University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

The Role of Modern Technologies and the Concept of Water Footprint in Managing the Water Resource Crisis in Iran

Seyed-Mahdi Salar-Khorasani [1*], Samaneh Sardroudi Rad[2]

Abstract

The water scarcity crisis, as one of the world's greatest challenges, is particularly evident in countries with arid and semi-arid climates like Iran. Due to its location in these climatic regions, Iran faces serious crises in water resource supply. Considering that fresh water resources constitute only 2.8% of the world's total water resources, optimal use of these resources is essential. In this regard, modern technologies such as remote sensing for soil moisture measurement and cloud seeding can play an effective role in improving water resource conditions. Remote sensing, using microwave waves, especially in soil moisture measurement, has been employed as a method to increase rainfall in dry areas, and reports indicate positive results in increasing rainfall in some regions of Iran. Additionally, the concept of the water footprint, as an important tool for measuring water consumption in the production of goods and the provision of various services, is of particular importance. The water footprint includes three main components: blue water, green water, and grey water, each significantly impacting water consumption. To reduce this footprint, changes in agricultural practices, reduction of food waste, and the use of water-saving technologies are essential. Consequently, the utilization of these technologies and the concept of the water footprint can effectively contribute to managing the water crisis and ensuring sustainable water resources for future generations.

Keywords: Water Crisis, Remote Sensing, Cloud Seeding, Water Footprint, Water Resource Management

[1] Master's Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran. Email: mahdi.salar.kh@ut.ac.ir
[2] Master's Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran. Email: samaneh.sardroudi@ut.ac.ir

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

نقش فناوری‌های نوین و مفهوم ردپای آب در مدیریت بحران کمبود منابع آبی در ایران

سیدمهدی سالارخراسانی[۳*]، سمانه سردرودی راد[۴]

چکیده

بحران کمبود آب، به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های جهانی، به‌ویژه در کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران به شدت مشاهده می‌شود. ایران به دلیل قرار گیری در این مناطق اقلیمی ، با بحران‌های جدی در تأمین منابع آبی مواجه است. با توجه به اینکه منابع آب شیرین تنها ۲.۸ درصد از کل منابع آبی جهان را تشکیل می‌دهد، استفاده بهینه از این منابع ضروری است. در این راستا، فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و بارورسازی ابرها می‌توانند نقش مؤثری در بهبود وضعیت منابع آبی ایفا کنند. سنجش از دور با استفاده از امواج ماکروویو، به‌ویژه در اندازه‌گیری رطوبت خاک در روشی برای افزایش بارندگی در مناطق خشک به‌کار گرفته شده است و گزارش‌ها حاکی از نتایج مثبت در افزایش بارندگی‌ها در برخی مناطق ایران است. علاوه بر این، مفهوم ردپای آب به‌عنوان ابزاری مهم برای اندازه‌گیری مصرف آب در تولید کالاها و ارائه خدمات مختلف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ردپای آب شامل سه جزء اصلی آب آبی، آب سبز و آب خاکستری است که هر یک به‌طور قابل توجهی بر میزان مصرف آب تأثیر می‌گذارند. برای کاهش این ردپا، تغییرات در شیوه‌های کشاورزی، کاهش ضایعات مواد غذایی و استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب ضروری است. در نتیجه، بهره‌گیری از این فناوری‌ها و مفهوم ردپای آب می‌تواند به‌طور مؤثری در مدیریت بحران آب و تأمین منابع آبی پایدار برای نسل‌های آینده کمک کند.

کلمات کلیدی: بحران آب، سنجش از دور، بارورسازی ابرها، ردپای آب، مدیریت منابع آبی

۳ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده فنی و مهندسی کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، تهران، ایران. پست الکترونیکی: mahdi.salar.kh@ut.ac.ir

۴ کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی تهران، دانشگاه تهران، کرج، تهران، ایران. پست الکترونیکی: samaneh.sardroudi@ut.ac.ir

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

۱- مقدمه

بحران کمبود آب در جهان به یکی از چالش‌های اساسی و پیچیده قرن بیست و یکم تبدیل شده است و تأثیرات گسترده‌ای بر زندگی بشر، محیط‌زیست، امنیت غذایی، و توسعه اقتصادی-اجتماعی داشته است. با توجه به اینکه منابع آب شیرین تنها ۲.۸ درصد از کل منابع آبی زمین را تشکیل می‌دهند و بخش عمده‌ای از آن نیز به صورت یخچال‌های طبیعی و منابع غیرقابل دسترس است، این بحران به‌ویژه کشورهای کم‌آب و خشک را تحت تأثیر قرار داده و ضرورت مدیریت پایدار این منابع محدود را برجسته کرده است. ایران، به عنوان یکی از کشورهای واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک جهان، با چالش‌های جدی در زمینه تأمین و مدیریت منابع آب مواجه است. کاهش بارش‌ها، بهره‌برداری ناپایدار از منابع آبی زیرزمینی، توسعه نامتوازن کشاورزی، و تغییرات اقلیمی از جمله عواملی هستند که بحران آب را در ایران شدت بخشیده‌اند [۱،۲،۳،۴]. این وضعیت به‌طور مستقیم بر امنیت غذایی، کیفیت زندگی، و پایداری زیست‌محیطی تأثیر گذاشته و نیاز به راهکارهای فوری و جامع را افزایش داده است.

در این راستا، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در حوزه مدیریت منابع آبی به عنوان یک راهکار کلیدی مطرح شده است. فناوری‌هایی نظیر سنجش از دور برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و بارورسازی ابرها می‌توانند ابزارهای مؤثری برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشند. سنجش از دور، به‌ویژه با استفاده از امواج ماکروویو، امکان پایش دقیق و گسترده رطوبت خاک را فراهم می‌کند و اطلاعات لازم برای مدیریت بهینه آبیاری و مقابله با خشکسالی را ارائه می‌دهد. همچنین، بارورسازی ابرها به عنوان یکی از روش‌های افزایش بارندگی در مناطق کم‌آب، نتایج مثبتی در ایران و سایر کشورها داشته است. این فناوری‌ها می‌توانند به کاهش اثرات منفی بحران آب کمک کرده و راه‌حل‌هایی عملی برای مدیریت منابع آبی ارائه دهند[۴]. علاوه بر فناوری‌های نوین، مفهوم ردپای آب به عنوان ابزاری برای تحلیل و کاهش مصرف آب در تولید محصولات و خدمات مختلف اهمیت زیادی پیدا کرده است. این مفهوم که شامل سه جزء آب آبی، آب سبز، و آب خاکستری است، می‌تواند نقش مهمی در شناسایی بخش‌های پرمصرف و ارائه راهکارهای کاهش مصرف آب ایفا کند. در بخش کشاورزی، که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی در ایران است، محاسبه و کاهش ردپای آب از طریق اصلاح روش‌های آبیاری و استفاده از فناوری‌های کارآمد می‌تواند به‌طور قابل توجهی به کاهش فشار بر منابع آبی کمک کند.

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

در این مقاله، ضمن بررسی فناوری‌های نوین مدیریت منابع آب و تحلیل موقعیت ایران در این زمینه، به مفهوم ردپای آب و اهمیت کاهش آن پرداخته می‌شود. همچنین، راهکارهای پیشنهادی برای بهره‌گیری بهینه از این فناوری‌ها و دستیابی به مدیریت پایدار منابع آبی ارائه خواهد شد. امید است این بررسی بتواند در ارائه چارچوبی علمی برای مقابله با بحران آب و حفاظت از این منبع حیاتی برای نسل‌های آینده مؤثر باشد.

۲- وضعیت و چالش‌های منابع آبی ایران و جهان

به طور کلی، از مجموع ۱.۳۳۲ میلیارد کیلومتر مکعب آب موجود در کره زمین، ۹۷.۲ درصد آن آب شور و غیرقابل استفاده است. تنها ۲.۸ درصد از این آب‌ها به صورت آب شیرین موجود است که بخش عمده آن در یخچال‌ها و آب‌های زیرزمینی به‌طور ذخیره‌شده است. از این میزان ۲.۸ درصد، تنها بخش کوچکی به آب‌های سطحی و در دسترس تعلق دارد [۵]. این واقعیت نشان می‌دهد که منابع آب شیرین برای تأمین نیازهای انسانی و اکوسیستم‌ها بسیار محدود است.

ایران به دلیل قرار گرفتن در منطقه‌ای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، از وضعیت نامساعدی در زمینه منابع آبی برخوردار است. متوسط بارندگی سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که کمتر از یک‌سوم متوسط جهانی است. علاوه بر این، ایران با بحران‌هایی مانند کاهش آب‌های زیرزمینی، خشک شدن دریاچه‌ها (مانند دریاچه ارومیه)، و آلودگی منابع آبی روبرو است. این بحران‌ها تهدیدی جدی برای کشاورزی، صنعت و حتی تأمین آب شرب محسوب می‌شوند[۶].

خشکسالی‌ها و تغییرات اقلیمی، همراه با مدیریت نادرست منابع آب، باعث تشدید بحران کم‌آبی در ایران شده است. بر اساس گزارش‌های جهانی، ایران یکی از کشورهای دارای کمبود آب جدی در جهان است و حدود ۴۳ درصد از جمعیت آن در حوضه‌های رودخانه‌ای با تنش آبی متوسط تا زیاد زندگی می‌کنند [۷]. با این حال، هنوز استراتژی‌های کافی برای مقابله با این بحران در سطح ملی و محلی وجود ندارد.

۳- فناوری‌های نوین در حوزه آب

۳-۱- تولید نقشه‌های رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور

رطوبت خاک یکی از اجزای اساسی سامانه اقلیمی زمین و چرخه هیدرولوژیکی است. اطلاعات رطوبت خاک در مقیاس محلی برای کاربردهای کشاورزی، در مقیاس منطقه‌ای برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و در مقیاس جهانی برای

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources

مدل‌سازی جهانی جو و پیش‌بینی‌های عددی هواشناسی نقش مهمی دارند[۸،۹،۱۰]. با توجه به نقش مهم رطوبت خاک در انجام کاربری‌های علمی و عملی مختلف، در دسترس بودن داده‌های رطوبت در مقیاس‌های مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. اندازه‌گیری رطوبت خاک معمولا در مقیاس نقطه‌ای انجام می‌شود که این روش اندازه‌گیری بیانگر وضعیت رطوبت در بخش محدودی از خاک است. اندازه‌گیری نقطه‌ای متعدد در بخش‌های مختلف یک منطقه می‌تواند مقدار متوسط رطوبت خاک را برای آن منطقه تعیین نماید. در شرایطی که اندازه‌گیری‌های زیاد و در مقیاس وسیع موردنیاز باشد، چنین روش‌هایی دشوار و پرهزینه خواهد بود[۱۱].

در سال‌های اخیر سنجش از دور در برآورد منطقه‌ای و جهانی رطوبت خاک پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. در این خصوص سنجش از دور مایکروویو قابلیت منحصر به فردی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در سطوح وسیع دارد؛ زیرا دماهای درخشندگی در محدوده ماکروویو پایینی طیف الکترومغناطیسی، حساسیت بالایی به رطوبت خاک دارند. در این زمینه رادیومتری ماکروویو در فرکانس‌های پایین، روشی است که برای برآورد جهانی رطوبت سطحی خاک با دقت مناسب توسعه یافته است[۱۲]. در ایران در سال‌های اخیر، با استفاده از تکنیک سنجش از دور، در مقیاس‌های مختلف رطوبت خاک برآورد شده است[۱۳،۱۴].

۳-۲- سنجش از دور با استفاده از امواج ماکروویو

سنجش از دور به‌ویژه با استفاده از امواج ماکروویو در اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس‌های وسیع بسیار مؤثر است. این روش به دلیل حساسیت بالای امواج ماکروویو به رطوبت خاک، امکان اندازه‌گیری رطوبت در مقیاس جهانی و منطقه‌ای را فراهم می‌آورد. به‌طور خاص، در فرکانس‌های پایین، امواج ماکروویو به‌طور دقیق رطوبت سطحی خاک را برآورد می‌کنند [۱۲].

۳-۳- مطالعات انجام‌شده در ایران

در ایران، نیز سنجش از دور به‌عنوان یک ابزار مهم در پایش رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهشی که توسط محرابی و همکاران انجام شد[۱۳]، استفاده از داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی رطوبت خاک در استان‌های مختلف ایران به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان یک راهکار موفق در مدیریت منابع آبی معرفی شد. این پژوهش

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری می‌تواند به‌طور مؤثر در شبیه‌سازی شرایط رطوبتی خاک و مدیریت بهینه منابع آبی کمک کند.

۴- بارورسازی ابرها: روش‌هایی برای مقابله با بحران کم‌آبی

بارورسازی ابرها یکی از راهکارهای متداول برای افزایش بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این روش شامل تزریق مواد خاصی به ابرها برای تسریع فرآیند تشکیل قطرات آب و افزایش بارش است. بارورسازی ابرها به‌ویژه در مناطقی مانند ایران که با خشکسالی‌های مکرر روبرو هستند، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای تأمین منابع آبی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].

۴-۱- روش‌های مختلف بارورسازی ابرها

یکی از روش‌های مرسوم در بارورسازی ابرها، استفاده از تجهیزات زمینی است. در این روش، مواد مختلفی مانند یدور نقره یا یخ خشک به داخل ابرها تزریق می‌شود تا فرآیند تشکیل بلورهای یخ تسریع شود. همچنین، در برخی مناطق برای انجام این عملیات از هواپیماها یا موشک‌ها استفاده می‌شود که مواد مورد نیاز را به داخل ابرها پرتاب می‌کنند[۱۶].

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

شکل۱: روند شماتیک بارورسازی ابرها با استفاده از یدور نقره

۴-۲- مطالعات جهان و ایران

مطالعات انجام‌شده در کشورهای مختلف نشان‌دهنده موفقیت‌هایی در افزایش بارندگی با استفاده از این فناوری است. برای مثال، در استرالیا، اولین تجربیات بارورسازی ابرها در دهه ۱۹۵۰ انجام شد و نتایج مثبت آن نشان‌دهنده افزایش ۱۹ درصدی بارندگی در مناطق مختلف بود [۱۷]. در ایران نیز در سال‌های اخیر، طرح‌های بارورسازی ابرها در استان‌های یزد، مرکزی و زاگرس انجام شده است. گزارش‌های منتشرشده از این طرح‌ها نشان‌دهنده افزایش ۱۸.۹ درصدی بارش‌ها در استان یزد و ۴۶.۴ درصدی در حوضه آبخیز گاوخونی در سال ۱۳۸۹ است[۱۸].

با این حال، باید توجه داشت که بارورسازی ابرها همواره نتایج یکسانی ندارد و می‌تواند در برخی شرایط نتایج منفی به همراه داشته باشد. به گفته بزرگ حداد و همکاران [۱۶]، تغییرات در ساختار ابرها و شرایط جوی می‌تواند منجر به عدم موفقیت این عملیات‌ها شود.

۵- ردپای آب: مفهومی برای مدیریت منابع آبی

ردپای آب به‌عنوان یکی از معیارهای نوین و جامع برای اندازه‌گیری میزان مصرف آب در تولید کالاها و خدمات مختلف، در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این مفهوم به دلیل بحران‌های روزافزون جهانی آب و نیاز به مدیریت پایدار منابع آبی، اهمیت بیشتری پیدا کرده و به یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل و بهینه‌سازی مصرف آب تبدیل شده است. ردپای آب به تولیدکنندگان و سیاست‌گذاران این امکان را می‌دهد که میزان مصرف آب در فرآیندهای مختلف تولید را به دقت ارزیابی کرده و گام‌هایی مؤثر برای کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری بردارند. [۱۹،۲۰].

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

این شاخص شامل سه بخش اصلی است که هر یک جنبه‌ای متفاوت از مصرف آب را نشان می‌دهند. بخش اول، آب آبی، به میزان آب‌های سطحی و زیرزمینی اشاره دارد که در فرآیند تولید استفاده می‌شود. این آب می‌تواند شامل آب مصرف‌شده برای آبیاری محصولات کشاورزی، خنک‌سازی در صنایع، یا تأمین نیازهای تولیدی دیگر باشد. آب آبی معمولاً از منابع محدود و ارزشمندی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و منابع زیرزمینی تأمین می‌شود و استفاده غیرمسئولانه از آن می‌تواند منجر به کاهش دسترسی به این منابع در آینده شود[۲۱].

بخش دوم، آب سبز، به آب ناشی از بارندگی اشاره دارد که به‌طور مستقیم در فرآیند رشد محصولات کشاورزی یا پوشش گیاهی استفاده می‌شود. آب سبز معمولاً در خاک ذخیره شده و توسط ریشه‌های گیاهان جذب می‌شود. در مناطقی که بارندگی به‌صورت طبیعی تأمین‌کننده نیازهای آبی محصولات کشاورزی است، نقش آب سبز در کاهش فشار بر منابع آب آبی بسیار قابل توجه است. بررسی و بهینه‌سازی استفاده از آب سبز می‌تواند به افزایش بهره‌وری در کشاورزی و کاهش نیاز به منابع آبی دیگر کمک کند[۲۲].

بخش سوم، آب خاکستری، مربوط به میزان آبی است که برای رقیق‌سازی آلودگی‌های ناشی از فرآیند تولید لازم است. این بخش شامل حجم آبی است که برای کاهش آلاینده‌ها تا حد استانداردهای زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب خاکستری یکی از بخش‌های مهم در صنایع آلاینده مانند صنایع شیمیایی، نساجی و تولید انرژی است و کاهش آن نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های نوین و فرآیندهای تصفیه است[۲۳].

درک و ارزیابی دقیق ردپای آب در صنایع مختلف نه‌تنها می‌تواند به کاهش مصرف آب کمک کند، بلکه باعث افزایش آگاهی عمومی درباره اهمیت مدیریت منابع آبی نیز می‌شود. در کشوری مانند ایران که با چالش‌های شدید آبی مواجه است، استفاده از این مفهوم می‌تواند به شناسایی بخش‌های پرمصرف و اتخاذ سیاست‌های هدفمند برای مدیریت بهتر منابع آب کمک شایانی کند. به‌عنوان مثال، صنایع پرمصرف می‌توانند با تحلیل ردپای آب خود، از فناوری‌های پیشرفته‌تری برای کاهش مصرف و بهبود کیفیت خروجی‌های خود بهره‌مند شوند. همچنین در کشاورزی، استفاده از ردپای آب به‌عنوان

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

معیاری برای انتخاب نوع محصول یا روش‌های آبیاری مناسب می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آبی محدود و دستیابی به کشاورزی پایدار کمک کند[۲۳].

۶- مطالعات جهانی و مقایسه مصرف آب در تولید محصولات

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ردپای آب در تولید محصولات مختلف به شدت متفاوت است. به‌عنوان مثال، تولید یک کیلوگرم گوشت گاو می‌تواند تا ۱۵۰۰۰ لیتر آب مصرف کند، در حالی که تولید یک کیلوگرم گندم تنها ۱۵۰۰ لیتر آب نیاز دارد [۲۴].

این تفاوت‌های زیاد در مصرف آب در صنایع مختلف، اهمیت توجه به مصرف آب در فرآیند تولید و به‌ویژه در بخش کشاورزی را نشان می‌دهد. طبق تحقیقات لیو و همکاران [۲۵]، حدود ۴۳ درصد از جمعیت جهان در حوضه‌های رودخانه‌ای با تنش آبی متوسط تا زیاد زندگی می‌کنند و این نشان‌دهنده نیاز به مدیریت بهینه مصرف آب در سطح جهانی است.

۷- کاهش ردپای آب و شیوه‌های مدیریت پایدار

برای کاهش ردپای آب، اقدامات مختلفی می‌توان انجام داد. به گفته لی و همکاران [۲۶]، کاهش ضایعات مواد غذایی، تغییر به سمت کشاورزی کارآمدتر، و استفاده از شیوه‌های صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آبی کمک کند. استفاده از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی و صنعت، همچنین ترویج فناوری‌های آب‌سنجی و تکنیک‌های آبیاری به‌عنوان راهکارهایی برای کاهش ردپای آب مورد توجه قرار گرفته است [۲۷].

۸- نتیجه‌گیری

بحران آب در ایران و بسیاری از کشورهای جهان به یکی از چالش‌های اصلی توسعه پایدار تبدیل شده است. کاهش منابع آب، افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت و اثرات تغییرات اقلیمی فشار قابل توجهی بر مدیریت منابع آبی وارد کرده است. برای مقابله با این چالش، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و رویکردهای نوین در مدیریت منابع آب نه‌تنها یک گزینه، بلکه یک ضرورت حیاتی به شمار می‌رود. فناوری‌هایی مانند سنجش از دور و بارورسازی ابرها از جمله ابزارهای کلیدی محسوب می‌شوند که می‌توانند نقش مهمی در بهبود وضعیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا کنند.

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

فناوری سنجش از دور امکان پایش و ارزیابی رطوبت خاک را در مقیاس‌های وسیع با دقت بالا فراهم می‌آورد. این فناوری، به‌ویژه با استفاده از امواج ماکروویو که قابلیت نفوذ به ابرها و عملکرد در شرایط مختلف جوی را دارد، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت منابع آب شناخته می‌شود. این فناوری به کشاورزان و مدیران کمک می‌کند تا با پایش دقیق تغییرات رطوبت خاک، تصمیمات بهتری در زمینه زمان‌بندی آبیاری و مقابله با خشکسالی بگیرند. افزون بر این، داده‌های حاصل از سنجش از دور می‌تواند در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی به کار رود.

از سوی دیگر، بارورسازی ابرها به‌عنوان یکی از روش‌های نوین برای افزایش بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح شده است. این فناوری با تزریق مواد خاص به ابرها، فرآیند بارش را تسریع کرده و به افزایش بارندگی در مناطق هدف کمک می‌کند. در ایران نیز استفاده از این روش در برخی مناطق نتایج امیدوارکننده‌ای در تقویت منابع آبی سطحی و زیرزمینی به همراه داشته است. گسترش این فناوری و بهبود کارایی آن می‌تواند گامی مؤثر در کاهش فشار بر منابع آبی موجود باشد.

علاوه بر این فناوری‌ها، مفهوم ردپای آب به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم مدیریت مصرف آب مطرح است. ردپای آب، که میزان مصرف آب در تولید کالاها و خدمات را اندازه‌گیری می‌کند، به شناسایی بخش‌های پرمصرف و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی کمک می‌کند. این شاخص شامل سه بخش آب آبی، آب سبز و آب خاکستری است که هرکدام نمایانگر نوع خاصی از منابع آبی مورد استفاده در فرآیند تولید هستند. برای مثال، در بخش کشاورزی که یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان آب در ایران است، استفاده از مفهوم ردپای آب می‌تواند به انتخاب محصولات مناسب، بهبود روش‌های آبیاری، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری آب کمک کند.

ایران، با توجه به بحران جدی منابع آبی و شرایط اقلیمی خاص خود، نیازمند رویکردی جامع و عملیاتی در مدیریت منابع آب است. بهره‌برداری از فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور و بارورسازی ابرها، همراه با اجرای سیاست‌هایی برای کاهش ردپای آب در بخش‌های مختلف، از جمله کشاورزی و صنعت، می‌تواند به بهبود وضعیت منابع آبی کشور کمک کند. همچنین، آموزش عمومی و افزایش آگاهی مردم در زمینه اهمیت صرفه‌جویی در مصرف آب، نقشی اساسی در موفقیت این راهکارها ایفا می‌کند. این اقدامات، اگر به‌صورت هماهنگ و مستمر دنبال شوند، می‌توانند ضمن تأمین منابع آبی پایدار برای نسل‌های آینده، از بروز بحران‌های احتمالی ناشی از کمبود آب جلوگیری کنند.

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

۹- مراجع

1.Salem, H. S., Pudza, M. Y., & Yihdego, Y. (2022). Water strategies and water–food Nexus: challenges and opportunities towards sustainable development in various regions of the World. Sustainable Water Resources Management, 8(4), 114.

2. Bozorg-Haddad, O., Zolghadr-Asli, B., Sarzaeim, P., Aboutalebi, M., Chu, X., & Loáiciga, H. A. (2020). Evaluation of water shortage crisis in the Middle East and possible remedies. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 69(1), 85-98.

3. Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies, 4(3), 1-78.

4. Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. Environment International, 158, 106936.

5. Dustan. (2024). Changes in Iran's climatic zones since the mid-twentieth century (1961-2022). Physical Geography Research, 56(1).[in Persian]

6. Kaboli, S., Hekmatzadeh, A. A., Darabi, H., & Haghighi, A. T. (2021). Variation in physical characteristics of rainfall in Iran, determined using daily rainfall concentration index and monthly rainfall percentage index. Theoretical and Applied Climatology, 144, 507-520.

7. Mirzavand, M., & Bagheri, R. (2020). The water crisis in Iran: Development or destruction?. World Water Policy, 6(1), 89-97.

8. Leroux, D. J., Kerr, Y. H., Al Bitar, A., Bindlish, R., Jackson, T. J., Berthelot, B., & Portet, G. (2013). Comparison between SMOS, VUA, ASCAT, and ECMWF soil moisture products over four watersheds in US. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(3), 1562-1571.

9. Pan, M., Sahoo, A. K., Wood, E. F., Al Bitar, A., Leroux, D., & Kerr, Y. H. (2012). An initial assessment of SMOS derived soil moisture over the continental United States. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(5), 1448-1457.

10. Zeng, J., Li, Z., Chen, Q., Bi, H., Qiu, J., & Zou, P. (2015). Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations. Remote Sensing of environment, 163, 91-110.

11. Famiglietti, J. S., Ryu, D., Berg, A. A., Rodell, M., & Jackson, T. J. (2008). Field observations of soil moisture variability across scales. Water Resources Research, 44(1).

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

12. Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Martinuzzi, J. A. M. J., Font, J., & Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. IEEE transactions on Geoscience and remote sensing, 39(8), 1729-1735.

13. Mehrabi, Mohammad, Hamzeh, Saeed, Alavipanah, Seyed Kazem, Kiavarz Moghaddam, Majid, Ziaei, Ruhollah. (2019). Estimating soil moisture using remote sensing data and surface energy balance system. Watershed Engineering and Management, 11 (3).[in Persian]

14. Madanchi, Peyman, Habibnejad Roshan, Mahmoud, Shahedi, Kaka, Soleimani, Karim, Fatehi, Ahmad. (2019). Study of remote sensing data for soil moisture monitoring in Kerman province (case study: Baft Dam watershed). Watershed Engineering and Management, 12 (3).[in Persian]

15. Mariotti, R., Pandolfi, S., De Cauwer, I., Saumitou-Laprade, P., Vernet, P., Rossi, M., ... & Mousavi, S. (2021). Diallelic self-incompatibility is the main determinant of fertilization patterns in olive orchards. Evolutionary Applications, 14(4), 983-995.

16. Bozorg-Haddad, O., Geranmehr, M., Yaseen, Z. M., & Singh, V. P. (2021). New water resources technologies. Water Resources: Future Perspectives, Challenges, Concepts and Necessities, 1.

17. Smith, E. J., Adderley, E. E., & Walsh, D. T. (1963). A cloud-seeding experiment in the Snowy Mountains, Australia. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2(3), 324-332.

18. Khalili Sr., M., Seidhassani, M., Golkar, F. and Khatibi, V. (2009) Results of cloud seeding operations for precipitation enhancement in Iran during 1999-2007. National Cloud Seeding Research Center, Yazd.

19. Rosa, L., Sanchez, D. L., Realmonte, G., Baldocchi, D., & D'Odorico, P. (2021). The water footprint of carbon capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138, 110511.

20. Harris, F., Moss, C., Joy, E. J., Quinn, R., Scheelbeek, P. F., Dangour, A. D., & Green, R. (2020). The water footprint of diets: a global systematic review and meta-analysis. Advances in Nutrition, 11(2), 375-386.

21. Uggeri, S., Migliorati, L., & Carè, S. Water Productivity and Environmental Impact of Direct Blue Water Consumption in Beef Production in Specialized Fattening Farms in North Italy.

22. Xie, P., Zhuo, L., Yang, X., Huang, H., Gao, X., & Wu, P. (2020). Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin. Journal of Hydrology, 590, 125222.

23. Hekmatnia, H., Hosseini, S. M., & Safdari, M. (2020). Determination and assessment of green, blue and gray water footprints in the international trade of agricultural products of Iran. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 14(2), 446-463.

24. Rodrigues Junior, U. J., & Dziedzic, M. (2021). The water footprint of beef cattle in the amazon region, Brazil. Ciência Rural, 51, 20190294.

University of Tehran
نشریه علمی ترویجی آبخوان
JOURNAL OF AQUIFER
Scientific-promotional journal
Karaj, IRAN
www.abkhansj.ut.ac.ir
University of Tehran College of Agriculture and Natural Resources
نشریه علمی ترویجی (حرفه‌ای) آبخوان

25. Liu, M., Zhou, X., Huang, G., & Li, Y. (2024). The increasing water stress projected for China could shift the agriculture and manufacturing industry geographically. Communications Earth & Environment, 5(1), 396.

26. Li, R., Wang, Q., Li, L., & Hu, S. (2023). Do natural resource rent and corruption governance reshape the environmental Kuznets curve for ecological footprint? Evidence from 158 countries. Resources Policy, 85, 103890.

27. Zambrano-Monserrate, Manuel A., Maria Alejandra Ruano, Vanessa Ormeño-Candelario, and Daniel A. Sanchez-Loor. "Global ecological footprint and spatial dependence between countries." Journal of environmental management 272 (2020): 111069.