

Scientific-Promotional
(Professional) Journal of

AQUIFER



فهرست آبخوان

از زهکشی تا پایداری: نقش بیوراکتورهای تراشه چوب در کاهش بار مواد مغذی

۴

زهکشی کنترل‌شده: تلفیق مدیریت آب و حفظ بهره‌وری در شرایط کم‌آبی پیاده‌سازی آبیاری پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک

۱۲

بارورسازی ابرهای قطبی: ارزیابی امکان‌سنجی و اثرات اقلیمی با بهره‌گیری از مدل‌سازی پیشرفته و پهپادها

۲۰

از خطای مفهومی تا مغلطه: نقد علمی مخالفت‌ها با توسعه سامانه‌های نوین آبیاری

۲۴

چالش‌های حکمرانی آب و تاب‌آوری آبی در ایران: مدیریت بحران منابع آبی با راهکار های پایدار

۲۸

کاربرد سنجش از دور در مدیریت منابع آب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در ایالات متحده

۳۲

تحلیل نقش اکوسیستم تالابی در حفظ کمیت و کیفیت منابع آب در مواجهه با بحران آب

۳۸

سخن سردبیر

با افتخار و مسئولیتی که بر دوش داریم، بار دیگر برگ تازه‌ای از نشریه آبخوان را ورق می‌زنیم؛ نشریه‌ای که بیش از شانزده سال است به عنوان صدای اندیشه، دانش و تجربه در گستره مهندسی آب، جاری‌ست. آب، این عنصر حیاتی و پیچیده، امروز نه‌تنها در بطن مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی بلکه در قلب سیاست‌گذاری‌ها و توسعه پایدار جای گرفته است. در این مسیر، نشریه علمی-ترویجی آبخوان با هدف توسعه دانش بومی و انتقال تجربیات نوین در حوزه علوم و مهندسی آب، بستری فراهم کرده تا استادان، پژوهشگران، دانشجویان، کارشناسان، کشاورزان و سیاست‌گذاران در تعامل با یکدیگر، دیدگاه‌های تخصصی خود را به اشتراک بگذارند. نخستین شماره نشریه آبخوان در سال ۱۳۸۴، با همت دانشجویان فعال و پرتلاش گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران منتشر شد. از آن زمان تا کنون، ما با بهره‌گیری از نگاه بین‌رشته‌ای و ترویج علم کاربردی، سعی کرده‌ایم تا پلی میان دانشگاه، صنعت و جامعه ایجاد کنیم. این تلاش در سال ۱۴۰۰ با ارتقای جایگاه نشریه به سطح حرفه‌ای (علمی-ترویجی) از سوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران، رسمی‌تر و مسئولانه‌تر ادامه یافت. ما در نشریه آبخوان بر آئیم تا با انعکاس دستاوردهای علمی و تجربی در طیفی گسترده از گرایش‌های تخصصی مرتبط با آب، از جمله مهندسی آبیاری و زهکشی، سازه‌های آبی، منابع آب، هواشناسی کشاورزی، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، هیدروانفورماتیک، رودخانه و اکوسیستم‌های آبی، آثار و سازه‌های تاریخی آب، آب و محیط‌زیست، آب و توسعه، آب و مهندسی سیستم، آب و کشاورزی، آب و اقتصاد، آب و حکمرانی، آب و حقوق و سایر حوزه‌های وابسته، نقشی مؤثر در مسیر توسعه پایدار، حکمرانی هوشمندانه منابع آب و مواجهه علمی با چالش‌های روزافزون این حوزه ایفا کنیم. باور داریم که حل بحران‌های امروز و فردای منابع آب، نیازمند هم‌افزایی علم، تجربه و نگاهی انسانی به آب است. از شما، همراهان آگاه و دغدغه‌مند دعوت می‌کنیم تا با ارسال مقالات، یادداشت‌ها، نقدها و تجربیات خود، چراغ این مسیر علمی و ترویجی را پرفروغ‌تر سازید. آبخوان، خانه اندیشه‌های نو در دنیای پرچالش آب است.

با احترام

ایمان حاجی‌راد

سردبیر نشریه علمی-ترویجی آبخوان

مدیر مسئول نشریه

سردبیر نشریه

مدیر اجرایی

صفحه‌آرا

نیما مقدم

ایمان حاجی‌راد

سینا کوثری

سارا موسی‌زاده

از زهکشی تا پایداری: نقش بیوراکتورهای تراشه چوب در کاهش بار مواد مغذی



سینا کوثری

| دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

مقدمه

زهکش‌های زیرسطحی مصنوعی در اراضی کشاورزی طی دهه‌های گذشته به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی برای افزایش بهره‌وری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سامانه‌ها با بهبود شرایط خاک، کاهش ماندابی‌بودن زمین و فراهم‌کردن امکان ورود به مزرعه در زمان مناسب، نقش مهمی در ارتقای تولید و افزایش بهره‌وری ایفا کرده‌اند [۱]. با این حال، در کنار منافع اقتصادی و زراعی، این سامانه‌ها اثرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی نیز ایجاد می‌کنند که مهم‌ترین آن، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی است. یکی از بارزترین نمونه‌های پیامدهای زیست‌محیطی زهکشی، در منطقه میدوست ایالات متحده مشاهده می‌شود؛ جایی که بیش از یک قرن است زهکشی مصنوعی در اراضی کشاورزی رواج دارد. طی دهه‌های اخیر، ورود نیترات حاصل از زهکش‌ها به آب‌های سطحی، منجر به شکل‌گیری مناطق هیپوکسیک در خلیج مکزیک شده است [۲،۳]؛ پدیده‌ای که اکنون به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های کیفی آب در ایالات متحده مطرح است (شکل ۱). در واکنش به این بحران، سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا کاهش دست‌کم ۴۵ درصدی بار نیترژن ورودی از طریق رودخانه

ریپاریایی (Riparian buffers) به‌عنوان راهکارهای مکمل شناخته می‌شوند [۷]. با این حال، کارایی این روش‌ها همواره محدود بوده و نیاز به فناوری‌های نوین و کارآمدتر در مدیریت آلودگی نیترات وجود دارد. در این راستا، به‌کارگیری اقدامات مدیریتی موسوم به Best Management Practices (BMPs) اهمیت ویژه‌ای یافته است. BMPها به‌عنوان مجموعه‌ای از روش‌های مدیریتی، طراحی‌شده‌اند تا ضمن حفظ بهره‌وری کشاورزی، اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. یکی از نوین‌ترین و کارآمدترین BMPها در سال‌های اخیر، بیوراکتورهای چوبی (Woodchip Bioreactors) هستند. در این مطالعه به بررسی یکی از کارآمدترین شیوه‌های مدیریتی در کاهش آلاینده‌های مواد مغذی با عنوان بیوراکتورهای زیستی پرداخته می‌شود.

دنیتریفیکاسیون: فرآیند کلیدی حذف نیترژن

دنیتریفیکاسیون یکی از مسیرهای کلیدی چرخه نیترژن در اکوسیستم‌های خاکی و آبی است که طی آن نیترات (NO_3^-) و نیتريت (NO_2^-) در یک فرایند میکروبی بی‌هوازی به گاز دی‌نیترژن (N_2) و در برخی شرایط به اکسید نیترژ (N_2O) تصفیه‌خانه‌ها به کار گرفته می‌شود؛ اما در بخش کشاورزی که منبع اصلی نیترژن غیرنقطه‌ای محسوب می‌شود، مدیریت کوددهی، افزایش بهره‌وری مصرف نیترژن، اجرای برنامه‌های مدیریتی و استفاده از زهکشی کنترل‌شده پیشنهاد شده است. علاوه‌براین، روش‌هایی نظیر تالاب‌های مصنوعی و توارهای حائل

تنظیم چرخه جهانی نیترژن و جلوگیری از تجمع ترکیبات نیترژن‌دار در آب‌های سطحی و زیرزمینی ایفا می‌کند. توسعه زهکش‌های زیرسطحی مصنوعی در اراضی کشاورزی، ضمن بهبود شرایط زراعی، چرخه نیترژن را تحت تأثیر قرار داده است. انتقال سریع آب از طریق زهکش‌ها زمان ماند هیدرولیکی را کاهش داده و بنابراین فرصت کافی برای وقوع دنیتریفیکاسیون طبیعی در خاک فراهم نمی‌شود. علاوه‌براین، در اعماق بیشتر خاک، محدودیت کربن آلی تجزیه‌پذیر موجب کاهش چشمگیر نرخ دنیتریفیکاسیون می‌شود.

شرایط و نیازمندی‌های دنیتریفیکاسیون

وقوع دنیتریفیکاسیون وابسته به مجموعه‌ای از شرایط محیطی و میکروبی است:

۱. وجود پذیرنده‌های نهایی الکترون: ترکیبات نیترژنی اکسید شده نظیر NO_3^- ، NO_2^- ، NO و N_2O

۲. میکروارگانیسم‌های دنیتریفیکان: عمدتاً باکتری‌های هتروتروف (Heterotrophic) بی‌هوازی اختیاری (Facultative anaerobes) مانند Pseudomonas, Paracoccus, Bacillus و برخی آرکی‌ها.

۳. منبع کربن آلی: دهنده الکترون و منبع انرژی. این منبع می‌تواند محلول (DOC)، نیمه‌پایدار (مانند بقایای گیاهی یا سخت‌تجزیه woodchips) باشد.

۴. شرایط اکسیژن محلول (DO): پایین: غلظت‌های بالاتر از ۰.۲ میلی‌گرم بر لیتر باعث ترجیح O_2 بر NO_3^- می‌شود و دنیتریفیکاسیون متوقف می‌گردد.

۵. pH و دما: محدوده بهینه بین ۸-۶.۵ pH و دمای ۲۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد است.

۶. پتانسیل ردوکس (Eh): محدوده بحرانی برای شروع دنیتریفیکاسیون ۱۰۰+ تا ۳۰۰- mV گزارش شده است.

ژنتیک و آنزیم‌های کلیدی

دنیتریفیکاسیون به کمک مجموعه‌ای از ژن‌ها و آنزیم‌ها انجام می‌شود:

• narG/narH: نیترات ردوکتاز
 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$

• nirS/nirK: نیتريت ردوکتاز
 $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$

• norB: نیتريت اکسید ردوکتاز
 $\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$

• nosZ: نیتروزاکسید ردوکتاز
 $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

عدم وجود ژن nosZ در برخی باکتری‌ها موجب انباشت N_2O به‌جای کاهش کامل آن می‌شود. کشف nosZ clade II در سال‌های اخیر نشان داد که گروه‌های متنوع‌تری از میکروب‌ها در کاهش N_2O نقش دارند و اهمیت بالایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند.

فرآیندهای میکروبی مرتبط و رقیب

- دنیتریفیکاسیون هتروتروفیک (Heterotrophic denitrification): مسیر غالب در خاک‌ها و سامانه‌های بیوراکتور، وابسته به کربن آلی.

- دنیتریفیکاسیون شیمیوتوتروفیک (Chemo-autotrophic denitrification): استفاده از دهنده‌های الکترون غیرآلی مانند Fe^{2+} یا H_2 یا S^{2-}

- اکسیداسیون بی‌هوازی آمونیوم (Anaerobic ammonium oxidation): ترکیب NH_4^+ و NO_3^- و تبدیل مستقیم آن به N_2 ؛ اهمیت بالاتر در محیط‌های آبی خاص.

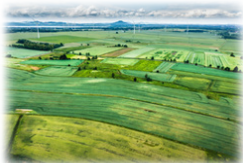


شکل ۱ - تصویری از آلودگی خلیج مکزیک در اثر تخلیه آلاینده‌های کشاورزی

DNRA (Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium): کاهش نیترات به NH_4^+ : برخلاف دنیتریفیکاسیون حذف دائمی ایجاد نمی‌کند و در شرایط C:N بالا یا حضور سولفور رقابت‌پذیر است.

محدودیت‌های کربن و نقش آن

وجود کربن آلی تجزیه‌پذیر یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده دنیتریفیکاسیون است. در خاک‌های کشاورزی زهکش‌شده که نیترات فراوان اما کربن محلول اندک است، نرخ دنیتریفیکاسیون به شدت کاهش می‌یابد. کربن علاوه‌بر دهنده الکترون، در ایجاد شرایط بی‌هوازی نقش دارد.



شکل ۲ - ایجاد تعادل و دوستی بین محیط‌زیست و سودآوری کشاورزی توسط BMPs

• در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب: متانول، استات یا گلیسرول به‌عنوان منبع کربن افزوده می‌شوند.

• در سامانه‌های کشاورزی: افزودن بسترهای جامد کربنی مانند woodchips در بیوراکتورها برای رفع محدودیت کربن رایج است.

محصولات نهایی دنیتریفیکاسیون

محصولات نهایی شامل CO_2^- و N_2 و HCO_3^- هستند. N_2 پایدارترین محصول است، اما تحت شرایط خاص زیست‌محیطی (pH پایین، DO بالا، نسبت پایین C:N ، دمای پایین) تولید N_2O افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، تمامی باکتری‌های دنیتریفیکان دارای ژن کدکننده آنزیم نیتروز اکسید ردوکتاز (Encoding the nitrous oxide reductase) برای کاهش N_2O به N_2 نیستند و این موضوع نیز بر الگوی نهایی محصولات اثرگذار است.

• NO_3^- یک گاز گلخانه‌ای بسیار قوی با پتانسیل گرمایش جهانی حدود ۳۰۰ برابر CO_2 است.

• علاوه‌براین، N_2O در تخریب لایه اُزن نیز نقش دارد.

مسیرهای ردوکسی جایگزین

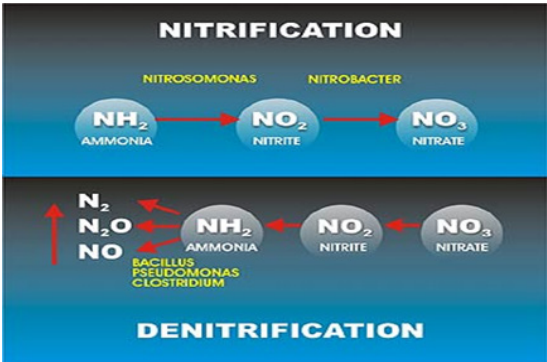
پس از مصرف کامل نیترات، در شرایط ردوکس پایین‌تر، میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی اجباری (Obligate anaerobes) از سایر پذیرنده‌های الکترون استفاده می‌کنند:

• منگنز ($\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$)

• آهن ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$)

• سولفات ($\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S}$)

ترتیب استفاده از این پذیرنده‌ها بر اساس انرژی آزاد شده در واکنش مشخص می‌شود. دنیتریفیکاسیون انرژی بیشتری نسبت به احیای سولفات آزاد می‌کند و بنابراین معمولاً زودتر رخ می‌دهد.



شکل ۳ - شماتیکی از فرایند نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی توسط واکنش‌های بیولوژیکی

تاثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین

• افزایش دما سرعت دنیتریفیکاسیون را بالا می‌برد اما احتمال تولید N_2O را نیز افزایش می‌دهد.

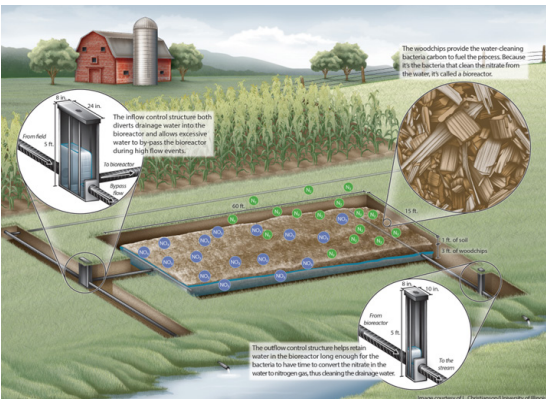
• رویدادهای بارش شدید می‌توانند بار نیترات را افزایش داده ولی زمان تماس با میکروب‌ها را کاهش دهند.

• کاربری زمین: در تالاب‌ها و riparian buffers، نرخ دنیتریفیکاسیون بالاست؛ اما در خاک‌های کشاورزی زهکشی‌شده به‌دلیل محدودیت کربن و زمان ماند، نرخ پایین‌تر است.

بیوراکتورهای تراشه چوب: فناوری نوین برای کاهش نیتروژن

در سال‌های اخیر، بیوراکتورهای تراشه چوب (Woodchip Bioreactors) به‌عنوان یک فناوری نوظهور اما کارآمد برای مدیریت نیتروژن در سامانه‌های زهکشی کشاورزی معرفی شده‌اند. این سامانه‌ها که معمولاً در حاشیه مزارع و در مسیر خروجی زهکش‌ها نصب می‌شوند، با فراهم‌کردن محیط بی‌هوازی و تأمین منبع کربن پایدار، شرایط لازم برای فرایند دنیتریفیکاسیون میکروبی را مهیا کرده و امکان کاهش مؤثر غلظت نیترات در زهاب کشاورزی را فراهم می‌سازند. بیوراکتور در

فرایند حذف نیترات در بیوراکتورهای تراشه چوب بر پایه تنفس بی‌هوازی اختیاری باکتری‌ها است. در این شرایط، میکروارگانیسم‌ها به‌جای استفاده از اکسیژن آزاد، از نیترات به‌عنوان پذیرنده نهایی الکترون در زنجیره تنفسی خود استفاده می‌کنند. کربن آلی موجود در تراشه‌ها منبع الکترون و انرژی برای میکروب‌هاست، در حالی که نیترات موجود در زهکش به‌عنوان اکسیدکننده عمل کرده و به نیتريت، نیتريك اكسيد، اكسيد نيتروز و در نهایت به دی‌نیتروژن (N_2) کاهش می‌یابد. حاصل این واکنش‌ها، تبدیل نیترات‌های محلول به گازهای نیتروژن و حذف آن‌ها پیش از ورود به آب‌های سطحی است. نتایج تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که بیوراکتورهای تراشه چوب می‌توانند ۲۰ تا ۵۰ درصد بار سالانه نیترات خروجی از زهکش‌های کشاورزی را حذف کنند. این میزان وابسته به عواملی مانند زمان ماند هیدرولیکی، دما، ترکیب بافت خاک، ویژگی‌های میکروبی و کیفیت منبع کربن است. افزون بر کاهش نیترات، این سامانه‌ها به‌دلیل هزینه پایین، سادگی طراحی، قابلیت ادغام با زرساخت‌های زهکشی موجود و نیاز زدنک به نگهداری، به‌عنوان یکی از نوین‌ترین Best Management Practices (BMPs) در مدیریت کشاورزی پایدار مطرح شده‌اند.



شکل ۵ - شماتیکی از نحوه عملکرد بیوراکتورهای زهکشی و اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن مانند سازه‌های کنترلی ورودی و خروجی [۸]



شکل ۴ - تصویری از حفر تراشه بیوراکتور تراشه چوب

بهترین ژن‌های میکروب در بیوراکتورهای دنیتریفیکاسیونی

پایداری و کارایی بیوراکتورهای دنیتریفیکاسیونی به‌طور مستقیم تحت تأثیر ترکیب، تنوع و غلبه ژن‌های میکروبی قرار دارد [۱۵]. شناخت جوامع میکروبی، به‌ویژه گونه‌هایی که می‌توانند در حذف نیترات نقش داشته یا به تولید ترکیبات خواستهای مانند سولفید هیدروژن (H_2S)

منجر شوند، برای بهینه‌سازی عملکرد این سامانه‌ها ضروری است. تحقیقات عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی و تحت شرایط کنترل‌شده انجام شده‌اند [۱۱]. اگرچه فعالیت تعداد زیادی از میکروارگانیسم‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته [۱۲]، هنوز تصویر جامعی از میکروبیولوژی بیوراکتورهای دنیتریفیکاسیونی به دست نیامده است. با این حال، شواهد نشان می‌دهد که این سامانه‌ها میزبان جمعیت متنوعی از میکروب‌های هتروتروف (Heterotrophic) و اتوتروف (Autotrophic) هستند که علاوه بر انجام دنیتریفیکاسیون، توانایی تجزیه ترکیبات پیچیده آلی نظیر سلولز و لیگنین چوب به شکل‌های ساده‌تر و قابل‌مصرف را دارند. این ترکیبات تجزیه‌شده سپس به‌عنوان منبع کربن برای سایر باکتری‌های دنیتریفیکان عمل می‌کنند. علاوه بر باکتری‌ها، قارچ‌ها نیز توانایی حذف نیترات از بیوراکتورهای تراشه چوب را دارند [۱۳]. قارچ‌ها با تجزیه تدریجی سلولز و لیگنین، یک جریان پایدار اما آهسته از کربن آلی فراهم می‌کنند که نقش مهمی در پایداری بلندمدت سیستم دارد [۱۴].

بررسی‌های مبتنی بر آنالیز ژنتیکی (۱۶S rDNA، ۱۶S rRNA) و کشت ایزوله‌ها نشان داده‌اند که چند جنس میکروبی نقش کلیدی در رانندمان بیوراکتورها ایفا می‌کنند:

• Diaphorobacter



شکل ۶ - تصویری از مواد مختلف به‌کاربرده شده در تراشه‌های بیوراکتور [۹]

یکی از فراوان‌ترین جنس‌های شناسایی‌شده در بیوراکتورهای تراشه چوب است. این جنس در شرایط pH طبیعی و دمای محیط قادر به حذف کامل نیتрат تا غلظت 50 mg L^{-1} of NO_3^- بوده است [۱۵].

• *Pseudomonas* spp. گونه‌هایی مانند *P. stutzeri*, *P. mendocina*, *P. putida* دنیتریفیکان‌های هوازی و بی‌هوازی شناخته می‌شوند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که سویه *P. stutzeri* GF۳ در همزیستی با پلت‌های قارچی (Fungal Pellets) راندمان حذف نیترات را تا ۱۰۰٪ افزایش داده است [۱۶].

• *Polaromonas* spp. نقش ویژه در شرایط دمای پایین ($\sim 15^\circ \text{C}$) دارند. به‌ویژه، *Cellulomonas* قادر است چوب را تجزیه کرده و کربن مورد نیاز برای خود و سایر باکتری‌های دنیتریفیکان را در شرایط سرد فراهم کند [۱۷].

محدودیت‌ها و چالش‌های بیوراکتورها

با وجود مزایا، بیوراکتورهای تراشه چوب فناوری‌ای نوپا محسوب می‌شوند و برخی جنبه‌های عملکردی آن‌ها نیازمند پژوهش‌های بیشتر است:

• طول عمر: با گذشت زمان، تجزیه تراشه‌های چوب و کاهش محتوای کربن آزادشده باعث افت راندمان می‌شود. طول عمر مفید این سامانه‌ها عموماً بین ۱۰ تا ۱۵ سال برآورد می‌شود.

• کارایی بلندمدت: نرخ حذف نیترات در سال‌های نخست بالاتر است و سپس روندی کاهشی دارد.

• آثار جانبی احتمالی: در برخی شرایط، تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر N_2O یا انحلال ترکیبات آلی محلول (DOC) در آب خروجی گزارش شده است.

• وابستگی به شرایط محیطی: دمای پایین و زمان ماند کوتاه، راندمان دنیتریفیکاسیون را کاهش می‌دهند.

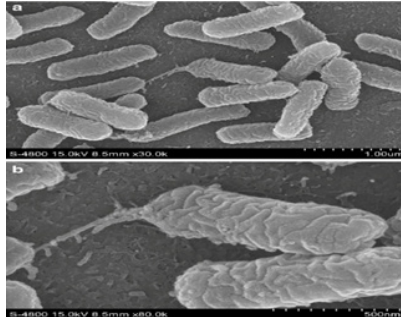
مزایا و معایب بیوراکتورهای زهکشی

عملکرد بیوراکتورها در کاهش غلظت نیترات زهکش‌های کشاورزی به‌طور گسترده‌ای در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی به اثبات رسیده است. مهم‌ترین مزایای این فناوری عبارتند از:

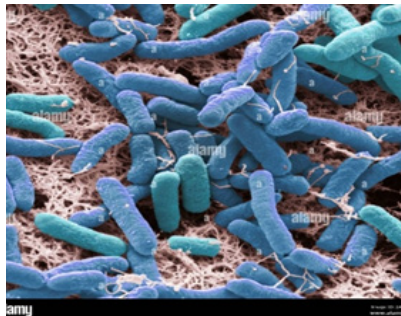
۱. عدم نیاز به تغییر در الگوهای کشاورزی و زهکشی متداول: نصب بیوراکتورهای تراشه چوب نیازمند اصلاحات عمده در سیستم‌های زراعی موجود نیست و می‌تواند در کنار زیرساخت‌های فعلی به‌کار گرفته شود (Edge of field practices).

۲. عدم خروج زمین از چرخه تولید: بیوراکتور در حاشیه مزرعه نصب می‌شود و بنابراین هیچ بخشی از زمین کشاورزی از کاربری زراعی خارج نمی‌گردد.

۳. عدم تأثیر بر عملکرد شبکه



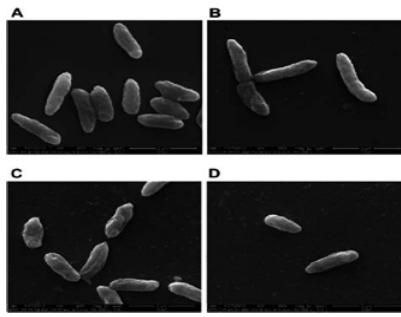
شکل ۹ - تصویر میکروسکوپی از *Diaphorobacter* ((Proteobacteria))



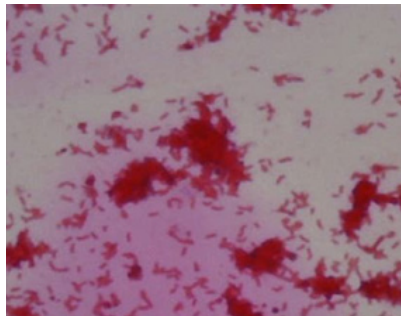
شکل ۱۰ - تصویر میکروسکوپ الکترونی رنگی از *Pseudomonas* spp.



شکل ۱۲ - تصویر SEM از باکتری *Halomonas salifodinae*



شکل ۷ - تصویر SEM از *Pseudomonas denitrificans*



شکل ۹ - تصویر رنگ‌آمیزی گرم از *Cellulomonas* sp.



شکل ۱۱ - تصویر SEM از باکتری *Pseudomonas* sp.

زهکشی: بیوراکتورها را می‌توان بدوین کاهش کارایی هیدرولیکی شبکه زهکشی نصب یا حتی غیرفعال کرد.

۴. نیاز اندک به بهره‌برداری و نگهداری: تنها شامل تنظیم چندپایه سطح آب در سازه‌های کنترلی طی سال است و به اپراتور متخصص یا تجهیزات پیچیده نیاز ندارد.

۵. دوام و پایداری نسبی: عمر مفید بیوراکتورهای تراشه چوب بر اساس شرایط بهره‌برداری بین ۱۰ تا ۲۰ سال گزارش شده است.

۶. هزینه پایین و کارایی بالا: نسبت به سایر فناوری‌های حذف نیترژن، این سامانه‌ها هزینه اولیه و عملیاتی کمتری دارند.

۷. سازگاری با محیط‌زیست: با استفاده از منابع طبیعی کربن (تراشه‌های چوب)، این فناوری به‌عنوان رویکردی پایدار و کم‌خطر شناخته می‌شود.

۸. قابلیت کاربرد در شرایط متنوع: بیوراکتورها در زمین‌های مسطح یا شیب‌دار و در طیف گسترده‌ای از انواع خاک عملکرد مؤثر دارند، که این ویژگی دامنه استفاده از آن‌ها را بسیار گسترده می‌سازد.

در کنار مزایا، بیوراکتورهای تراشه چوب می‌توانند دارای عوارض جانبی یا محدودیت‌هایی باشند که باید در طراحی و مدیریت مورد توجه قرار گیرند:

۱. تولید ترکیبات گوگردی: در شرایطی که غلظت سولفات (SO_4^{2-}) در زهاب بالا باشد، باکتری‌های احیاکننده سولفات می‌توانند آن را به سولفید هیدروژن (H_2S) تبدیل کنند. این ترکیب بوی ناخوشایند تخم‌مرغ گندیده ایجاد کرده و نشان‌دهنده کاهش بیش از حد پتانسیل ردوکس است. در چنین شرایطی، کاهش زمان ماند هیدرولیکی یا پایین آوردن سطح آب خروجی به کاهش این مشکل کمک می‌کند.

۲. رنگ قهوه‌ای آب خروجی: در چند هفته نخست بهره‌برداری، به‌دلیل آزادسازی

ترکیبات آلی محلول از چوب، آب خروجی به رنگ چای در می‌آید. این پدیده معمولاً گذرا بوده و اثر زیست‌محیطی قابل‌توجهی ندارد.

۳. تشکیل متیل‌جیوه (MeHg): در حضور جیوه، تحت شرایط کاملاً احیایی و در غیاب نیترات، امکان متیلاسیون جیوه وجود دارد که منجر به تولید متیل‌جیوه، ترکیبی بسیار سمی و تجمع‌پذیر در زنجیره غذایی، می‌شود. هرچند وقوع آن نادر است، اما مدیریت زمان ماند و جلوگیری از حذف کامل نیترات می‌تواند از این ریسک بکاهد.

۴. تولید گازهای گلخانه‌ای: در برخی موارد، بیوراکتورها می‌توانند منبع تولید اکسید نیتروژن (N_2O) باشند که گازی با پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالا است.

۵. کاهش تدریجی کارایی: با گذشت زمان، میزان کربن آزادشده از تراشه‌ها کاهش یافته و راندمان حذف نیترات افت می‌کند. این موضوع محدودیتی برای کارایی بلندمدت محسوب می‌شود.

۶. وابستگی به شرایط محیطی: در دماهای پایین یا در زمان ماند کوتاه، نرخ دینیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بیوراکتورهای تراشه چوب به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین و پایدار در مدیریت منابع آب کشاورزی، ظرفیت بالایی برای کاهش بار آلاینده‌های مغذی از زهکش‌های زیرسطحی دارند. شواهد میدانی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که این سامانه‌ها قادرند به‌طور میانگین ۲۰ تا ۵۰ درصد از بار سالانه نیترات خروجی را کاهش دهند؛ در شرایط بهینه، میزان حذف حتی می‌تواند به بیش از ۹۰ درصد نیز برسد. افزون بر نیترژن، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بیوراکتورها در کاهش ۱۰ تا ۴۵ درصد فسفر محلول نیز مؤثرند، هرچند کارایی آن‌ها در حذف فسفر به اندازه نیترژن بالا نیست. مزایای کلیدی این فناوری شامل هزینه پایین، نیاز اندک به نگهداری، عدم اختلال در کاربری زمین و قابلیت استفاده در انواع خاک و توپوگرافی است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند کاهش تدریجی

کارایی در طول زمان، احتمال تولید ترکیبات جانبی نظیر N_2O یا H_2S و وابستگی به شرایط محیطی، ضرورت انجام پژوهش‌های تکمیلی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و درازمدت را برجسته می‌سازد. به‌طور کلی، بیوراکتورهای تراشه چوب نه‌تنها می‌توانند بهبود قابل‌توجهی در کیفیت آب ایجاد کنند، بلکه به‌عنوان بخشی از بسته اقدامات مدیریتی (BMPs) می‌توانند نقش مهمی در دستیابی به اهداف کاهش آلودگی نیترژن و فسفر در حوضه‌های آبریز ایفا نمایند. توسعه تحقیقات بین‌رشته‌ای در زمینه انتخاب مواد بستر، بهینه‌سازی جامعه میکروبی، و ادغام این سامانه‌ها با سایر راهکارهای مدیریتی، گام مهمی برای افزایش اثربخشی و پایداری آن‌ها در آینده خواهد بود.

منابع

- R.W. Skaggs, J. Van Schilfgaarde, Drainage for Agriculture, Monograph No. 38, Madison, WI Am. Soc. Agron. (1999).
- R.E. Turner, N.N. Rabalais, Coastal eutrophication near the Mississippi river delta, Nature 368 (1994) 619–621.
- N.N. Rabalais, R.E. Turner, D. Justić, Q. Dortch, W.J. Wiseman, B.K. Sen Gupta, Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf, Estuaries 19 (1996) 386–407.
- S.A. Board, A. Plan, Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: An update by the EPA, Scientific Advisory board, (2007).
- J.N. Galloway, A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger, M.A. Sutton, Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions, Science (80-.). 320 (2008) 889–892.
- D.L. Dinnes, D.L. Karlen, D.B. Jaynes, T.C. Kaspar, J.L. Hatfield, T.S. Colvin, C.A. Cambardella, Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils, Agron. J. 94 (2002) 153–171.
- L.A. Schipper, W.D. Robertson, A.J. Gold, D.B. Jaynes, S.C. Cameron, Denitrifying bioreactors—An approach for reducing nitrate loads to receiving waters, Ecol. Eng. 36 (2010) 1532–1543.

- L.E. Christianson, Woodchip Bioreactor: A science-based option to reduce nitrate loss 2018, URL Http://Draindrop. Crop. Illinois. Edu/Wp-Content/Uploads/2019/12/Christianson-et-Al_2018_Woodchip-Bioreactor_2pg-Factsheet. Pdf (n.d.).
- G.M. Johnson, R.D. Christianson, R.A.C. Cooke, C. Diaz-García, L.E. Christianson, Denitrifying bioreactor woodchip sourcing guidance based on physical and hydraulic properties, Ecol. Eng. 184 (2022) 106791.
- Y. Chen, S. Lan, L. Wang, S. Dong, H. Zhou, Z. Tan, X. Li, A review: driving factors and regulation strategies of microbial community structure and dynamics in wastewater treatment systems, Chemosphere 174 (2017) 173–182.
- S. Kiani, K. Kujala, J.T. Pulkkinen, S.L. Aalto, S. Suurnäkki, T. Kiuru, M. Tirola, B. Kløve, A.-K. Ronkanen, Enhanced nitrogen removal of low carbon wastewater in denitrification bioreactors by utilizing industrial waste toward circular economy, J. Clean. Prod. 254 (2020) 119973.
- S.L. Aalto, S. Suurnäkki, M. von Ahnen, H.M.P. Siljanen, P.B. Pedersen, M. Tirola, Nitrate removal microbiology in woodchip bioreactors: a case-study with full-scale bioreactors treating aquaculture effluents, Sci. Total Environ. 723 (2020) 138093.
- N. Aldossari, S. Ishii, Isolation of cold-adapted nitrate-reducing fungi that have potential to increase nitrate removal in woodchip bioreactors, J. Appl. Microbiol. 131 (2021) 197–207.
- S. Fatehi-Pouladi, B.C. Anderson, B. Wootton, M. Button, S. Bissegger, L. Rozema, K.P. Weber, Interstitial water microbial communities as an indicator of microbial denitrifying capacity in woodchip bioreactors, Sci. Total Environ. 655 (2019) 720–729.
- L. Xia, X. Li, W. Fan, J. Wang, Denitrification performance and microbial community of bioreactor packed with PHBV/PLA/rice hulls composite, Sci. Total Environ. 803 (2022) 150033.
- Y. Sun, J. Su, A. Ali, S. Zhang, Z. Zheng, Y. Min, Effect of fungal pellets on denitrifying bacteria at low carbon to nitrogen ratio: Nitrate removal,

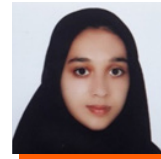
- extracellular polymeric substances, and potential functions, Sci. Total Environ. 847 (2022) 157591.
- J. Jang, E.L. Anderson, R.T. Venterea, M.J. Sadowsky, C.J. Rosen, G.W. Feyereisen, S. Ishii, Denitrifying bacteria active in woodchip bioreactors at low-temperature conditions, Front. Microbiol. 10 (2019) 635.
- P. Lv, J. Luo, X. Zhuang, Diversity of culturable aerobic denitrifying bacteria in the sediment, water and biofilms in Liangshui River of Beijing. China Scientific Reports 7: 10032, (2017).
- S. Miao, C. Jin, R. Liu, Y. Bai, H. Liu, C. Hu, J. Qu, Microbial community structures and functions of hypersaline heterotrophic denitrifying process: Lab-scale and pilot-scale studies, Bioresour. Technol. 310 (2020) 123244.
- Z. Yao, L. Yang, F. Wang, L. Tian, N. Song, H. Jiang, Enhanced nitrate removal from surface water in a denitrifying woodchip bioreactor with a heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying fungus, Bioresour. Technol. 303 (2020) 122948.

ایجاد تعادل میان محیط‌زیست و سودآوری کشاورزی

زهکشی کنترل شده: تلفیق مدیریت آب و حفظ بهره‌وری در شرایط کم‌آبی



سینا کوثری
| دانشجوی دکتری دانشگاه تهران



مهسا حیدری
| دانشجوی دکتری دانشگاه محقق اردبیلی

مقدمه

نیمه‌خشک، هدف اصلی زهکشی، جلوگیری از آب‌گرفتگی و شور شدن خاک در اثر آبیاری است [۲۱]. در چنین مناطقی با اقلیم خشک، تأخیر شدید و کاهش جریان‌های سطحی رودخانه‌ها، دو پیامد ناگزیر کشاورزی آبی، یعنی افزایش شوری خاک و کاهش منابع آب شیرین، بیش از پیش نمود پیدا کرده‌اند. شور شدن خاک فرآیندی تدریجی است و از این رو، کشاورزان، مهندسان و سیاست‌گذاران معمولاً آبیاری را به‌عنوان نیاز فوری امروز و شوری را مسئله‌ای مربوط به آینده تلقی می‌کنند. اما این نوع نگرش کوتاه‌مدت می‌تواند تبعات بلندمدت جدی برای پایداری کشاورزی در پی داشته باشد.

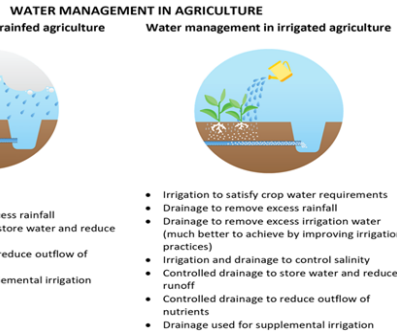
تغییر نیازهای آبیاری و تغییرات اقلیمی

نیازهای آبیاری در دهه‌های اخیر دستخوش تحولی اساسی شده‌اند؛ تحولی که عمدتاً از دو عامل کلیدی نشأت می‌گیرد: تغییرات اقلیمی و دگرگونی در الگوهای کاربری اراضی.

سامانه‌های آبیاری سنتی که با هدف تأمین نیازهای آبی کشاورزان و محصولات مشخصی طراحی شده بودند، عمدتاً به منابع آب سطحی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها متکی بودند. اما گسترش مناطق شهری، افزایش استفاده‌های غیرکشاورزی از اراضی، و تمرکز روافزون بر خدمات اکوسیستمی، سبب شده‌اند تا الگوهای تقاضا برای آب به‌طور چشمگیری تغییر یابند [۳۱]. در کنار این تحولات ساختاری، تغییرات اقلیمی نیز با ایجاد نوسانات دمایی، تغییر در الگوی پراکنش بارندگی، و بروز پدیده‌هایی همچون خشکسالی‌های مکرر، فشار مضاعفی بر تعادل شکننده بین عرضه و تقاضای آب وارد کرده‌اند. تنوع در شیوه‌های آبیاری، گسترش استفاده از منابع آب غیرمتعارف مانند آب‌های زیرزمینی، پساب‌های تصفیه‌شده و زهاب‌های بازافتی، و همچنین تغییر در الگوی کشت محصولات، همگی بر پیچیدگی مدیریت منابع آبی افزوده‌اند [۲۳،۲۴]. با وجود پیشرفت‌های فناورانه در حوزه طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری، روش‌شناسی طراحی زهکشی زیرزمینی طی ۵۰ سال گذشته تقریباً بدون تغییر باقی مانده است [۲۵]. این در حالی است که ادامه روند زهکشی‌های افراطی، به خشکی بیش از حد خاک، افت سطح آب زیرزمینی، و از

بین رفتن چشمه‌ها، تالاب‌ها و جریان‌های طبیعی منجر شده است [۲۶]. چنین اثراتی، نه‌تنها پایداری زیست‌بوم‌های طبیعی را تهدید می‌کنند، بلکه ظرفیت منابع آبی برای مصارف انسانی و کشاورزی را نیز به شدت کاهش داده‌اند. در این میان، افزایش تقاضا برای تولید غذا و کاهش دسترسی به منابع آب شیرین، بحرانی جهانی در زمینه آب ایجاد کرده است. مواجهه با این چالش‌ها نیازمند رویکردی نوین و یکپارچه در مدیریت منابع آب است که مبتنی بر درک صحیحی از روندهای گذشته و نیازهای آینده باشد. در کشورهایی مانند ایران که در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، توسعه و اجرای راهکارهای پایدار در بهره‌برداری از منابع آب بیش از هر زمان دیگری ضروری است. در بخش کشاورزی، مدیریت آب هم از جنبه آبیاری و هم از جنبه زهکشی قابل انجام است. در سال‌های اخیر، مدیریت آب در بخش زهکشی، به‌ویژه از لحاظ کمی و کیفی، با بهره‌گیری از بهترین شیوه‌های مدیریتی (Best management practices) مورد توجه قرار گرفته است که به‌طور کامل در نشریه قبلی توضیح داده شده است. با این حال، بیشتر تلاش‌ها سیاست‌گذاری‌ها همچنان بر کاهش مصرف آب در بخش آبیاری و مدیریت منابع آب متمرکز است، و مدیریت زهاب کشاورزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، یکی از راهکارهای نوین، کم‌هزینه و در عین حال کارآمد، سامانه زهکشی کنترل‌شده (Controlled Drainage) است. این سیستم با سازوکاری ساده اما مؤثر، می‌تواند بهره‌وری مصرف آب را افزایش داده و از تلفات آن در خاک و محیط پیرامون جلوگیری کند. در این مقاله، به بررسی تأثیرات مثبت و منفی سامانه زهکشی کنترل‌شده پرداخته می‌شود تا آگاهی بیشتری در این زمینه ایجاد شده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های علمی‌تر و پایدارتر در مدیریت منابع آب در بخش زهکشی گردد.

تغییر نقش زهکشی در مناطق خشک: از کنترل شوری تا



شکل ۱ - نقش زهکشی در مدیریت آب کشاورزی در شرایط قریب‌آبیچیده‌تر از کشت دیم [۲۲]

مدیریت یکپارچه آب

با توجه به تحولات گسترده در عرضه و تقاضای منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش زهکشی، به‌ویژه زهکشی زیرزمینی، دیگر به یک راهکار صرفاً تک‌منظوره برای مقابله با مشکلاتی نظیر آب‌ماندگی و شوری محدود نمی‌شود. بلکه، این سامانه‌ها به‌تدریج به عنوان عناصر کلیدی در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب مطرح شده‌اند، به‌ویژه در شرایطی که سناریوهای مختلف طراحی اراضی و فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی، چالش‌های جدیدی را ایجاد کرده‌اند [۱۹]. برای دستیابی به توسعه‌ای پایدار و منطقی‌تر در بخش کشاورزی، ضروری است که جایگاه واقعی و چندمنظوره زهکشی در ساختار مدیریت آب بازتعریف شود و از نگاه سنتی صرف‌نظر گردد. در همین راستا، پژوهشگران بر لزوم به‌روزرسانی طراحی و مدیریت سامانه‌های زهکشی تأکید دارند تا این سیستم‌ها بتوانند پاسخگوی نیازهای نوین کشاورزی، حفظ محیط‌زیست و امنیت آب باشند [۲۰،۲۵]. بررسی این پیشرفت‌های مورد نیاز در بخش‌های بعدی این مقاله ارائه خواهد شد.

زهکشی کنترل‌شده

پیشرفت‌های مدیریت سیستم‌های زهکشی

زهکشی کنترل‌شده که در منابع رسمی با عنوان مدیریت زهاب (Drainage Water Management) و تحت کد ۵۵۴ سازمان USDA-NRCS شناخته می‌شود، یک روش مدیریتی است که با بهره‌گیری از سازه‌های کنترلی، جریان آب زیرسطحی در سامانه زهکشی را تنظیم کرده و از این طریق سطح ایستابی خاک را در بازه‌های زمانی مختلف کنترل می‌کند [۳۷،۳۸]. در این روش، سازه‌های کنترل آب در انتهای لوله‌های زهکشی و در مرز مزرعه نصب می‌شوند تا امکان قطع و وصل فصلی جریان زهکشی فراهم شود. آب عبوری از سامانه زهکشی به این سازه‌ها می‌رسد و تا زمانی که ارتفاع آن به سطح دروازه کنترلی نرسد، از مزرعه خارج نمی‌شود. بدین ترتیب، سطح ایستابی با دقت بالا قابل افزایش یا کاهش است و در نتیجه، میزان تخلیه آب و مواد مغذی قابل تنظیم خواهد بود (شکل ۳).

روال معمول در این سامانه‌ها بدین صورت است که پس از برداشت محصول در پاییز، سطح ایستابی افزایش می‌یابد و تا زمان آماده‌سازی زمین، کاشت و استقرار گیاه در بهار، در سطح بالا نگه داشته می‌شود. سپس، سطح ایستابی به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که در صورت

اهمیت دارد

نیاز، آبیاری زیرسطحی (subirrigation) نیز امکان‌پذیر باشد [۲۷،۲۹،۳۰]. با توجه به اینکه در بسیاری از مناطق ایالت‌های آمریکا و بخش‌هایی از کانادا، بیشتر جریان‌های زهکشی در خارج از فصل رشد اتفاق می‌افتند [۳۰،۳۱]، این روش می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش حجم کلی زهکشی زیرسطحی و کاهش تلفات مواد مغذی و آب باشد (شکل ۴).

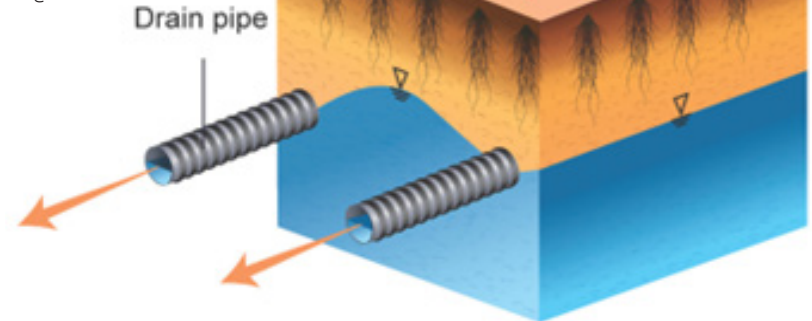
در ادبیات بین‌المللی، اصطلاح زهکشی برای توصیف اقداماتی به‌کار می‌رود که هدف آن کاهش سطح ایستابی از طریق احداث نهرا یا لوله‌های زهکش است [۳۲]. در این نوشتار تمرکز بر سامانه‌های زهکشی زیرسطحی با استفاده از لوله‌هاست. دوره‌ای که در آن زهکشی به‌کار نمی‌رفت (No drainage)، عمدتاً پیش از جنگ جهانی دوم بود. در آن زمان، اراضی کشاورزی توسط نهرا احاطه می‌شدند، اما استفاده از لوله‌های زهکشی رایج نبود و این امر منجر به برآمدگی سطح ایستابی میان نهرا می‌گردید. در سال‌های پر بارش، این وضعیت باعث غرقاب و در نتیجه کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شد. با آغاز دوران زهکشی متداول (Conventional drainage) پس از جنگ جهانی دوم،

سامانه‌هایی متشکل از لوله‌های زهکش منفرد که به نهر تخلیه متصل بودند، توسعه یافتند. در این سامانه‌ها، لوله‌ها در ارتفاعی بالاتر از سطح نگهداری‌شده نهر نصب می‌شوند و بنابراین در صورتی‌که سطح ایستابی پایین‌تر از ارتفاع لوله‌ها قرار گیرد، زهکشی متوقف می‌شود [۳۲]. هدف اصلی از اجرای این سامانه‌ها، کاهش سطح ایستابی در زمستان و اوایل بهار برای تسهیل عملیات زراعی و جلوگیری از غرقابیت در فصل رشد محصول بود [۳۳،۳۴]. کاهش سطح ایستابی باعث یکنواختی بیشتر آن در سطح مزرعه می‌گردد. با این حال، زهکشی متداول ممکن است در تابستان منجر به بروز تنش خشکی شود، زیرا ذخایر آبی در دسترس گیاه کاهش می‌یابد [۳۵]. در ادامه‌ی تحول سامانه‌های زهکشی، مفهوم زهکشی کنترل‌شده (Controlled drainage) یا زهکشی با سطح کنترل‌شده (Level-controlled drainage) مطرح شد (شکل ۵).

این سامانه شباهت‌هایی با زهکشی متداول دارد اما لوله‌های زهکش در ارتفاعی پایین‌تر از سطح نگهداری‌شده نهر قرار می‌گیرند. در این روش، خروجی زهکشی

به‌واسطه کنترل سطح آب در نهر توسط سازه‌هایی نظیر سرریز (Weir) تنظیم می‌شود. اهداف اصلی زهکشی کنترل‌شده عبارت‌اند از: (۱) جلوگیری از زهکشی غیرضروری و حفظ منابع آبی در سامانه‌های منطقه‌ای در هنگام بارش و (۲) کاهش پیک‌های خروجی در زمان‌های تخلیه. لازم به ذکر است که در این سامانه‌ها، سطح آب نهر توسط نهادهای مدیریت منابع آب منطقه‌ای کنترل می‌شود و بنابراین، تأثیر سامانه بر قطعات زراعی بالادست و پایین‌دست می‌تواند متفاوت باشد (شکل ۵). در مرحله‌ای پیشرفته‌تر، سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده مرکب (Composite controlled drainage) معرفی شدند. در این روش، لوله‌های زهکش منفرد به یک لوله کلکتور در انتهای مزرعه متصل می‌شوند که خود به یک حوضچه یا سازه کنترل و سپس به نهر مجاور متصل است. تفاوت اصلی این سامانه با زهکشی کنترل‌شده معمول در این است که در روش مرکب، سطح زهکشی از طریق جعبه کنترل و توسط کشاورز در مقیاس مزرعه تنظیم می‌شود، درحالی‌که در روش قبلی، کنترل در مقیاس منطقه‌ای و توسط نهادهای ذی‌ربط انجام می‌گرفت. جعبه‌ی کنترل دارای سرریز ثابتی است و سطح آب در آن برابر با فشار آب در لوله‌های زهکش خواهد بود (شکل ۶). این سامانه، امکان حفظ آب در مزرعه و تنظیم سطح ایستابی توسط کشاورز را فراهم می‌کند. عملکرد دوگانه این سیستم در طول فصل رشد چندین بار تغییر می‌کند که شامل:

• تخلیه آب (Discharge water) برای کاهش سطح



شکل ۲ - شماتیکی از نمای مقطع خاک با نمایش سیستم زهکشی زیرسطحی (Ghane, ۲۰۲۵ - <https://tinyurl.com/9xpxuzv7>)

ایستابی در دوره‌های مرطوب، به‌گونه‌ای که زهکشی تنها در صورتی انجام می‌شود که تاج سرریز در سازه کنترل پایین‌تر از سطح آب در آن باشد؛

• نگهداشت و ذخیره‌ی آب (Retain and store water) در سامانه خاک-آب برای جلوگیری از افت سریع سطح ایستابی در دوره‌های خشک و افزایش آن در هنگام بارندگی، که در این حالت، تاج سرریز بالاتر از سطح آب در سازه کنترل قرار می‌گیرد.

نقش این سامانه در مدیریت مزرعه‌ای آب متأثر از ویژگی‌های جغرافیایی منطقه از جمله الگوهای بارندگی، سطح ایستابی منطقه‌ای، نوع خاک، و الگوی جریان آب زیرزمینی است. مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد این سامانه در اراضی مسطح (با شیب کمتر از یک درصد) بسیار مؤثرتر است [۳۶،۳۷]. همچنین این سامانه، ناهمگونی‌های درون‌مزرعه‌ای در سطح ایستابی را به‌طور خودکار هموار می‌سازد. در ادامه، سامانه زهکشی سازگار با اقلیم (Climate Adaptive Drainage - CAD) به‌عنوان نسخه‌ای فناورانه از زهکشی کنترل‌شده مرکب توسعه یافته است که در آن، درچه‌ها در باکس کنترل به‌صورت آنلاین و خودکار قابل تنظیم است (شکل ۶).

تفاوت اصلی میان زهکشی مرکب ساده و CAD در نحوه‌ی مدیریت سطح زهکشی است. در CAD، این سطح می‌تواند از راه دور و از طریق اینترنت در هر مقدار دلخواه (در محدوده فیزیکی مجاز) تنظیم شود، درحالی‌که در زهکشی مرکب ساده، تنظیم به‌صورت دستی و محدود به تعداد مشخصی از سطوح انجام می‌شود. با ترکیب سامانه CAD با الگوریتم مدیریتی CAD، می‌توان به‌طور هوشمند سطح مطلوب سرریز را بر اساس پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی و وضعیت هیدرولوژیکی مزرعه تعیین کرد و بدین‌ترتیب، وضعیت رطوبتی ناحیه ریشه به‌صورت فعالانه کنترل می‌شود. این الگوریتم با بهره‌گیری از داده‌های مزرعه‌ای شامل بارندگی، سطح ایستابی، رطوبت خاک، تراز تاج سرریز و سطح آب نهر، به‌همراه مدل SWAP برای ناحیه غیراشباع [۳۸] و الگوریتم بهینه‌سازی Pest [۳۹] سطح بهینه‌ی

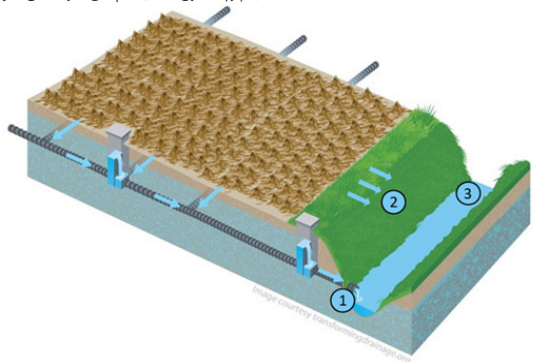
تاج سرریز را تخمین می‌زند. این فرآیند همچنین ملاحظات مشابه جلوگیری از تنش اکسیژنی و زهکشی غیرضروری را نیز در نظر می‌گیرد. در نهایت، با اصلاح سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده مرکب، امکان تبدیل آن‌ها به سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده همراه با آبیاری زیرسطحی (subirrigation) فراهم شده است. در این روش با تزریق آب از یک منبع خارجی به درون سازه کنترل (از طریق جریان طبیعی یا پمپاژ فعال)، فشار آب در سامانه زهکشی افزایش می‌یابد. زمانی که فشار درون لوله‌های زهکش از سطح ایستابی بیشتر شود، آب از لوله‌ها به درون خاک نفوذ کرده و موجب افزایش سطح ایستابی و رطوبت ناحیه ریشه می‌شود (شکل ۷). این سامانه سه رویکرد اساسی را دنبال می‌کند: تخلیه آب (Discharge water)، نگهداشت آب (Retain water) و تزریق یا تغذیه مجدد منابع آبی (Recharge water). لازم به ذکر است که در این نوع آبیاری زیرسطحی، باید منبع آبی خارجی در دسترس باشد که می‌تواند شامل آب سطحی، آب استخرها، زهاب بازیافتی، آب زیرزمینی یا فاضلاب تصفیه‌شده صنعتی یا خانگی باشد.

بنابراین، با توجه به بحران کم‌آبی در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه در استان‌های شمالی مانند مازندران و گیلان و

همچنین مناطق جنوبی همچون خوزستان، بهره‌گیری از سامانه‌های پیشرفته زهکشی نظیر زهکشی کنترل‌شده، زهکشی کنترل‌شده مرکب، و سامانه‌های ترکیبی با آبیاری زیرسطحی می‌تواند راهکاری مؤثر در راستای ارتقای راندمان آبیاری و کاهش مصرف آب باشد. این سامانه‌ها با امکان مدیریت دقیق سطح ایستابی و حفظ رطوبت مؤثر در ناحیه ریشه، نیاز به آبیاری مکرر را کاهش داده و از اتلاف منابع آب جلوگیری می‌کنند. افزون‌براین، بهره‌برداری از زهاب یا پساب‌های تصفیه‌شده در قالب سیستم‌های زهکشی کنترل‌شده همراه با زیرآبیاری، می‌تواند فرصتی برای بازچرخانی آب در سطح مزرعه فراهم آورد و با کاهش وابستگی به منابع آب شیرین، سطح پایداری در مدیریت منابع آب کشاورزی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. در نتیجه، برای ایفای نقش مناسب زهکشی در مدیریت آب کشاورزی، چه در کشت دیم و چه در کشت آبی، پیشرفت‌های اخیر در طراحی و مدیریت زهکشی بر موضوعات زیر متمرکز شده‌اند:

۱. افزایش کنترل در سیستم زهکشی برای هماهنگی با نیازهای آبیاری

توسعه سیستم‌های زهکشی هوشمند با قابلیت تنظیم خودکار، یکپارچه‌سازی سیستم‌های زهکشی و



شکل ۳ - طراحی سامانه زهکشی کنترل‌شده شامل دو سازه کنترل آب که برای افزایش ارتفاع خروجی زهکشی استفاده شده‌اند. رنگ خاکستری-آبی نشان‌دهنده سطح آب زیرزمینی است. اعداد نیز نشان‌دهنده‌ی اجزای کلیدی سامانه هستند: (۱) جریان خروجی از لوله زهکش (۲) رواناب سطحی (۳) جریان آب در پایین‌دست. منبع: transformingdrainage.org

آبیاری برای بهینه‌سازی مصرف آب، استفاده از فناوری‌های پایش لحظه‌ای سطح آب زیرزمینی

۲. کاهش اثرات زیست‌محیطی زهکشی

طراحی سیستم‌های زهکشی با حداقل اختلال در اکوسیستم‌های طبیعی، فیلتراسیون و تصفیه آب خروجی از سیستم‌های زهکشی، مدیریت مواد زائد و آلاینده‌های همراه با زهاب

۳. بازیافت و استفاده مجدد از زهاب کشاورزی

تصفیه و استفاده مجدد از زهاب برای آبیاری، توسعه سیستم‌های بازیافت مواد مغذی از زهاب، مدیریت کیفیت آب برای استفاده‌های چندانگانه

۴. دفع ایمن پساب زهکشی

توسعه روش‌های ایمن برای تخلیه زهاب، طراحی سیستم‌های تصفیه طبیعی (Natural Treatment Systems)، مدیریت تلفیقی پساب زهکشی در سطح حوضه‌های آبریز

۵. پیشرفت در مواد و مصالح زهکشی

توسعه مواد جدید با دوام بیشتر و هزینه کمتر، استفاده از مواد بازیافتی و دوستدار محیط زیست، بهینه‌سازی طراحی لوله‌ها و مصالح زهکشی زیرزمینی

۶. سازماندهی مدیریت زهاب

توسعه چارچوب‌های مدیریت مشارکتی زهکشی، یکپارچه‌سازی مدیریت زهکشی در برنامه‌ریزی‌های کلان آب منطقه‌ای، ایجاد سیستم‌های پایش و ارزیابی عملکرد زهکشی

این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده تحول اساسی در نگرش به سیستم‌های زهکشی از یک فناوری ساده به بخشی حیاتی از

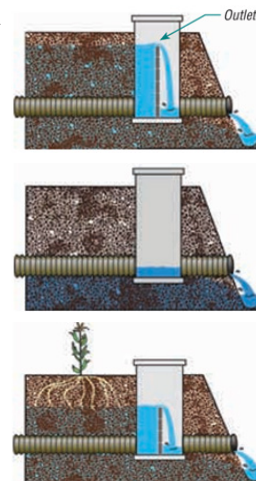
مدیریت پایدار منابع آب در کشاورزی در بحران آب و محیط‌زیست کنونی است.

تاثیرات زهکشی کنترل‌شده

مطالعات انجام‌شده در مناطق

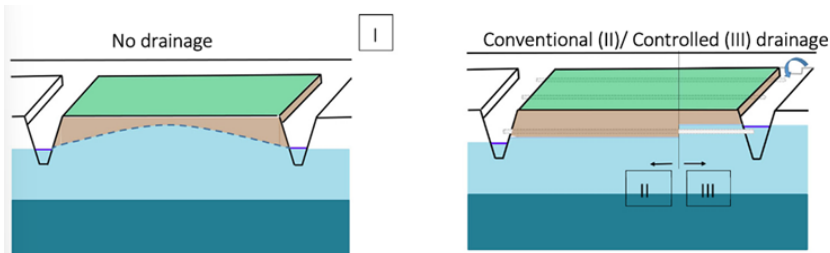
میدوست ایالات متحده نشان داده‌اند که مدیریت سطح ایستابی از طریق سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده می‌تواند میزان آب خروجی از مزرعه از طریق زهکشی زیرسطحی را در زمان وقوع بارش‌های سنگین تا ۲۲ درصد کاهش دهد [۴۰].

همچنین این کاهش در مقیاس سالانه بین ۸ تا ۸۵ درصد متغیر بوده است [۳۰،۴۰]. این کاهش در جریان زهکشی عمدتاً به افزایش تبخیر، نفوذ به اعماق خاک، یا افزایش رواناب سطحی ناشی از افزایش سطح ایستابی و شرایط اشباع‌شده مربوط است. کاهش جریان زهکشی منجر به کاهش انتقال آلاینده‌ها به پایین‌دست، به‌ویژه نیتروژن، می‌شود. مرور مطالعات



شکل ۴ - شماتیکی از مراحل مختلف مدیریت سطح ایستابی با استفاده از سیستم زهکشی کنترل‌شده: (A) پس از برداشت محصول، خروجی زهکشی بالا آورده می‌شود تا انتقال نیترات و زهاب کاهش یابد (B) چند هفته پیش از کاشت و برداشت، خروجی زهکشی پایین آورده می‌شود تا امکان زهکشی کامل‌تر مزرعه فراهم شود (C) پس از کاشت، خروجی زهکشی بالا آورده می‌شود تا در صورت امکان، آب برای گیاهان ذخیره شود.

از سوی دیگر، در شرایط اشباع خاک، زهکشی کنترل‌شده می‌تواند با ایجاد محیط بی‌هوازی باعث آزادسازی فسفر از خاک و پدیده جابجایی آلاینده‌ها (Pollutant swapping) شود؛ یعنی حذف نیتروژن همراه با آزادسازی فسفر [۴۳]. با این حال، زهکشی آزاد است [۴۱]. افزایش رواناب سطحی می‌تواند منجر به جابجایی آلاینده‌هایی نظیر فسفر محلول، ذرات خاک و آفت‌کش‌های جذب‌شده بر ذرات شود، اما تاکنون مطالعات کمی به بررسی بار آلودگی سطحی تحت شرایط زهکشی کنترل‌شده پرداخته‌اند. برای نمونه، یک مدل‌سازی انجام‌شده نشان داد که باوجود کاهش ۸۵ درصدی فسفر در زهکشی زیرسطحی، در مجموع ۱۳ درصد افزایش در اتلاف کل فسفر از طریق جریان‌های سطحی وجود داشته است [۴۲].



شکل ۵ - شماتیکی از مزرعه کشاورزی بدون زهکشی لوله‌ای (I)، با زهکشی متداول (II)، با زهکشی کنترل‌شده [۳۶] (III)

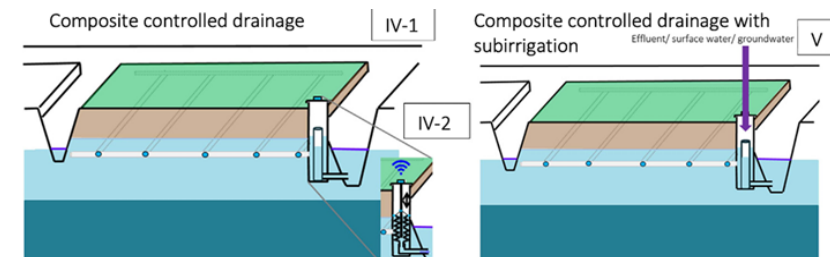
عملکرد ذرت در شرایط خشکسالی خفیف تا متوسط اشاره داشته‌اند، اما به‌طور کلی بهبود عملکرد محصولات وابسته به شرایط اقلیمی و خاک و متغیر بین مکان‌ها و سال‌های مختلف است، و در برخی موارد حتی کاهش عملکرد نیز گزارش شده است [۴۴]. در رابطه با تأثیرات زیست‌محیطی دیگر، مانند گازهای گلخانه‌ای، مطالعات بسیار محدودی در دسترس است. اگرچه افزایش اشباع خاک می‌تواند منجر به افزایش دینتریفیکاسیون و تولید گازهایی مانند CH_4 یا N_2O شود، اما شواهد تجربی روشنی در این خصوص به‌ویژه در کمربند ذرت آمریکا وجود ندارد. برخی مطالعات مدل‌سازی افزایش حدود ۵/۷ درصدی انتشار نیتروژن اکسید را پیش‌بینی کرده‌اند، اما نتایج کلی این موضوع هنوز قطعی نیست و به شرایط مدیریت و ویژگی‌های مزرعه‌ای بستگی دارد [۴۵].

در نهایت، اگر سطح ایستابی در اواخر زمستان یا اوایل بهار به حدی بالا نگه داشته شود که موجب آب‌گرفتگی موفق بخش‌هایی از مزرعه گردد، می‌توان

با این روش زیستگاه‌های فصلی برای پرندگان مهاجر با دائمی فراهم ساخت. البته مطالعات مستقیمی در این زمینه تاکنون انجام نشده و بررسی امکان‌پذیری آن نیازمند مطالعات میدانی، مدلسازی و تعامل با ذی‌نفعان است.

جمع‌بندی

زهکشی کنترل‌شده، نه‌تنها روشی برای مدیریت رطوبت خاک، بلکه راهکاری مؤثر برای مقابله با بحران کم‌آبی در کشاورزی است. این سیستم با قابلیت اجرا در مقیاس مزرعه‌ای، به کشاورزان این امکان را می‌دهد که بدون نیاز به فناوری‌های پرهزینه، به بهره‌وری بالاتر در مصرف آب دست پیدا کنند. در شرایط اقلیمی امروز، هر قطره آب اهمیت دارد، و زهکشی کنترل‌شده می‌تواند سهم بزرگی در حفظ همین قطره‌ها ایفا کند. جمع‌بندی این مطالعات نشان می‌دهد که زهکشی کنترل‌شده به‌عنوان یک راهکار مدیریت پایدار آب در اراضی کشاورزی، پتانسیل بالایی در کاهش اتلاف نیترات، بهبود نگهداشت آب خاک و حتی افزایش



شکل ۶ - شماتیکی از مزرعه کشاورزی با زهکشی کنترل‌شده مرکب همراه با سرریز ثابت (IV-۱) سرریز قابل کنترل به‌صورت اتلایین (IV-۲)، و زهکشی کنترل‌شده مرکب همراه با آبیاری زیرسطحی که توسط سرریز ثابت یا سرریز قابل کنترل اتلایین مدیریت می‌شود [۳۶] (V)

[1] R.W. Skaggs, J. Van Schilfgaarde, Drainage for Agriculture, Monograph No. 38, Madison, WI Am. Soc. Agron. (1999).

[2] R.E. Turner, N.N. Rabalais, Coastal eutrophication near the Mississippi river delta, Nature 368 (1994) 619–621.

[3] N.N. Rabalais, R.E. Turner, D. Justic, Q. Dortch, W.J. Wiseman, B.K. Sen Gupta, Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf, Estuaries 19 (1996)

controlled drainage on corn yield under varying precipitation patterns: A synthesis of studies across the US Midwest and Southeast, *Agric. Water Manag.* 275 (2023) 107993.

[45] Z. Wang, Z. Qi, L. Xue, M. Bukovsky, RZWQM2 simulated management practices to mitigate climate change impacts on nitrogen losses and corn production, *Environ. Model. Softw.* 84 (2016) 99–111.

[39] J. Doherty, PEST: Model independent parameter estimation, Watermark Numer, Comput. Brisbane, Queensland, Aust. (2010).

[40] G.B. Lahdou, L. Bowling, J. Frankenberger, E. Klavivko, Hydrologic controls of controlled and free draining subsurface drainage systems, *Agric. Water Manag.* 213 (2019) 605–615.

[41] V.S. Shedekar, K.W. King, N.R. Fausey, K.R. Islam, A.B.O. Soboyejo, M.M. Kalcic, L.C. Brown, Exploring the effectiveness of drainage water management on water budgets and nitrate loss using three evaluation approaches, *Agric. Water Manag.* 243 (2021) 106501.

[42] D. Sadhukhan, Z. Qi, T. Zhang, C.S. Tan, L. Ma, Modeling and mitigating phosphorus losses from a tile-drained and manured field using RZWQM2-P, *J. Environ. Qual.* 48 (2019) 995–1005.

[43] K.W. King, M.R. Williams, M.L. Macrae, N.R. Fausey, J. Frankenberger, D.R. Smith, P.J.A. Kleinman, L.C. Brown, Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review, *J. Environ. Qual.* 44 (2015) 467–485.

[44] M.A. Youssef, J. Strock, E. Bagheri, B.D. Reinhart, L.J. Abendroth, G. Chighladze, E. Ghane, V. Shedekar, N.R. Fausey, J.R. Frankenberger, Impact of

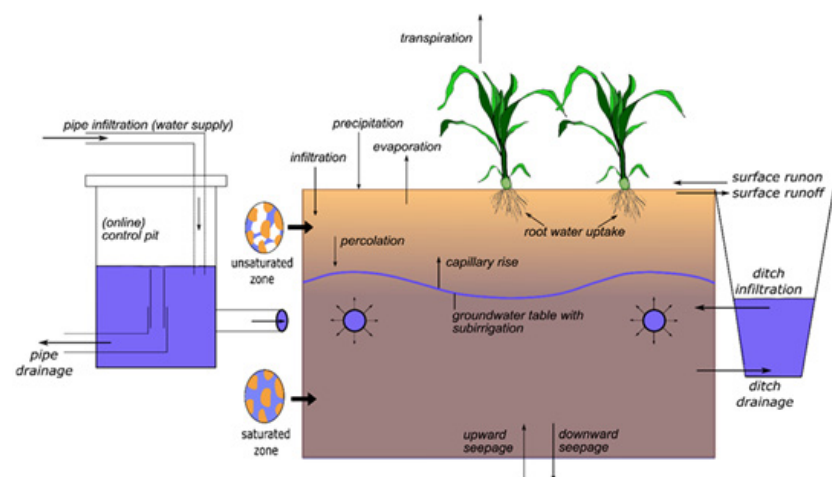
to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farmers' fields, *Agric. Water Manag.* 95 (2008) 179–189.

[35] C.S. Tan, C.F. Drury, J.D. Gaynor, T.W. Welacky, W.D. Reynolds, Effect of tillage and water table control on evapotranspiration, surface runoff, tile drainage and soil water content under maize on a clay loam soil, *Agric. Water Manag.* 54 (2002) 173–188. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00178-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00178-0).

[36] J.A. (Janine) de Wit, C.J. (Coen) Ritsema, J.C. (Jos) van Dam, G.A.P.H. (Gé) van den Eertwegh, R.P. (Ruud) Bartholomeus, Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge, *Agric. Water Manag.* 269 (2022) 107677. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107677>.

[37] M.V. Carstensen, F. Hashemi, C.C. Hoffmann, D. Zak, J. Audet, B. Kronvang, Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review, *Ambio* 49 (2020) 1820–1837.

[38] J.G. Kroes, J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supt, P.E.V. van Walsum, SWAP version 4: theory description and user manual., (2017).



شکل ۷ - ستون آب خاک در مقیاس مزرعه همراه با مؤلفه‌های تراز آبی در منطقه اشباع و غیراشباع [۳۶]

feasibility and economic return of drainage water recycling in an arid region, *Agric. Water Manag.* 302 (2024) 108983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108983>.

[25] J.E. Ayars, R.G. Evans, Subsurface drainage—What's next?, *Irrig. Drain.* 64 (2015) 378–392.

[26] T. Hoogland, G.B.M. Heuvelink, M. Knotters, Mapping water-table depths over time to assess desiccation of groundwater-dependent ecosystems in the Netherlands, *Wetlands* 30 (2010) 137–147.

[27] R.W. Skaggs, N.R. Fausey, R.O. Evans, Drainage water management, *J. Soil Water Conserv.* 67 (2012) 167A–172A.

[28] J.W. Gilliam, R.W. Skaggs, S.B. Weed, Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields, Wiley Online Library, 1979.

[29] M. Helmers, R. Christianson, G. Brennenman, D. Lockett, C. Pederson, Water table, drainage, and yield response to drainage water management in southeast Iowa, *J. Soil Water Conserv.* 67 (2012) 495–501.

[30] M.J. Helmers, L. Abendroth, B. Reinhart, G. Chighladze, L. Pease, L. Bowling, M. Youssef, E. Ghane, L. Ahiablame, L. Brown, Impact of controlled drainage on subsurface drain flow and nitrate load: A synthesis of studies across the US Midwest and Southeast, *Agric. Water Manag.* 259 (2022) 107265.

[31] C.S. Tan, T.Q. Zhang, Surface runoff and sub-surface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario, Can. J. Soil Sci. 91 (2011) 349–359. <https://doi.org/10.4141/cjss09086>.

[32] L.C.P.M. Stuyt, Regelbare drainage als schakel in toekomstbestendig waterbeheer: bundeling van resultaten van onderzoek, ervaringen en indrukken, opgedaan in binnen-en buitenland, Alterra, 2013.

[33] H.P. Ritzema, H.J. Nijland, F.W. Croon, Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation, *Agric. Water Manag.* 86 (2006) 60–71.

[34] H.P. Ritzema, T. V Satyanarayana, S. Raman, J. Boonstra, Subsurface drainage

Zheng, Y. Min, Effect of fungal pellets on denitrifying bacteria at low carbon to nitrogen ratio: Nitrate removal, extracellular polymeric substances, and potential functions, *Sci. Total Environ.* 847 (2022) 157591.

[14] J. Jang, E.L. Anderson, R.T. Venterea, M.J. Sadowsky, C.J. Rosen, G.W. Feyereisen, S. Ishii, Denitrifying bacteria active in woodchip bioreactors at low-temperature conditions, *Front. Microbiol.* 10 (2019) 635.

[15] P. Lv, J. Luo, X. Zhuang, Diversity of culturable aerobic denitrifying bacteria in the sediment, water and biofilms in Liangshui River of Beijing, *China Scientific Reports* 7: 10032, (2017).

[16] S. Miao, C. Jin, R. Liu, Y. Bai, H. Liu, C. Hu, J. Qu, Microbial community structures and functions of hypersaline heterotrophic denitrifying process: Lab-scale and pilot-scale studies, *Bioresour. Technol.* 310 (2020) 123244.

[17] Z. Yao, L. Yang, F. Wang, L. Tian, N. Song, H. Jiang, Enhanced nitrate removal from surface water in a denitrifying woodchip bioreactor with a heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying fungus, *Bioresour. Technol.* 303 (2020) 122948.

[18] D. Molden, Water for food water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture, Routledge, 2013.

[19] B. Schultz, D. Zimmer, W.F. Vlotman, Drainage under increasing and changing requirements, *Irrig. Drain. J. Int. Comm. Irrig. Drain.* 56 (2007) S3–S22.

[20] H.P. Ritzema, Drain for Gain: Managing salinity in irrigated lands—A review, *Agric. Water Manag.* 176 (2016) 18–28.

[21] H. Ritzema, Drainage systems to support sustainable water use, in: *Water Manag. Sustain. Agric.*, Burleigh Dodds Science Publishing, 2018: pp. 467–493.

[22] H.P. Ritzema, Advances in drainage design and management for irrigated agriculture, in: *Improv. Water Manag. Agric.*, Burleigh Dodds Science Publishing, 2024: pp. 111–142.

[23] A. Singh, Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture, *J. Hydrol.* 519 (2014) 1688–1697.

[24] S. Kosari, M. Parsinejad, A. Mokhtaran, S. Zebardast, Predicted

386–407.

[4] S.A. Board, A. Plan, Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: An update by the EPA, Scientific Advisory board, (2007).

[5] J.N. Galloway, A.R. Townsend, J.W. Erisman, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Frenay, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger, M.A. Sutton, Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions, *Science* (80-.). 320 (2008) 889–892.

[6] G.M. Johnson, R.D. Christianson, R.A.C. Cooke, C. Díaz-García, L.E. Christianson, Denitrifying bioreactor woodchip sourcing guidance based on physical and hydraulic properties, *Ecol. Eng.* 184 (2022) 106791.

[7] Y. Chen, S. Lan, L. Wang, S. Dong, H. Zhou, Z. Tan, X. Li, A review: driving factors and regulation strategies of microbial community structure and dynamics in wastewater treatment systems, *Chemosphere* 174 (2017) 173–182.

[8] S. Kiani, K. Kujala, J.T. Pulkkinen, S.L. Aalto, S. Suurnäkki, T. Kiuru, M. Tirola, B. Kløve, A.-K. Ronkanen, Enhanced nitrogen removal of low carbon wastewater in denitrification bioreactors by utilizing industrial waste toward circular economy, *J. Clean. Prod.* 254 (2020) 119973.

[9] S.L. Aalto, S. Suurnäkki, M. von Ahnen, H.M.P. Sijjanen, P.B. Pedersen, M. Tirola, Nitrate removal microbiology in woodchip bioreactors: a case-study with full-scale bioreactors treating aquaculture effluents, *Sci. Total Environ.* 723 (2020) 138093.

[10] N. Aldossari, S. Ishii, Isolation of cold-adapted nitrate-reducing fungi that have potential to increase nitrate removal in woodchip bioreactors, *J. Appl. Microbiol.* 131 (2021) 197–207.

[11] S. Fatehi-Pouladi, B.C. Anderson, B. Wootton, M. Button, S. Bissegger, L. Rozema, K.P. Weber, Interstitial water microbial communities as an indicator of microbial denitrifying capacity in woodchip bioreactors, *Sci. Total Environ.* 655 (2019) 720–729.

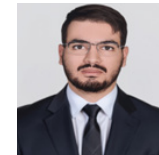
[12] L. Xia, X. Li, W. Fan, J. Wang, Denitrification performance and microbial community of bioreactor packed with PHBV/PLA/rice hulls composite, *Sci. Total Environ.* 803 (2022) 150033.

[13] Y. Sun, J. Su, A. Ali, S. Zhang, Z.

بارورسازی ابرهای قطبی: ارزیابی امکان سنجی و اثرات اقلیمی با بهره‌گیری از مدل سازی پیشرفته و پهپادها

نیما مقدم

دانشجوی سرآمد پژوهشی مقطع ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران
دبیر انجمن علمی دانشجویی مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران



چکیده

گرمایش جهانی سرعت ذوب یخ‌های قطبی به‌ویژه در منطقه قطب شمال را افزایش داده و پیامدهایی جدی برای افزایش سطح آب دریاها و پایداری اقلیم جهانی به همراه داشته است. این پژوهش به بررسی امکان‌سنجی و آثار اقلیمی بذریاشی یخ‌زاد ابرها به‌عنوان رویکردی نوین در ژئومهندسی می‌پردازد. هدف اصلی افزایش بارش برف و تقویت آل بدوی سطحی برای کاهش نرخ ذوب یخ‌هاست. در این طرح، از مدل‌سازی پیشرفته جوی مدل (WRF) و سامانه‌های پهپادی برای بذریاشی بهره‌گیری خواهد شد. نتایج اولیه حاکی از آن است که افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی بارش برف می‌تواند به کاهش نرخ ذوب و تقویت تاب‌آوری اقلیمی کمک نماید. این پژوهش با تلفیق مدل‌سازی اقلیمی، فناوری پهپادی و ملاحظات حکمرانی محیط‌زیست، رویکردی میان‌رشته‌ای و نوآورانه ارائه می‌دهد.

مقدمه

قطب شمال با نرخ بیش از دو برابر میانگین جهانی گرم شده و این امر موجب ذوب سریع یخ‌ها و افزایش سطح دریاها شده است. (Davison et al. ۲۰۲۳) این روند تهدیدی جدی برای جوامع ساحلی، زیرساخت‌ها و اکوسیستم‌های جهانی محسوب می‌شود. سیاست‌های سنتی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌تنهایی قادر به توقف روند کوتاه‌مدت کاهش یخ‌های قطبی نیستند. ازاین‌رو، بهره‌گیری از راهبردهای تکمیلی ژئومهندسی همچون بارورسازی ابر می‌تواند در تثبیت یخ‌های قطبی نقش‌آفرین باشد. در همین راستا ایده بارورسازی ابرها در قطب جنوب با توجه به مساعد بودن شرایط برای نزولات جوی و همچنین وقوع آن به‌صورت برف می‌تواند موجب کاهش دما و تأثیر بر جریانات جوی منشاء گرفته از قطب در سایر نقاط کره زمین گردد، اما درست همین ویژگی باعث حساسیت بالای این موضوع شده و نیازمند انجام محاسبات دقیق هست.

پیشینه پژوهش

مطالعات نشان داده‌اند که بارورسازی و بذریاشی می‌تواند بارش برف را تا ۲۰-۳۰ درصد در شرایط مناسب افزایش دهد (French et al. ۲۰۱۸) ابرهای فوق سرد در مناطق قطبی شرایطی ایده آلی را برای بذریاشی یخ‌زاد فراهم می‌کنند. (Listowski et al. ۲۰۱۹) از سوی دیگر، استفاده از پهپادها علاوه بر کاهش هزینه‌های لجستیکی و انتشار کربن، امکان بذریاشی هدفمند را مهیا می‌سازد. (Ricaud et al. ۲۰۲۴).

روش تحقیق

این پژوهش شامل مراحل گردآوری داده‌ها، توسعه مدل WRF با مازول هسته‌زایی یخ، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، طراحی عملیات پهپادی و ملاحظات حقوقی و اخلاقی خواهد بود. در این فرایند، داده‌های باز تحلیل ERA۵/ و ECMWF و مشاهدات ایستگاه‌های

قطبی استفاده‌شده و اعتبارسنجی مدل با داده‌های تاریخی صورت می‌گیرد تا میزان تأثیر بارورسازی ابرها بر بارش و تأثیر آن بر روند کاهش دما مدل‌سازی و دقیق برآورد شود. این برآورد عملی بودن یا نبودن ایده را نشان خواهد داد، همچنانی که در شرایطی که مسئله گرمایش زمین مطرح می‌شود، بحث صرفه مالی نباید زیاد مطرح گردد زیرا که باید به این دست از اقدامات به چشم سرمایه‌گذاری برای زندگی بهتر نسل‌های آینده بشریت و موجودات زنده نگاه کرد.

نتایج مورد انتظار

انتظار می‌رود بذریاشی موجب افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی بارش برف شود که به تقویت آل بدو و کاهش دمای منطقه منجر گردد. نتایج کمی شامل شناسایی گستره جغرافیایی مناسب، برآورد کاهش نرخ ذوب یخ و تغییرات دمای منطقه‌ای خواهد بود. البته که به سبب منشاء پذیری جریانات هوایی قاره اروپا از قطب جنوب باید این فرایند کنترل‌شده صورت پذیرد زیرا انجام بیش‌ازاندازه آن می‌تواند منجر به وقوع جریانات بسیار سرد و یخ‌بندان‌های سهمگین در قاره اروپا گردد.

بحث

بذریاشی ابرهای قطبی می‌تواند ابزاری مکمل در کاهش سرعت افزایش سطح دریاها باشد. قابلیت مقیاس‌پذیری آن استفاده در هر دو منطقه قطب شمال و جنوب را ممکن می‌سازد. بااین‌حال، ابهاماتی درباره پیامدهای بلندمدت زیست‌محیطی و تغییرات گردش جوی باقی‌مانده است. نوآوری پژوهش در ادغام فناوری پهپادی، مدل‌سازی پیشرفته و شرایط خاص قطبی نهفته است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه، راهبردی نوین برای کاهش ذوب یخ‌های قطبی از طریق بذریاشی ابر ارائه می‌دهد. بهره‌گیری از

مدل WRF و پهپادها امکان ارزیابی دقیق آثار اقلیمی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کند. افزایش بارش برف می‌تواند مکمل سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد و مسیری برای ارتقای تاب‌آوری اقلیمی جهانی فراهم سازد تا آیندگان ما از زندگی سالم، آرام و لذت‌بخش بهره ببرند و همچنین با پیشرفت علم این دست از اقدامات الگویی باشد برای این مهم که سلامت سیاره مساوی است با سلامت همه ما که در آن زندگی می‌کنیم، به امید آنکه آیندگان نیز برای سلامت و امنیت نسل بعدی خود از هیچ اقدامی فروگذار نکنند.



formation from orographic cloud seeding. PNAS, 115(6), 1168-1173. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716995115>

Larson, E. J. L., Rosenlof, K. H., & Gao, R.-S. (2023). Increasing Antarctic Ice Mass to Help Offset Sea Level Rise. *Atmosphere*, 14(10), 1564. <https://doi.org/10.3390/atmos14101564>

Listowski, C., Delanoë, J., Kirchgaessner, A., Lachlan-Cope, T., & King, J. (2019). Antarctic clouds, supercooled liquid water and mixed phase, investigated with DARDAR: geographical and seasonal variations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(10), 6771-6808. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6771-2019>

Ricaud, P., Del Guasta, M., Bazile, E., Azouz, N., Lupi, A., Durand, P., Attié, J.-L., Veron, D., Guidard, V., & Grigioni, P. (2024). Supercooled liquid water clouds observed over Dome C, Antarctica: temperature sensitivity and cloud radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(1), 613-630. <https://doi.org/10.5194/acp-24-613-2024>

منابع

Antarctic Treaty Secretariat. (1991). Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty. Retrieved from <https://www.ats.aq/e/protocol.html>

Davison, B. J., Hogg, A. E., Rigby, R., Veldhuijsen, S., van Wessem, J. M., van den Broeke, M. R., Holland, P. R., Selley, H. L., & Dutrieux, P. (2023). Sea level rise from West Antarctic mass loss significantly modified by large snowfall anomalies. *Nature Communications*, 14, 1479. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36990-3>

Fajardo, C., Costa, G., Ortiz, L. T., Nande, M., Rodríguez-Membibre, M. L., Martín, M., & Sánchez-Fortún, S. (2016). Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.028>

French, J. R., Friedrich, K., Tessendorf, S. A., Rauber, R. M., Rasmussen, R. M., Xue, L., ... & Blestrud, D. R. (2018). Precipitation

از خطای مفهومی تا مغلطه: نقد علمی مخالفت‌ها با توسعه سامانه‌های نوین آبیاری



فاطمه خیاط

| دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

مقدمه: طرح مسئله و اهمیت موضوع

در سال‌های اخیر، یکی از بحث‌های پرتکرار و جنجالی در حوزه سیاست‌گذاری آب کشور، موضوع صرفه‌جویی آب از طریق افزایش راندمان کاربرد آبیاری در سطح واحدهای کشاورزی و سایر بخش‌های مصرف‌کننده بوده است. این رویکرد که تا مدتی به عنوان راهبرد غالب برای مدیریت بحران آب و توسعه سامانه‌های نوین آبیاری شناخته می‌شد، به تدریج با نقدهایی از سوی برخی محافل دانشگاهی و پژوهشی مواجه شد.

با وجود اینکه بهبود راندمان سامانه‌های آبیاری می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری کشاورزی ایفا کند، تحلیل‌های غیر دقیق و بعضاً مغرضانه در سال‌های اخیر باعث شده است که جایگاه این سامانه‌ها در سیاست‌گذاری کلان تضعیف شود. بررسی انتقادی این تحلیل‌ها برای هدایت تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد ضروری است.

بخش اول: واکاوی یک خطای مفهومی در تحلیل

صرفه‌جویی آب

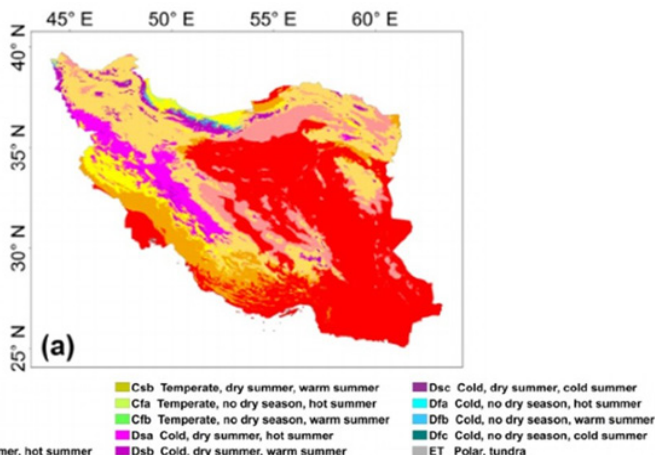
گزارش مشهور سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) با عنوان "Does Improved Irrigation Technology Save Water? A Review of the Evidence" به این مسئله پرداخته است که افزایش راندمان سامانه‌های آبیاری در سطح مزرعه، لزوماً به صرفه‌جویی مطلق در منابع آب منجر نمی‌شود. این گزارش، با بررسی شواهد میدانی در کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا، نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، کاهش مصرف آب در سطح مزرعه با گسترش سطح زیرکشت یا تغییر الگوی رفتاری کشاورزان جبران می‌شود؛ بنابراین مصرف کل آب در مقیاس حوضه آبریز یا تغییری نمی‌کند یا حتی افزایش می‌یابد. [۱]

برخی از مطالعات علمی نیز، تلاش کردند با تکیه بر مفاهیم دقیق‌تری از چرخه آب در کشاورزی، ارزیابی تازه‌ای از میزان صرفه‌جویی ارائه کنند. در این نگاه، سه مفهوم کلیدی مطرح می‌شود: نخست «آب برداشت شده» که به کل آبی اطلاق می‌شود که از منابع سطحی یا زیرزمینی برداشت می‌گردد. دوم «آب کاربردی» که همان بخشی از آب برداشت‌شده است که وارد مزرعه می‌شود. سوم «آب مصرفی» که

بخش واقعی مصرف آب در مزرعه محسوب می‌شود؛ یعنی آن مقدار از آب کاربردی که از طریق تبخیر و تعرق از بین می‌رود و دیگر به منابع آب باز نمی‌گردد.

بر اساس این نگاه، صرفاً آب مصرفی به عنوان مصرف واقعی تلقی می‌شود و کاهش آب کاربردی بدون کاهش واقعی در میزان تبخیر و تعرق (ET) یا محدودسازی سطح و الگوی کشت، به معنای صرفه‌جویی واقعی در مقیاس حوضه نیست؛ زیرا بخش قابل توجهی از آب برداشت‌شده معمولاً به سامانه بازمی‌گردد و به‌عنوان جریان‌های برگشتی دوباره در چرخه قرار می‌گیرد. به بیان دیگر، اگر با به کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری، میزان تبخیر و تعرق تغییری نکند، حتی اگر حجم برداشت آب کمتر شود، از نگاه این گروه، صرفه‌جویی واقعی رخ نداده است.

این دیدگاه علمی در ادامه به ادعایی گسترده‌تر تبدیل شد: افزایش راندمان آبیاری لزوماً به صرفه‌جویی واقعی منجر نمی‌شود و کاهش واقعی مصرف آب تنها از طریق محدود کردن سطح زیر کشت امکان‌پذیر است. این برداشت به سرعت مورد توجه برخی نهادهای سیاست‌گذاری



شکل ۱ - نقشه اقلیمی ایران بر اساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر (۳)

و اجرایی در کشور قرار گرفت و همین امر جایگاه سامانه‌های نوین آبیاری را در سیاست‌های صرفه‌جویی آب تضعیف کرد.

بخش دوم: شناسایی یک مغلطه رایج در مخالفت با سامانه‌های نوین

در این روند، مغلطه‌ای جدی شکل گرفت؛ چرا که برخی تحلیل‌ها با تکیه بر تعاریف فنی، این تصور نادرست را القا کردند که حتی راندمان پایین آبیاری می‌تواند برای بخش کشاورزی دو کشور تفاوت‌های کشور مفید باشد. این برداشت شامل دو خطای اساسی است: نخست، نادیده‌گرفتن نقش سامانه‌های نوین آبیاری در ارتقای بهره‌وری مزرعه، زیرا کاهش آب کاربردی باید به‌عنوان یک مزیت مهم این فناوری‌ها تلقی شود، نه تهدید. دوم، فراموش کردن ارزش واقعی صرفه‌جویی در سطح مزرعه است؛ چرا که کاهش آب کاربردی، حتی در صورت عدم کاهش ET، مزایای قابل توجهی از جمله صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بهبود توزیع منابع و افزایش بازدهی را به همراه دارد.

نمونه‌ای از این استدلال مغلطه‌آمیز

در نشست‌هایی مطرح شده است که در آن گفته می‌شود: «چه ضرورتی دارد آبیاری تحت فشار در کشور گسترش یابد؟ آمریکا با آن وسعت تا سال ۲۰۰۰، تنها حدود ۵۲ درصد [۲] از کل اراضی آبیاری شده خود را با سامانه‌های نوین (تحت فشار) آبیاری تجهیز کرده است.» این مقایسه در ظاهر منطقی به نظر می‌رسد اما از چند جهت نادرست است. شرایط اقلیمی آمریکا به طور متوسط بسیار متفاوت از ایران است و در بسیاری از مناطق این کشور بارندگی کافی است و نیاز به آبیاری را برطرف می‌کند. همچنین، ساختار اقتصادی و نظام بارانه‌ای بخش کشاورزی دو کشور تفاوت‌های بنیادین دارد که هرگونه مقایسه مستقیم را بی‌معنا می‌سازد.

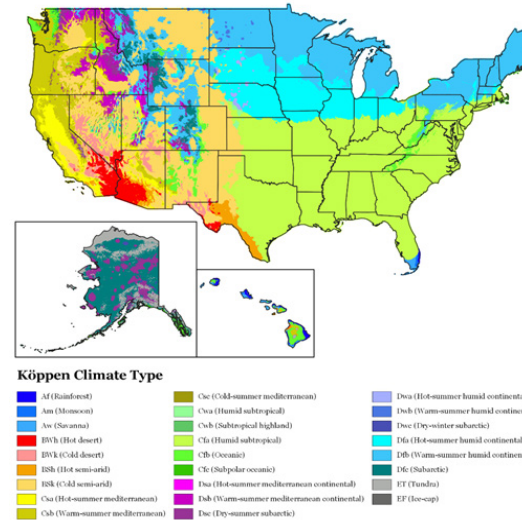
شکل ۱ نقشه اقلیمی ایران [۳] و شکل ۲ نقشه اقلیمی ایالات متحده آمریکا [۴] را بر اساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مناطقی از ایالات متحده شامل کالیفرنیا، آریزونا و تگزاس دارای الگوهای اقلیمی هستند که شباهت قابل توجهی با مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارند. این هم‌خوانی اقلیمی نشان می‌دهد که تجربه موفق ایالت‌های خشک آمریکا در توسعه و گسترش سامانه‌های نوین آبیاری، به‌ویژه میکروآبیاری و آبیاری بارانی،

می‌تواند به‌عنوان الگویی معتبر برای ایران مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، مقایسه سطح ملی آمریکا با ایران، بدون توجه به تفاوت‌های اقلیمی و منطقه‌ای، گمراه‌کننده است و تمرکز بر مناطق اقلیمی مشابه، ضرورت و کارایی سرمایه‌گذاری در آبیاری تحت فشار در ایران را به‌روشنی توجیه می‌کند.

چنانچه به جای کل پهنای ایالات متحده، مناطق خشک و نیمه‌خشکی نظیر تگزاس، کالیفرنیا و آریزونا بررسی شود، مشاهده می‌گردد که سهم اراضی مجهز به سامانه‌های تحت فشار به مراتب بیشتر از متوسط ملی است. بر اساس داده‌های سال ۲۰۰۰، ایالت‌های کالیفرنیا، نبراسکا، تگزاس، آرکانزاس و آیداهو در مجموع ۵۳ درصد از کل اراضی آبیاری‌شده کشور را به خود اختصاص داده‌اند. از این میان، کالیفرنیا، نبراسکا و تگزاس حدود ۴۰ درصد از کل اراضی مجهز به سامانه‌های بارانی و میکروآبیاری را پوشش می‌دهند و تنها ایالت کالیفرنیا ۷۲ درصد از کل اراضی میکروآبیاری ایالات متحده را در اختیار دارد. در مجموع، سامانه‌های بارانی و میکروآبیاری بیش از ۵۰ درصد از کل اراضی آبیاری‌شده آمریکا را شامل می‌شوند. [۲]



Köppen Climate Types of the United States



شکل ۲ - نقشه اقلیمی ایالات متحده آمریکا بر اساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر

Does improved irrigation technology save water? A review of the evidence. Discussion paper on irrigation and sustainable water resources management in the Near East and North Africa. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[2] Hutson, S. S., Barber, N. L., Kenny, J. F., Linsey, K. S., Lumia, D. S., & Maupin, M. A. (2004). Estimated use of water in the United States in 2000 (U.S. Geological Survey Circular 1268). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/circ/2004/circ1268/htdocs/text-ir.html>

[3] Soltani, A. (2023). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen-Geiger climate classification in Iran. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/384963937>

[4] Wikimedia Commons. (2016). Köppen climate types US 50. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C3%B6ppen_Climate_Types_US_50.png

[5] U.S. Government Accountability Office. (2020). Irrigation water use and efficiency in the United States (GAO-20-128SP). Washington, DC: GAO. <https://www.gao.gov/assets/gao-20-128sp.pdf>

برای دستیابی به سیاست‌گذاری علمی و کارآمد، اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود:

- تحلیل منطقه‌ای دقیق برای انتخاب و به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری متناسب با شرایط هر ناحیه اقلیمی.

- ترکیب توسعه فناوری با سیاست‌های کنترلی همچون مدیریت منطقه‌ای سطح زیرکشت برای جلوگیری از افزایش مصرف کل.

- توانمندسازی و آموزش کشاورزان جهت بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های نوین، پایش و ارزیابی مستمر آثار سامانه‌های نوین در سطوح مزرعه و حوضه برای جلوگیری از برداشت‌های تحلیلی نادرست.

تنها با اتخاذ این رویکرد جامع و مبتنی بر شواهد می‌توان از ظرفیت واقعی سامانه‌های نوین آبیاری برای افزایش بهره‌وری و کاهش فشار بر منابع آب در کشور بهره‌برداری کرد.

منابع

[1] Perry, C. J., & Steduto, P. (2017).

علاوه بر این، بر اساس گزارش GAO (۲۰۲۰)، به نقل از USDA جمع‌آوری کرده است، در سال ۲۰۱۲ ایالت کالیفرنیا حدود ۱۳.۹۵ درصد از کل اراضی آبیاری‌شده آمریکا را به خود اختصاص داده بود که از این مساحت، نزدیک به ۵۰ درصد با سیستم‌های میکروآبیاری آبیاری می‌شدند [۵]. این آمار نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در سامانه‌های نوین آبیاری در ایالت‌های خشک و نیمه‌خشک آمریکا همواره روند افزایشی داشته و نقش بسیار مهمی در بهره‌وری و مدیریت بهینه منابع آب ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مخالفت با توسعه سامانه‌های نوین آبیاری در کشور، زمانی که بر پایه برداشت‌های ناقص یا مقایسه‌های غیرعلمی شکل می‌گیرد، منجر به انحراف در سیاست‌گذاری منابع آب می‌شود. خطای مفهومی زمانی بروز می‌کند که کاهش برداشت آب یا ارتقای راندمان آبیاری به دلیل عدم کاهش مصرف مطلق، بی‌اهمیت تلقی می‌شود. در کنار آن، مغلطه رایج با مقایسه مستقیم ایران با کشورهای با شرایط اقلیمی و اقتصادی کاملاً متفاوت، جایگاه حیاتی این فناوری‌ها را در مدیریت منابع آب کم‌رنگ جلوه می‌دهد.

شواهد آماری به وضوح نشان می‌دهد که برخلاف این ادعاها، در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایالات متحده، که شباهت‌های اقلیمی بسیاری با ایران دارند، سهم قابل توجهی از اراضی به سامانه‌های تحت فشار و میکروآبیاری مجهز شده است. این واقعیت نشان می‌دهد که توسعه فناوری‌های نوین آبیاری نه یک انتخاب اختیاری، بلکه ضروری برای مدیریت بهینه آب و ارتقای بهره‌وری کشاورزی در مناطق خشک و کم‌آب است.

نادیده‌گرفتن این تفاوت‌ها موجب شده است که در سطوح کارشناسی و سیاست‌گذاری، نقش ارتقای بهره‌وری در مدیریت پحران آب نادیده گرفته شود. از این‌رو، بازنگری در سیاست‌های آب کشور، با تکیه بر شرایط واقعی اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی داخلی، اجتناب‌ناپذیر است.

چالش‌های حکمرانی آب و تاب‌آوری آبی در ایران: مدیریت بحران منابع آبی با راهکارهای پایدار



محمدامین عبداللهی

| دانشجوی دکتری منابع آب دانشگاه تهران

چکیده

بحران آب در ایران به‌ویژه در سال ۱۴۰۴، به یکی از جدی‌ترین مسائل کشور تبدیل شده است. کاهش ملموس بارندگی‌ها در سال، که تنها چیزی حدود یک سوم میانگین جهانی است، به همراه خشکسالی‌های پایایی، منابع آبی را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. در چنین وضعیتی، ترکیب عدم مدیریت پایدار و سیاست‌گذاری‌های ناپایدار و نادرست و سایر ناهماهنگی‌های نهادی سبب ایجاد گره‌ای کور شده که حل کردن آن به هیچ عنوان کار ساده‌ای نیست. این مقاله کوتاه سعی دارد با نگاهی دقیق، چالش‌های حکمرانی آب در ایران را مورد بررسی قرار داده و راهکارهای مناسب برای افزایش تاب‌آوری آبی پیشنهاد دهد.

مقدمه

بیشتر مشکلات آب جهان و راه‌حل‌های آنها، مستقیماً به سیاست‌ها و حکمرانی،

چه به‌طور خاص در حوزه آب و چه به‌طور کلی، مربوط می‌شود [۲]. کشور ایران در حالی‌که نسبت به اکثر کشورهای خاورمیانه از سیستم مدیریت آب پیشرفته‌تری برخوردار است، ولی همچون اکثر آن‌ها با بحران جدی دست و پنجه نرم می‌کند. دولت، تغییر اقلیم، خشکسالی‌های پایایی و حتی تحریم‌های بین‌المللی را مقصر می‌داند و بر این باور اعتقاد دارد که این کمبود دوره‌ای است [۱]. کشاورزی، که حدود ۹۰ درصد آب ایران را مصرف می‌کند، باید متحول شود [۳].

چالش‌های حکمرانی آب در ایران

مدیریت منابع آبی در ایران گرفتار مشکلات عمیقی است که از ساختارهای نهادی ناکارآمد نشأت می‌گیرد. نبود هماهنگی بین نهادهایی مثل وزارت

نیرو و سازمان حفاظت محیط زیست، سیاست‌گذاری منسجم را مختل کرده است [۱]. لازم به ذکر است تعداد سازمان‌ها و

نهادهایی که به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم با موضوع آب در ایران مرتبط هستند کم نیست و هماهنگی بین آن‌ها قطعاً کار ساده‌ای هم نیست. به تعدادی از نهادها و سازمان‌هایی که مستقیم یا غیر مستقیم با آب مرتبط هستند در جدول شماره (۱) اشاره شده است.

سدسازی‌های بی‌رویه، همچون سد گتوند در حوضه کارون، در استان خوزستان، که نه‌تنها منابع آبی را کاهش داده، بلکه با افزایش شوری خاک، کشاورزی این استان را با بحران مواجه کرده و اعتراضات کشاورزان را نیز در پی داشته است [۱]. برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی، با کاهش سالانه حدود ۵ میلیارد مترمکعب، دشت‌هایی مثل همدان، یزد، و کرمانشاه را با خطر فرونشست زمین روبه‌رو کرده است [۳].

تخصیص ناعادلانه آب هم داستان دیگری است. وقتی صنایع آب‌بر، مثل کارخانه‌های فولاد در مناطق کویری یزد،

جدول ۱ - تعدادی از نهادها و سازمان‌های مرتبط با آب در کشور

ردیف	نام نهاد/سازمان	نوع	حوزه مسئولیت
۱	وزارت نیرو	اجرایی-دولتی	مدیریت و توسعه منابع آب، تامین آب شرب شهری و ...
۲	شرکت مدیریت منابع آب	زیر مجموع وزارت نیرو	برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های کلان آبی
۳	شرکت‌های آب منطقه‌ای	استانی-اجرایی	اجرای سیاست‌های وزارت نیرو در استان‌ها
۴	شرکت‌های آب و فاضلاب	زیر مجموعه وزارت نیرو	خدمات‌رسانی آب شرب
۵	وزارت جهاد کشاورزی	اجرایی-دولتی	توسعه کشاورزی، آبیاری
۶	سازمان حفاظت محیط‌زیست	نظارتی-دولتی	حفاظت از منابع آبی و محیط زیست
۷	شورای عالی آب	فردادستگاهی-ملی	سیاست‌گذاری کلان منابع آب
۸	مراکز تحقیقات و مطالعه آب	پژوهشی	مدلسازی، تحلیل و برنامه‌ریزی منابع آب
۹	سمن‌های زیست‌محیطی و منابع طبیعی	غیردولتی	آگاهی بخشی و مشارکت در حفاظت منابع آبی
۱۰	تشکل‌های آب‌بران (کشاورزان)	محل-مشارکتی	بهره‌برداری از منابع آبی
۱۱	دانشگاه‌ها و مراکز علمی	علمی-دانشگاهی	آموزش و پژوهش در حوزه آب

راهکارهای افزایش تاب‌آوری آبی

می‌شود، بنظر می‌رسد با کاهش قابل توجه این مقدار می‌توان بخش قابل توجهی از مشکل را حل کرد. با توجه به آمارهای موجود، اگر به عنوان مثال، مقدار آب تجدید پذیر کشور را سالانه حدود ۱۰۰ میلیارد متر مکعب در نظر بگیریم، حدود ۹۰ میلیارد مترمکعب از آن در بخش کشاورزی مصرف می‌شود که رقم بسیار قابل توجهی است! امروزه بر همگان آشکار است که روش‌های آبیاری سنتی با رانده‌مان پایین معضل بخش کشاورزی است که باعث می‌شود چنین حجمی از آب مصرف شود. لازم به ذکر است بهبود عملکرد بخش کشاورزی بدون افزایش بی برنامه سطح زیر کشت، موثر خواهد بود. علی‌رغم آنکه شاید واژه "خودکفایی" آن هم به‌صورت کامل در بخش کشاورزی، طی سالیان متمادی، صدمات جبران ناپذیری به منابع آبی کشور وارد کرده است.

بازیافت فاضلاب و استفاده از آب‌های خاکستری هم راهکار دیگری است که می‌تواند موثر واقع شود. در شهرهایی مثل تهران و شیراز، می‌توان از آب خاکستری برای آبیاری فضای سبز یا مصارف صنعتی

برای برون‌رفت از این بحران، مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) راهکاری جامع است که هماهنگی بین بخش‌های کشاورزی، صنعت، و شرب را با مشارکت ذینفعان تقویت می‌کند [۲]. روش‌های آبیاری نوین، مثل آبیاری قطره‌ای، و کشت محصولات کم‌آب‌بر، مثل جو به‌جای برنج در مناطق خشک، می‌تواند هدررفت ۷۰ درصدی آب را کاهش دهد [۳]. مثلاً، در برخی مزارع شمال خراسان، استفاده از حسگرهای پایش هوشمند مصرف آب را بهینه کرده و نتایج خوبی به همراه داشته است. همچنین مشاهده شد که، با استفاده از یک رویکرد تصمیم‌گیری گروهی فراگیر که متشکل از ذینفعان مختلف با تمرکز بر کشاورزان باشد، می‌توان به نتایج مطلوبی در مدیریت پایدار رسید [۳].

با توجه به درصد قابل توجه حدود ۹۰ درصدی آب که در بخش کشاورزی مصرف

استفاده کرد و فشار بر آب‌های زیرزمینی را کم کرد [۴]. پروژه‌های بازیافت، فاضلاب در بندرعباس نمونه موفق از این رویکرد است [۴]. مشارکت جوامع محلی هم نقش مهمی دارد. تجربه پروژه احیای دریاچه ارومیه نشان داد که شوراهای محلی می‌توانند حس مسئولیت‌پذیری را تقویت کرده و اجرای سیاست‌ها را آسان‌تر کنند [۵].

از دیگر راهکارهای موثر که می‌توان از آن به عنوان رویکردی غیرسازهای یاد کرد، ایجاد بازارهای آب است. این رویکرد قادر است انگیزه بهره برداران را برای مصرف بهینه افزایش دهد. تجربه های بین الملل همچون بازار آب در استرالیا نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند تخصیص آب را عادلانه‌تر کند [۶]. به روز رسانی کردن قوانین حقایق و تقویت نقش سازمان‌های مردم‌نهاد نیز امری ضروری است [۵]. سرمایه گذاری در فناوری‌های نوین، مثل سیستم‌های تصفیه پیشرفته و پایش هوشمند قادر است در کارآمد تر کردن مدیریت آب موثر واقع شود [۳]. به‌عنوان مثال، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در راستای پایش تغییرات حوضه‌های آبریز همچون زاینده رود، می‌تواند به برنامه ریزی بهتر کمک کند [۴].

نتیجه‌گیری

بحران آب در ایران، که از ناکارآمدی حکمرانی و سیاست گذاری‌های ناپایدار، فشارهای اقلیمی، و مصرف ناپایدار ناشی شده، نیازمند اصلاحات فوری است. مدیریت یکپارچه و پایدار، اصلاح حکمرانی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با آب، هماهنگی بین نهادهای و سازمان‌های مرتبط، بازیافت فاضلاب، بازار آب، و مشارکت مردم می‌توانند راه را برای تاب‌آوری آبی هموار کنند.

فشاری که طی سالیان متمادی بر منابع آبی کشور به‌ویژه منابع آب زیر زمینی و آبخوان‌ها بر اثر عدم مدیریت صحیح و پایدار، همچنین سیاست گذاری‌های نامناسب و ناپایدار وارد کرده ایم، بی شک صدمات جبران ناپذیری برای نسل‌های آینده این کشور در پی خواهد داشت.

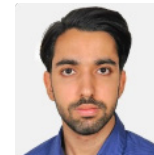
منابع

- Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328.
- UNESCO. (2016). *Integrated water resources management: The Global Water Partnership's approach*. UNESCO Publishing.
- Behrami Nasab, M., Firoozzare, A., Dourandish, A., Sabouhi, M., & Ghorbani, M. (2024). Group decision-making of agricultural stakeholders for sustainable groundwater management: A case study of North Khorasan. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 38(4), 443–460.
- Nazari, R., Eslamian, S., & Khanbilvardi, R. (2018). Water reuse and sustainability in arid regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12), 736.
- Khatami, S. S., Bozorgmehr, K., Zarrin, A., & Fal Soleiman, M. (2022). Analysis of water resource management studies in Iran and the world. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 251–271.
- Vahidizadeh, S., Forohar, L., & Kerachian, R. (2018). A comparative study of international water market experiences. *Iranian Water Resources Research*, 14(4), 184–197.

کلام آخر

بحران آب و خشکسالی، طنین زخم کهنه‌ای است که بی توجهی دیروزمان آن را عمیق‌تر ساخته است. آنچه امروز از آب شنیده می‌شود، نه صدایی تازه، بلکه پژواک زخمی است که سال‌ها نادیده‌اش گرفتیم.

کاربرد سنجش از دور در مدیریت منابع آب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در ایالات متحده



سیدمهدی سالارخراسانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران

چکیده

سنجش از دور به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت منابع آب مطرح است و به ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی کاربردهای فراوانی دارد. این مقاله مروری به بررسی علمی و جامع نقش سنجش از دور در مدیریت منابع آب در ایالات متحده می پردازد. ابتدا کاربردهای کلیدی سنجش از دور در پایش بارش، تبخیر-تعرق، پوشش گیاهی، منابع آب سطحی و زیرزمینی و پیش بینی خشکسالی مرور می شود. سپس چالش های اصلی از جمله دقت داده ها، دسترسی به تصاویر ماهواره ای، نیاز به اعتبارسنجی میدانی و محدودیت های فنی و نهادی بررسی می شوند. در ادامه، افق های آینده و نوآوری های تکنولوژیک مانند به کارگیری هوش مصنوعی، ماهواره های نسل جدید و ادغام داده های سنجش از دور با داده های میدانی و مدل های عددی مطرح می شوند. در این مطالعه تمرکز جغرافیایی بر ایالات متحده است و مثال های موری واقعی مورد اشاره قرار می گیرند. نتایج نشان می دهد که سنجش از دور می تواند

شکاف های بزرگ داده ای در نظارت بر منابع آب را تا حدی کاهش دهد، اما موفقیت آن مستلزم توجه به نیازهای فنی، دسترسی به داده های با کیفیت، و همکاری سازمان های مرتبط است. در نهایت، پیشنهادهایی برای پژوهش های آینده و توسعه سامانه های یکپارچه برای مدیریت هوشمند منابع آب ارائه شده است.

مقدمه

تغییرات اقلیمی و افزایش نوسان های هیدرولوژیکی، چالش های جدی برای مدیریت منابع آب در ایالات متحده ایجاد کرده است. کاهش بارش در برخی مناطق، افزایش دمای هوا و تبخیر-تعرق بالاتر و وقوع خشکسالی های پایایی، به همراه رشد جمعیت و افزایش تقاضای آب، نیاز به ابزارهای نوین برای پایش و مدیریت منابع آب را دوچندان کرده است. سنجش از دور ماهواره ای به دلیل پوشش وسیع فضایی، تکرارپذیری زمانی و تهیه داده های همگن مکانی، می تواند در تکمیل و حمایت از شبکه های پایش زمینی نقش مؤثری

کاربردهای سنجش از دور در مدیریت منابع آب

نظارت بر بارش

یکی از مهم ترین کاربردهای سنجش از دور در حوزه آب، تخمین بارش سطح منطقه ای است. مأموریت های ماهواره ای نظیر TRMM و GPM داده های تقریبی بارش را به صورت روزانه و پوشش جهانی فراهم می کنند. به عنوان مثال، شبکه (تجمع چندماهواره ای GPM) با ترکیب داده های دهه ماهواره سنجشی، توزیع زمانی-مکانی بارش را ارائه می دهد. این داده ها در کشورهایی مانند ایالات متحده برای بهبود پیش بینی رواناب و مدیریت سیلاب به کار می رود. با این حال، دقت این برآوردها در مناطق کوهستانی یا بارش های شدید گاهی محدود است و نیاز به ترکیب با شبکه های رادار زمینی و مدل های هواشناسی دارد. از سوی دیگر، رادارهای زمینی مانند NEXRAD میزان بارش را ردیابی می کنند ولی پوشش و قابلیت اندازه گیری بارش متراکم را ندارند؛ در این زمینه سنجش از دور ماهواره ای می تواند جایگزین یا مکمل داده های زمینی باشد (به عنوان مثال برای مانیتورینگ گسترده مناطق نیمه خشک). استفاده از مجموعه داده های سنتز ماهواره ای بارش، نقش مهمی در مدل های پیش بینی خشکسالی و مدیریت منابع آب در حوضه های مختلف آمریکا داشته است [۴-۶].

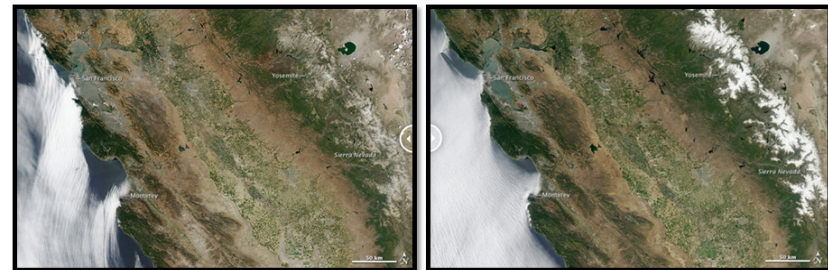
تخمین تبخیر-تعرق

تبخیر-تعرق (ET) فرآیندی کلیدی در تراز آبی و بودجه آب زیرسطحی است. سنجش از دور امکان تخمین مکانی تبخیر-تعرق را با استفاده از اندازه گیری دمای

سطح زمین و اندیس های پوشش گیاهی فراهم می سازد. به عنوان مثال، سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) محصول «تبخیر-تعرق واقعی لندست» را ارائه کرده که بر اساس مدل انرژی سطح (SEBAL) (METRIC) و دیگر روش ها) از داده های لندست ET را به دست می آورد. این محصول برای محاسبه بودجه آب حوضه، برآورد مصرف آب کشاورزی، پایش خشکسالی و محاسبه عملکرد محصولات کشاورزی کاربرد دارد. همچنین مأموریت های ماهواره ای دیگر مانند MODIS (با روش هایی مشابه) و سنجنده ECOSTRESS (بر روی ایستگاه فضایی) برای تخمین حرارتی تبخیر-تعرق استفاده می شوند. این اطلاعات فضایی کمک می کند تا مدیران منابع آب، مناطق پرمصرف و زمان های اوج مصرف را شناسایی کنند و سیاست های تخصیص آب را بر اساس آن تنظیم نمایند [۷-۹].

پایش پوشش گیاهی

پوشش گیاهی و شاخص های آن (مانند NDVI یا EVI) نقش مهمی در مدیریت آب دارند. گیاهان تحت شرایط خشکسالی از خود نشان رنگ متفاوتی در ناحیه طیفی نزدیک-مادون قرمز نشان می دهند که از ماهواره هایی مانند MODIS، لندست و سنتینل قابل اندازه گیری است. با تحلیل تغییرات NDVI می توان استرس زراعی و خشکی را تشخیص داد و به صورت مکانی زمان بندی خشکسالی را ردیابی نمود. برای مثال، کاهش چشمگیر NDVI در کالیفرنیا در دوره خشکسالی ۲۰۱۳-۲۰۱۴ (مشاهده شده توسط حسگر



شکل ۱ - جفت تصاویر فوق، که توسط طیف سنج تصویربرداری با تفکیک متوسط (MODIS) روی ماهواره آکوا ناسا تهیه شده اند، نمایی گسترده از وضعیت منطقه را نشان می دهند. تصویر سمت راست در تاریخ ۲ ژوئیه ۲۰۱۱ و تصویر سمت چپ در ۲۵ ژوئن ۲۰۱۴ ثبت شده است، درست در آغاز آخرین دوره خشکسالی. مقایسه این دو تصویر تغییرات قابل توجه در چشم انداز را آشکار می سازد [۱۰].

MODIS) نشان داد که پوشش گیاهی از بین رفته و بسیاری از اراضی کشاورزی بی ثمر شده اند. شکل ۱ نمایی ماهواره ای از ایالت کالیفرنیا در سال ۲۰۱۴ را نشان می دهد که خشکسالی شدید را با کاهش پوشش گیاهی توصیف می کند. این گونه تصاویر به مدیران اجازه می دهد به سرعت مناطق بحرانی را شناسایی کنند و منابع آبی برای آن بخش ها متمرکز نمایند. استفاده از نقشه های پوشش گیاهی همچنین در مدل های هیدرولوژیکی برای برآورد تبخیر-تعرق و پیش بینی رواناب نقش دارد. به طور کلی، سنجش از دور پوشش گیاهی، ابزاری ارزشمند برای یکپارچه سازی اطلاعات اکولوژیک و هیدرولوژیک در مدیریت منابع آب است [۱۰-۱۳].

نظارت منابع آب سطحی

ماهواره ها با ابزارهای نوری و راداری خود می توانند وسعت، وضعیت و سطح آب های سطحی (رودها، دریاچه ها، سدها) را ردیابی کنند. به عنوان مثال، مشاهدات لندست و سنتینل نشان داده اند که سطح و مساحت مخازن و دریاچه ها با نوسانات فصلی و خشکسالی تغییر می کند. مأموریت جدید SWOT نیز در آینده به طور مستقیم ارتفاع سطح آب رودها، دریاچه ها و مخازن را با دقت بالا اندازه گیری خواهد کرد. علاوه بر این، ارتفاع سنجی راداری (مانند ماهواره های Jason-۳، Sentinel-۳)، می تواند جریان رودخانه ها و سطح دریاچه ها را تخمین بزند. تصاویر ماهواره ای نوری (Landsat)، نیز با تکنیک های پردازش تصویر، مساحت وسعت آب را برآورد

از فضا تا زمین

می‌کنند. این اطلاعات برای ارزیابی تغییرات حجم مخازن، تحلیل تأثیر خشکسالی بر منابع سطحی و پیش‌بینی سیلاب‌ها کاربرد دارد. به‌عنوان مثال، مطالعات در حوضه می‌سی‌سی‌پی با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای توانسته‌اند نوسانات حجم سدها و الگوی رواناب را تا حدی پیش‌بینی کنند. همچنین پیش‌پلادرنگ سیلاب با ترکیب تصاویر راداری و نوری ممکن است به کاهش خسارات ناشی از سیل کمک کند [۱۴-۱۸].

پایش منابع آب زیرسطحی

مهم‌ترین نوآوری در رصد منابع آب زیرسطحی در دو دهه اخیر، مأموریت GRACE و جانشین آن GRACE-FO بوده‌اند. این ماهواره‌ها با اندازه‌گیری تغییرات میدان ثقل زمین، امکان استنتاج تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی و سایر اجزای تراز آبی را فراهم کرده‌اند. بررسی داده‌های GRACE طی بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که ذخایر آب زیرزمینی در حوضه Great Basin نزدیک به ۱۶.۵ مایل مکعب (معادل ۷/۶۸ کیلومتر مکعب) کاهش یافته است (شکل ۲)؛ رقمی که تقریباً برابر با دو سوم مصرف سالانه ایالت

ساخته می‌شود، مستقیماً خشکی سطح را اندازه می‌گیرد و نیازی به داده‌های بارش ندارد. این شاخص در ایالات متحده توسط NOAA برای پایش خشکسالی کشاورزی به‌کار می‌رود. همچنین نقشه‌های پوشش گیاهی سالانه و تراکم گیاهی امکان رصد روند خشک‌سالی بلندمدت را فراهم می‌آورد. ترکیب این شاخص‌ها با داده‌های هواشناسی (بارش، دما) و مدل‌های پیش‌بینی اقلیم، الگوهای خشکسالی آتی را تخمین می‌زند. به این ترتیب، سنجش از دور نقش مهمی در پیش‌بینی و پایش خشکسالی‌های چند ساله در غرب آمریکا داشته و به مدیریت بهتر منابع آبی و واکنش‌های سیاست‌گذارانه کمک کرده است [۲۵-۲۲].

چالش‌ها

هرچند سنجش از دور مزایای بسیاری دارد، استفاده عملی از آن در مدیریت منابع آب با چالش‌هایی مواجه است. نخستین چالش دقت و محدودیت‌های داده‌ای است. سنجش از دور اغلب دقت کمتری نسبت به اندازه‌گیری مستقیم در محل دارد؛ برای مثال داده‌های بارش ماهواره‌ای ممکن است خطاهایی در مناطق کوهستانی یا در هنگام طوفان شدید داشته باشند. وضوح مکانی تصاویر ماهواره‌ای نیز محدود است؛ هرچند نسل جدید ماهواره‌ها وضوح فضایی بالا را فراهم کرده‌اند، اما پوشش جهانی با وضوح بالا معمولاً هزینه‌بر است. همچنین تصحیح جو و اثرات اتمسفر مانند ابر، هواویز بر مشاهدات ضروری است که خود پیچیدگی‌هایی را می‌افزاید. آلاینده‌های اتمسفری و پوشش ابری می‌توانند مانع رصد مداوم شوند؛ به‌عنوان نمونه، مشاهدات نوری در طول ایام ابری قابل استفاده نیستند و نیاز به جایگزین‌های راداری است [۲۶].

پیش‌بینی و پایش خشک‌سالی

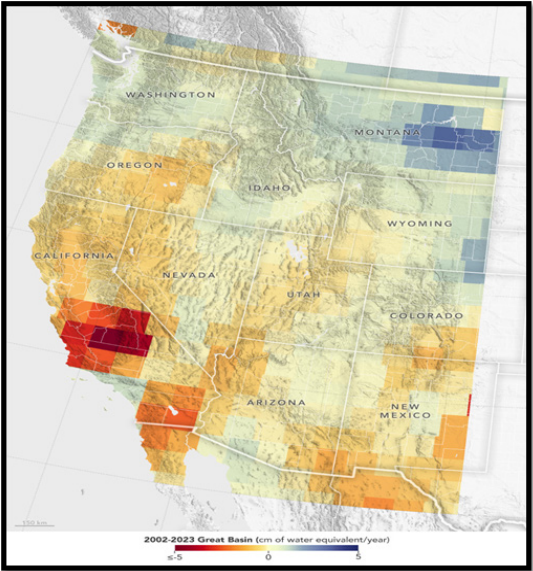
خشکسالی به عنوان یکی از پیامدهای مهم تغییر اقلیم، نیازمند سیستم‌های پایش و هشدار زودهنگام است. سنجش از دور با ارائه شاخص‌های نوده گیاهی مانند(NDVI)، دمای سطح زمین (LST)، رطوبت خاک حسگر (SMAP) و شاخص‌های تخییر-تعرق مانند ESI ابزارهای متنوعی برای شناسایی خشک‌سالی فراهم کرده است. شاخص تخییر-تشی (ESI) که بر اساس دمای سطح زمین از داده‌های سنجنده‌های حرارتی ماهواره‌ای

و پردازش حجم عظیم داده‌های ماهواره‌ای نیازمند زیرساخت محاسباتی قدرتمند است که در بسیاری از سازمان‌های محلی و ایالتی وجود ندارد [۲۷].

سومین چالش، نیاز به اعتبارسنجی میدانی است. برای اطمینان از صحت برآوردهای سنجش از دور، لازم است داده‌های ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های زمینی همسان‌سازی شوند. این امر در بسیاری از مناطق دورافتاده یا بیابانی دشوار است. همان‌طور که مطالعات نشان داده‌اند، برای هر فرایند هیدرولوژیکی مورد پایش، لازم است داده‌های میدانی از قبیل ایستگاه‌های باران‌سنجی، مقیاس‌های تخییر-تعرق و نمونه‌های کیفیت آب در اختیار باشد تا مدل‌های سنجش از دور را کالیبره و اعتبارسنجی کرد. با این حال، شبکه‌های مشاهده‌ی میدانی در ایالات متحده نیز نقاط کور زیادی دارند که نتیجه آن کاهش دقت برآوردهاست [۲۸].

چالش بعدی محدودیت‌های فنی است. هر سنجنده ماهواره‌ای محدودیت‌های خاص خود را دارد؛ به‌طور مثال، سنجنده‌های نوری نمی‌توانند زیر پوشش ابر را ببیند، سنجنده‌های حرارتی وضوح مکانی پایین‌تری دارند، و سنجنده‌های راداری شاید قدرت تفکیک کمی برای آب‌های سطحی داشته باشند. علاوه بر این، دوره بازگشت ماهواره (revisit time) نیز گاهی اوقات بلند است و امکان پایش پیوسته در بازه‌های کوتاه را محدود می‌کند. فناوری‌های جدید مانند ماهواره‌های پربسامد (frequent revisit) و کوچک‌ماهواره‌ها (CubeSat) در حال توسعه‌اند تا این محدودیت‌ها را برطرف کنند [۲۹].

چالش نهادها و همکاری بین‌بخشی نیز نباید نادیده گرفته شود. مدیریت منابع آب در آمریکا شامل چندین آژانس فدرال، ایالتی، محلی و مردمی است. موفقیت پروژه‌های سنجش از دور نیازمند هماهنگی بین سازمان‌ها، اشتراک‌گذاری داده‌ها و آموزش کارشناسان است. در برخی مناطق، کمبود تخصص فنی و اعتبارات مالی مانع استفاده گسترده از داده‌های سنجش از دور شده است. همچنین موانع قانونی و



شکل ۲ – تغییرات ذخیره آب‌های زیرزمینی در حوضه بزرگ‌حوضه (Great Basin) بین آوریل ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۲۳. کاهش شدید آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در بخش‌هایی از جنوب کالیفرنیا، بسیار فراتر از کاهش منابع سطحی است و نشان‌دهنده تأثیر خشکسالی شدید و افزایش برداشت آب در این منطقه است. داده‌ها از مأموریت‌های GRACE و GRACE-FO ناسا و آژانس فضایی آلمان (DLR) استخراج شده‌اند [۱۹].

مالکیت داده‌های خصوصی (مانند تصاویر ماهواره‌ای تجاری) ممکن است چالش‌هایی برای دسترسی و استفاده ایجاد کند [۳۰].

از مدار تا مزرعه

در مجموع، با وجود این چالش‌ها که در مطالعات پیشین نیز بر آن‌ها تأکید شده است، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش از دور و افزایش دسترسی به داده‌های عمومی مانند سرویس‌های ابری و پلتفرم‌های باز مانند Google Earth Engine امیدبخش بهینه‌سازی بیشتر این ابزارها در آینده است.

افق‌های آینده و نوآوری‌ها

همچنین یکپارچه‌سازی داده‌های
سنجش از دور با داده‌های زمینی و مدل‌ها
رشد رو به پیشی دارد. استفاده از شبکه‌های
انتزنت اشیا (IoT) و حسگرهای زمینی
پیشرفته، داده‌های میدانی را در اختیار
سامانه‌های مبتنی بر پر قدرت می‌دهد. این
داده‌ها می‌توانند با مشاهده فضایی در
مدل‌های پیشرفته آب و هوا و هیدرولوژی
ادغام شوند تا دقت پیش‌بینی منابع آب
و خشکسالی افزایش یابد. به‌عنوان مثال،
یکپارچه‌سازی داده‌های ابراهای سنسور
دوربرد هوشناسی با تصاویر ماهواره‌ای و
اندازه‌گیری‌های برش‌های آب می‌تواند باورود
بهتر از روناب در حوضه‌های آبی ارائه
دهد [۳۳].

در نهایت، فناوری‌های پردازش آبري و تحليل داده‌هاي بزرگ (Big Data) فست‌هاي جديدي فراهم کرده‌اند. پلتفرم‌هاي مانند Google Earth Engine و NASA Earthdata امکان تحليل هم‌زمان چندين لايه اطلاعاتي (بارش، رطوبت خاک، دما، پوشش گياهي و غيره) را روي ابر فراهم کرده‌اند. اين ابزارها به دانشمندان و مديران آب اجازه مي‌دهند تا با کم‌ترين نياز به زيرساخت محاسباتي محلي، پروژه‌هاي پايش گسترده‌اي را اجرا کنند [۳۴، ۳۵].

تلفیق کرده و تصمیم‌گیری دقیق‌تری را برای تخصیص منابع با فراهم می‌آورند. این مدیریت نوین تحت تأثیر هوش مصنوعی، سیستم‌های متصل و رویکردهای داممحور خواهد بود، به‌نحوی که منابع آب به شکلی پویا و با توجه به شاخص‌های اقلیمی بهینه مصرف شوند.

اندازه‌گیری گردد. در ایالات متحده، سنجش از دور کمک در دست راست تا شکاف‌های عمیق موجود در شبکه‌های نظارتی بر شهود و رهنمائی خشکسالی و تنش این بهتر رصد شوند. با این وجود، چالش‌هایی همچون نیاز به داده‌های با وضوح بالا، تصحیح جزو، اعتبارسنجی میدانی و همکاری نهادهای مانع استفاده گسترده‌تر شده است. رفع این موانع با توسعه فناوری‌های جدید (ماهواره‌های پیشرفته، هوش مصنوعی) و تقویت ظرفیت نهادهای ممکن خواهد بود. مطالعات موردی در آمریکا نشان داده است که ادغام داده‌های ماهواره‌ای در برنامه‌های مدیریت آب (مانند تریس‌تک) مانع به صرف و طراحی زیرساخت‌ها) منجر به

انتظار می‌رود که سامانه‌های یکپارچه و مبتنی بر داده (شامل سنجش از دور، سنسورهای زمینی و مدل‌های عددی) نقش محوری در انطباق با تغییر اقلیم و اطمینان از امنیت آب در سراسر کشور داشته باشند.

منابع

[1] Gleick, P. H. (2000). Water: the potential consequences of climate variability and change for the water resources of the United States. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security.

[2] U.S. Geological Survey. (Year). National Hydrography Dataset (NHD): database of streams and lakes feature, USA – includes over 7.5 million miles of streams/ivers and 6.5 million lakes/ponds.

[3] U.S. Environmental Protection Agency. (Year). Supplemental Module: Monitoring and Assessment. Under the Clean Water Act: approximately 20% of streams/ivers, 40% of lakes, and 30% of bays/estuaries are regularly monitored.

[4] Nakamura, K. (2021). Progress from TRMM to GPM. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 99(3), 697-729.

[5] Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K. L., Joyce, R. J., Kidd, C., ... & Xie, P. (2020). Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG). In *Satellite precipitation measurement: Volume 1* (pp. 343-353). Cham: Springer International Publishing.

[6] Matyas, C. J. (2010). Use of ground-based radar for climate-scale studies of weather and rainfall. *Geography Compass*, 4(9), 1218-1237.

[7] Senay, G. B., Budde, M. E., & Verdin, J. P. (2011). Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. *Agricultural Water Management*, 98(4), 606-618.

[8] Fisher, J. B., Lee, B., Purdy, A. J., Halverson, G. H., Dohlen, M. B., Cawse-Nicholson, K., ... & Hook, S. (2020). ECOSTRESS: NASA's next generation mission to measure evapotranspiration from the international space station. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR026058.

[9] Hu, T., Mallick, K., Hulley, G. C., Planells, L. P., Götsche, F. M., Schlerf, M., ... & Hook, S. (2022). Continental-scale evaluation of three ECOSTRESS land surface temperature products over Europe and Africa: Temperature-based validation and cross-satellite comparison. Remote Sensing of Environment, 282, 113296.

[10] NASA Earth Observatory. (2014, July 17). The Golden-Brown State. NASA. Retrieved August 14, 2025, from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/84032/the-golden-brown-state>

[11] Yan, E., Wang, G., Lin, H., Xia, C., & Sun, H. (2015). Phenology-based classification of vegetation cover types in Northeast China using MODIS NDVI and EVI time series. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 489-512.

[12] Okin, G. S., Dong, C., Willis, K. S., Gillespie, T. W., & MacDonald, G. M. (2018). The impact of drought on native southern California vegetation: Remote sensing analysis using MODIS-derived time series. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(6), 1927-1939.

[13] Shukla, S., M. Safeeq, A. AghaKouchak, K. Guan, and C. Funk (2015), Temperature impacts on the water year 2014 drought in California. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4384–4393. doi: 10.1002/2015GL063666.

[14] Fu, L. L., Alsford, D., Rodriguez, E., Morrow, R., Mognard, N., Lambin, J., ... & Lafon, T. (2009). The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) mission: Spaceborne radar interferometry for oceanographic and hydrological applications. *Proceedings of OCEANOBS*, 9, 21-25.

[15] Bijesh, T. V., & Narasimhamurthy, K. N. (2020). Surface water detection and delineation using remote sensing images: A review of methods and algorithms. *Sustainable Water Resources Management*, 6(4), 68.

[16] Mason, D. C., Davenport, I. J., Neal, J. C., Schumann, G. J. P., & Bates, P. D. (2012). Near real-time flood detection in urban and rural areas using high-resolution synthetic aperture radar images. *IEEE*

transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(8), 3041-3052.

[17] Cretaux, J. F., Berge-Nguyen, M., Calmant, S., Jamangulova, N., Satylkanov, R., Lyard, F., ... & Bonnefond, P. (2018). Absolute calibration or validation of the altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan). *Remote Sensing*, 10(11), 1679.

[18] Biancamaria, S., Schaeedele, T., Blumstein, D., Frappart, F., Boy, F., Desjonquères, J. D., ... & Niño, F. (2018). Validation of Jason-3 tracking modes over French rivers. *Remote Sensing of Environment*, 209, 77-89.

[19] NASA Earth Observatory. (2023, December 19). Groundwater declines in the U.S. Southwest. NASA. Retrieved August 14, 2025, from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/152970/groundwater-declines-in-the-us-southwest>

[20] The Guardian. (2025, May 27). Colorado River basin has lost nearly the equivalent of an underground Lake Mead. Retrieved August 14, 2025, from <https://www.theguardian.com/us-news/2025/may/27/colorado-river-basin-nasa-study>

[21] NASA's Goddard Space Flight Center. (2024, August 8). NASA Satellites Find Snow Didn't Offset Southwest US Groundwater Loss. Retrieved from NASA Earth Observatory website.

[22] Su, Z., He, Y., Dong, X., & Wang, L. (2016). Drought monitoring and assessment using remote sensing. In *Remote sensing of hydrological extremes* (pp. 151-172). Cham: Springer International Publishing.

[23] Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., & Kustas, W. P. (2011). Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *Journal of Climate*, 24(8), 2025-2044.

[24] Lee, S. J., Kim, N., & Lee, Y. (2021). Development of integrated crop drought index by combining rainfall, land surface temperature, evapotranspiration, soil moisture, and vegetation index for agricultural drought monitoring. *Remote Sensing*, 13(9), 1778.

[25] Zhan, X., Fang, L., Yin, J., Schull, M., Liu, J., Hain, C., ... & Kalluri, S. (2021). Remote sensing of evapotranspiration for global drought monitoring. *Global Drought and Flood: Observation, Modeling, and Prediction*, 29-46.

[26] Lettenmaier, D. P., & Famiglietti, J. S. (2006). Hydrology: Water from on high. *Nature*, 444(7119), 562–563.

[27] Schultz, G. A., & Engman, E. T. (2000). Remote Sensing in Hydrology and Water

Management. Springer.

[28] McCabe, M. F., et al. (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3879–3914.

[29] Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2013). Water in the Balance. *Science*, 340(6138), 1300–1301.

[30] USGS. (2020). Remote Sensing for Water Resources Management. United States Geological Survey.

[31] Srinivasan, M., Andral, A., Dejus, M., Hossain, F., Peterson, C., Beighley, E., ... & Houperl, L. (2015). Engaging the applications community of the future surface water and ocean topography (SWOT) mission. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, 1497-1504.

[32] Lopez, T., Al Bitar, A., Biancamaria, S., Güntner, A., & Jäggi, A. (2020). On the use of satellite remote sensing to detect floods and droughts at large scales. *Surveys in Geophysics*, 41(6), 1461-1487.

[33] Babu, S. M., Lakshmi, A. J., & Rao, B. T. (2015, April). A study on cloud based Internet of Things: CloudIoT. In 2015 global conference on communication technologies (GCCT) (pp. 60-65). IEEE.

[34] Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350.

[35] Suman, S., Maurya, S., Pandey, V., Srivastava, P. K., & Gupta, D. K. (2025). Cloud computing platforms–based remote sensing big data applications. Google Earth Engine and Artificial Intelligence for Earth Observation, 77-88.

تحلیل نقش اکوسیستم تالابی در حفظ کمیت و کیفیت منابع آب در مواجهه با بحران آب



علی حاجی الیاسی

کاندیدای دکتری مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشگاه تهران

مقدمه

می‌شوند، نه تنها مخازن طبیعی آب هستند، بلکه در تنظیم جریان‌های آبی، تصفیه آلاینده‌ها و حمایت از تنوع زیستی مؤثرند [۴]. تالاب‌ها از منظر کنوانسیون رامسر به‌عنوان «پهنه‌های باتلاقی، مردابی، تورب‌زاری یا آبی، طبیعی یا مصنوعی، دائمی یا موقت، با آب راکد یا جاری، شیرین، لب‌شور یا شور و حتی آب‌های دریایی با عمق کمتر از ۶ متر در پایین‌ترین جزر» شناخته می‌شوند. این تعریف، طیفی از تالاب‌های داخلی (دشت‌های سیلابی، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها) تا ساحلی را در بر می‌گیرد و از همان ابتدا «آب» را عامل کنترل‌کننده ساختار و کارکرد این بوم‌سازگان‌ها می‌داند [۵]. به صورت کلی در چهارچوب خدمات اکوسیستمی، تالاب‌ها با سه محور کلیدی ارزش‌آفرینی می‌کنند: (۱) تنظیم کمی آب در مقیاس حوضه (کاهش دبی اوج سیلاب، افزایش زمان‌ماند رواناب، تغذیه آب‌زمین و پایداری جریان پایه)، (۲) ارتقای کیفیت آب از طریق ته‌نشینی رسوبات، جذب/رسوب‌گذاری فسفر و تجزیه نیترژن و (۳) تنظیم اقلیم محلی و منطقه ای، به‌ویژه از رهگذر ذخیره کربن در تورب‌زارها و «کربن آبی» در تالاب‌های ساحلی [۲]. در شکل ۱ شمایی از خدمات اکوسیستمی تالاب نشان داده شده است.

با وجود این ظرفیت‌ها، شواهد جهانی نشان می‌دهد تالاب‌ها در سده اخیر تحت فشار بی‌سابقه‌اند. تغییر اقلیم از یک سو و فعالیت‌های انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، اتکا به اقتصاد مبتنی بر و توسعه‌های شهری و زیر ساخت‌ها و کشاورزی و... همگی باعث شده‌اند تا سیستم هیدرواکولوژیکی تالاب‌ها تحت خطر باشند [۳ و ۶]. این روند در ۱۰۰ سال گذشته در تمامی مناطق جهان منجر به از بین رفتن ۵۰ درصد تالاب‌های جهان و در خطر بودن مابقی آنها شده است [۲]. تالاب‌ها رعایت نمی‌شود و از سوی دیگر گرمایش جهانی منجر به تخریب بیش از حد از آب تالاب می‌شود در عین حال که بارندگی نیز از حد نرمال خود پایین‌تر است و همچنین سوزاندن گیاهان تالابی، چرا احشام و تغییر کاربری‌ها از تالاب به زمین‌های کشاورزی منجر به نابودی حیات وحش تالاب و تضعیف خدمات اکوسیستمی آن می‌شود [۴-۶]. هم‌زمان، افت آب‌های زیرزمینی به عنوان یک منبع مهم تامین آب تالاب، فشار مضاعفی بر تالاب‌ها به‌ویژه تالاب‌های متصل به آبخوان تحمیل کرده است. مطالعه‌ی جهانی سال ۲۰۲۴ با داده‌های ۱۰هزار چاه در ۱۶۹۳ آبخوان نشان داد کاهش تراز آب‌زمین در سده ۲۱

بحران آب یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و توسعه‌ای قرن بیست‌ویکم است. بر اساس گزارش توسعه جهانی آب سازمان ملل متحد (۲۰۲۴)، بیش از دو میلیارد نفر در جهان به منابع آب سالم و کافی دسترسی پایدار ندارند و پیش‌بینی می‌شود که تحت تأثیر تغییر اقلیم، رشد جمعیت و فشارهای توسعه‌ای، تا سال ۲۰۵۰ تقاضا برای آب شیرین بیش از ۳۰ درصد افزایش یابد[۱]. این در حالی است که چرخه‌ی هیدرولوژیک در بسیاری از مناطق دنیا با تغییرات شدیدی روبه‌رو شده است. خشکسالی‌ها طولانی‌تر شده‌اند و تغییرات بارش‌ها نامنظم‌تر توزیع می‌شوند و سیلاب‌های ناگهانی خسارت‌های بیشتری بر جوامع وارد می‌سازند[۲]. از این رو، مدیریت پایدار منابع آب نه تنها یک ضرورت اکولوژیک، بلکه یک الزام اجتماعی، اقتصادی و حتی امنیتی به شمار می‌آید. در چنین شرایطی، تالاب‌ها جایگاهی کلیدی پیدا می‌کنند. تالاب‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی-خاکی، نقش حیاتی در چرخه هیدرولوژیکی و حفظ تعادل زیست‌محیطی ایفا می‌کنند [۳]. این اکوسیستم‌ها، که شامل مرداب‌ها، باتلاق‌ها، دریاچه‌ها و مناطق ساحلی



شکل ۱- خدمات اکوسیستمی تالاب‌ها از منظر کمی، کیفی و محیط زیستی [۲]

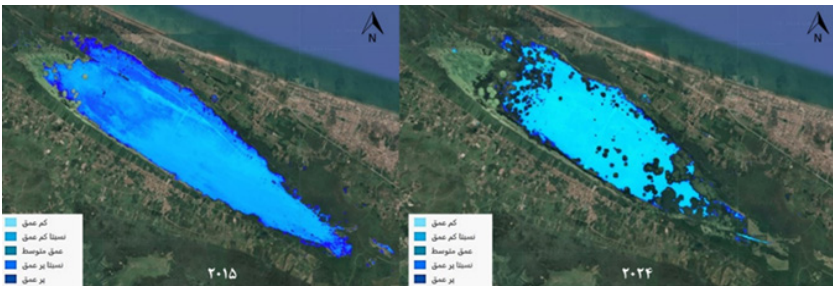
یک بحران زیست‌محیطی محسوب نمی‌شود، بلکه به یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده توسعه پایدار در سطح جهانی بدل شده است. رشد سریع جمعیت، شهرنشینی فزاینده، توسعه کشاورزی آبی و فشارهای صنعتی سبب شده‌اند تقاضا برای منابع آب شیرین با شتابی بی‌سابقه افزایش یابد [۱]. در برخی مناطق مانند بخش وسیعی از خاورمیانه و آفریقا تنش آبی و بحران آب چشمگیرتر از سایر مناطق جهان است. ایران یکی از کانون‌های اصلی این بحران در مقیاس منطقه‌ای است. میانگین بارش سالانه‌ی ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است؛ رقمی که کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی است [۹]. بر اساس گزارش‌ها و مطالعات، بیش از ۸۵ درصد پهنه‌ی ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و سرانه‌ی منابع آب تجدیدپذیر کشور از حدود ۷۰۰۰ مترمکعب در دهه‌ی ۱۹۶۰ به کمتر از ۱۵۰۰ مترمکعب در سال‌های اخیر رسیده است؛ سطحی که مرز «تنش آبی شدید» محسوب می‌شود [۱ و ۹]. برداشت بیش از حد از آب‌زمین، توسعه بی‌رویه‌ی کشاورزی آبی، سدسازی گسترده و ضعف در مدیریت تقاضا، همگی باعث شده‌اند بسیاری از رودخانه‌ها و سفره‌های زیرزمینی ایران با افت جدی روبه‌رو شوند. پیامد این روند یا کوچک‌شدن تالاب‌های مهمی چون دریاچه ارومیه، هامون،

صالحیه، گاوخونی و انزلی به‌وضوح نمایان است؛ تالاب‌هایی که خشکیده شدنشان نه‌تنها معیشت میلیون‌ها نفر را تهدید کرده، بلکه به بحران‌های ثانویه‌ای چون جردوغیر، مهاجرت اجباری و کاهش امنیت غذایی نیز دامن زده است [۱۰]. در شکل ۲ روند خشک شدن پهنه آبی تالاب انزلی در دو دهه گذشته نشان داده شده است.

برای مقابله با بحران آب، مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها پیشنهاد و اجرا شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی، کاهش برداشت از منابع زیرزمینی، مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب در مقیاس حوضه، استفاده از فناوری‌های نوین تصفیه و بازچرخانی فاضلاب، و اصلاح حکمرانی آب اشاره نمود [۱۱]. با این حال، هیچ راه‌حلی به تنهایی کافی نیست و اتکا صرف به زیرساخت‌های سخت‌افزاری مانند سد‌ها و انتقال‌های بین‌حوضه‌ای، خود می‌تواند تبعات زیست‌محیطی و اجتماعی سنگینی ایجاد کند. در چنین شرایطی، «راه‌حل‌های طبیعت‌محور» جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. احیا و حفاظت از تالاب‌ها مهم‌ترین و اثربخش‌ترین گزینه در این دسته به شمار می‌آید [۱۲]. تالاب‌ها همانند اسفنج‌های طبیعی در زمان بارش‌های شدید بخشی از رواناب را ذخیره کرده و

بحران جهانی آب و راه حل آن

در حال حاضر مسئله‌ی آب تنها



شکل ۲ - تغییرات مساحت آب تالاب انزلی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ [۱۵]

خسارات سیلاب را کاهش می‌دهند، در دوره‌های کم‌آبی آب ذخیره‌شده را تدریجاً آزاد کرده و جریان‌های پایه را پایدار می‌سازند [۲ و ۱۰]. همزمان کیفیت آب را با حذف رسوبات و مواد مغذی بهبود می‌بخشند. افزون بر این، تالاب‌ها ذخایر عظیم کربن خاکی‌اند و با مهار انتشار گازهای گلخانه‌ای به کاهش تغییر اقلیم یاری می‌رسانند [۱۰]. بر همین اساس، گزارش ۲۰۲۴ توسعه جهانی آب و اسناد کنوانسیون رامسر هر دو بر نقش کلیدی تالاب‌ها در استراتژی‌های مقابله با بحران آب و سازگاری با تغییر اقلیم تأکید کرده‌اند. در ادامه خدمات اکوسیستمی تالاب از دو منظر اثربخشی آن بر کمیت و کیفیت منابع آب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۵-۳].

خدمات اکوسیستمی تالاب از منظر کمیت

تالاب‌ها به عنوان مخازن طبیعی آب، خدمات اکوسیستمی متعددی در زمینه کمیت منابع آب ارائه می‌دهند. آنها در هنگام بارش‌های شدید و خیزش رودخانه، سطح آب را بر پهنه‌های کم‌شیب می‌گسترانند، سرعت جریان را کاهش می‌دهند و بخشی از موج سیلاب را به‌صورت آب ایستا یا با جریان‌های آرام در خود نگه می‌دارند تا پس از عبور قله، تدریجاً آن را به شبکه‌ی آبراهه بازگردانند و به سطح زیرین خود برای تغذیه آبخوارها

چنین افزایش‌هایی به‌طور مستقیم به کاهش خسارات سیلاب و تقویت تاب‌آوری منابع آب در برابر خشکسالی کمک می‌کند [۱۲ و ۱۳]. در ایران، تالاب‌هایی مانند انزلی و بختگان می‌توانند جریان‌های فصلی را تنظیم کنند و از کاهش سطح آب زیرزمینی جلوگیری نمایند که متأسفانه به دلیل مدیریت نادرست، این دو تالاب در معرض خشک شدن هستند [۲]. این ذخیره سازی آب می تواند از منظر اقتصادی هم برای

حوضه آبخیز سودآور باشد. به طوری که رفتار، کاهش دبی اوج و پایین‌آمدن ارتفاع آب در پایین‌دست و بر طبق مطالعات ذخیره سازی ۳۰ درصدی آب در آبخوان های مناطق نیمه خشک خواهد بود [۱۲-۱۳]. از منظر محیط زیستی - انسانی، این امر منجر به تداوم حیات وحش و گیاهان تالابی و ذخیره سازی مناسب آب به صورت طبیعی میشود. تالاب عملاً آب را در خود و سطح زیرین ذخیره می کند تا در مواقع کم آبی برای بخش کشاورزی و شرب جوامع محلی و منطقه ای، آب ذخیره شده کاملاً در دسترس باشد[۲، ۳ و ۱۳]. در همین راستا و بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط جونز و همکاران در سال ۲۰۱۸ که بروی تالاب های آمریکا انجام شده است، مشخص شده است که احیای تالاب ها در آن منطقه که همراه با بستن موقت مسیرهای رهکش امکان پذیر است، می تواند ظرفیت ذخیره ی آب را تا ۸۰ درصد و در برخی حوضه‌ها حتی تا ۲۵۰ درصد افزایش دهد [۱۴] (شکل ۳).

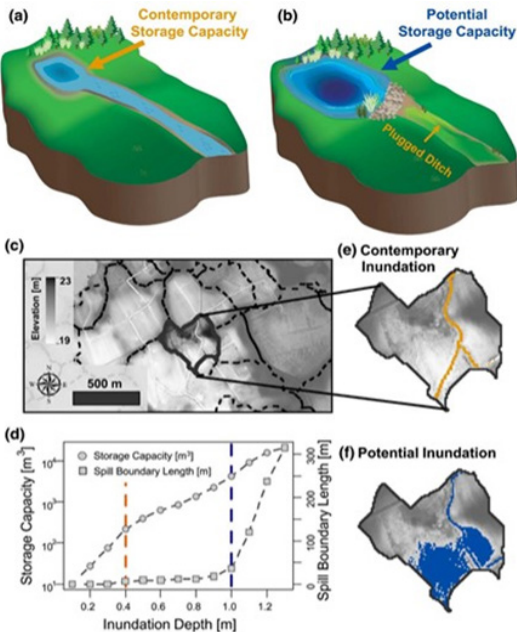
چنین افزایش‌هایی به‌طور مستقیم به کاهش خسارات سیلاب و تقویت تاب‌آوری منابع آب در برابر خشکسالی کمک می‌کند [۱۲ و ۱۳]. در ایران، تالاب‌هایی مانند انزلی و بختگان می‌توانند جریان‌های فصلی را تنظیم کنند و از کاهش سطح آب زیرزمینی جلوگیری نمایند که متأسفانه به دلیل مدیریت نادرست، این دو تالاب در معرض خشک شدن هستند [۲]. این ذخیره سازی وابسته به کشاورزی و تاب آورسازی شهرها

در مواجهه با کم آبی یا بحران های مقطعی آب در فصول خشک و سیلاب ها در فصول پر بارش کمک می‌رسانند.

خدمات اکوسیستمی تالاب از منظر کیفیت

تالاب‌ها به عنوان فیلترهای طبیعی، خدمات اکوسیستمی برجسته‌ای در بهبود کیفیت آب ارائه می‌دهند. فرآیندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی در تالاب‌ها منجر به حذف آلاینده‌ها می‌شود. تالاب مثل یک فیلتر طبیعی بزرگ کار می‌کند. وقتی آب حاوی رسوبات و آغشته به آلاینده ها وارد تالاب می‌شود، سرعتش به واسطه افزایش ضریب زبری کاهش می یابد و فرصت پیدا می‌کند تا ذرات معلق و گل‌ولای ته‌نشین شوند. اینگونه رسوبات کاهش و شفافیت آب بیشتر می شود [۱۰]. از سوی دیگر آلاینده های ورودی به تالاب که از فاضلاب شهری و صنعتی یا حاصل از رواناب های جاری شده از اراضی کشاورزی حاوی سموم و کود شیمیایی هستند، مواد مغذی نظیر نیتروژن و فسفر را وارد آب تالاب ها می کنند که اینها عامل شکوفه‌های جلبکی، بو و طعم بد آب می‌شوند [۱۷]. در تالاب، گیاهها بخشی از این مواد را جذب می‌کنند و خاک تالاب هم می‌تواند فسفر را به خودش بگیرد و نگه دارد. برای نیتروژن، باکتری‌های تالاب نیترات را به گاز نیتروژن تبدیل می‌کنند و آن را به اتمسفر منتقل می کنند؛ یعنی نیتروژن محلول از چرخه آب حذف می‌شود و خطر شکوفه‌های جلبکی کمتر می‌گردد [۱۸]. همچنین بر طبق مطالعات گیاهان تالابی مانند نی و جلبک‌ها می‌توانند نیترات و فسفات را تا بیش از ۸۰ درصد کاهش دهند [۱۷ و ۱۸]. لازم به ذکر است هر چقدر تالاب جوان تر باشد و خاک بستر آن کم رسوب تر بتانسیل تالاب نیز در فیلتراسیون مواد آلاینده بیشتر خواهد شد [۲]. در ایران، تالاب انزلی پیش از اینکه بخش اعظمی از مساحت آبی خود را از دست بدهد به عنوان یک فیلتر طبیعی برای رودخانه‌های ورودی عمل می‌کرد، اما آلودگی‌های ناشی از کشاورزی و ورود بیش از حد فاضلاب شهری و ورود رسوبات رودخانه ای و عدم لایروبی باعث کاهش کارایی آن شده است [۱۹].

شکل ۴ بیانگر روند کدورت و کلروفیل در تالاب انزلی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بر اساس اطلاعات جمع آوری شده از ماهواره سنتینل



شکل ۳ - نمایی از احیای تالاب ها با بستن موقت مسیرهای رهکش و غرقاب کردن زمین های اطراف [۱۴]

نتیجه‌گیری

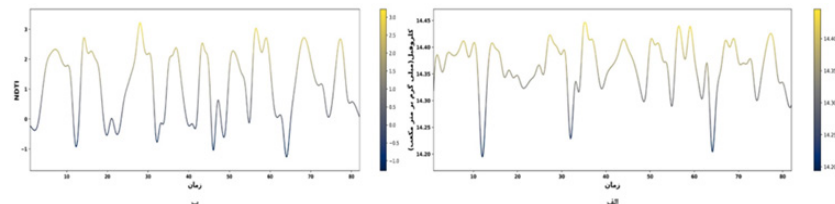
مطالعه انجام‌شده نشان داد که بحران آب در جهان و به‌ویژه در ایران نه یک مسئله صرفاً اقلیمی، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ی عوامل طبیعی و انسانی است که در سطوح مختلف اکولوژیک، اجتماعی و اقتصادی تأثیرگذارند. تالاب‌ها در این میان جایگاهی یگانه دارند؛ زیرا همزمان چند خدمت اساسی نظیر کاهش سیلاب‌ها و ذخیره‌سازی آب برای دوره‌های خشک، ارتقای کیفیت آب از طریق حذف رسوبات و مواد مغذی، تغذیه آب‌زمین و ایجاد جریان‌های پایه، و نقش‌آفرینی در کاهش تغییر اقلیم از رهگذر ذخیره کربن را ارائه می‌دهند. با وجود این ظرفیت‌ها، روند تخریب تالاب‌ها در ایران و بسیاری از نقاط جهان نشان داده است که ضعف حکمرانی آب، برداشت‌های بی‌رویه و اولویت دادن به توسعه‌ی سازه‌ای بر مدیریت

۲ است که هر دو روندی صعودی داشته اند. بر طبق مطالعه الیاسی و همکاران، ۱۴۰۳، تالاب انزلی به دلیل توسعه کاربری های انسان ساخت و تغییر کاربری از منابع طبیعی به زمین های کشاورزی دچار افت کیفیت آب و عدم فیلتراسیون آلاینده ها شده است [۱۹].

در صورتی که تالاب های طبیعی کارایی خود را در این زمینه از دست داده باشند یا لایروبی های مناسبی برای آنها صورت نگیرد، تالاب های مصنوعی یا انسان ساخت می تواند کمک کننده باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این تالاب‌ها می‌توانند تا ۹۰ درصد از آلاینده‌های صنعتی را تصفیه کنند، که این امر در مدیریت پساب‌های شهری مفید است [۲۰]. بنابراین، خدمات کیفی تالاب‌ها در حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی و انسانی ضروری است.

راه حل در دل طبیعت

تالاب‌ها فیلتر طبیعی آب و هوای زمین



شکل ۴ - سری زمانی پارامترهای کیفی تالاب شامل الف) تغییرات کِلروفیل ب) تغییرات شاخص کدورت [۱۰]

drought characteristics to propagation of meteorological droughts to hydrological droughts. *Journal of Hydrology*, p.128971. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128971.

14. Jones, C. N., Evenson, G. R., McLaughlin, D. L., Vanderhoof, M. K., Lang, M. W., McCarty, G. W., Golden, H. E., Lane, C. R., & Alexander, L. C. (2018). Estimating restorable wetland water storage at landscape scales. *Hydrological processes*, 32(2), 305–313. https://doi.org/10.1002/hyp.11405

15. Taylor, C.A. and Druckenmiller, H. (2022). Wetlands, Flooding, and the Clean Water Act. *American Economic Review*, 112(4), pp.1334–1363. doi:https://doi.org/10.1257/aer.20210497.

16. Beck, M. (2017). Coastal Wetlands Prevented \$625M in Property Damage During Hurricane Sandy. [online] Cool Green Science. Available at: https://blog.nature.org/2017/08/31/coastal-wetlands-prevented-625m-in-property-damage-during-hurricane-sandy[Accessed 23 Aug. 2025].

میرقلاخ نصیری، سید سامان ، امیری، ابراهیم و ۱۷. بهزادی، جلال . (۱۴۰۳). بررسی قابلیت روش ماشین بردار پشتیبان و تبدیل موجک در پیش‌بینی کمیت و کیفیت آب (مطالعه موردی: تالاب انزلی). تحقیقات منابع آب ایران، ۲۰(۲)، ۱-۱۴. doi: ۱۰.۲۲۰۳۴/iwrr.۲۰۲۴.۴۳۱۴۹۵.۲۷۳۴

18. Lam, V.S., Cuc, T., Vo, T.-D.-H., Nguyen, D.D. and Nguyen, X.C. (2024). Meta-analysis review for pilot and large-scale constructed wetlands: Design parameters, treatment performance, and influencing factors. *The Science of The Total Environment*, 927, pp.172140–172140. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172140.

حاجی الیاسی، علی ، ناصری، محسن و بدیعی، ۱۹. سید پیمان . (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی بر مبنای تلفیق روش یادگیری ماشین و الگوریتم نقشه‌بردار راولیه طبیعی با استفاده از نمونه‌های آموزشی متغیر، مطالعه موردی: حوضه آبریز تالاب انزلی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶(۳)، ۳۹۰-۵۶. doi: ۱۰.۲۲۰۵۹/jphgr.۲۰۲۵.۳۸۳۴۶۲.۱۰۰۷۸۴۸

20. Wang, L., Ma, L., Wang, J., Zhao, X., Jing, Y., Liu, C., Xiao, Y., Li, C., Jiao, C. and Xu, M. (2024). Research Progress on the Removal of Contaminants from Wastewater by Constructed Wetland Substrate: A Review. *Water*, [online] 16(13), pp.1848–1848. doi:https://doi.org/10.3390/w16131848.

launched at UN Water Conference.

[online] UN Environment. Available at: https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/largest-river-and-wetland-restoration-initiative-history-launched-un [Accessed 23 Aug. 2025].

5. Gell, P.A., C. Max Finlayson and Davidson, N.C. (2023). An introduction to the Ramsar Convention on Wetlands. Elsevier eBooks, pp.1–36. doi:https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817803-4.00018-8.

6. IPCC (2022). Chapter 4: Water. [online] Ipcc.ch. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-4

7. Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R.G., Fallatah, O. and Kirchner, J.W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, [online] 625(7996), pp.715–721. doi:https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8.

8. United Nations. (2025). The 17 Sustainable Development Goals. [online] United Nations. Available at: https://sdgs.un.org/goals.

9. Barati, A.A., Dehghani Pour, M. and Adeli Sardooei, M. (2023). Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus. *Science of The Total Environment*, 882, pp.163549–163549. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163549.

حاجی الیاسی، علی، ناصری، محسن و بدیعی، ۱۰. سید پیمان. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات کمی و کیفی تالاب‌انزلی با تلفیق متغیرهای اقلیمی-اکوهیدرولوژیک مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور. اولین کنفرانس مهندسی اکوهیدرولوژی ایران-دانشگاه تهران

11. Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016. doi:10.1080/00210862.2016.1259286

12. Wu, Y., Sun, J., Hu, B., Zhang, G. and Rousseau, A.N. (2023). Wetland-based solutions against extreme flood and severe drought: Efficiency evaluation of risk mitigation. *Climate Risk Management*, [online] 40, p.100505. doi:https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100505.

13. Wu, Y., Sun, J., Blanchette, M., Rousseau, A.N., Xu, Y.J., Hu, B. and Zhang, G. (2022). Wetland mitigation functions on hydrological droughts: From

تقاضا، عملاً تاب‌آوری این اکوسیستم‌ها را کاهش داده و پایداری خدمات کمی و کیفی آن‌ها را با تهدید جدی مواجه کرده است. بنابراین، آینده مدیریت بحران آب مستلزم تغییر پارادایم از «مدیریت صرفاً سازه‌ای و مهندسی» به «مدیریت یکپارچه و طبیعت‌محور» است. این تغییر باید با تضمین حقایق‌های زیست‌محیطی تالاب‌ها، توقف افت آب‌زمین، بازپیوند رودخانه و دشت سیلابی و سرمایه‌گذاری بر احیای تالاب‌های آسیب‌دیده همراه باشد. از سوی دیگر، اسناد جهانی نشان می‌دهند که جامعه بین‌المللی نیز تالاب‌ها را به‌عنوان محور سیاست‌های آینده‌ی آب و اقلیم به رسمیت شناخته است. بحران آب در ایران نیز می‌تواند در زیر سایه حکمرانی خوب با هم‌راستا کردن برنامه‌های ملی با این ابتکارها فرصتی استراتژیک برای جذب منابع مالی، ارتقای جایگاه زیست‌محیطی کشور و بهبود تاب‌آوری اکولوژیک و اجتماعی در برابر بحران آب فراهم آید. در نهایت، می‌توان گفت که تالاب‌ها زیرساخت‌های طبیعی حیاتی‌اند که حفاظت و احیای آن‌ها نه یک انتخاب، بلکه ضرورتی علمی، مدیریتی و سیاستی برای بقا و توسعه‌ی پایدار در عصر تنش آبی و تغییر اقلیم است.

منابع

1. UNESCO. (2024). Water for Prosperity and Peace. [online] Unesco.org. Available at: https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/.

۲. ناصری، محسن، منعم، محمد جواد، جعفری از نویسندگان، (۱۴۰۳). کتاب مبانی شناخت، مدل سازی و تعیین ستر و جریم تالاب ها. ویرایش دوم. انتشارات دانشگاه تهران

3. Global Wetland Outlook (2019). Global Wetland Outlook. [online] Global Wetland Outlook. Available at: https://www.global-wetland-outlook.ramsar.org[Accessed 23 Aug. 2025].

4. UNEP. (2023). Largest river and wetland restoration initiative in history

Volume 18, Issue 1, September 2025

Editor-in-chief: Nima Moghaddam
Managing Editor: Iman Hajirad
Executive Manager: Sina Kosari



Published by the Scientific Society of
Water Engineering and Sciences
University of Tehran