از ریشه شروع می‌شود (Tierney و Kelleher, ۲۰۱۸). این الگوریتم در واقع از نوعی if/else برای ایجاد یک ساختار درختی استفاده می‌کند (کاویانی، ۱۴۰۱). در واقع یک درخت تصمیم ساختاری درختی است که از گره‌های داخلی و گره‌های خارجی تشکیل شده است. این گره‌ها به وسیله شاخه‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و مجموعه ورودی را به مناطق اختصاصی و متناقص تقسیم می‌کند. به هر یک از این مناطق یک برچسب، یک مقدار یا یک عمل اختصاص داده می‌شود. گره‌های داخلی که به عنوان واحد تصمیم‌گیری شناخته می‌شوند، یک تابع تصمیم را ارزیابی می‌کنند تا تصمیم بگیرند کدام گره فرزند بعدی را باید بیاورند. گره‌های انتهایی که با برچسب‌ها (مثلاً رویدادهای آبیاری یا غیرآبیاری) مشخص می‌شوند، به عنوان برگ‌ها یا گره‌های پایانی (گره‌های خارجی) شناخته می‌شوند و فرزندی ندارند (Perea و همکاران، ۲۰۱۹). در شکل (۹) نمونه یک ساختار کلاسیک از درخت تصمیم آورده شده است. در این شکل 1، 2، 3 و 4 در حقیقت همان برچسب‌های نهایی برای طبقه‌بندی نمونه‌ها هستند که به عنوان برگ نیز شناخته می‌شوند.

- **الگوریتم جنگل‌های تصادفی:** جنگل مجموعه‌ای از درخت‌ها است. الگوریتم جنگل تصادفی نیز از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم برای ساخت مدل روی مجموعه‌ی داده‌ها و پیش‌بینی

- **الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه (KNN):** الگوریتم طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایه، برای پیدا کردن برچسب داده‌ی جدید، فاصله نمونه جدید را با تمامی نمونه‌های قبلی از مجموعه داده‌ی آموزشی مقایسه کرده، نزدیک‌ترین نمونه‌ها را انتخاب و برچسب آن‌ها را بر روی نمونه‌های جدید می‌گذارد. این کار می‌تواند با استفاده از یک معیار فاصله (مانند فاصله اقلیدسی^{۳۶}، منتهن^{۳۷}، مینکووسکی^{۳۸} و همینگ^{۳۹}) انجام شود (کاویانی، ۱۴۰۱). این الگوریتم با توجه به پارامتری تحت عنوان K ، تعداد K عدد از نزدیک‌ترین نمونه‌ها را از مجموعه آموزشی (مجموعه‌ای که قبلاً توسط متخصص برچسب‌گذاری شده است) با توجه به فاصله اقلیدسی (رابطه ۴) آن‌ها از نمونه جدید در نظر گرفته و این نمونه بر اساس آن‌ها برچسب خواهد خورد (شکل ۷). دقت و صحت بالا، از نقاط قابل توجه در این الگوریتم است. در مورد نقاط ضعف آن نیز می‌توان به محاسبات زیاد و سرعت پایین اشاره کرد.

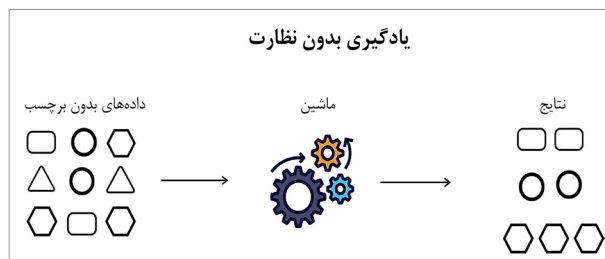


شکل ۷- نمایی از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه‌ها (برگرفته از وبسایت ibm.com)

- **ماشین بردار پشتیبان (SVM):** یکی از مشکلات الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه، قرار گرفتن آن در دسته الگوریتم‌های تنبل^{۴۱} است (Raschka, ۲۰۱۸). در واقع این الگوریتم، داده‌های مجموعه‌ی آموزشی را (بعد از پیش پردازش) بدون تغییر ذخیره و نمونه جدید را با تمامی نمونه‌های موجود در مجموعه‌ی داده، مقایسه می‌کند. این کار باعث حجم بالای محاسبات و به تبع آن کاهش سرعت الگوریتم می‌شود. اما الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با استفاده از روش ایجاد خط یا ابرصفحه^{۴۳} این مشکل را حل می‌کند (شکل ۸). این الگوریتم فضا را به بخش‌های منفک تقسیم‌بندی کرده تا سرعت پیش‌بینی افزایش یابد (کاویانی، ۱۴۰۱). در شکل (۸) مجموع داده‌ها دو ویژگی (متغیر) با نام‌های X و Y دارند. دو نوع برچسب، کلاس و یا دسته نیز وجود دارد که با رنگ‌های متفاوت مشخص شده‌اند؛ الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با استفاده از یک خط متمایزکننده، دو نوع دسته را از یکدیگر جدا کرده است، به گونه‌ای که هر نمونه پایین این خط جداکننده برچسب دسته اول و هر نمونه بالای این خط، برچسب دسته دوم را خواهد گرفت. اگر تعداد ویژگی‌ها بیشتر از دو مورد باشد، آنگاه دیگر نمی‌توان با یک خط آن‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد بلکه باید از صفحه استفاده شود. اگر تعداد ویژگی‌ها (متغیرها) بیشتر از سه ویژگی باشد،

۲- یادگیری بدون نظارت

در یادگیری بدون نظارت مجموعه داده‌های ورودی بدون قالب‌های برچسب‌دار هستند. این روش‌ها بدون نظارت نامیده می‌شوند؛ زیرا مدل یا الگوریتم تلاش می‌کند ساختارها، الگوها و روابط ذاتی را از داده‌های مفروض بدون هیچ گونه کمک و نظارتی یاد بگیرد. یادگیری بدون نظارت به جای پیش‌بینی برخی نتایج بر اساس داده‌های آموزشی، تلاش می‌کند تا بینش یا اطلاعات معنادار از داده‌ها استخراج کند (شکل ۱۱).



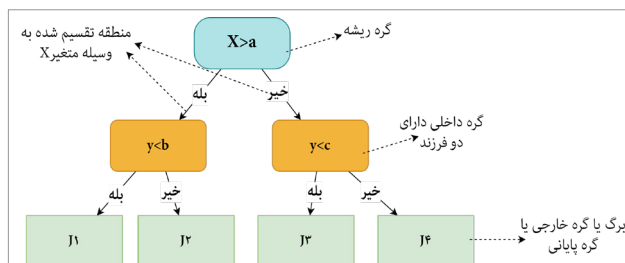
شکل ۱۱- طرح شماتیک از روش یادگیری بدون نظارت (برگرفته از تارغای enjoyalgorithms.com (Raj, ۲۰۲۱))

الگوریتم‌های خوشه‌بندی^{۳۵}، کاهش بعد^{۳۶} و کشف ناهنجاری^{۳۷} از روش‌های یادگیری بدون نظارت هستند (نیکخواه، ۱۳۹۷). الگوریتم‌های خوشه‌بندی شامل K میانگین^{۳۸}، خوشه‌بندی مبتنی بر غلظت^{۳۹} و الگوریتم تغییر میانگین^{۴۰} می‌شوند (کاویانی، ۱۴۰۱).

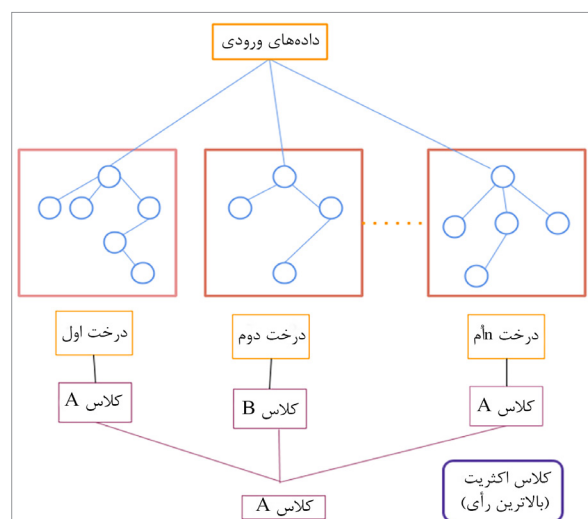
۳- یادگیری نیمه نظارتی

یادگیری نیمه‌نظارتی نوعی یادگیری ماشین است که در آن الگوریتم براساس ترکیبی از داده‌های برچسب‌دار و بدون برچسب آموزش داده می‌شود. به‌طور معمول، این ترکیب مقدار بسیار کمی از داده‌های برچسب‌دار و مقدار بسیار زیادی از داده‌های بدون برچسب را شامل خواهد بود (نیکخواه، ۱۳۹۷؛ شکل ۱۲). روش یادگیری نیمه نظارتی به عنوان یکی از مدل‌های یادگیری ماشین، راهکاری مؤثر برای رفع چالش‌های مربوط به داده‌های برچسب‌دار می‌باشد. در یادگیری نیمه نظارتی به طور همزمان از داده‌های برچسب خورده و از داده‌های برچسب نخورده استفاده می‌شود تا بتوان دقت یادگیری را بهبود بخشید. این نوع از مدل یادگیری به عنوان روشی که می‌تواند از داده‌های بدون برچسب بیشترین استفاده را بکند، از منظر کاربرد عملی ارزش فوق‌العاده‌ای دارد. در این حوزه روش‌های متعددی در قالب روش‌های مولد^{۴۱}، روش‌های مبتنی بر نمودار^{۴۲} و روش‌های اکتشاف محور^{۴۳} در دسترس هستند (نیکخواه، ۱۳۹۷).

نمونه‌های جدید استفاده می‌کند. شمای کلی الگوریتم جنگل تصادفی در شکل (۱۰) آورده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی ابتدا در فاز یادگیری، چندین درخت از روی مجموعه داده‌های آموزشی ایجاد می‌کند. این الگوریتم به هر کدام از درخت‌ها یک زیرمجموعه از داده‌های ورودی در هنگام ساخت تزریق می‌کند. در واقع، هر کدام از درخت‌ها با مشاهده‌ی زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها (متغیرها) در مجموعه آموزشی، یادگیری را انجام می‌دهند (به این صورت معمولاً دو درخت در جنگل تصادفی شبیه به هم نمی‌شوند) و الگوریتم جنگل تصادفی این درخت‌های تصمیم را به عنوان مدل ذخیره می‌کند. هنگامی که نمونه جدید برای طبقه‌بندی از راه می‌رسد، جنگل تصادفی این نمونه را به هر کدام از درخت داده و درخت‌ها هر کدام یک برچسب (براساس یادگیری که انجام داده‌اند) برمی‌گردانند. سپس الگوریتم، برچسب یا کلاس اکثریت را به عنوان برچسب نهایی برای آن نمونه‌ی جدید انتخاب می‌کند. الگوریتم درخت تصادفی نسبت به الگوریتم درخت تصمیم، معمولاً دقت و صحت بالاتری در مسائل مختلف تولید می‌کند. اگر چه سرعت این الگوریتم به واسطه‌ی درخت‌های متعدد پایین است و یادگیری و ساخت مدل معمولاً فضای زیادی نسبت به درخت‌های تصمیم اشغال می‌کند (کاویانی، ۱۴۰۱).

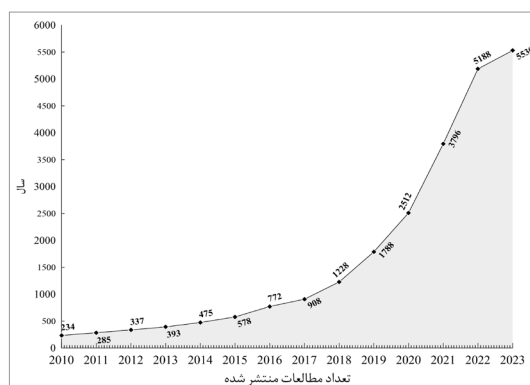


شکل ۹- ساختار کلاسیک یک درخت (Perea و همکاران، ۲۰۱۹)



شکل ۱۰- شمای کلی الگوریتم جنگل تصادفی (برگرفته از وبسایت analyticssteps.com)

داده وب آف ساینس^{۴۵} انجام دادند، نشان داد که مطالعات در این زمینه به طور میانگین ۴۴/۶۷ درصد در سال افزایش می یابد. نتایج این پژوهش رشد سریع این مطالعات از سال ۲۰۱۹ به بعد را نشان داد که این موضوع در پایگاه داده ساینس دایرکت^{۴۶} نیز مشاهده می شود (شکل ۱۳). در شکل (۱۴) سیر تکاملی الگوریتم های یادگیری ماشین در زمینه آبیاری آورده شده است. در این روند مشاهده می شود که تحقیقات یادگیری ماشین در زمینه آبیاری از پیش بینی رطوبت خاک سرچشمه می گیرد. با افزایش تحقیقات در این زمینه، مدل ها به تدریج از یک مدل منفرد به یک مدل ترکیبی در جهت و محتوای تحقیق عمیق تر شدند.



شکل ۱۳- مطالعات منتشر شده در زمینه استفاده از یادگیری ماشین در حوزه کشاورزی و آب طی ۱۳ سال گذشته (منبع: Scindirect.com)



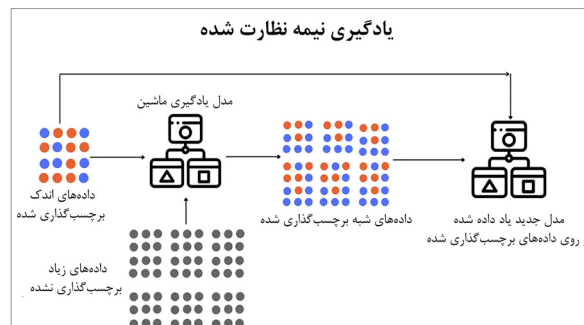
شکل ۱۴- تاریخچه یادگیری ماشین در حوزه علوم آبیاری (Gao و همکاران، ۲۰۲۳)

زمینه استفاده از یادگیری ماشین در پایش و پیش بینی سطح آب های زیرزمینی، در بین سایر کشورها پیشگام بوده است. بر اساس نتایج این پژوهش کشورهای با وابستگی بیشتر به آب زیرزمینی به عنوان یک منبع آب شیرین، اکثر مطالعات در مورد کاربرد یادگیری ماشین در مدل سازی آب زیرزمینی را تولید کردند.

در ادامه این نوشتار، موضوعاتی که بیشتر مورد توجه پژوهشگران در حوزه کاربرد علم داده در علوم و مهندسی آب بوده اند مورد بحث قرار گرفته است.

• مدیریت آب در کشاورزی

یکی از مهم ترین کاربردهای علم داده در کشاورزی، مدیریت آب است. با استفاده از علم داده و یادگیری ماشین می توان آبیاری را با نرخ متغیر به جای استفاده از نرخ یکنواخت برای کل مزرعه



شکل ۱۲- طرح شماتیک از روش یادگیری نیمه نظارت شده (برگرفته از تارغای (lenjoyalgorithms.com) (Raj, ۲۰۲۱))

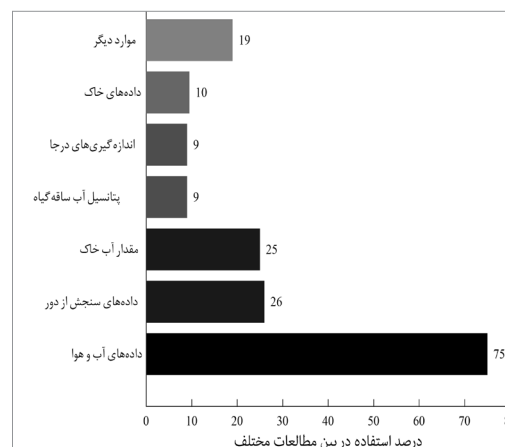
کاربردهای علم داده در علوم و مهندسی آب

نتایج جستجو در پایگاه داده های مطالعاتی مختلف حاکی از رشد چشمگیر انتشار مطالعات در این حوزه است که نشان دهنده اهمیت موضوع در جامعه جهانی است. به عنوان مثال شکل (۱۳)، نتیجه جستجو با سه کلید واژه "Machine learning"، "Water" و "Agriculture" در پایگاه ساینس دایرکت^{۴۶} را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود تعداد مطالعات مرتبط با این کلیدواژه از ۲۳۴ عدد در سال ۲۰۱۰ به تعداد ۵۵۳۰ عدد در سال ۲۰۲۳ رسیده است. در پژوهش دیگری که Gao و همکاران (۲۰۲۳) با دو کلیدواژه "machine learning" و "irrigation" بر روی پایگاه

نتیجه یک بررسی انجام شده بین کل مطالعات با محوریت یادگیری ماشین در کشاورزی بین سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ نشان داد که به طور کلی یادگیری ماشین در چهار حوزه اصلی شامل مدیریت گیاه، دام، آب و خاک مورد استفاده قرار می گیرد که بخش آب ۱۰ درصد این مطالعات را شامل می شوند (Benos و همکاران، ۲۰۲۱).

بالتبع در ایران نیز در سال های اخیر نظر پژوهشگران حوزه کشاورزی به این موضوعات معطوف شده است. بر اساس نتایج Benos و همکاران (۲۰۲۱)، ایران سهم ۵/۶۲ درصدی از مطالعات با محوریت استفاده از یادگیری ماشین در کشاورزی داشته است. در این بین کشور چین، با سهم ۲۴/۹ درصدی در جایگاه نخست و ایالت متحده آمریکا با سهم ۲۰/۷ درصدی در جایگاه دوم قرار گرفته است. نتایج فرتحلیل^{۴۷} Ahmadi و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که ایران با سهم ۲۴ درصدی در بین مطالعات انجام شده در

انجام داد. به این معنا که هر نقطه از زمین کشاورزی بر اساس داده‌های مختلف نرخ متفاوتی از آب دریافت کند. اثربخشی و امکان‌سنجی روش آبیاری با نرخ متغیر به عوامل زراعی از جمله توپوگرافی، خواص خاک و تأثیر آنها بر آب خاک به منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و بهینه‌سازی عملکرد بستگی دارد. پایش دقیق وضعیت آب خاک، شرایط رشد محصول و الگوهای زمانی و مکانی در ترکیب با پایش و پیش‌بینی شرایط آب و هوایی، می‌تواند به برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت کارآمد آب کمک کند (Benos و همکاران، ۲۰۲۱). در موضوع مدیریت آب، داده‌های آب و هوا رایج‌ترین داده‌های ورودی برای تخمین تبخیر-تعرق (ET) هستند. در بسیاری از موارد، برآورد دقیق تبخیر-تعرق یکی از محوری‌ترین عناصر چرخه هیدرولوژیکی برای مدیریت بهینه منابع آب است. داده‌های حسگرهای از راه دور و اندازه‌گیری مقدار آب خاک نیز به طور گسترده در این دسته، استفاده می‌شود. در شکل (۱۵) معمول‌ترین داده‌هایی که به عنوان ورودی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در بحث مدیریت آب در بین مطالعات مختلف استفاده شده‌اند آورده شده است (Benos و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۱۵- درصد شکل‌های مختلف داده‌های ورودی به الگوریتم‌های یادگیری ماشین با هدف مدیریت آب در کشاورزی (Benos و همکاران، ۲۰۲۱)

مطالعات متعددی دقت بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در برآورد تبخیر-تعرق گزارش کرده‌اند (Mehdizadeh و همکاران، ۲۰۱۷؛ Fan و همکاران، ۲۰۱۸؛ Yaseen و همکاران، ۲۰۲۰؛ Xing و همکاران، ۲۰۲۲). ویژگی‌های ورودی معمول به الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور محاسبه تبخیر-تعرق شامل حداکثر، حداقل و میانگین دما، رطوبت نسبی، تابش خورشید و سرعت باد است. استفاده از یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی مصنوعی در این زمینه نسبت به سایر الگوریتم‌ها محبوبیت بیشتری دارد.

• تعیین پارامترهای کیفیت آب با یادگیری ماشین

استفاده از روش‌های معمولی برای پیش‌بینی کیفیت آب آبیاری، عموماً برای کشاورزان به ویژه در کشورهای در حال توسعه، پرهزینه و دشوار است (Jayaraman و همکاران، ۲۰۲۲). از طرف دیگر شکل‌های مختلف منابع آب شامل فاضلاب، آب زیرزمینی، آب سطحی، آب دریا و آب شیرین باعث شده است انواع مختلف آب، ویژگی‌های متفاوتی داشته باشند که خود باعث پیچیدگی بیشتر بررسی کیفیت آب خواهد شد (Maxwell، ۲۰۱۵). از این رو استفاده از مدل‌های مختلف یادگیری ماشین می‌تواند به اقتصاد و همچنین بهداشت کشاورزان کمک به‌سزایی کرده و فرآیند بررسی کیفیت آب را آسان‌تر و سریع‌تر کند. اخیراً مطالعاتی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین نیز به تعیین کیفیت آب و سایر جنبه‌های آن پرداختند (Haghiabi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Pu و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ly و همکاران، ۲۰۲۱؛ Zhi و همکاران، ۲۰۲۱). در این دست مطالعات معمولاً مجموعه‌ای از داده‌های از قبل تهیه شده شامل عوامل مختلف کیفیت آب به مدل داده شده و ماشین بر اساس آن‌ها آموزش داده می‌شود. در ستون برجسته^{۴۸} (هدف) به صورت متغیر، غلظت عناصر مختلف و یا شاخص‌های دیگر کیفیت آب قرار می‌گیرد. سپس هر کدام از این شاخص‌ها براساس سایر شاخص‌ها تعیین می‌شود.

• تشخیص نشتی و تلفات آب در کانال‌ها

از جمله مسائل دیگری که در حوزه استفاده از علوم داده در مدیریت آب بررسی می‌شود، تشخیص تلفات آب در سازه‌های انتقال آب است. وجود درز و ترک‌ها و حفره‌ها در کانال‌های انتقال آب باعث از دست رفتن آب در حین انتقال خواهد شد. این موضوع بر راندمان انتقال آب اثر منفی خواهد گذاشت. از طرف دیگر برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری زیرساخت‌های انتقال آب به بازرسی میدانی و متناوب نیاز است. این موضوع می‌تواند فرآیندی زمان‌بر و طاقت‌فرسا باشد. چرا که در عمل، کانال‌ها می‌توانند ده‌ها یا حتی صدها کیلومتر طول داشته باشند. این موضوع ممکن است باعث شود که بازرسی‌های میدانی کانال هفته‌ها طول بکشد. مشکل دیگر این است که بیشتر ترک‌ها در زیر آب ایجاد می‌شوند. بازرسان بدون

• تعیین تبخیر-تعرق با استفاده از یادگیری ماشین

پیش‌بینی تبخیر-تعرق می‌تواند نقش مهمی در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب داشته باشد. تخمین دقیق تبخیر-تعرق یک فرآیند پیچیده است و برای مدیریت منابع در تولید محصول و همچنین برای طراحی و مدیریت عملیات سامانه‌های آبیاری اهمیت بالایی دارد. در اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، نتیجه یک معادله پایه‌ای تبخیر-تعرق مانند پنمن-مانتیت به عنوان ستون هدف در نظر گرفته شده و مقادیر ورودی الگوریتم، شامل شاخص‌های تأثیرگذار بر این معادله هستند. این شاخص‌ها به طور معمول شامل حداقل، حداکثر و میانگین دمای روزانه، رطوبت نسبی، مدت زمان تابش خورشید و سرعت باد است. تاکنون

خشک کردن کانال‌ها قادر نخواهند بود شرایط زیر آب را مشاهده کنند. حتی بازرسان باتجربه نیز به زمان زیادی برای تکمیل یک ارزیابی قابل اعتماد از وضعیت کانال نیاز دارند. امروزه مطالعاتی با ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری ماشین توانسته‌اند نشتی در کانال‌ها را با دقت بسیار بالایی شناسایی کنند. Zanganeh و همکاران (۲۰۱۶) از روش‌های پردازش تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای تعیین محل نشتی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که روش‌های سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح متوسط می‌توانند به تشخیص زودهنگام نشت‌ها دست یابند. ایشان از الگوریتم توسعه‌یافته از NDVI برای تجزیه و تحلیل توزیع پوشش گیاهی در طول کانال‌ها استفاده کردند. سپس از روش طبقه‌بندی K-means روی نقشه NDVI برای شناسایی نشتی‌ها استفاده شد. در مطالعه‌ای دیگر Chen و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری عمیق، نشتی آب در کانال‌ها را شناسایی کردند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم (Physics-guided Neural Networks (PGNN در یادگیری ماشین، توانستند با دقت ۸۶ درصد نشتی آب در کانال‌ها را شناسایی کنند.

• مدیریت و اجرای سامانه‌های آبیاری

ترکیب دو علم داده و اینترنت اشیاء^{۴۹} می‌تواند از جمله راهکارهای مفید در زمینه افزایش بهره‌وری آب باشد. اینترنت اشیاء ترکیبی از چندین فناوری است که بوسیله آن حسگرها، عملگرها و سایر نقش‌های یک پروژه به صورت هوشمند به یکدیگر متصل می‌شوند. در این روش، به طور معمول مجموعه‌ای از داده‌ها از حسگرهای مختلف مانند حسگر رطوبت خاک، دمای خاک، دما و رطوبت محیط و همچنین داده‌های ماهواره‌ای دریافت شده و در یک پایگاه داده ذخیره می‌شود. پس از ذخیره‌سازی، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، زمان مناسب آبیاری تعیین شده و عملیات آبیاری نیز به صورت خودکار انجام خواهد شد. Singh و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی یک سامانه آبیاری هوشمند با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین پیاده‌سازی کردند. ایشان برای کنترل پمپ از یک حسگر رطوبت برای بررسی میزان رطوبت خاک و نیاز محصولات مختلف استفاده کردند. این حسگر مقادیر آنالوگ را به میکروکنترلر مورد استفاده در سامانه ارسال کرده و میکروکنترلر پس از مقایسه این مقادیر با مقدار آستانه، پمپ را روشن یا خاموش خواهد کرد. با استفاده از این سامانه، کشاورزان نیازی به آبیاری دستی در شرایط آب و هوایی نامناسب و شب‌ها نخواهند داشت. همچنین تلفات آب کاهش و به تبع آن بهره‌وری آب افزایش خواهد یافت.

• تشخیص نوع سامانه‌های آبیاری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری عمیق

دانستن نوع سامانه‌های آبیاری در هر منطقه به صورت یکپارچه

می‌تواند در سطح کلان و فراحوضه‌ای باعث بهبود بهره‌وری آب با اتخاذ سیاست‌های درخور آن شود. از این رو داشتن اطلاعات و آمار بروز و دقیق از این سامانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. در این عرصه نیز با کمک ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری ماشین می‌توان اطلاعاتی از نوع سامانه‌های آبیاری موجود در هر منطقه به دست آورد. به عنوان مثال Saraiva و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به نقشه‌برداری خودکار سامانه‌های آبیاری دوار مرکزی^{۵۰} با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و یادگیری عمیق پرداختند. نتایج آنان نشان داد مدل پیاده شده در این تحقیق دقت ۹۹ درصد و بازیابی ۸۸ درصد برای تشخیص و نقشه‌برداری سامانه‌های آبیاری دوار مرکزی (سنتریوت) در منطقه مورد مطالعه (ایالت‌های گویاس^{۵۱} و مینا ژرایس^{۵۲} در برزیل) را دارا است.

• مدیریت و پایش گیاه و پیش‌بینی عملکرد

استفاده از روش‌های مختلف علم داده و یادگیری ماشین برای مدیریت محصولات شامل حیطه‌های متنوعی مانند پیش‌بینی عملکرد، تشخیص بیماری، تشخیص علف‌های هرز، تشخیص محصول و کیفیت محصول است. این روش‌ها به افزایش بهره‌وری و در نتیجه، درآمد مالی کمک می‌کند. همچنین علم داده می‌تواند برای ایجاد سامانه‌های نظارتی محصول استفاده شود. با استفاده از حسگرها، پهپادها و ماهواره‌ها داده‌های مختلف جمع‌آوری شده که می‌تواند برای شناسایی زودهنگام مشکلات و انجام اقدامات اصلاحی تجزیه و تحلیل شود. این به بهبود عملکرد و جلوگیری از تلفات ناشی از آفات یا بیماری‌ها، کم آبی و کمبود مواد مغذی کمک می‌کند (Virnodkar و همکاران، ۲۰۲۰). با تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی در مورد الگوهای آب و هوایی و عملکرد محصولات، محققین می‌توانند مدل‌هایی را توسعه دهند که بتوانند پیش‌بینی کنند وضعیت یک محصول خاص در آینده تحت شرایط مختلف چگونه خواهد بود (Kouadio و همکاران، ۲۰۱۸؛ Pourmohammadali و همکاران، ۲۰۱۹؛ Khosla و همکاران، ۲۰۲۰؛ Alibabaei و همکاران، ۲۰۲۱؛ Cedric و همکاران، ۲۰۲۲). این اطلاعات می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در مورد کاشت نوع محصول و زمان برداشت آن به درستی تصمیم‌گیری کنند.

• تعیین الگوی کشت

برآورد مساحت محصول به روش سنتی زمان‌بر، پرهزینه و با احتمال خطا و سوگیری انسان است. همچنین برآورد مساحت محصول در روستاهای دور افتاده، زمین‌های صعب‌العبور و مزارع شیب‌دار بسیار دشوار است. به منظور غلبه بر این مشکلات، برای برآورد سطح محصول می‌توان از ترکیب فناوری سنجش از دور و یادگیری ماشین استفاده کرد. ماهواره‌های سنجش از دور، تصاویر زمانی، سینوپتیکی، چند طیفی و با وضوح چندگانه از پوشش زمین را فراهم

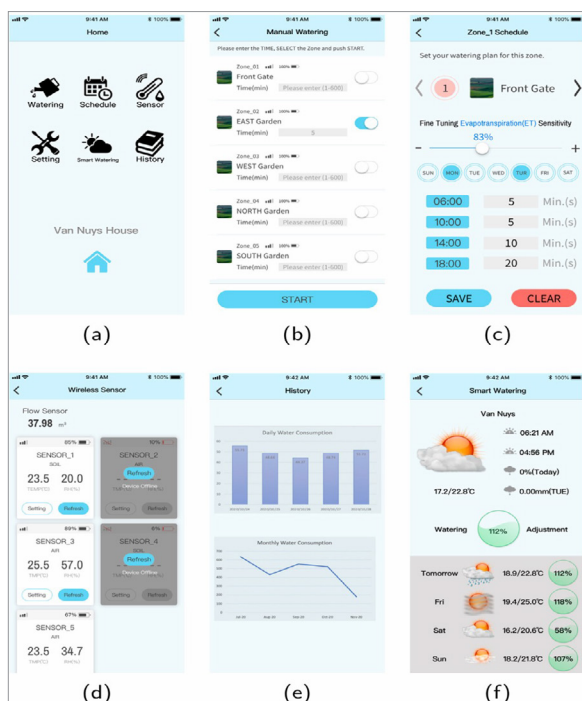
می‌کند و توانایی طبقه‌بندی محصولات مختلف را ارائه می‌دهد. تاکنون مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است که حاکی از دقت خوب این روش‌ها در تعیین الگوی کشت محصولات است (شریفی و همکاران، ۱۴۰۰، باقری، ۱۴۰۱؛ Zhao و Pan، ۲۰۱۸؛ Kranjčić و همکاران، ۲۰۱۹؛ Blickensdörfer و همکاران، ۲۰۲۲؛ Ghassemi و همکاران، ۲۰۲۲). برای این منظور در فناوری سنجش از دور، بازتاب طیفی بررسی شده و گزارشی از سلامت پوشش گیاهی به عنوان مثال، ساختار گیاه، رطوبت و محتوای کلروفیل بررسی می‌شود. سنسورهای نوری از راه دور در باندهای طیفی مرئی، NIR^{۵۲} و SWIR^{۵۴} کار می‌کنند. به کمک باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای می‌توان شاخص‌های مختلفی را محاسبه نمود. برخی از پرکاربردترین شاخص‌ها با عنوان‌های NDVI^{۵۵}، GNDVI^{۵۶} و LAI^{۵۷} شناخته می‌شوند. شاخص‌های محاسبه در هر سلول از تصویر که عوارض آن متفاوت باشد، مقدار متفاوتی می‌دهد. همین امر مبنای طبقه‌بندی تصاویر می‌باشد. نتایج الگوریتم در پژوهش‌های مختلف از باندهای تصاویر ماهواره‌ای و یا شاخص اختلاف گیاهی نرمال شده (NDVI) به عنوان ورودی و محدوده‌های داده‌برداری شده با کلاس یا طبقه معین به دست می‌آیند (Patel و Hudait، ۲۰۲۲؛ Gumma و همکاران، ۲۰۲۲؛ Parida و Ranjan، ۲۰۱۹).

• سایر کاربردهای علم داده در حوزه مدیریت آب کشاورزی

استفاده از یادگیری ماشین در حوزه مدیریت آب تنها معطوف به موارد ذکر شده نبوده و در بخش‌های دیگری نیز استفاده می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به پایش و پیش‌بینی خشکسالی، تغییرات اقلیمی، سطح آب‌های زیرزمینی و... اشاره کرد. خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی است که شناسایی، پیش‌بینی و کاهش آن اغلب دشوار است (Aadhar و Mishra، ۲۰۱۷). علاوه بر این، شاخص‌های مختلفی به منظور پایش خشکسالی ارائه شده است که به علت وابستگی آن‌ها به اندازه‌گیری‌های زمینی مانند اندازه‌گیری دما و بارندگی، برای نشان دادن توزیع مکانی دقیق در مقیاس بزرگ مناسب نیستند. امروزه روش‌های سنجش از دور با پوشش یک منطقه جغرافیایی بزرگ که برای پایش خشکسالی مناسب‌تر از روش مبتنی بر زمین است، کاربرد گسترده‌تری پیدا کرده‌اند (Prodhan و همکاران، ۲۰۲۱). اطلاعات دقیق و کامل خشکسالی با سیستم پایش مناسب در آشکار ساختن ماهیت پیچیده خشکسالی و عوامل مرتبط با آن بسیار مهم است. بسیاری از شاخص‌های خشکسالی برای توصیف خشکسالی کشاورزی، با تکیه بر داده‌های آب و هوایی یا عوامل مختلف خشکسالی سنجش از راه دور ایجاد شده‌اند (Feng و همکاران، ۲۰۱۹). چندین شاخص خشکسالی سنجش از دور (بیش از ۱۶۰ شاخص) از جمله شاخص تغییرات پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI^{۵۸})، شاخص

وضعیت رطوبتی خاک (SMCI^{۵۹}) و... وجود دارند. می‌توان گفت در بحث خشکسالی، چالش اصلی این است که این شاخص‌ها قادر به انعکاس صحیح اطلاعات نیستند؛ زیرا شرایط خشکسالی به عوامل متعددی مرتبط است. در نتیجه، شاخص‌های خشکسالی منفرد اطلاعات پیچیده خشکسالی را نشان نمی‌دهند و لازم است که ترکیبی از شاخص‌ها مورد بررسی قرار گیرند. به همین علت مدل‌های مختلف یادگیری ماشین مانند رگرسیون خطی، سری‌های زمانی، یادگیری عمیق و حتی جنگل‌های تصادفی به منظور پیدا کردن روابط غیرخطی بین علل مختلف خشکسالی استفاده می‌شود (Chen و همکاران، ۲۰۱۲؛ Khadr، ۲۰۱۶؛ Li و همکاران، ۲۰۱۶؛ Shen و همکاران، ۲۰۱۹؛ Prodhan و همکاران، ۲۰۲۱). با در نظر گرفتن تخلیه سریع بسیاری از سفره‌های زیرزمینی با تغذیه ناچیز، مدیریت مؤثرتر آب به منظور صرفه‌جویی بهتر آب از نظر دستیابی به تولید محصول پایدار مورد نیاز است (El Bilali و همکاران، ۲۰۲۲). در حوزه آب‌های زیرزمینی به طور معمول از علم داده به منظور پایش کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. به طور کلی مدل‌های فیزیکی و عددی ابزار اصلی در مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی بوده‌اند. با این حال، از آنجا که این روش‌ها نیز بر روی ورودی‌های مختلف تکیه دارند و سازوکارهای زیربنایی معمولاً برای درک آن‌ها بسیار پیچیده هستند، اخیراً از روش‌های مبتنی بر داده استفاده می‌شود (Azari و همکاران، ۲۰۲۱؛ Osman، ۲۰۲۲). Ahmadi و همکاران (۲۰۲۲) در یک مطالعه فراتحلیل و مرور سیستماتیک بر روی ۱۹۷ مطالعه انجام شده در سراسر دنیا از سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، نتیجه گرفتند که روش‌های یادگیری ماشین می‌توانند با دقت بسیار بالایی سطوح آب زیرزمینی را نظارت و پیش‌بینی کنند. براساس نتایج این پژوهش الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN^{۶۰}) با سهم ۵۳ درصدی در این مطالعات بیشترین کاربرد را داشته‌اند. داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی عمده داده‌های هستند که در این حوزه به عنوان متغیرهای ورودی به الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شوند (Osman، ۲۰۲۲). علم داده از حوزه مزرعه نیز فراتر رفته و در بحث مدیریت گلخانه‌ها نقش بسزایی ایفا می‌کند. این فناوری علاوه بر تسهیل و بهبود روش‌های آبیاری گلخانه‌ها می‌تواند در زمینه پایش و کنترل اقلیم گلخانه‌ها که تحت عنوان خرداقلیم^{۶۱} نیز دسته‌بندی می‌شوند نقش بسزایی ایفا کند. مطالعه Chen و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که سامانه‌های کنترل هوشمند گلخانه‌ها^{۶۲} می‌تواند در مقایسه با روش‌های سنتی به میزان ۶۶/۸ درصد به صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی دست یابد. مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تولید گازهای گلخانه‌ای تولید شده در مزارع نیز به خوبی عمل کرده‌اند. Hamrani و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق توانستند با دقت بالایی نیتروژن اکسید و کربن دی‌اکسید حاصل از فعالیت‌های

Gong و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب داده‌های مختلف گذشته (شامل داده‌های قدیمی هواشناسی و آبیاری)، حال (داده‌های حسگرها) و آینده (پیش‌بینی هواشناسی) به طراحی یک سامانه هوشمند آبیاری پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که این سامانه می‌تواند باعث بهبود چشم‌گیر راندمان ذخیره آب شود. در این مطالعه نیز یک نرم‌افزار تلفن همراه ارائه شده است که کاربر می‌تواند به وسیله آن آبیاری را به صورت دستی و یا هوشمند انجام دهد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- نرم افزار تلفن همراه آبیاری هوشمند (Gong و همکاران، ۲۰۲۲)

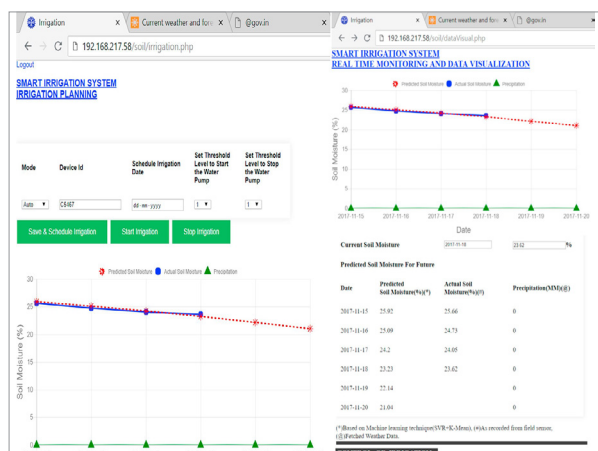
به طور کلی در این زمینه مطالعات متعددی انجام شده است که برخی از آن‌ها برای سایر محیط‌های کشت مانند گلخانه‌ها نیز ارائه شده‌اند (Nie و همکاران، ۲۰۱۸؛ Chang و همکاران، ۲۰۱۹؛ Moghadas و همکاران، ۲۰۱۹؛ Muñoz و همکاران، ۲۰۲۰). برخی از مطالعات مباحث اقتصادی در زمینه کشاورزی را نیز در نظر گرفته‌اند. به عنوان مثال Nutrient ROI calculator^{۶۴} یک سامانه تعیین بازده سرمایه‌گذاری در کشاورزی است که هدف آن کمک به کشاورزان در بهینه‌سازی عملکرد و درآمد است (Lindemann و Sinha، ۲۰۱۹؛ Dhanalakshmi، ۲۰۲۲). در واقع کشاورزان می‌توانند با استفاده از پیش‌بینی‌های این سامانه، راهبردهای دقیق‌تری برای کاربرد کود ایجاد کنند و در نتیجه سود حاصل از نهاده‌های مزرعه را بهینه کنند و بنابراین می‌توانند سودآوری خود را افزایش دهند (شکل ۱۸). پروژه دیگری تحت عنوان OpenIoT به منظور بررسی شرایط مختلف برای کشت گندم توسعه یافته است. این بستر به کشاورزان کمک می‌کند تا زمان برداشت، زمان آبیاری و مواد مغذی مورد نیاز برای رشد گیاهان را پیش‌بینی کنند (Bhagat و همکاران، ۲۰۱۹).

کشاورزی را پیش‌بینی کنند. این موضوع با توجه به نقش پر رنگ گازهای گلخانه‌ای در تغییرات اقلیمی بسیار حائز اهمیت است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد هدف این پژوهش بررسی مهم‌ترین کاربردهای علم داده در حوزه مدیریت آب کشاورزی است و واضح است که این فناوری به شکل‌های دیگری نیز می‌تواند استفاده شود.

سامانه‌های توسعه یافته

مرحله انتهایی چرخه کریسپ فاز توسعه بود که به طور معمول به توسعه یک نرم‌افزار کاربردی ختم می‌شود. در این بخش به برخی از مطالعاتی پرداخته می‌شود که به طور خاص نتیجه کار آن‌ها به توسعه یک سامانه ختم شده است. برای بهره‌برداری مؤثر و بهینه از آب در مزرعه، توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر پیش‌بینی الگوی رطوبتی خاک مزرعه و اطلاعات بارش روزهای آتی ضروری است. برای پیش‌بینی رطوبت خاک می‌توان از الگوریتم‌های مربوط به یادگیری ماشین بهره گرفت (Goap و همکاران، ۲۰۱۸). تمامی اطلاعات ذکر شده را می‌توان با توسعه یک پورتال وب به صورت آبی مشاهده کرد. این پورتال باید شامل خدماتی برای جمع‌آوری داده‌های حسگر میدانی، سرویس جمع‌آوری اطلاعات هواشناسی در دسترس موجود در اینترنت، سرویس برای کنترل پمپ آب، الگوریتم‌های پیش‌بینی رطوبت خاک و ناظر بر مزرعه در هر لحظه باشد. Goap و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از این اطلاعات به توسعه یک نرم‌افزار تحت وب پرداختند. ایشان در این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی (ترکیب الگوریتم‌های SVR و K-means) یادگیری ماشین توانستند با دقت خوبی (بیش از ۹۶ درصد) رطوبت خاک را پیش‌بینی کنند. با این وجود این سامانه تحت وب به صورت محلی^{۶۴} در دسترس بوده و جنبه استفاده عمومی تا زمان نگارش این پژوهش پیدا نکرده است. نمایی از این نرم‌افزار در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۶- بخشی از نرم‌افزار تحت وب پایش رطوبت خاک و برنامه‌ریزی زمان آبیاری (Goap و همکاران، ۲۰۱۸)

برخی مطالعات نیز مانند پروژه SWAMP^{۶۵} در حال توسعه یک مفهوم یا به عبارت دیگر معماری مناسب سامانه آبیاری هوشمند با دقت بالا برای کشاورزی هستند (Kamienski و همکاران، ۲۰۱۹). با این حال بر اساس نتایج جستجوهای انجام شده تا زمان نگارش این پژوهش، هنوز موضوع استفاده از یادگیری ماشین در زمینه مدیریت آب کشاورزی به گونه‌ای فراگیر نشده است که در مقیاس اجرایی و در دستان کشاورز مورد بهره‌ر قرار گیرد. در واقع اکثر مطالعات در فاز مطالعه باقی مانده و در سطح کلان استفاده نشده‌اند. همین امر نشان‌دهنده ظرفیت‌های بالقوه موجود فراوان در این حوزه است.

گیاه، پیش‌بینی عملکرد و تعیین کیفیت آب بوده است. در ایران نیز در سال‌های اخیر توجه محققین حوزه مهندسی آب به کاربرد علم داده جلب شده است. در بین کل مطالعات انجام شده این حوزه در جهان بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، ایران سهم ۵/۶۲ درصدی بین این مطالعات داشته است. در کل مطالعات انجام شده در این حوزه استفاده از داده‌های آب و هوا کاربرد بیشتری دارد که این موضوع می‌تواند به طور ضمنی به اهمیت برآورد تبخیر-تعرق در مدیریت آب کشاورزی اشاره داشته باشد.

رهیافت ترویجی

استفاده از علم داده در کشاورزی مزایای زیادی دارد، اما بالتبع هر فناوری نوظهوری می‌تواند با مشکلاتی روبرو باشد. برخی از مشکلات موجود در استفاده از علم داده در حوزه مدیریت آب می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱- مشکلات مربوط به داده‌ها: در برخی مناطق کشاورزی، داده‌های دقیق و کافی ممکن است موجود نباشد. این کمبود داده می‌تواند به کارآمدی مدل‌های پیش‌بینی و تحلیل‌های داده‌محور آسیب برساند. از سوی دیگر حجم بالای داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها و دستگاه‌های مختلف ممکن است باعث پیچیدگی در مدیریت، ذخیره‌سازی، و پردازش این داده‌ها شود.

۲- پیچیدگی فرآیندهای مختلف حوزه مدیریت آب و تعدد پارامترها: عوامل متعددی در فرآیندهای کشاورزی درگیر هستند که ممکن است باعث افزایش پیچیدگی مدل‌ها و تحلیل‌ها شود. این پیچیدگی ممکن است باعث کاهش تفسیرپذیری مدل‌ها شود. از طرف دیگر تدوین مدل‌های دقیق و قابل اعتماد برای پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌ها ممکن است دشوار باشد، به خصوص زمانی که داده‌های ناقص وجود داشته باشد.

۳- هزینه‌های پیاده‌سازی: پیاده‌سازی فناوری‌های علم داده گاهی می‌تواند نیازمند سرمایه‌گذاری هزینه‌بر باشد. این هزینه‌ها می‌توانند شامل هزینه تهیه داده، ابزار و رایانه باشند. در بعضی از مناطق، زیرساخت‌های فنی برای ارتباطات اینترنتی و پردازش داده‌ها به اندازه کافی توسعه یافته نیستند که می‌تواند استفاده از علم داده را با چالش روبرو کند.

۴- تخصص: نباید فراموش کرد که ساخت و پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین و سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیا می‌تواند به دانش و منابع تخصصی نیاز داشته باشد که ممکن است به راحتی در بخش کشاورزی در دسترس نباشد. این امر می‌تواند استفاده از این فناوری‌ها را برای کشاورزان و سایر ذی‌نفعان دشوار کند.

درک دقیق از این محدودیت‌ها و توجه به آن‌ها در طراحی و پیاده‌سازی مفاهیم علم داده در حوزه علوم و مهندسی آب، می‌تواند کمک کند تا به چالش‌ها پاسخ داده شود و بهبودهای مؤثری در این

شکل ۱۸- نمایی از نرم افزار Nutrient ROI calculator

نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی، هدف علم داده بهینه‌سازی عملکرد یک کار، از طریق بهره‌برداری از مثال‌ها یا تجربه‌های گذشته است. به طور خاص، یادگیری ماشین می‌تواند روابط کارآمدی بین داده‌های ورودی ایجاد و از آن‌ها به بینش و الگوی جدیدی برسد. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادر هستند روابط غیرخطی بین داده‌ها را کشف و مدل‌سازی کنند. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که علم داده و یادگیری ماشین قدرت کافی در زمینه برآورد و پیش‌بینی شاخص‌های مختلف در حوزه کشاورزی را دارا هستند. بر این اساس استفاده از علم داده در بخش کشاورزی، علی‌الخصوص در حوزه آب کشاورزی بسیار کمک‌کننده خواهد بود. طبق جستجوهای انجام شده در پژوهش حاضر، تمرکز پژوهشگران بیشتر در موضوعات تعیین تبخیر-تعرق

12-Data set	13-Numeric
14-Nominal	15-Ordinal
16-Extensible Markup Language	
17-CRISP-DM	18-Supervised Learning
19-Un supervised Learning	
20-Semi-supervised Learning	
21-Classification	22-Regression
23-Parameterized mathematical model	
24-Multiple linear regression	
25-K-Nearest Neighbors	26-Euclidean
27-Manhattan	28-Minkowski
29-Hamming	30-Support Vector Machine
31-Lazy learning algorithm	32-Hyper plane
33-Margin maximization	34-Iterative Dichotomiser 3
35-Clustering	36-Dimensionality Reduction
37-Anomaly Detection	38-K-means
39-DBSCAN	40-Mean-shift
41-Generative Methods	42-Graph Based Methods
43-Heuristic Based Methods	44-Science Direct
45- https://mjl.clarivate.com/ ; Web of Science	
46-sciencedirect.com	47-Meta-Analysis
48-Label	49-Internet of things
50-Center pivot	51-Goiás
52-Minas Gerais	53-Near infrared
54-shortwave infrared	
55-Normalized Difference Vegetation Index	
56-Green Normalized Difference Vegetation Index	
57-Leaf area index	58-Vegetation condition index
59-Soil Moisture Condition Index	
60-Artificial neural network	61-Microclimate
62-Smart microclimate-control system	
63-Local	64-return on investment
65-Smart water management platform	

منابع

باقری، حمید. (۱۴۰۱). استفاده از الگوریتم فراابتکاری کرم شب تاب در بهبود دقت طبقه‌بندی تصویر ماهواره ای، مطالعه موردی: شهر رفسنجان. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، انتشار آنلاین ۶ تیرماه ۱۴۰۱. doi: [10.30495/girs.2022.692233](https://doi.org/10.30495/girs.2022.692233)

شریفی، عبید، اصغری بیرامی، بهنام، و مختارزاده، مهدی. (۱۴۰۰).

زمینه ایجاد شود. برای حل این مشکلات، لازم است تا سیاستمداران، محققین، و کشاورزان با همکاری یکدیگر، راهکارهایی را ارائه کنند که بتوانند از مزایای علم داده بهینه استفاده کنند و در عین حال به چالش‌ها و مشکلات موجود پاسخ دهند. به طور کلی، توسعه نرم‌افزارهایی که به‌صراحت پیرامون راه‌حل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و اینترنت اشیا طراحی شده‌اند، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است که ممکن است برای کشاورزان خرده‌مالک که به منابع بیشتری برای حمایت مالی از این طرح‌ها نیاز دارند، بسیار پرهزینه باشد. خوشبختانه، راه‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان این موانع را از طریق سیستم‌های ابری با ارائه سکوها دسترسی باز که در آن کاربران می‌توانند مجموعه داده‌های خود را بارگذاری کنند، بینش‌های خود را به اشتراک بگذارند، و در پروژه‌های تحقیقاتی همکاری کنند، برطرف کرد.

با این حال با توجه به نوظهور بودن این فناوری، هنوز خلاءهای مطالعاتی در این حوزه وجود دارد که انتظار می‌رود در آینده نظر محققین به آن‌ها جلب شود. به عنوان مثال می‌توان به کاربرد کمتر علم داده در بررسی تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های کشاورزی، بهینه‌تر کردن الگوریتم‌های فعلی، توسعه الگوریتم‌های جدید مناسب‌تر و همچنین تبدیل الگوریتم‌ها به سامانه‌های کاربردی در حوزه کشاورزی اشاره کرد. می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد محصول، قیمت‌ها و سایر روندهای کشاورزی آتی استفاده کرد. پیش‌بینی‌های کشاورزی می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد راهبردهای کاشت، برداشت و بازاریابی استفاده شود. از طرف دیگر می‌تواند به کشاورزان و کسب‌وکارهای کشاورزی در پیش‌بینی الگوهای آب‌وهوا و برنامه‌ریزی برای بلایای طبیعی نیز کمک کند. این باعث می‌شود که آن‌ها به ویژه برای پیش‌بینی‌های بلندمدت نیز مناسب باشند. کاربردهای بالقوه زیادی برای پیش‌بینی کشاورزی وجود دارد؛ از جمله کمک به کشاورزان برای تصمیم‌گیری در مورد بهترین زمان کاشت یا برداشت محصولات خود، حمایت از مشاغل کشاورزی در تصمیم‌گیری در مورد قیمت‌گذاری و در دسترس بودن محصول و اطلاع‌رسانی سیاست‌های دولت که از بخش کشاورزی حمایت می‌کنند. این موضوع می‌تواند در امر پیاده‌سازی الگوی کشت مناسب در مقیاس کشور نیز بسیار حائز اهمیت باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Food and Agriculture Organization
- 2-Data Science
- 3-Machine learning
- 4-Cleveland
- 5-Artificial Intelligence (AI)
- 6-Deep learning
- 7-Training data
- 8-Big Data
- 9-Entities
- 10-Attributes
- 11-Analytics record

- Organisation of the United Nations. Rome, Italy.
- Cedric, L. S., Adoni, W. Y. H., Aworka, R., Zoueu, J. T., Mutombo, F. K., Krichen, M., & Kimpolo, C. L. M. (2022). Crops yield prediction based on machine learning models: Case of West African countries. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100049. doi: [10.1016/j.atech.2022.100049](https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100049)
- Chang, Y. C., Huang, T. W., & Huang, N. F. (2019, September). A machine learning based smart irrigation system with LoRa P2P networks. In 2019 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS) (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.23919/APNOMS.2019.8893034>
- Chapman, P., (1999). Julian Clinton (SPSS), Randy Kerber (NCR), Thomas Khabaza (SPSS), Thomas Reinartz (DaimlerChrysler), Colin Shearer (SPSS) and Rüdiger Wirth (DaimlerChrysler),". CRISP-DM 1.0. Step-by-step data mining guide. Available online: <https://www.coursehero.com/file/14884931/CRISP-DM-Process-Model-User-Guide>
- Chen, J., Li, M., & Wang, W. (2012). Statistical uncertainty estimation using random forests and its application to drought forecast. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012(1), 915053, 1-12. doi: [10.1155/2012/915053](https://doi.org/10.1155/2012/915053)
- Chen, T. H., Lee, M. H., Hsia, I. W., Hsu, C. H., Yao, M. H., & Chang, F. J. (2022). Develop a Smart Microclimate Control System for Greenhouses through System Dynamics and Machine Learning Techniques. *Water*, 14(23), 3941. doi: [10.3390/w14233941](https://doi.org/10.3390/w14233941)
- Chen, Z., Zhu, Z., Jiang, H., & Sun, S. (2020). Estimating daily reference evapotranspiration based on limited meteorological data using deep learning and classical machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 591, 125286. doi: [10.1016/j.jhydrol.2020.125286](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125286)
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064016. doi: [10.1088/1748-9326/aa6cd5](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5)
- Dwivedi, R. (2020). How to use the Random Forest classifier in Machine learning?. [Online]. Available: <https://www.analyticssteps.com/blogs/how-use-random-forest-classifier-machine-learning>. Updated: 1/18/2021.
- طبقه‌بندی تصاویر ابرطیفی با استفاده از ادغام ویژگی‌های طیفی و مکانی در شبکه‌های عصبی پیچشی. نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۹(۲)، ۱-۲۷. doi: [10.52547/jgit.9.2.1](https://doi.org/10.52547/jgit.9.2.1)
- کاویانی، مسعود. (۱۴۰۱). یادگیری ماشین و یادگیری عمیق با زبان‌های پایتون و R. انتشارات دیباگران. چاپ اول. ۲۴۶ صفحه. تهران، ایران.
- نیکخواه، امیره. (۱۳۹۷). واژه نامه علم داده. انتشارات لیلان. چاپ اول. ۱۴۲ صفحه. تهران، ایران.
- Aadhar, S., & Mishra, V. (2017). High-resolution near real-time drought monitoring in South Asia. *Scientific Data*, 4(1), 1-14. doi: [10.1038/sdata.2017.145](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.145)
- Ahmadi, A., Olyaei, M., Heydari, Z., Emami, M., Zeynolabedin, A., Ghomlaghi, A., ... & Sadegh, M. (2022). Groundwater level modeling with machine learning: a systematic review and meta-analysis. *Water*, 14(6), 949. doi: [10.3390/w14060949](https://doi.org/10.3390/w14060949)
- Alibabaei, K., Gaspar, P. D., & Lima, T. M. (2021). Crop yield estimation using deep learning based on climate big data and irrigation scheduling. *Energies*, 14(11), 3004. doi: [10.3390/en14113004](https://doi.org/10.3390/en14113004)
- Azari, A., Zeynoddin, M., Ebtehaj, I., Sattar, A. M., Gharabaghi, B., & Bonakdari, H. (2021). Integrated preprocessing techniques with linear stochastic approaches in groundwater level forecasting. *Acta Geophysica*, 69(4), 1395-1411. doi: [10.1007/s11600-021-00617-2](https://doi.org/10.1007/s11600-021-00617-2)
- Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. *Sensors*, 21(11), 3758. doi: [10.3390/s21113758](https://doi.org/10.3390/s21113758)
- Bhagat, M., Kumar, D., & Kumar, D. (2019). Role of Internet of Things (IoT) in smart farming: A brief survey. 2019 Devices for Integrated Circuit (DevIC), 141-145. doi: [10.1109/DEVIC.2019.8783800](https://doi.org/10.1109/DEVIC.2019.8783800)
- Blickensdörfer, L., Schwieder, M., Pflugmacher, D., Nendel, C., Erasmi, S., & Hostert, P. (2022). Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote sensing of environment*, 269, 112831. doi: [10.1016/j.rse.2021.112831](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112831)
- Burra, D. D., Hildebrand, J., Giles, J., Nguyen, T., Hasinier, E., Schroeder, K., ... & Kropff, W. (2021). Digital Agriculture Profile: Viet Nam. Food and Agriculture

- Sentinel-2 satellite data with focus on field-level information. *Geocarto International*, 37(7), 1833-1849. doi: [10.1080/10106049.2020.1805029](https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1805029)
- Haghiabi, A. H., Nasrolahi, A. H., & Parsaie, A. (2018). Water quality prediction using machine learning methods. *Water Quality Research Journal*, 53(1), 3-13. doi: [10.2166/wqrj.2018.025](https://doi.org/10.2166/wqrj.2018.025)
- Hamrani, A., Akbarzadeh, A., & Madramootoo, C. A. (2020). Machine learning for predicting greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 741, 140338. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.140338](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140338)
- Hudait, M., & Patel, P. P. (2022). Crop-type mapping and acreage estimation in smallholding plots using Sentinel-2 images and machine learning algorithms: Some comparisons. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 147-156. doi: [10.1016/j.ejrs.2022.01.004](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.004)
- IBM. (n.d.). K-Nearest Neighbors (KNN). IBM. Retrieved September 26, 2024, from https://www.ibm.com/topics/knn?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=KNN
- Jayaraman, P., Nagarajan, K. K., & Partheeban, P. (2022). A Review on Artificial intelligence Algorithms and Machine Learning to Predict the Quality of Groundwater for Irrigation Purposes. In 2022 International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence (ICDSAAI) (Vol. 1, pp. 1-8). IEEE. doi: [10.1109/ICDSAAI55433.2022.10028857](https://doi.org/10.1109/ICDSAAI55433.2022.10028857)
- Kamienski, C., Soininen, J. P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Salmon Cinotti, T., ... & Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. doi: [10.3390/s19020276](https://doi.org/10.3390/s19020276)
- Kelleher, J. D., & Tierney, B. (2018). *Data science*. MIT Press. Massachusetts, USA. doi: [10.7551/mitpress/11140.001.0001](https://doi.org/10.7551/mitpress/11140.001.0001)
- Khadr, M. (2016). Forecasting of meteorological drought using Hidden Markov Model (case study: The upper Blue Nile river basin, Ethiopia). *Ain Shams Engineering Journal*, 7(1), 47-56. doi: [10.1016/j.asej.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.005)
- Khosla, E., Dharavath, R., & Priya, R. (2020). Crop yield prediction using aggregated rainfall-based modular
- El Bilali, A., Taleb, A. and Brouziyne, Y., 2021. Groundwater quality forecasting using machine learning algorithms for irrigation purposes. *Agricultural Water Management*, 245, p.106625. doi: [10.1016/j.agwat.2020.106625](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106625)
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture*. Rome.
- Fan, J., Yue, W., Wu, L., Zhang, F., Cai, H., Wang, X., ... & Xiang, Y. (2018). Evaluation of SVM, ELM and four tree-based ensemble models for predicting daily reference evapotranspiration using limited meteorological data in different climates of China. *Agricultural and forest meteorology*, 263, 225-241. doi: [10.1016/j.agrformet.2018.08.019](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.019)
- Feng, P., Wang, B., Li Liu, D., & Yu, Q. (2019). Machine learning-based integration of remotely-sensed drought factors can improve the estimation of agricultural drought in South-Eastern Australia. *Agricultural Systems*, 173, 303-316. doi: [10.1016/j.agsy.2019.03.015](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.015)
- Gao, H., Zhangzhong, L., Zheng, W., & Chen, G. (2023). How can agricultural water production be promoted? a review on machine learning for irrigation. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137687. doi: [10.1016/j.jclepro.2023.137687](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137687)
- Ghassemi, B., Dujakovic, A., Žóltak, M., Immitzer, M., Atzberger, C., & Vuolo, F. (2022). Designing a European-wide crop type mapping approach based on machine learning algorithms using LUCAS field survey and Sentinel-2 data. *Remote sensing*, 14(3), 541. doi: [10.3390/rs14030541](https://doi.org/10.3390/rs14030541)
- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 41-49. doi: [10.1016/j.compag.2018.09.040](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040)
- Gong, L., Yan, J., Chen, Y., An, J., He, L., Zheng, L., & Zou, Z. (2022). An IoT-based intelligent irrigation system with data fusion and a self-powered wide-area network. *Journal of Industrial Information Integration*, 29, 100367. doi: [10.1016/j.jii.2022.100367](https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100367)
- Gumma, M. K., Tummala, K., Dixit, S., Collivignarelli, F., Holecz, F., Kolli, R. N., & Whitbread, A. M. (2022). Crop type identification and spatial mapping using

- Moghadas, D., Jadoon, K. Z., & McCabe, M. F. (2019). Spatiotemporal monitoring of soil moisture from EMI data using DCT-based Bayesian inference and neural network. *Journal of Applied Geophysics*, 169, 226-238. doi: [10.1016/j.jappgeo.2019.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.07.004)
- Muñoz, M., Guzmán, J. L., Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., Torres, M., & Berenguel, M. (2020). A new IoT-based platform for greenhouse crop production. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6325-6334. doi: [10.1109/JIOT.2020.2996081](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2996081)
- Nie, H., Yang, L., Li, X., Ren, L., Xu, J., & Feng, Y. (2018). Spatial prediction of soil moisture content in winter wheat based on machine learning model. In 2018 26th International Conference on Geoinformatics (pp. 1-6). IEEE. doi: [10.1109/GeoINFORMATICS.2018.8557119](https://doi.org/10.1109/GeoINFORMATICS.2018.8557119)
- Osman, A. I. A., Ahmed, A. N., Huang, Y. F., Kumar, P., Birima, A. H., Sherif, M., ... & El-Shafie, A. (2022). Past, present and perspective methodology for groundwater modeling-based machine learning approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 3843-3859. doi: [10.1007/s11831-022-09715-w](https://doi.org/10.1007/s11831-022-09715-w)
- Pan, X., & Zhao, J. (2018). High-resolution remote sensing image classification method based on convolutional neural network and restricted conditional random field. *Remote Sensing*, 10(6), 920. doi: [10.3390/rs10060920](https://doi.org/10.3390/rs10060920)
- Perea, R. G., Poyato, E. C., Montesinos, P., & Díaz, J. R. (2019). Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal decision trees. *Computers and electronics in agriculture*, 157, 173-180. doi: [10.1016/j.compag.2018.12.043](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.043)
- Pierson, L. (2021). *Data science for dummies*. John Wiley & Sons, NewYork, USA.
- Pourmohammadali, B., Hosseinifard, S. J., Salehi, M. H., Shirani, H., & Boroujeni, I. E. (2019). Effects of soil properties, water quality and management practices on pistachio yield in Rafsanjan region, southeast of Iran. *Agricultural water management*, 213, 894-902. doi: [10.1016/j.agwat.2018.12.005](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.005)
- Prodhan, F. A., Zhang, J., Yao, F., Shi, L., Pangali Sharma, T. P., Zhang, D., ... & Mohana, H. P. (2021). Deep learning for monitoring agricultural drought in South artificial neural networks and support vector regression. *Environment. Development and Sustainability*, 22, 5687-5708. doi: [10.1007/s10668-019-00445-x](https://doi.org/10.1007/s10668-019-00445-x)
- Kotu, V., & Deshpande, B. (2018). *Data science: concepts and practice*. Morgan Kaufmann. Massachusetts, USA.
- Kouadio, L., Deo, R. C., Byrareddy, V., Adamowski, J. F., & Mushtaq, S. (2018). Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 324-338. doi: [j.compag.2018.10.014](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.014)
- Kranjčić, N., Medak, D., Župan, R., & Rezo, M. (2019). Machine learning methods for classification of the green infrastructure in city areas. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(10), 463. doi: [10.3390/ijgi8100463](https://doi.org/10.3390/ijgi8100463)
- Li, J., Zhou, S., & Hu, R. (2016). Hydrological drought class transition using SPI and SRI time series by log-linear regression. *Water resources management*, 30, 669-684. doi: [10.1007/s11269-015-1184-7](https://doi.org/10.1007/s11269-015-1184-7)
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. doi: [10.3390/s18082674](https://doi.org/10.3390/s18082674)
- Lindemann, M. D. (2019). 169 awardee talk-nutrition from a risk management perspective. *Journal of Animal Science*, 97(Supplement_3), 174-175. doi: [10.1093/jas/skz258.358](https://doi.org/10.1093/jas/skz258.358)
- Ly, Q. V., Nguyen, X. C., Lê, N. C., Truong, T. D., Hoang, T. H. T., Park, T. J., ... & Hur, J. (2021). Application of Machine Learning for eutrophication analysis and algal bloom prediction in an urban river: A 10-year study of the Han River, South Korea. *Science of The Total Environment*, 797, 149040. doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.149040](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149040)
- Maxwell, S. (2015). One water: the need for more holistic thinking, analysis, and policymaking in water. *Journal-American Water Works Association*, 107(3), 21-24. doi: [10.5942/jawwa.2015.107.0048](https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0048)
- Mehdizadeh, S., Behmanesh, J., & Khalili, K. (2017). Using MARS, SVM, GEP and empirical equations for estimation of monthly mean reference evapotranspiration. *Computers and electronics in agriculture*, 139, 103-114. doi: [10.1016/j.compag.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.002)

- 299-318). CRC Press, Florida, USA.
- Sinha, B. B., & Dhanalakshmi, R. (2022). Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 126, 169-184. doi: [10.1016/j.future.2021.08.006](https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006)
- Sundmaeker, H., Verdouw, C., Wolfert, S., & Freire, L. P. (2022). Internet of food and farm 2020. In *Digitising the Industry Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds* (pp. 129-151). River Publishers.
- Virnodkar, S. S., Pachghare, V. K., Patil, V. C., & Jha, S. K. (2020). Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review. *Precision Agriculture*, 21(5), 1121-1155. doi: [10.1007/s11119-020-09711-9](https://doi.org/10.1007/s11119-020-09711-9)
- Wang, H., Liu, C., & Zhang, L. (2002). Water-saving agriculture in China: an overview. *Advances in Agronomy*, 75, 135-171. doi: [10.1016/S0065-2113\(02\)75004-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75004-9)
- Xing, L., Cui, N., Guo, L., Du, T., Gong, D., Zhan, C., ... & Wu, Z. (2022). Estimating daily reference evapotranspiration using a novel hybrid deep learning model. *Journal of Hydrology*, 614, 128567. doi: [10.1016/j.jhydrol.2022.128567](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128567)
- Yaseen, Z. M., Al-Juboori, A. M., Beyaztas, U., Al-Ansari, N., Chau, K. W., Qi, C., ... & Shahid, S. (2020). Prediction of evaporation in arid and semi-arid regions: A comparative study using different machine learning models. *Engineering applications of computational fluid mechanics*, 14(1), 70-89. doi: [10.1080/19942060.2019.1680576](https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1680576)
- Zanganeh, R., Mojaradi, B., & Jabbari, E. (2016). Leak Detection from the Buried Water Transmission Pipeline Using Landsat 8 Satellite Images (Case Study of the Kosar Water Transmission Pipeline). In *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering*, Tehran, Iran (pp. 8-10).
- Zhi, W., Feng, D., Tsai, W. P., Sterle, G., Harpold, A., Shen, C., & Li, L. (2021). From hydrometeorology to river water quality: can a deep learning model predict dissolved oxygen at the continental scale?. *Environmental science & technology*, 55(4), 2357-2368. doi: [10.1021/acs.est.0c06783](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06783)
- Asia using remote sensing data. *Remote Sensing*, 13(9), 1715. doi: [10.3390/rs13091715](https://doi.org/10.3390/rs13091715)
- Pu, F., Ding, C., Chao, Z., Yu, Y., & Xu, X. (2019). Water-quality classification of inland lakes using Landsat8 images by convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 11(14), 1674. doi: [10.3390/rs11141674](https://doi.org/10.3390/rs11141674)
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, 1, 81-106.
- Raj, R. (2021). Supervised, Unsupervised, And Semi-Supervised Learning With Real-Life Usecase. *Enjoy Algorithm*. [Online]. Available: <https://www.enjoyalgorithms.com/blogs/supervised-unsupervised-and-semisupervised-learning>. Updated: 07/08/2021.
- Ranjan, A. K., & Parida, B. R. (2019). Paddy acreage mapping and yield prediction using sentinel-based optical and SAR data in Sahibganj district, Jharkhand (India). *Spatial Information Research*, 27(4), 399-410. doi: [10.1007/s41324-019-00246-4](https://doi.org/10.1007/s41324-019-00246-4)
- Raschka, S. (2018). STAT 479: Machine Learning Lecture Notes. Department of Statistics, University of Wisconsin-Madison. https://sebastianraschka.com/pdf/lecture-notes/stat479fs18/07_ensembles_notes.pdf
- Rosegrant, M. W., Ringler, C., & Zhu, T. (2009). Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity. *Annual review of Environment and resources*, 34, 205-222. doi: [10.1146/annurev.environ.030308.090351](https://doi.org/10.1146/annurev.environ.030308.090351)
- Saraiva, M., Protas, É., Salgado, M., & Souza Jr, C. (2020). Automatic mapping of center pivot irrigation systems from satellite images using deep learning. *Remote Sensing*, 12(3), 558. doi: [10.3390/rs12030558](https://doi.org/10.3390/rs12030558)
- ScienceDirect. (n.d.). Search results for "water, machine learning, agriculture". Retrieved December 2023, from <https://www.sciencedirect.com>
- Shen, R., Huang, A., Li, B., & Guo, J. (2019). Construction of a drought monitoring model using deep learning based on multi-source remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 48-57. doi: [10.1016/j.jag.2019.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.006)
- Singh, R., Deshwal, A., & Kumar, K. (2021). Implementation of smart irrigation system using intelligent systems and machine learning approaches. In *Data Science and Innovations for Intelligent Systems* (pp.

Article Type: Technical paper

نوع مقاله: فنی و ترویجی

The Experience of Designing and Building a Floating Intake System in the Doosti Dam

A. Shahabi^{1*}, M. Naderian², M. Maghrebi³, R. Ghasemi⁴

1- Ph.D. in Water and Hydraulic Structures, Dam and Network Design Studies Department, Khorasan Razavi Regional Water Company, Mashhad, Iran. 2- MSc in Water Engineering & MSc in Water Resources Management, Water Technical Office, Khorasan Razavi Regional Water Company, Mashhad, Iran. 3- Ph.D. in Water Resources and Environmental Engineering, Hydropars Khorasan Consulting Engineers, Civil Engineering Department, Gonabad Higher Education Complex, Gonabad, Iran.

* (Corresponding Author Email: shahbi.ab@khrw.ir)

Received: 16-12-2023

Revised: 07-05-2024

Accepted: 08-05-2024

Available Online: 15-09-2024

تجربه طراحی و ساخت سامانه آبگیر شناور در سد دوستی

اکبر شهابی^۱، محمود نادریان^۲، محسن مغربی^۳، رضا قاسمی^۴

۱- دانش آموخته دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مطالعات طرح‌های سد و شبکه، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران. ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد گرایش مهندسی آب و دانش آموخته کارشناسی ارشد گرایش مدیریت منابع آب، دفتر فنی آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران. ۳- دانش آموخته دکتری مهندسی منابع آب و محیط زیست، مهندسین مشاور هیدروپارس خراسان، گروه عمران، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: shahbi.ab@khrw.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

Abstract

Ensuring water in critical conditions, especially in the hot months of the year, is very critical and requires optimal use of all water capacities. In this research, the study and implementation approach of constructing a floating pumping station in the Doosti dam to water withdrawal from the surface of the reservoir to improve the qualitative and quantitative conditions in water withdrawal from the reservoir of this dam in summer 2023 has been discussed. By using a floating pumping station with an approximate weight of 100 tons, it was possible to supply water with a capacity of 2.25 to 3 m³/s from the Doosti dam reservoir and with a turbidity between 4 and 5 NTU; While without using this floating pumping station, maximum of 2 m³/s of water with a turbidity between 17 and 19 NTU could be extracted from the dam. One of the most important features of this project was the transfer of a significant volume of water from the dam reservoir to the intake tower in the shortest possible time with the least equipment and facilities, which, by being placed in the circuit, was able to play an important role in providing drinking water to the Mashhad city in summer 2023. The results of this research can be used in other dams of the country and in water resources development planning to cover current needs or increase the water quality in the exploitation of dams.

Keywords: Drinking Water Supply of Mashhad City, Floating Pumping Station, Doosti Dam.

چکیده

تأمین آب در شرایط بحرانی به‌ویژه در ماه‌های گرم سال بسیار بحرانی و نیازمند استفاده بهینه از تمام ظرفیت‌های آبی می‌باشد. در این پژوهش رویکرد مطالعاتی و اجرایی ساخت ایستگاه پمپاژ شناور در مخزن سد دوستی برای آبگیری از سطح مخزن و با هدف ارتقا شرایط کیفی و کمی در آبگیری از مخزن این سد در تابستان ۱۴۰۲ بیان شده است. با استفاده از ایستگاه پمپاژ شناور با وزن تقریبی ۱۰۰ تن، امکان تأمین آب با ظرفیت ۲/۲۵ تا ۳ مترمکعب بر ثانیه از مخزن سد دوستی و با کدورت بین ۴ تا ۵ NTU فراهم شد؛ درحالی‌که بدون استفاده از این ایستگاه پمپاژ شناور، حداکثر ۲ متر مکعب بر ثانیه آب با کدورت بین ۱۷ تا ۱۹ NTU از سد قابل برداشت بوده است. یکی از مهمترین ویژگی‌های این پروژه، انتقال حجم قابل توجه آب در کمترین زمان ممکن با صرف کمترین تجهیزات و مستحدمات از مخزن سد به برج آبگیر بود که با در مدار قرار گرفتن آن، توانست نقش مهمی در تأمین آب شرب شهر مشهد در تابستان ۱۴۰۲ بیافریند. نتایج این پژوهش می‌تواند در دیگر سدهای کشور و در برنامه‌ریزی‌های توسعه منابع آب با هدف پوشش نیازهای آبی لحظه‌ای و یا افزایش کیفیت آب در بهره‌برداری از سدها استفاده شود.

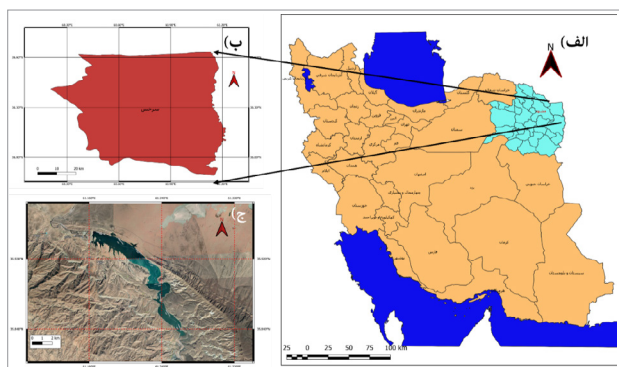
واژه‌های کلیدی: تأمین آب شرب شهر مشهد، ایستگاه پمپاژ شناور، سد دوستی.

(Erika, ۲۰۱۹). در این پژوهش یافته‌های مطالعاتی و اجرایی در خصوص طراحی و ساخت ایستگاه پمپاژ شناور در سد دوستی بیان شده است. این پژوهش از آن جهت اهمیت دارد که این نوع سازه به‌عنوان اولین سازه صنعتی آبگیر شناور در سطح کشور توسط پژوهشگران داخلی طراحی و ساخته شده و می‌تواند به‌عنوان یک الگو در تأمین آب کیفی و یا کمی در سدهای دیگر ایران برای مدیریت بهتر منابع آبی استفاده شود.

مواد و روش‌ها

• موقعیت و ویژگی‌های طرح مطالعه شده

سد دوستی یکی از سدهای مهم در شرق کشور است که در دهه‌های گذشته برای تأمین آب شرب شهر مشهد و توسعه کشاورزی در دشت سرخس ایجاد شده است. این سد در طول جغرافیایی $9^{\circ} 61'$ تا $9^{\circ} 61'$ و عرض جغرافیایی $49^{\circ} 35'$ تا $57^{\circ} 35'$ قرار گرفته است. شکل (۱) موقعیت این سد را نشان می‌دهد. این سد از نوع خاکی با هسته رسی به ارتفاع ۷۸ متر و طول تاج ۶۵۰ متر و حجم مخزنی حدود ۱,۲۵۰ میلیارد مترمکعب است (نظری محدر و همکاران، ۱۳۹۸). خط انتقال پایاب این سد به سمت مشهد، یکی از طرح‌های ملی کشور در جهت تأمین آب شرب شهر مشهد می‌باشد که شامل اجرای یک خط لوله فولادی به قطر ۲ هزار میلی‌متر و به طول ۱۸۲ کیلومتر، احداث ۵ ایستگاه پمپاژ، ساخت یک واحد تصفیه‌خانه به ظرفیت ۶ متر مکعب در ثانیه، ساخت یک تونل به طول ۹۳۰ متر، خط انتقال برق ۱۳۲ کیلوولت به طول ۱۵۰ کیلومتر و ۵ ایستگاه کاهنده ولتاژ ۱۳۲ به ۶,۶ کیلو ولت است.



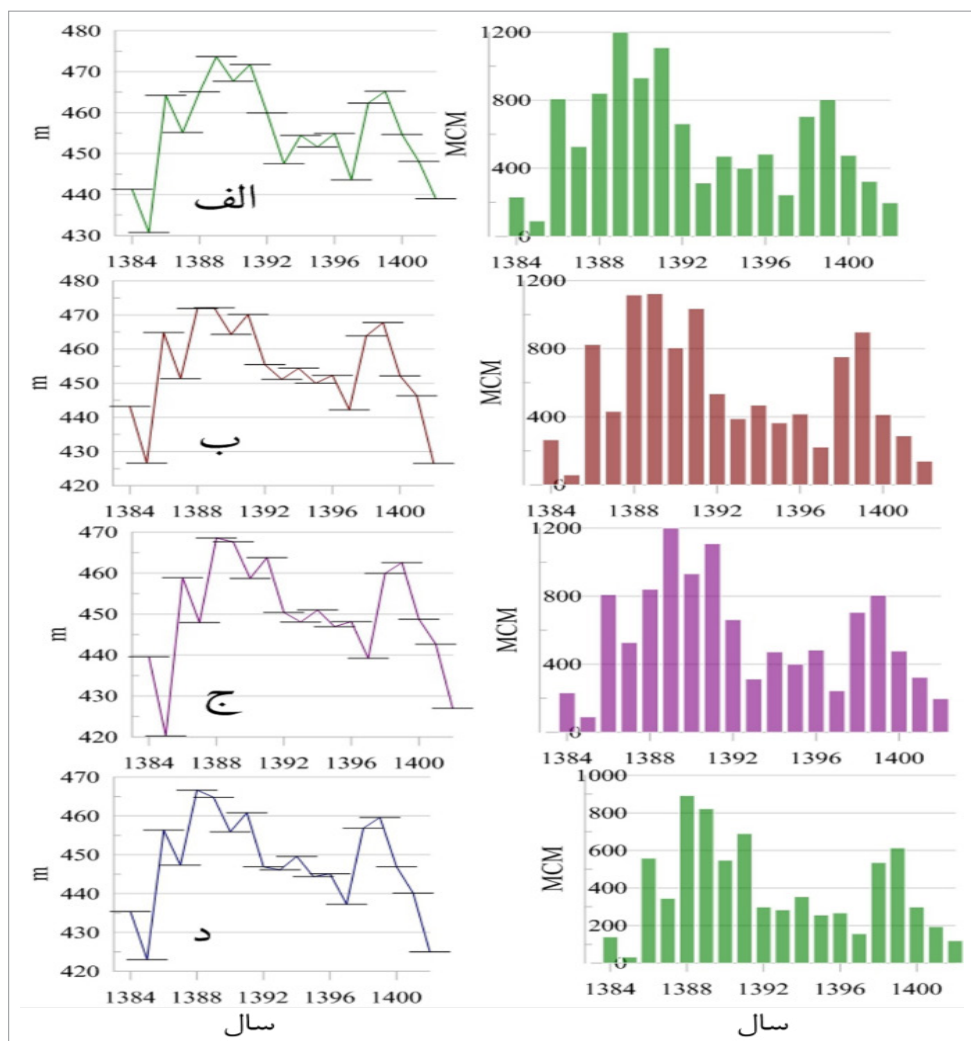
شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی: (الف) کشور ایران؛ (ب) شهرستان سرخس؛ (ج) سد دوستی

حجم مخزن سد دوستی توانایی تأمین ۱۶۵ میلیون مترمکعب در سال برای آب شرب شهر مشهد، ۱۳/۱ میلیون متر مکعب در سال برای تأمین آب شرب شهر سرخس و ۱۱۴/۱ میلیون مترمکعب در سال برای کشاورزی در دشت سرخس را دارد (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۴۰۲). در شکل (۲) تغییرات حجم مخزن و ارتفاع

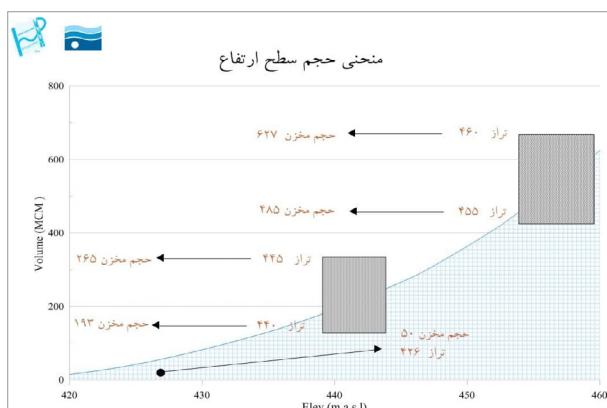
مشهد یکی از شهرهای مهم و پرجمعیت کشور است که به دلیل جذابیت‌های زیارتی و شهرنشینی و قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک کشور، نیازمند تنوع در منابع تأمین آب برای افزایش قابلیت‌های پایدار در تأمین آب است. اگرچه در حال حاضر برنامه‌ریزی‌های گسترده ملی و استانی برای اجرای طرح‌های تأمین آب این کلان شهر وجود دارد اما توجه به ظرفیت‌های موجود و استفاده بهینه از پتانسیل‌های ایجاد شده در سال‌های قبل با هزینه‌های گسترده، یکی از گزینه‌های اقتصادی در پوشش نیازهای آبی این شهر مهم است. در مواقع بحرانی مثل اوج مصرف تابستانه، لازم است از تمام ظرفیت‌ها به‌صورت کافی و جامع استفاده شود تا ضمن حفظ پایداری منابع آب، نیازها به‌صورت مطمئن و پایدار تأمین شود (Islami و Rahimi, ۲۰۱۹). یکی از ظرفیت‌های مناسب ایجاد شده در این بخش، سد دوستی است. سد دوستی، در مرز ایران و ترکمنستان و بر روی رودخانه مرزی هریرود در حوزه شهرستان سرخس در شمال شرق استان خراسان رضوی احداث شده است. در سال‌های اخیر به دلیل دخل و تصرفات در حوضه بالادست سد دوستی و همچنین تغییرات اقلیمی، کاهش آورد در سد دوستی مخصوصاً در ماه‌های خشک سال اتفاق افتاده و این امر بر توان آبگیری از سد دوستی به شدت اثر گذار بوده است (Maghrebi و همکاران، ۲۰۲۳). در حال حاضر با کاهش سطح آب در مخزن سد دوستی، تنها امکان آبگیری حدود ۴ مترمکعب بر ثانیه آب از مخزن این سد وجود دارد که بر اساس پروتکل‌های ملی بین کشور ایران و ترکمنستان، سهم ایران از این آب، ۲ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود. همچنین به دلیل عدم ورود منابع آبی به مخزن این سد در طول دو سال گذشته، کیفیت آب در مخزن این سد به شدت کاهش یافته است و آبگیری از تخلیه کننده تحتانی شرایط کیفی مناسبی ندارد؛ به‌طوری‌که کدورت در جریان آب برابر با ۱۷ تا ۱۹ NTU است. این موضوع هزینه‌های فرآیندهای تصفیه آب را نیز به شدت افزایش می‌دهد. یکی از راه حل‌های مناسب برای رفع این مشکل، استفاده از ایستگاه پمپاژ شناور برای افزایش راندمان آبگیری است (Chen و همکاران، ۲۰۲۱). از ایستگاه پمپاژ شناور برای مقاصد مختلفی استفاده می‌شود به‌عنوان مثال در شهر کنستانس کشور رومانی از این روش برای آبیاری حدود ۱۳۰۰ هکتار زمین کشاورزی با دبی ۶۴۰۰ متر مکعب بر ساعت استفاده شده است (Constantin و همکاران، ۲۰۱۱). در تجربه‌ای مشابه جهت استفاده از آب رودخانه دانوب در کشور رومانی از دو ایستگاه پمپاژ شناور با توان مجموع پمپاژ آب به میزان ۲۶/۴ مترمکعب بر ثانیه با ارتفاع پمپاژ ۱۲ متر برای آبیاری زمین‌های کشاورزی استفاده شده است (Robert و

و تصرف و توسعه کشاورزی در حوضه آبریز این سد باعث کاهش رواناب‌های ورودی به سد و افت تراز آب در مخزن سد شده است.

سطح آب سد دوستی در فصل‌های مختلف سال ارائه شده است که می‌توان بیان کرد عوامل مختلفی مانند کاهش نزولات جوی، دخل



شکل ۲- تغییرات حجم (سمت راست) و ارتفاع سطح آب مخزن (سمت چپ) سد دوستی در فصول مختلف سال؛
(الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز، (د) زمستان



شکل ۳- منحنی حجم ارتفاع در سد دوستی و موقعیت دریچه‌های آبیگر و برداشت آب در این سد (حجم مخزن به میلیون متر مکعب و سطح ارتفاع به متر)

در شکل (۳) مشاهده می‌شود کاهش تراز آب در مخزن سد باعث ایجاد شرایط عدم امکان آبیگری مطمئن از سازه‌های آبیگر سد شده است. به دلیل عدم امکان آبیگری از سازه‌های آبیگری، در شرایط حاضر، از تخلیه کننده تحتانی استفاده می‌شود که استفاده از آن علاوه بر وجود مخاطرات (امکان از دست رفتن شرایط آبیگری در اثر رخداد سیلاب و ورود رسوبات به دریچه و مخروط آبیگری)، بر روی مقدار آبیگری از سد نیز موثر بوده است. درحالی‌که بیشینه دبی آبیگری از سازه‌های آبیگر در سد دوستی برابر با ۶ متر مکعب بر ثانیه است، امکان استحصال آب از این آبیگر در بهترین شرایط به حدود ۴ متر مکعب بر ثانیه کاهش پیدا کرده است. لازم به ذکر است تراز نرمال در این سد برابر با ۴۷۴ متر و تراز تخلیه کننده تحتانی برابر با ۴۱۱/۵ متر و تراز آبیگری‌ها در دو تراز ۴۴۰ و ۴۵۵ متر است (شکل ۳).

مجموع دو آبگیر طراحی شده در این سد، توانایی آبگیری برابر با ۶ مترمکعب بر ثانیه را دارد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده از وضعیت مخزن در مورخه ۱۴۰۲/۰۲/۱۸، تراز آب در مخزن سد برابر با ۴۳۶ متر (پایین‌تر از هر دو تراز سازه آبگیر در مخزن سد) و حجم مخزن برابر با ۱۴۱/۶ میلیون مترمکعب است (شکل ۴). باتوجه به عدم امکان آبگیری از مخزن سد در این تراز، آبگیری از تخلیه کننده تحتانی صورت می‌پذیرد و دبی ۲ مترمکعب بر ثانیه، از سازه تخلیه کننده تحتانی به سمت آبگیر آب شرب مشهد منتقل می‌شود (شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۴۰۲)، بنابراین ایستگاه پمپاژ شناور در سد دوستی برای رفع این مشکل و مخاطرات و کمک به آبگیری پایدار و کیفیت مناسب آب، در نظر گرفته شد.



شکل ۴- موقعیت تأسیسات آبگیری از سد دوستی و وضعیت تراز آب (بهار ۱۴۰۲)

نتایج و بحث

الف) مکان‌یابی استقرار ایستگاه پمپاژ شناور

موقعیت قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور در مخزن سد با هدف ایجاد بیشترین عمق آبگیری و کمترین ورود رسوبات از بستر در اثر فرونشست سطح آب در طول دوران بهره‌برداری و کاهش

مسیر دسترسی برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و اجرای خط برق تعیین شده است (قزل‌سوفلو و همکاران، ۱۳۹۷). تراز کف مخزن برابر با ۴۱۴ متر، و بیشترین تراز ارتفاعی سد ۴۷۵ متر می‌باشد. در تراز ۴۴۰ متر (آخرین تراز آبگیری)، حجم مخزن برابر با ۱۹۱ میلیون مترمکعب است. در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲، تراز ارتفاعی در مخزن سد دوستی برابر با ۴۳۶ متر (معادل حجم آب در مخزن حدود ۱۳۵ میلیون مترمکعب) بوده است. بر اساس آخرین اطلاعات، حجم مرده برابر با ۱۵ میلیون مترمکعب برآورد شده که با احتساب حجم مرده، حجم مفید قابل دسترسی در تراز ۴۳۶ متر حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب می‌باشد.

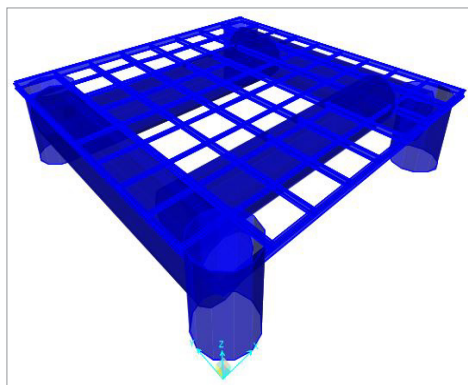
اثر کاهش طول بر میزان آبگیری سد بررسی فنی و مهندسی ارزش شده است. به همین دلیل با پذیرش ریسک، امکان کاهش آبگیری در طول‌های کمتر، اثر عمق‌های مختلف در فاصله قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور نسبت به سازه‌ی آبگیر بررسی شده است (جدول ۱). با انجام عمل هیدروگرافی اولیه مخزن سد، موقعیت قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور مکانی در نواحی تخلیه کننده تحتانی سد که بیشترین عمق را داشت در موقعیت E ۵۵,۹۴' و N ۶۱° ۵۷,۷۰' ۵۶' تعیین شد. در صورتی که تراز ارتفاعی ایستگاه پمپاژ شناور بر روی مخزن سد در مختصات اشاره شده جابه‌جا شود؛ بر طول کابل انتقال برق و طول لوله‌ها اثر گذار خواهد بود. در جدول (۱) میزان طول لوله‌های خط انتقال و همچنین کابل مورد نیاز انتقال برق (از ترانس تا محل تابلو برق) در هر کدام از فاصله‌ها ارائه شده است.

بر اساس نتایج هیدروگرافی انجام شده می‌توان موقعیت قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور را در فاصله ۱۸۰ متری نسبت به سازه آبگیر جامنایی نمود. در این موقعیت مکانی و زمانی، تراز آب در ۴۱۷ متر قرار گرفته است. این امر می‌تواند باعث کوتاه شدن مسیر خط انتقال به بیش از ۴۵ متر و کاهش طول راه دسترسی به بیش از ۵۰ متر شود. شکل (۵) نشان دهنده سیستم و موقعیت قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور پس از استفاده از نتایج هیدروگرافی مخزن است.

جدول ۱- اثر تراز قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور بر روی کاهش هزینه‌های خط انتقال و لوله آب‌بر

تراز آب در مخزن (متر)	فاصله ایستگاه شناور تا سازه آبگیر (متر)	طول خط انتقال (متر)	طول کابل (متر)	درصد کاهش طول خط انتقال	درصد کاهش طول کابل
۴۲۰	۲۶۰	۲۳۴۰	۴۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴۲۵	۱۹۵	۱۷۵۵	۴۷۰	۲۵/۰۰	۴/۰۸
۴۳۰	۱۷۶	۱۵۸۴	۳۸۰	۳۲/۳۱	۲۲/۴۵
۴۳۵	۹۶	۸۶۴	۳۵۵	۶۳/۰۸	۲۷/۵۵
۴۴۰	۰	۰	۳۱۰	۱۰۰/۰	۳۶/۷۳

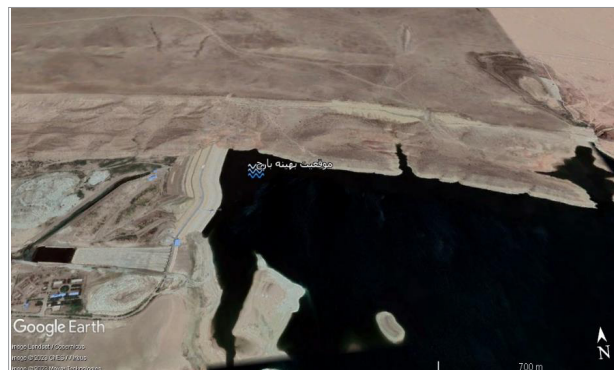
آلات روی ایستگاه پمپاژ شناور، ۷۰۰ کیلوگرم بر متر طول لوله؛ و بار ناشی از وزن دیوار ساندویچ پنل و سقف سبک، ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع است. در نهایت بر اساس خروجی‌های این مدل، ابعاد و مقاطع فولادی مورد نیاز بر روی سکوی شناوری طراحی شده است.



شکل ۶- آنالیز سازه‌ای ایستگاه پمپاژ شناور در نرم‌افزار SAP2000

د) انتخاب پمپ‌ها ایستگاه پمپاژ شناور

از بین پمپ‌های موجود در بازار، پمپ‌های شناور به دلیل محدودیت ظرفیت حداکثر تا ۱۸۰ لیتر بر ثانیه و پمپ‌های کفکش و لجن‌کش به دلیل محدودیت‌های عملکردی از نظر تامین بار آبی (ارتفاع) و دبی مورد نیاز، از دسته انتخاب خارج شد و بر اساس پمپ‌های موجود در بازار، ۱۲ پمپ از نوع ETA 250-29 به‌صورت موازی برای قرارگیری بر روی ایستگاه پمپاژ شناور انتخاب شد. بر روی هر شناور یک پمپ رزرو وجود دارد که در صورت نیاز به دبی بیشتر می‌توان از آن پمپ هم استفاده نمود. این پمپ، امکان تأمین دبی برابر با ۹۰۰ مترمکعب بر ساعت و با آبی ۱۰ تا ۲۰ متر را با توان نامی ۵۵ کیلووات و قطر پروانه ۲۱۰/۲۹۰ با پروانه‌های حلزونی GG25 و محور CK45 را تأمین می‌نماید.



شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای از موقعیت بهینه قرارگیری ایستگاه پمپاژ شناور (۲۰۲۲)

ب) تأمین نیروی شناوری ایستگاه شناور

برای شناورسازی آبگیر، گزینه‌های مختلفی مانند استفاده از یونولیت، بالشتک‌های پلی‌اتیلنی و قطعات فولادی در دستور کار قرار گرفت. در این خصوص با توجه به زمان‌بندی پروژه و ضرورت بهره‌برداری از پروژه، تصمیم‌گیری بر اساس موجودی‌های بازار و اجرا و آب‌اندازی با رعایت مسائل فنی صورت پذیرفت و در نهایت شناوری بر اساس لوله‌های فولادی به قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۶ میلی‌متر مهیا شد. لازم به ذکر است، برای افزایش ضریب اطمینان و اصلاح بارگذاری نامتقارن ناشی از قرارگیری کلکتور در گوشه‌های ایستگاه شناور، یونولیت در ناحیه مرکزی و در زیر شاسی در نظر گرفته شد. جرم هر کدام از سازه‌های شناوری به همراه متعلقات و شاسی‌کشی برابر با ۴۸۴۰۰ کیلوگرم و میزان جرم شناور تأمین شده برابر با ۵۹۰۰۰ کیلوگرم است که ضریب اطمینان را به عدد ۱/۲ می‌رساند.

ج) طراحی سازه‌ای ایستگاه پمپاژ شناور

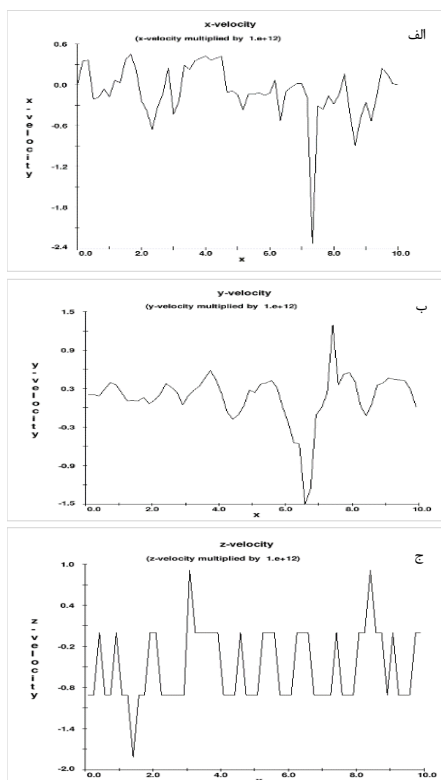
بر روی سازه‌ی شناوری لازم است اسکلت فولادی در نظر گرفته شود تا بر روی آن، اسکلت و پمپ‌ها قرار داده شود و این اطمینان حاصل شود که مجموعه پمپ‌ها بدون هیچ گونه لرزش و یا مخاطره‌ای در طول دوران بهره‌برداری عمل می‌نمایند. لوله‌های فولادی، ممان اینرسی و قابلیت بارپذیری دارند. برای این منظور سیستم شناوری و اسکلت فولادی برای تعیین مشخصات سازه‌ای در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شد که بخشی از این نتایج در شکل (۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است بارگذاری بر روی این سازه شامل بار مرده ناشی از وزن صفحه مشبک فولادی با ضخامت ۳ میلیمتر، ۲۵ کیلوگرم بر مترمربع؛ بار زنده ناشی از وزن افراد، ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع؛ بار مرده ناشی از وزن پمپ‌های آب نصب شده، ۲ تن به ازای هر پمپ؛ بار ناشی از وزن لوله‌های فولادی و شیر

۵) مدل سازی هیدرولیکی

یکی از نگرانی های هیدرولیکی در فرآیند آبیگری، تداخل مخروط های افت پمپ ها و ایجاد حباب هوا در آبیگری از جریان در مخزن سد است. برای بررسی دقیق این موضوع از نرم افزار FLOW3D استفاده شد. استفاده از این نرم افزار برای دستیابی به دید کلی از فرآیند هیدرودینامیکی انجام شد و فرآیند واسنجی در این خصوص در دستور کار نبود. برای این منظور سیستم آبیگری در سناریوهای مختلف با شبکه بندی ۱۰ سانتی متری از هندسه طرح تهیه و اجرا شد. این موضوع در سناریوهای مختلف تراز قرارگیری دهانه آبیگر اجرا و در نهایت مشخص شد در صورتی که عمق قرارگیری پمپ ها به صورت پلکانی و در عمق ۱/۷ متر در دوطرف و ۱/۳ متر در مرکز و با فاصله ۲/۲ متری نسبت به یکدیگر باشند، شرایط تداخل جریان و ورود هوا به پمپ ها رخ نخواهد داد (شکل ۷).

پس از بررسی های فنی در لایه های مختلف، طرح ایستگاه پمپاژ شناور در سد دوستی برابر نهایی و مقدمات اجرای کار در فاز سوم برداشته شد (جدول ۲).

این ایستگاه پمپاژ در ۱۶ تیرماه سال ۱۴۰۲ وارد مدار بهره برداری شد و نقش مهمی در تأمین آب شرب شهر مشهد به ویژه در اوج مصرف تابستان در مرداد و شهریور انجام داد (شکل ۸).



شکل ۷- توزیع سرعت (متر بر ثانیه) به صورت یک بعدی و در جهات: (الف) X، (ب) Y و (ج) Z

جدول ۲- مشخصات کلی ایستگاه پمپاژ شناور در سد دوستی

تعداد شناور	۲ شناور	ابعاد هندسی	۸×۸×۸ متر
نوع شناور	لوله های فولادی و قطعات یونولیتی	تعداد پمپ در هر شناور	۶ عدد
ظرفیت نهایی آبدی هر شناور	۱/۱۲۵ تا ۱/۵ متر مکعب بر ثانیه	ظرفیت آبدی کل شناور	۲/۲۵ تا ۳ متر مکعب بر ثانیه
نحوه تعادل	با مهار جانبی ساحلی سه جهته	نوع پمپ	اتا - ۲۹-۲۵
توان و ظرفیت پمپ	۵۵ کیلو وات، ۷۵ اسب بخار و ۱۰۵ آمپر	لوله آبیگر	فولادی با پوشش به قطر ۴۵۰ میلی متر به عمق ۱/۳ و ۱/۷ متر
لوله رانش	فولادی با پوشش به قطر ۳۰۰ میلی متر	جنس و قطر خط انتقال	پلی اتیلن - ۵۰۰ میلی متر ۴×
نحوه ورود جریان	متقارن ۴ طرفه به همراه شبکه آشغال گیر ۴ جهته	وضعیت کف	انسداد برای جلوگیری از ورود رسوبات از کف
طول خط انتقال (m)	۲×(۴×۲۰۰)-D500 پلی اتیلن	نوع و جنس کابل خط انتقال خط اصلی	۳×۳۰۰-۲۰۰
طول و جنس کابل از محل تابلو (mm)	۳×۱۲۰ - ۳۶۰۰	نوع شبکه آشغال گیر	توری پلی اتیلن چند جهته



شکل ۸- ایستگاه پمپاژ شناور در حال بهره‌برداری، مرداد ۱۴۰۲

شد. لازم به ذکر است از ایستگاه پمپاژ شناور در جایگاه‌هایی در داخل و خارج از کشور استفاده شده است اما میزان حجم آب قابل استحصال، مدت زمان اجرا، استفاده از قطعات ساخته شده در داخل کشور و طرح و اجرا توسط متخصصین ایرانی، این ایستگاه پمپاژ شناور را نسبت به سایر ایستگاه پمپاژ شناور اجرا شده در داخل کشور متمایز می‌سازد. همچنین در اجرای این پروژه محدودیت‌های زمانی و مالی برای تأمین قطعات وجود داشت. در صورت عدم وجود چنین محدودیت‌هایی، استفاده از کابل‌های مقاوم به ضربه و آب و همچنین استفاده از قطعات بالشتک‌های پلی‌اتیلنی می‌توانست مشخصات این سامانه را ارتقا دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پس از اتمام مطالعات و تهیه طرح، فرایند اجرایی این ایستگاه پمپاژ در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲ آغاز شد. هدف اصلی در این مرحله، آبیگری از مجموعه سیستم تا اوایل تیر ماه برای پوشش اوج مصرف شهر مشهد در این ماه‌های سال تعیین شد. فرایند اجرایی با حضور نمایندگان شرکت مدیریت منابع آب ایران، ارکان اجرایی و مطالعاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، شرکت مهندسين مشاور هیدروپارس خراسان و شرکت ساختمانی و راه‌سازی دژ بوژان آغاز شد و در طول فرایندهای اجرایی این پروژه از تولیدات تأمین کنندگان ایرانی استفاده شد. با شروع عملیات اجرایی پروژه به دلیل گرمای زیاد در محل سد و آماده نبودن زیر ساخت‌های اجرایی، کارگاه اصلی پروژه برای جوشکاری‌ها و مونتاژ اولیه قطعات در یکی از کارگاه‌های فعال شهر مشهد برنامه‌ریزی و با تأمین زیر ساخت‌های لازم از قبیل سکوی نصب و آماده سازی در محل مخزن سد دوستی، قطعات به سمت محل پروژه منتقل شد. در ابتدا زیر ساخت‌های شناوری شامل لوله‌های ۱۴۰۰ به یکدیگر جوش و در ادامه قطعات فولادی شاسی و ورق‌های نهایی و متعاقب آن نصب پمپ‌ها بر روی کف سازه‌ی شناور اجرا شد و پس از آن، لوله‌های آبگیر و رانش به همراه متعلقات و اتصالات لازم شامل شیرهای هوا، شیر یک طرفه، کلکتور، شیر هواگیری و فشار سنج بر روی ایستگاه پمپاژ اجرا شد. برای ایجاد تقارن در پروژه جامه‌ای اجرا به نحوی صورت پذیرفته است تا نهایت تقارن بارگذاری در سازه ایجاد شود. یکی از فرایندهای مهم در اجرای این پروژه، آب اندازی ایستگاه پمپاژ بود که باتوجه به وزن زیاد، نیازمند استفاده از روش‌های متناسب با شرایط موجود در منطقه است. برای این منظور پس از بررسی گزینه‌های مختلف، آب اندازی از طریق ریل‌گذاری در حاشیه مخزن سد به‌عنوان گزینه‌ی اجرایی مطلوب تعیین

پی‌نوشت‌ها

1-Nephelometric Turbidity Unit

منابع

- شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی. (۱۴۰۲). مطالعات مرحله اول و دوم ایستگاه پمپاژ شناور سد دوستی شهرستان سرخس. شرکت هیدروپارس خراسان. مشهد، ایران.
- قزل‌سوفلو، عباسعلی، مغربی، محسن، و داروغه، فرزانه. (۱۳۹۷). شناسایی و تعیین میزان گسترش در آبکندهای فعال با استفاده از سنجش از راه دور. آب و توسعه پایدار، ۵(۱): ۶۷-۷۲. doi: [10.22067/jwsd.v5i1.59123](https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i1.59123)
- نظری محدر، حسن، مریدی، علی، یزدی، جعفر، خزائی پول، احمد. (۱۳۹۸). چشم‌انداز پایداری تأمین نیازهای شرب و کشاورزی سد دوستی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و بهره‌برداری از سد سلما. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۳)، ۱۷-۳۲. <https://doi.org/10.1001.1.17352347.1398.15.3.2.3>
- Islami, R., & Rahimi, A. (2019). Policymaking and water crisis in Iran. Quarterly Journal of the Macro and Strategic Policies, 7(27), 410-435. doi: [10.32598/JMSP7.3.5](https://doi.org/10.32598/JMSP7.3.5)
- Maghrebi, M., Noori, R., Mehr, A.D., Lak, R., Darougheh, F., Razmgir, R., Farnoush, H., Taherpour, H., Moghadam, S.M.R.A., Araghi, A., & Kløve, B. (2023). Spatiotemporal Changes in Iranian Rivers' Discharge. Elementa science of the Anthropocene, doi: [10.1525/elementa.2022.00002](https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00002)
- Chen, S., Zhao, P., Xie, G., Wei, Y., Lyu, Y., Zhang, Y., Yan, T., & Zhang, T. (2021). A floating solar still

- inspired by continuous root water intake. Desalination, 512, 115133. doi: [10.1016/j.desal.2021.115133](https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115133)
- Constantin, A., Nițescu, C., Stănescu, M., & Roșu, L. (2011). Operation Improvement of an Irrigation Water Supply Floating Pumping Station in Constantza County. Ovidius University Annals Series: Civil Engineering, 13, 7-12.
- Robert, B., & Erika, B. (2019). The SPA1 Cetate pumping station modernization, Floating pumping station and irrigation System. Scientific Bulletin of Politehnica University of Timisoara: Transactions on HYDROTECHNICS, 64(78), 42-45.

An Analysis on the Management of Septage Disposal in Mashhad and Providing a Suitable Practical Solution

R. Salajegheh¹, M. Raei Naei^{2*}, K. Esmaili^{3*}

1, 2, 3- Ph.D Candidate, Associate Professor and MSc in Water Science and Engineering, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: mehdi.raei1365@yahoo.com)

Received: 28-08-2023

Revised: 06-03-2024

Accepted: 19-03-2024

Available Online: 21-09-2024

تحلیلی بر مدیریت دفع سپتاز در مشهد و ارائه راه حل عملی مناسب

رضوان سلاجقه^۱، مهدی راعی نائی^{۲*}، کاظم اسماعیلی^{۳*}

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آب و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: mehdi.raei1365@yahoo.com)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

Abstract

Septage refers to wastewater that has been concentrated after being stored in absorption wells and septic tanks. Due to the retention and storage process, its quality differs somewhat from raw wastewater entering sewage treatment plants. In the past, this type of wastewater was disposed of by direct discharge in non-residential areas or even onto vegetable farms. Septage cannot be equated with raw wastewater, as its degree of concentration and stabilization varies depending on its source, duration, and storage conditions. Therefore, proper assessments should be conducted regarding the management of its discharge into the environment. In this study, to explore the management methods for septage in the city of Mashhad, the qualitative and quantitative characteristics of Mashhad's septage were first examined. Qualitative investigations into the subject of septage revealed that studies on the quality and composition of septage have been conducted in other parts of the country too. Additionally, the standards and regulations for the disposal and treatment of septage, as well as the treatment processes themselves, were reviewed. Moreover, given the similarities between the processing of septage and the sludge from wastewater treatment plants, this process was thoroughly examined. The results of the investigation indicated that, for the liquid portion, independent treatment before discharge into surface waters is the preferred process, while composting is the most suitable approach for managing the sludge portion.

Keywords: Septage, Septic Tank, Sludge, Absorption Well, Composting.

چکیده

سپتاز فاضلابی است که پس از ماندگاری در چاه‌های جذبی و در سپتیک تانک‌ها تخلیظ شده و کیفیت آن بدلیل ماندگاری و ذخیره شدن تا حدودی نسبت به فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متفاوت می‌باشد. نحوه دفع این نوع فاضلاب از گذشته بصورت تخلیه مستقیم در نواحی غیرمسکونی و یا حتی در مزارع صیفی‌جات بوده است. سپتاز را نمی‌توان معادل فاضلاب خام قلمداد نمود، زیرا درجه تخلیظ و تثبیت آن برحسب منشأ، زمان و شرایط ماندگاری متفاوت است. لذا باید در مورد نحوه مدیریت تخلیه آن در طبیعت بررسی‌های لازم صورت گیرد. در این تحقیق جهت بررسی روش‌های مدیریت سپتاز شهر مشهد، ابتدا خصوصیات کیفی و کمی سپتاز مشهد مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌ها از نگاه کیفی به موضوع سپتاز نشان داد مطالعاتی در خصوص کیفیت سپتاز و مواد موجود در آن در سایر نقاط کشور نیز صورت گرفته است. همچنین استانداردها و ضوابط مربوط به دفع و تصفیه سپتاز و نیز فرآیند تصفیه مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی با توجه به شباهت فرآوری سپتاز و لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، این فرآیند به طور مفصل بررسی شد. ماحصل بررسی‌ها نشان داد در بخش مایع، تصفیه مستقل جهت تخلیه به آب‌های سطحی فرآیند منتخب است و در بخش لجن نیز کمپوست کردن مناسب‌ترین رویکرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سپتاز، سپتیک تانک، لجن، چاه جاذب، کمپوست کردن.

جمشید بوده که با استفاده از کانال‌هایی به یک نيزار طبیعی در پایین‌دست تخلیه می‌شد. در طی ۳۰ تا ۴۰ سال اخیر نیز در برخی از شهرها مانند اصفهان، اهواز و برخی نواحی تهران، اقدام به ایجاد شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب گردید. به‌ویژه با تأسیس شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور در بسیاری از شهرها که در این مورد با مشکلات حادی روبه‌رو بودند، شبکه‌های جمع‌آوری و تأسیسات تصفیه‌خانه فاضلاب به وجود آمد (منزوی، ۱۳۹۰). آمار شرکت آب و فاضلاب کشور نشان می‌دهد که در سال ۱۳۷۶ شهرهای بروجن، شهرکرد، فولادشهر، اصفهان، شاهین‌شهر، بخش‌هایی از تهران، و هویزه از جمله شهرهایی هستند که به‌جز شبکه جمع‌آوری فاضلاب دارای تصفیه‌خانه فعال نیز بوده‌اند (منزوی، ۱۳۹۰). در حال حاضر حدود ۳۰۰ شهر در کشور شبکه جمع‌آوری فاضلاب دارند که جمعیتی حدود ۳۵ میلیون نفر را پوشش می‌دهد (درگاه اینترنتی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۴۰۲).

در حال حاضر بخش خصوصی حمل و دفع سپتاز در اکثر شهرهای ایران را انجام می‌دهد و تانکرهای تحت پوشش این بخش عمدتاً اقدام به حمل سپتاز خانگی می‌نمایند. محل دفع سپتاز به‌طور عمده بیابان‌ها و یا رودخانه‌های اطراف شهرها است. بخش کمی از آن برای استفاده در اراضی کشاورزی به کشاورزان فروخته می‌شود و مابقی در بیابان‌ها، رودخانه‌ها، تصفیه‌خانه‌ها و یا نقاط دیگر شهر تخلیه می‌گردد. در برخی موارد ملاحظه شده که فاضلاب‌های صنعتی نیز معمولاً به‌طور غیرقانونی توسط تانکرها حمل شده و در بیابان‌ها و رودخانه‌های اطراف تخلیه می‌شود. در جدول (۱) چگونگی دفع سپتاز در برخی از شهرهای ایران ارائه شده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در بیشتر شهرهای ایران که فاقد سیستم شبکه جمع‌آوری فاضلاب بوده و یا آن که شبکه به‌طور کامل اجرا نشده است، مشکل حمل و دفع سپتاز وجود دارد. همچنین باوجود آنکه بخش خصوصی اقدام به حمل و دفع سپتاز می‌نمایند، ولی سازمان‌دهی و مدیریت صحیحی توسط بخش دولتی مرتبط نداشته که این امر باعث بروز مشکلات متعددی در اکثر شهرها شده است (شرکت مهندسی مشاور پارس آب تدبیر، ۱۳۹۷).

اجرای شبکه فاضلاب کلانشهر مشهد از سال ۱۳۷۳ آغاز شده و تاکنون با انجام سه هزار و هفتصد کیلومتر حدود ۸۵ درصد پیشرفت فیزیکی داشته است. هم‌اینک پنج تصفیه‌خانه با ظرفیت اسمی ۲۶۳ هزارمترمکعب در شبانه روز در مدار بهره‌برداری است (ایرنا، ۱۴۰۲). مشاهدات میدانی نویسندگان در سال ۱۴۰۲ این موضوع را تأیید می‌کند که هنوز اقدام قابل توجهی در خصوص رفع مسئله دفع سپتاز در کلان مشهد صورت نگرفته است.

در سال‌های اخیر پژوهشگرانی به تحقیق و بررسی نحوه ساماندهی سپتاز در شهرهای مشهد، شرق مازندران، گرگان و بابلسر پرداختند (میثمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مفتاح هلقی و

فاضلاب به مجموعه آب‌های دورریختنی که ممکن است پس از تصفیه قابلیت استفاده مجدد را داشته باشد گفته می‌شود. جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب عبارت است از تصفیه فیزیکی، زیستی و پیشرفته (نهایی) با مقاصد بهداشت همگانی، پاکیزگی و حفظ محیط‌زیست، بازیابی فاضلاب و تأثیر بر سفره‌های آب زیرزمینی (منزوی، ۱۳۶۱).

فاضلاب با منشأ خانگی، صنعتی و سطحی در طبیعت مشاهده می‌شود. سپتاز نوعی از فاضلاب است که به لجن (مایع و جامد) حاصل از سپتیک تانک^۱ها و چاه‌های فاضلاب اطلاق می‌شود. به‌عبارت دیگر سپتاز را نمی‌توان معادل فاضلاب خام قلمداد نمود، که برحسب منشأ، زمان و شرایط ماندگاری آن متفاوت است (EPA، ۱۹۹۴).

به دلیل تنوع بالای منابع تولید (خانگی، صنعتی و ...)، نحوه تولید (چاه جذبی، سپتیک تانک و ...) و محل تولید (کشورهای مختلف، محیط شهر یا روستا و ...)، پارامترهای کیفی سپتاز محدوده گسترده‌ای را دربردارند؛ بطوری که در رابطه با سپتاز خانگی اعداد کیفیت می‌تواند بسیار متفاوت باشد (میثمی و همکاران، ۱۳۹۸).

قدیمی‌ترین سیستم کانالی را می‌توان در آثار تمدن هندیان مشاهده نمود. در این آثار که تاریخ آن‌ها به حدود ۷۰۰۰ سال پیش نسبت داده می‌شود، باقیمانده فاضلاب‌روهایی برای هدایت فاضلاب‌های خانگی دیده می‌شود. در خرابه‌های شهر بابل و نینوا و نیز در جزیره کرت آثاری از مجراهای فاضلاب همگانی دیده شده‌اند. در شهرهای یونان و روم قدیم آثار فاضلاب‌روهایی به قطرهای ۲ تا ۳ متر مشاهده می‌شوند که ساختمان آن‌ها را به ۲۰۰۰ سال پیش از میلاد نسبت می‌دهند. در اورشلیم آثار کانال‌های هدایت فاضلاب به بیرون شهر و جمع‌آوری آن در دریاچه‌های فاضلاب و حتی استفاده از فاضلاب به‌عنوان کود در کشاورزی دیده شده است که تاریخ ایجاد آن‌ها به حدود ۳۰۰۰ سال پیش می‌رسد. در شهر بمبئی باقیمانده فاضلاب‌روهایی مشاهده می‌شود که ساختمان آن‌ها را به حدود ۱۹۰۰ سال پیش مربوط می‌دانند (منزوی، ۱۳۶۱).

کانال‌های اصلی شبکه جمع‌آوری فاضلاب (اگو) شهر پاریس به درازای ۳۶ کیلومتر در سال ۱۷۸۹ میلادی ساخته شدند. شهر لندن پس از کشتاری که بیماری وبا در آن انجام داده و طی آن ۲۵۰۰۰ نفر تلف شدند، در سال‌های ۱۸۳۲ تا ۱۸۴۸ دارای شبکه زیرزمینی جمع‌آوری فاضلاب شد. هامبورگ در سال ۱۸۴۲، برلین در سال ۱۸۵۲ و فرانکفورت در سال ۱۸۶۶ مجهز به شبکه‌ی کانال‌کشی شدند (منزوی، ۱۳۶۱؛ شرکت مهندسی متکاف و ادی، ۱۳۹۲). اولین سابقه از جمع‌آوری و دفع فاضلاب در ایران مربوط به تخت

همکاران، ۱۳۹۵؛ یوسفی و سیدی‌راد، ۱۳۹۲؛ یوسفی، ۱۴۰۱).
 نتایج این تحقیقات منجر به تهیه طرح تصفیه-خانه شده است.
 میثمی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی نحوه استخراج خصوصیات
 کمی و تخمین حجم کل فاضلاب تانکری شهر مشهد، سپس با
 معرفی نحوه دستیابی به خصوصیات کیفی و آزمایشات انجام
 شده روی سپتاژ مشهد، طرح پیشنهادی تصفیه-خانه سپتاژ
 مشهد را ارائه کردند.
 در مطالعه حاضر جهت بررسی روش‌های مدیریت سپتاژ شهر

مشهد، در ابتدا مبانی کیفی و کمی مورد مطالعه قرار گرفته
 است. در خصوص مبانی کمی، برآورد مقدار سپتاژ با استفاده از
 اطلاعات سازمان‌های مرتبط و بررسی‌های میدانی انجام گرفته
 به عنوان مبانی طرح قرار گرفت. در خصوص مبانی کیفی نیز به
 مطالعات کتابخانه‌ای، نمونه‌های مشابه در داخل کشور و انجام
 آزمایشات لازم استناد شد. پس از آن استاندارد و ضابطه مربوط
 به دفع و تصفیه سپتاژ و نیز فرآیند تصفیه بررسی شده و بهترین
 راهکار پیشنهاد شده است.

جدول ۱- چگونگی دفع سپتاژ در برخی شهرهای ایران (شرکت مهندسی مشاور پارس آب تدبیر، ۱۳۹۷)

نام شهر	شبکه جمع‌آوری فاضلاب	تصفیه‌خانه فاضلاب	نوع سپتاژ	محل تخلیه سپتاژ	سازمان‌های متولی تانکرهای حمل سپتاژ	ساماندهی وضعیت تانکرها
تهران	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	سپتاژ خانگی به کشاورزان فروخته و سپتاژ صنعتی در بیابان دفع می‌شود	بخش خصوصی	انجام نشده است
شاهرود	دارد	ندارد	خانگی و صنعتی	تخلیه در بیابان	بخش خصوصی	انجام نشده است
گرگان	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	تصفیه‌خانه فاضلاب (در مرحله مطالعات)	بخش خصوصی	در دست انجام
رشت	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	تخلیه در بیابان	بخش خصوصی	انجام نشده است
بابل	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	تخلیه در بیابان و رودخانه	بخش خصوصی	انجام نشده است
بیرجند	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	تخلیه در آب‌بندهای خارج شهر	بخش خصوصی	انجام نشده است
ساوه	دارد	دارد	خانگی و صنعتی	سپتاژ خانگی به کشاورزان فروخته و سپتاژ صنعتی در بیابان دفع می‌شود	بخش خصوصی	انجام نشده است

مواد و روش

در مورد فرآیند دفع سپتاژ شهر مشهد ابتدا باید مطالعه‌ای در
 خصوص مبانی کمی آن انجام گیرد تا بتوان برآورد نسبتاً قابل
 قبولی از میزان سپتاژ تولیدی داشته و آن را مبانی محاسبات
 بعدی قرار داد. همچنین با توجه به اینکه حجم سپتاژ تخلیه
 شده توسط تانکرهای حمل سپتاژ در ساعات مختلف شبانه روز
 یکسان نیست، می‌بایست دبی پیک آن را مشخص کرد. یادآوری
 می‌گردد که با توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری و احداث
 تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، از حجم سپتاژ تولیدی کاسته می‌شود.
 فاضلاب‌های خانگی، صنعتی و سطحی در بعضی از پارامترهای
 کیفی تا حدود زیادی با هم متفاوتند. همچنین فاضلاب تصفیه
 شده برای اهداف متفاوتی ممکن است استفاده شود که هرکدام
 از این گزینه‌ها مشخصات و استانداردهای خاص خود را می‌طلبد؛
 بنابراین باید کاربرد نهایی استفاده از پساب، استانداردهای مورد
 نیاز و نیز مبانی کیفی سپتاژ اولیه مشخص بوده تا بتوان با انتخاب

فرآیند مناسب تصفیه، مشخصات کیفی سپتاژ را حتی‌الامکان به
 استاندارد مورد نظر نزدیک کرد.

• مبانی کمی

با دو رویکرد اصلی اقدام به برآورد مقدار سپتاژ شده است که
 شامل ۱- اخذ اطلاعات از سازمان‌های مرتبط؛ در این راستا از ستاد
 خاک و نخاله شهرداری، اتحادیه صنف اتوبار و خدمات شهری،
 سازمان حفاظت محیط‌زیست خراسان، مرکز بهداشت استان
 خراسان و فرمانداری مشهد استعلام شده است. ۲- با توجه به
 نقصان اطلاعات دریافتی از سازمان‌ها، اقدام به مطالعات میدانی
 شده و به منظور حصول نتایج قابل اتکا و دقیق، برنامه شمارش
 حامل‌های سپتاژ در محل تصفیه‌خانه اولنگ آغاز و نهایتاً با پایش
 انجام گرفته برآورد مقادیر با بهره‌جویی از اطلاعات به‌دست‌آمده
 محقق گردیده است. همچنین تعیین ضریب حداکثر جریان در
 خصوص سپتاژ با شمارش تعداد تانکر در واحد زمان انجام شد.
 نتایج حاصل مطابق جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲- جمع‌بندی نهایی تعداد تانکر و حجم سپتاژ روزانه
شهر مشهد در سال ۱۳۹۹

ظرفیت تانکر	تعداد تانکر	متوسط درصد تانکرها	متوسط تعداد تخلیه روزانه	حجم سپتاژ (مترمکعب)
۴۵۰۰	۶۵	۵۹	۳/۵	۱۰۲۲
۸۰۰۰	۱۶	۱۵	۳	۳۸۴
۹۰۰۰	۱۱	۱۰	۲/۵	۲۴۷
۱۰۰۰۰	۷	۷	۴/۵	۳۱۵
۱۲۰۰۰	۴	۴	۳/۵۲	۱۵۶
۱۵۰۰۰	۶	۵	۵/۵	۴۹۵
مجموع	۱۰۹	۱۰۰	-	۲۶۲۰

• مبانی کیفی

برخی از فاکتورهایی که می‌تواند تا حدودی نشان‌دهنده خواص فاضلاب خانگی باشد شامل رنگ و بوی فاضلاب، درجه اسیدی، دمای فاضلاب، مواد خارجی موجود در آن و نیز وزن مخصوص فاضلاب است.

خواص فاضلاب‌های صنعتی و پساب کارخانه‌ها بستگی به نوع فرآورده کارخانه دارد که مهم‌ترین تفاوت آن با فاضلاب خانگی عبارت‌اند از: امکان وجود مواد و ترکیب‌های شیمیایی سمی بیشتر، خاصیت خورندگی و درجه اسیدی بیشتر و امکان وجود مواد زنده کمتر.

فاضلاب‌های سطحی نیز ناشی از بارندگی و ذوب یخ‌ها و برف‌های نقاط بلند بوده که به علت جریان در سطح زمین و تماس با آلودگی‌های روی زمین و سطح خیابان‌ها و پشت‌بام‌ها، مقداری مواد آلی و معدنی، پس‌مانده ذرات گیاهی و حیوانی، مواد نفتی و دوده وارد آن‌ها شده که دارای درجه آلودگی و مواد آلی زیاد و حتی بیش از فاضلاب‌های خانگی است.

برای نشان دادن درجه آلودگی فاضلاب معمولاً بجای اندازه مقدار مواد آلی، مقدار اکسیژن لازم برای اکسیداسیون مواد نامبرده را اندازه‌گیری می‌کنند. مهم‌ترین روش‌های تعیین درجه آلودگی فاضلاب عبارت‌اند از: تعیین مقدار BOD، تعیین مقدار COD، تعیین TOC، تعیین مقدار مواد معلق (SS) و تعیین اکسیژن محلول (DO) (منزوی، ۱۳۹۰).

به‌طورکلی در بحث مبانی کیفی، رویکردهای قابل‌طرح عبارت‌اند از: استناد به مطالعات کتابخانه‌ای، نمونه‌های مشابه در داخل کشور و نتایج آزمایشات انجام شده (Eddy و Metcalf، ۲۰۰۳: USEPA، ۱۹۸۴). دقیق‌ترین راه در راستای برآورد شرایط کیفی، انجام آزمایش‌های دوره‌ای است. جدیدترین آزمایشات توسط آزمایشگاه مشرق زمین مشهد انجام شده که نتایج آن در بخش‌های انتهایی ارائه خواهد شد (جدول ۱۰).

• ضوابط و استانداردهای موجود برای سپتاژ

دفع سپتاژ در کشورهای پیشرفته عمدتاً تابع ضوابط و استانداردهایی سخت است؛ اما در بسیاری از کشورهای درحال توسعه و ازجمله ایران هنوز استاندارد مناسبی جهت تصفیه و دفع سپتاژ تهیه نشده است. در ادامه خلاصه‌ای از مهم‌ترین استانداردهای موجود ارائه شده است. به‌طورکلی سپتاژ معمولاً شرایطی بینابین فاضلاب و لجن دارد و می‌توان برای طرح تصفیه آن از استانداردهای پساب و لجن استفاده نمود که در ادامه برخی از آنها بررسی می‌شود.

- آیین‌نامه دفع سپتاژ در منچستر آمریکا:

در آیین‌نامه این موارد در نظر گرفته شده است:

- کلیه سپتاژهای تولیدی باید در تصفیه‌خانه فاضلاب تصفیه شود.
- قبل از انتقال سپتاژ به تصفیه‌خانه فاضلاب، هماهنگی با رئیس تصفیه‌خانه لازم و ضروری است.
- فقط سپتاژ حاصل از منابع خانگی شهرهای بزرگ آمریکا مجاز به حمل و دفع است.

- جهت حمل‌ونقل هر تانکر سپتاژ به محل دفع باید ۱۰ دلار دستمزد پرداخت شود (Klingel و همکاران، ۲۰۰۲؛ Eliot و همکاران ۲۰۰۳).

- آیین‌نامه اوهایو آمریکا جهت دفع سپتاژ در زمین:

۱- انتخاب محل دفع سپتاژ به‌گونه‌ای باشد که از عدم تماس افراد با سپتاژ اطمینان حاصل شود.

۲- میزان عوامل بیماری‌زا موجود در سپتاژ تا حد استاندارد کاهش یابد.

۳- روش‌های مدیریتی جهت دفع سپتاژ اعمال گردد.

۴- مکان مورد استفاده و میزان مواد مغذی موردنیاز محصولاتی که قرار است از سپتاژ به‌عنوان کود استفاده نمایند، مشخص شود (EPA، ۲۰۱۲).

• روش‌های متداول تصفیه سپتاژ در دنیا

به‌طورکلی به دلیل ماهیت متغیر سپتاژ، روش‌های مختلفی برای تصفیه آن در دنیا موردبحث و بررسی قرار گرفته است و در هر منطقه به فراخور کمیت و کیفیت سپتاژ تولیدی و چگونگی امکانات دفع و استفاده مجدد از آن روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. به‌طور مثال در کشورهای صنعتی فرآیندهای تصفیه فاضلاب و لجن به‌طور گسترده‌ای جهت تصفیه سپتاژ به کار می‌رود. متداول‌ترین فناوری‌های تصفیه در این کشورها عبارت‌اند از: هوادهی گسترده، هضم بی‌هوازی، تغلیظ‌کننده‌های مکانیکی، سانتریفوژ، فیلتر پرس، فیلتر مکشی، خشک‌کردن در درجه حرارت زیاد، پاستوریزاسیون و غیره؛ اما تمامی فناوری‌های فوق برای کشورهای درحال توسعه قابل کاربرد نیست. چون اغلب آن‌ها خیلی گران هستند و هزینه‌های راهبری و نگهداری بالایی دارند. درجه بالای مکانیزاسیون این روش‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری

بالا و هزینه‌های بالای نگهداری و بهره‌برداری داشته، به‌علاوه نیاز به کادر ماهر جهت راهبری باعث می‌شود که در کشورهای درحال توسعه استفاده از این سامانه‌ها با محدودیت زیادی مواجه باشد. در کشورهای درحال توسعه چنین امکاناتی فقط در شهرهای بزرگ ممکن است قابل حصول باشد. به همین جهت در کشورهای درحال توسعه از روش‌های ساده و طبیعی جهت تصفیه سپتاژ و دفع آن استفاده می‌شود. در این کشورها انتخاب روش‌های تصفیه سپتاژ با توجه به موارد هزینه کم، سادگی راهبری و سادگی فرآیند صورت می‌گیرد.

• بررسی فرآیندهای تصفیه سپتاژ

تفاوت اصلی سپتاژ و فاضلاب در غلظت آلاینده‌ها و نوع آن‌ها

است. غلظت آلاینده‌های موجود در سپتاژ نزدیک به شرایط لجن تصفیه‌خانه فاضلاب است. به همین دلیل فرآیندهای تصفیه سپتاژ شباهت زیادی به فرآیندهای تصفیه لجن دارند. این فرآیندها عمدتاً شامل استفاده از ظرفیت‌های موجود (تصفیه‌خانه‌های فاضلاب)، استفاده از ظرفیت طبیعی محیط (نی‌زارها و نظایر آن)، کاهش حجم، تثبیت و امثال آن است. فرآیندهای تصفیه سپتاژ عمدتاً در شرایط شهری محدود بوده و فرآیندهای قابل قبول در این زمینه مشابه فرآیندهای تصفیه لجن هستند. اهم این موارد شامل تثبیت‌های هوازی، بی‌هوازی، کمپوست‌سازی، سوزاندن، تثبیت قلیایی و دفن است. در جدول (۳) نمونه‌هایی از روش‌های تصفیه سپتاژ در کشورهای در حال توسعه آورده شده است (شرکت مهندسين مشاور پارس آب تدبير، ۱۳۹۷).

جدول ۳- نمونه‌هایی از روش‌های تصفیه سپتاژ در کشورهای درحال توسعه (شرکت مهندسی مشاور پارس آب تدبیر، ۱۳۹۷)

نام شهر یا کشور	ملاحظات
آسیا	
اندونزی	در حدود ۱۰ واحد تصفیه سپتاژ در این کشور موجود است (طرح‌های برکه و در بعضی موارد تانک‌های ایمهاف نیز به‌عنوان واحدهای تصفیه سپتاژ استفاده شده است).
تایلند	۲ واحد تصفیه فاضلاب در جاکارتا شامل هوادهی گسترده متعاقب برکه‌های اختیاری و زلال‌سازی است. طرح‌های کم‌هزینه (هاضم‌ها + بسترهای لجن خشک‌کن + برکه‌ها) در شهرهای بزرگ، واحدهایی با فناوری پیشرفته (تصفیه فیزیکی - شیمیایی متعاقب لجن فعال)
ویتنام	بسترهای لجن خشک‌کن + فروش بیوسالید نیزارهای مصنوعی طراحی شده
لائوس	واحدهای تصفیه کم‌هزینه
جمهوری چین	هاضم بی‌هوازی و دیگر واحدهای جانبی
آفریقا	
گینه	۲ طرح در آکرا + یک طرح در کوماسی + یک واحد کوچک‌تر تصفیه سپتاژ (همگی برکه)
بنین	یک طرح برکه
مالی	۲ واحد تصفیه سپتاژ (برکه و نی‌زاز مصنوعی)
بورکینافاسو	تصفیه مشترک در برکه
تانزانیا	تصفیه مشترک همراه با فاضلاب در برکه
آفریقای جنوبی	تصفیه مشترک همراه با فاضلاب در واحدهای لجن فعال

• روش‌های دفع سپتاژ

با توجه به تنوع آب‌وهوا و خصوصیات منطقه، روش‌های متفاوتی برای دفع سپتاژ در زمین وجود دارد ولی به‌هرحال روش انتخابی باید به‌گونه‌ای باشد که قابلیت انعطاف بالایی داشته باشد. در طراحی محل دفع سپتاژ نیز نیاز به ملاحظات در سطح تخصصی و کارشناسی است. لازم به ذکر است که تجهیزات و امکانات مورد نیاز دفع سپتاژ در زمین، مشابه آن‌هایی است که در دفع فضولات حیوانی (کود کشاورزی) بکار برده می‌شوند (منزوی، ۱۳۹۰).

• فرآیندهای پیشنهادی تصفیه سپتاژ شهر مشهد

در طرح پیشنهادی تصفیه سپتاژ شهر مشهد پروژه به دو قسمت پیش‌تصفیه و تصفیه تکمیلی تقسیم می‌شود. بخش پیش‌تصفیه در سایت تصفیه‌خانه فاضلاب اولنگ و شامل ایستگاه دریافت سپتاژ، تله ماسه‌گیر، آشغال‌گیر، دانه‌گیر و لاگون بی‌هوازی است. بخش پیش‌تصفیه راندمان تقریبی ۵۰ درصد در حذف پارامترهای BOD و COD داشته و راندمان حذف TSS آن حدود ۷۰ درصد است. عملکرد بخش پیش‌تصفیه عمدتاً به دلیل وجود لاگون بی‌هوازی است که به‌صورت هم‌زمان عملکرد

ته‌نشینی و تصفیه را تحقق می‌بخشد.

در خصوص بخش تصفیه تکمیلی با توجه به شرایط کیفی ذکر شده (در قسمت نتایج کیفی) و غلظت بالای آلاینده‌ها، می‌بایست فرآیندهای مناسبی جهت کاهش غلظت پارامترها در نظر گرفته شود.

• فرآیندهای تصفیه بخش مایع

برای تصفیه بخش مایع، فرآیندهای زیر با توجه به استانداردهای ذکر شده انتخاب شده است.

- ۱- صاف‌سازی پساب جهت انتقال به ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب.
 - ۲- فرآیند تصفیه مستقل با رویکرد حصول استاندارد مناسب جهت استفاده از پساب در کشاورزی.
 - ۳- فرآیند تصفیه مستقل با رویکرد حصول استاندارد مناسب جهت تخلیه پساب به آب‌های سطحی.
- دو فرآیند اول در مشهد قابل استفاده نیستند و برای سپتاز شهر مشهد فرآیند سوم بدلیل شرایط خاص طرح پیشنهاد می‌شود.

- فرآیند تصفیه مستقل با رویکرد حصول استاندارد مناسب جهت تخلیه پساب به آب‌های سطحی:

تصفیه در این بخش به ترتیب شامل ۴ واحد بیولوژیک، فیلتراسیون، تزریق ازن و کربن فعال است. مشخصات پیشنهادی برای هر یک از این واحدها در ادامه ارائه می‌شود.

۱- **واحد بیولوژیک:** به منظور حصول کیفیت پساب جهت تخلیه به منابع آب سطحی می‌بایست علاوه بر کاهش پارامترهای BOD و COD تا حد قابل توجه، نوترینت‌ها (نیتروژن و فسفر) نیز تا حد استاندارد کاهش یابند. مرحله اول تصفیه در این بخش مشابه انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی خواهد بود. مشخصات واحد بیولوژیک در جدول (۴) ارائه شده است.

۲- **واحد فیلتراسیون:** پس از خروج پساب از تانک ته‌نشینی ثانویه واحدهای تصفیه پیشرفته جهت حصول استاندارد آب سطحی در نظر گرفته شده است. از آنجا که کدورت و مواد معلق موجود در پساب عمل تصفیه را با مشکل روبرو می‌سازد لذا می‌بایست تا حد امکان مواد معلق را کاهش داد. برای این منظور از فیلتراسیون تحت فشار استفاده می‌شود. پساب به وسیله پمپاژ وارد فیلتر شنی می‌گردد؛ و پس از کاهش کدورت وارد ادامه‌ی مراحل تصفیه می‌شود. فیلترها پس از مدتی استفاده نیاز به شستشوی معکوس با جریان آب و هوا دارند. شستشوی معکوس معمولاً تابع زمان یا کیفیت پساب خروجی است. زهاب حاصل از شستشوی معکوس فیلترها همراه با سوپرناتانت سایر واحدها به صورت مجتمع به ابتدای تصفیه‌خانه برمی‌گردد. مشخصات واحد فیلتراسیون در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات واحد بیولوژیک

پارامتر	واحد	مقدار
بخش هوادهی		
تعداد تانک	-	۲
ابعاد تانک هوادهی	متر × متر × متر	۱۰ × ۱۰ × ۵
MLSS	میلی گرم بر لیتر	۳۵۰۰
نرخ لجن برگشتی	درصد	۸۰
میزان هوای موردنیاز	مترمکعب بر دقیقه	۱۰۰
میزان لجن مازاد	کیلوگرم بر روز	۳۱۰
F/M	-	۰/۱۳
زمان ماند سلولی (SRT)	روز	۱۲
بخش آنوکسیک		
تعداد تانک	-	۲
ابعاد تانک آنوکسیک	متر × متر × متر	۴۰ × ۱۰ × ۵
مقدار متانول تزریقی	کیلوگرم بر روز	۳۴۰۰
انرژی اختلاط	وات به ازای هر مترمکعب	۱۰
کل انرژی اختلاط موردنیاز	کیلووات	۴۰
SDNR	گرم نیترات بر گرم VSS بر روز	۰/۱۳
هوادهی دوم		
تعداد تانک	-	۲
ابعاد	متر × متر × متر	۱۰ × ۵ × ۲
میزان هوای موردنیاز	مترمکعب بر دقیقه	۲۰
تعداد تانک ته‌نشینی ثانویه	-	۲
قطر هر تانک ته‌نشینی	متر	۱۰
عمق آب در تانک ته‌نشینی	متر	۴
کل هوای موردنیاز	مترمکعب بر دقیقه	۱۲۰

جدول ۵- مشخصات واحد فیلتراسیون

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد فیلتر	-	۱ دستگاه اصلی ۲ دستگاه جانبی
بار سطحی فیلتر	مترمکعب بر مترمربع روز	۱۲۰
قطر هر فیلتر	متر	۳
نوع فیلتر	-	تند ماسه‌ای تحت فشار

۳- واحد تزریق ازن: به منظور حصول کیفیت پساب قابل تخلیه

به منابع آب سطحی لازم است COD خروجی تصفیه‌خانه حداکثر در حدود ۶۰ میلی‌گرم در لیتر باشد. بخش قابل‌تجزیه بیولوژیک در فرآیند تصفیه بیولوژیک مصرف شده است. لیکن بخش غیرقابل تجزیه بیولوژیک تنها در ته‌نشینی و فیلتراسیون کاهش یافته است. لذا پارامتر مواد غیرقابل تجزیه بیولوژیکی در سپتاژ دست‌نخورده باقی‌مانده است. به‌منظور حذف این بخش از آلاینده لازم است از اکسیداسیون پیشرفته استفاده شود. یکی از روش‌های اکسیداسیون پیشرفته استفاده از فرآیند ازن زنی است. همچنین گفتنی است که پساب پس از اکسیداسیون ازن و طی زمان تماس مناسب نیاز به گندزدایی نخواهد داشت. مشخصات واحد ازن زنی در جدول (۶) ارائه گردیده است.

جدول ۶- مشخصات واحد تزریق ازن

پارامتر	واحد	مقدار
حجم تانک تماس ازن	مترمکعب	۲۵۰
زمان تماس ازن زنی	ساعت	۲
مقدار ازن تزریقی	کیلوگرم بر ساعت	۲۰

۴- **واحد کربن فعال:** پساب خروجی از واحد اکسیداسیون پیشرفته که امکان ممکن است دارای مواد آلی، ترکیبات سخت تجزیه‌پذیر، فلزات سنگین و نظایر آن باشد. برای کنترل این پارامترها از فیلتر کربن فعال استفاده می‌شود. سازوکار این فیلترها به‌صورت تحت‌فشار بوده و جریان از یک توده کربن فعال گرانولی عبور داده می‌شود. در این فیلتر بخش باقی‌مانده مواد آلی حذف می‌شود. ظرفیت گرانول‌های موجود در فیلتر پس از مدتی استفاده پر خواهد شد. پس‌ازآن لازم است کربن فعال موجود در فیلتر تخلیه و احیا شود. در هر نوبت از احیا بخشی از کربن فعال از دست خواهد رفت که لازم است با کربن فعال جدید جایگزین شود. مشخصات واحد کربن فعال در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷- مشخصات واحد کربن فعال

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد فیلتر	-	۲+۲
جرم کربن فعال موجود در هر فیلتر	کیلوگرم	۱۶۰۰
قطر هر فیلتر	متر	۲

• فرآیندهای تصفیه لجن

لجن اولیه برای گزینه‌های مختلف بخش مایع (فرآیندهای تصفیه بخش مایع) مشترک است و همچنین مقدار لجن ثانویه در سه گزینه بخش مایع بسیار نزدیک به هم بوده است

(۲۹۰ و ۳۰۰ و ۳۱۰ کیلوگرم در روز). به همین منظور مقایسه گزینه‌های گوناگون در بخش لجن مستقل از نوع فرآیند انجام می‌شود.

سپتاژ دارای مواد مغذی ارزشمندی است که می‌توانند در مصارف کشاورزی استفاده شوند. لیکن همین مواد مغذی قابلیت آلوده کردن محیط و بروز مشکلات زیست‌محیطی و مخاطرات بهداشتی را دارند. لذا باید فرآیندهایی مبنای عملکرد قرار گیرند که قادر به کاهش آلاینده‌ها و از بین بردن زمینه آلودگی محیط‌زیست باشند. گزینه‌های زیر به‌منظور مدیریت لجن برای شهر مشهد و با توجه به امکانات موجود پیشنهاد می‌شود.

۱- استفاده از تأسیسات موجود تصفیه‌خانه التیمور

۲- استفاده از روش Zero Waste (فاقد پسماند)

۳- احداث هاضم هوازی و تأسیسات مرتبط

۴- احداث هاضم بی‌هوازی و تأسیسات مرتبط

۵- کمپوست‌سازی

۶- سوزاندن لجن

با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق از میان گزینه‌های پیشنهادی کمپوست‌سازی پیشنهاد می‌شود. لذا در ادامه شرح این گزینه ارائه می‌شود.

- کمپوست‌سازی:

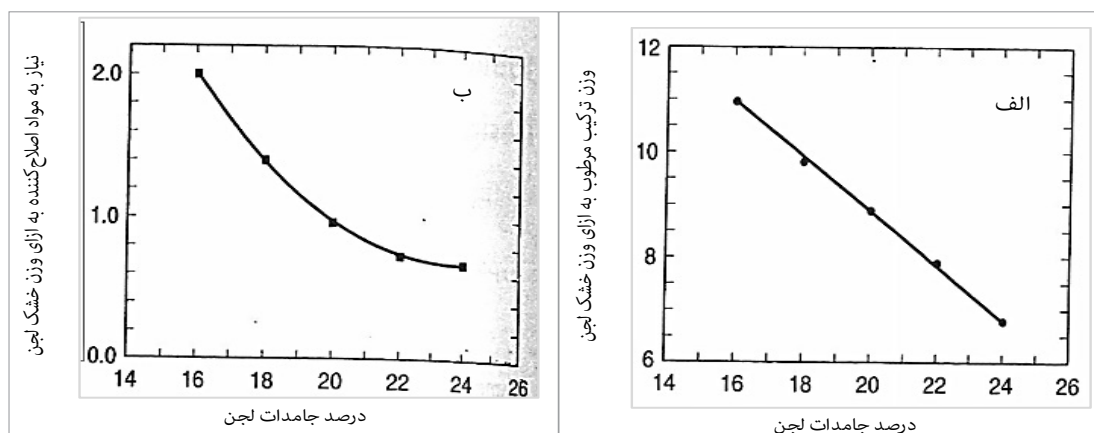
کمپوست‌سازی یکی از روش‌های مدیریت مواد زائد جامد و بخصوص لجن است. کمپوست‌سازی قادر است در شرایط گوناگون لجن کلاس A^۲ یا B^۲ را تأمین نماید. تفاوت این دو مورد در میزان حرارت و زمان کمپوست‌شدن است. در این روش میکروبیولوژی بسیار پیچیده‌ای وجود دارد که باعث می‌شود توده لجن وارد فاز حرارت دوست شود و در اثر فعل و انفعالات بیولوژیکی حرارت قابل‌توجهی تولید شود. این حرارت باعث تخریب پاتوژن‌ها و تخم انگل‌ها می‌شود. در فرآیند کمپوست‌سازی لازم است از بی‌هوازی شدن توده جلوگیری شود. درواقع باید بخشی از توده بی‌هوازی شده و بخش دیگر هوازی باشد. برای این منظور می‌توان از روش‌های گوناگون استفاده نمود. تفاوت عمده‌ی روش‌ها در روش هوارسانی است. در روش استاتیکی توده ساکن بوده و هوا توسط کمپرسور به درون توده دمیده می‌شود. روش دوم شایر نام دارد. در روش کمپوست‌سازی ویندرو مواد جامد (لجن) آبیگری می‌شوند و توسط عوامل جانبی حجیم می‌شوند. توده‌ی حجیم شده به مدت ۲۱ تا ۲۸ روز انباشته شده و در این مدت ۵ بار زیرورو می‌شود. با توجه به غلظت ۳ درصدی لجن نیازی به عملیات تغلیظ نیست (شرکت مهندسی متکاف و ادی، ۱۳۹۲). مشخصات سیستم آبیگری لجن به شرح جدول (۸) است.

جدول ۸- مشخصات واحد آبیگری لجن (انجام شده در تحقیق حاضر)

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد دستگاه	-	۲+۱
عرض بلت	متر	۱,۵
درصد جامدات کیک	%	۲۲
تعداد روزهای کاری در هفته	روز	۷
ساعت کاری در روز	ساعت	۸
اشل مصرف پلیمر	گرم به ازای کیلوگرم ماده خشک	۲ - ۵
مصرف پلیمر سالیانه	کیلوگرم در سال	۵۹۰۰
درصد به دام افتادن جامدات	%	۹۵
جرم کیک تولیدی روزانه	کیلوگرم در روز	۳۸۵۰
حجم کیک تولیدی روزانه	مترمکعب در روز	۱۷/۵

برای انجام عمل کمپوست سازی باید لجن آبیگری شده با مواد حجیم کننده ترکیب شود. این عمل هم به منظور تأمین یک منبع کربنی و هم افزایش حجم و در نتیجه راندمان بهتر هوادهی است. در عمل حجیم سازی باید رطوبت نهایی حداکثر ۶۰ درصد باشد و میزان مواد حجیم کننده نیز تابع درصد خشکی لجن آبیگری شده است. مقدار رطوبت توده و مواد حجیم کننده طبق نمودارهای (۱) برآورد می شود.

به منظور حجیم کردن توده کمپوست می توان از خاکاره، ورقه های کوچک چوب (چیپس)، برگ ها و مواد زائد فضای سبز، تایرهای خرد شده و ضایعات چوبی استفاده کرد. این مواد را پس از طی دوره زمانی مورد نظر می توان به وسیله ی غربالگری از لجن آبیگری شده جدا نمود و مجدداً مورد استفاده قرار داد. مشخصات کمپوست پروژه حاضر در جدول (۹) ارائه شده است.



شکل ۱- تأثیر درصد جامدات لجن بر ترکیب کمپوست و مقدار مواد اصلاح کننده (مربوط به رطوبت و عامل حجیم کننده در کمپوست) (الف) مقدار ترکیب در مقابل درصد جامدات لجن (ب) نیاز به مواد اصلاح کننده در مقابل درصد جامدات لجن (Eddy و Metcalf، ۲۰۰۳؛ USEPA، ۱۹۸۴)

توده کمپوست بایستی در طول مدت ذخیره سازی حداقل ۵ بار هوادهی گردد. این عمل با به هم زدن توده انجام می شود. می توان برای به هم زدن توده از دستگاه های کمپوست ترنر استفاده نمود. این دستگاه ها به یک تراکتور متصل شده و عمل اختلاط توده لجن را انجام می دهند.

نتایج و بحث

• تحلیل نتایج کمی

جمع بندی کلی صورت گرفته در خصوص برآورد روزانه مقدار سپتاز شهر مشهد در تصفیه خانه فاضلاب اولنگ در سال ۱۳۹۹ در جدول (۲) آورده شده است. طبق اعلام تصفیه خانه فاضلاب اولنگ تعداد تانکرهای ورودی در بعضی ماه ها حداکثر ۱۷۰ تانکر در روز است؛ اما در آمارگیری انجام شده در ایام تابستان سال ۱۳۹۹ تا ۳۰۰ تانکر نیز گزارش شده است (ایرنا، ۱۴۰۲).

جدول ۹- مشخصات کمپوست در پروژه حاضر

پارامتر	واحد	مقدار
نوع کمپوست	-	ویندرو در سالن مسقف
تعداد بلوک های کمپوست	-	۳۰
زمان نگهداری لجن	روز	۳۰
ابعاد هر بلوک	متر × متر × متر	۵×۳×۱/۵
جرم لجن آبیگری شده	کیلوگرم بر روز	۳۸۵۰
نسبت جرم ماده حجیم کننده	کیلوگرم بر کیلوگرم	۰/۹
جرم ماده حجیم کننده روزانه	تن در روز	۳/۵
حجم کلی توده روزانه	مترمکعب	۲۲/۵
نرخ بازآوری ماده حجیم کننده	درصد	۹۵

با توجه به تحقیقات میدانی، برآوردها و ارزیابی‌های صورت گرفته، مقدار متوسط ۳۰۰۰ مترمکعب در روز مبنای عملکرد در طرح جاری قرار خواهد گرفت. همچنین بررسی آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده نشان می‌دهد که بارگیری و تخلیه سپتاژ در طول شبانه‌روز یکنواخت نمی‌باشد؛ بیشینه تخلیه تانکرها بین ساعات ۱۰ تا ۱۳ و ۱۶ تا ۱۹ بوده و دبی حداکثر ساعتی آن در حدود ۱۷۳ مترمکعب در ساعت است.

• تحلیل نتایج کیفی

میزان مواد معلق موجود در سپتاژ حدود ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است که حدود ۷۱ برابر غلظت فاضلاب خانگی (۲۱۰ میلی‌گرم در لیتر) است. غلظت سایر ناخالصی‌های موجود در سپتاژ نیز چندین برابر غلظت آن‌ها در فاضلاب است. به‌طوری‌که محتوای مواد آلی سپتاژ با غلظت‌هایی حدود ۷۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر برحسب BOD و ۱۵۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر برحسب COD، به ترتیب ۳۷ برابر و ۳۵ برابر غلظت آن در فاضلاب است. غلظت عناصر غذایی گیاهی (نیترژن و فسفر) نیز در سپتاژ نسبت به فاضلاب خام بسیار بالا بوده و حدود ۱۷ برابر برای نیترژن و ۴۶ برابر برای فسفر مشاهده می‌گردد. بر اساس بررسی پارامترهای کیفی مذکور و مقادیر آن‌ها، نتایجی استنتاج می‌گردد که اهم آن‌ها عبارت‌اند از (شرکت مهندسين مشاور پارس آب تدبیر ۱۳۹۷):

۱- سپتاژ تولیدی در نقاط مختلف دنیا دارای کیفیتی مشابه نیست بلکه غالب پارامترهای کیفی دامنه وسیعی از تغییرات را نشان می‌دهند.

۲- سپتاژ فاضلابی است که تا حدی تغلیظ شده است. به‌عبارت‌دیگر سپتاژ را نمی‌توان معادل فاضلاب خام قلمداد نمود بلکه با توجه به غلظت و درصد مواد معلق آن، سپتاژ لجن غلیظ شده‌ای است که درجه تغلیظ آن برحسب منشأ، زمان ماندگاری آن، شرایط ماندگاری و فرآیندهای انجام شده بر روی آن متفاوت است. میانگین درصد مواد معلق سپتاژ در کشورهای پیشرفته ۱/۳ تا ۴/۵ درصد و در کشورهای درحال‌توسعه حدود ۱/۵ درصد است. بدیهی است که چنانچه در معیار سنجش، حداقل و حداکثرها منظور گردند دامنه تغییرات به‌مراتب وسیع‌تر می‌شوند.

۳- سپتاژ لجنی است که علاوه بر تغلیظ تا حدی تثبیت نیز شده است. میزان تثبیت مواد آلی سپتاژ برحسب شرایط ماندگاری در سپتیک تانک‌ها و چاه‌های جاذب و زمان‌ماندگاری آن متفاوت است. میزان تثبیت مواد آلی موجود در لجن و سپتاژ را می‌توان با بررسی داده‌های مربوط به کل مواد جامد (TS)، کل مواد آلی فرار (TVS) و یا داده‌هایی نظیر COD، BOD5 و محاسبه نسبت‌های TVS/TS و BOD/COD برآورد نمود. نسبت‌های

مذکور به‌طور تقریب میزان مواد آلی قابل‌تجزیه بیولوژیکی را به‌کل مواد آلی نمایش می‌دهند. هر چه این نسبت‌ها کوچک‌تر باشند به این مفهوم است که میزان مواد آلی قابل‌تجزیه باقی‌مانده کمتر بوده و بخش اعظم مواد آلی تجزیه و تثبیت شده‌اند و درنتیجه پتانسیل آلودگی سپتاژ کمتر است. در لجنی که به روش بی‌هوایی و با راندمان بالا تثبیت شده باشد نسبت TVS/TS معمولاً حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است. ارقام مربوط به نسبت TVS/TS سپتاژ کشورهای مختلف درصد مواد آلی فرار را در سپتاژ کشورهای پیشرفته بین ۵۵ تا ۸۰ درصد و در کشورهای در حال توسعه بین ۴۷ تا ۷۶ درصد نشان می‌دهد و دلالت بر این دارد که سپتاژ در طی دوره ماندگاری در سپتیک تانک‌ها و چاه‌های جاذب (در صورت شرایط مساعد و زمان‌ماندگاری کافی) می‌تواند تا حد بسیار بالایی تثبیت شده باشد (منزوی، ۱۳۹۰). آمار مربوط به نسبت COD/BOD نیز مؤید درجات مختلفی از تثبیت مواد آلی سپتاژ است.

۴- سپتاژ خانگی علیرغم محل تولید آن، حاوی مقادیر محدود از عناصر غذایی گیاهی (نیترژن و فسفر) است؛ بنابراین کاربرد آن در اراضی کشاورزی و یا مراتع در صورتی‌که با مدیریت صحیح توأم باشد می‌تواند تا حد زیادی نیازهای گیاهان زراعی را تأمین ساخته و از مصرف کودهای شیمیایی و اثرات زیست‌محیطی آن بکاهد.

۵- سپتاژ در صورتی‌که از فاضلاب‌های صنعتی ناشی شده باشد می‌تواند علاوه بر ترکیبات متداول حاوی مقادیر قابل‌توجهی از ترکیبات آلی و معدنی و فلزات سنگین باشد. چنین ترکیبات و عناصری می‌توانند بالأخص در طولانی‌مدت اثرات زیست‌محیطی نامطلوبی را به بار آورند.

۶- از آنجا که سپتاژ در طی مرحله نگهداری در سپتیک تانک‌ها و چاه‌های جاذب تغلیظ می‌شود و از طرف دیگر در طی این مدت قسمت عمده عناصر سنگین آن (در صورت موجود بودن) جذب ذرات مواد آلی و معدنی شده و سپس ترسیب می‌گردد؛ لذا غلظت عناصر سنگین در سپتاژ حاصل از فاضلاب‌های صنعتی می‌تواند به‌مراتب بیشتر از غلظت آن‌ها در فاضلاب‌های خام اولیه صنعتی باشد. به همین جهت کاربرد چنین سپتاژهایی در اراضی کشاورزی، مراتع و غیره بایستی با تدابیر مدیریتی خاصی انجام پذیرد. نتایج آخرین آزمایشات انجام شده نیز مطابق جدول (۱۰) می‌باشد؛ این نمونه‌ها در سال ۱۳۹۹ از سپتاژ مشهد برداشت شده و توسط آزمایشگاه مشرق زمین انجام شده است.

داده‌های جدول (۱۰) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی‌ها و تشکیل پارامترهای جانبی از این مقادیر منجر به جدول (۱۱) شد.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش‌های کیفی جدید

کد نمونه	ABC	DEF	123	456	789	101112	A123	A456	A789	A101112
BOD (mg/l)	۱۰۰۰	۳۵۰۰	۱۰۸۰	۱۲۴۸	۱۸۰۰	۳۸۱۵	۵۰۰	۱۳۰۰	۱۰۰۰	۱۸۰۰
COD (mg/l)	۳۲۰۰	۳۵۲۰۰	۲۲۰۰	۱۹۷۵	۲۸۰۰	۹۵۰۰	۱۷۲۰	۷۳۰۰	۳۵۲۰	۴۷۰۰
sBOD (mg/l)	۶۵۰	۹۵۰	۲۶۰	۲۰۰	۵۲۰	۷۰۰	۳۰۰	۲۴۰	۱۴۰	۶۲۰
sCOD (mg/l)	۱۰۲۸	۲۶۰۰	۶۱۳	۴۶۰	۸۰۰	۱۰۸۰	۵۷۰	۷۴۰	۳۰۰	۹۰۰
TSS (mg/l)	۲۷۰۰	۱۵۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۳۳	۱۱۹۶۶	۱۳۷۵	۵۱۵۰	۲۱۰۰	۳۰۰۰
VSS (mg/l)	۲۰۰۰	۱۱۲۰۰	۱۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۴۲۰۰	۸۰۰	۳۰۵۰	۱۲۷۵	۱۰۰۰
TP (mg/l as P)	۳۴/۶	۶۷/۸۸	۲۸/۱۲	۳۲/۴	۵۵	۱۱۳/۵	۷۷/۴	۷۳/۹۲	۸۲/۶	۳۸/۲
TN (mg/l as N)	۵۲۰/۶۷	۳۷۵	۲۷۸	۲۸۸/۶۸	۶۲۰/۶۷	۴۴۹/۶۷	۴۲۷/۷	۵۲۴/۷	۳۴۲/۲	۲۵۶/۹
TKN (mg/l as N)	۵۲۰	۳۷۴	۲۴۴	۲۸۸	۶۲۰	۴۴۹	۴۲۷	۵۲۴	۳۴۲	۲۵۶/۷
NH ₄ (mg/l as NH ₄)	۴۰۰	۲۶۰	۲۲۴	۲۰۶	۴۸۱	۳۲۰	۳۶۷	۳۸۵	۲۷۰	۲۳۰
NO ₃ (mg/l as NO ₃)	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۱
چربی و روغن (mg/l)	۱۲۸	۱۳۳۷۰	۱۰۰	۱۱۲	۲۰۰	۵۳۰	۹۰	۵۲۰	۲۰۰	۳۵۰
ته‌نشینی نیم‌ساعته (ml/l)	۸۰	۶۰	۵۰	۴۰	۷۵	۱۲۵	۴۰	۱۲۵	۸۰	۷۰

جدول ۱۱- مقادیر پارامترهای کیفی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های جدید

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	ملاحظات
BOD	mg/l	۵۰۰	۳۸۱۵	۱۷۰۴/۳	-
COD	mg/l	۱۷۲۰	۳۵۲۰۰	۷۲۱۱/۵	-
sBOD	mg/l	۱۴۰	۹۵۰	۴۵۸	بخش محلول BOD
sCOD	mg/l	۳۰۰	۲۶۰۰	۹۰۹/۱	بخش محلول COD
TSS	mg/l	۱۰۰۰	۱۵۸۰۰	۴۵۷۲/۴	-
VSS	mg/l	۱۰۰	۱۱۲۰۰	۲۴۸۲/۵	بخش آلی مواد معلق
TP	mg/l	۲۸/۱۲	۱۱۳/۵	۶۰/۳۶۲	-
TN	mg/l as N	۲۵۶/۹	۶۲۰/۶۷	۴۰۸/۴۱۸	-
TKN	mg/l as N	۲۵۶/۷	۶۲۰	۴۰۷/۷۷	-
NH ₄	mg/l as NH ₄	۲۰۶	۴۸۱	۳۱۴/۳	-
NO ₃	mg/l as NO ₃	۱	۳	۲/۶	-
BOD/COD	-	۰/۱	۰/۶۴	۰/۳۷	-
bCOD	mg/l	۸۰۰	۶۱۰۴	۲۷۱۶/۷	با فرض نسبت ۱/۶ محاسبه شده است
nbCOD	mg/l	۰	۲۹۶۰۰	۴۴۹۴	بخش غیرقابل تجزیه بیولوژیک
bsCOD	mg/l	۲۲۴	۱۵۲۰	۷۲۹	-
nbsCOD	mg/l	۰	۱۰۸۰	۱۷۹/۹	بیانگر نیاز اکسیداسیون پیشرفته
nbpCOD	mg/l	۰	۲۸۵۲۰	۴۳۱۴/۹	بخش عمده مواد غیرقابل تجزیه به‌صورت معلق هستند
sBOD/BOD	-	۰/۱۴	۰/۶۵	۰/۳۱	نسبت حالیت در پارامتر BOD
sCOD/COD	-	۰/۰۷	۰/۳۳	۰/۲	نسبت حالیت در پارامتر COD
NH ₄	mg/l as N	۱۶۰/۲۲	۳۷۴/۱۱	۲۴۴/۴۶	آمونیاک برحسب نیتروژن
نیتروژن آلی	mg/l as N	۷۷/۸۱	۲۵۴/۸۹	۱۶۳/۳۱	بخش آلی نیتروژن
چربی و روغن	mg/l	۹۰	۱۳۳۷۰	۱۵۶۰	-
ته‌نشینی نیم‌ساعته	ml/l	۴۰	۱۲۵	۷۴/۵	بیانگر بخش سوسپانسیون مخلوط

با توجه به نتایج به دست آمده و تدقیق شده می توان دریافت بخش قابل توجهی از بار آلاینده ها به صورت معلق و کلوئیدی است. در بخش محلول مواد قابل تجزیه بیولوژیکی درصد بالاتری از کل آلاینده ها را به خود تخصیص داده است.

• بررسی استانداردها

با توجه به رویکرد شرکت آب و فاضلاب مشهد مقرر گردید از جنبه هزینه های ارتقاء کیفی سپتاز سه کیفیت کلی برای پساب ارزیابی اقتصادی شوند که عبارتند از: سطح کیفی برای استفاده از پساب در کشاورزی، کیفیت مناسب برای تخلیه به ورودی تصفیه خانه فاضلاب (در حد فاضلاب خام) و کیفیت مناسب برای تخلیه به آب های سطحی (تصفیه مستقل). در خصوص لجن تصفیه خانه نیز حصول کلاس B و یا کلاس A مدنظر است.

ماحصل تصفیه سپتاز همراه با فاضلاب شهری می تواند ضمن فراهم ساختن امکان استفاده بهینه از ظرفیت تصفیه خانه، از آلودگی های زیست محیطی جلوگیری کرده و منبع درآمدی نیز برای تصفیه خانه باشد. مهمترین مزیت استفاده از تصفیه خانه فاضلاب این است که امکان مدیریت سپتاز به صورت یکپارچه را فراهم می نماید. معایب این روش نیز عبارتند از:

- هزینه های سرمایه گذاری و راهبری تصفیه خانه فاضلاب، افزایش می یابد.

- ممکن است بعضی مشکلات احتمالی مثل بو، جلبک و جانوران موذی داشته باشد.

- با ورود سپتاز ممکن است تصفیه خانه فاضلاب با مشکلاتی روبرو شود.

- اگر افزودن سپتاز به درستی کنترل نشده باشد، دفع لجن و پساب ممکن است با محدودیت مواجه شود.

• نتیجه بررسی فرآیندهای پیشنهادی تصفیه سپتاز شهر مشهد

با توجه به آنچه در مواد و روش ذکر گردید و نیز با توجه به رویکرد شرکت آب و فاضلاب مشهد؛ در مورد بخش مایع باید سه گزینه استفاده از پساب در کشاورزی، تخلیه به ورودی تصفیه خانه فاضلاب (در حد فاضلاب خام) و تخلیه به آب های سطحی (تصفیه مستقل) ارزیابی شوند. با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق گزینه مناسب تخلیه به آب های سطحی است که در بخش های پیشین به طور مفصل بررسی شد. همچنین در بخش لجن گزینه های مورد بحث روش اول استفاده از تأسیسات موجود در تصفیه خانه التیمور که با توجه به لزوم پمپاژ لجن به کلی مردود بوده و توجیه فنی و اقتصادی ندارد؛ روش دوم یعنی zero waste (فاقد پسماند) نیز با بررسی انجام شده توسط محقق کفایت لازم را دارا

نمی باشد؛ بنابراین چهار روش باقیمانده یعنی احداث هاضم هوازی، احداث هاضم بی هوازی، کمپوست و سوزاندن لجن نیز مورد ارزیابی قرار گرفته که با توجه به بررسی های انجام شده در این تحقیق کمپوست سازی به عنوان بهترین گزینه پیشنهاد می شود.

جمع بندی

با در نظر گرفتن جمیع جهات خلاصه مبانی کمی و کیفی (که در بخش های پیشین به طور کامل بررسی شدند) پیشنهاد شده مناسب طرح احداث تصفیه خانه سپتاز شهر مشهد در جدول (۱۲) ارائه شده است.

جدول ۱۲- مبانی کمی و کیفی پیشنهاد شده برای طرح احداث تصفیه خانه سپتاز شهر مشهد

پارامتر	واحد	مقدار
دبی متوسط روزانه	مترمکعب در روز	۳۰۰۰
دبی حداکثر ساعتی	مترمکعب در ساعت	۱۷۳
BOD	میلی گرم بر لیتر	۱۷۰۰
TSS	میلی گرم بر لیتر	۴۶۰۰
COD	میلی گرم بر لیتر	۷۲۰۰
TKN	میلی گرم بر لیتر	۴۰۷
TP	میلی گرم بر لیتر	۶۰

با توجه به اخذ نظرات شرکت آب و فاضلاب مشهد به عنوان بهره بردار و نیز نتایج مقایسه فنی و اقتصادی، فرآیند منتخب در بخش مایع علی رغم هزینه ی بیشتر، تصفیه مستقل با رویکرد حصول استاندارد و تخلیه به آب های سطحی است. با در نظر گرفتن موارد فوق می توان نتیجه گرفت که تا اینجا اولویت انتخاب فرآیند بخش مایع بر اساس مقایسه فنی صورت گرفته و موارد فنی اهمیت بالاتری داشته است اما در بخش لجن بر اساس مقایسه اقتصادی و آنچه که در جدول (۱۳) مشاهده می شود، کمپوست کردن مناسب ترین رویکرد در مدیریت لجن تصفیه خانه سپتاز شهر مشهد است. به عبارت دیگر در بخش لجن، انتخاب فرآیند بر اساس مقایسه اقتصادی و هزینه های تمام شده است. ضمناً تأکید شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور به لزوم کمپوست سازی لجن کل تصفیه خانه های شهر مشهد می باشد. احداث کمپوست در طرح حاضر می تواند علاوه بر مدیریت لجن با کارایی و هزینه ی بهینه، به عنوان نمونه ای برای طرح کمپوست لجن تصفیه خانه های شهر مشهد به حساب آید.

جدول ۱۳- هزینه هر مترمکعب سپتاژ تصفیه شده در بخش لجن

ردیف	نام گزینه فرآیندی	هزینه هر مترمکعب سپتاژ تصفیه شده (ریال)
۱	هاضم هوازی	۱۶۲۳۷
۲	هاضم بی هوازی	۱۹۹۰۵
۳	کمپوست	۷۵۲۶
۴	سوزاندن لجن	۱۶۶۹۳

پی‌نوشت‌ها

- ۱- سپتیک تانک مخزنی است که در آن فاضلاب به کمک فرآیندهایی از قبیل ته نشینی، شناورسازی و بیولوژیکی تصفیه می‌شود.
- ۲- لجنی که کاربرد آن از نظر عوامل میکروبی هیچ محدودیتی نداشته باشد.
- ۳- لجنی که عاری از عوامل بیماری‌زا است و در صورت استفاده از نظر بهداشت عمومی و محیط‌زیست مشکلی به وجود نخواهد آمد.

منابع

- درگاه اینترنتی خبرگزاری جمهوری اسلامی (ایرنا). (۱۴۰۲). وضعیت شبکه جمع‌آوری فاضلاب مشهد. <https://www.irna.ir/news/85200607>. تاریخ به‌روزرسانی: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵.
- درگاه اینترنتی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. (۱۴۰۲). وضعیت شبکه جمع‌آوری فاضلاب کشور. <https://www.nww.ir/bahrefa>. تاریخ به‌روزرسانی: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰.
- شرکت مهندسی متکاف و ادی. (۱۳۶۱). مهندسی فاضلاب، جلد اول. مترجمان: ابریشم‌چی، احمد، افشار، عباس، و جمشید، بهشید. مرکز نشر دانشگاهی اصفهان. چاپ هشتم. اصفهان، ایران.
- شرکت مهندسی مشاور پارس آب تدبیر. (۱۳۹۷). مطالعات مرحله اول طرح تصفیه سپتاژ شهر مشهد. مشهد، ایران.
- منزوی، محمد تقی. (۱۳۹۲). فاضلاب شهری. جلد اول. گردآوری فاضلاب. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ پانزدهم. تهران، ایران.
- منزوی، محمد تقی. (۱۳۹۰). فاضلاب شهری. جلد دوم. تصفیه فاضلاب. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ سیزدهم. تهران، ایران.
- میثمی، فرهاد، تفضیلی، سید محمد، و اسماعیلیان، حسین. (۱۳۹۸). ساماندهی، انتقال و تصفیه سپتاژ شهری مشهد. دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدر رفت و بازیافت. تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/990447>.

مفتاح هلقی، مهدی، دهقانی، امیراحمد، و رودی، حامد. (۱۳۹۵). بررسی کمی و کیفی فاضلاب سپتاژ شهر گرگان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/search?keywords>

یوسفی، ذبیح‌الله، و سیدی‌راد، مهدی. (۱۳۹۲). بررسی کمی و کیفی فاضلاب سپتاژ شده مازندران و راهکار مدیریتی. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۲۳(۱۰۲)، ۶۱-۷۱. <http://jmums.mazums.ac.ir/article-1-2391-fa.html>

یوسفی، ذبیح‌الله. (۱۴۰۱). سپتاژها، چالش‌ها و راه حل‌ها و بررسی موردی سپتاژ بابل‌سر. چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران. دانشگاه قم، قم، ایران. <https://civilica.com/doc/1630870>

EPA Office of Research and Development Handbook of Septage. (1994). Guide to Septage Treatment and Disposal, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Office of Science, Planning, and Regulatory Evaluation.

EPA. (2012). Guidelines for Water Reuse. Water Environment Federation. EPA/600/R-12/618.

Eliot, Epslein. (2003). Land Application of Sewage Sludge Biosolids. Boca Raton. First Edition. U.S.A

Klingel, F., Montangero, A., & Strauss, M. (2002). Fecal Sludge Management in Developing Countries, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology Department for Water and Sanitation in Developing Countries. First edition. Swiss.

Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Forth Edition. McGraw-Hill, New York.

Municipal Environmental Research Laboratory Cincinnati. (1984). Septage Treatment and Disposal. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). U.S.



Article Type:

نوع مقاله:

Investigating the Threatening Pollution of the Drinking Water Distribution Network (Case Study: Astara City)

M. Golshan^{*}

Ph.D. Graduated, Watershed Management, Department of Natural Resources, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

Email: m.naghavi@urmia.ac.ir

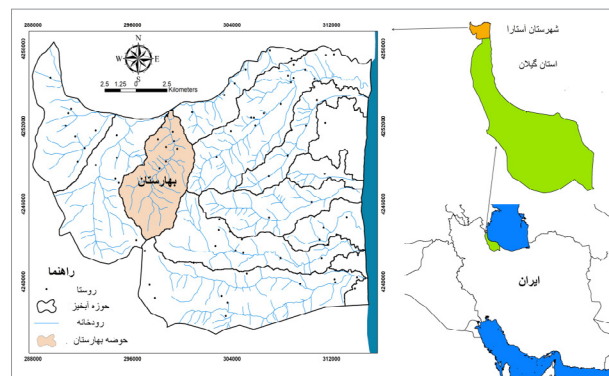
Received: 17-01-2024

Revised: 25-05-2024

Accepted: 29-06-2024

Available Online: 20-09-2024

روستاهای واقع در این زیرحوضه به صورت پراکنده می‌باشند که ساکنین آن‌ها برای امرار معاش به کشاورزی و دامداری وابسته هستند. از لحاظ مدیریت منابع آب شرب شهرستان آستارا، حوزه آبخیز بهارستان اهمیت بسیار بالایی دارد و تأمین‌کننده آب شرب ساکنین این شهرستان می‌باشد. موقعیت این حوزه آبخیز در شکل (۱) ارائه شده است. باتوجه به سکونت جوامع انسانی در این حوزه آبخیز و قابلیت جذب گردشگری، این حوزه آبخیز پتانسیل آلودگی آب را دارد.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲- تعیین نقاط نمونه‌گیری

جهت تعیین مناطق نمونه‌برداری، اقدام به بازدید از حوزه آبخیز بهارستان شد تا منشأ آلودگی مشخص و مناسب‌ترین منطقه جهت نمونه‌برداری تعیین شود. در بازدید صورت گرفته منابع آلودگی از جمله محل دفع فضولات دامی، زباله و محل سرویس‌های بهداشتی مورد توجه قرار گرفتند. در شکل (۲) نمونه منشأ آلودگی آب منطقه ارائه شده است. با توجه به واقع شدن منشأ آلودگی‌ها در مجاورت شبکه آبراهه‌ای، آلودگی‌ها به رودخانه اصلی انتقال می‌یابد.



شکل ۲- بازدید از منشأ آلودگی شبکه رودخانه‌ای بهارستان

سه سایت نمونه‌برداری از بالادست حوزه آبخیز به طرف پایین‌دست انتخاب شدند. در سایت‌های نمونه‌برداری براساس مطالعات انجام شده (سعیدپور و سادات مدنی بروجنی، ۱۳۹۵؛ کاویان و همکاران، ۱۳۹۵) هر آزمایش به صورت تصادفی سه بار تکرار شدند و میانگین آزمایشات به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شدند. در سایت‌های نمونه‌برداری، آزمایشات در سه فصل بهار، تابستان و پاییز تکرار شدند. بطری‌های نمونه‌برداری آب با محلول اسید نیتریک رقیق، شست‌شو داده شده و با آب مقطر آب‌کشی و خشک شدند تا آلودگی‌های بطری در نتایج فیزیک و شیمیایی نمونه‌های آب تأثیر نداشته باشند (سعیدپور و سادات مدنی بروجنی، ۱۳۹۵). روش نمونه‌برداری به صورت گرفتن نمونه آب به روش انتگراسیون عمقی انجام شد. در این روش ظرف نمونه‌برداری با سرعت ثابت در آب وارد و با همان سرعت خارج می‌شود (کاویان و همکاران، ۱۳۹۵). نمونه‌های برداشت شده بلافاصله به آزمایشگاه دانشگاه محقق اردبیلی انتقال یافتند. براساس مطالعات انجام شده (Egbueri and Unigwe, ۲۰۲۳؛ Rahman و همکاران، ۲۰۲۳؛ Lipps و همکاران، ۲۰۲۳؛ کمالی و همکاران، ۱۴۰۱) مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در کیفیت آب آشامیدنی شامل سدیم (Na)، منیزیم (mg^{+2})، کلسیم (Ca^{+2})، فسفات (ph^{+3})، نیترات (No3)، نیتريت (NO2)، بی‌کربنات (HCO3)، منگنز (Mn)، آهن (Fe)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)، کلی فرم گوآرشی (FC)، اکسیژن محلول (DO)، میزان اسیدیته (PH)، هدایت الکتریکی (EC) و سختی کل (TDS) انتخاب و بررسی شدند تا روند تغییرات کیفیت آب در مسیر رودخانه مشخص شود.

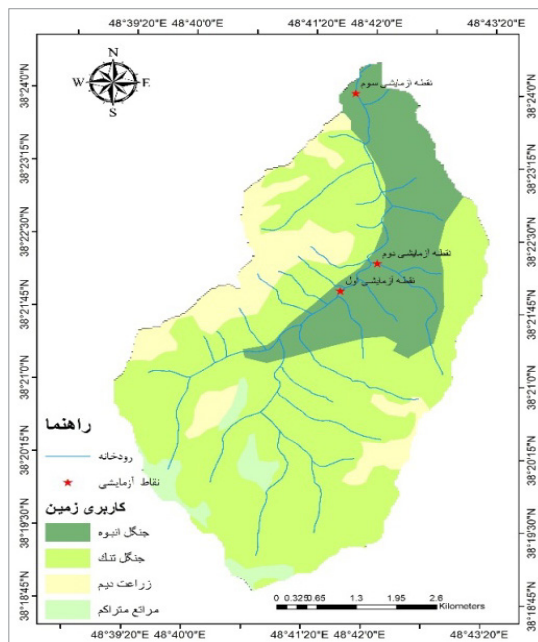
۳- محاسبه شاخص کیفیت آب (IRWQI)

پارامترهای مورد نیاز برای این شاخص، شامل نیترات، کلیفرم مدفوعی، هدایت الکتریکی، سختی کل، نسبت جذب سدیم، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی، فسفات، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، اسیدیته و اکسیژن محلول می‌باشند. اکسیژن محلول به درصد اشباع می‌باشد. برحسب وزن هر پارامتر و منحنی‌های رتبه‌بندی مقدار شاخص پارامتر محاسبه و با استفاده از رابطه (۱) مقدار IRWQI تعیین شد (Zamani-Ahmadmahooodi و همکاران، ۲۰۲۳).

$$IRWQI_{SC} = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{Wi} \right]^{1/\gamma} \quad (1)$$

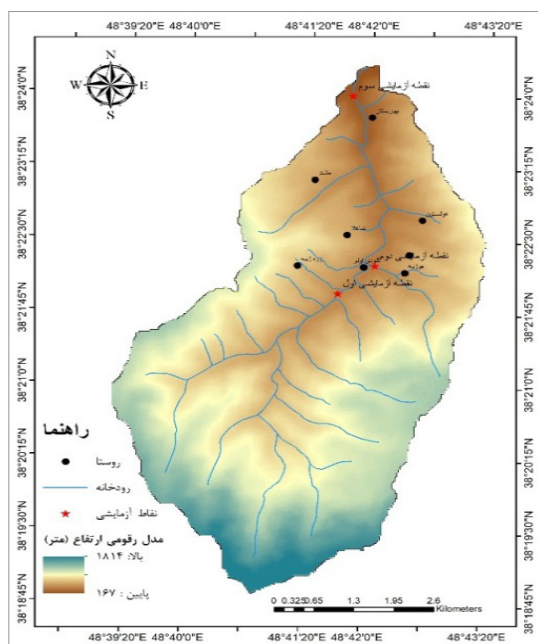
که در آن γ از طریق رابطه زیر مشخص شد و Wi وزن پارامتر i ام، n تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی می‌باشد.

$$\gamma = \sum_{i=1}^n Wi \quad (2)$$

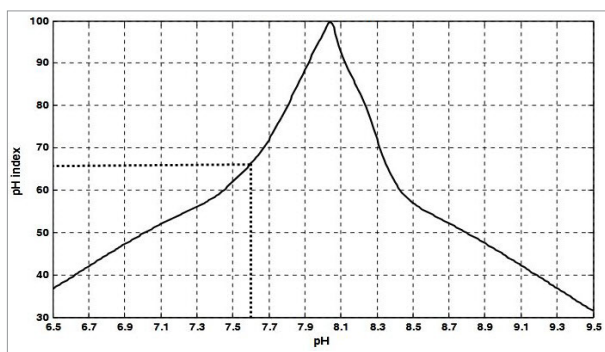


شکل ۳- نقشه نقاط نمونه برداری آزمایش آب

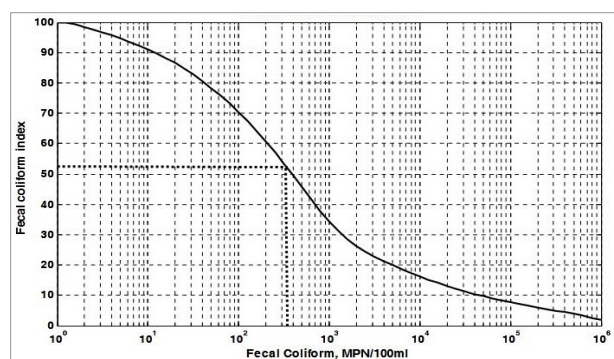
بررسی نقشه نوع خاک در مناطق مطالعاتی نشان داد که جنس خاک از نوع Antisoil می باشد و از لحاظ وضعیت کاربری اراضی منطقه، کاربری جنگل با ۸۱ درصد، کشاورزی دیم با ۱۲ درصد و مرتع متراکم با ۷ درصد به ترتیب کاربری های غالب در منطقه مطالعاتی می باشند (شکل ۴).



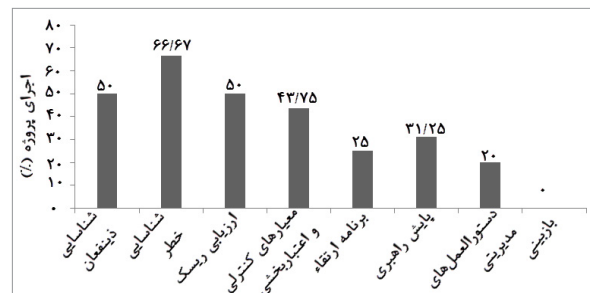
شکل ۴- نقشه کاربری زمین در منطقه مطالعاتی



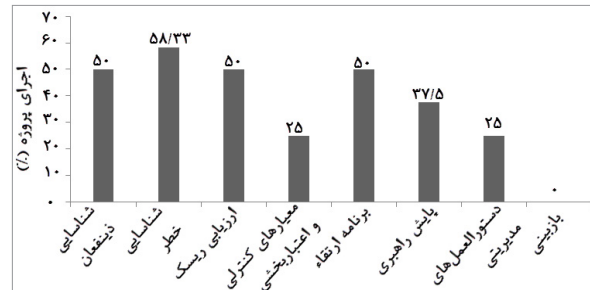
شکل ۶- مقدار شاخص پارامتر PH در منحنی رتبه‌بندی (IRWQI) برای منطقه بهارستان در فصل بهار



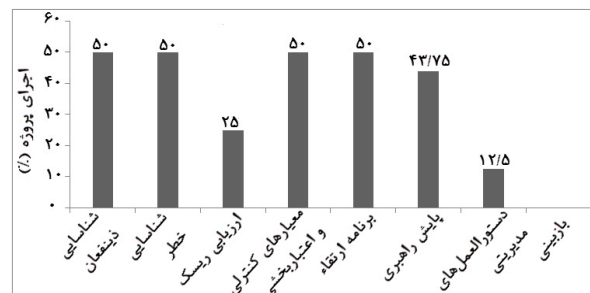
شکل ۵- مقدار شاخص پارامتر FC در منحنی رتبه‌بندی (IRWQI) برای منطقه بهارستان در فصل بهار



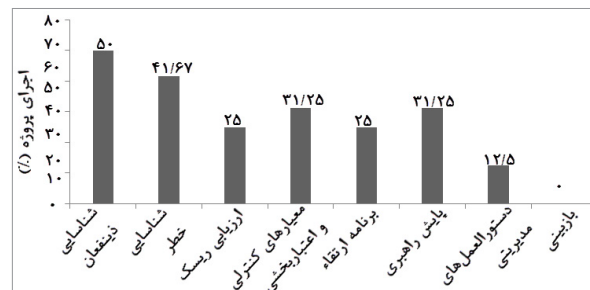
شکل ۷- نتایج اطلاعات WSP برای منابع آب آشامیدنی



شکل ۸- نتایج اطلاعات WSP برای تصفیه‌خانه آب آشامیدنی



شکل ۹- نتایج اطلاعات WSP برای شبکه توزیع آب آشامیدنی



شکل ۱۰- نتایج اطلاعات WSP برای نقطه مصرف آب آشامیدنی

بحث و نتیجه‌گیری

تصفیه‌خانه آب شهرستان آستارا در حوزه آبخیز بهارستان واقع شده است، که باتوجه به برداشت آب از این حوزه آبخیز جهت تأمین مصارف خانگی از جمله شرب، اهمیت بررسی کیفیت آب این رودخانه بسیار بالا است. در این مطالعه با انجام مطالعات میدانی و بازدید از رودخانه اصلی و انشعابات وارده به رودخانه،

.....

.....



Article Type:

نوع مقاله:

Investigating the Performance of Microbial Fuel Cells in Wastewater Treatment Containing Azo Dyes Using Meta-Analysis

S. Parsayan^{1*}, S. Sadri Moghaddam^{2*}

1, 2- M.Sc. Student and Assistant Professor, Civil Engineering- Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: sadrimoghaddam@kntu.ac.ir)

Received: 05-03-2024

Revised: 25-04-2024

Accepted: 08-05-2024

Available Online: 21-09-2024

به ازای غلظت ورودی است که در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$\text{Dye decolorization efficiency} = (\Delta \text{dye}) / \text{dye}_{\text{inf}} \times 100 \quad (2)$$

Δdye اختلاف بین غلظت رنگ آزو ورودی و خروجی بر حسب (mg/lit) و dye_{inf} غلظت رنگ آزو ورودی بر حسب (mg/lit) است.

۳-۲- نرخ تصفیه حجمی

نرخ تصفیه حجمی (VTR^{V}) سرعتی است که در آن رنگ آزو از فاضلاب ورودی در ساعت حذف می شود و همچنین بر حسب (mg COD/lit/h) بیان می شود. در این پارامتر همانطور که از رابطه (۳) نیز قابل استنتاج است، نرخ جریان، حجم راکتور، غلظت رنگزا و استانداردهای تخلیه در نظر می شود.

$$\text{VTR} = (\Delta \text{dye}) / \text{HRT} \quad (3)$$

HRT زمان ماندن هیدرولیکی بر حسب ساعت است.

۴-۲- چگالی توان

چگالی توان (PD) پارامتری است که به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد و بر اساس مساحت پیش بینی شده آند یا کاتد (m^2/W) یا حجم مایع آند (m^3/m^2) محاسبه می شود. در این مطالعه از حجم مایع آند استفاده شد و PD به صورت زیر محاسبه شد.

$$\text{PD} = P / V \quad (4)$$

P توان بر حسب میلی وات و V حجم فاضلاب بر حسب متر مکعب است. چگالی توان عواملی مانند زمان ماند هیدرولیکی یا COD حذف شده را در نظر نمی گیرد. درحقیقت، این پارامتر به طور کلی تولید انرژی سیستم را منعکس نمی کند و مقایسه را دشوار می سازد (Ge و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، باید از پارامترهای نرمال شده بر اساس حجم محفظه و مقدار رنگ زدایی استفاده کرد.

۵-۲- بازیابی انرژی نرمال شده

بازیابی انرژی نرمال شده (NER^{V}) به عنوان روشی قابل مقایسه برای ارزیابی بازیابی انرژی الکتریکی از MFC های مختلف ارائه می کند. NER را می توان به دو صورت NERV و NERCOD بیان کرد. پارامتر NERV بر حسب (W h/lit) (رابطه ۵)، یک واحد پرکاربرد در تصفیه فاضلاب برای بحث در مورد مسائل انرژی است (Plappally, ۲۰۱۲). زمان ماند هیدرولیکی MFC و حجم فاضلاب تصفیه شده و توان تولیدی در این پارامتر در نظر گرفته می شود. پارامتر NERCOD بر حسب (W h/gCOD) (رابطه ۶) است که حذف بخش آلی را در نظر می گیرد که به دلیل تنوع بالای مواد آلی در فاضلاب های مختلف یک پارامتر ضروری است (Ge و همکاران، ۲۰۱۴). در این مطالعه با توجه به تمرکز مقالات بر رنگ زدایی رنگ آزو و عدم گزارش میزان حذف COD در اکثر مقالات، به جای NERCOD ، NER_{dye} که بر اساس میزان حذف رنگ آزو می باشد، استفاده شد.

$$\text{NER}_v = (P \times \text{HRT}) / V \quad (5)$$

$$\text{NER}_{\text{dye}} = (P \times \text{HRT}) / (\Delta \text{dye}) \quad (6)$$

P توان بر حسب ولت و V حجم فاضلاب تصفیه شده (در زمان HRT) بر حسب لیتر است.

۶-۲- دسته‌بندی داده‌ها

در شکل (۱)، فرآیند انجام تحقیق شامل نحوه یافتن مقالات، معیارهای انتخاب مقاله مناسب، داده‌های استخراج شده از مقالات، پردازش‌های انجام شده بر روی داده‌های استخراج شده و اطلاعات محاسبه شده، ارائه شده‌است. همانطور که در نمودار نیز قابل مشاهده است، برای تسهیل در کاوش داده‌ها و تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری شده به‌صورت زیر دسته‌بندی شدند:

۱. **پیکربندی پیل سوختی میکروبی:** در این مقاله از تک محفظه یا دو محفظه استفاده شده‌است؛ زیرا این پیکربندی‌ها بیشترین کاربرد را دارند.

۲. **شکل الکتروآند:** انواع آند به دو دسته آند برسی و آند سطح



شکل ۱- فرآیند انجام تحقیق

نتایج

در جدول (۱) پارامترهای تأثیرگذار از ۱۴ مقاله گزارش شده و بر اساس سال انتشار مرتب شده‌اند. در این مطالعه با توجه

تخت تقسیم می‌شوند. تمام آندهای تخت بدون در نظر گرفتن جنس مورد استفاده (پارچه، ورق، فمد و الیاف)، در گروه آند تخت گروه‌بندی شدند.

۳. **نوع منبع COD:** با توجه به تفاوت سرعت تجزیه بیولوژیکی بین دو گروه گلوکز و استات، منبع COD به دو گروه استات و گلوکز تقسیم شد.

زمان ماند هیدرولیکی: در داده‌های استخراج شده، زمان نگهداری هیدرولیکی ۹ تحقیق برابر یا کمتر از ۲۴ ساعت و همچنین ۱۴ تحقیق بیش از ۲۴ ساعت است؛ بنابراین زمان نگهداری هیدرولیکی ۲۴ ساعت به‌عنوان مبنای تفکیک داده‌ها انتخاب شد.

به اینکه برخی از مقالات شرایط طراحی مختلف را بررسی کرده بودند، ۲۳ مجموعه اطلاعاتی استخراج شد. در این جدول پارامترهای پیکربندی دستگاه (مانند تعداد محفظه و حجم آن)، شرایط عملیاتی (مانند دما و pH)، مشخصات

و NER_{dye} برای ارزیابی همزمان مقدار توان تولیدی به ازای رنگ آزو حذف شده استفاده شد. نمودار این سه پارامتر معیار، ترسیم و نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این فرآیند به دستیابی به یک دید کلی از اثربخشی هر جزء کمک می‌کند و انتخاب هوشمندانه‌ای را برای محققان فراهم می‌کند.

جریان ورودی (مانند غلظت رنگ آزو ورودی) و در جدول (۲) معیارهای ارزیابی فرآیند (مانند نرخ تصفیه حجمی) ارائه شده است. ارزیابی عملکرد سیستم MFC در دو دسته کارایی فرآیند (بازده تصفیه) و مقدار الکتریسیته تولید شده (بازده انرژی) قرار گرفته است. در این مطالعه از VTR برای ارزیابی عملکرد تصفیه، NER_v برای ارزیابی مقدار توان تولید شده

جدول ۱- اطلاعات استخراج شده از مقالات

شرایط پیکربندی فرآیند							
ردیف	سال	پیکربندی	حجم کل (lit)	جنس الکترود آند	مساحت سطح الکترود آند (cm^2)	جنس الکترود کاتد	مساحت سطح الکترود کاتد (cm^2)
۱	۲۰۰۹	تک محفظه	۰/۹	Porous carbon papers	۷۲	Porous carbon papers	۷۲
۲	۲۰۱۲	تک محفظه	۰/۴	Non-wet proofed porous carbon papers	۱۸	Wet proofed porous carbon papers	۱۸
		دو محفظه	۰/۸	Plain porous carbon paper	۱۸	Plain porous carbon paper	۱۸
۳	۲۰۱۳	تک محفظه	۰/۲۵۶	Graphite felt	۲۵	Carbon paper	۲۵
۴	۲۰۱۶	دو محفظه	۰/۸	Porous carbon papers	۱۸	Porous carbon papers	۱۸
		دو محفظه	۰/۸	Porous carbon papers	۱۸	Porous carbon papers	-
۵	۲۰۱۶	تک محفظه	۰/۲۵۶	Graphite felt	۶۰	Carbon paper	-
		تک محفظه	۰/۲۵۶	1.25C RF	۶۰	Carbon paper	-
		تک محفظه	۰/۲۵۶	2.5C HA	۶۰	Carbon paper	-
۶	۲۰۱۹	تک محفظه	۰/۴	Graphite fibre brush	۵۰	Carbon cloth	۵۰
		تک محفظه	۰/۴	Graphite fibre brush	۵۰	Carbon cloth	۵۰
۷	۲۰۱۹	دو محفظه	۰/۸	Plain porous carbon papers	۱۸	Plain porous carbon papers	۱۸
۸	۲۰۱۹	تک محفظه	۰/۱۸	Graphite block	۶/۴	Carbon cloth	۱۸
۹	۲۰۲۱	دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
		دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
		دو محفظه	۱/۱	Carbon felts	۲۰۰	Carbon felts	۲۰۰
۱۰	۲۰۲۱	تک محفظه	۰/۱	Carbon fiber brush	۱۲	Carbon fabric	۱۵
۱۱	۲۰۲۱	دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	TH-MFC	۱۶
		دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	AQS-MFC	۱۶
		دو محفظه	۰/۵	Carbon brush	۸۸	-	۱۶
۱۲	۲۰۲۲	دو محفظه	۰/۷	Carbon felt	۳۶	-	-
۱۳	۲۰۲۲	دو محفظه	۰/۸	Graphite rods	۲۱۳	Graphite rods	۲۱۳
۱۴	۲۰۲۲	تک محفظه	۰/۳۸	Carbon felt	۲۷	-	-

ادامه جدول ۱- اطلاعات استخراج شده از مقالات

پارامترهای اندازه‌گیری شده			شرایط بهره‌برداری								
مقدار رنگ حذف شده (mg/lit)	راندمان رنگزدایی (%)	راندمان حذف COD (%)	OLR (mg/lit h)	زمان ماند هیدرولیکی (h)	غلظت اولیه رنگ (mg/lit)	منبع COD	COD (mg/lit)	رژیم تغذیه	pH	دما (C°)	ردیف
۲۷۶	۹۲	۸۸	۶/۵	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۱
۲۸۹	۹۶	-	۲/۸	۱۰۷	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۲
۴۸۲	۹۶	-	۱۷/۲۴	۲۹	۵۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	
۲۷۰	۹۰	-	۹/۴	۳۲	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۳
۲۷۳	۹۱	-	۶/۲۵	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۴
۲۵۰	۸۳	-	۶/۲۶	۴۸	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-		
۲۱۰	۷۰	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	۷	۳۰	۵
۲۲۵	۷۵	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	-	
۲۵۸	۸۶	-	۱۸/۷۵	۱۶	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	-	
۱۶۲	۸۱	۳۳	۵/۶	۳۶	۲۰۰	استات	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۶
۸۵	۸۵	-	۲/۸	۳۶	۱۰۰	استات	-	ناپیوسته	-	-	
۲۹۱	۹۷	-	۱۰	۳۰	۳۰۰	گلوکز	۵۰۰	ناپیوسته	-	۳۰	۷
۵۰۰	۱۰۰	-	۱۰/۴	۴۸	۵۰۰	گلوکز	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۸
۴۶	۹۳	۷۴	۲/۰۸	۲۴	۵۰	استات	۳۷۵	پیوسته	۷	۲۷	۹
۹۴	۹۴	۷۴	۴/۱۷	۲۴	۱۰۰	استات	۳۷۵	پیوسته	-	-	
۱۸۸	۹۴	۷۸	۸/۳	۲۴	۲۰۰	استات	۷۵۰	پیوسته	-	-	
۱۰۰	۱۰۰	-	۱۷/۴	۲۴	۱۰۰	استات	-	ناپیوسته	۷	۲۵	۱۰
۱۸۵	۹۲	۷۷	۲/۷	۷۴	۲۰۰	استات	-	-	۷	۳۰	۱۱
۱۶۱	۸۰	۷۱	۲/۶۳	۷۶	۲۰۰	استات	-	-	-	-	
۴۲	۲۱	۱۸	۸/۲	۷۲	۲۰۰	استات	-	-	-	-	
۱۵۰	۱۰۰	-	۳/۳	۴۵	۱۵۰	-	-	ناپیوسته	۷/۲	۳۷	۱۲
-	۲۵	-	-	۵۰۰	۵۰	۸	۶/۲۵	-	-		۱۳
۲۴	۲۸	-	پیوسته	-	۲۵	۲۴	۱/۰۴	۷۰	۹۶		۱۴

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده در این مطالعه

منابع	پارامترهای محاسبه شده				ردیف
	NER dye (W h lit/g)	NER v (W h/lit)	VTR (mg/lit h)	چگالی توان (mW/m ²)	
(Sun و همکاران، ۲۰۰۹)	۰/۲۹۳	۰/۰۸۹۷	۵/۷۵	۲۳۴	۱
(Hou و همکاران، ۲۰۱۲)	۰/۲۱۵۸	۰/۱۵۶	۲/۷	۳۲۴	۲
	۰/۰۱۳۲۱	۰/۰۰۸	۱۶/۶۲	۱۲۲	
(Sun و همکاران، ۲۰۱۳)	۰/۰۱۵۷۳	۰/۰۱۶۶	۸/۴۴	۵۳/۱	۳
(Sun و همکاران، ۲۰۱۶)	۰/۰۰۲۸۵	۰/۰۰۱	۵/۶۹	۹	۴
	۰/۰۱	۰/۰۰۳۱	۵/۲	۲۹	
	۰/۰۸۸	۰/۰۷۲۴	۱۳/۱۳	۱۹۳	۵
(Huang و همکاران، ۲۰۱۷)	۰/۱۱۵	۰/۱۰۱۳	۱۴/۰۶	۲۷۰	
	۰/۱۱۹	۰/۱۲	۱۶/۱۳	۳۲۰	
(Dai و همکاران، ۲۰۲۰)	۰/۰۲۶۲۴	۰/۰۱۰۶	۴/۵	۲۳/۵	۶
	۰/۰۵۷۵	۰/۰۱۲۲۱	۲/۳۶	۲۷	
(Hou و همکاران، ۲۰۱۹)	۰/۰۳۹۵	۰/۰۱۴۴	۹/۷	۲۱۳	۷
(Ilamathi و همکاران، ۲۰۱۹)	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۱۰/۴۲	۲/۷	۸
	۰/۱۲۸۶	۰/۰۰۵۴	۱/۹۳	۱۲/۴	۹
(Oon و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۰۵۱۴	۰/۰۰۴۴	۳/۹۲	۱۰/۰۶	
	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۳۵	۷/۸۴	۸/۱	
(de Almeida و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۰۴۴۹	۰/۰۴۵	۴/۱۷	۱۵۶	۱۰
	۰/۱۱۲۷	۰/۰۴۲	۲/۵	۳۲	۱۱
(Khan و همکاران، ۲۰۲۱)	۰/۱۰۹۳	۰/۰۳۵	۲/۱۲	۲۶/۳	
	۰/۳۲۲۵	۰/۰۲۷	۰/۵۸۳	۲۱/۴	
(Raqba و همکاران، ۲۰۲۲)	۰/۲۴۱۹	۰/۰۵۲	۳/۳۳	۲۲۴	۱۲
(Ravinuthala و همکاران، ۲۰۲۲)	-	۰/۰۰۱۸	-	۸/۱۷	۱۳
(Tan و همکاران، ۲۰۲۲)	۰/۵۰۸۵	۰/۰۳۲	۰/۹۹۷	۱۳۷	۱۴

۱- بررسی اجمالی

• پیکربندی (MFC)

ب‌طور کلی در شکل (۲) پیکربندی MFC مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نمودار (۲-الف)، در مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفته، دو گروه تک محفظه و دو محفظه، توزیع نزدیکی دارند. نمودار (۲-ب) و نمودار (۲-ج) به ترتیب محدوده مقادیر VTR و NER_{dye} را برای هر گروه نشان می‌دهد که مشخص است حالت تک محفظه در هر دو حالت، بازدهی بالاتری دارد. در پیل‌های سوختی میکروبی، وجود فضای کافی برای الکترولیت و فاضلاب برای عملکرد بهینه، بسیار مهم است. وقتی فضای بیشتری وجود داشته باشد، میکروارگانیسم‌ها بهتر عمل می‌کنند و انتقال الکترون‌ها و پروتون‌ها سریع‌تر انجام می‌شود. به عبارت دیگر، فراهم کردن فضای کافی برای الکترولیت و فاضلاب امکان دسترسی بهتر به مواد

مغذی و اکسیژن، رشد میکروبی سالم‌تر و افزایش نرخ انتقال الکترون را فراهم می‌کند (Izadi و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، عدم وجود غشای جداکننده در حالت تک محفظه‌ای، مقاومت داخلی فرآیند را کاهش می‌دهد و منجر به چگالی توان بالاتر و در نتیجه بازایی انرژی نرمال شده بالاتر می‌شود. بنابراین، طراحی و پیکربندی MFC ها نقش بسزایی در کارایی آنها دارد. MFC های تک محفظه در کاربردهای خاص مؤثر هستند و مزایایی مانند کاهش مقاومت داخلی را ارائه می‌دهند (Sato و همکاران، ۲۰۲۱). اگرچه MFC های تک محفظه چندین مزیت را ارائه می‌دهند، اما هنگام افزایش مقیاس و صنعتی شدن با چالش‌هایی مواجه می‌شوند. برخی از این چالش‌ها عبارتند از:

- عدم وجود سیستم هوادهی: MFC های تک محفظه نیازی به سیستم هوادهی ندارند که این مزیت در ابعاد کوچک آنهاست.

با این حال، این می‌تواند در هنگام افزایش مقیاس، یک چالش باشد؛ زیرا هوادهی برای حفظ کارایی بسیار مهم می‌شود (Tan و همکاران، ۲۰۲۰).

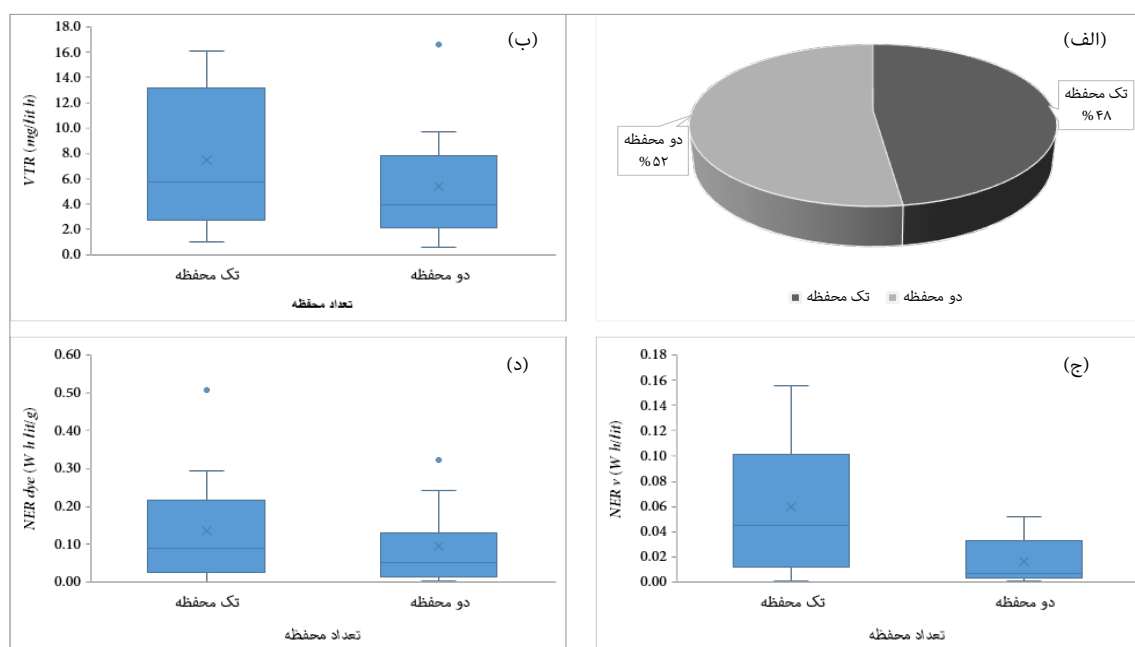
- میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی در محفظه آند: عدم وجود غشای جداکننده محفظه می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی در محفظه آند شود. این میکروارگانیزم‌ها ممکن است در یک محیط غنی از اکسیژن به مشکل برسند که منجر به کاهش عملکرد می‌شود (Saravanan و Karthikeyan، ۲۰۱۸).

در نتیجه، در حالی که MFC‌های تک محفظه از نظر طراحی و کاهش مقاومت داخلی مزایایی دارند، به دلیل فقدان سیستم هوادهی و مشکلات میکروارگانیزم‌های بی‌هوازی، هنگام افزایش مقیاس و صنعتی شدن با چالش‌هایی مواجه می‌شوند.

علاوه بر این، حالت دو محفظه مزایایی را نسبت به پیکربندی تک محفظه ارائه می‌دهد که شامل بهبود عملکرد MFC با افزودن واسطه‌ها به کاتد، امکان کنترل pH در کاتد، و تزریق اکسیژن خالص به محفظه کاتد است که در نهایت بر عملکرد MFC تأثیر می‌گذارد (Flimban و همکاران، ۲۰۱۹). بطور کلی، در حالی که MFC تک

محفظه مزایایی مانند کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و توان خروجی بالاتر را ارائه می‌دهد، حالت دو محفظه انعطاف‌پذیری و کنترل بیشتری را بر روی محیط MFC فراهم می‌کند و در نهایت به بهبود مقیاس‌پذیری کمک می‌کند.

پارامتر NER_{dye} که بیانگر توان تولیدی به ازای رنگ حذف شده می‌باشد، در نمودار (۲-د) نشان داده شده است. مشخص است که حالت تک محفظه برتری نسبی دارد. بنابراین توصیه می‌شود در صورت امکان از حالت تک محفظه استفاده شود. قابل ذکر است فرآیند ساخت حالت تک محفظه به علت کاتد آن که قابلیت نفوذ هوا را دارد، پیچیده است. همانطور که ذکر شد، یکی از چالش‌های اساسی در مسیر صنعتی شدن این فرآیند، کاهش بازدهی آن در صورت افزایش حجم محفظه است. یکی از راهکارها برای مقابله با این چالش، اتصال سری یا موازی پیل‌های سوختی میکروبی در حجم عملیاتی کم، به یکدیگر است. بنابراین با توجه به هدف ما از استفاده از پیل‌های سوختی میکروبی و روش مورد نظر برای مقیاس‌پذیری (اتصال پیل‌های سوختی کوچک به یکدیگر به صورت سری یا موازی یا افزایش حجم راکتورها)، می‌توان نوع پیکربندی را انتخاب کرد.



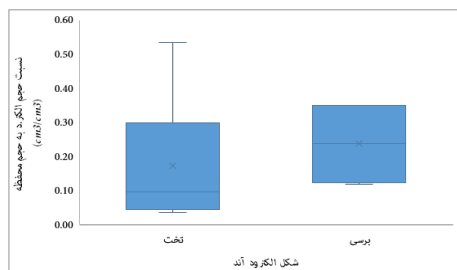
شکل ۲- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصد پیل سوختی تک محفظه (۱۱ مورد) و پیل سوختی دو محفظه (۱۲ مورد)، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه، (ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_v برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه، (د) نمودار جعبه محدوده مقدار NER_{dye} برای پیل سوختی تک محفظه و دو محفظه

سیستم است که عموماً مقدار پایینی دارد، یعنی با وجود راندمان مناسب تصفیه، اما الکتریسیته متناسب با آن تولید و منتقل نمی‌شود. رابطه بین غلظت رنگ در جریان فاضلاب ورودی، راندمان رنگ‌زدایی و چگالی توان در پیل‌های سوختی میکروبی یکی از جنبه‌های مهم

راندمان کولمبی یکی از پارامترهای معیار مهم در مبحث MFC ها است که متأسفانه به دلیل گزارش نکردن مقدار آن در برخی از مقالات، در این تحقیق قابل ارائه نیست. این پارامتر جریان تولید شده به ازای تغییرات COD را بیان می‌کند و به نوعی بیانگر پتانسیل

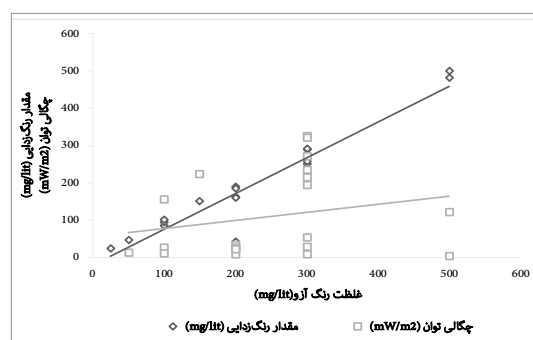
• شکل الکتروند

در نمودار (۴) تأثیر شکل الکتروند مورد بررسی قرار گرفته است. بطورکلی، الکترودهای برسی می‌توانند به چگالی توان بالاتری نسبت به الکترودهای تخت در پیل‌های سوختی میکروبی دست یابند (Zafar و همکاران، ۲۰۲۲؛ Fonseca و همکاران، ۲۰۲۱). دلیل این ترجیح این است که هر چه الکتروند فضای بیشتری را در محفظه آند اشغال کند، سطح بیوفیلم بیشتری روی الکتروند قرار می‌گیرد و قابلیت تصفیه سیستم افزایش می‌یابد. با این حال، همانطور که در نمودار (۴-ب) و (۴-ج) نشان داده شده، بطور غافلگیرکننده‌ای الکترودهای تخت از نظر راندمان تصفیه و ظرفیت توان تولید، برتر از الکترودهای برسی هستند. همانطور که در شکل (۵) نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروند آند به حجم محفظه آند برای دو حالت برسی و تخت مشخص است، این پارامتر برای حالت برسی برتری قابل توجهی ندارد؛ بنابراین نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروند برسی به حجم محفظه آندی به درستی تنظیم نشده است.

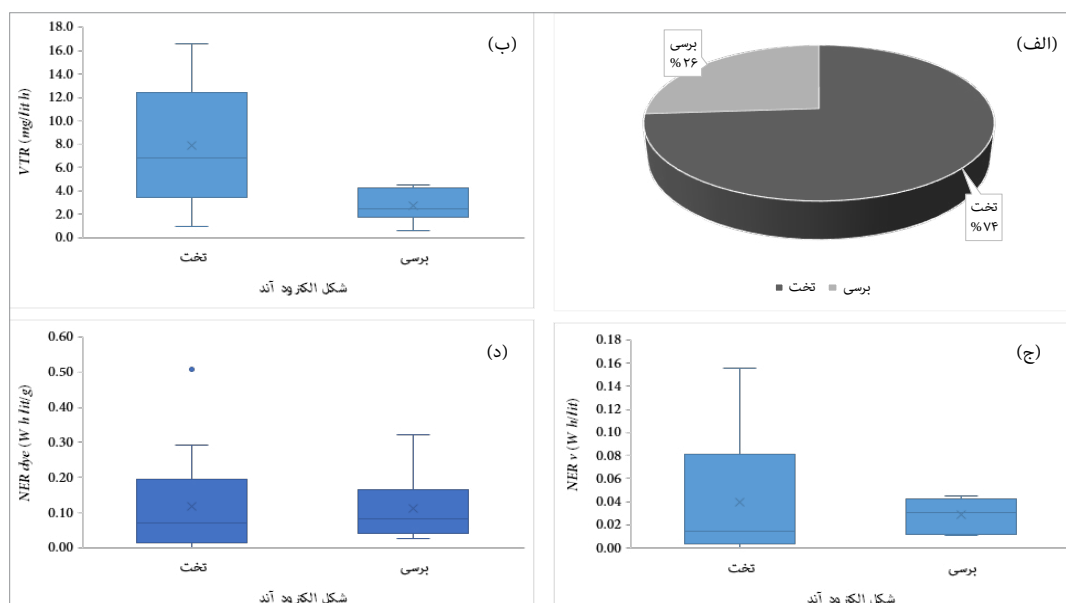


شکل ۵- نمودار جعبه‌ای نسبت حجم اشغال شده توسط الکتروند آند به حجم محفظه آند برای آند تخت و برسی

عملکرد MFC است که در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت رنگ ورودی، راندمان سیستم در حذف رنگ نسبتاً ثابت می‌ماند، در حالی که تولید چگالی توان به‌طور قابل توجهی افزایش نمی‌یابد. این نشان می‌دهد که MFC ها بدون توجه به غلظت رنگ، سطح ثابتی از راندمان حذف رنگ را حفظ می‌کنند، اما افزایش غلظت رنگ به‌طور متناسبی چگالی توان را افزایش نمی‌دهد (Oon و همکاران، ۲۰۲۱). این امر بر اهمیت توسعه استراتژی‌هایی برای بهبود چگالی توان و راندمان رنگ‌زدایی، به‌ویژه در غلظت‌های رنگ بالاتر، برای افزایش عملکرد MFC در تصفیه فاضلاب رنگی تأکید می‌کند. به‌عنوان مثال، یک مطالعه استفاده از پیش تصفیه فوتوکاتالیز TiO_2 را برای افزایش چگالی توان خروجی MFC‌های تغذیه شده با رنگ پیشنهاد کرده است (Su و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۳- مقدار رنگ‌زدایی و چگالی توان تولیدی در غلظت‌های متفاوت رنگ آزو

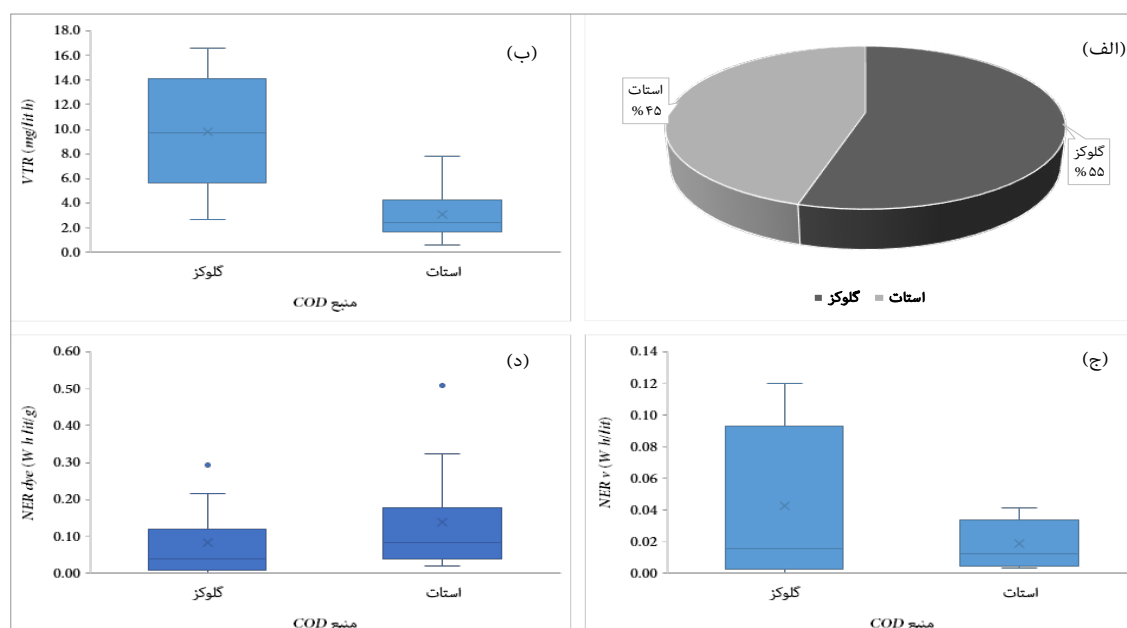


شکل ۴- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصدی الکتروند تخت (۱۷ مورد) و الکتروند برسی (۶ مورد) آند، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای آند تخت و برسی، (ج) نمودار جعبه‌ای از محدوده مقدار NER_v برای آند تخت و برسی، (د) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_{dye} برای آند تخت و برسی

• منبع COD

نتایج این تحقیق مشابه با برخی مطالعات و در تناقض با برخی دیگر است. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که گلوکز از نظر بازده تصفیه و ظرفیت تولید برتر از استات است، اما این برتری قابل توجه نیست. همچنین تأثیر تجزیه سوبسترا بر تولید انرژی در MFCها و جامعه میکروبی را بررسی کردند و مشخص شده که میزان هیدرولیز و تخمیر گلوکز و استات مشابه است (Velasquez-Orta و همکاران، ۲۰۱۱). در حالی که برخی دیگر دریافته‌اند که استات بهترین بستر در بین سوبستراهای مختلف آزمایش شده است (Ullah و Zeshan، ۲۰۲۰) و (Mateo و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، انتخاب سوبسترا ممکن است به عوامل مختلفی مانند طراحی خاص (MFC)، شرایط عملیاتی و جامعه میکروبی بستگی داشته باشد و بایستی در این خصوص تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

همانطور که در نمودار (۶-الف) نشان داده شده است، در مقالات مورد بررسی در این تحقیق دو گروه گلوکز و استات به عنوان منبع COD توزیع نزدیکی دارند. از نمودار (۶-ب) و نمودار (۶-ج) می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از گلوکز نسبت به استات برای منبع COD، هم از نظر بازدهی تصفیه و هم از نظر ظرفیت توان تولیدی برتری دارد. یکی از پایه‌های اصلی عملکرد سیستم، میزان الکترون و هیدروژن تولید شده در حین تجزیه زیستی سوبسترا است. به‌طور کلی، تجزیه گلوکز در مقایسه با تجزیه استات، الکترون و یون‌های هیدروژن بیشتری تولید می‌کند. گلوکز یک مولکول بزرگتر و پیچیده‌تر در مقایسه با استات است و حاوی اتم‌های کربن بیشتری بوده که می‌تواند در طول متابولیسم اکسید شود (Sun و همکاران، ۲۰۲۰).

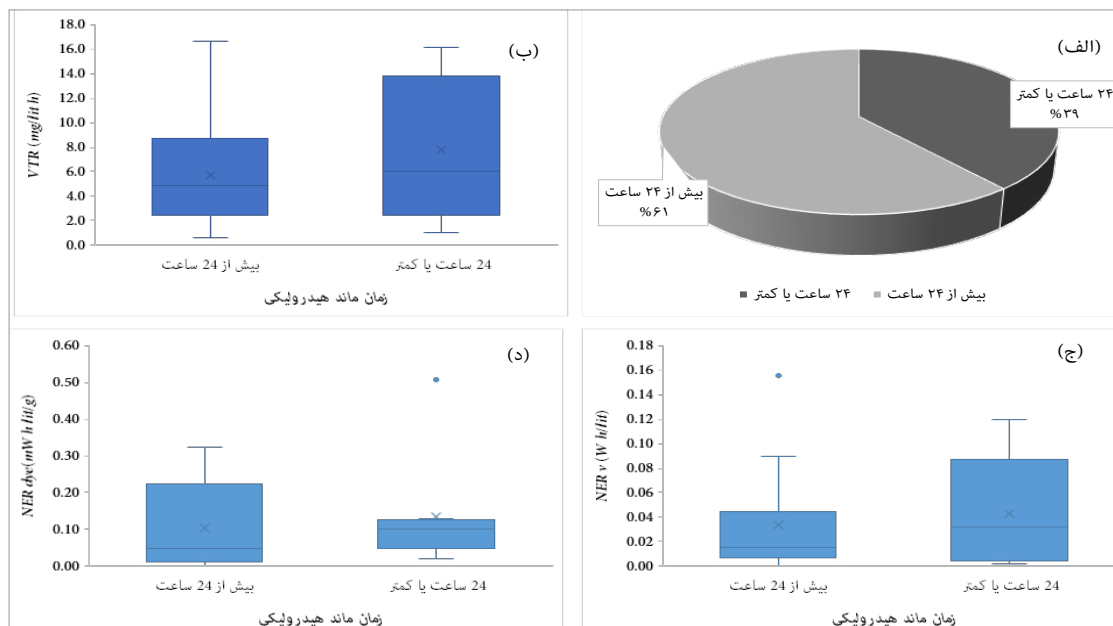


شکل ۶- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصد گلوکز (۱۲ مورد) و استات (۱۰ مورد) به‌عنوان منبع COD، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای گلوکز و استات، (ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER برای گلوکز و استات، (د) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NER_{dye} برای گلوکز و استات

• زمان ماند هیدرولیکی

راندمان رنگ‌زدایی حدود ۹۰٪ در ۲۴ ساعت اول می‌باشد. در نتیجه زمان ماند هیدرولیکی بیش از ۲۴ ساعت، باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و کاهش راندمان سیستم می‌شود. باید توجه داشت که در پیل‌های سوختی میکروبی زمان ماند هیدرولیکی بر اساس مقدار ولتاژ تعیین می‌شود و زمانی که ولتاژ به مقدار کمینه تعیین شده توسط محقق (عموماً ۵ میلی ولت) می‌رسد، فاضلاب جدید جایگزین می‌شود. بنابراین واکنش کاهش اکسیژن که در محفظه کاتدی رخ می‌دهد و وابسته به کاتالیست استفاده شده در الکتروکاتد است، نقش بسیار مهمی در زمان ماند هیدرولیکی دارد (Yuan و همکاران، ۲۰۱۶).

همانطور که در نمودار (۷-الف) نشان داده شده، مطالعات با HRT کمتر یا مساوی ۲۴ ساعت و بیشتر از ۲۴ ساعت، توزیع نزدیکی دارند. از نمودار (۷-ب) و نمودار (۷-ج) می‌توان نتیجه گرفت که اگر زمان ماند هیدرولیکی برابر یا کمتر از ۲۴ ساعت باشد، عملکرد سیستم بهتر از زمانی است که بیش از ۲۴ ساعت باشد. از آنجایی که در این مقایسه از پارامترهایی استفاده شده که زمان ماند هیدرولیکی در مخرج آن می‌باشد، بنابراین افزایش زمان ماند هیدرولیکی موجب کاهش مقدار آن پارامتر می‌شود. همچنین با توجه به داده‌های ارائه شده به‌طور کلی

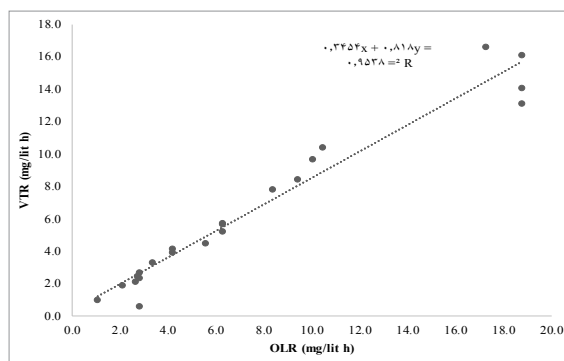


شکل ۷- (الف) نمودار 3D-Pie توزیع درصدی یک دوره یک روز یا کمتر (۱۰ مورد) و یک دوره بیش از یک روز (۱۴ مورد) به عنوان زمان ماند هیدرولیک، (ب) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار VTR برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز به عنوان HRT، (ج) نمودار جعبه‌ای محدوده مقدار NERV برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز، (د) نمودار جعبه محدوده مقدار NERdye برای دوره یک روز یا کمتر و دوره بیش از یک روز

$$VTR = 0.818 \times OLR + 0.3454 \quad (7)$$

$$(\Delta dye / HRT = 0.3454 + (0.818 \times dye_{inf} / HRT) \quad (8)$$

$$HRT = [\Delta dye - (0.818 \times dye_{inf})] / 0.3454 \quad (9)$$



شکل ۸- رابطه بین نرخ بارگذاری آلی و نرخ تصفیه حجمی

۳- چارچوب پیشنهادی برای مطالعات MFC

یکی از مشکلات اساسی در مسیر این پژوهش، عدم وجود اطلاعات کافی و مناسب بود. از آنجایی که پیل‌های سوختی میکروبی از لحاظ پیکربندی و ساختار، تفاوت زیادی با یکدیگر دارند، عدم وجود اطلاعات کافی، دسته‌بندی‌ها را با چالش مواجه می‌کند. یکپارچه‌سازی داده‌ها در راستای پردازش عمیق و دقیق‌تر اطلاعات توصیه می‌شود و برای نیل به این هدف، موارد موجود در جدول (۳) باید در مقالات گزارش شود.

۲- یافتن رابطه VTR و OLR

پارامتر VTR رابطه بین HRT و تغییرات غلظت رنگ را بیان می‌کند و می‌تواند برای طراحی سیستم تصفیه استفاده شود. می‌توان انتظار داشت که هر چه HRT طولانی‌تر باشد، VTR یک سیستم کمتر باشد. به این دلیل که فاضلاب برای مدت طولانی‌تری در راکتور حفظ می‌شود و بنابراین حجم کلی تصفیه شده در روز کاهش می‌یابد (Leicester و همکاران، ۲۰۲۰). زمان ماند هیدرولیکی کوتاه‌تر باعث می‌شود که فاضلاب زمان کافی برای متابولیسم آلاینده‌ها نداشته باشد و همچنین منجر به کاهش VTR می‌شود. چندین مطالعه با HRTهای کوتاه نیز VTRهای کم را گزارش کرده‌اند (Liang و همکاران، ۲۰۱۸). یک VTR بهینه باید وجود داشته باشد که بتوان از آن برای تعیین اندازه راکتور استفاده کرد. پس از رسم نمودار VTR به OLR که در شکل (۸) نمایش داده شده و تجزیه و تحلیل ترکیبی داده‌های آزمایشگاهی MFC، مشخص شد که همبستگی معنی‌داری بین OLR و VTR ($R^2 = 95.7\%$) وجود دارد. این بدان معنی است که به وسیله مقدار OLR مشخص، می‌توان VTR یک MFC را تخمین زد (معادله (۷)). بنابراین، اگر مقدار و نرخ غلظت رنگ آزو ($mg/lit h$) مشخص باشد، می‌توان از آن برای محاسبه قابل اعتماد نرخ تصفیه مورد انتظار در MFC استفاده کرد. با این کار می‌توان HRT (رابطه ۹) را محاسبه کرد.

جدول ۳- چارچوب پیشنهادی برای گزارش داده‌ها

۱. طراحی (MFC)	۲. پارامترهای بهره‌برداری	۳. پارامترهای اندازه‌گیری
• نوع پیل سوختی • حجم محفظه آند و کاتد • جنس الکترودها • ابعاد الکترودها • فاصله بین الکترودها • کاتالیست استفاده شده • نوع غشاء • ابعاد غشاء	• دما و pH • نوع منبع COD • غلظت COD ورودی • غلظت آلاینده صنعتی ورودی • زمان ماند هیدرولیکی • مقاومت خارجی اعمال شده • حالت بهره‌برداری (پیوسته، دسته‌ای) • نوع و غلظت لجن جهت تلقیح	• توان تولیدی • راندمان کاهش COD • راندمان حذف آلاینده مورد نظر • راندمان کولمبی

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده در صورتی که از پیل‌های سوختی میکروبی در حجم کمتر از یک لیتر استفاده می‌کنیم، بهتر است از پیل‌های تک محفظه بخاطر توان تولیدی بیشتر و بازده تصفیه بهتر استفاده کنیم؛ اما اگر انعطاف پذیری و کنترل بیشتر بر روی محیط MFC مدنظر باشد، بهتر است از حالت دو محفظه استفاده کرد. علیرغم نتایج بدست آمده در خصوص نوع مورفولوژی الکترود آند، توصیه می‌شود از الکترودهای بررسی استفاده شود؛ قابل ذکر است که باید به نسبت حجم اشغال شده توسط الکترود به حجم محفظه آند، توجه شود. گلوکز به عنوان منبع COD مناسب است و موجب پایداری بیشتر دستگاه می‌شود؛ هرچند باید در انتخاب سوپسترا به عواملی مانند طراحی MFC مورد نظر، شرایط عملیاتی و جامعه میکروبی توجه کرد. همچنین پیل‌های سوختی میکروبی در هنگام تصفیه فاضلاب حاوی رنگ آزو در مدت زمان ۲۴ ساعت، عمدتاً بازدهی رنگ‌زدایی بالاتر از ۹۰ درصد دارند و برای عدم اتلاف زمان و افزایش کارایی دستگاه بهتر است شرایط به گونه‌ای فراهم شود تا زمان ماند هیدرولیکی بیش از ۲۴ ساعت انتخاب نشود که برای دستیابی به این امر باید به پارامترهایی مانند کاتالیست مورد استفاده در الکترود کاتد که نقش بسیار مهمی در فرآیند کاهش اکسیژن دارد توجه شود. مقدار نرخ تصفیه حجمی بر اساس نرخ بارگذاری آلی نیز با دقت مناسبی بدست آمد. در صورت گزارش‌دهی مناسب توسط محققان، به‌ویژه با رعایت چارچوب پیشنهادی، می‌توان بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر در راستای توسعه پیل‌های سوختی میکروبی انجام شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Advanced Oxidation Process
- 2-Microbial Fuel Cell
- 3-Proton Exchange Membrane

4-Activated Sludge

5-Organic Loading Rate

6-Volumetric Treatment Rate

7-Normalized Energy Recovery

منابع

- Ahn, E., & Kang, H. (2018). Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean journal of anesthesiology*, 71(2), 103-112. <https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103>
- Benkhaya, S., M'rabet, S., & El Harfi, A. (2020). Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>
- Dai, Q., Zhang, S., Liu, H., Huang, J., & Li, L. (2020). Sulfide-mediated azo dye degradation and microbial community analysis in a single-chamber air cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 131, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.107349>
- de Almeida, E. J. R., Halfeld, G. G., Reginatto, V., & de Andrade, A. R. (2021). Simultaneous energy generation, decolorization, and detoxification of the azo dye Procion Red MX-5B in a microbial fuel cell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106221. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106221>
- Feng, Y., He, W., Liu, J., Wang, X., Qu, Y., & Ren, N. (2014). A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Biore-source technology*, 156, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.104>

- [org/10.1007/s11157-009-9184-9](https://doi.org/10.1007/s11157-009-9184-9)
- Ilamathi, R., Sheela, A. M., & Gandhi, N. N. (2019). Comparative evaluation of *Pseudomonas* species in single chamber microbial fuel cell with manganese coated cathode for reactive azo dye removal. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 144, 104744. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104744>
- Ishaq, S., Sadiq, R., Farooq, S., Chhipi-Shrestha, G., & Hewage, K. (2020). Investigating the public health risks of low impact developments at residential, neighbourhood, and municipal levels. *Science of The Total Environment*, 744, 140778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140778>
- Izadi, P., Fontmorin, J.-M., Fernández, L. F., Cheng, S., Head, I., & Yu, E. H. (2019). High performing gas diffusion biocathode for microbial fuel cells using acidophilic iron oxidizing bacteria. *Frontiers in Energy Research*, 7, 93. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00093>
- Khan, M. D., Thimmappa, R., Anwer, A. H., Khan, N., Tabraiz, S., Li, D., Khan, M. Z., & Yu, E. H. (2021). Redox mediator as cathode modifier for enhanced degradation of azo dye in a sequential dual chamber microbial fuel cell-aerobic treatment process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(79), 39427-39437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.151>
- Leicester, D. D., Amezaga, J. M., Moore, A., & Heidrich, E. S. (2020). Optimising the hydraulic retention time in a pilot-scale microbial electrolysis cell to achieve high volumetric treatment rates Using concentrated domestic wastewater. *Molecules*, 25(12), 2945. <https://doi.org/10.3390/molecules25122945>
- Liang, P., Duan, R., Jiang, Y., Zhang, X., Qiu, Y., & Huang, X. (2018). One-year operation of 1000-L modularized microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Water research*, 141, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.066>
- Mateo, S., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Fernandez-Morales, F. J. (2018). Driving force behind electrochemical performance of microbial fuel cells fed with different substrates. *Chemosphere*, 207, 313-319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.100>
- Flimban, S. G., Ismail, I. M., Kim, T., & Oh, S.-E. (2019). Overview of recent advancements in the microbial fuel cell from fundamentals to applications: Design, major elements, and scalability. *Energies*, 12(17), 3390. <https://doi.org/10.3390/en12173390>
- Fonseca, E. U., Yang, W., Wang, X., Rossi, R., & Logan, B. E. (2021). Comparison of different chemical treatments of brush and flat carbon electrodes to improve performance of microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 342, 125932. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125932>
- Ge, Z., Li, J., Xiao, L., Tong, Y., & He, Z. (2014). Recovery of electrical energy in microbial fuel cells: brief review. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(2), 137-141. <https://doi.org/10.1021/ez4000324>
- Halepoto, H., Gong, T., & Memon, H. (2022). Current status and research trends of textile wastewater treatments-A bibliometric-based study [Original Research]. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1042256>
- Hou, B., Hu, Y., & Sun, J. (2012). Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled with different cathode types during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation. *Bioresource technology*, 111, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.017>
- Hou, B., Lu, J., Wang, H., Li, Y., Liu, P., Liu, Y., & Chen, J. (2019). Performance of microbial fuel cells based on the operational parameters of biocathode during simultaneous Congo red decolorization and electricity generation. *Bioelectrochemistry*, 128, 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.019>
- Huang, W., Chen, J., Hu, Y., Chen, J., Sun, J., & Zhang, L. (2017). Enhanced simultaneous decolorization of azo dye and electricity generation in microbial fuel cell (MFC) with redox mediator modified anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2349-2359. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.216>
- Husain, Q. (2010). Peroxidase mediated decolorization and remediation of wastewater containing industrial dyes: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 117-140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.001>

- Sato, C., Paucar, N. E., Chiu, S., Mahmud, M. Z., & Dudgeon, J. (2021). Single-chamber microbial fuel cell with multiple plates of bamboo charcoal anode: Performance evaluation. *Processes*, 9(12), 2194. <https://doi.org/10.3390/pr9122194>
- Solanki, K., Subramanian, S., & Basu, S. (2013). Microbial fuel cells for azo dye treatment with electricity generation: a review. *Bioresource technology*, 131, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.063>
- Su, L., Fan, X., Yin, T., Chen, H., Lin, X., Yuan, C., & Fu, D. (2015). Increasing power density and dye decolorization of an X-3B-fed microbial fuel cell via TiO₂ photocatalysis pretreatment. *Rsc Advances*, 5(102), 83906-83913. <https://doi.org/10.1039/C5RA16043J>
- Sun, J., Cai, B., Zhang, Y., Peng, Y., Chang, K., Ning, X., Liu, G., Yao, K., Wang, Y., & Yang, Z. (2016). Regulation of biocathode microbial fuel cell performance with respect to azo dye degradation and electricity generation via the selection of anodic inoculum. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(9), 5141-5150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.114>
- Sun, J., Hu, Y.-y., Bi, Z., & Cao, Y.-q. (2009). Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 100(13), 3185-3192. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.002>
- Sun, J., Li, W., Li, Y., Hu, Y., & Zhang, Y. (2013). Redox mediator enhanced simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation in air-cathode microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 142, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.039>
- Sun, S., Ding, Y., Liu, M., Xian, M., & Zhao, G. (2020). Comparison of glucose, acetate and ethanol as carbon resource for production of poly (3-hydroxybutyrate) and other acetyl-CoA derivatives. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 833. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00833>
- Tan, S.-M., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Abidin, C. Z. A., Teoh, T.-P., & Yap, K.-L. (2022). Discerning the biodegradation of binary dyes in microbial fuel cell: Interactive effects of dyes, electron transport
- Méndez-Paz, D., Omil, F., & Lema, J. (2005). Anaerobic treatment of azo dye Acid Orange 7 under fed-batch and continuous conditions. *Water research*, 39(5), 771-778. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.022>
- Oon, Y.-S., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Oon, Y.-L., Lehl, H. K., & Thung, W.-E. (2021). Innovative baffled microbial fuel cells for azo dye degradation: Interactive mechanisms of electron transport and degradation pathway. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126366>
- Patil, S. A., Gildemyn, S., Pant, D., Zengler, K., Logan, B. E., & Rabaey, K. (2015). A logical data representation framework for electricity-driven bioproduction processes. *Biotechnology advances*, 33(6), 736-744. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.03.002>
- Plappally, A. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4818-4848. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.022>
- Raqba, R., Rafaqat, S., Ali, N., & Munis, M. F. H. (2022). Biodegradation of Reactive Red 195 azo dye and Chlorpyrifos organophosphate along with simultaneous bioelectricity generation through bacterial and fungal based biocathode in microbial fuel cell. *Journal of Water Process Engineering*, 50, 103177. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103177>
- Ravinuthala, S., Nair, A. V., Sharma, N., Lokesh, S., Madhusudhan, M., & Das, S. P. (2022). Co-substrates' influence on bioelectricity production in an azo dye-based microbial fuel cell. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101012. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101012>
- Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J.-S., & Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review. *Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers*, 42(1), 138-157. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>
- Saravanan, N., & Karthikeyan, M. (2018). Study of single chamber and double chamber efficiency and losses of wastewater treatment. *Int Res J Eng Technol*, 5, 1225-1230. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229368429>

- Zafar, H., Ishaq, S., Peleato, N., & Roberts, D. (2022). Meta-analysis of operational performance and response metrics of microbial fuel cells (MFCs) fed with complex food waste. *Journal of Environmental Management*, 315, 115152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115152>
- behaviour, autocatalytic mechanism, and degradation pathways. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107739. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107739>
- Tan, S.-M., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Thung, W.-E., & Teoh, T.-P. (2020). The reaction of wastewater treatment and power generation of single chamber microbial fuel cell against substrate concentration and anode distributions. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 793-807. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00504-w>
- Tremouli, A., Martinos, M., & Lyberatos, G. (2017). The effects of salinity, pH and temperature on the performance of a microbial fuel cell. *Waste and biomass valorization*, 8, 2037-2043. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9712-0>
- Ullah, Z., & Zeshan, S. (2020). Effect of substrate type and concentration on the performance of a double chamber microbial fuel cell. *Water Science and Technology*, 81(7), 1336-1344. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.387>
- Van der Zee, F. P., Lettinga, G., & Field, J. A. (2001). Azo dye decolourisation by anaerobic granular sludge. *Chemosphere*, 44(5), 1169-1176. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00270-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00270-8)
- Velasquez-Orta, S. B., Yu, E., Katuri, K. P., Head, I. M., Curtis, T. P., & Scott, K. (2011). Evaluation of hydrolysis and fermentation rates in microbial fuel cells. *Applied microbiology and biotechnology*, 90, 789-798. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3126-5>
- Yadav, A., Kumar, P., Rawat, D., Garg, S., Mukherjee, P., Farooqi, F., Roy, A., Sundaram, S., Sharma, R. S., & Mishra, V. (2022). Microbial fuel cells for mineralization and decolorization of azo dyes: Recent advances in design and materials. *Science of The Total Environment*, 826, 154038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154038>
- Yuan, H., Hou, Y., Abu-Reesh, I. M., Chen, J., & He, Z. (2016). Oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells for energy-efficient wastewater treatment: a review. *Materials Horizons*, 3(5), 382-401. <https://doi.org/10.1039/C6MH00093B>

روز جهانی آب یک رویداد سالانه می‌باشد که توسط سازمان ملل متحد هر ساله در ۲۲ مارس (دوم یا سوم فروردین) برگزار می‌شود. عنوان شعار این روز در سال ۲۰۲۴ «آب برای صلح» است و بر اهمیت حیاتی آب در سیستم‌های انسانی و اجتماعی تأکید دارد، همچنین نیاز به استفاده پایدار از منابع آب را برای حفظ یکپارچگی حاکمیت فرامرزی مورد تأکید قرار می‌دهد. این رویداد با هدف افزایش آگاهی جامعه جهانی از اهمیت آب برای حفظ صلح و پایداری می‌پردازد و استفاده بهینه از منابع آب، مدیریت پایدار آن و همکاری بین کشورها برای حل و فصل اختلافات مربوط به آب از جمله هدف‌های اصلی آن می‌باشد. این رویداد برای جلب توجه به مسائل محیطی و اجتماعی مرتبط با آب برگزار می‌شود و تلاش می‌کند با تبیین اهمیت حفظ و مدیریت منابع آب، بحران‌های مرتبط با کمبود آب و تأثیرات آن را برای جوامع جهانی روشن نماید و به اشتراک بگذارد. در پژوهش حاضر، به بررسی شعارهای روز جهانی آب از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ پرداخته شده است. سپس تحلیل نام‌گذاری روز آب در سال ۲۰۲۴ ارائه گردید. **واژه‌های کلیدی:** روز جهانی آب، نقش حیاتی آب، مدیریت پایدار، آب برای همه.

مقدمه

اعم از خشونت مستقیم نظامی و یا خشونت غیرمستقیم مانند بی‌عدالتی، فقر، توسعه نیافتگی، تخریب محیط‌زیست و به‌طور کلی نقض حقوق بشر اطلاق می‌گردد (عسکری و خسروی، ۱۳۹۵). بر این اساس صلح دیگر پدیده بین دولت‌ها نیست، بلکه زندگی انسان‌ها و دیگر گروه‌های غیردولتی را نیز در بر می‌گیرد (Moradi و Soltani، ۲۰۱۷). در پژوهش حاضر، به بررسی مفهوم آب برای صلح که عنوان روز جهانی آب در سال ۲۰۲۴ است، پرداخته شد. در ادامه و در شکل (۱) معرفی نام‌گذاری روز جهانی آب از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ ارائه شده است.

تحلیل شعار سال آب برای صلح

نام‌گذاری سال ۲۰۲۴ با عنوان «آب برای صلح» بیانگر اهمیت حفاظت از منابع آب و توسعه پایدار می‌باشد. این نام‌گذاری به مفهوم حفاظت از آب به‌عنوان یک منبع حیاتی و ضروری برای زندگی و صلح جهانی اشاره دارد. این موضوع نشان از اهمیت توجه به مسائل محیط‌زیستی و عدالت اجتماعی و به عنوان نماد صلح و آرامش به کار می‌رود. چرا که آب عنصر بسیار اساسی و ضروری است و نه تنها برای ادامه حیات بلکه برای حفظ سلامتی و ارتباطات انسانی نیز ضروری می‌باشد. آب به طور نمادین می‌تواند بیانگر آرامش، تمیزی، صفا و صلح باشد. آب به دلیل ویژگی‌هایی که دارد، نقش مهمی در زندگی انسان‌ها و همه موجودات زنده ایفا می‌کند، بدون آب امکان زندگی وجود ندارد. آب نماد زندگی، تجدید و تولید، تمیزی و پاکیزگی، وحدت و انسجام، صلح و آرامش است. به همین دلیل این عنصر طبیعی، اغلب به‌عنوان نماد صلح و همبستگی در متون و فرهنگ‌های مختلف شناخته شده است. سال‌هاست که پیش‌بینی می‌شود درگیری‌های و جنگ‌های آتی به‌دلیل کاهش منابع آب قابل استفاده خواهد بود. از این‌رو برنامه‌ریزی

آب، منبع حیاتی و اساسی در زندگی است که به طور نامتناسبی در سراسر جهان توزیع شده است. مشکل دسترسی به آب سالم برای بسیاری از مردم جهان اهمیت زیادی دارد و آلودگی آب می‌تواند به بروز بیماری‌های جدی منجر شود. حفظ منابع آب و استفاده هوشمندانه از آن بسیار ضروری است. روز جهانی آب^۱ در ۲۲ مارس، برای جلب توجه جهانی به اهمیت حفظ منابع آب برگزار می‌شود و شعار «آب برای صلح»^۲ برای سال ۲۰۲۴ انتخاب شده است. این روز، فرصتی برای افزایش آگاهی و بحث درباره موضوعات مرتبط با آب و حفاظت از منابع آبی در جهان می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین اهداف از برگزاری این کنفرانس‌ها، آگاهی‌رسانی، آموزش عمومی و بحث در زمینه موضوع منتخب هر سال جهت حفاظت از منابع و آینده بشریت است. هرچند از سال ۱۹۹۴ میلادی شعار پایه و همیشگی «آب برای زندگی»^۳ توسط سازمان خوار و بار و کشاورزی ملل متحد (فائو)^۴ تصویب شده است، ولی هر سال برای روز جهانی آب نام‌گذاری انجام می‌گیرد. گزارش نهادهای بین‌المللی و بررسی‌های صورت گرفته، کم‌آبی در سراسر جهان را یک بحران جدی قلمداد می‌کند و پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که غرب آسیا و شمال آفریقا مستعدترین منطقه برای به وجود آمدن جنگ‌های آبی می‌باشند (World Bank Group، ۲۰۱۸؛ FAO، ۲۰۱۹). تا قبل از تأسیس سازمان ملل متحد، صلح به وضعیتی گفته می‌شد که در آن جنگ حکم‌فرما نباشد، اما بعد از تشکیل این سازمان، به تدریج مفهومی مثبت به صلح بخشیده شد. شورای امنیت در بیانیه صادر شده در ۳۱ ژانویه ۱۹۹۲ تأکید نمود که صلح تنها فقدان تعارض بین دولت‌ها نیست، بلکه عدم ثبات اقتصادی، اجتماعی، انسانی و محیط‌زیستی تهدیدی برای صلح و امنیت است (UN، ۱۹۹۲). صلح در بخش مثبت آن به هم‌زیستی گروه‌ها و اقوام مختلف در محیطی فارغ از خشونت،

در نوشتار حاضر به تحلیل و بررسی شعار سال روز جهانی آب پرداخته شد. بدین منظور پژوهش‌های حوزه آب برای صلح از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت که طبق تحلیل‌های صورت گرفته، این پژوهش‌ها در ۸ گروه تقسیم‌بندی و ارائه شد. در ادامه گروه‌بندی موضوعی پژوهش‌های این حوزه آمده است. گروه ۱: آموزش، تاب‌آوری، حاکمیت غذایی، کمک‌های خارجی،

گروه ۲: مشارکت مدنی، همکاری بین‌المللی، نوع دوستی، مدل توسعه صلح‌سازی، تعارض بالا، تعارض بین گروهی، سلامت روان

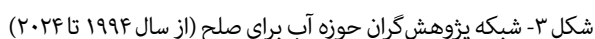
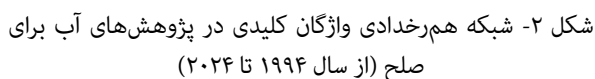
گروه ۳: چالش‌ها، تصمیم‌گیرندگان، صلح، امنیت، دیپلماسی آب، توانمندسازی

تغییر اقلیم

گروه ۶: سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی، حقوق بین‌المللی آب

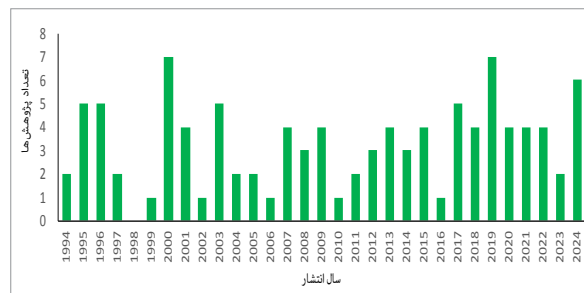
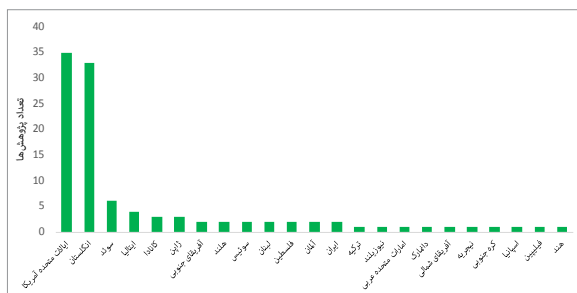
گروه ۷: استفاده مجدد از آب، یساب کشاورزی

گروه ۸: تقاضای آب، مذاکره‌های تجاری، جنگ بر سر آب



آب داء، صلح = ۲۰۲۴

شکل ۱- نام‌گذاری روز جهانی آب (از سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴)



شکل ۵- تعداد پژوهش‌های آب برای صلح در کشورهای مختلف جهان
از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴

شکل ۴- تعداد پژوهش‌های آب برای صلح از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۴

جدول ۱- پژوهش‌های انجام شده در زمینه آب برای صلح در سال ۲۰۲۴

عنوان پژوهش‌های انجام شده تا به الان در زمینه آب برای صلح در سال ۲۰۲۴	نویسندگان
سیاست همکاری آبی: راهبرد حقوقی برای صلح و امنیت بین‌المللی	فضائی و رشیدی (۱۴۰۳)
آب برای صلح: بازنگری نقش امنیت‌پذیری در همکاری‌ها	Dirioz (۲۰۲۴)
آب، سلامت و صلح: فراخوانی برای پژوهش‌های میان رشته‌ای	Abbara و همکاران (۲۰۲۴)
آب به عنوان یک کاتالیزور برای اقدام مشترک آب و هوا و صلح	Giovinazzo (۲۰۲۴)
آب برای صلح: چگونه حکمرانی بهتر می‌تواند تعارضات را کاهش دهد؟	Romano (۲۰۲۴)
گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۴: آب برای رفاه و صلح؛ حقایق، ارقام و نمونه‌های عملی	Koncagül و همکاران (۲۰۲۴)

- استفاده از فناوری‌های نوین برای مدیریت بهتر و بهره‌وری بیشتر از منابع آب

طبق بررسی‌های انجام گرفته در پژوهش حاضر، کشورهای ایالات متحده آمریکا و انگلستان به ترتیب بیش‌ترین پژوهش‌ها را در زمینه آب برای صلح به ثبت رسانده‌اند. همچنین با تحلیل و بررسی پژوهش‌ها نتایج مهم زیر حاصل شد که برای صلح آبی در جهان اهمیت ویژه‌ای را دارا می‌باشند:

✓ مدیریت منابع آب

- توزیع عادلانه منابع آب بین کشورها و مناطق داخلی
- افزایش بهره‌وری استفاده از آب و کاهش تلفات
- حفاظت از منابع آب شیرین در برابر آلودگی
- مقابله با تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر دسترسی به آب

✓ همکاری بین‌المللی

- ایجاد توافقات و موافقت‌نامه‌های بین‌المللی برای مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب مشترک
- تشویق به همکاری بین کشورها در زمینه تصفیه و توزیع آب

✓ امنیت آبی

- پیشگیری از نزاعات آبی و تداوم مناسب روابط آبی بین کشورها
- مدیریت مناسب برای جلوگیری از تنش‌ها و تعارضات در استفاده از منابع آب

✓ توسعه پایدار

- ارتقاء دسترسی مساوی به منابع آب برای توسعه اقتصادی و اجتماعی
- توجه به نیازهای مردم و اجتماعات محلی در فرآیند تصمیم‌گیری مربوط به آب

نتیجه‌گیری

نام‌گذاری روز جهانی آب در سال ۲۰۲۴ به‌ویژه در جهت ترویج صلح و همکاری بین‌المللی اهمیت دارد؛ زیرا آب به عنوان یک منبع حیاتی برای انسان‌ها و محیط‌زیست، می‌تواند یک موضوع مشترک برای همکاری و توافق بین کشورها و جوامع مختلف جهان باشد. افزایش همکاری و تعامل در زمینه مدیریت منابع آب، می‌تواند به کاهش تنش‌ها و تعارضات مربوط به آب در مناطق مختلف جهان کمک کند و در نهایت به ترویج صلح و پایداری جهانی منجر شود. این همکاری‌ها می‌تواند از شکل‌گیری آپارتاید آبی در سطح جهان و در مناطق مختلف به‌ویژه در مناطق کم‌آب جلوگیری نموده و امکان استفاده هم‌سطح را برای همه انسان‌ها در نواحی مختلف کره زمین فراهم سازد. از این رو، نام‌گذاری روز جهانی آب در سال حاضر با تأکید بر صلح و همکاری‌های بین‌المللی، می‌تواند زمینه‌ساز ارتقای آگاهی عمومی و اقدامات مؤثر در حوزه مدیریت این منبع حیاتی باشد. بررسی پژوهش‌های انجام شده و تحلیل آن‌ها با عنوان آب برای صلح نشان داد که اغلب پژوهش‌ها به بحث همکاری بین‌المللی توجه ویژه‌ای دارند. به‌طور کلی، همکاری بین‌المللی در زمینه آب می‌تواند

operative climate action and peace - Geneva, 22 March 2024 - 10:00 - 11:30 CET Onsite, WMO Headquarters (7Bis Avenue de la Paix, 1211 Geneva), Global Water Partnership. Ghana. Retrieved from <https://policycommons.net/artifacts/11759254/water-as-a-catalyst-for-cooperative-climate-action-and-peace/12650543/>

Koncagül, E., Connor, R., & Abete, V. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace; facts, figures and action examples. <https://policycommons.net/artifacts/11770300/the-united-nations-world-water-development-report-2024/12663562/>

Romano. (2024). Water for peace: how better governance can reduce conflict. <https://policycommons.net/artifacts/11759240/water-for-peace/12650527/>

Soltani, R., & Moradi, M. (2017). The Evolution of the Concept of International Peace and Security in light of UN Security Council Practice (End of the Cold War-Until Now). Open Journal of Political Science, 7(01), 133. doi: [10.4236/ojps.2017.71010](https://doi.org/10.4236/ojps.2017.71010)

UN Doc. S/23500, UN SCOR, 3046th Meeting. (1992). Note by the President of Security Council. <https://www.securitycouncilreport.org/atf/cf/%7B65B-FCF9B-6D27-4E9C-8CD3-CF6E4FF96FF9%7D/PKO%20S%2023500.pdf>

World Bank Group. (2018). MENA Development Report: Beyond Scarcity, Water Security in the Middle East and North Africa. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1144-9>

به ایجاد صلح، پایداری و همبستگی بین کشورها و جوامع مختلف جهان کمک نماید که در این ارتباط نقش سازمان ملل و نهادهای وابسته ذی ربط بسیار اهمیت خواهد داشت تا با برنامه ریزی و ایجاد وفاق جهانی، مسائل و مشکلات مربوط به حوزه آب را در نقاط مختلف که تحت تاثیر شرایط کمبود منابع آبی هستند، به صورت صلح آمیز بررسی و راه حل های قابل قبول ارائه نماید.

پی نوشت ها

1-WWD (World Water Day)

2-WFP (Water for Peace)

3-Water For Life

4-FAO (Food and Agriculture Organization)

منابع

عسکری، پوریا، و خسروی، یلدا. (۱۳۹۵). ضرورت و بایسته های مطالعات صلح از دیدگاه حقوق بین الملل. پژوهش های روابط بین الملل، ۶(۲۲)، ۲۳۷-۲۶۶.

فضائی، مصطفی، و رشیدی، مهناز. (۱۴۰۳). سیاست همکاری آبی: راهبرد حقوقی برای صلح و امنیت بین المللی. فصلنامه مطالعات حقوق عمومی دانشگاه تهران، ۵۴(۳)، ۱۹۰۷-۱۹۳۰. doi: [10.22059/jpls.2022.340520.3056](https://doi.org/10.22059/jpls.2022.340520.3056)

Abbara, A., Shomar, R. A., Daoudy, M., Sittah, G. A., Zaman, M. H., & Zeitoun, M. (2024). Water, health, and peace: a call for interdisciplinary research. The Lancet, 403(10435), 1427-1429. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00588-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00588-9)

Dirioz, A. O. (2024). Water for Peace Revisited: Reconsidering the Role of Securitization in Water Cooperation. In Theorizing Transboundary Waters in International Relations, 105-120. Cham: Springer International Publishing, book chapter. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43376-4_7

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). Land and Water Governance to Achieve the SDGs in Fragile Systems, Background Paper Prepared for the Plenary Session on Land and Water Governance., Cairo. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca5172en>

Giovinazzo, B. (2024). Water as a catalyst for co-



ایران با مشکلات گسترده‌ای در حوزه مدیریت منابع آب مواجه است که ناشی از کاهش منابع آب تجدیدپذیر، افزایش تقاضا و مدیریت غیر اصولی می‌باشد. به علاوه، عواملی همچون تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر، بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی و عدم توازن در توزیع آب میان بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری، نیز منجر به تشدید بحران در تأمین پایدار آب گردیده است. رویکرد مدیریت تقاضای آب (WDM) که دربرگیرنده روش‌های تنظیم و کاهش مصرف آب از طریق ترکیبی از اصول اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌باشد، به عنوان یک راهکار کلیدی، در دهه‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته است. هدف از این مطالعه، بررسی اصول و فرآیندهای اجرایی و پیاده‌سازی مدیریت تقاضا می‌باشد. بدین منظور، ابتدا مفهوم مدیریت تقاضا و نقش آن در کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری منابع تشریح می‌شود. سپس، ابزارهای اجرایی مختلف، شامل اقدامات تعرفه‌ای مانند قیمت‌گذاری پلکانی، و اقدامات غیرتعرفه‌ای همچون برنامه‌های آگاهی‌بخشی عمومی و مقررات اجباری مصرف، معرفی و تحلیل خواهند شد. در نهایت، برای دستیابی به اجرای هرچه مؤثرتر مدیریت تقاضای آب، نیاز به استفاده توأمان ترکیبی از سازوکارهای سیاستی و هماهنگی و هم‌افزایی بین نهادهای دولتی، خصوصی و جوامع محلی می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** مدیریت تقاضا آب، پارادایم مدیریت آب، اقدامات تعرفه‌ای و غیرتعرفه‌ای، هزینه‌ها و منافع مدیریت تقاضا.

مقدمه

آب یک ماده خالص (محدود و بدون جایگزین) برای زندگی بشر و ادامه نسل او و سایر اشکال حیات بر روی کره زمین است. درعین حال، آب کالا است؛ کالایی عمومی و نیز کالایی اقتصادی (زیرا عامل تولید و تجمع ثروت است). بهبود مدیریت منابع آب یکی از مسائل مهم جهانی است. هدف اصلی مدیریت آب تأمین آب پاک با کیفیت و کمیت کافی برای تمامی مصارف، مدیریت پایدار آن و ارائه خدمات بهداشتی و مدیریت فاضلاب برای همگان می‌باشد. در کشورهای توسعه‌یافته، با وجود دسترسی تقریباً جهانی به آب، همچنان دغدغه‌های عمده‌ای از جمله ارتقای مدیریت آب، بهبود کیفیت آب، نوسازی و به‌روزرسانی زیرساخت‌ها، اثرات تغییرات اقلیمی و اهمیت این موضوع در بالاترین سطوح سیاسی وجود دارد (Tortajada و همکاران، ۲۰۱۹). در سال ۲۰۱۴، ۵۴ درصد از جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کردند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ این رقم به دو سوم جمعیت جهانی برسد، که منجر به افزایش ۵۵ درصدی تقاضای آب خواهد شد. برای مدیریت شرایط آینده آب، شهرها باید چالش‌های فعلی مانند امنیت آب، مدیریت تقاضا، حفاظت و مصرف پایدار را حل کنند. تقاضای جهانی آب از ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۰ تقریباً هشت برابر شده و تا سال ۲۰۲۵ احتمالاً بیش از ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. بیش از ۶۵ درصد جمعیت جهان در آینده نزدیک با کمبود آب روبرو خواهند شد، که این موضوع به دلیل افزایش شهرنشینی و کاهش کیفیت و دسترسی به منابع آب است (Atiq و Arfanuzzaman، ۲۰۱۷؛ Ray Biswas و همکاران، ۲۰۲۳).

کشور ایران با کمبود مزمن آب و چالش‌های فزاینده‌ای مواجه است که ناشی از تغییرات اقلیمی، افزایش دما، تبخیر، تغییر الگوی بارش و

رشد جمعیت می‌باشد. این عوامل به کاهش منابع آب تجدیدشونده و افزایش تقاضای آب به دلیل توسعه شهری، صنعتی و بهبود رفاه عمومی منجر شده است. در نتیجه، مناطق بیشتری از کشور در آینده با کمبود شدید آب مواجه خواهند شد. برای مقابله با این چالش‌ها، بازسازی زیرساخت‌های قدیمی و ساخت زیرساخت‌های جدید اکنون به عنوان راه‌حل‌های مهندسی برای کاهش عدم قطعیت‌های اقلیمی آینده در چرخه هیدرولوژیکی، به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. متأسفانه، به دلیل مدیریت دولتی آب و نیز یارانه‌ای بودن قیمت آب در شهرها، فرهنگ استفاده صرفه‌جویانه از آب در ایران تضعیف شده و جایگاه خاص خود را (آن‌چنانکه نزد پیشینیان بود) از دست داده است. این وضعیت حاکی از ضرورت تغییر فوری در سیاست‌های مدیریت آب کشور به سمت کاهش جدی میزان مصرف است. در چنین شرایطی، چالش‌های جدی پیش‌روی مدیریت آب کشور در سال‌های آتی عبارتند از:

۱. کاهش سرانه آب تجدیدپذیر، ناشی از تغییر اقلیم و رشد جمعیت؛
 ۲. اُفت سفره‌های آب زیرزمینی، زوال کُمّی و کیفی این آب‌ها و نشست زمین، ناشی از برداشت بیش از حد آب؛
 ۳. رشد شوری در اراضی فاریاب و کاهش حاصل‌خیزی خاک، ناشی از کم‌آبیاری و فرسایش خاک‌ها؛
 ۴. هدررفت آب در شبکه‌های توزیع، ناشی از محدودیت منابع مالی؛
 ۵. بازده پایین کاربرد آب در تمامی بخش‌های مصرف‌کننده، ناشی از عدم توجه به ضرورت تحول فناورانه در کاربری‌های آب، که به نوبه خود معلول اقتصاد دولتی و ناکارآمد آب است.
- علاوه بر این موارد، عدم هماهنگی میان سازمان‌های ذی‌ربط نیز فرآیند حل مشکلات را پیچیده‌تر کرده است. راه‌حل جامع برای این مسائل در «حکمرانی محلی آب» بر اساس «مدیریت یکپارچه و مشارکتی آب» نهفته است که دستیابی به آن زمان‌بر است. با

این حال، یکی از مؤلفه‌های راه‌حل که به طور نسبی سریع‌تر قابل دستیابی است، مدیریت تقاضای آب (WDM^۱) می‌باشد.

تعریف مدیریت تقاضا

در سه دهه اخیر، به دلیل عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب و محدودیت‌های موجود در توسعه منابع آبی در بسیاری از نقاط

جهان، توجه فزاینده‌ای به مدیریت تقاضای آب معطوف شده است. با محدود و گران‌شدن گزینه‌های توسعه منابع آب، نقش مدیریت تقاضا به طور چشمگیری افزایش یافته است. به طور کلی، مدیریت تقاضا به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که بر کاربرد آب تأثیر گذاشته و باعث کاهش مصرف آن می‌گردد. در عین حال تعاریف مختلفی برای مدیریت تقاضای آب استفاده می‌شود که تعدادی از این تعاریف در جدول (۱) آورده شده است:

جدول ۱- تعاریف مدیریت تقاضا در مراجع مختلف

ردیف	منبع	تعریف
۱	DWAF ^۲ , ۱۹۹۹	گزینش و پیاده‌سازی راهبردها (سیاست‌ها و مشوق‌ها) توسط نهاد آب که تقاضا و کاربرد آب را تحت تأثیر قرار داده و منجر به بهبود در یک یا چند مورد از موارد زیر گردد: بهره‌وری اقتصادی، توسعه اجتماعی، برابری/ انصاف اجتماعی، حفاظت محیط‌زیست، پایداری عرضه‌ی آب، و مقبولیت سیاسی.
۲	IUCN ^۳ , ۲۰۰۰	یک رویکرد مدیریتی است که هدف آن حفظ منابع آب از طریق تحت تأثیر قرار دادن تقاضا است. این مدیریت شامل استفاده از مشوق‌هایی برای ارتقاء استفاده کارآمد و عادلانه از آب است. مدیریت تقاضای آب این پتانسیل را دارا است که موجب افزایش دسترسی به آب از طریق افزایش کارایی تخصیص و بهبود بازده مصرف گردد. اصول این مدیریت عبارت‌اند از: «بهره‌وری اقتصادی»، «دسترسی منصفانه»، «حفاظت از محیط‌زیست و پایداری اکوسیستم»، «افزایش مشارکت مردم در حکمرانی آب» و نیز «ارتقاء مسئولیت‌پذیری، پاسخگویی، و مقبولیت سامانه مدیریت آب».
۳	Khumalo, ۲۰۱۳	مشوق استفاده بهتر از منابع آب موجود از طریق مدیریت اقتصادی و کارآمد مصارف است، تا نیاز به افزایش عرضه را کاهش دهد؛ و شامل مجموعه‌ای از اقدامات و نظام‌های سازمانی برای افزایش سطح فنی، اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی، و کارایی نهادی در استفاده‌های مختلف از آب می‌باشد. مدیریت تقاضا بطور ویژه اهداف زیر را دنبال می‌نماید: • افزایش کارایی مصرف آب در دو بُعد: - درون بخشی: کاهش تلفات و استفاده‌های ناصحیح آب درون هر بخش؛ و - میان بخشی: بهینه‌سازی استفاده از آب با تخصیص معقول میان بخش‌های مختلف؛ با تأکید بر توسعه فعالیت‌هایی که صرفاً نیازمند آب جاری هستند (مانند: تولید انرژی، تفریحات، آبی‌پروری و ماهیگیری، و ...). • کسب ارزش بیشتر به ازای هر واحد از منابع آب استفاده شده. • صرفه جویی در سرمایه‌گذاری (زیرساخت‌ها و امور زیربنایی) مورد نیاز برای تأمین آب. • کمک به کاهش فشار بر منابع آب، به ویژه برای کاهش یا توقف برداشت اضافی (بیش از تجدیدپذیری) با هدف حفظ پایداری این منابع.
۴	Abu-Bakar, ۲۰۲۱	به مجموعه‌ای از تدابیر و سیاست‌ها اطلاق می‌گردد که هدف آن‌ها افزایش کارایی و حفظ منابع آب موجود است. سیاست‌های مدیریت تقاضای آب به دو نوع اصلی رویکردهای مرتبط با قیمت و رویکردهای غیر مرتبط با قیمت (تعرفه) تقسیم می‌گردد.

شایان ذکر است که در سال‌های اخیر اصطلاح «مدیریت مصرف» در کشور کاربرد زیادی یافته است. در این خصوص، باید توجه داشت که مدیریت تقاضا و مدیریت مصرف هر دو به مدیریت منابع آب مرتبط هستند، اما تفاوت‌های اصلی در تمرکز و رویکرد آن‌ها وجود دارد. «مدیریت تقاضا» بر کاهش و کنترل نیاز به آب پیش از بروز افزایش مصرف تمرکز دارد و شامل تدوین سیاست‌ها و اقدامات برای پیشگیری از افزایش تقاضا و عدم تعادل بین عرضه و تقاضا بوده و هدف آن بهبود بهره‌وری آب و جلوگیری از آلودگی

و تخریب منابع آبی است. این فرآیند بهبود بهره‌وری در مصرف آب و پیشگیری از آلودگی و تخریب منابع آبی را در پی دارد. در مقابل، «مدیریت مصرف» بر کنترل و بهینه‌سازی مصرف واقعی آب تمرکز دارد و شامل نظارت، اجرای محدودیت‌ها، و استفاده از تکنولوژی‌های صرفه‌جویی برای کاهش مصرف فعلی آب در سطوح مختلف است. به طور کلی، مدیریت تقاضا به پیشگیری از افزایش نیاز به آب پرداخته و مدیریت مصرف بر نحوه استفاده و بهره‌برداری از آب در عمل تمرکز دارد.

اکوسیستم، از جمله حفظ تنوع زیستی است. این سیستم‌ها باید اصل تاب‌آوری را در نظر بگیرند، به این معنا که باید قادر به حفظ کارکرد مؤثر خود تحت شرایط متغیر اجتماعی و زیست‌محیطی باشند. در نتیجه به موازات و به تدریج، توجه مدیران و مهندسين به مدیریت تقاضای آب در مقابل عرضه آب، و نیز صرفه‌جویی (WC^۵) در استفاده از آب معطوف گردیده است.

ارتباط مدیریت تقاضا با مدیریت آب

برای فهم بهتر مدیریت تقاضا، شناخت جامع‌تری از مدیریت آب مورد نیاز است. محیط مدیریت آب در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشهود است محیط طبیعی (هیدرولوژیکی) و بستر اطلاعاتی موجود احاطه کامل بر لایه‌های سیاستی، منابع (مالی، انسانی، ...) و مهندسی دارند. در واقع دامنه مدیریت و توان مهندسی محدود به وضعیت هیدرولوژیکی منطقه؛ داده، اطلاعات و دانش موجود است؛ همچنین، تابع امکانات (منابع) در دسترس نیز می‌باشد. علاوه بر این، در تصویر به طور واضح تفکیک نقش سیاست‌گذاران و مدیران از نقش مهندسين نمایش داده شده است.



شکل ۱- اجزاء و محیط مدیریت آب

همان‌گونه که از شکل بالا پیداست، مؤلفه‌های مدیریت آب به دو حالت می‌توانند دسته‌بندی گردند که در هر دو حالت شامل ۴ دسته (زیر بخش) می‌باشند. در حالت اول عناوین زیر بخش‌های اصلی عبارت‌اند از: تأمین، توزیع، کاربرد و جریان برگشتی. در حالت دوم عناوین این زیر بخش‌ها عبارت‌اند از: عرضه، تقاضا، واحد مصرف‌کننده و کنترل آلودگی. با توجه به این تقسیم‌بندی مشخص می‌شود که مدیریت تقاضا با سایر اجزای مدیریت آب ارتباط داشته و قسمتی از مدیریت‌های عرضه و واحد مصرف‌کننده را نیز شامل می‌شود. به نظر می‌رسد با این دیدگاه، مفهوم نسبتاً جامعی از مدیریت تقاضا حاصل می‌گردد. اکنون که مؤلفه‌های هر کدام از زیر بخش‌های مدیریتی مشخص شده‌اند، نیاز است تا اهداف هر کدام از آن‌ها نیز شناخته شوند.

در بیشتر دوره قرن بیستم، مدیریت تقاضای آب (WDM) توجه چندانی را به خود جلب نکرد. برنامه‌ریزان آب به سادگی با ضرب کردن میزان استفاده پیش‌بینی‌شده آب به ازای هر نفر (مصرف سرانه) در جمعیت تحت پوشش، مصرف آب آینده را محاسبه می‌کردند. سپس زیرساخت‌های آبی، نظیر مخازن و لوله‌های انتقال، برای ذخیره‌سازی و انتقال مقدار مورد نیاز ساخته می‌شدند. به عبارت دیگر، محور اصلی توسعه بر بهره‌برداری حداکثری از منابع طبیعی متمرکز بود که در حوزه منابع آب به شکل پارادایم «توسعه منابع آب» ظهور یافته است. این پارادایم با مراحل متوالی «پیش‌بینی نیازها»، «شناسایی منابع» و «اجرای پروژه‌های تأمین»، بیشتر بر جنبه عرضه آب تأکید داشت و به مدیریت تقاضا کمتر توجه می‌کرد (داوری و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، ترکیبی از عوامل باعث شد که برنامه‌ریزان به بازنگری در تمرکز محدود خود بر مدیریت عرضه بپردازند. این عوامل عبارت بودند از: (۱) کاهش منابع آب غیرقابل بهره‌برداری نزدیک به شهرها و دشواری بیشتر در دسترسی به منابع باقی‌مانده؛ (۲) منابع آب زیرزمینی آلوده و/یا در حال کاهش که عرضه موجود را محدودتر می‌کرد؛ (۳) افزایش خشکسالی‌ها و رقابت شدیدتر میان کاربران آب شهری، صنعتی و کشاورزی؛ (۴) افزایش آگاهی نسبت به هزینه‌های زیست‌محیطی توسعه‌های بزرگ مقیاس زیرساخت‌های آبی؛ (۵) افزایش درک عمومی از وابستگی متقابل آب، اکوسیستم‌های فعال و سلامت انسانی؛ و (۶) هزینه‌های بالا برای ساخت و نگهداری زیرساخت‌های آبی که اشتیاق به سرمایه‌گذاری را از سوی سازمان‌های آب کاهش می‌داد. نتیجه موارد مذکور، تغییر تمرکز از سمت و سوی بهره‌برداری منابع آب غیرقابل استفاده به روش‌های جدید تأمین نیازهای آب با منابع کمتر، هزینه پایین‌تر و کاهش تخریب اکولوژیکی بود (Stavenhagen و همکاران، ۲۰۱۸). مدیریت آب می‌تواند به عنوان ایجاد/ حفظ «تعادل بین عرضه و تقاضای آب» در بلندمدت، معرفی شود. بنابراین، مدیریت آب بایستی توانمند هم عرضه و هم تقاضای آب را شامل گردد. همزمان با تغییر پارادایم از توسعه منابع آب به مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM^۶)، رویکرد مدیریت تقاضا به عنوان یکی از گزینه‌های سیاستی و راهبردی برای مدیریت آب پررنگ شده است. بدین لحاظ و برای درک بهتر از ارزش مدیریت تقاضا، لازم است تا موقعیت آن در درون مدیریت یکپارچه منابع آب جانمایی گردد. در مطالعه‌ای دیگر، (Poff و همکاران، ۲۰۱۶) بیان کردند که سیستم‌های مدیریت آب پایدار باید به گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر تأمین نیازهای جامعه در طول عمر زیرساخت‌ها، به حفظ کارکردهای اکولوژیکی کلیدی نیز توجه داشته باشند. این کارکردها شامل تأمین طولانی‌مدت کالاها، خدمات، و ارزش‌های

هزینه‌ها/منافع مدیریت تقاضا به دو نوع «مستقیم» و «غیرمستقیم» تقسیم می‌شوند. هزینه‌ها/منافع مستقیم، به پیاده‌سازی مدیریت تقاضا مربوط می‌شوند؛ در حالی که هزینه‌ها/منافع غیرمستقیم، به تبعات ناشی از پیاده‌سازی مدیریت تقاضا ارتباط پیدا می‌کنند.

۱-۲- هزینه‌ها و منافع مستقیم

مانند هر پروژه دیگری، پروژه‌های مدیریت تقاضا (اعم از رویکردهای سخت و یا نرم) هزینه‌هایی در بر دارند که به طور مشخص ناشی از پیاده‌سازی یک اقدام یا سیاست است و در مقابل این پروژه‌ها دارای منافع بسیاری نیز می‌باشند. برای انتخاب گزینه‌های برتر برای هر مورد، بایستی هزینه‌ها و منافع برآورد و تحت تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در هر حال پس از چنین آنالیزی بایستی معلوم گردد تأمین هزینه‌ها بر عهده کیست و منافع آن به کجا واصل می‌شود. در جدول‌های (۲) و (۳) فهرستی از هزینه‌ها و منافع مربوط به پیاده‌سازی سیاست‌های مدیریت تقاضا به تفکیک بخش‌های مصرف‌کننده ارائه شده است.

جدول ۲- فهرستی از هزینه‌های پیاده‌سازی مدیریت تقاضا و اهمیت آن‌ها در مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی

ردیف	اقدامات	شهری (خانگی، عمومی، خدمات)	کشاورزی و دامداری (+فضای سبز)	صنعت و معدن
۱	نصب و نگهداری تجهیزات اندازه‌گیری آب	√	√	√
۲	مشوق‌های مالی برای فناوری‌های جدید آبیاری (برای مثال آبیاری قطره‌ای)	-	√√	-
۳	برنامه‌های آموزشی و آگاهی‌بخشی	√√	√	√
۴	تغییر فضای سبز شهری از طریق جایگزینی و کاشت گیاهان کم‌آب‌بر	√	-	-
۵	ترویج «روش‌های علمی برنامه‌ریزی آبیاری» به کشاورزان و فضای سبز شهری	√	√√	-

جدول ۳- فهرستی از منافع پیاده‌سازی مدیریت تقاضا و اهمیت آن‌ها در مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی

ردیف	اقدامات	شهری (خانگی، عمومی، خدمات)	کشاورزی و دامداری (+فضای سبز)	صنعت و معدن
۱	کاهش مقدار کود مصرفی به دلیل کاهش زه‌آب‌ها	-	√	-
۲	کاهش آب بدون درآمد به دلیل کاهش هدررفت فیزیکی (با مدیریت فشار)	√√	√	√
۳	کاهش پساب‌ها و زه‌آب‌ها (به دلیل مصرف آب کم‌تر)	√	√√	√
۴	کاهش هزینه‌های تصفیه فاضلاب (به دلیل مصرف آب کم‌تر)	√√	-	√
۵	افزایش عملکرد و کیفیت محصول در نتیجه بکارگیری برنامه‌ریزی علمی آبیاری	-	√	-

۲-۲- هزینه‌ها و منافع غیرمستقیم

اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا ممکن است موجب تحمیل برخی فشارها (نارضایتی) و یا وقوع برخی بهبودها برای مصرف‌کنندگان آب گردد. این فشارها/بهبودها را می‌توان به عنوان هزینه/درآمد نامحسوس در نظر گرفت که بایستی در ارزیابی گزینه‌ها و انتخاب گزینه برتر، مورد توجه قرار گیرند. منظور از هزینه‌های غیرمستقیم، نارضایتی‌های ناشی از اقدامات

مدیریت تقاضای آب است که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری و پیش‌بینی نیستند. تعدادی از آن‌ها عبارت‌اند از: ۱- افزایش آب‌بها؛ ۲- هزینه‌های مترتب بر افزایش بازده مصرف آب در خانه‌ها (خرید لوازم کم‌آب‌بر خانگی)، در صنعت (تغییر فناوری تولید به منظور کاهش مصرف آب) و کشاورزی (تغییر سامانه آبیاری)؛ ۳- کاهش اجباری مصرف آب (کوچک‌تر شدن باغچه‌ها، استخرهای شنا، وان‌های حمام و دیگر مصارف غیر ضروری آب)؛

۴- از دست رفتن فرصت‌های شغلی سنتی در بخش کشاورزی و لذا کاهش استانداردهای زندگی روستائیان؛ و ۵- کاهش کیفیت ارائه خدمات شرکت‌های تأمین آب (آبفا، ...) ناشی از کاهش درآمد این شرکت‌ها.

همچنین منظور از منافع غیرمستقیم، منافع ناشی از اقدامات مدیریت تقاضای آب است که تعدادی از آن‌ها عبارت‌اند از: ۱- فراهم ساختن آب ارزان‌تر برای قشر کم درآمد؛ ۲- افزایش آگاهی و توانمندی جوامع؛ ۳- رشد فرصت‌های شغلی جدید؛ ۴- تأمین آب برای جمعیت بیشتر، ناشی از کاهش سرانه مصرف و بدون نیاز به

تغییر در شبکه موجود آب شهری؛ ۵- صرفه‌جویی در مصرف انرژی و ۷- محیط‌زیست سالم‌تر به دلیل کاهش تولید فاضلاب/پساب (و حتی به دلیل بازچرخانی آب در مقیاس واحدهای مسکونی).

۳) سیاست‌های مدیریت تقاضای آب

(Stavenhagen و همکاران، ۲۰۱۸) در مطالعه‌ای، سیاست‌ها و تأثیرات مدیریت تقاضای آب را براساس دو دسته‌بندی اصلی اقدامات تعرفه‌ای و غیرتعرفه‌ای بر کاهش مصرف آب بررسی نمودند که به طور خلاصه در جدول (۴) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴- مروری بر سیاست‌ها و پیامدهای مدیریت تقاضای آب (WDM)

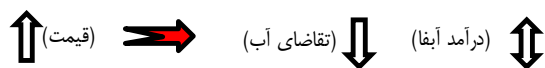
سیاست‌ها	تأثیرات
۱. تعرفه‌ای	• مصرف آب معمولاً نسبت به قیمت بی‌کاهش است. • افزایش قیمت آب منجر به کاهش مصرف آب می‌شود. • اثر بازگشتی: کاهش مصرف آب به دلیل افزایش قیمت معمولاً پس از مدتی کاهش می‌یابد و ممکن است به سطحی بالاتر از پیش از تغییر قیمت برسد. • مصرف آب تا یک آستانه خاص (برای نیازهای اساسی، بهداشت و نظافت) به تغییرات قیمت بی‌کاهش است، در حالی که هر میزان آب اضافی پس از این آستانه نسبت به قیمت، حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. • آگاهی از قیمت آب بر مصرف آب تأثیر می‌گذارد.
	• ساختارهای تعرفه‌ای هوشمند، مانند قیمت‌گذاری به صورت پلکانی، مصرف آب را کاهش می‌دهند. • با این حال، با تلاش برای ایجاد تعرفه‌ای منصفانه‌تر یا کارآتر معمولاً این سیستم پیچیده‌تر می‌شود و در نتیجه، فهم آن برای مصرف‌کنندگان دشوارتر خواهد بود. • تعرفه‌گذاری پلکانی در کشورهای در حال توسعه اغلب به نتایج ناکارآمد منجر می‌شود و نابرابری را ترویج می‌کند.
۲. غیرتعرفه‌ای	• کاهش نشت در زیرساخت‌های شبکه انتقال و توزیع آب به عنوان یکی از مؤثرترین تدابیر مدیریت تقاضای آب در نظر گرفته می‌شود. • با تدوین استانداردهای لوله‌کشی و برچسب‌گذاری کارایی در استرالیا و ایالات متحده، مصرف آب به میزان ۵ تا ۱۰ درصد طی ۱۰ سال کاهش یافت. • ضوابط بازدارنده مالی اعمال شده در کالیفرنیا تحت تأثیر خشکسالی توسط بیش از ۵۰ درصد مشتریان رعایت نشد.
	• پایش مصرف آب باعث صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۱۰ تا ۲۵ درصد به دلیل ارائه اطلاعات، برنامه‌ریزی برای تبلیغات و تعمیرات نشت‌ها می‌شود. • به طور میانگین مصرف آب به میزان ۲۰ درصد در برنامه‌های ایالات متحده، کاهش یافت. • پایش مصرف آب و اطلاع‌رسانی آن موجب افزایش آگاهی شهروندان نسبت به ضرورت صرفه‌جویی در آب می‌شود.
	• کمپین‌های اطلاع‌رسانی، عامل مهمی در جهت تشویق به استفاده معقول‌تر از آب تلقی می‌شوند. • پخش‌های رسانه‌ای می‌توانند به‌طور موقت تقاضای آب را حدوداً ۲ تا ۵ درصد کاهش دهند. • اثربخشی این کمپین‌ها به وضوح مشخص نیست و می‌تواند از ۰ تا ۸ درصد متغیر باشد.
	• صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب با استفاده از سردوش‌های کم‌مصرف. • در ایالات متحده مصرف آب خانگی می‌تواند از طریق برنامه‌های «نوسازی»^۸ به میزان ۹-۱۲ درصد کاهش یابد، یا از طریق تعویض کامل لوازم خانگی با لوازم بسیار کارآمدتر و تعمیر نشت‌های قبلی (مانند نشت توالت یا سایر نشت‌ها) به میزان ۳۰-۵۰ درصد کاهش پیدا کند.

۳-۱- تعرفه‌گذاری

تعرفه‌گذاری آب، یکی از راهکارهای مهم برای مدیریت بهینه منابع آب، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی و بحران‌های محیط‌زیستی می‌باشد. در این زمینه، توجه به مفاهیمی همچون کشش قیمت و تابع تقاضا ضروری می‌باشد. همچنین، روش‌ها و گزینه‌های مختلفی برای تعیین قیمت آب وجود دارد.

کشش قیمت و تقاضای آب: تقاضا به طور کلی در علم اقتصاد به علاقه و تمایل مصرف‌کنندگان برای خرید کالاها یا خدمات خاص اشاره دارد. در زمینه آب، این مفهوم معمولاً معادل «نیاز آبی» در نظر گرفته می‌شود. اصولاً، طبق قانون کلی اقتصاد، با کاهش قیمت یک کالا، تقاضا برای آن کالا افزایش می‌یابد، زیرا نیاز واقعی به آن کالا به هر قیمتی باید تأمین شود. کشش تقاضا به واکنش مصرف‌کنندگان نسبت به تغییرات قیمت اشاره دارد. در این زمینه، کشش قیمت به عنوان یک شاخص کلیدی مطرح است که به معنی درصد تغییر در میزان تقاضا به ازای یک درصد تغییر در قیمت است. در خصوص کشش قیمت آب، این شاخص به سنجش میزان تمایل مصرف‌کنندگان به کاهش یا افزایش مصرف آب در پاسخ به تغییرات قیمت می‌پردازد. به عبارت دیگر، کشش قیمت آب میزان تغییر در تقاضا را به ازای تغییرات قیمتی نشان می‌دهد؛ یعنی چگونه افزایش قیمت آب می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب و کاهش قیمت آن به افزایش مصرف

آب منجر شود. شکل (۲) رابطه بین عوامل مختلف مرتبط با کشش قیمت را نمایش می‌دهد.

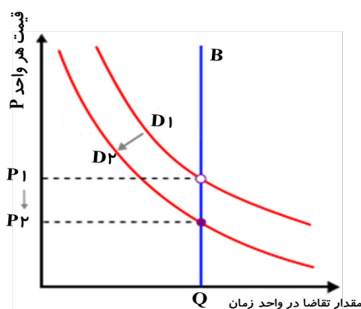


شکل ۲- رابطه بین روندهای عوامل مختلف مرتبط با کشش قیمت

از مطالعات گزارش شده تاکنون می‌توان یک نتیجه استخراج نمود: تقاضا نسبت به افزایش قیمت دارای نوسان است. از طرف دیگر بین مقادیر محاسبه شده، ارتباط و تناسبی دیده نمی‌شود و این می‌تواند به دلیل نتیجه به کار بستن روش‌های گوناگون (قیمت متوسط، حاشیه‌ای، ...) در پژوهش‌ها باشد. همچنین باید در نظر داشت که تعرفه‌ها علاوه بر معقول بودن، بایستی عادلانه نیز باشند. مصارف مسکونی به دلیل برخی عوامل از پیچیدگی بالاتری برخوردارند. تفاوت در عواملی مانند نوع منازل (آپارتمان یا ویلا)، بُعد خانوار (تعداد ساکنین هر خانه)، فصل و نیازهای متغیر، و ... موجب این پیچیدگی می‌گردند. عدم توجه به این تفاوت‌ها، موجب بی‌عدالتی در تعیین تعرفه‌ها می‌گردد (جدول ۵). گرچه، محدودیت‌های موقت (مثلاً فصلی) منابع آب ممکن است شرکت‌های آب و فاضلاب را وادارند تا موقتاً برای مشتریان، بدون توجه به عدالت، محدودیت اعمال نمایند.

جدول ۵- عوامل تمایز در تعرفه‌گذاری آب خانگی

عامل	ناعادلانه	عادلانه
خانوار	ثابت: بدون توجه به تعداد نفرات ساکن هر واحد مسکونی؛ مثلاً ۲۰ مترمکعب در ماه برای هر خانه (فرض بُعد خانوار ثابت)	متغیر: با توجه به تعداد نفر ساکن هر واحد مسکونی؛ مثلاً ۴ مترمکعب در ماه برای هر نفر
تفاوت فصلی	قیمت ثابت در تمام فصول بدون توجه به مصارفی چون کولر آبی و آبیاری (و کمک به فضای سبز شهری)	تعدیل قیمت در تابستان برای حد معقول این گونه کاربری‌ها، به‌ویژه برای درختان (کمک به فضای سبز شهری)
تفاوت نوع مسکن	ثابت برای آپارتمان و ویلا (بدون توجه به فضای سبز)	متغیر برای این دو
تفاوت درآمد خانوار	یکسان برای همه اقشار و دارای قیمت از یک لیتر تا هر مقدار	تا حد ۵۰ لیتر در روز مجانی (حمایت از اقشار ضعیف)؛ و مازاد بهای متفاوت (تابعی از مساحت زمین و منطقه مسکونی، به‌عنوان یک شاخص میزان برخورداری خانوار)



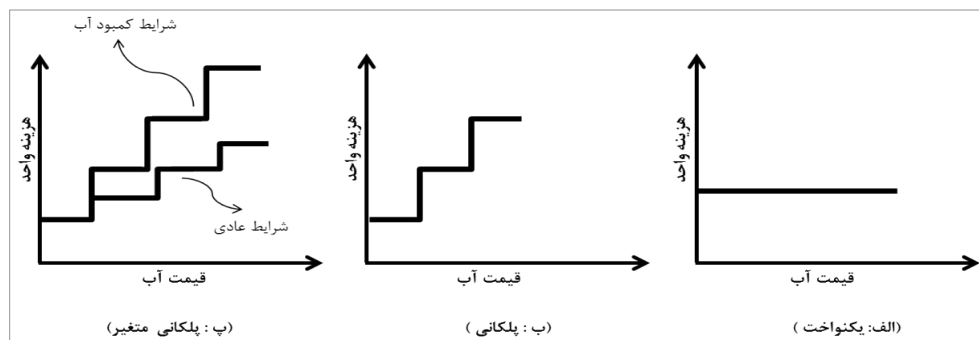
شکل ۳- توابع تقاضا

تابع تقاضا: تابع تقاضا که در شکل (۳) نشان داده شده است، ارتباط بین مقدار کالا و تمایل خریدار به خرید با قیمت معین را نشان می‌دهد. منحنی‌های تابع تقاضا عموماً دارای شیب منفی هستند. منحنی‌های D_1 ، نمونه تقاضای معمول هستند که نشان می‌دهند که هرچه قدر قیمت کمتر، تقاضا بیش‌تر خواهد شد. اما منحنی B ، منحنی تقاضایی است که در آن رابطه‌ای میان تقاضا و قیمت مشاهده نمی‌شود. این حالت صرفاً در نیازهای بسیار مبرم (نیازی که به هر قیمت بایستی برآورده گردد) می‌تواند مصداق یابد.

گزینه‌های قیمت‌گذاری: به طور سنتی تاکنون متولیان آب، افزایش تقاضای آب را با تأمین آب بیش‌تر (و نه تغییر قیمت) پاسخ داده‌اند. افزایش قیمت آب برای مصارف خانگی به منظور کنترل تقاضا یک راه‌حل جدی و مؤثر است که بایستی بدان بیشتر پرداخته شود. شکل (۴) گزینه قیمت‌گذاری آب را نمایش می‌دهد: ۱- قیمت یکنواخت (شکل ۴- الف)؛ ۲- قیمت پلکانی با در نظر گرفتن حداقل نیاز شرب و بهداشتی (شکل ۴- ب)؛ ۳- قیمت پلکانی متغیر (فصلی، خشکسالی/ ترسالی) با در نظر گرفتن حداقل نیاز شرب و بهداشتی (شکل ۴- پ). قیمت‌گذاری پلکانی متغیر، روشی است که هم‌زمان دو منظور را برآورده می‌سازد. ۱- جبران هزینه‌های تأمین و توزیع آب، ۲- معقول ساختن مصرف در شرایط محدودیت منابع.

در تمامی حالات فوق می‌توان مقدار هزینه ماهانه را ثابت در نظر گرفت. از دو منحنی ارائه شده در شکل (۴- پ) منحنی بالایی مربوط به شرایط کمبود آب و منحنی پایینی مربوط به

شرایط عادی می‌باشد. گرچه در حداقل مصرف (نیازهای شرب و بهداشتی) هردو منحنی بر هم منطبق‌اند، اما در پلکان‌های بعدی کاملاً مشهود است که قیمت در شرایط کمبود به سرعت افزایش می‌یابد و لذا منجر به کاهش تقاضای آب خواهد شد. به‌طور کلی می‌توان گفت، قیمت‌گذاری آب به عنوان یک ابزار مدیریت تقاضا ممکن است در برخی موارد به حفظ آب کمک کند، اما این رویکرد در همه شرایط مؤثر نیست. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش قیمت‌ها، همیشه عامل اصلی در کاهش مصرف آب نیست و اقداماتی مانند سرمایه‌گذاری در تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها، اجرای مقررات، نصب کنتورهای فردی و کمپین‌های آگاهی‌رسانی عمومی برای تشویق به صرفه‌جویی در مصرف آب، تأثیر بیشتری در حفاظت از منابع آب دارند. دلیل این امر آن است که هزینه‌های آب و فاضلاب، معمولاً سهم کمی از درآمد خانوار را تشکیل می‌دهد، به همین دلیل تغییر قیمت‌ها تأثیر چشمگیری بر رفتار مصرفی مردم ندارد (Tortajada و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۴- گزینه‌های مختلف قیمت‌گذاری آب

۲-۲- اصلاح فرآیند تخصیص و تحویل آب

فرآیند تخصیص آب به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که برای تعیین و تخصیص منابع آب به مصرف‌کنندگان مختلف (کشاورزی، شهری، صنعتی و غیره) انجام می‌شود. در صورت تخصیص مناسب و سازگار با نوسانات آب، اطمینان از استفاده بهینه و عادلانه از منابع آبی در دسترس و پاسخگویی به نیازهای متنوع و متغیر مصرف‌کنندگان حاصل می‌گردد. لذا برای مدیریت مؤثر تقاضای آب، نیاز است که متولیان منابع آب از روش‌های مختلف تخصیص موجود و پیامدهای آن‌ها بر منابع آبی، آگاهی داشته باشند. در زمینه تخصیص منابع آبی، توجه به نکات زیر حائز اهمیت می‌باشد:

الف) فرآیند تخصیص آب در تمامی بخش‌های مصرفی (کشاورزی، شهری، صنعت) در کشور قابل تقسیم به دو نوع می‌باشد. (۱) روش‌های سنتی: که عموماً مبتنی بر تقسیم آب بر اساس سهم (و نه حجم) شکل گرفته است. این سیستم بیش‌تر به نوسانات آب و هوایی واکنش نشان می‌دهد و به شرایط تغییرات اقلیمی سازگار است. نمونه‌ای از این سیستم، عبارتند از: حقابه‌های قدیمی‌تر

مانند برداشت آب از قنوت، چشمه‌ها و برخی از دهانه‌های آبگیر. همچنین بیش‌تر قراردادهای تحویل آب در پایاب سدها نیز از همین قاعده پیروی می‌نمایند. (۲) روش‌های نوین: در این سیستم، مجوزهای برداشت آب از چاه‌ها عموماً بر اساس ساعت کارکرد و دبی صادر می‌گردند. این نوع مجوزها اشاره به برداشت حجم ثابت داشته و لذا با نوسان تجدیدپذیری منابع آب (نوسانات آب و هوایی/ اقلیمی) انطباق ندارند؛ چنین مجوزهایی در شرایط کاهش تجدیدپذیری منابع آب در نتیجه یک خشکسالی طولانی، منجر به افت آبخوان می‌گردد. این روش معمولاً در شرایطی که نیاز به برنامه‌ریزی دقیق‌تر و کنترل بیش‌تری است، به کار می‌رود. ب) در حال حاضر، حریم‌های هیدرولیکی در مقوله تخصیص آب لحاظ می‌گردد، اما توجه کافی به حریم‌های هیدرولوژیکی صورت نمی‌گیرد. منظور از حریم هیدرولیکی، حفظ فاصله کافی بین چاه جدید تا نقاط برداشت موجود است؛ به نحوی که چاه جدید اثر منفی بر نقاط برداشت موجود نداشته باشد. منظور از حریم هیدرولوژیکی، توجه به وابستگی منابع آب یک حوضه اعم از سطحی و زیرزمینی، از بالادست تا پایین‌دست می‌باشد؛ به

نحوی که پایایی منابع آب موجود حوضه و پایایی برداشت از این منابع (در نقاط برداشت موجود) حفظ گردد. نتیجه این نقص در مدیریت، برداشت بیش از حد منابع آب و بحران‌های آبی ناشی از آن است. به‌ویژه، عدم توجه به حریم هیدرولوژیکی موجب خشک شدن قنات و چاه‌ها و افزایش رقابت مخرب میان بهره‌برداران از منابع عمومی شده است. برای رفع این مشکلات، پیشنهاد می‌شود که مجوزهای برداشت آب بر اساس سهم‌بندی منابع و با در نظر گرفتن حقایق‌های قدیمی صادر شوند و میزان برداشت به کمتر از ۷۵ درصد آب تجدیدپذیر محدود گردد تا فشار بر منابع کاهش یابد و پایایی منابع آب حفظ شود.

پ) با هدف افزایش بهره‌وری در شرایط کمبود آب، آبران اقدام به جلوگیری از تلفات آب و یا بازچرخانی آب می‌کنند. این عمل در نهایت نتیجه عکس داشته و منجر به افزایش مصرف آب (مصرف به معنای برداشت منهای برگشت) می‌گردد؛ و در حوضه‌ای که دارای عدم تعادل است و از افت مزمن کمیت و کیفیت آب رنج می‌برد، افزایش مصارف به هیچ وجه قابل تحمل نیست. به عنوان مثال، اگر در کشاورزی با آبیاری سطحی سنتی، بخش زیادی از آب مصرفی به منابع زیرزمینی باز می‌گردد و در پایین‌دست قابل بازیابی است؛ اما با استفاده از فناوری‌های جدید مانند لوله‌کشی، بخش بیشتری از آب به مصرف نهایی می‌رسد و بنابراین آب برگشتی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به کاهش دسترسی پایین‌دست به آب و تشدید بحران آب در حوضه شود.

با این حال، چنانچه واحدی با تغییر فناوری درصدد افزایش بهره‌وری آب باشد، صرفاً حق دارد تا فقط روی سهم مصرفی خویش تمرکز نماید. زیرا آب برگشتی منبعی برای تأمین آب آبران پایین‌دست می‌باشد. در واقع تخصیص آب به یک واحد (کشاورزی/ صنعتی/ خدماتی)، هم بر مبنای مجوز برداشت و هم با توجه به فناوری کاربرد آب در آن واحد باید برنامه‌ریزی گردد؛ و هرگونه تغییر فناوری بایستی مجدداً مبنای تعدیل تخصیص قرار گیرد. غفلت از این مهم موجب رشد مصرف آب در حوضه می‌شود؛ و لذا در شرایط وخیم، قطعاً منجر به تشدید وضعیت آب خواهد گردید.

ت) علاوه بر کمیت آب برگشتی، کیفیت آن نیز نقشی اساسی در نگهداری و حفاظت از منابع آب دارد. مدیریت تقاضا، تا جای ممکن در مجوزهای بهره‌برداری از منابع آب بایستی حداقل کیفیت آب برگشتی را نیز مشخص و معین نماید؛ و البته برای عدم برگشت آب با حجم و کیفیت معین، بایستی جریمه‌های بازدارنده تصویب و اعمال گردد.

۳-۳- ضوابط اجباری، مشوق‌ها و بازدارنده‌های مالی

با توجه به اهمیت مدیریت تقاضا، تدوین ضوابط یا قوانین و نیز اجباری کردن برخی ضوابط (تعریف استاندارد) برای کاهش

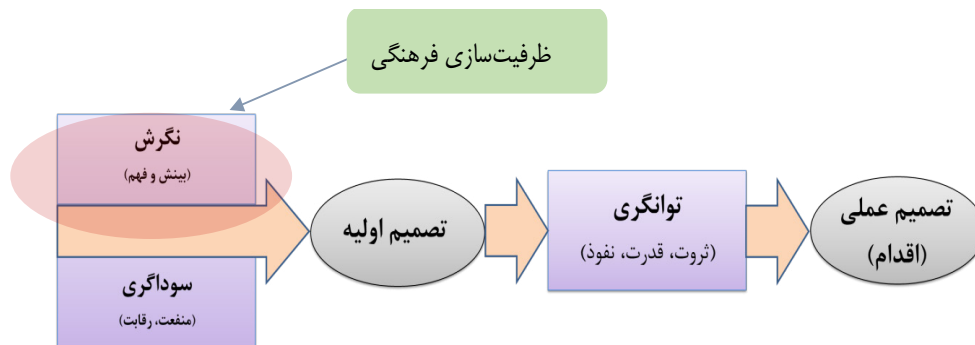
مصرف آب، ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان مثال، ضوابط اجباری می‌تواند صنایع را ملزم به بازچرخانی آب برگشتی و کاهش آلودگی به حدی معین نماید که این امر منجر به استفاده چندباره از آب خواهد شد. علاوه بر این، بازچرخانی موجب کاهش حجم فاضلاب دفع‌شده به محیط می‌گردد که از لحاظ محیط‌زیستی مطلوب است. متقابلاً به دلیل وجود ضوابط اجباری برای دفع فاضلاب (کاهش آلاینده‌ها) نیاز برای تصفیه کامل فاضلاب اغلب منجر به افزایش استفاده مجدد از آب شده است. پرداخت مشوق‌های مالی به‌طور مستقیم (به واحد تولیدی) یا غیر مستقیم (یارانه به تولید کننده تجهیزات بازچرخانی و تصفیه)، روند کاهش تقاضای آب برای صنعت را تشدید می‌نماید.

از طرفی، افزایش جریمه‌های مؤثر و فوری برای صنایع متخلف که آلودگی بیش از حد مجاز، تولید و دفع می‌کنند، انگیزه‌ای قوی برای کاهش مصرف آب فراهم می‌آورد. در صورتی که جریمه‌ها بر مبنای حجم فاضلاب تخلیه‌شده اعمال شوند، صنایع به افزایش سهم بازچرخانی آب ترغیب خواهند شد و حجم نهایی فاضلاب کاهش خواهد یافت. اگر این جریمه‌ها بر اساس میزان آلاینده‌ها وضع شوند، صنایع به نصب تأسیسات تصفیه فاضلاب تشویق خواهند شد که این تأسیسات، فاضلاب را با کیفیت بالاتری تصفیه می‌کنند و این آب تصفیه‌شده می‌تواند به جای تخلیه، مجدداً در فرآیند تولید استفاده شود. به طور کلی، تنظیم جریمه‌ها بر اساس هر دو معیار حجم و آلودگی بهترین راهکار است که به طور همزمان بازچرخانی آب (=کاهش تقاضا) و تصفیه فاضلاب (=کاهش آلودگی) را تقویت می‌کند.

۴-۳- ظرفیت‌سازی فرهنگی

(Tortajada و همکاران، ۲۰۱۹) بیان کردند که پویای آموزشی می‌تواند تأثیر مثبتی بر رفتار خانوارها در انتخاب فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب و ایجاد عادات صرفه‌جویی داشته باشند.

یکی دیگر از روش‌های مدیریت تقاضا، افزایش درک و پذیرش مصرف‌کنندگان از «محیط طبیعی، منابع آب و عواقب رفتار غیرمسئولانه نسبت به این دو» می‌باشد. برای درک بهتر اثر این روش بر الگوی رفتار کنشگران (افراد حقیقی یا حقوقی)، در شکل (۵) عوامل مؤثر بر موضع‌گیری ایشان در فضای کنشگری نمایش داده شده است. در شکل مشهود است که اقدام هر کنشگر نتیجه سه عنصر توانگری، سوداگری و منفعت‌طلبی، و نگرش وی است. ظرفیت‌سازی فرهنگی به دنبال تغییر نگرش کنشگر نسبت به شرایط پیرامونش از طریق رشد «جامع‌نگری» و «واقع‌بینی» وی می‌باشد.



شکل ۵- مدل رفتار کنشگران

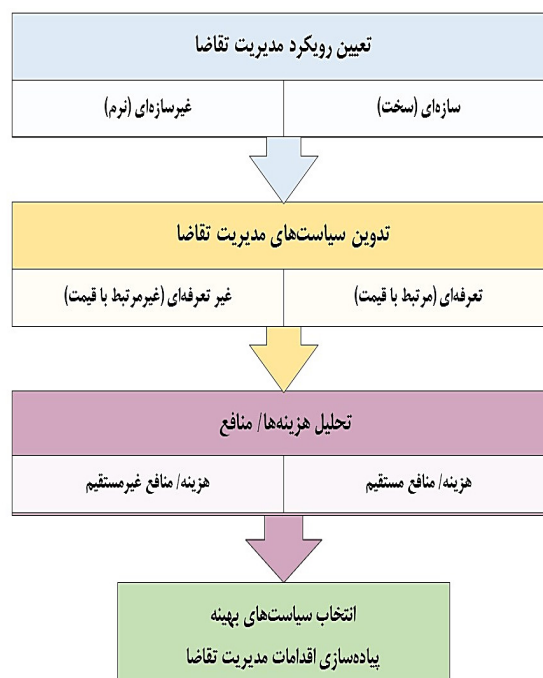
نتیجه گیری

در مواجهه با چالش‌های پیچیده مدیریت منابع آب، تدوین استراتژی‌های مؤثر برای مدیریت تقاضا امری حیاتی است. یکی از اصلی‌ترین ابزارها در این راستا، قیمت‌گذاری مناسب آب است که باید به گونه‌ای طراحی شود که به کاهش مصرف و افزایش کارایی منجر گردد. این سیاست باید به نحوی تنظیم شود که هزینه‌های واقعی آب را بازتاب دهد و برای افراد و صنایع، انگیزه مالی برای کاهش مصرف و استفاده از فناوری‌های بهره‌وری آب را فراهم کند. علاوه بر این، فرهنگ‌سازی و آموزش به عنوان ابزاری کلیدی در تغییر رفتار مصرف‌کنندگان و ارتقاء آگاهی عمومی در مورد اهمیت مدیریت تقاضا و مصرف بهینه آب بسیار مهم است. این امر می‌تواند از طریق برنامه‌های آموزشی، پوشش‌های عمومی و ارتقاء آگاهی در مورد تأثیرات محیطی و اقتصادی مصرف آب، حاصل گردد.

نقش سازمان‌ها و نهادهای متولی حوزه آب و فاضلاب در این فرآیند نیز بسیار اساسی است. آن‌ها بایستی به عنوان نهادهای اجرایی و نظارتی، در تدوین و پیاده‌سازی سیاست‌های قیمت‌گذاری و همچنین برنامه‌های فرهنگی و آموزشی فعال باشند. همچنین، بایستی علاوه بر نظارت بر اجرای درست سیاست‌های قیمتی، با فراهم کردن ابزارها و زیرساخت‌های لازم برای مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف آب، نقش کلیدی ایفا کنند. در نهایت، بایستی تأکید نمود که با ترکیب بهینه‌ای از انواع سیاست‌های اقتصادی، ابزارهای اجرایی و فرهنگ‌سازی، می‌توان به نتیجه مطلوب در مدیریت تقاضا و کاهش بحران‌های مربوط به منابع آب رسید. لذا، توجه توأمان به اقتصاد، ابزارها و فرهنگ‌سازی به عنوان اصول اصلی چارچوب پیاده‌سازی مدیریت تقاضا، برای دستیابی به راه‌حل‌های پایدار و مؤثر ضروری است.

نتیجه دیگر ناشی از تغییر نگرش کنشگران، تغییر در سوداگرایی ایشان است. بدین معنی که کسب فهم عمیق‌تر از پیرامون (یعنی واقع‌بینی) و نیز دانستن پیامد رفتارهای نابخردانه بر پیرامون (یعنی جامع‌نگری)؛ موجب آن می‌شود که: «آن‌چه را تا دیروز منفعت می‌پنداشته، امروز خسارت بداند». برای مثال آب‌برانی که به جان آب زیرزمینی افتاده و آن را تاراج می‌نمایند، هرگاه به این درک برسند که عاقبت این رفتار به ضرر همه آن‌هاست، به احتمال زیاد به دنبال راه‌حلی جمعی برای توقف این تاراج خواهند بود.

در مجموع براساس مطالعات انجام شده و موارد ذکر شده در این بخش می‌توان چارچوب کلی پیاده‌سازی مدیریت تقاضا را به شرح شکل (۶) ترسیم نمود.



شکل ۶- چارچوب پیاده‌سازی مدیریت تقاضا آب

- partment of Water Affairs and Forestry, Pretoria, south africa.
- IUCN. (2000). Vision for Water and Nature: A World Strategy for Conservation and Sustainable Management of Water Resources in the 21st Century. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN.
- Khumalo, S. (2013). Water crisis in cities: an investigation into the contribution of water demand management towards mitigating the scarcity of potable water in the city of Bulawayo. University of South Africa, Pretoria. <http://hdl.handle.net/10500/13785>
- Poff, N. L., Brown, C. M., Grantham, T. E., Matthews, J. H., Palmer, M. A., Spence, C. M., Wilby, R. L., Haasnoot, M., Mendoza, G. F., Dominique, K. C., & Baeza, A. (2016). Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. *Nature Climate Change*, 6 (1), 25–34. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nclimate2765>
- Ray Biswas, R., Sharma, R., Gyasi-Agyei, Y., & Rahman, A. (2023). Urban water security: water supply and demand management strategies in the face of climate change. *Urban Water Journal*, 20(6), 723–737. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2209549>
- Stavenhagen, M., Buurman, J., & Tortajada, C. (2018). Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. *Cities*, 79, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.03.008>
- Tortajada, C., González-Gómez, F., Biswas, A. K., & Buurman, J. (2019). Water demand management strategies for water-scarce cities: The case of Spain. *Sustainable Cities and Society*, 45, 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.044>
- ۶- این استانداردها شامل مجموعه‌ای از قوانین و مقررات فنی هستند که به نحوه نصب، طراحی و نگهداری سیستم‌های لوله‌کشی و تجهیزات مرتبط با آب می‌پردازند. هدف آن‌ها این است که اطمینان حاصل کنند که سیستم‌های آبرسانی به طور مؤثر عمل کرده و در عین حال مصرف آب را به حداقل برسانند. به عنوان مثال، استانداردهای لوله‌کشی می‌توانند شامل الزامات برای استفاده از تجهیزات با کارایی بالا یا طراحی سیستم‌های لوله‌کشی به گونه‌ای باشند که از نشت و هدررفت آب جلوگیری کنند.
- ۷- این برچسب‌ها برای محصولات و تجهیزات مختلف، از جمله لوازم بهداشتی مانند شیرآلات و دستشویی‌ها، استفاده می‌شوند. برچسب‌گذاری کارایی اطلاعاتی درباره میزان مصرف آب محصول را ارائه می‌دهد و مصرف‌کنندگان را قادر می‌سازد تا انتخاب‌های آگاهانه‌تری داشته باشند. این برچسب‌ها معمولاً نشان‌دهنده کارایی آب محصول هستند و به آن‌ها کمک می‌کند تا کالاهایی را که مصرف آب پایین‌تری دارند، شناسایی کنند.
- 8-Retrofit Programs

منابع

- داوری، ک، اسلامی، الف، عمرانیان، ح، درخشان، ه، و سالاریان، م. (۱۴۰۳). مدیریت آب (منابع و کاربردها). چاپ اول. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد مشهد.
- Abu-Bakar, H., Williams, L., & Hallett, S. H. (2021). A review of household water demand management and consumption measurement. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125872>
- Arfanuzzaman, M., & Atiq Rahman, A. (2017). Sustainable water demand management in the face of rapid urbanization and ground water depletion for social-ecological resilience building. *Global Ecology and Conservation*, 10, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.01.005>
- DWAF. (1999). Water Conservation and Demand Management National Strategy Framework. De-



کارشناسان و تصمیم‌گیران آبی درباره نحوه تأثیر بازار بر پایداری منابع آب در نتیجه ارزشمند شدن آب، بخش زیادی از اقدامات و کنش‌های انجام شده در سیر ممکن‌شدن نهاد بازار آب، به ویژه در دهه ۸۰، معطوف به این عرصه کنش بوده است. این عرصه کنشی، در همه دولت‌ها، هر کدام به گونه‌ای متفاوت، تا به امروز بخش مهمی از مسیر تکامل نهاد بازار آب را شامل شده است.

۲- رسمی‌سازی نهادی:

از پدیدار شدن محور «توسعه بازارهای محلی آب» در نظام برنامه‌ریزی آب کشور، در ماده ۱۰۶ قانون برنامه پنج‌ساله سوم توسعه در اواخر دهه ۷۰ تا به امروز کارشناسان و تصمیم‌گیران آب در برنامه‌های مختلف پنج‌ساله (ماده ۱۷ برنامه چهارم توسعه و ماده ۱۴۲ قانون برنامه پنجم و برنامه هفتم پیشرفت) و سندهای بخشی و فرابخشی (بند ۴۷ سیاست‌های فرابخشی آب مصوب سال ۱۳۸۴، بند ۳۶ راهبردهای بخش آب مصوب ۱۳۸۷ و سیاست چهارم اقتصاد مقاومتی وزارت نیرو) و قوانین بودجه سالانه، در مسیر تثبیت نهاد بازار آب در قوانین و مقررات رسمی قدم برداشته‌اند.

۳- کنش‌های کرداری/عملیاتی:

از اواسط دهه ۹۰ با برنامه‌ریزی اجرایی-اداری برای اجرای بازار محلی آب به صورت طرح آزمایشی (Pilot) در حداقل یک دشت، بیشتر برجسته شد. در همین راستا، با تصویب نظام‌نامه ساماندهی و توسعه بازارهای محلی آب و توسعه ساختارهای اداری مسئول اجرای بازار محلی چون تشکیل هیئت ساماندهی در وزارت نیرو، تشکیل کارگروه‌های تخصصی، راه‌اندازی مرکز مدیریت و هماهنگی بازارهای محلی آب در شرکت مدیریت منابع آب و واحد عملیات بازارهای محلی آب در شرکت‌های آب منطقه‌ای و گسترده‌کردن طرح‌های آزمایشی اجرایی بازار محلی آب از یک طرح آزمایشی به شش طرح آزمایشی، کنش‌ها و کردارها و تجربیات در اجرایی کردن بازار آب انباشته و تقویت شد. در سال جاری با ابلاغ معاون وزیر نیرو در امور آب و آبفا، هر استان موظف شده است که یک طرح آزمایشی برای راه‌اندازی بازار محلی آب مشخص کند.

در دولت‌های مختلف به فراخور نوع نگاه و رویکرد به یکی یا ترکیبی از این سه عرصه کنشی، بیشتر تأکید شده است.

در شرایطی که تقاضای آب بر عرضه آب -در شرایط رهاشدگی مدیریت آب- زمینه دست‌اندازی بهره‌برداران جدید به حقوق بهره‌برداران متقدم و بازتخصیص خاموش آب از کشاورزی به مصارف دیگر را فراهم کرده است، یکی از ابزارهایی که برای مدیریت این شرایط توسط سیاستمداران از برنامه پنج ساله چهارم توسعه در دستور کار بخش آب قرار گرفته است، به کارگیری سازوکار مبادله آب با راه‌اندازی بازارهای محلی آب است. بازار آب با هدف فراهم کردن بستر مناسب بازتخصیص آب از بهره‌بردارهای با ارزش کم به بهره‌بردارهای با ارزش بالاتر دنبال می‌شود. این سیاست بیشتر با رویکرد از بالا به پایین، تمرکزگرایی بالا، تأکید بر کارآیی صرف، عدم توجه به نهاد اجتماعی پشتیبان، در نظر گرفتن تنوع منطقه‌ای و اقتصاد سیاسی آب در مناطق مختلف، با شیوه‌ای واحد و صرفاً بروکراتیک و اداری در کشور پیش رفته است. به همین دلیل در عمل چندان توفیقی به همراه نداشته است.

آنچه درباره نهاد بازار آب، به عنوان نهادی اقتصادی و اجتماعی، قابل تأمل بسیار است این است که این نهاد به صورت هنجاری و ناگهانی در قامت نهادی کامل و موثر در سپهر حکمرانی آب پدیدار نمی‌شود، بلکه همچون هر نهاد دیگری به صورت تاریخی و غیرهنجاری از درون کنش و واکنش‌های بین نهادها و کنشگران در میدان نیروهای درکار ظهور و در یک مسیر تاریخی خود تکوین پیدا می‌کند. با این نگاه، این نهاد برای بازتخصیص اقتصادی آب، از زمان ظهورش در عرصه دانش در جامعه بین‌المللی و در فضای حکمرانی آب کشور تا به امروز که دو دهه می‌گذرد، مسیر تکاملی خود را با عبور از فراز و فرودهایی پشت سر گذاشته است. سه میدان کنشی موازی و در ارتباط با هم در یک فرم درهم تنیده و ارگانیک در مسیری تکوینی برای شکل‌گیری این نهاد طی شده است.

۱- کنش‌های گفتاری:

این حوضه کنشی بر تولید دانش و تغییر فضای مناسب ذهنی برای شکل‌گیری نهاد بازار از طریق انجام پژوهش‌های دانشگاهی و پروژه‌های مطالعاتی مختلف، برجسته‌کردن نمونه‌های موفق چون بازار موجن و بازار آب مورلی‌دارلینگ، بازدیدهای علمی، نشست‌های گفت‌وگویی و تخصصی، مقالات و یادداشت‌های رسانه‌ای و سیاستی، تمرکز و تأکید دارد. در فضای مهندسی‌زده و وجود نگرانی‌ها و ابهامات در سطح

انجام همه این کنش‌های گفتاری و کرداری تعادلی نو را در میدان نیروها پیرامون نهاد بازار محلی آب رقم زده است. به گونه‌ای که شرایط ذهنی و عینی برای ممکن شدن نهاد بازار در امروز نسبت به ابتدای دهه ۱۳۸۰ بسیار مهیاتر است. اما در عین حال مسائل و چالش‌های اساسی در حوزه حقوق آب، تحقق پایداری منابع آب، نظام بهره‌برداری آب و پیامدهای جانبی بازار آب، همچنان باقی است که باید با آن دست و پنجه نرم کرد. از این رو، برای ایجاد تحول در مسیر تحقق سیاست بازار آب توجه به محورهای زیر می‌تواند راهگشا باشد:

۱- هدف بازار آب تحقق کارایی و نه حفاظت و پایداری: راس‌الخمیه و هدف اصلی بازار، بازتخصیص اقتصادی آب از بهره‌برداری‌های با ارزش افزوده کم به بهره‌برداری‌های با ارزش افزوده بالا است. از این رو سازوکار بازار آب به دنبال بهبود کارایی آب بوده و نمی‌توان از آن انتظار تحقق پایداری و حفاظت از منابع آب داشت. به دیگر سخن، با ایجاد امکان مبادله آب، ارزش آب بالاتر می‌رود، ولی وقتی با تمهیدات لازم برای کنترل‌های جدی حفاظت از منابع آب همراه نباشد به هجوم برای برداشت بی‌رویه از آب، منجر می‌شود. به همین دلیل در کنار بازار آب برای تحقق هدف حفاظت و پایداری منابع آب، باید تمهیدات، سازوکارها و ابزارهای جداگانه خاصی در نظر گرفته شود. این سازوکارها ممکن است با هدف افزایش کارایی آب در تعارض یا تضاد باشد. در این وضعیت، نحوه بده‌بستان بین هدف کارایی با هدف پایداری و همچنین در افق وسیع‌تر عدالت اجتماعی و توازن بین این اهداف، مسأله اصلی مدیریت و حکمرانی آب می‌شود.

۲- تعیین و تکلیف حقوق مالکیت آب: مسأله حقوق مالکیت، پایین بودن هزینه‌های مبادله و استقرار نهادهایی برای حفاظت و حراست از این حقوق، از مهمترین پیش‌نیازهای استقرار سازوکار رسمی بازار برای بازتخصیص آب می‌باشد. به گونه‌ای که هر نوع مبادله آب، منوط به تعیین تکلیف وضعیت حقوق مالکیت آب و شفاف کردن است. در این تعیین تکلیف باید موضوع حق طبیعی، حق عرفی، حق قانونی و حق انتفاع از آب و ارتباطات بین این حق‌ها در حوزه آب مشخص و شفاف شود. رسمیت بخشیدن به این حقوق و مشخص کردن آنها فرایند اجتماعی و حقوقی بسیار پیچیده‌ای است که نیاز به اتخاذ رویکرد غیرمتمرکز از پایین به بالا با مشارکت ذینفعان در بستر رژیم حکمرانی محلی آب دارد.

۳- نظام بهره‌برداری آب، پایه بازار آب: نهاد بازار آب پیش از اینکه نهادی اقتصادی باشد، نهادی اجتماعی است. به این معنی که مبادلات آب در بستر روابط اجتماعی و نظام بهره‌برداری از آب انجام می‌شود. نیاز به شفافیت اطلاعاتی و اعتماد اجتماعی برای انجام مبادله در کنار امکان تحویل فیزیکی کالای آب در درون نظام بهره‌برداری آب بعد از معامله آب، ضرورت تبیین سازوکار مبادله در درون نظام اجتماعی بهره‌برداری را برجسته می‌کند؛ چون بازار آب در درون نظام بهره‌برداری آب، شامل زمان‌بندی تقسیم آب، سهم‌بندی آب از منبع آبی، امکان تحویل آب و ... اجرایی می‌شود و نه بیرون از آن.

۴- بررسی پیامدهای جانبی بازار آب (هزینه‌های وارده بر شخص ثالث): مسأله تأثیرات جانبی بازار آب از جمله تأثیرات محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی آن، از مسائل مهمی است که باید درباره آن اندیشه شود و قبل از راه‌اندازی بازار، سازوکارها و مدل‌هایی برای حل آن، پیش‌بینی شود. این آثار جانبی در اثر درهم‌تنیدگی و ویژگی‌های سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی است. به همین دلیل استحصال آب بر اثر روشن شدن موتور بازار آب، می‌تواند آثار جانبی منفی بزرگی را به دنبال داشته باشد. اثر جانبی بر کیفیت آب، بر شخص ثالث، بر اقتصاد منطقه و بر اجتماع منطقه از جمله آثار جانبی بازار آب است که از نگرانی‌های اصلی دولت‌ها برای راه‌اندازی بازارهای آب است.

۵- کنترل اجتماعی در کنار کنترل تکنولوژیک: برای کنترل پیامدهای جانبی بازار آب، تمام تأکید کارشناسان و مسئولین امر بر کنترل برداشت آب از طریق ابزارهای تکنولوژیک مانند کنتورهای هوشمند آب است. این در صورتی است که به دلیل امکان دست‌کاری و تقلب در این ابزارهای تکنولوژیک، لزوم فعال کردن ابزارهای کنترل اجتماعی در کنار این ابزارها و شفاف‌سازی اطلاعات برداشت از منابع آب، ضرورت دارد.

۶- حل تعارض منافع: در دهه‌های گذشته فرایند تخصیص آب به صورت دستوری و توسط وزارت نیرو از طریق کارگزاران استانی آن (شرکت‌های آب منطقه‌ای) انجام می‌شود. به دلیل انحصار طبیعی ناشی از این اختیار، قدرت و امتیازی برای آن شرکت‌ها ایجاد شده است که منافع و رانت‌هایی از طریق آن خلق می‌شود. ترس از از بین رفتن این منافع و همچنین از بین رفتن قدرت تنظیم‌گری و اختیار تخصیص آب، باعث ایجاد نگرانی‌ها و دست‌اندازهایی شده است. فهم تعارض منافع ناشی از اصلاح سازوکار تخصیص آب از طریق بازار، کمک خواهد کرد که تحلیلی از منافع و رفتارهای کنشگران اثربخش در شکل‌گیری این نهاد به دست آید.

بازار آب دریچه‌ای نو برای مدیریت مصرف و تقاضا می‌باشد. این بازار، محلی است که در آن به تقاضاهای جدید آب پاسخ داده می‌شود و افراد حقیقی و حقوقی دارای مجوز برداشت از منابع آب زیرزمینی از طریق صرفه‌جویی یا افزایش راندمان آب، می‌توانند بخشی از حق‌آبه در اختیار خود را طی مکانیسمی وارد بازار آب نمایند و صنایع و معادن و یا کشاورزانی که نیاز به آب مازاد دارند، این حق‌آبه را خریداری و به چاه خود منتقل و یا از طریق تانکر به محل مصرف منتقل نمایند.

بازار آب در محدوده مطالعاتی خواف در استان خراسان رضوی از سال ۱۴۰۰ به طور رسمی با انعقاد تفاهم‌نامه‌ای بین آب منطقه‌ای و کارگزار بازار آب و تشکل آب‌بران، برای اولین بار در کشور شروع به کار نمود. محدوده مطالعاتی خواف در حوضه آبریز نمکزار خواف و در جنوب شرق استان خراسان رضوی قرار دارد و هم‌مرز با کشور افغانستان است. میزان آب ورودی سطحی به محدوده خواف، ۲/۵ میلیون متر مکعب و از سمت محدوده مطالعاتی زوزن می‌باشد. جریان سطحی خروجی نیز ۸/۱ میلیون مترمکعب و به سمت محدوده‌های زوزن و نمکزار خواف است. جریان زیرزمینی ورودی و خروجی از دشت هم تقریباً صفر است.

در سال ۱۴۰۱ با ابلاغ بخشنامه ایجاد بازار توسط وزیر محترم نیرو و اجرای آزمایشی بازار در چند استان، استان خراسان رضوی نیز به صورت پایلوت برای راه‌اندازی بازار آب انتخاب گردید، لذا بر این اساس دستورالعمل‌ها و فرآیندهای بازار آب اصلاح و دور جدید مبادلات در بازار شکل گرفت که طبق آن مبادلات آب بین کشاورزان و یا از کشاورزی به صنعت و خدمات مجاز می‌باشد.

برای ارائه آب در بازار، کافی است نماینده چاهی که بخشی از آب آن قرار است در بازار ارائه شود، درخواست خود را به دفتر پیشخوان ارائه نماید. پس از بررسی کارشناسی و داشتن شرایط اولیه و طی مراحل اداری، مجوز ارائه آب در بازار با حجم مشخص برای متقاضی صادر و این حجم، از شارژ سالانه چاه کم می‌شود. دارنده مجوز به کارگزار بازار آب مراجعه و کارگزار قرارداد مبادله آب بین ارائه‌دهنده آب و دریافت‌کننده را تنظیم می‌نماید. متقاضی دریافت‌کننده آب با ارائه یک نسخه از قرارداد منعقد شده و اصل مجوز ارائه آب در بازار، درخواست خود را برای شارژ چاه خود به امور آب ارائه می‌نماید و شارژ خریداری شده پس از کسر سهم آبخوان، در چاه خریدار شارژ می‌گردد. با توجه به این که بخش قابل توجهی از آب مصرفی

در بخش کشاورزی به زمین نفوذ کرده و به آبخوان برمی‌گردد، ولی در مصارف دیگر از جمله صنعت این مقدار ناچیز بوده و یا به صفر می‌رسد و به منظور جبران آن، هنگامی که مبادله‌ای در بازار صورت می‌گیرد و مقرر است آب از بخش کشاورزی به صنعت منتقل شود، درصدی از آب مبادله شده به عنوان سهم آبخوان در نظر گرفته شده و از کل شارژ مبادله شده کسر و باقیمانده برای بخش صنعت شارژ می‌گردد.

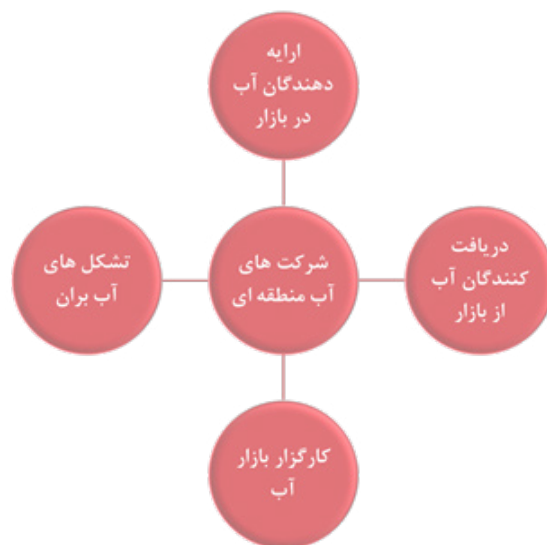
در سال ۱۴۰۲ شش مجوز از سوی کشاورزان برای ارائه آب در بازار با حجم ۲۱۰ هزار متر مکعب دریافت شد که مقدار ۱۲۲۰۰۰ متر مکعب آن در بازار معامله شد. حجم کل قراردادهای منعقد شده مبلغ ۲۵ میلیارد ریال بوده است. تمام این آب توسط بخش صنعت خریداری گردید که مقدار ۲۶۰۰۰ متر مکعب آن به نفع آبخوان ذخیره و باقیمانده آن به مصرف صنعت رسید. در سال جاری نیز ۲۹۰ هزار متر مکعب آب مبادله شده و جمع مبلغ قراردادهای مبادله آب ۱۰۰ میلیارد ریال بوده است. در این بازار مبادله بین بخش کشاورزی با کشاورزی و بخش کشاورزی با صنعت مجاز است، ولی علیرغم مجاز بودن مبادله آب بین بخش کشاورزی، کل مبادلاتی که در خواف داشته‌ایم از کشاورزی به صنعت بوده است.

در بازار، مبادله آب به دو صورت می‌تواند صورت پذیرد. یکی مبادله شارژ از چاه مبدأ به مقصد و دیگری انتقال آب به وسیله تانکر از چاه مبدأ به محل مصرف. در صورت اول مقداری از حجم آب که به صورت شارژ است از حجم کارت شارژ فروشنده کم و کارت شارژ چاه خریدار شارژ می‌گردد. نوع دوم فروش تانکری است، یعنی مالک چاه درخواست می‌دهد و پس از این که مجوز ارائه آب در بازار برای او صادر شد به میزان حجم مجوز صادره، مجاز است از چاه خود فروش تانکری داشته باشد و آب از محل چاه به وسیله تانکر به محل مصرف انتقال می‌یابد.

ورود به بازار آب یا به عبارتی ارائه آب و یا دریافت آب از بازار، منوط به داشتن شرایطی می‌باشد. ابتدا اینکه چاه ارائه‌دهنده و دریافت‌کننده باید فعال باشد. چاهی که متروکه است و از آن بهره‌برداری نمی‌شود، عملاً نمی‌تواند وارد بازار شود. همچنین نصب کنتور هوشمند بر روی چاه‌ها، داشتن گواهی صحت‌سنجی کنتور و عدم تخلف از مفاد پروانه بهره‌برداری، پیش‌نیازهای ورود به این بازار هستند.

در این بازار چند رکن داریم: شرکت آب منطقه‌ای، کارگزار بازار آب، تشکل آب‌بران، دریافت‌کنندگان آب از بازار و دریافت‌کنندگان آب از بازار (شکل ۱).

دستورالعمل‌ها را تهیه می‌کند و همچنین مسئول بررسی درخواست‌های ورود به بازار و صدور مجوزهای مربوطه و نظارت بر مبادلات می‌باشد. رکن دیگر، کارگزار بازار آب است که خریدار و فروشنده را به هم معرفی و در صورت توافق، قرارداد مبادله آب را بین این دو تنظیم می‌کند. برابر دستورالعمل ارائه شده از سوی شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت‌هایی که تقاضای صدور مجوز کارگزاری دارند، می‌بایست درخواست خود را به همراه مدارک لازم به آب منطقه‌ای تحویل نمایند. مدارک پس از تکمیل به شرکت مدیریت ارسال و در صورت تأیید صلاحیت، کارگزاری بازار آب برای متقاضی صادر می‌گردد. شکل آب‌بران دشت خواف نیز در راه‌اندازی و شکل‌گیری این بازار کمک زیادی نموده و در تشویق و راهنمایی کشاورزان برای ورود به بازار آب و کمک به آنها برای مدیریت مقدار آب پس از ارائه بخشی از آن در بازار، نقش اساسی داشته است. رکن بعدی، ارائه‌کننده آب در بازار می‌باشد که آب مازاد دارد و می‌خواهد در بازار آب بفروشد. البته مقدار آب ارائه شده در بازار نباید از ده درصد حجم مجاز پروانه تجاوز کند. در آخر هم یک خریدار داریم. کسی که می‌خواهد آب بخرد و حجم آب خریداری شده را در چاه خود شارژ نماید.



شکل ۱- ارکان پنج‌گانه بازار آب

بازار آب در خواف از سال ۱۴۰۰ آغاز به کار نموده و هم اکنون نیز در حال اجراست. البته به دلیل آزمایشی بودن، مسائل و مشکلات اندکی وجود دارد که به تدریج در حال برطرف شدن هستند. اولین مشکلی که وجود داشت این بود که ترس کشاورزان از ورود به این بازار بود. کشاورزان گمان می‌کردند که اگر اظهار دارند که دارای آب مازاد هستند و آب را وارد بازار نمایند، در آینده ممکن است آب منطقه‌ای به دلیل اعلام

عدم نیاز کشاورز، پروانه را کم کند. علاوه بر این، حساسیت در مورد صنعت داشتند و حاضر نبودند آب را به صنعت بدهند. از طرفی جهاد کشاورزی اعتقاد داشت که اگر کشاورزها آب به صنعت بفروشند، باعث کاهش تولید می‌شود و ممکن است امنیت غذایی به خطر افتد، لذا با راه‌اندازی بازار آب مخالف بود. همه اینها مسائلی بود که باعث می‌شد بازار راه نیافتد، ولی با هماهنگی از یک طرف با تشکل کشاورزان خواف و از طرف دیگر با کارگزار که نقش تسهیل‌گر را نیز بر عهده داشت، بازار آب پا گرفت و مبادلاتی شکل گرفت. همکاری سه جانبه اداره منابع آب، اتحادیه کشاورزان و کارگزار بازار و برگزاری جلسات و کارگاه‌های متعدد با کشاورزان، مسئولین محلی، مسئولین سیاسی و صنعت‌گران باعث شد که مسائل و مشکلات برطرف گردد و هم مسئولان جهاد کشاورزی، هم مسئولین سیاسی و هم کشاورزان توجیه شدند که ورود به بازار هیچ ضرری برایشان ندارد. علاوه بر این، منفعت‌هایی پایدار برایشان دارد و نقدینگی تأمین شده از محل بازار می‌تواند به افزایش بهره‌وری آب کشاورزی کمک کند.

بازار آب در واقع چند هدف را دنبال می‌کند. تأمین نیازهای آب جدید، بدون اینکه فشار بیشتر به سفره آب زیرزمینی داشته باشیم، یعنی تخصیص جدیدی ندهیم و از مازاد تخصیص‌هایی که در کشاورزی یا صنعت وجود دارد، نیازهای آب صنایع یا کشاورزانی که دارای راندمان آبیاری بالاتری هستند را تأمین کنیم، مثل گلخانه‌ها، دامداری‌ها و صنایع. در واقع الگوی مصرف با بازار آب اصلاح می‌شود.

افزایش بهره‌وری در بخش آب نیز از دستاوردهای بازار آب است. می‌دانیم که بهره‌وری در بخش صنعت و خدمات بسیار بالاتر از بخش‌های دیگر است. ارزش افزوده ایجاد شده در صنعت به ازای هر متر مکعب آب، بیشتر از سایر بخش‌ها می‌باشد و بازار، این قابلیت را ایجاد می‌کند که با حفظ حقوق کشاورزان و دارندگان حق‌آبه‌ها، آب صنعت نیز تأمین و ارزش افزوده بالاتری به ازای مصرف آب داشته باشیم.

موضوع اصلی دیگر توانمندسازی کشاورزان در استفاده بهینه از آب است. چون قیمت آبی که کشاورزان در بازار می‌فروشند، عملاً نسبت به میزان تولید محصول به ازای هر متر مکعب یا ارزش افزوده‌ای که به ازای هر متر مکعب محصول تولید می‌کنند، خیلی بیشتر است و این به کشاورزها کمک می‌کند که علاوه بر توانمند شدن، بتوانند طرح‌های آبیاری را در چاه خود اجرا کنند و راندمان آبیاری را بالا ببرند.

و در آخر ارزش‌گذاری اقتصادی آب هم از دستاوردهای مهم این بازار است. هم کشاورز و هم صنعت‌گر درمی‌یابند که آب چقدر ارزش دارد و وقتی که ارزش واقعی آن مشخص شد، طبیعتاً برای استفاده بهینه از آن برنامه‌ریزی می‌کنند.

گزارش برگزاری کارگاه آشنایی با علم داده کاوی و کاربردهای آن در صنعت آب و فاضلاب

به نقل از فریبا قنبری، سرپرست گروه تحقیقات و فناوری شرکت آب و فاضلاب مشهد.

یادگیری داده ارائه گردید. همچنین به برخی از کاربردهای کلیدی داده کاوی در صنعت آب و فاضلاب و تحولات آینده از جمله موارد زیر نیز پرداخته شد:

- تحلیل مصرف آب
- شناسایی نشت ها
- مدیریت کیفیت آب
- پیش بینی تقاضا
- بهینه سازی عملیات

در ابتدای بخش دوم کارگاه نیز روش های کاربردی داده کاوی در صنعت آب و فاضلاب از جمله موارد زیر طرح موضوع شد:

- پایش و مدیریت کیفیت آب
- مدیریت تعمیر و نگهداری
- تحلیل سری های زمانی
- تشخیص نشت و هدررفت آب
- بهینه سازی شبکه های توزیع آب

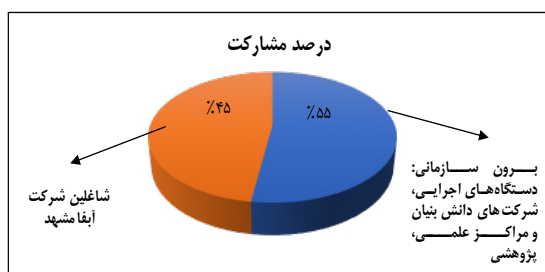
همچنین، برخی تجارب عملیاتی موفق داخلی و خارجی (اسپانیا و سانفرانسیسکو) در استفاده از داده کاوی در صنعت آب و فاضلاب بازخوانی و تشریح گردید. در ادامه نیز نرم افزارهای کاربردی در حوزه داده کاوی برای حضار معرفی و نحوه دسترسی به آنها تشریح شد.

برگزاری سلسله کارگاه های تخصصی «روزآمد با فناوری» با هدف رصد فناوری های روز و کاربردی در صنعت آب و فاضلاب و ایجاد زمینه ای برای آشنایی کارکنان و علاقمندان با این فناوری ها، در گروه تحقیقات و فناوری شرکت آب و فاضلاب مشهد برنامه ریزی شده است.

در همین راستا، نخستین کارگاه با عنوان «آشنایی با علم داده کاوی و کاربردهای آن در صنعت آب و فاضلاب» با همکاری شرکت آمار پردازان پیشرو مورخ ۳۰ مرداد ماه در شرکت آب و فاضلاب مشهد واقع در سالن شریف واقفی با سخنرانی آقای دکتر سلیمانی فرد، عضو هیات علمی گروه ریاضی دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید. در این کارگاه ۳ ساعته که با استقبال مخاطبین مواجه شد، به موضوع داده کاوی و کاربردهای آن در صنعت آب و فاضلاب پرداخته شد. برنامه کارگاه در دو بخش به شرح زیر ایراد گردید:

۱. مقدمه ای بر علم داده کاوی (الگوریتم های یادگیری علم داده و انواع داده ها در صنعت آب و فاضلاب)
۲. روش های کاربردی داده کاوی در صنعت آب و فاضلاب و معرفی نمونه های موفق داخلی و خارجی داده کاوی در صنعت آب و فاضلاب.

در بخش اول کارگاه مقدمه ای از علم داده کاوی و الگوریتم های



حاضرین این کارگاه متشکل از ۱۲۰ نفر اعم از کارکنان دستگاه های اجرایی استان و شاغلین حوزه صنعت، اعضای هیئت علمی دانشگاه ها، شرکت های دانش بنیان، پژوهشگران و... بودند. نحوه مشارکت سازمان ها و موسسات مختلف در این کارگاه تخصصی به شرح نمودار ذیل می باشد.

«آشنایی با علم داده‌کاوی و کاربردهای آن در صنعت آب و فاضلاب» انتخاب گردیده است.



در این نشست، آقای کلایی، معاون منابع انسانی و تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد نیز، بیان نمودند که برگزاری سلسله کارگاه‌های تخصصی «روزآمد با فناوری» با هدف رصد فناوری‌های روز و کاربردی در صنعت آب و فاضلاب و ایجاد زمینه‌ای برای آشنایی کارکنان و علاقمندان با این فناوری‌ها برنامه‌ریزی گردیده و انتظار می‌رود برگزاری این کارگاه‌ها منجر به به‌روزرسانی سطح دانش و اطلاعات شاغلین و فعالان صنعت آب و فاضلاب در حوزه فناوری‌های نوین و شناسایی زمینه‌های کاربرد این فناوری‌ها در حوزه‌های تخصصی گردد. لذا باتوجه به اهمیت مدیریت و استفاده هدفمند از داده‌ها و اطلاعات در جهت پیش‌بینی و تصمیم‌سازی در حوزه صنعت آب و فاضلاب، موضوع اولین کارگاه از سلسله کارگاه‌های مذکور

باتوجه به استقبال صورت گرفته از برگزاری نخستین کارگاه از سلسله کارگاه‌های علمی - تخصصی «روزآمد با فناوری» و نتایج نظرسنجی انجام شده، تداوم برگزاری این برنامه‌ها با لحاظ تجربیات و نقطه‌نظرات و انتخاب موضوعات کاربردی و مفید، در دستور کار بخش تحقیقات و فناوری شرکت آب و فاضلاب مشهد قرار گرفته است.

کنکاشی در انگاشت‌های بازار آب ایران

به سفارش

نشریه آب و توسعه پایدار
و شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

با همکاری

پژوهشکده آب و محیط زیست
دانشگاه فردوسی مشهد



تابستان
۱۴۰۳



گردآورندگان

- دکتر کاظم اسماعیلی
- وحیده مرتضوی امیری
- مائده اسکوهی
- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد
- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد
- دکتری علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

بخش اول < اصول نظری بازار آب



بخش دوم < میزگرد مجازی



بخش سوم < پاسخ به سؤالاتی در زمینه بازار آب



بخش چهارم < جمع بندی



پژوهشکده آب و محیط زیست



شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی



دانشگاه فردوسی مشهد

شرکت‌کنندگان در بیان نظرات

نام	سمت	نحوه شرکت
مهندس انوش نوری اسفندیاری	بنیانگذار اندیشکده تدبیر آب ایران	میزگرد مجازی
مهندس عباس کشاورز	معاون پژوهشی مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و اتاق آب ایران	میزگرد مجازی
دکتر حسین زمانی	مدیرکل دفتر حقوقی شرکت مدیریت منابع آب ایران	میزگرد مجازی
دکتر کاظم اسماعیلی	دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد	میزگرد مجازی
دکتر حمید میرقاسمی	مدیرتحقیقات، برنامه‌ریزی و بررسی‌های اقتصادی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی	میزگرد مجازی
مهندس حسین حیدرزاده	دبیر کمیته هماهنگی بازار آب شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی	میزگرد مجازی
دکتر لیلی ابوالحسنی	دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد	میزگرد مجازی
دکتر داوودرضا عرب	مدیر عامل مؤسسه پژوهشی مهندسی راهبرد دانش پویا تهران	میزگرد مجازی
دکتر عباس فقیه خراسانی	مدیر بازار آب یزد	میزگرد مجازی
دکتر رضا رمضانی	فعال محیط‌زیست استان زنجان	میزگرد مجازی
مهندس محسن طراوت	نایب رئیس شرکت کارگزار بازار آب	میزگرد مجازی
مهندس عباسقلی جهانی	عضو هیأت موسس انجمن علوم و مهندسی آب ایران	میزگرد مجازی و پاسخ به سوالات
دکتر حسین انصاری	استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد	پاسخ به سوالات
دکتر کامران داوری	استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد	ارائه اصول نظری بازار آب
دکتر ناصر شاهنوشی فروشانی	استاد گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد	جمع‌بندی

<< مالکیت، تبادل و بازار آب

آب منشأ حیات بر روی کره خاکی بوده و هست؛ امروزه نیز اکوسیستم‌های بسیاری وابستگی حیاتی به آب دارند. در عین حال، آب از طرفی کالای عمومی و بدون جایگزین است؛ که عموم مردم حق دسترسی به آن را دارند. از طرفی دیگر، آب کالایی محدود و کمیاب است که به راحتی و بدون هزینه قابل تملک نیست. به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، جنبه اقتصادی پر رنگی دارد و استحصال و توزیع آن نیز با ارزش افزوده همراه است. در ایران نیز همگان از نقش پر اهمیت آب در مسیر رشد اقتصادی و پایایی توسعه آگاهند. این درک می‌بایست موجب گذر از برنامه‌ریزی پروژه محور به برنامه‌ریزی جامع حوضه‌ای (منبع‌محور) با تمرکز بر رویکرد «مدیریت یکپارچه» گردد؛ بنابراین ارتباط مدیریت آب با سایر بخش‌ها در برنامه‌ریزی‌های ملی، منطقه‌ای و محلی باید با اهمیت تلقی گشته و موجب تخصیص یکپارچه آب شود. به عبارت دیگر باید توجه نمود که استفاده از آب در یک موقعیت جغرافیایی، در هر زمان و در هر بخش/ فعالیت، می‌تواند سایر بخش‌ها/ فعالیت‌ها را حتی در موقعیت و زمانی دیگر تحت تأثیر قرار دهد. لاجرم استفاده‌کنندگان آب، حتی از نسلی به نسل دیگر، به هم وابسته هستند. برای درک بهتر موضوع در شرایط ایران، به موارد زیر بایستی توجه نمود: هرگونه تغییر در منابع آب، خواه این تغییرات ناشی از تغییرات طبیعی یا به علت دخالت انسان باشد، کل اقتصاد (و لذا کل جامعه) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌ویژه با توجه به سهم بالای آب کشاورزی از مجموع برداشت‌های آب (و متقابلاً وابستگی کشاورزی به آب) و نیز ارتباطات پسین و پیشین بخش کشاورزی با سایر بخش‌ها، هرگونه شوک کم‌آبی، اقتصاد کشاورزی و سایر بخش‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد که می‌تواند امنیت غذایی کشور، بیکاری، مهاجرت و سایر ناپایداری‌های اقتصادی و اجتماعی را در پی داشته باشد.

با توجه به پیچیدگی و پویایی سامانه‌های منابع - مصارف آب، تدوین برنامه‌های راهبردی برای توسعه اجتماعی - اقتصادی با تمرکز بر پایایی منابع آب (آمایش آب - محور) و برای تضمین تاب‌آوری توسعه، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. تدوین چنین برنامه‌ای نیازمند جلب همراهی تمامی کنشگران حوضه برای اخذ تصمیمات مشارکتی (شامل: تبیین چشم‌انداز، تدوین برنامه استراتژیک، و سیاست‌گذاری) است. قطعاً در تخصیص آب به فعالیت‌های مختلف، باید یکپارچگی تخصیص و مشاع بودن منبع آب حوضه در نظر گرفته شود؛ و البته حقوق کلیه گروه‌داران (شامل: اکوسیستم/ محیط‌زیست، ساکنان حوضه و نسل‌های آینده، آب‌بران بالادست و پایین‌دست و...) مورد

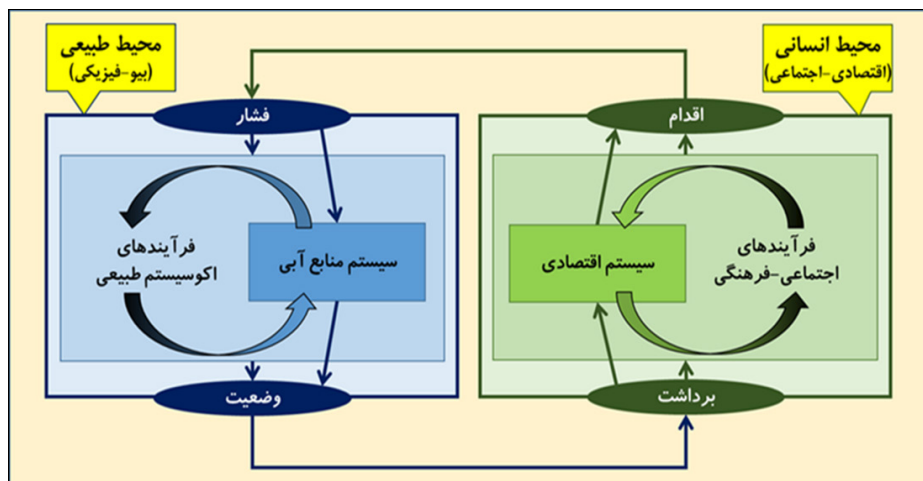
توجه قرار گیرد.

آب منبعی اساسی برای توسعه (به‌ویژه در مناطق خشک) است؛ لذا حفظ کمیّت و کیفیت این منبع برای آیندگان باید جزئی از سیاست‌های راهبردی در سطح کلان کشور تلقی گردد. دستیابی به این اهداف، هم از جهت عرضه و هم از منظر تقاضا، صرفاً به کمک ابزارهایی مانند وضع مشوق‌ها یا جریمه‌ها و نیز بازار آب (برای کشف ارزش واقعی آب) امکان‌پذیر است.

تبادل آب در یک بازار آب آزاد و رقابتی و شفاف، به‌عنوان یکی از بهترین روش‌ها در تخصیص بهینه منابع آب شناخته شده است؛ حتی اگر تحت برخی ضوابط برای تعادل‌بخشی قرار داشته باشد. تجربه ایجاد بازار آب در کشورهای مختلف دستاوردهای متفاوتی را به دنبال داشته است. در پاره‌ای از کشورهای ایجاد بازار آب تجربه‌ای موفق بوده و تأثیرات مثبتی در تعادل‌بخشی و ارتقا شاخص‌های اجتماعی - اقتصادی در پی داشته است. در ایران از سالیان دور، تبادل آب در بخش کشاورزی به طور سنتی (در ابعاد محدود و محلی) وجود داشته و نقش یک مکانیزم مناسب در تخصیص بهینه منابع آبی به فعالیت‌های مختلف بخش کشاورزی را ایفا نموده است. اما یک بازار متشکل و نهادینه شده برای آب، تاکنون در کشور وجود نیافته است.

تهی‌شدن منبع آب برای آب‌برانی که نقطه برداشت مستقل (چاه، قنات و...) در اختیار دارند، مستقیماً خسارتی بزرگ (از دست‌رفتن سرمایه) محسوب می‌شود. اما در شبکه‌های توزیع آب، وضع بر منوال دیگری است. در این شبکه‌ها عموماً قیمت‌های یارانه‌ای رواج دارد و مشترکین در نهایت ممکن است صرفاً هزینه‌های استحصال و توزیع راپردازند. یعنی شهروندان (در شبکه‌های توزیع آب شهری) و یا کشاورزان (در شبکه‌های آبیاری پایاب سدها)، عملاً هزینه واقعی آب را نمی‌پردازند. بدیهی است پائین نگه‌داشتن قیمت منجر به استفاده بیش از حد آب و نهایتاً به تهی‌شدن منبع می‌انجامد. باید توجه داشت زمانی می‌توان قیمت آب را بر پایه هزینه واقعی برداشت آب تعیین نمود که کشاورزان بتوانند محصولات خود را بر اساس قیمت بازار بفروشند و قیمت محصولات کشاورزی به طور مستقیم و غیرمستقیم توسط دولت دستکاری نشود.

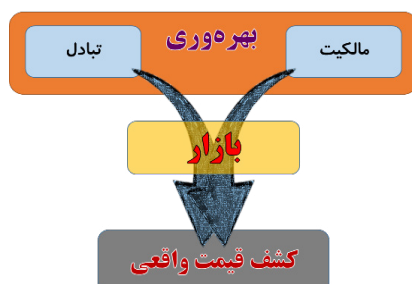
برای درک بهتر موضوع، شرح برخی مفاهیم کلیدی در ادامه می‌آید. مدیریت پایای منابع - مصارف آب نیازمند توجه به اثرات متقابل محیط انسانی و محیط طبیعی بر یکدیگر است (شکل ۱). عناصر اصلی در محیط انسانی شامل فرآیندهای اجتماعی-فرهنگی و سیستم اقتصادی است. این محیط در مدیریت آب کشور تاکنون مورد اعتنا نبوده و همین باعث شده تا مدیریت آب، ناموفق باشد.



شکل ۱- فرآیند تأثیرگذاری عناصر اصلی در محیط انسانی شامل فرآیندهای اجتماعی- فرهنگی و سیستم اقتصادی

و شفاف ندارد و سیاست‌های کلان ملی و منطقه‌ای تنها به طور غیرمستقیم (از طریق قواعد تشویقی یا محدودیت‌های بازدارنده) بر تبادلات تأثیر می‌گذارند. البته این تبادل باید درون‌بخشی باشد نه بین‌بخشی. چون در صورت بین‌بخشی بودن، عملاً بخش کشاورزی آسیب جدی خواهد دید، بخصوص برای کشاورزی در ایران که با محدودیت منابع آبی مواجه هست (شکل ۲).

بازار آزاد و رقابتی و شفاف، فضایی (فیزیکی یا الکترونیکی) برای تبادل است که تعداد زیادی خریدار و فروشنده هم‌زمان آنجا حضور دارند و در آن تباری و اعمال فشار ممکن نیست. چنین بازاری موجب آشکار شدن قیمت و یا ارزش واقعی هر کالایی (از جمله عوامل تولید کشاورزی و به‌ویژه آب) است. در چنین بازاری دولت نقشی به جز نظارت و تضمین تبادل آزاد، رقابتی

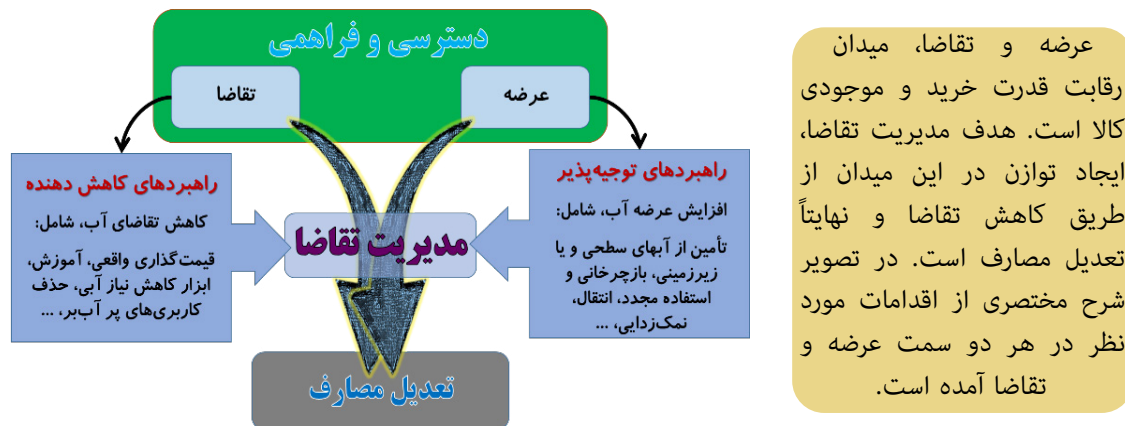


شکل ۲- مدل عرضه و تقاضا در بازار رقابتی

تبادل (خرید و فروش) و اقلام تحت مالکیت موجب بهبود بهره‌وری می‌شود. این دو شرط لازم (و نه کافی) برای شکل‌گیری بازار هستند. نقش بازار (آزاد، رقابتی و شفاف)، کشف قیمت واقعی در میدان عرضه - تقاضا است.

تعدلی باز می‌گردد. در قیمت‌های پایین‌تر نیز، مقدار تقاضا از مقدار عرضه بیشتر می‌شود و باعث تقاضای مازاد می‌شود. در این حالت، تقاضای اضافی موجب بازگشت به قیمت تعادلی می‌گردد. نکته مهم اینکه چنین تحلیلی برای کالاهای اقتصادی صادق است در حالی که ماهیت آب این‌گونه نیست، مگر اینکه آب را یک کالای اقتصادی فرض کنیم. از طرفی وقتی از آب سخن می‌گوییم، منظور آب فراوری شده است نه عرضه آب به طور عام (شکل ۳).

مدل عرضه و تقاضا در واقع برای بازار رقابتی روایی دارد؛ بازاری که در آن هیچ خریداری و فروشنده‌ای اثر چندانی بر قیمت ندارد. عرضه و تقاضا وابسته به قیمت محصول در بازار هستند و متقابلاً قیمت وابسته به عرضه و تقاضا است. این یعنی، در بازار رقابتی قیمت تعادلی با عرضه و تقاضای کالا در بازار تعیین می‌شود. در قیمت‌های بالاتر کمبود تقاضا اتفاق می‌افتد و مازاد عرضه پدید می‌آید. در این حالت، عرضه اضافی کاهش قیمت را موجب می‌شود، قیمت دوباره به سطح



شکل ۳- مدیریت تقاضا برای تعدیل مصارف

<< آب، منبعی اقتصادی یا غیراقتصادی

در مباحث مربوط به سیاست گذاری آب، دو نگرش مطرح است: «آب منبعی اقتصادی» در مقابل «آب منبعی غیراقتصادی». این دو دیدگاه، دو انتهای طیف سیاست گذاری آب هستند. نگاه سومی هم به آب به عنوان «آب منبعی اقتصادی و اجتماعی» وجود دارد که در میانه این دو قرار می گیرد. در این بخش، این نگرش سوم تشریح می شود.

در آغاز بحث باید گفته شود که آب و خاک نقشی محوری در هستی انسان/تمدن ها داشته و دارند؛ همچنین، در گذشته های دورتر پایگاه حکومت های فئودالی و منشأ قدرت آن ها بوده اند؛ لذا، انسان این منابع ارزشمند را کاملاً متفاوت از سایر منابع یا کالاها تلقی نموده است. تنها از قرون هجدهم و نوزدهم میلادی بود که اراضی قابل کشت در نظام سرمایه داری (آن هم فقط در مراکز توسعه سرمایه داری) به عنوان کالای قابل دادوستد شناخته شد؛ و البته حقوق و تعهداتی را بر آن افزود که بازهم آن را از سایر کالاها متمایز می کرد. در ادامه در قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، تبدیل زمین به یک منبع اقتصادی که بتواند آزادانه مبادله شود، در قالب «حق مالکیت مطلق بدون محدودیت» به اوج خود رسید. اما در نیم قرن اخیر، منزلت زمین به عنوان یک کالای مطلق تنزل یافته و این کالا تنها می تواند برای مقاصد که در مقررات مشخص شده است، استفاده شود. قوت و ضعف این رویکرد از کشوری به کشور دیگر و بر اساس گرایش سیاسی دولت ها، متفاوت است. با این همه، حتی دولت های سرمایه داری نیز برخی محدودیت های کاربری اراضی را پذیرفته اند؛ درحالی که این گونه دولت ها معتقد به حداقل مداخله گری در بازار و عدم محدود نمودن حقوق مالکان هستند.

طی قرن بیستم میلادی، آب نیز به تدریج دستخوش تغییراتی مشابه همان تغییراتی شده است که زمین را از یک منبع مشترک

به یک کالا تبدیل کرد. همچنین، با پایان یافتن دسترسی آزاد به منابع آب، برخی از پارامترهای بحث انگیز دیگر موضوعیت ندارند. بدیهی است، مادامی که دسترسی به آب برای متقاضیان جدید آزاد باشد، تلاش برای تبدیل آب به کالایی مبادله ای ناکام خواهد ماند. در مقابل، هرگاه دسترسی آزاد به منبع پایان بیابد، حقوق دسترسی ظهور خواهد نمود و عملاً منزلت «آب منبعی غیراقتصادی» پایان می یابد؛ خواه مردم با این نگرش مخالف باشند یا نباشند. انکار شکل های نوظهور حقوق آب، تلاش ها برای کارآمدتر ساختن تخصیص آب و عادلانه تر نمودن توزیع آن را دشوار و پرهزینه می سازد.

تفاوت گذاشتن میان دو مفهوم «منابع با دسترسی آزاد» و «منابع بدون دسترسی آزاد» ضروری است. برای نمونه، زمین عملاً منبعی است که دسترسی آزاد به آن در مناطقی که ارزش دارد، پایان یافته زیرا «زمین بیشتری ساخته نمی شود». اکنون فقط بخشی از نواحی بیابانی دوردست و نامساعد برای زیست، برای تملک (بدون خریدار) باقی مانده است. به عبارت دیگر، زمین منبعی است کاملاً محدود که عمدتاً تحت تصرف و تملک قرار دارد؛ لذا هر متقاضی برای استفاده از زمین، باید حقوق فعلی آن را خریداری نماید. نمونه دیگر ماهیگیری است که در گذشته آزاد بوده است. اما به تدریج با توسعه ماهیگیری و کاهش جمعیت ماهی ها، مقررات سخت گیرانه ای درباره صید برقرار می شود؛ لذا، صیادان جدید برای ماهیگیری باید مجوزهای ماهیگیران فعلی را خریداری نمایند.

مخالفان فلسفه «آب منبعی اقتصادی» توانسته اند حقوق دسترسی را به شکل دیگری تعبیر نمایند؛ اما، در اینکه آیا چنین مخالفتی می تواند از برقراری حقوق دارایی بر آب جلوگیری کند یا نه، تردید جدی وجود دارد. به نظر می رسد تضادی آشفتنی ناپذیر میان طرف داران «استفاده منصفانه از آب» و طرف داران «حقوق مالکانه» وجود دارد. شاید تا اندازه ای بتوان تضاد میان این دو

را از طریق «برنامه‌ریزی کاربری آب» برطرف نمود. توجه به تفاوت میان کاربری‌های کشاورزی با کاربری‌های شهری/صنعتی موضوع را روشن‌تر خواهد نمود. آبی که برای کاربری‌های خانگی، خدمات و برخی کاربری‌های صنعتی استفاده می‌شود به دلیل کیفیت و توزیع آن نسبتاً پرهزینه است. اما در ایران، این نوع آب همچنان یک منبع آزاد و در دسترس همه افراد (بدون خرید حقایق مالکان فعلی) بشمار می‌آید. البته هزینه‌های توزیع دریافت می‌شود، ولی هزینه دسترسی خیر. در مقابل، آب کشاورزی است که دسترسی آزاد به آن پایان یافته است. در این حالت قبول نوعی از مالکیت اجتناب‌ناپذیر است؛ و به همین لحاظ کشاورزان هزینه دسترسی به آب را پرداخت می‌کنند (با خرید چاه). جالب آن است که غالب مردم تصور می‌کنند که آب کشاورزی مجانی است. در هر حال از سیاست‌های آب بر اساس رویکرد «آب منبعی اقتصادی و اجتماعی» با دو استدلال «عدالت اجتماعی» و «کارایی اقتصادی» دفاع می‌شود.

۱- استدلال مبتنی بر عدالت اجتماعی: رشد جمعیت جهان در قرن بیستم میلادی، محدودیت بسیاری از منابع را آشکار ساخت. تا پیش از این، چنین منابعی به سبب جمعیت کمتر و پیشرفته نبودن فناوری، به صورت کامل مورد استحصال و بهره‌برداری قرار نگرفته بودند. در این قرن شمار بیشتر و بیشتری از این منابع، با نزدیک شدن به حد استحصال خود از دایره منابع با مالکیت مشترک و دسترسی آزاد، خارج شدند. جنگل‌ها و مراتع و شیلات، از روشن‌ترین نمونه‌های این فهرست هستند. آب نیز در حال پیوستن به همین فهرست است. هنگامی که یک منبع از وضعیت دسترسی آزاد خارج شد، ارزشمند می‌شود. کسب حق مالکیت بدون خرید (یا تحصیل مجانی) بخشی از هر منبع بدون دسترسی آزاد، به نسل‌هایی تعلق گرفته است که به اندازه کافی خوش‌شانس بودند. زیرا ایشان قبل از پایان یافتن دسترسی آزاد منبع، بدان دسترسی یافته‌اند. در هر حال توزیع نابرابر منبع (مثلاً آب) و کمیابی، خریداران را مجبور به پرداخت قیمت‌های بالا برای کسب حق بهره‌برداری از آن می‌نماید که بدین ترتیب بر نفع نسل اول افزوده می‌شود.

قیمت فروش آب پس از مرحله اول (یا همان نفع بادآورده ناشی از پایان یافتن دسترسی آزاد به منبع)، بر اساس هزینه‌های اقتصادی و بازگشت سرمایه و یا از طریق سازوکارهای بازار تعیین می‌شود. تلاش برای کاستن از منافع بادآورده دارندگان اولیه حق بهره‌برداری، عمل دشواری برای دولت‌های دموکراتیک به شمار می‌آید. نسل اول حقایق‌داران در زمره رأی‌دهندگان فعال سیاسی قرار دارند و با هر تلاشی که منافع ایشان را محدود سازد، مخالفت می‌کنند. در مقابل، نسل بعدی (که از مالکیت این منابع محروم مانده) خود را در قالب یک «اتحادیه» (نا آب‌بران یا آب‌بران بالقوه)

سازماندهی نکرده است؛ لذا قادر نیستند از سیاست تعدیل منافع نسل اول پشتیبانی کنند. بدین ترتیب، تا مدت‌ها از طریق ارث و بدون پرداخت پول، اراضی کشاورزی و آب از نسلی به نسل بعدی منتقل می‌شود. درست مانند آنچه در مورد زمین در جریان است؛ بنابراین چنین برداشتی درباره حقوق آب نیز محتمل است.

تذکر اساسی در اینجا آن است که متولیان آب باید همّت خویش را مصروف مدیریت آب و به‌ویژه حفاظت از کمیّت و کیفیت آن کنند؛ و نه آنکه از دیدگاه خودشان به دنبال بازتعریف عدالت یا انصاف باشند. زیرا، این وظیفه سیاست‌گذاران و مردم است. بدیهی است مردم و سیاست‌گذاران منتخب ایشان در تثبیت انصاف و عدالت، باید به دنبال نوعی از سیاست‌های بازتوزیع منافع باشند که بتواند ذی‌نفعان فعلی را به حامیان سیاست‌های رعایت «انصاف میان نسلی»، تبدیل نماید. ممکن است با اخذ مالیات، بخشی از سود و منافع نسل اول توسط دولت دریافت و در جهت عدالت اجتماعی صرف گردد.

۲- استدلال مبتنی بر کارایی اقتصادی: مسلماً برای ارتقای کارایی اقتصادی آب، راهکارهای متعدد فنی وجود دارد. اما در ایران فرصت‌هایی که تبادل و بازار آب برای ارتقای کارایی اقتصادی آب فراهم می‌آورند، موردتوجه نبوده‌اند. در اینجا به دو مورد اشاره می‌شود.

مبادله مجوزهای آب: مبادله مجوزهای برداشت آب، موجب تغییر مصرف آب از فعالیت‌های کمتر بهره‌ور به فعالیت‌های با بهره‌وری بیشتر و پرازش‌تر است. قطعاً با رعایت جوانب فنی و اقتصادی، هر کاربر آب در هر بخشی (کشاورزی، خدمات و صنعت) می‌تواند بهره‌ور باشد؛ اما، غالباً به سبب فقدان تخصص یا نداشتن ابتکار، و یا فقدان بازار برای محصول، این مورد با مانع روبرو می‌شود. مبادله آب، سازوکاری برای سوق‌دادن منابع آب به سمت تولیدات ارزشمندتر فراهم می‌آورد. این تبادلات درون هر بخش معمول است؛ اما صدور اجازه برای تبادلات میان‌بخشی مرسوم نیست (یا بسیار محدود است). چنین مجوزهایی باید با رویکرد جامع حوضه‌ای و بر اساس سیاست‌گذاری اقتصادی - اجتماعی که با اجماع کنشگران محلی صورت می‌پذیرد، صادر شوند.

فروش آب مازاد (درون هر بخش): منظور اجازه فروش موقت (اجاره) آب به سایر کاربران در همان بخش است. برای مثال چنین امکانی، به کشاورزان فرصت می‌دهد تا به یاری یکدیگر بپردازند و کسب درآمد نیز به عنوان انگیزه‌ای دیگر برای بهبود کارایی آب عمل می‌کند. بدیهی است فروشنده آب، فرصت یا امکان کسب درآمد بهتری (بیشتر از قیمت فروش) نداشته است (و گرنه نمی‌فروخت)؛ و قطعاً خریدار، انگیزه‌ای به جز کسب سود بیشتر ندارد.

نکته بسیار مهمی که در اینجا نباید فراموش شود، «پایایی» است که در واقع همان کارایی اقتصادی است، البته وقتی که این کارایی در مقیاس‌های مکانی و به‌ویژه زمانی بسیار گسترده‌تری ارزیابی شود. به عبارت دیگر، اگر تأثیر تصمیمات و اقدامات بر کارایی اقتصادی در پهنه‌های مکانی گسترده (اعم از پایین‌دست و بالادست) و در دامنه زمانی گسترده (تا نسل‌های آینده) موردتوجه باشد، پایایی مدنظر قرار گرفته است.

<< کاربری آب و تعدیل مصارف

تعدیل مصارف آب، علاوه بر مباحث فوق، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است. ضوابطی مانند مالیات آب درباره مالکیت مطلق (مانند قوانینی که مالکان زمین‌های بزرگ را در هنگام ملحق شدن به اراضی شهری، ملزم به اهدای درصد مشخصی از اراضی خود برای استفاده عمومی می‌کنند) می‌تواند در تعدیل مصارف آب، مفید واقع گردد. تاکنون تمرکز بسیاری بر کاربرد آب در کشاورزی صورت گرفته، درحالی‌که این کاربری آب در ظاهر، یک مصرف کم‌ارزش آب است؛ ولی در ماهیت آن، آب در بخش کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تولید، ارزش بالایی دارد. ارزش آب مورد استفاده در صنعت بیشتر، ارزش آب مورد نیاز برای خدمات و شهر بالاتر، و ارزش آب شرب بیشترین است. این تفاوت در ارزش‌ها، موجب انتقال آب از مصارف کم‌ارزش‌تر به مصارف باارزش‌تر می‌گردد (البته بر حسب نیاز و ضرورت). اگر برای جلوگیری از کاهش سهم آب بخش کشاورزی سیاست کلان ملی وجود داشته باشد، معمولاً این سیاست از طریق ممنوعیت تبدیل کاربری اراضی و آب کشاورزی به سایر کاربری‌ها جاری می‌گردد. راه دیگر اعمال عوارض به سایر کاربری‌ها و پرداخت یارانه به بخش کشاورزی است تا تعادل منافع میان این مصارف ایجاد گردد و از این طریق با انگیزش مالی کشاورزان موجب عدم فروش آب به سایر بخش‌ها گردد. به‌هرحال، روند توسعه موجب رشد مصارف آب غیرکشاورزی هم‌زمان با رشد نیاز به غذا می‌شود. این رشد شدید نیاز به آب، فقط با تمرکز بر «فناوری‌های نو، افزایش بهره‌وری جامع، و تخصیص یکپارچه و بهینه آب»، در قالب برنامه‌ای منسجم، حل‌وفصل می‌گردد.

پس از کمیابی آب، تغییر کاربری آب سود قابل‌ملاحظه‌ای فراهم می‌نماید (درست مانند تغییر کاربری زمین). اگر آب‌بران (دارندگان مجوزهای برداشت آب و حقا به‌داران) بتوانند حقوق آب خود را به کاربری‌های دیگر (صنعتی و شهری) بفروشند؛ احتمالاً قیمت‌های بسیار بالاتری (در مقایسه با قیمت رایج آب در بخش کشاورزی) به چنگ خواهند آورد. این قیمت بالا، سود شخصی قابل‌ملاحظه‌ای به افراد فروشنده می‌رساند. ولی هم‌زمان، تمام بخش کشاورزی از قیمت فروش آب به

بیرون این بخش تأثیر می‌پذیرد؛ و نهایتاً این وضعیت، موجب تحمیل هزینه سرمایه سنگینی به آنان که هنوز به کشاورزی ادامه می‌دهند می‌شود و مهم‌تر اینکه امنیت غذایی کشور را دچار اختلال می‌کند. دولت باید به نحوی سیاست‌گذاری و اقدام نماید تا حداقل بخشی از این سود به تعادل بخشی منابع آب، ارتقای زیرساخت‌ها، و کنترل آلودگی‌ها اختصاص یابد. این سیاست، هم منافع بیشتری برای بخش اقتصاد به همراه دارد و هم موجب بسط عدالت و بهبود پایایی توسعه خواهد گردید. همچنین، با افزایش فشار بر منابع محدود آب، عدم تأمین آب موردنیاز اکوسیستم در بسیاری از مناطق به یک مسأله بحرانی تبدیل شده است. درنظرگرفتن سهمی برای اکو سامانه‌های آبی (نهرها و رودخانه‌ها، تالاب‌ها و مرداب‌ها، و...) و دیگر مقاصد محیط‌زیستی تابعی از عوامل اقتصادی و در نهایت تابع تصمیمات سیاسی است. در رویکرد «آب منبعی اجتماعی-اقتصادی» توجه به اکوسیستم تضمین گردیده است؛ زیرا در این رویکرد فرض می‌شود توسعه پایا برآیند سه مؤلفه است: ۱- جامعه با نشاط، ۲- اکوسیستم شاداب و محیط‌زیست سالم و ۳- اقتصاد بالنده. به‌عبارت‌دیگر، در این رویکرد فقط سودهای کوتاه‌مدت و فردی، پیشران توسعه نیستند. بلکه همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، کارایی اقتصادی در مقیاس‌های مکانی و به‌ویژه زمانی بسیار گسترده‌تر ارزیابی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، تأثیر تصمیمات و اقدامات بر کارایی اقتصادی در پهنه‌های مکانی گسترده (اعم از پایین‌دست و بالادست) و در دامنه زمانی گسترده (تا نسل‌های آینده) موردتوجه قرار می‌گیرد که منجر به پایایی خواهد شد.

<< بازار آب

در بسیاری از مناطق جهان، تقاضای آب برای مصارف شهری، کشاورزی و صنعتی در حالی روبه‌افزایش است که محدودیت‌های منابع آب نیز فزاینده است (به‌ویژه با ادامه روند تغییر اقلیم). در مناطقی که کم‌آبی به حد کمیابی رسیده است، مدیران آب شهری در تلاش هستند تأمین آب بیشتری را برای پشتیبانی از رشد شهرها تضمین کنند. تولید کشاورزی (به‌ویژه غذا) به سبب کاهش تأمین آب برای آبیاری و همچنین به دلیل تغییر اقلیم و تشدید نوسانات آب‌وهوایی، در تنگنا قرار گرفته است. اکنون کم‌آبی به چالش عمده قرن ۲۱ تبدیل شده است. در بیشتر مناطق، نظام‌های حکمرانی آب توانسته‌اند توفیق چندانی در مدیریت اثربخش کم‌آبی حاصل نمایند. در واقع، مدیران آب، اجازه بهره‌برداری مفرط از رودخانه‌ها و آبخانه‌ها را صادر کرده‌اند؛ و در پی این زیاده‌خواهی، اکنون سیستم «انسانی - طبیعی»، با تعارض و مشکلات جدی روبرو شده است. این شرایط، مسأله کم‌آبی را

به یک موضوع پیچیده و درهم‌تنیده تبدیل نموده که راه حل آسان و فوری ندارد. شکنندگی سیستم به حدی رسیده که وقتی دوره خشک (خشکسالی) فرامی‌رسد، مدیران برای جلوگیری از وقوع وضعیت وخیم آب (بحران آب) نمی‌توانند تناسب لازم میان تقاضا و عرضه را برقرار نمایند؛ و لذا بحران بروز می‌نماید؛ و ناگزیر سیستم در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای مختل می‌شود. این اختلال، در نهایت منجر به بروز یا تشدید تعارض‌های اجتماعی و بی‌ثباتی سیاسی و نیز خسارت دیدن اقتصاد و اکوسیستم می‌گردد.

با این‌همه اگرچه آب منبعی محدود است؛ اما زمین به طور کامل از آب شیرین تهی نخواهد شد. مقدار آب موجود در کره زمین، بسیار بیشتر از نیازهای کنونی و پیش‌بینی شده انسان است. مشکل اساسی عدم انطباق زمانی - مکانی آب شیرین موجود با نیازهای بشر است. تلاش انسان برای تطبیق موجودی آب با نیازهای خودش، بسیار پرهزینه و از نظر اکولوژیکی خسارت‌آفرین بوده است؛ لذا فراخوان برای ایده‌های نو و ابتکاری مدیریتی و یا فناوریانه (نرم و/ یا سخت) باهدف کاستن از این آثار منفی از هر سو شنیده می‌شود.

تاکنون، عمدتاً پاسخ‌های مدیریت آب به کم‌آبی از جنس مهندسی و عرضه‌گرا بوده (ساخت مخازن، کانال‌ها، خطوط لوله، چاه‌ها و تأسیسات دیگر) است. اما به سبب افزایش هزینه پروژه‌های تأمین آب و نیز رشد روزافزون دغدغه‌های محیط‌زیستی در سال‌های اخیر، تغییر بارزی به سمت نوآوری‌های اقتصادی - مدیریتی، از جمله استراتژی‌های مدیریت تقاضا، پدیدار شده است. در چنین فضایی است که بازارهای آب به شکل فزاینده‌ای موردتوجه قرار گرفته‌اند. منظور از بازار آب، همان نظام (قواعد و مقررات عرفی یا رسمی) حاکم بر خریدوفروش و یا اجاره مجوزهای برداشت آب است که در حالت ایده‌آل، مستقل از حق مالکیت زمین مبادله می‌شود. طرفداران بازار آب معتقدند بازار، تأمین آب را بهبود می‌بخشد، بهره‌وری تخصیص آب را افزایش می‌دهد، و تقاضاهای متنوع آب را با انعطاف بیشتری پاسخ می‌دهد. بدیهی است حد انعطاف، تابع موجودیت زیرساخت‌های ذخیره، انتقال و توزیع آب می‌باشد. همچنین، انعطاف در مبادلات آب تابع سیاست‌های دولت است؛ زیرا قوانین و مقررات و یا یارانه‌ها و عوارض، مانند مشوق یا بازدارنده عمل می‌نمایند؛ و سپس میزان جابه‌جایی آب میان کاربری‌های متفاوت و یا انتقال آب (به/ از) ورای مرزهای ژئوپلیتیکی و هیدرولوژیکی تعیین می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد بازارهای آب (به‌عنوان نظام‌های مبادله آب) باید به این پرسش‌ها پاسخ داده شود: آیا مصرف آب در حدود تعیین شده (کمتر از سقف تعیین شده) باقی می‌ماند؟ تا چه اندازه از سلامت اکوسیستم حفاظت می‌شود؟ و آیا کارایی

اقتصادی و سایر معیارهای بهره‌وری اقتصادی بهبود می‌یابد؟ بررسی بازارهای آب (در آمریکا، استرالیا، شیلی، چین و آفریقای جنوبی) و ارزیابی عملکرد این بازارهای آب در مقایسه با معیارهای حقوقی/ نهادی مفید است و به این سؤال که «بازارهای آب چه پیامدهایی برای کارایی، عدالت و پایداری در برداشته‌اند؟»، پاسخ می‌دهد. اما متأسفانه، داده‌های موردنیاز برای مقایسه بازارهای آب، یا به‌قدر کافی وجود ندارد و یا در دسترس نیست. از مطرح‌ترین بازارهای آب موجود دنیا، چهار مورد در آمریکا قرار دارند (شامل: «آبخانه ادواردز در تگزاس»، «ناحیه شمال کلرادو»، «دره مرکزی رودخانه سن‌ژواکین در کالیفرنیا»، و «حوضه آبریز کلمبیا در شمال غرب پاسیفیک»)^۱؛ و سه مورد دیگر عبارت‌اند از: حوضه مورای دارلینگ در استرالیا، حوضه آبریز سانتیاگو در مکزیک، و نیز یک نمونه در شیلی.

این بازارهای آب به گونه‌های مختلفی ظهور یافته‌اند: برخی به‌تدریج با توسعه کاربری آب تکامل یافته‌اند (مانند جنوب شرق استرالیا)، یا در پاسخ به یک رویداد حقوقی مطرح و ایجاد شده‌اند (مانند اقامه دعوی حقوقی در موضوع حفاظت از گونه‌های در معرض خطر در تگزاس)، و یا برای کوچک‌سازی دولت و کاهش بار مالی دولت ایجاد گشته‌اند (مانند تمرکززدایی در بهره‌برداری از تأسیسات آبی در پی بحران مالی در مکزیک). اما در هر حال آنچه در بیشتر بازارها مشترک است، شرایط کم‌آبی است. به‌عبارت دیگر، وقتی تقاضاهای آب به سقف موجودی آب نزدیک می‌شود، بازارها ظهور می‌یابند. بدیهی است ظرفیت موجود آب (در دسترس و قابل‌برداشت) تابع تجدیدپذیری منابع آب (محدودیت طبیعی)، توسعه زیرساخت‌های استحصال (محدودیت اقتصادی)، و نیز محدودیت‌های اجتماعی - فرهنگی (اعم از رسمی یا عرفی) است. برای مثال هرگاه که حکمرانی آب تصمیم می‌گیرد به دلیل فراهم‌ساختن تفریحات رودخانه‌ای، در برداشت آب محدودیت و سقف تعیین کند، در واقع یک محدودیت اجتماعی - فرهنگی شکل گرفته است.

گاهی محدودیت‌های دیگری در برداشت آب (به دلایلی مانند حفاظت از امنیت آبی و پایداری توسعه و یا حفاظت از اکو سامانه‌های آب شیرین) مقرر می‌شود. این موارد معمولاً باهدف جلوگیری از زوال منابع آب حوضه (بر اساس اصل «تراژدی منابع مشترک»، آن‌گونه که هاردین بیان کرده) وضع می‌گردد. تراژدی منابع مشترک (Hardin, ۱۹۶۸) را می‌توان چنین شرح داد:

۱- افراد متعددی دسترسی آزادانه به یک منبع کمیاب ولی مشترک (مانند آب زیرزمینی) دارند؛
به طور طبیعی هر یک از افراد به دنبال منافع خود هستند و مستقلاً از منبع استفاده می‌کنند؛

اگر نهاد تنظیم‌کننده‌ای حضور نداشته باشد (و یا حضوری غیرمؤثر، مانند دولت، داشته باشد)، یک رقابت بدون ضابطه شکل می‌گیرد که در آن هر یک از افراد به دنبال استحصال سهم بیشتری برای خودش است؛ و این رقابت بی‌ضابطه در نهایت موجب تخلیه سریع منبع و احیاناً نابودی آن می‌شود.

به عبارت دیگر در غیاب رفتار اجتماعی و جمعی، عملاً افراد منبع را غارت می‌کنند؛ با وجود اینکه می‌دانند اقداماتشان در تضاد با منافع بلندمدت خودشان و جامعه قرار دارد. دلیل این وضعیت، آن است که افراد هزینه کامل اقدامات خود را متحمل نمی‌شوند. در تلاش برای اجتناب از وقوع این تراژدی، معمولاً با توجه به محدودیت‌ها (طبیعی، اقتصادی و اجتماعی - فرهنگی) سقف برداشت تعیین می‌شود؛ یا به بیان دیگر، حجم کل برداشت آب محدود می‌گردد. اعمال این گونه محدودیت‌ها فقط با وضع مقررات عادلانه (معقول و مقبول)، رعایت انصاف، و شفافیت در عملیات، قابل پیاده‌سازی است. البته تضمین دستیابی به نتیجه، نیازمند جلب مشارکت کنشگران، کسب اجماع ایشان (آن هم در فضای اعتماد متقابل) است.

در تگزاس، برداشت آب از آب‌خوان ادواردز تا اوایل دهه ۱۹۹۰ روند افزایشی داشته و در برخی سال‌ها به بیش از ۶۵۰ میلیون مترمکعب رسیده بود. در سال ۱۹۹۳، طرح یک دعوای حقوقی برای حفاظت از گونه‌های در معرض خطری که زیست آن‌ها به منابع آب حوضه وابسته بود، موجب شد تا دادگاه فدرال، رأی مبنی بر جلوگیری از افت بیشتر آبخوان صادر کند؛ زیرا افت آبخوان مسبب کاهش جریان رودخانه‌ها و چشمه‌ها و حتی خشکیدن آن‌ها بوده است. در پی این رأی دادگاه، نهاد قانون‌گذاری ایالت تگزاس برای حفاظت از تنوع زیستی حوضه، سقف برداشت از آبخوان را برای دوره منتهی به سال ۲۰۰۴، به ۵۵۵ میلیون مترمکعب محدود کرد (حدود ۱۵٪ کاهش نسبت به حداکثر برداشت قبلی)؛ و نیز مقرر نمود تا سپس طی چهار سال بعدی (تا سال ۲۰۰۸) این سقف بازم کاهش بیشتری بیابد تا به ۴۹۳ میلیون مترمکعب برسد (یعنی حدود ۱۱٪ کاهش نسبت به ۵۵۵ میلیون مترمکعب). در سال ۲۰۰۷، مقررات جدیدی جایگزین سقف تعیین شده شد که میزان برداشت از آبخوان را تابع تغییرات آب‌وهوایی دانسته و لذا سقف برداشت در خشکسالی‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌داد. از زمان راه‌اندازی بازار آب در آبخوان ادواردز، حدود ۸ درصد کل حبابه‌های سطحی و زیرزمینی (معادل حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب) از آبیاری به کاربری‌های شهری انتقال یافته است. فرایند صحیح تغییر قانون و نیز پیاده‌سازی تدریجی آن باعث شده است تا علی‌رغم افزایش جمعیت، میزان برداشت‌ها کاهش یافته و آبخوان ادواردز تعادل خود را باز یابد.

اگر با دوراندیشی، نتیجه رفتارهای غیرمسئولانه سنجیده شود

و با پیش‌نگری (Anticipation) عواقب این رفتار (شرایط نامطلوب) برآورد شود؛ براین اساس می‌توان محدودیت برداشت آب را قبل از وقوع شرایط نامطلوب تعیین و اعمال نمود. در این صورت با واقع‌گرایی، پیشگیری معقول انجام یافته است. بدیهی است «علاج واقعه، قبل از وقوع باید کرد»، و لذا رویکرد پیشگیرانه بر رویکرد جبرانی، ترجیح دارد. البته، رویکرد پیشگیرانه موجب کنترل (و یا حتی کاهش برداشت‌ها) می‌گردد؛ لذا طبیعی است که در میان ذی‌نفعان، نگرانی‌ها و بحث‌های قابل‌ملاحظه و نیز موجی از مخالفت ایجاد نماید. به‌طور کلی، کاهش برداشت‌ها به سه شیوه (یا ترکیبی از آن‌ها) ممکن است صورت پذیرد: ۱- دولت کاهش‌های اجباری در حبابه‌ها و مجوزهای برداشت را یک‌مرتبه اعمال نماید؛ ۲- تخصیص سالانه آب به آب‌بران می‌تواند به تدریج و با اولویت‌بندی (مثلاً با قائل‌شدن حق تقدم) کاهش یابد و نیز تابعی از موجودی آب در هر سال باشد؛ و یا ۳- دولت برای حذف برداشت‌های اضافه بر سقف، به سیاست بازخرید مجوزها بپردازد. البته، پیاده‌سازی هرکدام از این سه شیوه مناقشاتی به همراه خواهد داشت؛ زیرا پیامدهایی برای منافع، معیشت و امنیت (مالکیت و درآمد) کنشگران در بردارند. منابع مالی برای شیوه سوم را می‌توان در بازار آب از بخش خصوصی کسب نمود؛ بدین ترتیب که اجازه جابه‌جایی کاربری آب به شرطی داده شود که هم‌زمان با تبادل پروانه، کاهش حجم برداشت نیز اعمال گردد. تعیین سقف برداشت آب و محدودیت تأمین آب، انگیزه‌ای قوی برای مبادله آب و سرمایه‌گذاری در بهبود کارایی آن به وجود می‌آورد. بازار رقابتی در این شرایط، موجب شفاف‌سازی نظام مبادله و آسانی تبادل آب در چارچوب سقف تعیین شده می‌شود.

البته، آنچه بیشترین اهمیت را بر عملکرد مناسب بازار آب دارد، کنترل برداشت‌های آب و حصول اطمینان از رعایت حدود مقرر در مجوزهای صادر شده است. چنین انضباطی زمینه‌بازیابی تعادل آبخوان را فراهم می‌آورد؛ و نیز محدودیت ناگزیری که ناشی از کم‌آبی است، مشوقی قابل‌ملاحظه برای صرفه‌جویی آب خواهد بود. زیرا، در جایی که برای برداشت و مصرف آب سقف تعیین می‌شود، تنها راه پاسخ به نیازها و تقاضاهای فزاینده آبی برای آب (ناشی از رشد جمعیت و یا افزایش ضرورت تولید غذا)، افزایش کارایی مصرف آب است. در بازار، بازتخصیص آب میان بخش‌های مختلف از طریق مبادله آب صورت می‌پذیرد و به تدریج تسهیم آب میان بخش‌های رقیب را تغییر می‌دهد که عمدتاً، کاهش سهم آب کشاورزی و افزایش سهم آب شهر و خدمات و صنعت را در پی دارد. ماهیت پیچیده «نقش آب در توسعه اقتصادی و بقای اکوسیستم» سبب می‌شود بازار آب نتواند تمامی مشکلات را

به تنهایی حل نماید. درعین حال برای آنکه منافع بالقوه بازار آب پدیدار گردد، باید تلاش نمود تا شرایط و نهادهای مناسب برای استقرار بازار آب، با حداقل هزینه‌های تراکنش (Transaction Cost)، مهیا گردد.

با این حال، باید اذعان داشت که آب برای مقاصد متنوع عمومی/ خصوصی کاربرد دارد، استفاده مجدد از آب در برخی موارد رایج است، آب متحرک اما سنگین است، جابه‌جایی آن بر خلاف نیروی ثقل و بدون زیرساخت، بسیار سخت و هزینه‌بر است، آب زیرزمینی قابل‌مشاهده نیست، و موجودی آن تابع آب‌وهوا و بسیار نامعین است. این ویژگی‌ها بدین معنا است که استفاده و مبادله آب با مسائل جانبی فراوانی همراه است که مبادلات آب را پیچیده می‌سازد. درهرحال اهداف بازار آب، تابع اهداف اصلی مدیریت آب است؛ لذا در کنار هدف نهایی بازار، یعنی هدایت کاربری‌های آب به سمت کاربری‌های با بهره‌وری اقتصادی بالاتر، دو مورد از ضرورت‌های بازار آب، عبارت‌اند از:

۱- تعیین سقف تخصیص آب، بر اساس بیلان حوضه باشد؛ همچنین اجازه تخلیه فاضلاب‌ها بر اساس ظرفیت خود پالایی حوضه باشد؛ یا به عبارت دیگر مبنای صدور هرگونه مجوز (برداشت آب و دفع فاضلاب)، ظرفیت طبیعی حوضه است؛ و
۲- برای پایایی اکوسیستم وابسته به آب (گیاهان/جانوران) و حفاظت از تنوع زیستی، سهم آب محیط‌زیست رعایت گردد.
اگرچه در راستای هدف دوم برای شرایط عادی (شامل شرایط نرمال و نیز ترسالی‌ها و خشکسالی‌های با دوره بازگشت‌های کوتاه، مثلاً کمتر از ۲۰ سال)، قطعاً باید سهم مناسبی برای اکوسیستم لحاظ شده باشد. اما در وقوع خشکسالی‌های شدید که برنامه‌های جاری مدیریت آب به آن‌ها معطوف نیست، خرید حقایقه‌ها برای مقاصد محیط‌زیستی توسط نهادهای عمومی (محلی یا ملی) می‌تواند گره‌گشا باشد. نظریه‌های تکامل‌یافته حقوق آب، حفظ آب برای مصارف اکوسیستم درون رودخانه را در مواقع کم‌آبی، یا تخصیص سیل به عرصه‌های سیل‌گیر طبیعی راه، استفاده مفید تلقی می‌نماید و لذا خرید مجوزها را برای این موارد موجه می‌داند. حتی یک برنامه تخصیص انعطاف‌پذیر که تابع وضعیت آب‌وهوایی است، می‌تواند مشکل فوق را تا حد زیادی حل نماید.

برنامه‌های بازیابی گونه‌های در معرض خطر در آبخانه ادواردز، بر پایه مدیریت برداشت آب به‌نحوی که آب کافی برای پشتیبانی از ادامه حیات گونه‌های هدف باقی بماند، تهیه شده‌اند. یعنی حجم کل برداشت‌ها با نوسانات جوی تغییر می‌یابد، به‌نحوی که در دوره‌های خشک برداشت از آبخانه تعدیل می‌شود تا جریان چشمه‌ها و حداقل آب برای اکو سامانه‌های آبی و نیز سلامت کلی آبخانه تضمین شود. در واقع از اواخر دهه ۱۹۹۰، شرکت آب این حوضه طرح جسورانه‌ای را

برای صرفه‌جویی آب پیاده کرده که متناسب با ترازهای آب در آبخوان است. وقتی تراز آبخوان کاهش می‌یابد، بر اساس اجماع محلی کنترل‌های مقرراتی فزاینده (با جرایم بازدارنده) بر روی برداشت‌های آب در این ناحیه اعمال می‌شود. پایش جمعیت گونه‌های در معرض نابودی در سال‌های اخیر، حاکی از بهبود تدریجی شرایط در اثر اجرای این برنامه است. مدل‌سازی اکولوژیکی گسترده نیز نشان می‌دهد استراتژی‌های بکار گرفته شده توسط این شرکت موفقیت‌آمیز بودند؛ گرچه در برخی موارد نیازمند تعدیل یا تکمیل هستند.

نباید انتظار داشت که بازار آب، تمامی مشکلات را حل نماید. در واقع رویکرد «مبادله در سقف مجوزهای صادر شده برداشت»، علاوه بر بازار، مؤلفه دیگری نیز دارد که «کنترل مجموع آب برداشتی (تخصیصی) در سقف توافق شده» است. تحت این شرایط است که منافع وعده‌داده شده توسط بازار آب، تحقق می‌یابد. اگر کاهش کل برداشت‌ها ضرورت دارد، نهادهای محلی آب‌بران مجبور هستند با وضع مقررات تنظیم‌کننده و یا با خرید حقایقه‌ها، مجوزهای برداشت را تا سقف تعیین شده کاهش دهند. هرگونه رفتار دستوری و گزینشی (ناشی از دخالت دولت)، از کارایی مبادلات بازار آب می‌کاهد. بدیهی است که عملکرد خوب بازار، نیازمند جامع‌نگری است. بدین معنا که به اثر متقابل آب سطحی و آب زیرزمینی بر یکدیگر توجه گردد.

بنابراین، در هر منطقه، سقف مجاز برداشت‌ها را می‌توان بر اساس نوسانات آب‌وهوایی، دغدغه‌های محیط‌زیستی، و اثرات منفی بر محیط (طبیعی و انسانی) تعیین نمود. البته نباید فراموش شود که این سقف ثابت نبوده و تابع آب‌وهوا (و حتی تغییرات اقلیمی) است. یک راهکار برای ایجاد انعطاف در آب تخصیصی، آن است که مجوزهای برداشت بر اساس سهم (S) باشند و نه حجم. به عبارتی حجم برداشت برای هر مجوز برداشت، سالانه اعلام می‌شود. این حجم معادل سهم هر نقطه برداشت از حجم برداشت مجاز سالانه (V) برای منبع آب (سطحی یا آبخانه) است. در این صورت، حجم تخصیص‌داده شده سالانه به‌عنوان تابعی از مقدار سالانه قابل‌برداشت مشخص شود (یعنی تخصیص سالانه هر آب‌بر مساوی است با $S \times V$). بدیهی است نیازهای محیط‌زیست قبل از اعلام سقف، محاسبه و کنار گذاشته شده است. با این روش اگر وضعیت ترسالی وقوع یابد، تخصیص‌ها افزایش و در شرایط خشکسالی، تخصیص‌ها کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر تعیین (کاهش/افزایش) حقایقه‌ها با دریافت بازخورد از وضعیت منابع آب، خودکار می‌شود. پایش منابع آب، بازخورد لازم را فراهم می‌نماید (در آب‌های سطحی با پایش دبی رودخانه و در آب‌های زیرزمینی با پایش تراز آبخوان).

باید یادآوری نمود که تهی‌شدن منبع آب برای آب‌برانی که نقطه برداشت مستقل (چاه، قنات و...) در اختیار دارند، مستقیماً خسارتی بزرگ (از دست‌رفتن سرمایه) محسوب می‌شود. اما در شبکه‌های توزیع آب، وضع بر منوال دیگری است. در این شبکه‌های آب، عموماً قیمت‌های پارانه‌ای رواج دارد و یا صرفاً بر اساس هزینه‌های تأمین (استحصال و توزیع)، آب نرخ‌گذاری می‌شود؛ لذا شهروندان (در شبکه‌های توزیع آب شهری) و یا کشاورزان (در شبکه‌های آبیاری)، هزینه واقعی آب را نمی‌پردازند. بدیهی است قیمت‌گذاری پائین به استفاده بیش از حد آب (و صرفه‌جویی کمتر) دامن می‌زند و نهایتاً به تهی‌شدن منبع می‌انجامد؛ زیرا قیمت آب در شبکه‌ها از قواعد بازار تبعیت نمی‌کند. در واقع نقطه قوت اصلی بازارهای رقابتی آب، «سازوکار نرخ‌گذاری» آن است. این نقطه قوت موجب تعیین دقیق‌تر قیمت واقعی آب می‌شود؛ لذا ادامه فعالیت‌هایی که بهره‌وری پایینی دارند با رشد قیمت واقعی دیگر توجیه نخواهند داشت؛ لذا مالکین چنین فعالیت‌هایی فروشنده آب می‌شوند؛ بنابراین تبادل آب در بازار، به طور خودکار موجب بازتخصیص آب به فعالیت‌های با بهره‌وری بیشتر و نهایتاً حداکثر شدن ارزش اقتصادی آب می‌گردد. بازار در این نقش، به گونه‌ای نامتمرکز به تخصیص کارآمد آب می‌پردازد. مقایسه عملکرد بازارهای موجود آب با نتایج مقررات غیربازاری متعارف (یعنی سیاست‌های دستوری و کنترلی دولت) نشانگر تفاوتی معنادار به نفع بازارها است.

نقش بازار در خشکسالی‌ها نیز قابل‌توجه است. حقیقت آن است که خسارت کاهش مصرف آب برای آب‌بران مختلف به شکل قابل‌ملاحظه‌ای متفاوت است. برای نمونه حتی در بدترین خشکسالی‌ها، آب خانگی نباید از حد مشخصی کمتر شده و به هیچ وجه نایستی قطع گردد. در چنین شرایطی، مبادله حقایقه یا مجوزها در بازار آب، می‌تواند چاره‌ساز باشد. بدین معنا آن‌هایی که کاهش مصرف آب هزینه‌های بالا و خسارات اقتصادی/اجتماعی/سیاسی را بر ایشان تحمیل می‌کند، نمی‌توانند آن را تحمل نمایند؛ و لذا می‌توانند حقایقه/مجوزهای دیگری را که متحمل خسارت کمتری می‌شوند خریداری یا اجاره (خرید موقت) نمایند.

برای تأمین نیازهای فزاینده فعالیت‌های اقتصادی در شهرها و صنایع نایستی نگران بود؛ زیرا تفاوت شدید میان بهره‌وری بخش کشاورزی با سایر بخش‌های اقتصاد، آب کافی برای افزایش آن فعالیت‌ها را فراهم می‌آورد. البته کاهش سهم آب کشاورزی، غالباً بحث‌برانگیز است. بدیهی است که سودهای اقتصادی فقط زمانی محقق می‌شوند که مناطق و کشورها آزادانه بتوانند غذا را صادر و وارد کنند (تبادل آب مجازی).

معمولاً جوامع باتوجه به گرایش‌های سیاستی، برای حفاظت از منابع غذایی محلی یا برای حفاظت از سبک‌های زندگی سنتی/روستایی، باید با نگاهی بلندمدت تصمیم اتخاذ کنند که آیا تمایل دارند منافع اقتصادی را با گرایش‌های فرهنگی و سیاسی تهاتر کنند یا خیر؟ در نتیجه این تصمیمات، گاهی بازدارنده‌هایی برای جلوگیری از تبادل آب کشاورزی به بیرون از این بخش اعمال می‌شود. برای مثال، مقررات محدودکننده و یا عوارض بالایی برای فروش آب از کشاورزی به دیگر مصارف وضع می‌شود. این نکته را بایستی یادآوری نمود که به دلیل بالابودن ضریب برگشت آب در سایر بخش‌ها (نسبت به کشاورزی)، در انتقال آب از کشاورزی به آن بخش‌ها، آب برگشتی (فاضلاب و پساب) افزایش می‌یابد که معمولاً در کشاورزی قابل‌استفاده خواهد بود.

در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در مقابله با کمبود آب و استفاده پایا از آب، بازارهای آب در حال جلب توجه روزافزون هستند. زیرا نه تنها این بازارها می‌توانند به مصرف کارآمدتر آب کمک کنند؛ بلکه در این بازارها تأکید بر حقوق مالکیت آب، موجب حفاظت از این سرمایه بی‌نظیر توسط مالکان می‌گردد. بدیهی است، پیاده‌سازی بازار آب در یک حوضه، امر آسانی نبوده و زمان‌بر است. علاوه بر این، مدتی طول می‌کشد تا بازار آب به عملکرد خوب دست یابد. عوامل تدارکاتی و پشتیبانی مهمی وجود دارند که برای موفقیت بازار آب ضروری هستند که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: خریداران و فروشندگان به تمام اطلاعات درباره مجوزها و حقایقه‌هایی که مبادله می‌شوند دسترسی داشته باشند؛ مکانیزم‌های بازار و انواع مختلف حقوق، شفاف باشند؛ و نیز مشارکت‌کنندگان در بازار باید به اندازه کافی سواد بررسی عدم قطعیت‌ها و گزینش مناسب‌ترین گزینه را داشته باشند. علاوه بر این، عواقب احتمالی ناشی از تبادل آب بر حوضه (منابع آب و محیط‌زیست) و سایر آبخیزنشینان در ابعاد مکانی و زمانی باید به حساب آورده شود. بدیهی است، در خرید موقت (اجاره) آب، منابع آب خریدار و فروشنده باید از نظر هیدرولیکی مرتبط باشند (آب قابل‌تحويل به خریدار باشد). در نهایت، و شاید مهم‌تر از همه، بازار آب تنها وقتی عملکرد مناسب خواهد داشت که برداشت آب در سقف مشخص تعیین شده برای حفاظت از محیط‌زیست و تضمین پایایی اکو سیستم باشد. در واقع بازار آب در اینجا نقشی برای مقابله با کمیابی ندارد، همان‌گونه که تجارب استرالیا به‌روشنی نشان می‌دهد، پیاده‌سازی بازار آب و تعدیل برداشت‌ها و مصارف آب در یک حوضه، در گروی اجماع کنشگران و عزم سیاسی است که در مقدمه نیازمند بحث گسترده در جامعه، درباره جنبه‌های مختلف آن است.

>> **مهندس نوری اسفندیاری:** بازار آب موضوعی است که حدود ۲۰ سال پیش، با آغاز برنامه دوم توسعه در کشور، مورد توجه قرار گرفت. در آن زمان، بحث تشویق به ایجاد بازار آب شروع شد، در حالی که این بازار به صورت محلی و غیررسمی در کشور وجود داشت. قانون برنامه دوم توسعه تأکید داشت که موانع رشد و توسعه این بازار شناسایی و برطرف شوند. ایران نیز مانند بسیاری از کشورها که به سمت تشویق خرید و فروش آب در بازار رفته‌اند، به این مسیر پیوست. با این حال، این حرکت با احتیاط و بررسی‌های دقیق انجام شد تا موانع موجود در این زمینه کاهش یابد. در حال حاضر، وزارت نیرو در حال شکل‌دهی، بررسی و آسیب‌شناسی هشت بازار آب به صورت طرح آزمایشی است. علت توجه به بازار آب، مجادله‌ها و مطالباتی است که در این زمینه وجود دارد و شاید امروز فرصتی باشد تا درباره آن‌ها صحبت کنیم. بازار آب یک سازوکار است که از طریق آن، حقوق آب بین افراد مبادله می‌شود. این مبادله می‌تواند به صورت موقت یا دائمی باشد و در چارچوب مجموعه‌ای از مقررات و سیاست‌ها شکل می‌گیرد. اگر این مقررات رسمی باشند، به آن بازار، بازار رسمی گفته می‌شود. اگر پشتیبانی از بازار آب به صورت هنجارها و سازوکارهای اجتماعی باشد، به آن بازارهای غیررسمی می‌گویند. این نوع بازارها یکی از راه‌های مدیریت تقاضا محسوب می‌شوند. اگر کشوری بخواهد به سمت مدیریت تقاضا حرکت کند، بدون شک یکی از گزینه‌هایی که در سیاست‌گذاری دارد، تشویق به خرید و فروش آب در کنار سایر سیاست‌های مدیریت تقاضا است. کارکرد بازار با فرمان و دستور سازگار نیست و یکی از دلایل مشکلاتی که بازارهای کالاهای عادی در کشور ما با آن مواجه‌اند، همین دخالت‌های بی‌رویه‌ای است که در آن‌ها صورت می‌گیرد. اگر بازار آب به طور آزادانه‌تری فعالیت کند، می‌تواند با تعیین علامت قیمتی، آب را به بارزش‌ترین نوع مصرف یا استفاده، تخصیص دهد. قیمت‌ها در واکنش به علامت‌های تقاضا و عرضه تغییر می‌کنند. در شرایط کمیابی یا مشکلات مدیریت کیفیت آب، بازار می‌تواند مزایایی از نظر انعطاف‌پذیری، آزادی انتخاب و کارایی ارائه دهد. بازار بر اساس خرید و فروش مجوز برداشت آب شکل می‌گیرد. برای آب دائمی، پروانه یا حقابه صادر می‌شود که این مجوز حقوق مالکیت بر آب را به صورت نسبت یا مقدار مشخصی از دسترسی به یک منبع خاص تعیین می‌کند. همچنین، این مجوز امکان تحویل آب یا حق تقدم دریافت آب را در زمان مشخص می‌کند. در کشورهایی مانند ایران که سابقه چند هزار ساله در کشاورزی دارند، بازار غیررسمی آب وجود داشته است. این بازار به نوعی اشتراک‌گذاری بخشی از منابع آب بین همسایه‌ها و مناطق یا مصارف همجوار بوده است. اما در برخی از بازارهای کوچک و محلی، مانند بازار آب موجن، این نوع بازار عمق و

وسعت بیشتری پیدا کرده و بازارهایی شکل گرفته‌اند که بسیار کارآمد هستند و به نوعی با بازارهای رسمی رقابت می‌کنند. به نظر می‌رسد که دخالت دولت در برنامه‌های ششم و هفتم برای تشکیل بازار آب در ایران افزایش یافته است. همچنین، خوب است اشاره شود که تشویق به خرید و فروش رسمی آب در دنیا از سال ۱۹۶۰ آغاز شده و به عنوان یک سیاست مدیریت تقاضا شناخته می‌شود. در حال حاضر، در برخی کشورها این سیاست همچنان ادامه دارد، مانند استرالیا، ایالات متحده به ویژه ایالت‌های غربی، چین، شیلی و کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا. ما برنامه توسعه‌ای داریم که به بازار آب توجه کرده است و موضوع بازار آب در کشور ما دیگر موضوع جدیدی نیست که بخواهیم درباره الفبای آن صحبت کنیم؛ بنابراین، خوب است که از این مرحله یک گام فراتر برویم و دستاوردهای خود را در این زمینه ارائه دهیم. در پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده، شرایط و چارچوب‌های نهادی، مسائل خصوصی و بازارسازی در زمینه خطرات، سرقت و مبادله غیررسمی مورد توجه قرار گرفته است. انتقادات و مجادلاتی که در بازار آب وجود دارد، در همه جای دنیا با برجسب‌هایی مانند لیبرالیسم یا غیره مطرح می‌شود و نگرانی‌هایی را برای زارعین به وجود می‌آورد. این نگرانی‌ها شامل رها کردن کشاورزی به عنوان شغل و این ایراد است که آب یک نیاز اساسی است و شأن آن بالاتر از خرید و فروش است. اکثر اقتصاددان‌ها به خاطر تأثیری که بازار آب با کارکرد رقابتی‌اش بر کارایی دارد، از آن حمایت می‌کنند. اما آن‌ها به خوبی می‌دانند که بازار آب، مانند سایر بازارهای منابع طبیعی، مستعد مشکلاتی در تعیین و تعریف حقوق مالکیت و همچنین محدودیت‌هایی در ارائه اطلاعات متقارن است؛ بنابراین، مشکلات و خطراتی که وجود دارد، نمی‌توان نادیده گرفت و باید به آن‌ها توجه کرد. زیرا بازار آب تنها روش بازتخصیص است که می‌تواند نسبت به متغیرهای اقتصادی، جمعیتی و ارزش‌های اجتماعی نرمش‌پذیری داشته باشد؛ بنابراین، ما با چالشی در اتخاذ سیاست‌های بازار آب مواجه هستیم. از یک سو با خطرات و نارسایی‌هایی که ممکن است در بازار بروز کند، روبرو هستیم و از سوی دیگر باید به قابلیت‌هایی که این بازار دارد توجه کنیم و از ظرفیت‌های آن غافل نشویم.

>> **مهندس کشاورز:** موضوع آب در کشور ما به شدت با ناترازی مواجه است. چه در مورد آب‌های سطحی و چه آب‌های زیرزمینی، ما با مشکلاتی در عرضه و تقاضا روبه‌رو هستیم. این مسائل از دیدگاه اقتصادی، محیط‌زیستی و پایداری باید مورد بررسی قرار گیرد. اگر بخواهیم به تعاریف جدیدی که در نیم قرن اخیر درباره آب مطرح شده است، بپردازیم،

مفاهیمی مانند مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) و دیگر رویکردها به ذهن می‌رسد. همه این ادبیات تأکید می‌کنند که آب یک عامل اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی، فرهنگی و سیاسی است. یونسکو حد اقتصادی آب را در متوسط پایداری ۴۰ درصد اعلام کرده و به این نکته اشاره می‌کند که خشک کردن محیط‌های آبی و نادیده گرفتن حقابه‌های محیط زیستی، تالاب‌ها و منابع آبی، به انتشار کربن منجر می‌شود. همچنین، مسأله فرونشست زمین و تهدید زیرساخت‌ها و فرهنگ این سرزمین با سابقه تمدن هفت هزارساله نیز از دیگر چالش‌هاست. اگر این موارد را کنار هم بگذاریم و بگوییم که ما از حد ۴۰ درصد عبور کرده‌ایم، کارشناسان وزارت نیرو برآورد می‌کنند که ما اضافه برداشت ۲۴۰ هزار مترمکعب داریم و بر اساس مدلی از دانشگاه شیراز، این عدد به ۳۴۰ هزار مترمکعب می‌رسد؛ بنابراین، وقتی ما به آب زیرزمینی بدهکار هستیم، چگونه می‌توانیم آن را به بازار بیاوریم؟ بازار به رونق کسب و کار مربوط می‌شود و وقتی از بازار صحبت می‌کنیم، یعنی می‌خواهیم کالایی را مبادله کنیم. اما در شرایطی که سرزمین ما در حال تهدید است، هر تصمیم یا سیاستی که به این موضوع مربوط باشد، می‌تواند ناامیدی و ناباوری را در جامعه ایجاد کند. دومین نکته این است که اجازه دولت برای ایجاد بازار آب از چه منشأ حقوقی، قانونی و شرعی است؟ اگر کسی آبی را تولید کرده یا آب شیرین‌کن راه‌اندازی کرده، می‌تواند تجارت کند، اما در مورد آب تجدیدپذیر که مردم سال‌ها از آن بهره‌مند بوده‌اند، این موضوع پیچیده‌تر است. زمانی که دولت وارد بازار آب می‌شود و می‌خواهد ارزش ذاتی آب را تعیین کند، این برخلاف اصول اقتصادی است. همچنین، هر کالایی که وارد تجارت شود، تقاضا را تحریک می‌کند و کسانی که توان مالی بیشتری دارند، می‌توانند تقاضای بیشتری ایجاد کنند که این خود به نایابی و کمیابی دامن می‌زند. به عنوان مثال، در دهه ۱۳۵۰، یکی از پایه‌گذاران روش‌های علمی کشت چغندر قند در کشور (مرحوم آقای قره‌باغی) به مغان دعوت شد تا چغندر بکارند، در حالی که در آن سوی ارس پنبه می‌کاشتند، ایشان می‌گویند دستتان را بگذارید روی پیشانی‌تان که دیدتان زیاد شود نگاه کنید اطرافتان ببینید آن طرف ارس چه می‌کارند؟ آن طرف ارس پنبه می‌کارند. چه کسی به شما گفته است اینجا چغندر بکارید. مسئولان وقت کارخانه قند را راه‌اندازی کردند، اما این کارخانه هیچ‌گاه بهره‌برداری نشد، زیرا این تصمیم تناسبی با شرایط نداشت. وارد کردن کالای کمیاب به تجارت می‌تواند تمام توافقات و برنامه‌ریزی‌هایی که انجام شده را تحت تأثیر قرار دهد. در بحران آب کشور، باید به این نکته توجه کنیم که آب باید با محیط‌زیست و پایداری مرتبط باشد. در سال ۲۰۰۸، کتابی با عنوان «آب برای غذا، آب

برای زندگی» منتشر شد که نشان می‌دهد آب تنها یک کالای اقتصادی نیست. پروژه مروری دارلینگ در استرالیا مثالی بارز از این تعارض است. در این پروژه، حقابه‌ها به کشاورزان داده شد، اما بعد از ۲۰ سال، دولت مجبور شد آب را از کشاورزان خریداری کند تا تعادل اکولوژیکی را حفظ نماید. در ایالت کالیفرنیا نیز در طول ۸ سال خشکسالی، هیچ‌گاه تخصیص آب به محیط‌زیست کمتر از ۵۰ درصد نبوده است؛ بنابراین من چون قبل از هر تجارتی، هر پولی، هر ارزی، هر کالایی معتقدم که این بی‌توجهی به مسائل محیط‌زیستی آب، تهدید سرزمین و ناپایداری‌اش را به دنبال می‌آورد و آثارش را همه‌تان می‌بینید، با ورود بحث بازار آب ۱۰۰ درصد و عمیقاً مخالفم.

>> دکتر زمانی: بحث مالکیت آب یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که باید در بازار آب به آن توجه کنیم. نظراتی که بنده ارائه می‌دهم، به عنوان یک حقوقدان است و نه به عنوان کسی که سمت دولتی دارد. این نظرات شخصی من هستند و ارتباطی به نظرات سازمانی و وزارت نیرو یا شرکت مدیریت منابع آب ایران ندارند. مهندس کشاورز نیز اشاره کردند که آیا توجه شده است که آیا قوانین موجود اجازه می‌دهند ما چنین ایده‌ای را پیاده کنیم یا خیر؟ طبق اصل ۴۵ قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران، آب از ثروت‌های عمومی تلقی می‌شود و ماده‌ای که قانون توزیع عادلانه آب آن را جزو مشترکات می‌داند. سؤالی که مطرح می‌شود این است که آیا وقتی آب را وارد یک ظرف می‌کنیم، مالکیت حاصل می‌شود یا خیر؟ این یک موضع فکری خاص است. باید به دو بخش تقسیم کنیم: آبی که از آب‌های زیرزمینی یا آب‌های سطحی هنوز از ظرف طبیعی خود خارج نشده‌اند، مانند آبخوان‌ها یا آبی که در رودخانه‌هاست، این‌ها جزو مشترکات حساب می‌شوند و به هیچ وجه قابل تملک برای هیچ شخصی نیستند. این موضوع متفاوت از انفال است، زیرا انفال با اذن حاکم قابل تملک است، اما مشترکات این خاصیت را ندارند. این واقعاً جای خوشبختی است که آب را از زمره انفال درآورده و به عنوان مشترکات قید کرده‌اند، زیرا همان بلایی که سر اراضی منابع طبیعی می‌آید و واگذار می‌شود، می‌توانست سر آب هم بیاید و الحمدلله از این داستان عبور کردیم. وقتی آب با موتور پمپ یا از رودخانه‌ها برداشت می‌شود و از محیط طبیعی‌اش خارج می‌گردد، وارد ظرف یا استخر می‌شود و در این مرحله، وضعیت آن تغییر می‌کند. چند روایت از پیامبر نقل شده است که هم از اهل سنت و هم از ائمه شیعه آمده است که در این حالت، مالکیت حاصل می‌شود. یعنی وقتی آب وارد ظرف شد، مالکیت حاصل خواهد شد، مانند همین یک لیوان آبی که من می‌خورم و مالکش هستم. پس دو نکته را باید در نظر داشته باشیم: ما چگونه می‌خواهیم بازار آب را ایجاد کنیم؟

آیا می‌خواهیم آبی که جزو مشترکات و منابع عمومی مردم است را خارج کنیم و آن را در اختیار یک شخص قرار دهیم و بگوییم حالا تو مالک هستی؟ این کار به نظر می‌رسد با هدف اصل ۴۵ قانون اساسی مغایرت دارد. حال بیایید به قانون عادی نگاه کنیم. آیا قانون توزیع عادلانه آب فضایی برای ما ایجاد کرده است یا خیر؟ مشترکات از سال ۱۳۴۷ که قانون آب و نحوه ملی شدن آن به تصویب رسید، تحت مدیریت حقوق عمومی قرار گرفت و تقریباً دولت به طور کامل مسئولیت مدیریت آب را بر عهده گرفت. در این مدت، تنها یک مقدار محدود از حقوق خصوصی در مدیریت و مالکیت آب وجود داشت که به برخی چشمه‌ها در اراضی شخصی مربوط می‌شد. اما حقایق، داستان جداگانه‌ای دارد. من به یاد دارم قبل از اینکه وارد شرکت مدیریت منابع آب شوم، در وزارت نیرو بودم و این بحث را زیاد می‌دیدم. دوستان می‌گفتند که می‌توانیم از ظرفیت مواد ۲۷ و ۲۸ قانون توزیع عادلانه آب برای این موضوع استفاده کنیم. من از آن‌ها پرسیدم که آیا واقعاً ظرفیتی می‌بینید؟ زیرا ما باید برای بازار آب به یک قانونی مستند کنیم. آن‌ها گفتند که مواد ۲۷ و ۲۸ قانون توزیع عادلانه آب می‌توانند به ما کمک کنند. من به ماده ۲۸ نگاه کردم و متوجه شدم که اساساً هیچ ارتباطی با بازار آب ندارد. این ماده صرفاً در خصوص خرید و فروش پروانه است که سال‌هاست انجام می‌شود. فرض کنید یک شخصی سهم آبی را برای زمینش می‌خرد یا به آن منتقل می‌شود یا برای سند استفاده می‌کند که داستان خاص خودش را دارد. اما ماده ۲۷ ممکن است کمی به ما کمک کند. ماده ۲۷ قانون توزیع عادلانه آب، پروانه مصرف آب را اعم از آب زیرزمینی و آب سطحی، مختص به زمین و مواردی می‌داند که در آن صادر شده است؛ بنابراین، طبق ماده ۲۷ قانون توزیع عادلانه آب، آب مختص زمین است به‌نوعی به‌صورت ارضی و نه ذاتی، آب به زمین متصل شده است؛ یعنی پروانه بدون زمین معنا ندارد. حالا ما می‌خواهیم بازار آب ایجاد کنیم، در واقع قصد داریم این اتصال را قطع کنیم، می‌خواهیم بگوییم دیگر آب مختص به زمین و مواردی که صادر شده نیست. موارد یعنی نوع مصرفش، فرض کنید کشاورزی در یک منطقه خاص وجود دارد. در این صورت، تنها در صورتی که دولت تصمیم دیگری بگیرد، می‌توان تغییراتی ایجاد کرد. این تصمیم، مربوط به همان منطقه است و تصمیمی کلی برای کل کشور نیست. در واقع محلی (Local) است، این موضوع زمانی مطرح می‌شود که ضرورت ایجاد شود. فرض کنید در یک منطقه خاص، خشکسالی اتفاق بیفتد و زمین‌های کشاورزی در حال از بین رفتن باشند. در این شرایط، ممکن است گفته شود که چند چاه صنعتی داریم که نمی‌توانیم از آن‌ها استفاده کنیم. بر اساس ابتدای ماده ۲۷، دولت می‌گوید برای اینکه کسی ضرر نکند، به‌صورت

موقت اجازه می‌دهد که از آب این چاه‌های صنعتی استفاده شود. اما در واقع، ما چیزی نداریم که بتوانیم برای ایجاد بازار آب به آن استناد کنیم. مهم‌تر از همه، ماده ۷ قانون توزیع عادلانه آب وجود دارد که می‌گوید در مورد چاه‌هایی که مقدار آبدهی مجاز آن‌ها بیش از میزان مصرف معقول صاحبان چاه باشد، مثلاً اگر یک چاه ۳۰ لیتری داریم که نیازش ۲۰ لیتر است، ۱۰ لیتر آب مازاد دارد. این مازاد آب می‌تواند با ارائه شواهد و مدارک برای امور کشاورزی، صنعتی و شهری مصرف شود. وزارت نیرو می‌تواند، - این یک اختیار است و نه اجبار - تا زمانی که ضرورت اجتماعی ایجاب کند (موضوع بازار آب، یک موضوع موقت است)، و با رعایت مقررات و مصالح عمومی، اجازه مصرف آب برای همه مصرف‌کنندگان صادر کند. همچنین، باید قیمت عادلانه‌ای برای آب به صاحب چاه پرداخت شود تا او بتواند آب را استخراج کند. اما این آب متعلق به خود او نیست و به‌عنوان آب مشترک شناخته می‌شود. در اینجا تناقضی وجود دارد: از یک سو، گفته می‌شود که آب جز مشترکات است و از سوی دیگر، آن را در مالکیت یک شخص قرار می‌دهد و به او حق می‌دهد که پول آب را هم بگیرد. این مسأله حقوقی را کنار بگذاریم. ماده‌ای که اجازه می‌دهد بازار آب را بر اساس ماده ۷ ایجاد کنیم، همین مقرر است. یک ایراد دیگر این است که اگر بخواهیم چاه‌ها را تعدیل و اصلاح کنیم، ماده ۷ می‌گوید نیازی به این کار نیست و می‌توانید آب را در بازار خرید و فروش کنید. این دو سیاست که هم دولت و هم وزارت نیرو در راستای سازگاری با کم‌آبی دنبال می‌کنند، با بازار آب در تعارض است. شما بالاخره کدام را می‌خواهید؟ اگر پروانه‌ها را کاهش دهید، دیگر نمی‌توانید بازار آب را راه‌اندازی کنید، زیرا دیگر آب مازادی برای مصرف معقول صاحبان چاه وجود نخواهد داشت. این‌ها پارادوکس‌هایی هستند که در خصوص بازار آب وجود دارد. واقعیت این است که با قوانین فعلی، نمی‌توانیم بازار آب را به شکلی که می‌خواهیم و باید اجرا کنیم. ما در حال انجام کاری هستیم که چندان مستند به قانون نیست. تنها قانون‌گذار در قوانین موقت، از جمله قوانین برنامه، تکلیف کرده که وزارت نیرو بازار آب را ایجاد کند. این بازار آب نیازمند اصلاح قوانین دیگر است. ما تا به حال به این موضوع توجه نکرده‌ایم و با قوانین موجود از سال ۱۳۶۱، می‌خواهیم ایده‌ای را برای سال ۱۴۰۳ پیاده کنیم. من همیشه می‌گویم که قانون فرزند زمانه است و نمی‌توانیم ۴۰ سال به دنبال چنین ایده‌هایی باشیم. اگر واقعاً می‌خواهیم به درستی به این موضوع بپردازیم، باید به دنبال اصلاح قانون برویم. نکته بعدی اصل توسعه پایدار است. در تمام متون بین‌المللی از نظر محیط‌زیستی تأکید شده که باید توسعه پایدار را در قانون‌گذاری، سیاست‌گذاری و اجرا رعایت کنیم. همین سؤال را مطرح می‌کنیم و از دوستان فنی

می‌خواهیم که پاسخ دهند: آیا ایجاد بازار آب واقعاً در اصل توسعه پایدار جا می‌گیرد؟ آیا کمکی به محیط‌زیست می‌کند؟ شاید این موضوع به سمت اقتصاد برود، اما آیا به محیط‌زیست کمک خواهد کرد؟ من یکی از جنبه‌های آن را مطرح کردم که با بحث اصلاح پروانه‌ها در تعارض خواهد بود. نکته بعدی این است که اگر بخواهم به‌صورت موقت خرید و فروش آب را راه‌اندازی کنم و یک صنعت بزرگ را در یک منطقه وسیع ایجاد کنم، این کار یک حق مک‌تسبه ایجاد می‌کند. اگر فردا کسی نیاید آب بفروشد و کسی برای نیاز خود آب بگیرد، تکلیف آن صنعت، کارخانه یا حتی کشاورزی که ایجاد شده و آب ندارد چه خواهد شد؟ چه کسی می‌خواهد پاسخگو باشد؟ آیا باید بروم شکایت کنم، دادگاه بروم و چاه بگیرم یا تخصیص بگیرم؟ این مسائل قابل قبول نیست و باید به همه جوانب آن فکر کنیم. وزارت نیرو می‌خواهد آن چیزی را که قانون‌گذار به آن گفته، اجرا کند. اگر اجرا نکنند، ترک فعل کرده است و این نشان می‌دهد که خودشان به دنبال این قضیه نیستند. یک سوال دیگر این است که آیا من به‌عنوان سرمایه‌گذار می‌توانم یک صنعت بزرگ را در یک منطقه ایجاد کنم و بعد بگویم که آب را از یک بازار آب بخرم که مشخص نیست سال بعد آب خواهد بود یا نه؟ این‌ها سؤالاتی هستند که باید به آن‌ها پرداخته شود و نباید به‌صورت سطحی به آن‌ها نگاه کرد. نباید بگوییم که در دشت خاصی، در خراسان یا قزوین، بازار آب ایجاد کرده‌ایم و از تبعات آن غافل شویم. ما حقوق‌دان‌ها همیشه می‌گوییم که دوستان فنی باید با احتیاط پیش بروند، زیرا تبعات بعدی این داستان برای ما حقوقی‌ها خواهد بود. من باید به دیوان عدالت بروم و در دادگاه پاسخگو باشم. این‌ها تبعات نگران‌کننده‌ای هستند و انتظار داریم که در اینجا بتوانیم بحث کنیم. از دوستان در کامنت‌ها، عزیزان سخنران و برگزارکنندگان محترم ان‌شاءالله که به این مسائل بپردازیم.

>> مهندس جهانی: آقای مهندس اسفندیاری تعاریفی درباره بازار آب ارائه دادند. تعریف کلاسیکی که در متون جهانی وجود دارد، می‌گوید بازار آب عبارت است از تبادل داوطلبانه حقابه بین خریداران و فروشندگان در چارچوب قانون و مقررات. این حق‌ها یا فروش حقابه می‌تواند دائمی یا موقتی باشد؛ بنابراین، موضوع اصلی بحث، حقابه و مجوز استفاده از آن است، نه مالکیت آب. هدف اصلی تشکیل بازار آب این است که استفاده از آب را از ارزش کمتر به ارزش بیشتر ارتقا دهد. در بازار آب، فروشندگانی داریم که معمولاً با مازاد آب مواجه هستند و خریدارانی که یا با کمبود آب روبرو هستند یا حاضرند بهای بیشتری بپردازند تا آب بیشتری به دست آورند؛ بنابراین، اگر با این دیدگاه به بازار آب نگاه کنیم، موضوع عرضه و تقاضای

آب مطرح می‌شود. وجود مازاد آب در عرضه و بالا بردن ارزش اقتصادی آن، از جمله مسائل مهم است. به کنفرانس دوبلین در سال ۱۹۹۲ اشاره می‌کنم که قبل از تشکیل کنفرانس ریو برگزار شد. این کنفرانس چهار اصل دارد و اصل چهارم می‌گوید که آب در تمامی وجوه مصرف، دارای ارزش اقتصادی است و باید به‌عنوان یک کالای اقتصادی شناخته شود. اما وقتی که گفتگوها در کنفرانس ریو مطرح شد و پایه‌گذاری توسعه پایدار در آنجا شکل گرفت، مسأله توسعه پایدار با سه ستون اصلی شامل توسعه اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست همراه شد. این‌ها در واقع یک مجموعه را تشکیل می‌دهند، اما تناقضاتی نیز با هم دارند. اگر ما فقط به توسعه اقتصادی توجه کنیم، این موضوع با عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست در تضاد است؛ بنابراین، نمی‌توانیم آب را به‌عنوان یک کالای اقتصادی در نظر بگیریم، بدون اینکه به دو موضوع دیگر یعنی عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست توجه کنیم. تمرکز صرف بر بازار آب ممکن است ما را به بیراهه ببرد، به‌ویژه با تمام محدودیت‌ها و مسائلی که مطرح کردم. سؤال اصلی این است که جایگاه بازار آب در حل بحران آب در کشور کجاست؟ متأسفانه گاهی از زبان برخی کارشناسان می‌شنوم که گویی فکر می‌کنند تشکیل بازار آب یک راه‌حل قطعی برای بحران آب در کشور است. همان‌طور که آقای مهندس کشاورز هم اشاره نمودند، نه‌تنها مازاد آبی برای فروش وجود ندارد، بلکه بر اساس محاسبات اولیه، ما حدود ۱۴۵ میلیارد مترمکعب آب زیرزمینی داریم و همچنین نزدیک ۶۰ تا ۶۵ میلیارد مترمکعب برای احیای اکوسیستم‌های آبی نیاز داریم. ما به‌نوعی یک بدهی جمعی به کشور داریم که این بحران را به وجود آورده است. این بحران به چند دلیل به وجود آمده است: اول، نهادهای دولتی و حکومتی اجازه بهره‌برداری بیش از ظرفیت را در دشت‌ها داده‌اند؛ دوم، برخی از دارندگان مجوز بهره‌برداری بیش از حق خود برداشت کرده‌اند؛ و سوم، برداشت‌های غیرمجاز وجود دارد. حتی در حال حاضر، در برخی مناطق دشت‌های ممنوعه، هنوز اجازه حفر چاه داده می‌شود. حال، تشکیل بازار آب در مقایسه با این بحران در چه جایگاهی قرار می‌گیرد؟ اگر ما بتوانیم این جایگاه را به‌درستی تشخیص دهیم، من مشکلی نمی‌بینم که در حد مطالعات، تحقیقات و طرح آزمایشی به مسأله بازار آب پرداخته شود. اگر روزی موفقیت‌هایی حاصل شود و محدودیت‌های قانونی که آقای دکتر زمانی اشاره نمودند، برطرف شود، می‌توانیم بازار آب را در مقیاس‌های مناسب راه‌اندازی کنیم. اما اگر این دیدگاه وجود داشته باشد که بازار آب یک معجزه است، این دیدگاه بسیار خطرناک می‌باشد. اواخر شهریور ۱۴۰۳، هفته آب استکهلم برگزار شد و در این هفته حدود ۳۰۰ نشست

برگزار گردید که من فهرست همه آن‌ها را دارم و در اینترنت نیز قابل دسترسی است. من تلاش کردم به صورت مجازی در این نشست‌ها شرکت کنم و از بین ۳۰۰ نشست که تشکیل شد، تنها یک نشست در مورد بازار آب بود و آن هم صرفاً به مسأله بازار پساب و آب‌های برگشتی اختصاص داشت؛ بنابراین، نباید فکر کنیم که در مقیاس جهانی معجزه‌ای در حال وقوع است. اگر در کتاب‌ها و مراجع بین‌المللی جستجو کنید، متوجه می‌شوید که بازار آب تا چه حد در کاهش مصرف موفق بوده و چگونه می‌تواند با توجه به شرایط محیط‌زیستی و مسائل اجتماعی تراز ایجاد کند. اما در واقع، اکثر این تلاش‌ها با شکست مواجه شده‌اند. به عنوان مثال، پروژه موری دارلینگ و حوزه کلرادو در غرب آمریکا وجود دارد. در یکی از مراجع خواندم که سدی که روی رودخانه کلرادو قرار دارد، آب آشامیدنی ۲۵ میلیون نفر را تأمین می‌کند و تغییرات اقلیمی نشان داده است که ممکن است تا سال ۲۰۵۰ بین ۱۴ تا ۳۱ درصد آبدهی این رودخانه کاهش یابد. در این شرایط، تلاش کردند در بالادست بازار آب راه‌اندازی کنند، اما این بازار با شکست مواجه شد و در سال ۲۰۲۳، دولت بایدن ۶۰ میلیون دلار تخصیص داد تا آب بیشتری خریداری کند و به مخزن اضافه کند؛ بنابراین، در اکثر جاها که تعدادشان هم زیاد نیست، بازار آب یا با شکست مواجه شده یا نتوانسته به اهداف اولیه‌اش دست یابد. به همین دلیل، بهتر است که بازار آب را نفی نکنیم و در حد مطالعه، تحقیق و طرح آزمایشی تشویق کنیم، اما نباید انتظار داشته باشیم که این بازار یک معجزه برای حل بحران آب باشد. ما برای حل بحران آب و رسیدن به تعادل، به اصلاحات و اقدامات دیگری نیاز داریم که بازار آب یا نمی‌تواند جزئی از آن باشد، یا اگر بخواهد باشد، تنها یک نقطه بسیار کوچک در مقابل یک صفحه بزرگ خواهد بود. از این رو، خواهش می‌کنم به موضوع بازار آب با دقت نگاه کنیم. همه کارهایی که انجام شده قابل تقدیر است و کسی آن‌ها را نفی نمی‌کند. همچنین باید تلاش کنیم موانع موجود را برطرف کنیم، اما در حد و حدودی که اشاره کردم.

>> **دکتر اسماعیلی:** تجربه بازار آب اسپانیا می‌گوید منافع حاصل از بازار آب در اسپانیا تاکنون با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و نه بر اساس شواهد عینی ارزیابی شده است. مدل‌های شبیه‌سازی بازارهای آب نشان داده‌اند که این ابزار اقتصادی می‌تواند به شکل قابل‌ملاحظه‌ای کارایی مصرف آب و نیز رفاه اجتماعی را بهبود دهد. با این همه، این قبیل تحلیل‌ها قادر نیستند پیچیدگی‌های حقوقی، نهادی، فنی و فرهنگی مبادله آب را در نظر بگیرند. از این رو، برآورد دست‌بالایی از منافع حاصل از پیاده‌سازی بازار آب به دست می‌دهند.

>> **دکتر میرقاسمی:** براساس آمار موجود کل تولید ناخالص داخلی دنیا، ۱۰۰ تریلیون دلار است، آمریکا با ۲۵ تریلیون دلار (۲۵ درصد)، چین با ۱۸ تریلیون دلار (۱۸ درصد) و ژاپن با ۴ تریلیون دلار (۴ درصد) تولید ناخالص داخلی به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند. تولید ناخالص کشور ما ۰/۳ تریلیون دلار می‌باشد و باید ببینیم علت کجاست که این تفاوت فاحش هست. اگر بررسی کنیم، یکی از عواملی که دخالت دارد، مسأله آب و به‌ویژه بهره‌وری آب هست. بررسی مقالات نشان می‌دهد اغلب کشورهایی که در حاشیه خلیج فارس هستند، به ازای هر مترمکعب آب بیش از ۵۰ دلار ثروت تولید می‌کنند. مانند عمان که بیش از ۱۵۰ دلار از هر مترمکعب آب ثروت تولید می‌کند. این نشانه چیست؟ ساختار انرژی و آب را که بررسی کنیم، می‌بینیم اغلب کشورهای توسعه یافته که بخش از انرژی‌شان در صنعت است، بخش عمده مصارف آب آن‌ها در صنعت است. در خراسان رضوی، بیش از ۴۶ درصد برق مصرفی در کشاورزی است در صورتی که در دنیا، به عنوان مثال ترکیه، ۵۵ درصد مصرف انرژی در صنعت است یا کشور چین ۸۰ درصد برق را در صنعت استفاده می‌کنند؛ بنابراین مشخص است که بهره‌وری‌اش افزایش می‌یابد. در استان خراسان رضوی، سرانه مصرف آب ۱۲۵ مترمکعب به ازای هر نفر در سال است که عدد پایینی نسبت به استاندارد جهانی است. پس ما مجبوریم برای پاسخ به نیازهای جدید آب، راهکاری پیدا کنیم. در سال ۱۳۹۰ این سرانه آب در دشت مشهد ۶۰۰ مترمکعب بوده است که الان به ۱۲۵ مترمکعب رسیده است یا در کل استان، ۱۶۰۰ مترمکعب بوده است که به ۶۰۰ متر مکعب رسیده است؛ بنابراین سیر نزولی در سرانه آب داریم که به دلیل افزایش جمعیت، توسعه مراکز صنعتی و کاهش منابع آب پایدار، بوده است. ما بازار آب را معجزه نمی‌دانیم، ولی عقیده داریم می‌تواند راهکاری برای اهداف زیر باشد. اول پاسخ به نیازهای جدید آب، به خصوص در بخش صنعت، دوم کمک به تعادل‌بخشی و پایداری آب، سوم افزایش بهره‌وری آب. مصارف و تقاضایی که ارزش افزوده بیشتری دارد و می‌تواند رقابت کند، وارد بازار آب می‌شود. هدف ما فقط صنعت نیست، کشاورزی صنعتی هم هست. چه کسی می‌تواند آب را در بازار عرضه کند؟ آن واحد یا بخشی که پروانه دارد و در اثر اجرای سیستم‌های آبیاری یا هر عملیات کشاورزی توانسته بهره‌وری آب را بالا ببرد و بخشی از آب را ذخیره کند، برای ایجاد انگیزه می‌تواند ۱۰ درصد از آبی را که به عنوان حقابه در اختیار دارد، به صورت موقت برای یک سال در بازار عرضه کند. بعید می‌دانم که این مشکل قانونی داشته باشد. اگر این انگیزه را ایجاد کنیم که کشاورز توسعه سطح زیر کشت ایجاد نکند و همین ۱۰ درصد آبی را که صرفه‌جویی

کرده می‌تواند در بازار عرضه کند؛ چه مشکل حقوقی می‌تواند داشته باشد؟ ما معتقدیم چالش‌هایی هست و مخاطراتی می‌تواند وجود داشته باشد؛ اما امیدواریم این مخاطرات تبدیل به بحران نشود و بتوانیم راه حل منطقی‌ای برای عرضه آب در بازار داشته باشیم. به جز دستاوردهایی که می‌توان شمرد، هدف مهمتری که دنبال می‌کنیم افزایش بهره‌وری آب است که ما از هر متر مکعب آب بیشترین ثروت را در جهت رفاه مردم تولید کنیم و به نیازهای جدید آب صنعت، باتوجه به محدودیت‌هایی که داریم و امکان تخصیص جدید منابع برای صنایع و سایر مصارف و خدمات نداریم، پاسخ دهیم. همینطور می‌توانیم بخشی از تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی را مطابق دستورالعملی که داریم- باید بخشی از آب را به نفع آبخوان ذخیره کنیم- اجرایی کنیم، به این صورت که، دریافت‌کننده می‌تواند تنها از ۷۵ درصد آبی که فروش می‌رود، استفاده کند.

>> مهندس حیدرزاده: ما در شهرستان خواف به‌عنوان طرح آزمایشی کشوری در حال اجرای باز آب هستیم و با مواردی در این زمینه روبرو هستیم. مانند مسائل حقوقی که باید حل شود و شاید نیاز هست قوانین جدیدی نیز تصویب شود. از طرفی ما باید ببینیم که آیا بازار آب امکاناتی در اختیار ما می‌گذارد و به مدیریت مصرف آب کمک می‌کند؟ ما درصد کمی از بخش کشاورزی را وارد صنعت می‌کنیم. کسانی که مخالف هستند، دغدغه‌شان این است که آب از کشاورزی به صنعت نیاید، اما این مقدار فقط ۱۰ درصد هست. عمده توانی که ما گذاشتیم این است که این آب وارد صنعت شود و باعث توانمندسازی کشاورزان هم بشود. درست است که ما آب را از کشاورزی به صنعت می‌آوریم، اما باید بهایی که صنعت به کشاورزی پرداخت می‌کند را هم ببینیم. تخصیص‌هایی که موجود هست و آب منطقه‌ای وارد نشده، باعث کاهش آب زیرزمینی نمی‌شود یا تخصیص جدید نمی‌دهد. از تخصیص موجود، ما آب را به صنعت واگذار می‌کنیم. این باعث می‌شود آبی که کشاورزان واگذار می‌کنند، برایشان بیش از ده برابر ارزش افزوده داشته باشد. یعنی از فروش ۱۰ درصد آب مازاد، مقدار زیادی منابع مالی برایشان تولید می‌شود. این منابع مالی وارد سیستم کشاورزی می‌شود و باعث شده است کشاورزی‌شان را بهینه کنند. چون ارزش افزوده تولیدات کشاورزی زیاد نیست، از لحاظ بنیه مالی ضعیف هستند. وقتی این پول را از صنعت گرفتند، باعث می‌شود مصرف بهینه و راندمان آبیاری کشاورزی را بالا ببرند. این باعث می‌شود بدون کاهش تولید، آب مازاد داشته باشند و بتوانند در سال آینده این آب اضافی را در بازار وارد کنند. از این روش می‌توانند ارزش افزوده‌ای که در کشاورزی ایجاد می‌شود را باز هم بالاتر ببرند.

>> دکتر ابوالحسنی: در یک دوره مباحث مربوط به معایب و مزایای بازار آب، خصوصاً بحث‌های اقتصادی و عدالت اجتماعی انجام می‌شد. خوب هست که این بحث‌ها هدفمند شود. دغدغه‌های مسائل تخصصی و هم بحث‌های اقتصادی در این زمینه وجود دارد. چون بخش صنعت توانمند است، می‌تواند بازار آبی راه بیفتد؛ چون بخش کشاورزی حتی از طریق بازار سیاه هم که شده، این کار را انجام خواهد داد و بخش محیط‌زیستی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. امیدواریم در نشست‌های بعدی با مطالعه موردی^۱ بتوانیم صحبت کنیم. چه آن‌هایی که موفق بودند و توانستند این مشکلات را برطرف کنند و چه آن‌هایی که با مسائلی روبه‌رو بودند. ما در اقتصاد، بازارهای مختلفی داریم. حتی بازارهای آتی^۲ (پیمان آتی عبارت است از توافق طرفین برای انجام معامله در تاریخ مشخصی از آینده که مقدار کالا و قیمت آن نیز در قرارداد مشخص می‌گردد) داریم که ویژگی‌ها و بخش‌های به‌خصوص خود را دارند. چه بازاری موفق هست؟ آیا بازار آب می‌تواند موفق باشد یا خیر؟ بتوانیم به این موضوع بپردازیم که اگر این مقوله بخواهد شکل بگیرد، با چه مشکلاتی مواجه هستیم و چه راهکارهایی وجود دارد؟

>> مهندس کشاورز: در خراسان ما به‌جای مجوز ۴۰ درصد آب تجدیدپذیر، ۱۳۵ درصد در حال مصرف هستیم. رابطه آب و آمایش، رابطه آب و مباحث پایداری سرزمین و شاخص‌هایش مهم هستند. آبی وجود ندارد که به صنعت بدهیم. اگر مسأله GDP باشد، باید GDP صنعت و خدمات را مقایسه کنیم. اگر فروش نفت و فرآورده‌های پتروشیمی و خدمات نباشد، GDP وجود ندارد. میزان کسری تجمعی مخازن آب زیرزمینی کشور در سال ۱۴۰۰ به عدد ۱۴۳ میلیارد متر مکعب رسیده است. باید پرسیم چطور این اتفاق افتاده است؟ بازار آب، مبنایی در پایداری ندارد. کشور خوش‌بینانه ۲۰۰ میلیارد مترمکعب آب، با اولویت به سرزمین، بدهکار هست. کتاب فائو ۲۰۲۰ می‌گوید توسعه آبیاری تحت فشار منجر به صرفه‌جویی نشده است. کدام راندمان آبیاری منجر به صرفه‌جویی شده است؟ اگر کشور ۹۰ میلیارد مترمکعب آب قابل برنامه‌ریزی دارد، ۴۵ میلیارد مترمکعب آن مربوط به فعالیت اقتصادی است، بقیه متعلق به طبیعت است. سؤال شهروندی می‌گوید مگر قانون ما را مکلف به تحویل حجمی نکرده است؟ ما در این زمینه چه کار کردیم؟ فرونشست نیشابور و خراسان را در نظر بگیریم. چه آبی وجود دارد که می‌خواهیم در بازار آب، به صنعت واگذار کنیم؟ مگر ما آمایش نداریم؟ وضعیت ۱۴۵ میلیون مترمکعب برداشت از چاه‌ها، خوش‌بینانه‌ترین سناریو است. در شرکت منابع آب، کارشناسان این عدد را ۲۴۰ میلیون مترمکعب عنوان می‌کنند. یا از نظر دیگر کارشناسان، این حجم برداشت

بیشتر از ۳۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. کشور به جز راه سخت ریاضت توسعه پایدار، راهی در پیش ندارد.

>> دکتر عرب: می‌خواهم تجربه‌ای از احیای دریاچه آرال و گروهی که عمدتاً آمریکایی بودند و به ایران دعوت شده بودند با شما در میان بگذارم. ایشان گفتند کارهایی که نباید بکنیم، بر کارهایی که باید بکنیم، اولویت دارد؛ بنابراین در برنامه‌ریزی منابع آب باید این نکته را در نظر گرفت. هر طرحی که می‌دهیم باید بدانیم که وضعیت وخیم‌تر نشود. در ادبیات آمایشی، انسان، فعالیت و فضا مطرح هستند. مسأله‌ای که هست، این سه مورد باید با هم در نظر گرفته شوند. باید فکر کنیم آیا می‌توان کاری کرد که بازار آب در خدمت پایداری محیط‌زیست باشد؟ در شرایط فعلی که هم سرمایه اجتماعی پایین هست، هم نظارت نیست، هم مشارکت نیست، این‌گونه طرح‌ها می‌تواند بسیار خطرناک باشند و می‌توانند وضع را بدتر کنند. ولی در شرایطی، طرفداران بازار آب به چند نکته تأکید می‌کنند. اینکه بهره‌وری افزایش می‌یابد. همچنین بار اشتغال را از روی دوش کشاورزی که عمدتاً مصرف‌کننده آب است، بر می‌دارد و به بخش دیگری با مصرف آب کمتر می‌برد. اگر بهره‌وری را نقطه‌ای در نظر بگیریم، باید بدانیم در کشاورزی آب برگشتی داریم و اینکه مسأله آلودگی آب هست. پساب معمولی ۴۰ مترمکعب آب نیاز دارد که احیا شود و در صنعت می‌تواند حجم بیشتری هم موردنیاز باشد. در جاهایی، البته با همان شرایط نظارت، می‌توان از بازار آب استفاده کرد. همچنین در خشکسالی‌ها، با توجه به این‌که کسانی که باغ دارند، تحت شرایط کم‌آبی قرار می‌گیرند و مجبور می‌شوند به چاه‌های غیرمجاز روی آورند. مثلاً در سال ۱۳۸۵ که خشکسالی پیش آمد، این اشتباه تاریخی اتفاق افتاد که مجوز کف‌شکنی و احداث چاه داده شد. اما می‌توان در این شرایط خاص، این کار را انجام داد، البته با نظارت و در چارچوب قانون این کار انجام شود. مسأله دیگر این است که در دنیا هم مرسوم هست دولت‌ها، سمن‌ها و نهادهای دیگر، منابع مالی صندوقی که به صورت مشارکتی توسط مردم جمع‌آوری می‌شود و آب مازادی که از کشاورزی جمع‌آوری می‌شود، برای مصارف محیط‌زیست اختصاص پیدا کند. این موضوع می‌تواند به پایداری کمک کند. به هر صورت، خطراتی وجود دارد که اگر آب قیمت بگیرد، چاه غیرمجاز زیاد می‌شود و دوم استفاده غیرمجاز از چاه‌های مجاز بیشتر می‌شود و اگر نگاه سیستمی داشته باشیم، این می‌تواند وسیله‌ای بشود که مانند برقی کردن چاه‌ها، آسیب‌زا شود. در عمل، در شرایط فعلی، بازار آب می‌تواند از آن کارهایی باشد که نباید انجام دهیم، مگر اینکه زمینه قانونی آن فراهم شود.

>> دکتر فقیه خراسانی: بازار آب در یزد شروع شده است. کارگزاری آن در کارخانه نوآوری درخشان یزد آغاز به کار کرده است و در فصلی که گذشت، فعالیت ترویجی داشتیم. در طول رساله دکتری‌ام در یزد، با کشاورزها در برنامه رویدادهای آبی در طرح احیا و تعادل‌بخشی صحبت کردم و طی چندین پارادایم، به این نتایج رسیدم که ما یک فرایند نوسازی ناتمامی را مثل کنترل هوشمند آغاز کردیم. رویکردمان فرمان و کنترل است که بهره‌برداران هنوز آمادگی آن را ندارند. این تجربه می‌گوید که کشاورزان نهایتاً دو مورد را نیاز دارند. یا آب می‌خواستند و یا پولی که این وضعیت را درست کند. مثلاً چالشی که ما در یزد با آن مواجه هستیم، این است که الان آب ۵ ساعت در راه است و لوله‌کشی‌ای که باید انجام شود تا این زمان تبدیل به ۴۵ دقیقه شود، بار مالی‌ای دارد که کشاورز توان پرداخت ندارد. از هر ۱ ساعت، ۶ دقیقه قرار است وارد بازار آب شود. دستورالعمل‌ها و قوانینش در یزد مشخص هست و به خوبی پیش می‌رود. کشاورزان درخواست می‌کنند که حتی به جای پرداخت پول، خدماتی شامل هزینه لوله‌کشی هم رضایت‌آور است. مسأله فقط پول نیست، بلکه خدماتی این چنینی به این واسطه انجام می‌شود که می‌تواند کارساز باشد.

>> مهندس جهانی: اگر بازار آبی وجود داشته باشد، کسی مخالف ارتقا بهره‌وری آب، یا بالابردن ارزش اقتصادی آب نیست. همه این‌ها از طریق صرفه‌جویی امکان‌پذیر هست. بحث این است که این صرفه‌جویی را صرف خرید و فروش کنیم و یا ابتدا بدهکاری‌هایمان را تسویه کنیم؟ معمولاً بازار آب هم در شرایطی کار می‌کند که عرضه و تقاضا تقریباً مشابه است؛ بنابراین عرضه‌کننده می‌خواهد به کسی که بیشترین درخواست را دارد، ارائه کند؛ ولی وقتی ما با کمبود آب مواجه هستیم. شاید همین بازار آب، نوعی سم برای ایجاد تعادل و توازن در عرضه و تقاضای آب باشد، آن هم به صورت پایدار. من مخالف این‌که ما در حد تحقیقات، قانونی، عرفی، طرح آزمایشی و هم ارتقای ارزش اقتصادی کار بکنیم، نیستیم و هیچ اشکالی نمی‌بینم. اما باید حد و حدود و اولویت آن را بشناسیم و در این جهت که بتواند کارساز باشد، حرکت کنیم. نه اینکه فکر کنیم بازار آب همه مشکلات مربوط به آب را پاسخ‌گو خواهد بود.

>> دکتر اسماعیلی: بنابراین می‌توان جمع‌بندی نمود که نیاز است یک بررسی جامع در بخش تشکیل بازار آب ابتدا انجام شود و بعد بر اثر تجربیات و تحقیقات انجام شده، عمل کنیم. همچنین مقیاس تأثیر آن را در حل و فصل بحران آب کشور در نظر بگیریم.

>> دکتر زمانی: بازار آب مطمئناً پررونق خواهد شد. مطمئن باشید وقتی شما یک جنس کمیاب که طالبش زیاد است عرضه می‌کنید، طرفدار خواهد داشت. ولی این چه کمکی قرار است به بحث پایداری منابع آب و اصل توسعه پایدار بکند؟ اساساً من چرا باید پروانه‌ای داشته باشم که خودم به هر دلیلی مصرف نکنم، و در یک بازار ارائه کنم و به ثمن بسیار بالا بفروشم؟ بپذیریم این یک رانت است. فرض کنید زمین من حاصلخیزی خوبی ندارد و بیایم بازار آب ایجاد کنم و آن را به قیمت بالا به کسی که نیاز دارد بفروشم، آیا جز این است که جیب عده‌ای را پر کنیم؟ اینکه پرفروش خواهد بود درست است. ولی باید بپرسیم آخرش که چه؟ کسی که بازدهی خوبی ندارد، آب را بفروشد؟ برای او بازتخصیص انجام دهیم و مقدار حجمی پروانه‌اش را کم کنیم، برگردانیم به بانک آب یا به نفع آبخوان‌ها ذخیره کنیم و اگر یک زمانی یک صنعتی یا کشاورزی نابی بود، تخصیص جدید به آن بدهیم. این موضوع در دست دولت باشد، چرا در بازار بچرخد؟ یا چرا به فرد واگذار کنیم؟ نظر شخصی من به عنوان کارشناس حقوقی و آب زیرزمینی این است که هدفی که از این موضوع دنبال می‌کنیم چیست؟ حقا به هم مانند پروانه مصرف، به زمین متصل است. حقا به جدا از زمین نمی‌توان فروخت. در آیین‌نامه اجرایی فصل دوم قانون توزیع عادلانه آب و نیز در پشت پروانه‌ها نوشته شده است که خرید و فروش آب ممنوع است. در این صورت پروانه لغو می‌شود. ما سازوکار درستی نداریم و نمی‌دانیم دنبال چه هستیم. کسانی که پروانه دارند و نمی‌خواهند مصرف کنند، مثلاً کسی پروانه ۳۰ لیتری دارد و آن سال نمی‌خواهد کشت کند و می‌خواهد این آب را در بازار آب بفروشد، آیا کسی می‌تواند جلوی او را بگیرد که چرا کشت نمی‌کند و مصرف معقول ندارد؟ آیا جهاد کشاورزی سازوکاری دارد؟ همان‌طور که قانون در ماده ۷ گفته است، اساساً این چیزی نیست که بخواهیم در کل کشور پراکنده کنیم. این موضوع بسیار محدود و محلی خواهد بود، آن هم در حد طرح آزمایشی و مطالعاتی که توضیح داده شد و نیز اگر ضرورت اجتماعی ایجاب کند.

>> دکتر رمضان: بحث اینکه بازار آب ایجاد شود، نشان می‌دهد آب کالایی هست که می‌توانیم بخریم و بفروشیم و از آنجا ناشی می‌شود که بازار سیاه آب وجود دارد. ولی واقعیت این است که آب بخشی از اکوسیستم هست. هر اکوسیستم متناسب با ظرفیتی که دارد، ما می‌توانیم بخشی از آن را وام بگیریم تا بتوانیم نیازهای مرتبط با جامعه را از این روش برطرف کنیم. اما ما آن را تبدیل به یک بازار سیاه کردیم و به جای آن که نیازهای واقعی‌مان را برطرف کنیم می‌خواهیم این را بفروشیم. مانند این که سازمان انتقال خونی هست که در

مواقع مورد نیاز، افرادی خونشان را اهدا می‌کنند و بیماران در صورت نیاز، دریافت می‌کنند. مثل این است که یک بازار سیاهی وجود دارد که قاچاق اعضای بدن صورت می‌گیرد. حالا که این نقل و انتقال و خرید و فروش صورت می‌گیرد، بیایم این را قانونی کنیم، برای اینکه این قاچاقچیان اعضای بدن هم شناسنامه‌دار شوند و روی آن نظارت انجام شود. اصل و اساس غلط است. انسان همان‌طور که نمی‌تواند کلیه انسان‌های دیگر را بفروشد، حق ندارد آب طبیعت را منتزع کند و به دیگران بفروشد. وگرنه همان داستان مرغ تخم طلایی پیش می‌آید که اگر زنده باشد، می‌تواند صاحب مرغ را به نوایی برساند، ولی وقتی می‌خواهیم بازار تخم طلا رونق بگیرد، اگر این مرغ را بکشیم، روزی یک تخم طلا هم نخواهیم داشت. تصور می‌کنم کمی در مورد اینکه آب را می‌توان به این راحتی فروخت و به شکل یک کالا نگاه کرد، بیشتر بیاندیشیم. به جای این که بدانیم صاحب اصلی آن اکوسیستمی است که باید پایدار بماند، به وزارت نیرو اجازه می‌دهیم که این طرح را پیش بگیرد که همچنان می‌تواند از اکوسیستم‌ها، آب‌هایشان را بدزد و حقی را ایجاد کند و متعاقب آن یک بازار رسمی برای مال‌خرها به وجود بیاورد.

>> مهندس حیدرزاده: با تشکر از آقای مهندس کشاورز که این دغدغه‌ها را مطرح کردند و امیدوارم حاکمیت به جایی برسد که این دغدغه‌ها را جدی بگیرد. نکته‌ای که هست در بحث بازار، صحبت آب منطقه‌ای این است که ما آبی نداریم که به متقاضیان بدهیم و باید از بازار آب تأمین کنیم. یعنی از آب موجود، نه آبی که مازاد داریم یا از سفره‌های آب‌های زیرزمینی تأمین شود؛ بنابراین این ادعا که این روش بهترین است، نداریم و قرار نیست این روش از بحران آب جلوگیری کند. بلکه می‌خواهد در مدیریت بحران آب کمکی کند که افزایش پیدا نکند. ما در بازار آب شرط‌هایی داریم؛ مانند کنتور هوشمند که حتماً هم چاه دهنده و هم چاه گیرنده آب کشاورزی باید به کنتور هوشمند مجهز باشد تا بتوانیم کنترل را انجام دهیم. همچنین آبی که از کشاورزی به سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کند را هم در بازار آب دیدیم و سهمی هم برای آبخوان در نظر گرفتیم. بحث آلودگی هم هست. ضریبی با عنوان ضریب تعادل‌بخشی یا ضریب محیط‌زیست برای این آب در نظر گرفتیم که موجب می‌شود آب را کمتر به صنعت واگذار کنیم.

>> مهندس طراوت: جناب دکتر زمانی، به موجب ماده ۲۷ و ۲۸ قانون عادلانه توزیع آب، دستورالعمل جابه‌جایی چاه داریم که بعد هم یک دستورالعمل اصلاحی در این زمینه تهیه و اجرا شد. این‌ها با حرف‌های شما بسیار متفاوت است. به موجب آن

دستورالعمل، شما حق را به شکل متفاوتی از صحبت‌هایتان در اینجا به رسمیت شناختید. شما اجازه دادید چاه‌ها با قیمت‌های وحشتناک و با شرایط عجیب و خاص جابه‌جا شود. سؤال این است که اگر برداشت شما در رابطه با قانون توزیع عادلانه آب و انفال و مشترکات و اجازه مالکیت درست است، پس دستورالعمل اجرایی‌ای که وزارت نیرو و آقای اردکانیان ابلاغ کردند چیست؟ ضمن اینکه بازار آب خواف بر اساس همان دستورالعمل ابلاغ و اجرا شد.

>> **مهندس نوری اسفندیاری:** در این گفتگو صحبت‌هایی در موافقت و مخالفت بازار آب بود. مخالفت‌ها عمدتاً از زاویه این بود که ممکن است اهداف پنهانی در برگزاری این نشست وجود داشته باشد، که جزو منویات وزارت نیرو هست. متأسفانه سؤالاتی که طرح شده‌اند این هدف را نمی‌رساند. صحبت این هست که بخشی از کشاورزان و صاحبان چاه‌ها، راغب هستند این‌گونه مسأله را طرح کنند که آیا می‌شود راه‌حلی در رابطه با ایجاد بازار آب رسمی پیدا کرد که بسیار کم‌هزینه‌تر از طرح‌های انتقال آب هست؟ و معتقدند به‌جای طرح‌های پرهزینه انتقال آب، اجازه دهیم این مکانیسم بتواند به‌طور رسمی تپا‌های بسیار محدود بازتخصیص آب را حل و فصل کند. طبیعتاً این راه حل از راه حل اجباری بازتخصیص و راه‌حل‌های اداری، به‌نظر بهتر می‌آید. صحبت دکتر میرقاسمی به نظر من هدف اصلی نشست را می‌تواند به نحو بهتری بیان

کند. ضمناً جلسه‌ای هم بود که آقای مهندس کشاورز در اتاق بازرگانی بودند که یکی از فعالان کشاورزی خراسان این مسأله را خطاب به دکتر داوری مطرح کردند که چرا این مسأله را مورد توجه قرار نمی‌دهید؟ بنا بر پرسش ایشان، چرا باید این کار را انجام دهیم، در صورتی که می‌توانیم با تخصیص مقدار کمی از مصرف آب کشاورزی به صنعت، جلوی هزینه‌های زیادی را بگیریم؟ نظر شخصی من این است که برای این کار باید حتماً بازار رسمی داشته باشیم. تجربیات بین‌المللی هم همین را می‌گوید و لازم است که در بخش بازار اصلی هم برنامه‌هایی داشته باشیم. کارهایی که در طرح‌های آزمایشی در حال انجام هست هم در همین راستا می‌باشد و من شاهد این هستم که وزارت نیرو هم با احتیاط این کار را اجرا می‌کند. ما از نظریه گذشته‌ایم و در مرحله طرح آزمایشی، آزمون و خطاهایی در حال انجام است. خوب است که این طرح‌های آزمایشی مستند شود و اجازه داده شود جامعه‌شناس‌ها هم حضور داشته باشند و بتوانیم بر اساس تجربیات مشخص و بینش درست و کارهای علمی این مبحث را پیش ببریم. در پایان، پرسشی را مطرح می‌کنم: ما در برنامه سوم داشتیم که ۱۱ میلیارد متر مکعب از مصرف آب را باید کم کنیم و در برنامه هفتم هم داریم که باید ۱۵ میلیارد متر مکعب مصرف آب را کم کنیم. در عین حال می‌خواهیم رشد اقتصادی هم داشته باشیم. باید به این بیاندیشیم که چگونه می‌توانیم به اقتصاد بزرگ‌تر با مصرف آب کمتر برسیم؟



۱- نقش بازار آب در تخصیص بهینه منابع آب چیست؟

>> مهندس جهانی: بهتر است ببینیم منظور از موضوع تخصیص بهینه آب چیست؟ در قالب این منظور است که می‌توان به نقش بازار اشاره کرد. اگر منظور از تخصیص بهینه آب، موضوع ارتقا ارزش اقتصادی آب باشد، بله، بازار آب می‌تواند نقش مهمی در این مورد داشته باشد. زیرا اصولاً بازار به مفهوم عمومی آن، یعنی نقش اقتصاد و ارزش اقتصادی در آن، بسیار مهم است. ولی اگر چنانچه تخصیص بهینه منابع آب را از یک منظر دیگر ببینیم که آن منظر به اعتقاد من یک منظر مهم و پوشش‌دهنده است و آن موضوع توسعه پایدار است، در این صورت، در توسعه پایدار، ما در تخصیص منابع با سه ستون یا اصل مواجه هستیم. تخصیص منابع آب باید به گونه‌ای باشد که توازن و تعادل بین توسعه اقتصادی، عدالت اجتماعی و همین‌طور حفظ محیط‌زیست را تأمین کند. یعنی یک توازن منطقی میان این سه اصل ایجاد شود؛ بنابراین می‌بینیم در موضوع بازار که معطوف به موضوع ارتقای ارزش اقتصادی آب هست، این دو موضوع دیگر، یعنی عدالت اجتماعی و حفظ محیط‌زیست مغفول است و اصولاً مسأله بازار به عنوان کالای اقتصادی، خیلی هم توجه در بازار و این موارد به موضوع عدالت اجتماعی و حفاظت محیط‌زیست ندارد و عمده تمرکز و توجه آن این است که چگونه می‌توان ارزش اقتصادی را بالا برد. اگر به درستی به موضوع تخصیص آب نگاه کنیم، اینجا هست که می‌توانیم بگوییم اگر نقش بازار آب آن هم با در نظر گرفتن معیارهایی برقرار شود، فقط یک بعد از مسأله را در تخصیص بهینه آب می‌تواند برآورده کند و دو بعد دیگر غایب است و اصولاً تجربه جهانی هم در جاهایی که بازار آب تشکیل شده، نشان داده این دو موضوع، یعنی مسأله عدالت اجتماعی و حفاظت محیط‌زیست در موضوع بازار آب، یا کمتر دیده شده یا اصلاً دیده نشده است. آثار معطوف از آن مسأله هم در نهایت ممکن است به ارتقای ارزش اقتصادی آب منجر شده باشد. اما آسیب‌هایی که از این دو موضوع دیگر ایجاد شده، از منافی که از طریق ارتقای ارزش اقتصادی آب حاصل شده، بیشتر است. یعنی موضوع فایده به هزینه مطرح است و بنابراین باید خیلی مواظب بود، اگر چنانچه بازار آب با مفهومی که ممکن است با در نظر گرفتن کلیه جوانب تشکیل شود، به موضوع توازن و تعادل بین این سه مورد توجه عمده‌ای کند، در آن صورت است که می‌توانیم بگوییم بازار آب می‌تواند در تخصیص بهینه منابع آب، نقش داشته باشد. در غیر این صورت، این موضوع به ترتیبی که اشاره شد، مورد تردید قرار می‌گیرد. مگر اینکه ما تخصیص بهینه منابع آب را صرفاً در موضوع ارزش اقتصادی آب ببینیم که این هم یک نگاه مخدوش و غیرقابل قبول است.

>> دکتر انصاری: بازار آب به عنوان یک سازوکار مناسب می‌تواند برای تعیین ارزش آب در یک منطقه مورد استفاده قرار بگیرد و عرضه و تقاضای آب و به تناسب آن هم ارزشش به عنوان یک کالای اقتصادی اجتماعی در این سازوکار می‌تواند مشخص شود. بعد از کشف قیمت و ارزش (اگر این دو را در اینجا معادل در نظر بگیریم)، می‌توان با ایجاد سازوکارهای مناسب و نظارت درستی که دولت روی عرضه و تقاضا اعمال می‌کند، تخصیص بهینه منابع آب را انجام داد؛ لذا بازار آب می‌تواند به عنوان ابزاری در تخصیص بهینه منابع آب در نظر گرفته شود. البته آب را در مناطق خشک باید به عنوان کالای اقتصادی اجتماعی و محیط‌زیستی در نظر بگیریم.

۲- به طور کلی چه زیرساخت‌هایی برای تشکیل یک بازار آب کارا، لازم است؟

>> مهندس جهانی: منظور از تشکیل بازار کارا با زیرساخت‌هایی که برای تشکیل بازار آب در این سؤال مطرح است، به تشکیل بازار رسمی آب مربوط می‌شود. ما در گذشته بازار سنتی آب داشتیم و هنوز هم داریم و آب در این بازار مبادله می‌شود. وقتی به گذشته‌های دور می‌رویم (زمانی که اصولاً عرضه آب بیشتر از تقاضا بوده و در قالب بازار غیررسمی، فقط مسأله مبادله آب مطرح بوده است)، شاید بازار آب کارا تر هم بوده و ارزش اقتصادی آب به عنوان دارایی مطرح بوده است. حتی اگر به گذشته‌های دور برگردیم، سهمی از قنات، به عنوان مهریه برای ازدواج بانوان مطرح بوده، بنابراین موضوع بازار آب به صورت رسمی مطرح است. اگر این برداشت درست باشد، در این صورت باید ببینیم که اصولاً در بازار رسمی مسأله دخالت دولت مطرح است و اینکه این بازار بر چه مبنای و اصولی استوار است و چگونه باید تشکیل شود. چه عواملی در آن دخیل هستند و به طور کلی جنبه رسمی بودن این، به مفهوم دخالت دولت در ایجاد سازوکارهای لازم برای بازار آب مطرح است؛ بنابراین سؤالی که در ذهن من است اینکه آیا اصولاً وقتی ایده تشکیل بازار آب در دولت یا جامعه یا هر دو مطرح شده، برای اینکه این موضوع دارای پایه‌های اصلی باشد، در کشور مطالعات توجیهی و جامع در مورد ضرورت تشکیل بازار، انجام شده یا خیر؟ منظوری است که وقتی می‌خواهیم سازه‌ای مانند سد بسازیم، مطالعاتی تحت عنوان امکان‌سنجی^۲ انجام می‌دهیم. مطالعاتی از جنبه‌های فنی و سایر جنبه‌ها. مطالعات لازم انجام می‌شود و اهداف مشخص می‌گردد. بعد از آن است که اقدامات مربوط به طراحی و اجرا آغاز می‌شود. من هر چه که به گذشته برگشتم، می‌بینم هر چند حتی در برنامه‌های پنج ساله هم تشکیل بازار آب مطرح بوده، اما این‌ها شکل انتزاعی دارند. یعنی اینکه ما بگوییم که دولت به این دلایل به این نتیجه رسیده که باید بازار آب تشکیل

شود. برای این که این کار انجام شود، مطالعات سیستماتیک انجام شود، به این مفهوم که اصولاً اهداف این کار به درستی ترسیم شود، مشکلات و موانع مشخص شود و مطالعات جامعی که جهت گیری های اصلی در آنجا مشخص شده، به دست بیاید و بعد هم مشخص شود که مقیاس تأثیر این بازار به چه ترتیبی است. اصولاً این موضوع کجای بحران آب را می تواند حل و فصل کند و آیا توانایی این را دارد که به عنوان ابزاری برای حل و فصل بحران آب کمک کند و اگر هست، با چه حد و حدود و مقیاسی می تواند این نقش را ایفا کند؟ در کجاها با چه شرایطی می شود این بازار را تشکیل داد؟ چنین مطالعاتی به اعتقاد من انجام نشده یا به شکل های منقطع و نه یکپارچه، انجام شده است. پیشنهاد من این است که در دانشگاه فردوسی، مرکز مطالعات محیط زیست پیشنهاد دهد که این مطالعات جامع با فراهم نمودن امکانات لازم صورت بگیرد. حالا ممکن است این مطالعات یک سال هم طول بکشد. از سال ها پیش قرار بوده است بازار آب تشکیل شود که مشخص نیست این ها تشکیل شده یا خیر. این زمان طی شده ولی این که ما مطالعات سیستماتیک انجام دهیم و به پشتوانه آن مطالعات، هم از نظر قانونی و حقوقی، هم از نظر نهادی و ساختاری هم از نظر اجرایی و مهم تر از همه، از بعد پایش و نظارت و کارایی صورت بگیرد، فاقد این هستیم. بالقوه این که ما در کجاها می توانیم این بازارها را تشکیل دهیم؟ مقیاس تشکیل این بازارها در مقابل کل مسائل بحران آب کشور در کجا قرار می گیرد و از این قبیل مسائل. من فکر می کنم کشور ما نیاز به چنین مطالعاتی دارد. توصیه من این است که این مطالعات پایه گذاری شود و البته اسنادی هم در وزارت نیرو وجود دارد که این اسناد می تواند در جهت تکمیل یا فراهم کردن شرایط جامعیت و یکپارچگی این مطالعات کمک کند.

>> دکتر انصاری: در مورد زیرساخت ها می توان به پنج مورد اشاره کرد: بخش اول وجود اطلاعات مناسب در خصوص کیفیت و کمیت آب که منجر به شفافیت در بازار آب می شود. البته این اطلاعات باید برآمده از یک سری اطلاعات کامل و موثق و در اختیار همگان باشد. دوم باید مکانیزم های ورود و خروج آزادانه عرضه کنندگان و تقاضا کنندگان آب تمهید شده باشد. سوم تعریف دقیق حقوق مالکین آب به این شکل که باید لازم الاجرا، قابل انتقال و دارای طول زمانی مشخص باشد (تعیین تاریخ انقضا). می دانیم که حقوق مالکیت انواع متفاوتی دارد (حقوق مالکیت عمومی، خصوصی، مشترک و باز مثل انفال) که در ایران، آب در حوزه انفال معرفی می شود. پس باید تعریف دقیقی از حقوق آب ارائه شود و مکانیزم های بازار بر اساس آن تنظیم شود. این سه، زیرساخت های مهم و اصلی هستند. چهارم تعریف دقیق، جامع و مانع نهادها، قانون گذاران و قوانین مربوطه است. این تعریف دقیق قاعداً

به دولت کمک خواهد کرد که نظارت کامل و مناسبی در بازار داشته باشد. البته منظور از نظارت، دخالت در بازار نیست و مورد پنجم این است که باید کنترل آثار خارجی^۲ مثبت و منفی در جهت حفظ پایداری آب، به درستی انجام شود و البته وقتی صحبت از پایداری آب می شود، منظور هم پایداری در تأمین هست و هم پایداری در عرضه آب برای کاربران متفاوت از جمله آب شرب که اگر به درستی این کنترل انجام نشود، می تواند تأمین آب شرب را دچار مشکل کند، یا از طرف دیگر می تواند موجب افزایش قیمت آب در تأمین آب شرب در مناطق خشک و نیمه خشک شود و در نهایت این مسأله باعث می شود تقاضا کم شود و این خود می تواند مشکلاتی از جمله افزایش بیماری ها یا کاهش سطح بهداشت جامعه را موجب شود.

۳- به نظر شما بازار آب موجب کاهش یا افزایش ارزش آب خواهد شد؟

>> مهندس جهانی: اگر قرار باشد بازار آب موجب کاهش ارزش آب شود، به ضد خود تبدیل می شود و چون مفهوم کاهش ارزش در بازار یعنی ورشکستگی، بنابراین این پرسش باید اصلاح شود. قطعاً اگر بازار آب به درستی و در شرایط مناسب که در نشست وینار توضیح دادم، در جایی که عرضه و تقاضای آب دارای توازن باشد و ما کمبود (بدهکاری) نداشته باشیم، تشکیل شود، قاعداً می تواند به عنوان یک ابزار برای تولیدات با ارزش اقتصادی بیشتر در مبادله آب کمک کند. اصولاً هدف از تشکیل بازار آب، افزایش ارزش اقتصادی آب است. در غیر این صورت، مسأله بازار آب اصلاً مطرح نخواهد بود.

>> دکتر انصاری: ما از طریق بازار آب، قیمت آب را بر مبنای هزینه کامل که شامل هزینه های اقتصادی و محیط زیستی که با نظارت درست حاکمیت یا دولت اتفاق می افتد، کشف می کنیم. ارزش آب شاخص های دیگری دارد که از بازار بدست نمی آید. اما به طور کلی، اگر ارزش آب (ارزش اقتصادی به علاوه ارزش ذاتی آب) را معادل ارزش کامل آب در نظر بگیریم، می توانیم انتظار داشته باشیم در مدیریت منابع آب، اتفاق مثبت و خوبی بیفتد و منجر به پایداری تأمین آب شود؛ لذا باید بین ارزش آب، قیمت آب و نهایتاً هزینه تأمین آب تفاوت قائل شویم؛ بنابراین در اینجا به نظر می رسد اگر از عامل قیمت استفاده کنیم، درست تر است. اگر بازار به سمت انحصار برود، می تواند باعث افزایش قیمت شود؛ اما هر جا شفافیت وجود داشته باشد و به نوعی باعث شویم ساختاری کارا به وجود آید و به سمت رقابت پیش رویم، کشف قیمت اتفاق خواهد افتاد. یعنی نمی شود مشخص کرد که بازار باعث افزایش یا کاهش

قیمت می‌شود. اما اگر به سمت انحصار برویم، باعث افزایش قیمت خواهد شد و انحصار و قدرت بازار به دست دولت یا همان عرضه‌کننده خواهد بود. این اتفاق می‌تواند موجب افزایش قیمت شود. به‌عنوان مثال، در حال حاضر شرکت آب و فاضلاب یک انحصار طبیعی دارد و به نظر من این شرکت در حال تعیین قیمت آب است. با توجه به هزینه و درآمد خانوارها، بر خلاف آن چیزی که عموم فکر می‌کنند قیمت آب پایین است، این قیمت بالا هست. اگر آب قرار باشد از محل مخازن سدها به فروش برود، می‌توانیم انحصار چندجانبه داشته باشیم که در آنجا به‌نوعی جنگ قدرت بین عرضه‌کنندگان خواهیم داشت و بحث مفصلی دارد و تخصیص به کشاورزی و شرب اتفاق خواهد افتاد. پس مجدداً تأکید می‌کنم اگر قرار باشد آب را از مخازن سدها توزیع کنیم، جنگ قیمت خواهیم داشت. اینجا چون به کاهش یا افزایش ارزش اشاره شده است، می‌توان گفت بازار می‌تواند باعث کشف قیمت شود. این موضوع بسته به ارزش آب در بخش‌های مختلف صنعت، شرب و کشاورزی دارد و بر اساس آن ارزش و تمایل مصرف‌کنندگان، این قیمت کشف می‌شود که می‌تواند افزایش یا کاهش داشته باشد. البته در ایران، با توجه به این که در کشاورزی و صنعت، آب با قیمت بسیار پایین عرضه می‌شود، بازار آب سبب افزایش قیمت آب خواهد شد.

۴- تأثیر بازار آب بر الگوی کشت و تولیدات کشاورزی را چگونه می‌بینید؟

>> **مهندس جهانی:** وقتی صحبت از بازار می‌شود، بازار فروشنده و خریدار دارد. ممکن است هم فروشنده و هم خریدار از بخش کشاورزی باشند. همچنین ممکن است فروشنده از بخش کشاورزی و خریدار از بخش صنعت باشد. با این حال، عکس این وضعیت معمولاً رخ نمی‌دهد؛ زیرا با توجه به ارزش آب، مصرف‌کنندگان آب در بخش صنعت، معمولاً آن را به بخش کشاورزی نمی‌فروشند. اما بخش کشاورزی می‌تواند آب خود را به بخش صنعت بفروشد و حتی به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست، اقدام به فروش آب نماید. تجربه نشان داده است که در این زمینه، خریداران معمولاً اشخاص حقیقی نیستند، بلکه دولت‌ها هستند که برای حفظ تعادل و جبران کمبودهای محیط‌زیستی، حاضر به خرید آب از بخش کشاورزی می‌شوند که با سازوکارهای بازار تا حدی متفاوت است. در مورد نوع خریدار و فروشنده، این نکته مطرح است که فروشنده کشاورز است و باید بررسی شود که تأثیر بازار آب بر الگوی کشت و تولیدات کشاورزی چگونه است. هدف ما در اینجا، ارائه دیدگاه وسیع‌تری نسبت به بازار آب می‌باشد. بنابراین، طبیعی است که اگر خریدار بخواهد همان الگوی

کشت را که فروشنده اجرا می‌کند، ادامه دهد و آب را به همان شیوه مصرف کند و از تکنولوژی و فناوری‌های جدید بهره نبرد، در این صورت تغییر خاصی در الگو اتفاق نخواهد افتاد و لذا این خرید و فروش تأثیری بر بهبود اقتصادی و نیز کاهش برداشت آب نخواهد داشت. منطق این امر نیز این است که اگر خریدار بخواهد آب را در یک الگوی دیگر مصرف کند، می‌تواند تحولی در الگوی کشت در یک منطقه ایجاد کند که این بستگی به مقیاس دارد. برای مثال، اگر مقیاس آب قابل انتقال از بخش کشاورزی برای کشاورزی در دشت قابل توجه باشد، این موضوع می‌تواند به‌طور بنیادی در الگوی کشت، تحولاتی ایجاد کند. اما اگر مقیاس انتقال محدود باشد؛ و فروشنده و خریدار در مقیاس کوچک عمل کنند، تغییرات اندکی در الگوی کشت رخ خواهد داد که چندان معنادار نخواهد بود. علاوه بر این، ممکن است به‌صورت درصد خیلی جزئی تغییراتی ایجاد شود. اگر سؤال این باشد که آیا بازار آب می‌تواند تحولات دراماتیکی در الگوی کشت ملی ایجاد کند، پاسخ به این سؤال جای تردید دارد؛ زیرا واقعاً مقیاس بازار و تبادل آب در بازار به اندازه‌ای نیست که بتواند تغییرات معناداری در الگوی کشت در سطح ملی ایجاد کند. همچنین، ذکر این نکته ضروری است که نمی‌توان به خریدار دستور داد که آب را حتماً به یک الگوی خاص اختصاص دهد. به‌طور طبیعی، خریدار آبی را که می‌خرد به الگویی اختصاص خواهد داد که ارزش اقتصادی بیشتری تولید کند.

>> **دکتر انصاری:** در خصوص تأثیر بازار آب بر الگوی کشت و تولیدات کشاورزی، یکی از سازوکارها و ابزارهای مؤثر در تعیین الگوی کشت و تولیدات کشاورزی، بازار آب است. قطعاً بازار آب باعث می‌شود که الگوی کشت و تولیدات کشاورزی به سمت‌وسویی حرکت کند که بهره‌وری اقتصادی بالاتری دارند و به عنوان یکی از ابزارها و سازوکارهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب کشاورزی محسوب می‌شود. این موضوع به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آب و در برخی موارد با کمبود شدید منابع آب مواجه هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، الگوی کشت و تولیدات کشاورزی باید در رقابت با مصارف شرب و صنعتی قرار گیرد. در ساختارهای موجود و با کشت محصولاتی که در حال حاضر وجود دارد و با سطح علمی تولیدات کشاورزی فعلی، نمی‌توان انتظار کشت و تولیدات کشاورزی قابل توجهی را داشت. بنابراین، اگر بازار آب به درستی شکل بگیرد، به‌نظر می‌رسد تأثیر مثبتی خواهد داشت. البته اگر از منظر امنیت غذایی به این موضوع نگاه کنیم، دولت می‌تواند با اعمال نظارت خاص بر بازار و ارائه یارانه‌هایی به کشاورزان، سیاست‌های خود را تا حدودی اعمال نماید.

۵- بازار آب چگونه می‌تواند در راستای تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی عمل کند؟

>> **مهندس جهانی:** اگر بازار آب یک طرفش فروشنده و یک طرفش خریدار باشد و آب مازادی وجود نداشته باشد، در صورتی که خریدار بخواهد از فروشنده بخشی از آب‌های زیرزمینی یک چاه را خریداری نماید و آن را عیناً در یک چاه دیگری در همان منطقه مصرف کند، ممکن است ارزش اقتصادی محصولاتی که تولید می‌کند، بالاتر رود. با این حال، در زمینه تعادل بخشی، قطعاً نمی‌تواند اثرات معناداری داشته باشد، مگر اینکه مقررات و چارچوب‌هایی که برای ایجاد بازار رسمی آب تشکیل می‌شود، شرایطی را فراهم کند که به فروشنده دارای یک چاه بتواند بگوید شما می‌توانید مثلاً ۳۰ درصد یا ۴۰ درصد از آب را بفروشید، اما ۳۰ درصد فروخته شده ممکن است قابل استحصال نباشد. اگر چنین اتفاقی بیفتد، ممکن است در مقیاس محدود نیز این چنین انجام شود و فروشنده با وجود همه این موارد، ۳۰ درصد آب را برای تعادل بخشی نگه دارد و از آب زیرزمینی استخراج نکند. این امر نیازمند یک نظام دقیق نظارتی است. همچنین، اطلاعاتی که باید جمع‌آوری شود، سخت‌افزار و نرم‌افزارهای لازم و ارزیابی‌هایی که انجام می‌گیرد، ممکن است در زبان و گفتگو مطرح شود و در قراردادهای نیز ذکر گردد. اما اگر در عمل امکان پیاده‌سازی این موارد وجود نداشته باشد و نظارتی نیز وجود نداشته باشد، طبیعتاً این اتفاق نخواهد افتاد و قطعاً به تعادل بخشی کمک نخواهد کرد. شاید این شرایط به صورت محدود اتفاق بیفتد. بنابراین، اگر فروشنده قبول کند که برای ورود به بازار آب، بخشی از حقایق خود را استخراج نکند، طبیعتاً این می‌تواند به تعادل بخشی کمک نماید. البته در این مورد، مسأله مقیاس نیز مطرح است؛ به عنوان مثال، فرض کنید که در برخی دشت‌ها چند میلیارد مترمکعب کمبود آب وجود دارد. پرسش این است که با ایجاد چند بازار آب، دستیابی به شرایط مطلوب چگونه است و چه مدت زمان انجام می‌شود؟ تمام این موارد نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری است، اما به صورت نظری می‌توان گفت که اگر فروشنده حاضر باشد بخشی از سهم آب خود را استفاده نکند، در مقابل، ارزش اقتصادی بیشتری برای آن بخش قابل فروش به دست می‌آورد، تا حدی به این هدف (تعادل بخشی) کمک می‌نماید.

>> **دکتر انصاری:** در خصوص نقش بازار در راستای تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی، نکته اساسی در تعیین قیمت کف بازار است. در ایران، به دلیل اینکه آب در اختیار دولت قرار دارد، دولت می‌تواند با کشف هزینه‌های کامل آب، قیمت کف را تعیین نماید. به عبارت دیگر، دولت می‌تواند هزینه اقتصادی آب را مشخص نماید که در این هزینه اقتصادی، هزینه‌های

مربوط به آثار منفی محیط‌زیستی نیز لحاظ شده باشد. با اعمال این دو هزینه، قاعدتاً زمانی که برداشت آب خارج از تعادل آب‌های زیرزمینی انجام می‌شود، قیمت کف بازار به شدت افزایش می‌یابد. از آنجا که دولت موظف است قانون هزینه کامل را رعایت کند، این قیمت بالا به طور طبیعی باعث خواهد شد که مصرف‌کننده‌ای وجود نداشته باشد و عملاً این امر می‌تواند به تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی کمک کند. البته، این موضوع چالش‌های بسیار زیادی را نیز به همراه خواهد داشت. زیرا برداشت آب‌های زیرزمینی به شدت از حالت تعادل خارج شده و این قیمت بالا در حوزه صنعت، کشاورزی و شرب، رقابت جدی را بین صنعت و شرب ایجاد خواهد کرد. به نظر می‌رسد که در شرایط کنونی، کشاورزی از حوزه مصرف‌کنندگان خارج خواهد شد، مگر اینکه کشاورزی با ارزش اقتصادی بالا یا کشاورزی عمدتاً گلخانه‌ای و زیرپوشش بتوانند در این بازار رقابت کنند. با این حال، این رویکرد می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب عمل کند.

۶- روش بهینه برای انتخاب طرح‌های آزمایشی جهت اجرای بازار آب را چگونه پیشنهاد می‌کنید؟

>> **مهندس جهانی:** دیدگاه من این است که انتخاب طرح‌های آزمایشی بسیار مهم است و نمی‌توان بدون داشتن ضوابط و معیارهای مناسب به این انتخاب پرداخت. شاید بهترین شیوه برای به دست آوردن ضوابط و معیارها، انجام مطالعاتی باشد که در پاسخ به سؤال دوم درباره زیرساخت‌ها مطرح شد. به هر حال، برای گشایش در این زمینه، به چند نکته اشاره می‌کنم که در مورد انتخاب طرح‌های آزمایشی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. نخست اینکه در دشت‌ها و مناطق مختلف، بهره‌برداری‌های متفاوتی از منابع آب داریم. به طور مشخص، سه نوع بهره‌برداری را می‌توان ذکر نمود: نوع اول، استفاده صرف از آب‌های زیرزمینی برای تأمین نیازهاست؛ در برخی مناطق، تأمین نیازها تنها از آب‌های سطحی انجام می‌شود و در برخی دیگر، تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، طبیعتاً است که اگر به دنبال انتخاب طرح‌های آزمایشی هستیم، این شیوه‌های بهره‌برداری باید مورد توجه قرار گیرد و بررسی کنیم که بازار آب چگونه در این سه نوع شیوه بهره‌برداری انتخاب می‌شود. موضوع دوم این است که از نظر دشت‌ها و آب‌های زیرزمینی، با دشت‌های فوق‌بحرانی، دشت‌های بحرانی و دشت‌های آزاد (که تعدادشان کم است) سروکار داریم. بنابراین، یکی از معیارها در انتخاب طرح‌های آزمایشی می‌تواند این نوع ضوابط باشد که مشخص کنیم بازار آب در کدام یک از این دشت‌ها مؤثر است که به عنوان یک ضابطه مورد توجه قرار گیرد. موضوع سومی که

به نظر من ضابطه یا معیار طرح‌های آزمایشی است و باید مورد توجه قرار گیرد، جوامع بهره‌بردار هستند. ما در نقاط مختلف کشور از نظر فرهنگی و اجتماعی تفاوت‌هایی داریم و طبیعتاً نمی‌توان گفت که بازار آبی که به‌عنوان طرح آزمایشی در مناطق مرکزی ایران انتخاب می‌شود، شبیه به همان است که در مناطق شمالی ایران وجود دارد. بنابراین، توزیع جغرافیایی، فرهنگی و همچنین مسأله سابقه وجود بازار آب، به‌ویژه بازار آب سنتی و غیررسمی، اهمیت دارد. در جاهایی که این بازار غیررسمی وجود دارد، می‌توان روی طرح‌های آزمایشی کار کرد. در جاهایی که چنین موضوعی وجود ندارد یا کم‌رنگ است، می‌توان طرح آزمایشی انتخاب نمود و این‌ها را با هم مقایسه کرد تا نتیجه‌گیری کنیم که در کدام یک از این موارد می‌توان کارایی لازم را داشت.

موضوع آخر از نظر هیدرولوژیکی و تفاوت‌هایی که از نظر توزیع زمانی و مکانی منابع آب دارند، این‌ها به‌عنوان معیار اولیه معرفی می‌شود. به‌عنوان یک رویکرد سیستماتیک، بسیار مفید خواهد بود اگر مطالعاتی که من در پاسخ به سؤال دوم بر آن تأکید کردم که پایه‌گذار آن مرکز مطالعات و تحقیقات محیط‌زیست دانشگاه فردوسی مشهد است، به‌عنوان مبنای کار قرار گیرد. در این صورت، بسیار مغتنم خواهد بود که گروهی از متخصصان اصول، مبانی و چارچوب‌های مسیر مطالعات را پیشنهاد دهند و مشخص نمایند.

>> دکتر انصاری: در خصوص طرح آزمایشی اجرای طرح بازار آب، من در شرایط حاضر اجرای این طرح را مناسب نمی‌دانم، زیرا آن پنج زیرساختی که به آن اشاره نمودم، از جمله شفافیت در اطلاعات و داده‌ها، وجود ندارد. ابتدا باید شرکت‌های سهامی آب منطقه‌ای به‌عنوان متولی اجرای طرح بازار آب، به

دنبال تولید اطلاعات و داده‌های شفاف و مؤثر باشند. اجرای طرح بازار می‌تواند منجر به شکست و همچنین مشکلات عدیده‌ای گردد. از این جهت، گرچه در حال حاضر اجرای طرح بازار پیشنهاد می‌شود و شرکت آب منطقه‌ای نیز به سراغ آن رفته است، اما این کار را مناسب نمی‌بینم. با این حال، اگر به‌صورت بخشی و موقت از نظر زمانی باشد تا آسیب‌شناسی صورت گیرد و مجدداً سازوکار اجرای درست طرح بازار به‌دست آید و اطلاعاتی از بازار جمع‌آوری شود، می‌تواند طرح بازار آب در یک منطقه به‌صورت موقت اجرا شود. عملاً باید طرح بازار به‌صورت مجازی^۵ و مبتنی بر عامل^۶ یا عامل‌محور باشد. اجرای طرح بازار آب در شرایط حاضر و با وضعیتی که شرب، صنعت و کشاورزی دارند، و با توجه به اینکه کشاورزی قبلاً به‌عنوان محور توسعه قرار گرفته و اشتغال بسیار زیادی را در برخی از مناطق روستایی و شهرهای کوچک به خود اختصاص داده است، لذا برخلاف نظر برخی از عزیزان که اکنون به دنبال اجرای طرح بازار آب هستند، من این کار را در شرایط حاضر مناسب نمی‌بینم. مگر اینکه زیرساخت‌های لازم آماده شود و قوانین درستی تمهید گردد. همچنین، تعریف دقیق حقوق مالکیت باید انجام شود، با توجه به اینکه بخش زیادی از آب کشور در حال حاضر در اختیار بخش کشاورزی است. قطعاً مصرف‌کنندگان بخش کشاورزی نخواهند توانست در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک، قیمتی را که از بازار کشف می‌شود، بپردازند و این امر قطعاً وضعیت کشاورزی را به سمت نابسامانی پیش خواهد برد. از این جهت، نیاز به بررسی و ارزیابی‌های دقیق‌تری وجود دارد و باید ابتدا زیرساخت‌های لازم شکل بگیرد و سپس اجرای طرح بازار آب به‌صورت طرح آزمایشی صورت گیرد.



چرا که حتی در برخی از مناطق با توافق کشاورزان، بخشی از آب کشاورزی به سایر بخش‌ها نیز فروخته می‌شود.

۵- اگرچه مشکلات حقوقی ناشی از قوانین مرتبط با آب همراه با نارسایی‌های زیادی است و در بطن خود تناقضاتی را در مورد نحوه بهره‌برداری از منابع آبی کشور ایجاد کرده است؛ ولی از آنجا که بازار آب بر مبنای عرضه آب مازاد شکل می‌گیرد و این عرضه با مبنای حقوقی متفاوتی وجود دارد، این قوانین مانع جدی برای شکل‌گیری بازار آب نمی‌باشد.

۶- در سال‌های گذشته، به شیوه‌های مختلف، بر افزایش عرضه منابع آبی در کشور تمرکز شده است و در واقع نظام حکمرانی کشور بر مدیریت عرضه منابع آبی تأکید داشته است. با توجه به اینکه پتانسیل عرضه منابع آبی کشور کاهش بسیار محسوسی داشته است، باید نظام حکمرانی کشور بر مدیریت تقاضای آب متمرکز شود، به گونه‌ای که حداقل سهم محیط‌زیست تأمین شود. تأمین حداقل سهم محیط‌زیست از منابع آبی کشور، با توجه به تفاوت‌های اقلیمی مناطق مختلف یکسان نمی‌باشد. که طبعاً این میزان سهم توسط مراکز تحقیقاتی حوزه محیط‌زیست قابل محاسبه است.

۷- شکل‌گیری بازار آب می‌تواند حقایقه‌داران را در استفاده از سهم خود ترغیب نموده و در مواردی که نیاز لازم برای فعالیت‌های خود نداشته باشند، سعی در فروش آن خواهند کرد که این امر تأثیر منفی بر منابع آبی خواهد داشت.

۸- نهایتاً این که به نظر می‌رسد با توجه به تجارب سایر کشورها و شرایط طبیعی و اقلیمی کشور، بازار آب نمی‌تواند نقش مؤثری در مدیریت تقاضای آب در راستای کاهش مصرف آب در کشور داشته باشد.

۹- برآیند مجموعه نظرات مربوط به ویژگی‌های بازار آب و پیش‌نیازهای وابسته، حاکی از آن است که تشکیل بازار آب در ایران تا زمانی که زیرساخت‌های آن از جنبه‌های مختلف مهیا نباشد، قابل اجرا نیست. در عین حال تشکیل بازار به صورت طرح آزمایشی برای سنجش اثرات آن در یک ناحیه محدود، می‌تواند برای برنامه‌ریزی‌های آتی مؤثر باشد.

منابع

داوری، کامران، اسلامی، امیر، عمرانیان خراسانی، حمید، درخشان، هاشم، و سالاریان، محمد. (۱۴۰۲). مدیریت آب؛ منابع و کاربردها. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. چاپ اول. مشهد، ایران.

پی‌نوشت‌ها

1-case study

2-Future Markets

3-Feasibility

4-Externalities

5-Virtual

6-Agent-Based

همان‌گونه که در بخش اصول نظری بازار آب، تصویری از وضعیت منابع آبی و تأثیر آن بر اکوسیستم طبیعی کشور بیان شد، بدون تردید محدودیت منابع آبی و پیامدهای آن اگر نگوییم بزرگ‌ترین، ولی می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشور است که باید برای کاهش پیامدهای منفی آن باتوجه به تغییرات اقلیمی، چاره‌اندیشی کارآمدی را مدنظر قرار داد. به هر میزان که برای مقابله با بحران کم‌آبی در کشور اهمال شود، باید با شدت و سرعت بیشتری شاهد بروز بحران‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و حتی اجتماعی در کشور باشیم. برای مقابله با بحران کم‌آبی راهکارهای مختلفی مطرح شده است که هریک از این راهکارها یا امکان ظهور و بروز پیدا نکرده‌اند و یا اینکه از کارآمدی لازم برای کاهش آثار ناشی از کم‌آبی برخوردار نبوده‌اند. در سال‌های اخیر، ایجاد بازار آب به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای مقابله با چالش کم‌آبی در کشور توسط برخی از نهادها و شخصیت‌های اجرایی کشور مدنظر قرار گرفته و برای پیاده‌سازی این بازار، هم به صورت طرح‌های مطالعاتی و هم اجرای بازار آب به صورت محدود اقداماتی انجام گرفته است. سؤال اساسی این است ایجاد بازار آب شیوه مناسبی برای مقابله با بحران کم‌آبی در کشور می‌باشد؟ برای پاسخ به این سوال، نظرات کارشناسی برخی از خبرگان حوزه آب از دانشگاه و نهادهای اجرایی و فعالان بخش خصوصی احصا شده است که ماحصل آن به قرار زیر است:

۱- اساساً کارکرد بازار آب تخصیص بهینه آب بین فعالیت‌های مختلف در بخش‌های اقتصادی کشور است، به گونه‌ای که بیشترین بازدهی را از حیث ارزش قابل محاسبه آب به همراه داشته باشد و ایجاد این بازار نقش مؤثری در مقابله با کاهش منابع آبی به ویژه فرورفت سفره آب‌های زیرزمینی نخواهد داشت. در شرایط نرمال، آب می‌تواند به عنوان یک کالای اقتصادی هم تلقی شود و در بازار آب قیمت آن کشف شود؛ ولی آب فقط یک کالای اقتصادی نیست و چون شرط لازم برای تداوم حیات بشر و پایداری محیط‌زیست است، نباید صرفاً به آب نگاه اقتصادی داشت.

۲- در شرایطی که کشور با چالش کم‌آبی مواجه است، تمرکز بر ایجاد بازار آب، حتی می‌تواند محدودیت منابع آبی را تشدید کند و سهم آب برای حفظ پایداری محیط‌زیست نادیده گرفته شود.

۳- با توجه به اینکه کشور با محدودیت شدید منابع آبی مواجه است و از آنجا که خلق ارزش پولی در بخش‌های خدمات و صنعت بیشتر از بخش کشاورزی است، با ایجاد این بازار عملاً منابع آبی به اشکال مختلف به فعالیت‌های خدماتی و صنعتی سوق داده خواهد شد و از سهم بخش کشاورزی به عنوان بخشی که نقش اساسی را در تأمین امنیت غذایی کشور بر عهده دارد، به نحو محسوسی کاسته خواهد شد.

۴- از زمان‌های گذشته، فروش حقایقه و به طور معمول، فروش آب در بخش کشاورزی، در قالب بازارهای محلی و غیرمتمثل وجود داشته است و در سال‌های اخیر رونق بیشتری یافته و بدون دخالت نهادهای دولتی، خرید و فروش آب در این بازارهای غیررسمی متداول شده است. از این رو ایجاد بازار آب در بخش کشاورزی ضرورتی ندارد.

In the Name of Allah



Grantee
Manager in Charge
Editor in Chief

Editorial Board



Guiding Council



Advisory Editors



Executive Expert
Editor
Design / Graphic
Order of publication
Publisher
ISSN Print/ Online
Website/ E-Mail
Address
Sponsor
Indexing

Journal of Water and Sustainable Development



Volume 11, Issue 2 [Serial No. 32], June 2024

Due to certificate no. 3/18/126631 dated 20/9/2015 from the scientific publications review Commission of the Ministry of Science, Research and Technology in Iran. also Due to registration number no76766 dated 25/1/2016 from the Ministry of Culture and Islamic Guidance, this journal has been licensed to publish. This journal is an output of joint scientific activities between the Ferdowsi University of Mashhad and the Hydraulic Association of Iran.

College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Shahnooshi Foroushani, N. Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Davary, K. Prof. Ferdowsi University of Mashhad

Alidadi, H. Prof., Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

Ansari, H. Prof., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Bagheri, A. Asso. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Esmaili, K. Asso. Prof., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Jolaini, M. Asso. Prof., Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi, Mashhad, Iran

Morid, S. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Nassery, H.R. Prof., Shahid Behesti University, Tehran, Iran

Ghannadi, M. General Manager of the Office of Research, Technology Development and Communication with the Industry of the Country Water & Wastewater Engineering Company, **Chairman of the Council**

Esmailian, H. Managing director of Mashhad Water & Wastewater Company

Nematnejad, M.A., Managing director of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company

Mousavi, S. Y. Secretary of water Think tank at Iran Water Resources Management Company

Shahnooshi Foroushani, N. Manager in Charge

Davary, K. Editor in Chief

Noori Esfandiari, A. Representative of Water Think tank at Iran Water Resources Management Company

Sajadifar, S.H. Representative of Country Water and Wastewater Engineering Company

Kalaei, G.H. Representative of Mashhad Water & Wastewater Company

Ghanbari, F. Representative of Mashhad Water & Wastewater Company

Mirgasemi, S.H. Representative of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company

Barati, R. Representative of Khorasan Razavi Province's Regional Water Company

Shahedi, M., Talebi Hossein Abad, F.

Quchanian, M., Shahedi, M., Talebi Hossein Abad, F., Oskouhi, M.

Talebi Hossein Abad, F. / Shaikhi, M.R.

Quarterly

Ferdowsi University of Mashhad

2423-5474 / 2717-3321

<http://jwsd.um.ac.ir> / Email: jwsd@um.ac.ir

Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. P.O.Box: 917751163

Mashhad Water & Wastewater Company

ISC, Agris, CABI, DOAJ, google scholar, SID, Magiran

Articles in issue:

- **Analyzing Indicators of Adaptive Capacity of Agricultural Units in Water Insecurity Conditions in Hamedan Province**

Mahsa Motaghed, Shahla Choobchian

- **Statistical Downscaling of General Circulation Models (GCMs); History, Principles, and Methods**

Dina Yazdany, Azar Zarrin, Abbasali Dadashi-Roudbari

- **Feasibility of Fog Water Harvesting in Abi-beyglu, Ardabil**

Amin Kanooni, Mohammad Reza Kohan

- **A Review of the Application of Data Science and Machine Learning in Agricultural Water Management**

Reza Delbaz, Hamed Ebrahimian

- **The Experience of Designing and Building a Floating Intake System in the Doosti Dam**

Akbar Shahabi, Mahmood Naderian, Mohsen Maghrebi, Reza Ghasemi

- **An Analysis on the Management of Septage Disposal in Mashhad and Providing a Suitable Practical Solution**

Rezvan Salajegheh, Mehdi Raei Naei, Kazem Esmaili

- **Investigating the Threatening Pollution of the Drinking Water Distribution Network (Case Study: Astara City)**

Mohammad Golshan

- **Investigating the Performance of Microbial Fuel Cells in Wastewater Treatment Containing Azo Dyes Using Meta-Analysis**

Sina Parsayan, Shabnam Sadri Moghaddam

