

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری^۱

میثم فیضی و امیرحسین حمیدیان^{۲،۳}

چکیده

در سال‌های گذشته، بحران فزاینده کمبود منابع آب شیرین موجب شده‌است تا بسیاری از کشورها با بهره‌گیری از آب‌های شور دریا به‌عنوان منبعی جایگزین با هزینه‌های چشمگیر روی آورند. در حال حاضر، تنها یک‌سوم از آب برداشت‌شده از دریاها به آب شیرین تبدیل شود و بخش زیاد آن به‌عنوان شورابه به دریا بازگردانده می‌شود. بهره‌برداری دوباره از شورابه‌ها با رویکردهای نوآورانه و پایدار می‌تواند برای پرورش ماهیان متحمل به شوری، استخراج نمک و کشت علوفه استفاده شود. این مقاله، با بررسی ۱۱۰ مقاله معتبر، جنبه‌های مختلف بازچرخش شورابه‌های آب شیرین کن‌ها را از دیدگاه چالش‌ها، فرصت‌ها و سودمندی‌های اقتصادی در ایران واکاوی کرده و الگوی مفهومی کاهش تأثیرهای محیط‌زیستی آن را ارائه دهد. همچنین، در پایان ضمن بررسی کمبود نهاده‌های دامی، سودمندی‌های اقتصادی استخراج نمک‌های معدنی و فلزهای ارزشمند را گزارش می‌کند. افزون بر این، سه گونه گیاهی، چهار گونه آبی، سه گونه ریزجلبک و یک گونه سخت‌پوست با درصد پروتئین زیاد که می‌توانند شوری شورابه‌ها را تحمل کنند و توانایی پرورش و افزایش در این شرایط را دارند، معرفی کرده‌است.

واژه‌های کلیدی: آب دریا، آرتمیا، بازچرخش، سازگاری با شوری، گیاهان شورپسند^۴.

مقدمه

ایران با مساحتی حدود ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع و جمعیتی در حدود ۸۵ میلیون نفر، در منطقه خاورمیانه و در ناحیه اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. این کشور به ۳۱ استان مستقل و شش حوضه آبریز اصلی با گوناگونی اقلیمی چشمگیر تقسیم شده‌است. حوضه‌های آبریز ایران، به‌ترتیب از بیشترین خشکی به کمترین خشکی، شامل فلات مرکزی، مرزی شرق، قره‌قوم، دریاچه ارومیه، خلیج فارس و دریای خزر می‌باشند (مظاهری و همکاران، ۱۳۹۶). از دهه ۴۰ خورشیدی و پیش از تصویب قانون ملی شدن آب، مشکل‌های مدیریت منابع آبی در کشور آغاز شد و در دهه‌های گذشته، با افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آبی و نوسان‌های اقلیمی، وضعیت به‌طور فزاینده‌ای بحرانی‌تر شده است. این بحران به یک تهدید جدی برای تأمین آب شرب، صنایع، کشاورزی و حفظ زیست‌بوم‌ها تبدیل شده است. وضعیت منابع آبی

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۹

۲- نویسنده مسئول: پست الکترونیک: a.hamidian@ut.ac.ir

۳- به ترتیب، دانشجوی دکتری و استاد دانشگاه تهران (همکار مدعو فرهنگستان علوم ج.ا. ایران)، تهران.

کشور از مرحله بحرانی فراتر رفته و بر پایه آمار ارائه شده در سال ۱۴۰۲ توسط گروه آب در بررسی‌های زیربنایی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، برداشت بی‌رویه از منابع آبی موجب کاهش شدید مقدار آب‌های زیرزمینی شده و بیش از ۱۴۳ میلیارد متر مکعب اضافه برداشت تجمعی از منابع آبی زیرزمینی کشور انجام شده است (امیری و مظاهری، ۱۴۰۲). همچنین، میانگین افت سالیانه آبخوان‌های کشور حدود ۵۵ سانتی‌متر و میانگین افت تجمعی این منابع در ۵۰ سال گذشته به حدود ۲۵ متر رسیده است (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰).

فرآیند شیرین‌سازی آب دریا از ابتدای دهه ۱۳۹۰ خورشیدی در ساحل‌های جنوبی ایران با هدف تأمین آب مورد نیاز نواحی ساحلی آغاز گردید. در سال‌های اخیر، این روند گسترش یافته و در چندین مرحله، آب شور از راه خطوط انتقال به فلات مرکزی و نوار شرقی کشور منتقل شده است. همچنین بر اساس گزارش دفتر مطالعات زیربنایی، در مرحله دیگری از این برنامه، در سه‌ماهه نخست سال ۱۴۰۲، پروژه دیگری با هدف انتقال آب از دریای عمان به نوار شرقی کشور آغاز شده که شامل احداث خط انتقالی به طول تقریبی ۱۷۹۰ کیلومتر، با برآورد هزینه‌ای معادل ۳ میلیارد یورو و با پیشرفت فیزیکی ۸٪ می‌باشد (اسدی و عبدالمنافی، ۱۴۰۲).

در حال حاضر، بیش از ۸۵ برنامه شیرین‌سازی آب دریا در کشور با ظرفیت بهره‌برداری حدود ۲۹۵ هزار مترمکعب در شبانه‌روز و ظرفیت در حال ساخت حدود ۲۲۹ هزار متر مکعب در شبانه‌روز، با سرمایه‌گذاری کل حدود ۲۳،۱۰۰ میلیارد ریال، تنها در استان‌های ساحلی فعال هستند. بیش از ۹۳٪ از تأسیسات نمک‌زدایی آب دریا در استان‌های هرمزگان، بوشهر، سیستان و بلوچستان و خوزستان واقع شده‌اند. در مقایسه با برخی از کشورهای حاشیه خلیج فارس، این مقدار ناچیز است و توسعه محدود طرح‌های شیرین‌سازی آب دریا را در ساحل‌های جنوبی کشور نشان می‌دهد (مظاهری، ۱۴۰۰).

این مقاله مروری، با بررسی ۲۵ گزارش رسمی دفتر مطالعات زیربنایی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی و ۱۱۰ مقاله پژوهشی منتشر شده در مجله‌های علمی معتبر، با هدف روشن‌سازی و ارائه راهکارهایی برای مدیریت پساب آب شیرین‌کن‌ها، تهیه شده است. این مقاله به‌ویژه بر اصول محیط‌زیستی بهره‌گیری از خدمات‌های زیست‌بومی گوناگون حاصل از بازچرخش شورابه تأکید دارد افزون بر ملاحظه‌های زیست‌محیطی، توجه به جنبه‌های فنی بدون در نظر گرفتن بعدهای اقتصادی، راهگشا نخواهد بود. از این‌رو، این مطالعه به بررسی امکان‌سنجی اقتصادی و ظرفیت‌های تولید محصول‌های جانبی نیز پرداخته است. این راهکارها با نگاه شکل‌گیری هدف‌های توسعه پایدار در زمینه محیط زیست و کشاورزی و در راستای مدیریت بهینه منابع آب ارائه شده‌اند.

مواد و روش‌ها

بر پایه واکاوی متن‌های تخصصی و سندهای بالادستی، سه مسئله کلیدی مرتبط با منطقه فلات مرکزی ایران شناسایی و انتخاب شده است. نخستین مسئله، کم بودن برداشت زیست‌توده در واحد مساحت است که به‌طور مستقیم در افزایش بهره‌وری تولید مواد غذایی تأثیرگذار است. این موضوع در کشورهای پیشرفته‌ای همچون هلند، سوئیس، برزیل و فلسطین اشغالی، با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند مهندسی ژنتیک و روش‌های کشت پیشرفته مانند آبکشت^۱ و هواکشت^۲، به‌طور موفقیت‌آمیز افزایش یافته است. دومین مسئله، بهبود ساختارهای تغذیه دام، رفع کمبود نهاده و مواد غذایی از راه پرورش گونه‌های مختلف مانند ماهی، جلبک و سخت‌پوستان است. سومین مسئله، بهره‌برداری بهینه از

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

فرصت‌های اقتصادی نهفته در شورابه‌ها با هدف استحصال نمک‌ها و ترکیب‌های شیمیایی با ارزش، کاهش وابستگی به واردات این مواد، و توسعه ظرفیت‌های داخلی در زنجیره تأمین و فرآوری محصول‌های شیمیایی می‌باشد. مسئله کمبود آب و انتقال آب شور دریایی، به‌عنوان یک چالش بنیادی، در سایر بررسی‌های تخصصی مدیریت آبخیزداری به‌طور جداگانه بررسی شده و تمرکز اصلی این بررسی بر شناسایی و بهره‌برداری از ظرفیت‌های ممکن شورابه‌ها است.

تعریف شورابه بر پایه مستندها

شورابه‌ها محلول‌های غلیظ نمکی هستند که به‌عنوان محصول جانبی فرآیند نمک‌زدایی تولید می‌شوند. این شورابه‌ها دارای غلظت زیادی از یون‌های معدنی مانند سدیم، کلراید، منیزیم و سولفات هستند و ممکن است مقادیر متغیری از فلزهای سنگین، ترکیب‌های شیمیایی و مواد آلی نیز در خود داشته باشند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این محلول‌ها، از جمله شوری زیاد، دما و ترکیب‌های محلول، به منبع آب و فناوری نمک‌زدایی مورد استفاده، بستگی دارد. در ایران، بر پایه بررسی‌های زیربنایی، شوری شورابه‌های تولیدی در واحدهای اسمز معکوس به طور میانگین حدود ۸۰ قسمت در هزار گزارش شده که هنگام تخلیه به محیط دریایی با شوری طبیعی آب دریا (به تقریب ۳۵ تا ۳۶ قسمت در هزار) به تعادل می‌رسد (دهقانی فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، پژوهش‌های انجام‌شده در ساحل‌های جنوبی کشور در دهه ۱۳۹۰ خورشیدی نشان می‌دهند که تخلیه شورابه‌های با شوری ۳۸ قسمت در هزار موجب کاهش ۹۳ درصدی جمعیت کرم‌های حلقوی از خانواده پرتاران^۱ *Polychaeta* در محیط پیرامونی شده است (میری و همکاران، ۱۳۹۳).

بررسی مقاله‌های پژوهشی در مورد طرح بازچرخش شورابه بر مبنای سیاست تخلیه صفر

برپایه آمار منتشرشده توسط شرکت منابع آب ایران (وزارت نیرو) و گزارش‌های شرکت انتقال آب فرا آبرسان سرزمین، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۱۴۰۵، برداشت سالانه برای خط‌های انتقال به شیراز و اصفهان به حدود ۹۰ میلیون متر مکعب برسد. برای نمونه، گزارش‌ها نشان می‌دهند که در یک کارخانه تولید آب شیرین با ظرفیت روزانه ۱۰۰ هزار متر مکعب نیازمند برداشت روزانه ۳۵۰ هزار مترمکعب آب از دریاست و ۲۵۰ هزار متر مکعب آن به شورابه و پساب تبدیل می‌شود. این فرآیند با استفاده از نازل‌های ویژه در ژرفای دریا انجام می‌شود. بر پایه این اطلاعات، طرح فرضی کنونی بر مدیریت ۲۵۰ هزار متر مکعب شورابه در روز بر پایه اصول زیست‌محیطی طراحی شده است تا از تخلیه شورابه به دریا یا دیگر محیط‌های شکننده جلوگیری کند. لازم به بیان است که در این بخش تنها به معرفی کلی طرح پرداخته شده و در بخش‌های آتی، مستندهای علمی و پیش‌زمینه‌های مرتبط به‌طور جامع و تفصیلی بررسی خواهند شد. همچنین، با پیاده‌سازی اصلاح‌ها و محاسبه‌های فنی بوم‌شناختی، پیش‌بینی می‌شود که این طرح سودآوری چشمگیری داشته‌باشد. پیش از هرگونه اقدام به اجرای طرح، ایجاد تأسیساتی مناسب برای هدایت و بازچرخانی شورابه‌ها کاری اجتناب‌ناپذیر است. این تأسیسات باید روزانه دستکم توانایی مدیریت حجم ۳۰۰ هزار متر مکعب شورابه را داشته‌باشد. هر سیستم پیشنهادی باید به‌گونه‌ای طراحی شود که نه تنها بتواند پاسخگوی این حجم باشد، بلکه با بهره‌گیری از راهکارهای نوآورانه و طراحی بومی، زمان ماند^۲ شورابه‌ها را به‌طور بهینه تنظیم کند تا از گندیدگی آنها جلوگیری شود و امکان انتقال تدریجی و منظم به تأسیسات بازچرخانی فراهم شود. بر پایه بررسی‌های مشابه، بهترین رویکرد طراحی سیستم‌های بازچرخانی، استفاده از ساختارهای پی در پی برای کاربری‌های مختلف است. در این الگو، خروجی هر ناحیه به‌عنوان ورودی ناحیه بعدی به کار گرفته می‌شود و کیفیت آب تولیدی، نوع کاربری بعدی را تعیین می‌کند. هدف اصلی این رویکرد، کمینه‌سازی

1. *Polychaeta*

2. Residence time

```

graph TD
    A([شورابه]) --> B([فاضلاب خام یا تصفیه اولیه])
    A --> C[استخراج نمک و فلزات ارزشمند]
    B --> D[برکه تکثیر عدسک آبی و گیاه و تیمور]
    B --> E[برکه تکثیر میکرو جلبک]
    B --> F[برکه تکثیر ماهی های شورزی]
    D --> G[برکه تکثیر انواع جلبک]
    E --> G
    F --> G
    G --> H[واحد تکثیر آتریپلکس و سالیکورنیا]
    G --> I[مرغداری و دامداری و پرورش ماهی آب شیرین]
    H --> I
    I --> J[تولید پودر ماهی و کنسانتره]
    J --> K[فرآوری ساده و تولید غذای دام]
    K --> L[استفاده از آرتیمیا در غذای ماهی و دام]
    L --> M[برکه تکثیر آرتمیا]
    M --> B
    
```

شورابه

فاضلاب خام یا تصفیه اولیه

برکه تکثیر عدسک آبی و گیاه و تیمور

برکه تکثیر میکرو جلبک

برکه تکثیر ماهی های شورزی

برکه تکثیر انواع جلبک

واحد تکثیر آتریپلکس و سالیکورنیا

مرغداری و دامداری و پرورش ماهی آب شیرین

تولید پودر ماهی و کنسانتره

فرآوری ساده و تولید غذای دام

استفاده از آرتیمیا در غذای ماهی و دام

برکه تکثیر آرتمیا

استخراج نمک و فلزات ارزشمند

استفاده از جوانه ها و یافت نرم به عنوان منبع ویتامین و فیبر

پودر جلبک قهوه ای و قرمز به عنوان تثبیت کننده کنسانتره غذای دام و منبع مواد مغذی

کود مرغی و دامی برای تغذیه تمام حوضچه ها به جز حوضچه استخراج نمک تقسیم می شود.

انتقال آب

انتقال قاردرده

شکل ۱- مدل مفهومی جایگیری اجزای طرح بازچرخش شورا به بر پایه مقاله‌های پژوهشی منتشر شده در کشورهای بیشتر؛ در بخش فناوری آب شیرین کن‌ها.

در صورتی که نیمی از ظرفیت و حجم کل شورابه به مرحله برداشت نمک اختصاص یابد، با تقسیم حجم باقی مانده بر ساعت‌های شبانه‌روز، دبی تقریبی ۶۵۰۰ متر مکعب در ساعت به دست می‌آید. بدین ترتیب، طراحی مجموعه‌ای از استخرهای پی در پی و به هم پیوسته ضروری است. در این سیستم، شورابه پس از رقیق‌سازی با فاضلاب، وارد مرحله‌های پی در پی افزایش ریز جلبک‌ها، عدسک آبی و آبزیان شورزی می‌شود. در آغاز ریز جلبک‌ها بار آلودگی ترکیب‌های آلی و فلزهای سنگین را جذب می‌کنند. سپس عدسک آبی، باقیمانده نیترات، فسفات و فلزهای سنگین را حذف و اکسیژن لازم برای رشد آبزیان شورزی را فراهم می‌کند. آب خروجی از این مرحله به افزایش جلبک‌های قرمز و قهوه‌ای اختصاص یافته و در پایان، آب غنی از مواد مغذی حاصل از این فرآیند وارد مرحله نهایی افزایش علوفه‌های صنعتی می‌شود. این

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

علوفه به عنوان یکی از محصول‌های راهبردی و محیط زیستی ارزشمند استفاده می‌شوند. فرآورده‌های حاصل، شامل ریزجلبک‌ها به عنوان منبع کلروفیل و ترکیب‌های دارویی، عدسک آبی برای تغذیه ماهی و دام و ماهی‌های پرورش‌یافته برای مصرف انسانی یا تولید پودر ماهی (در صورت تأیید وزارت بهداشت) خواهد بود. همچنین، جلبک‌ها به عنوان منبع مواد مغذی در تغذیه دام استفاده می‌شوند و علوفه تولیدی به صورت خوراک تازه یا خشک، یا به عنوان ورودی کارخانه‌های نهاده دام، به کار می‌رود. در این مرحله پیشنهاد می‌شود، استخرهای اولیه به منظور تصفیه فاضلاب با بهره‌گیری از ریزجلبک‌ها و جلبک‌های معمولی طراحی شوند و جریان آب پس از تصفیه با دبی کنترل شده وارد مدار شود. در ضمن، استخرهای بعدی با بستر خاکی طراحی شده و نیاز به تأسیسات پیچیده‌ای ندارند.

یکی از چالش‌های اصلی مطرح‌شده در این طرح، تاب‌آوری گونه‌ها، زمان ماند و مقدار تبخیر است که در بخش‌های مرتبط به طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مسأله تبخیر در اقلیم ایران، به‌ویژه در فلات مرکزی، به عنوان یک چالش جدی شناخته می‌شود، زیرا مقدار تبخیر سالانه در این منطقه به طور چشمگیری بیش از حجم آب ورودی است و از عامل‌های اصلی بحران کم‌آبی به شمار می‌آید. با این حال، به دلیل تزریق مداوم حجم بزرگی از شورابه خروجی کارخانه به سامانه‌ها، تأثیر تبخیر در این فرآیند کمتر حس می‌شود و تمرکز اصلی طرح بر کاهش حجم شورابه است. بررسی‌های مشابه نشان داده‌اند که در مساحت یک هکتاری، مقدار تبخیر روزانه در اقلیم مدیترانه‌ای برای استخرهای پرورش ماهی حدود ۷۰ متر مکعب و برای برکه‌های دارای عدسک آبی ۵۰ متر مکعب است (Oron *et al.*, 2023). در صورتی که کنترل تبخیر اهمیت داشته باشد، می‌توان از طراحی‌های سازگار مانند استفاده از گونه‌های گیاهی شناور، ژرف‌تر نمودن استخرها، بهره‌گیری از جلبک‌های پوششی یا حتی استفاده از توپ‌های ضدتبخیر برای کاهش تبخیر بهره برد. با این حال، به دلیل حجم زیاد شورابه تولیدشده، پیشنهاد می‌شود که از طراحی‌های پیچیده پرهیز شده و تمرکز بر تولید محصول‌های ارزشمندی همچون فرآورده‌های دارویی، نهاده‌های دامی، علوفه و مواد صنعتی قرار گیرد.

در راستای طرح‌های مدیریت پایدار شورابه‌های حاصل از فرآیند شیرین‌سازی آب و کاهش هزینه‌های سنگین انتقال این پساب‌ها به دریا، رژیم اشغالگر قدس با همکاری مؤسسه‌های پژوهشی مرتبط با مدیریت منابع آب و بیابان‌زدایی، بر افزایش تولید غذا و توسعه راهکارهای پایدار در بازچرخش شورابه متمرکز شده است. در این چارچوب، سیستمی مشابه بررسی حاضر معرفی شده که با استفاده از گونه‌هایی مانند عدسک آبی^۱، ماهی تیلاپیا^۲، گیاه سالیکورنیا^۳ و آتریپلکس^۴، امکان بازچرخانی بهینه آب را فراهم می‌آورد. یک بررسی با حجم روزانه ۱۰۹۰۰ مترمکعب شورابه با شوری شش دسی‌زیمنس بر متر (معادل نزدیک به ۱۱ گرم در لیتر) و غلظت مواد جامد محلول ۳۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر نشان داده است که این سیستم می‌تواند بیشینه سود مالی ۰/۷ دلار آمریکا برای هر متر مکعب شورابه تولیدی را فراهم کند که سودمندی اقتصادی چشمگیری در مقایسه با هزینه‌های دفع شورابه به شمار می‌آید (Oron *et al.*, 2023). یکی از محدودیت‌های این طرح، شوری اندک شورابه مورد بررسی (۱۱ گرم در لیتر) در مقایسه با خروجی تأسیسات ایران (۸۰ گرم در لیتر) است. افزون بر این، صرفه‌جویی در هزینه انتقال شورابه به دریا در ایران به دلیل وجود خط‌های انتقال از پیش احداث‌شده، مطرح نیست. با این حال، بازچرخانی شورابه در یک چارچوب نظام‌مند، تأییدی بر اصول ارائه‌شده در این بررسی است.

شورابه در مرحله اولیه به دلیل شوری زیاد تنها برای گونه‌های محدودی کاربرد دارد، اما با بهره‌گیری از راهکارهای نوآورانه و آزمایش‌های پیاپی می‌توان این محدودیت را برطرف کرد. بررسی‌ها و منابع متعدد نشان داده‌اند که به قابلیت استفاده از فاضلاب و پساب خانگی برای کاهش تأثیرهای منفی شوری آب، کمتر توجه شده است. مشکل اصلی فاضلاب وجود مقدار زیادی از مواد آلی و میکروبی و چالش عمده آب شور، وجود ۸۰ گرم نمک در هر لیتر بدون مواد مغذی است. ترکیب این دو منبع، افزون بر کاهش شوری آب دریا به سطح تحمل‌شدنی و متعادل کردن بار بیماری‌زایی فاضلاب، می‌تواند راه‌حلی سازگار برای هر دو مشکل ارائه دهد. حتی می‌توان پیش از ورود آب دریا به تأسیسات شیرین‌سازی، آن را با فاضلاب ترکیب کرد که ضمن کاهش شوری و بار میکروبی، مصرف انرژی فرآیند تصفیه را تا ۵۰٪ کاهش داده و حجم ورود و خروج آب دریا را به نصف می‌رساند. در نتیجه، بهره‌وری اقتصادی و تعادل بوم‌شناختی افزایش می‌یابد و شورابه خروجی با شوری ۴۰ گرم در لیتر به جای ۸۰ گرم حاصل می‌شود. به‌منظور تأمین فاضلاب موردنیاز در طرح پیشنهادی، باید به محدودیت‌های فنی و مالی موجود در توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال توجه داشت. با توجه به چالش‌های جدی مرتبط با تخصیص بودجه‌های عمرانی و ناتوانی در گسترش زیرساخت‌های جدید، به‌نظر می‌رسد بهره‌گیری از ظرفیت تصفیه‌خانه‌های قدیمی و موجود، واقع‌بینانه‌ترین و کارآمدترین گزینه برای مدیریت فاضلاب مازاد آن‌ها باشد. این تصفیه‌خانه‌ها، به‌ویژه در شرایط بارش‌های فصلی و نوسانات دبی ورودی، با دشواری‌های ساختاری و عملکردی روبه‌رو هستند که موجب کاهش بازدهی و بروز نشت یا سرریز در سامانه‌های فاضلاب می‌گردد. در نتیجه، استفاده راهبردی از فاضلاب تصفیه‌نشده یا نیمه‌تصفیه‌شده در این سامانه‌ها، ضمن کاهش بار زیست‌محیطی، می‌تواند راهکاری مکمل در جهت تحقق اهداف بازچرخانی و پایداری آبی باشد.

توجیه طرح در مورد مسئله کمبود خوراک دام و پرندگان

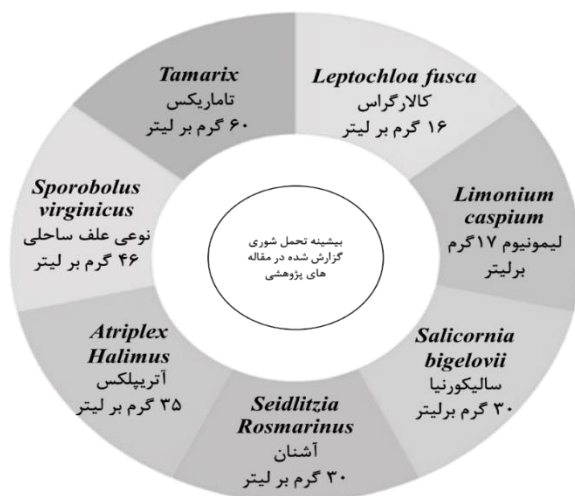
تولید خوراک دام در ایران، به‌دلیل اولویت‌بندی منابع به مصرف‌های انسانی، تداوم خشکسالی‌ها، افزایش روزافزون تقاضا، روش‌های سنتی کشت و محدودیت زمین‌های زراعی، با چالش‌های بنیادین روبه‌رو است. تأمین دولتی نهاده‌های دامی نیز به طور کامل به واردات وابسته بوده و با تأخیر تحویل دستکم ۴۵ روزه همراه است که این مسئله خود به گسترش بحران دامن می‌زند (ورمزیاری و اعلائی، ۱۳۹۹). به استناد آمار بررسی‌های زیربنایی منتشر شده در سال ۱۴۰۱، حدود ۷۰ تا ۷۵٪ هزینه‌های پرورش دام در ایران به تأمین خوراک اختصاص دارد. یک رأس دام سبک روزانه حدود ۶/۱ کیلوگرم خوراک مصرف می‌کند، درحالی‌که سهمیه دولتی تخصیص‌یافته برای هر رأس تنها ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم در روز است. خوراک‌های مرسوم مانند جو، یونجه و کاه که بخش اصلی جیره غذایی دام‌های سبک را تشکیل می‌دهند، به دلیل ناکافی بودن سهمیه دولتی، از بازار آزاد وارداتی تأمین می‌شوند. در بازه زمانی ابتدای سال ۱۳۹۹ تا بهمن ۱۴۰۰، قیمت خوراک دام رشد بی‌سابقه‌ای داشته است، به‌طوری‌که به تقریب افزایشی سه برابری را تجربه کرده است. این چالش‌ها، به‌ویژه در منطقه‌های فلات مرکزی، پیامدهایی چون ورشکستگی و خسارت‌های گسترده برای کشاورزان و دامداران به دنبال داشته است. بحران اصلی زمانی شدت یافته که کمبود نهاده در بازار آزاد با مشکل‌های ارزی و تأمین نهاده‌ها همزمان شده است. شوربختانه، در برخی از گزارش‌ها، معاوضه دام زنده و گوشت گرم با نهاده‌های دامی کشورهای خارجی به عنوان راهکار پیشنهادی کنونی مطرح شده است (افتخاری و همکاران، ۱۴۰۱). در فرآیند تولید زیست‌توده، گیاهان

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

خشکی و فیتوپلانکتون‌ها^۱ در دریا به عنوان تولیدکنندگان اولیه نقش اساسی دارند و زیاده‌ترین کارایی جرمی و انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. تقویت و تمرکز بر این تولیدکنندگان اولیه می‌تواند به بهبود یکپارچگی بوم‌نظام و تأمین سودمندی‌های انسانی پایدار بیانجامد. برای نمونه، از اهمیت تمرکز بر تولیدکنندگان اولیه، مقایسه تولید روغن در واحد سطح بیان‌شدنی است: از یک هکتار زمین، امکان تولید ۴۴۶ لیتر روغن از سویا، ۹۵۲ لیتر از آفتابگردان، ۱۴۱۳ لیتر از کرچک، ۵۹۵۰ لیتر از پالم و ۹۵۰۰۰ لیتر از جلبک وجود دارد (Ganesan et al., 2020). این مقایسه نشانگر کارایی بسیار زیاد تولیدکنندگان اولیه دریایی مانند جلبک در مقایسه با گونه‌های خشکی است.

گونه‌های شورپسند مطرح‌شده در منابع به عنوان بهترین راه حل برای مدیریت سازشی علوفه

استفاده از شورابه در کشاورزی به عنوان راهکاری پایدار برای مدیریت منابع آب در منطقه‌های خشک و شور اهمیت ویژه‌ای دارد. این روش از گونه‌های شورپسند مانند وتیور^۲، سالیکورنیا، آتریپلکس^۳، لیمونیوم^۴ و گز^۵ بهره می‌گیرد که توانایی رشد در شرایط شوری زیاد را دارند و می‌توانند به بهبود مدیریت آب و خاک، ارتقای پایداری کشاورزی و افزایش بازدهی اقتصادی کمک کنند (شکل ۲). بررسی‌های انجام‌شده در امارات متحده عربی نشان داده‌اند که گیاه سالیکورنیا^۶ با استفاده از شورابه رشد مطلوبی دارد و دارای پروتئین و درصد روغن زیادی است. این توانمندی‌ها به بستن قراردادهای گسترده با شرکت‌های چندملیتی برای تولید سوخت زیستی در زمین‌های ساحلی با استفاده از آبیاری آب دریا انجام‌شده است. در ایران نیز، گز و وتیور نقش مهمی در تثبیت خاک‌های شور و کاهش فرسایش دارند (Torshizi et al., 2020).



شکل ۲- بیشینه شوری قابل تحمل منتشر شده در بررسی‌ها در گونه‌های سالیکورنیا (Shahid et al., 2013)، آتریپلکس (Bajji et al., 1998)، لیمونیوم (Rodrigues et al., 2020)، تاماریکس (Carter & Nippert 2011)، علف ساحلی (Tisarum et al., 2022)، کالارگراس (Tawfik et al., 2012).

به جز درخت گز، تمامی گونه‌های معرفی‌شده در شکل ۲، درصد زیادی از علوفه‌ها را برای تغذیه دام به صورت تازه و خشک فراهم می‌آورند و برخی از آن‌ها دارای ویژگی‌های دارویی و صنعتی نیز می‌باشند. در این راستا، به عنوان یکی از مهمترین گونه‌های شورپسند، به بررسی و تشریح گیاه وتیور پرداخته می‌شود که به عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین

گیاهان در زمینه محیط زیست دارای اهمیت ویژه‌ای است. گیاه وتیور با توانایی چشمگیر در تبدیل انرژی خورشیدی به زیست‌توده (۶۶ تن در هکتار)، به‌عنوان گونه‌ای چندمنظوره با ظرفیت کاربردی گسترده شناخته می‌شود. روغن استخراج‌شده از ریشه این گیاه، که دارای بیش از ۱۰۰ ترکیب اسانسی گوناگون است، در صنایع عطرسازی و داروسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزون بر این، وتیور به عنوان یک گیاه پوششی، نقش چشمگیری در جلوگیری از فرسایش خاک، بهبود کیفیت آب و افزایش حاصلخیزی خاک دارد. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو)^۱ و بانک جهانی از چندین دهه گذشته بر استفاده از این گیاه برای اصلاح زمین‌ها و مدیریت خاک‌های نامساعد تأکید کرده‌اند (عسگری و همکاران، ۱۳۹۴؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۲). افزون بر این، در تصفیه فاضلاب، کاهش آلودگی‌های محیطی، کنترل علف‌های ناخواسته (هرز) و رویارویی با بیماری‌های گیاهی اثربخش است. آزمایش‌های متعددی در سطح جهان و ایران در زمینه کاربری وتیور برای اصلاح خاک‌های نامساعد انجام شده است. با این حال، تاکنون از این گیاه به عنوان کشت آبکشت برای تصفیه پساب شور در ایران استفاده نشده و این بخش همچنان نیازمند پژوهش بوم‌شناختی اقدام عملی است (نوشادی و ولی زاده، ۱۳۹۵؛ عابدی و همکاران، ۱۳۹۷). نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که گیاه وتیور توانایی چشمگیری در تحمل شوری تا ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر و در شرایط بیشینه تا شوری ۳۵ دسی‌زیمنس بر متر (به تقریب معادل ۳۰ گرم در لیتر) را دارد. در پژوهشی، این گیاه در دو هفته توانست شوری محیط را تا ۱۵٪ کاهش دهد و مقدار جذب سدیم و کلر آن نزدیک به ۲/۵ برابر تیمار شاهد گزارش شد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده توانایی زیاد وتیور در کاهش دشواری‌های ناشی از شوری بیش از حد ترکیب شورابه و فاضلاب شهری است که می‌تواند به عنوان راهکاری کارا برای بهبود کیفیت خاک و مدیریت منابع آب شور به کار گرفته شود (Maleki et al., 2015; Cuong et al., 2023).

عدسک آبی^۲ گیاهی آبی و شناور با برگ‌هایی به اندازه پنج تا ۱۰ میلی‌متر و گاه ریشک‌دار است که جزء گونه‌های فرصت‌طلب و متنوع به شمار می‌رود، به‌طوری‌که تاکنون بیش از ۴۰ گونه آن شناسایی شده است. این گیاه در حضور مواد مغذی و شرایط مساعد، در مدت دو تا پنج روز رشد چشمگیری دارد و به دلیل پروتئین زیاد (۲۸ تا ۳۵٪)، حتی در محیط‌های آلوده مانند استخرهای فاضلاب با ژرفای یک متر نیز رشد و ماندگاری دارد. در شرایط بهینه، عدسک آبی در ترکیب با شورابه با غلظت ۱۱ گرم در لیتر می‌تواند به صورت روزانه ۱۰ تا ۱۵ گرم ماده خشک در هر متر مربع تولید کند و تا دو یا سه بار در هفته برداشت شود. تاب‌آوری نهایی این گونه در برابر شوری ۲۱ گرم نمک در لیتر گزارش شده است و به نسبت کم است (Sree et al., 2015). در پژوهش‌های مرتبط با آب شیرین و فرآیندهای گیاه‌پالایی، عدسک آبی به عنوان گونه‌ای مؤثر و شناخته‌شده مطرح است. این گیاه عملکرد برجسته‌ای در حذف ۱۰۰ درصدی باکتری‌های کلی فرم مدفوعی از فاضلاب و کاهش ۹۰ درصدی آلودگی‌های ساحلی نسبت به دیگر گیاهان پالاینده نشان داده است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۷؛ رحیمی و همکاران، ۱۴۰۳).

در آزمایش‌های مرتبط با گونه *Sporobolus virginicus* مشاهده شده است که این گیاه در شرایط شوری شامل ۴۶ گرم در لیتر سدیم کلراید و ۱۱۳ گرم در لیتر سدیم سولفات، کاهش عملکرد بین ۱۵ تا ۴۵٪ در ویژگی‌های مختلف نشان داده است. با این حال، در شرایط افزایش شوری، محتوای قندی محلول در بافت‌های این گیاه به مقدار ۱/۵ برابر، غلظت سدیم تا ۲۸ برابر و مقدار پرولین به عنوان پیش‌ساز پروتئین به تقریب ۱۰ برابر نمونه شاهد افزایش یافته است (Tisarum et al., 2022). این یافته‌ها، تردیدهای بنیادینی را نسبت به درست بودن برخی از گزارش‌های دیگر مرتبط با

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

گونه‌های شورزی ایجاد کرده و احتمال می‌دهد که بسیاری از این گونه‌ها ممکن است سازوکارهای سودمند مشابهی در روبه‌رو شدن با شوری داشته باشند.

بهره گرفتن از ژن گیاهان شورپسند در ایجاد گیاهان متحمل به شوری

گیاهان شورپسند با وجود تحمل طبیعی در برابر شرایط شور، در برابر شوری‌های بسیار زیاد آسیب‌پذیر هستند. برای نمونه، طول و قطر ریشه و ساقه گیاه حرا^۱ در شوری زیاد کاهش می‌یابد، اما این تأثیرهای منفی می‌توانند با استفاده از تیمار باکتریایی ویژه بهبود یابند (بهروزی و همکاران، ۱۴۰۱). این گیاهان با سازوکارهایی مانند بیان ژن‌های مرتبط با متالوتیونین‌ها، ناقل‌های فلزی، متالوتیونین‌ها^۲ و فیتوکلاتین‌ها^۳، سمیت عنصرهای فلزی را تحمل می‌کنند. متالوتیونین‌ها و فیتوکلاتین‌ها نقش اساسی در سم‌زدایی یون‌های فلزی، حفظ هموستاز یونی و تقویت ظرفیت آن‌تی‌اکسیدانی دارند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که انتقال ژن‌های مرتبط با تحمل شوری از ژنگان^۴ گیاهان شورپسند به گونه‌های حساس به شوری، می‌تواند تحمل نسبی به شوری را در این گیاهان ایجاد کند. همچنین، ترکیب این ژن‌ها با نانوذره‌های مهارکننده آنزیم‌های هموستاز سدیم-پتاسیم، می‌تواند به بهبود تحمل شوری بیانجامد و به‌عنوان راهکاری کارا در کشاورزی منطقه‌های شور استفاده می‌شود (Khan et al., 2024). برای نمونه، گیاه اشنان^۵ با توانایی تحمل شوری تا ۳۰ گرم در لیتر به‌عنوان گونه گیاهی متحمل در شرایط شور شناخته شده است که در فراریشه خود، میزبان باکتری‌هایی است که عملکرد محصول‌های کشاورزی مانند گندم و سویا را بهبود می‌بخشند. منابع علمی نشان می‌دهند که این باکتری‌های فراریشه با سازوکارهایی مانند پمپاژ و تنظیم غلظت یونی در سیتوپلاسم یا انباشت اسمولیت‌هایی^۶ مانند ساکارز و ترهالوز^۷ با شوری مقابله می‌کنند. گزینش گونه‌های گیاهی بومی متناسب با هر منطقه از فلات مرکزی، همراه با دانش بومی، می‌تواند به بهره‌وری بهینه در کشاورزی منطقه‌ای بیانجامد (Kurkova et al., 2002).

کشت جلبک

جلبک‌ها به عنوان یکی از قدیمی‌ترین موجودهای زنده، نقش مهمی در صنایع غذایی و دارویی دارند و به دو گروه جلبک‌های میکروسکوپی (ریزجلبک‌ها) و ماکروسکوپی (جلبک‌های دریایی) تقسیم می‌شوند. گونه‌هایی مانند اسپیرولینا^۸ و کلرلا^۹ از غنی‌ترین منابع پروتئین، ویتامین‌هایی مانند کوبالامین^{۱۰} و مواد معدنی شامل آهن، کلسیم و منیزیم محسوب می‌شوند (Carpena et al., 2022). این جلبک‌ها همچنین دارای فیبرهای غذایی، ترکیب‌های آن‌تی‌اکسیدانی و اسیدهای چرب امگا-۳ هستند که در بهبود سلامت دستگاه گوارش و عملکرد قلب مؤثرند. به دلیل ویژگی‌های تغذیه‌ای و درمانی، جلبک‌ها به عنوان افزودنی‌های غذایی و مکمل‌های دارویی و غذایی کاربرد گسترده‌ای دارند و به دلیل ویژگی‌های ضدالتهابی، ضدسرطانی و تقویت‌کننده سیستم ایمنی بدن، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مرتبط یافته‌اند (Asghari et al., 2016).

استفاده از شورابه‌ها به عنوان منبعی برای پرورش جلبک‌ها، به ویژه در ترکیب با فاضلاب‌های غنی از مواد مغذی، به عنوان رویکردی نوآورانه و پایدار در تولید زیست‌توده و بهره‌برداری بهینه از منابع آب شور شناخته می‌شود. این روش افزون بر کاهش نیاز به آب شیرین و کاهش هزینه‌های تولید، محیطی مطلوب برای رشد جلبک‌هایی مانند اسپیرولینا و کلرلا فراهم می‌کند که حتی در شرایط شوری زیاد (تا ۴۰ گرم در لیتر) می‌توانند زیست‌توده چشمگیری تولید کنند (Elbarmelgy et al., 2021; Ghobashy et al., 2022). همچنین پژوهش‌ها نشانگر این هستند که این جلبک‌ها در

1. <i>Avicennia marina</i>	2. <i>Metallothionein</i>	3. <i>Phytochelutins</i>	4. <i>Genome</i>	5. <i>Seidlitzia rosmarinus</i>
6. <i>Osmolytes</i>	7. <i>Trehalose</i>	8. <i>Spirulina</i>	9. <i>Chlorella vulgaris</i>	
10. <i>Cobalamin or vitamin B12</i>				

محیط‌های دشوارتر، مانند شورابه‌های نفتی نیز عملکرد مطلوبی داشته‌اند (Graham et al., 2017). برای نمونه، اسپیرولینا توانایی رشد در شوری تا ۴۳ گرم در لیتر را داشته و همچنان به تولید زیست‌توده ادامه می‌دهد (Zeng et al., 1998). بهره‌گیری از تصفیه زیستی با استفاده از گیاهان، جلبک‌ها و میکروارگانیسم‌ها، راهکاری کارآمد و پایدار برای مدیریت آلاینده‌ها و مواد آلی است.

در این زمینه، راکتورهای گیاهی و تالاب‌های مصنوعی با عملکردی مؤثر در حذف بیش از ۹۰٪ نیترژن و فسفر، به‌ویژه در بررسی‌های انجام‌شده در چین، کارایی چشمگیری از خود نشان داده‌اند (Lu et al., 2019). به همین صورت، راکتورهای جلبکی در ایالات متحده توانسته‌اند بیش از ۸۰٪ از آلاینده‌های مغذی را در مقیاس صنعتی جذب کنند (Klein & Davis, 2023). همچنین، راکتورهای میکروبی با تجزیه مواد آلی و آلاینده‌های شیمیایی نقش چشمگیری در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری داشته‌اند، چنان‌که در هند این سیستم‌ها عملکرد مؤثری در حذف آلاینده‌ها از خود نشان داده‌اند (Swain et al., 2018).

گونه‌های دو ریزجلبک^۱ با عملکردی برجسته در محیط‌های شور با غلظت نمک ۲۰۰ تا ۲۵۰ گرم در لیتر، پتانسیل زیادی برای کاربردهای زیستی و صنعتی نشان داده‌اند و حتی در شرایط بی‌هوازی نیز نتایج مطلوبی ارائه کرده‌اند (Oren et al., 2007). ریزجلبک اول، به عنوان یک ریزجلبک سبز نمک‌دوست، به واسطه توانایی تولید زیادی کاروتنوئیدها^۲ و بتاکاروتن^۳، به ویژه در شرایط تنش‌های محیطی، شناخته شده است. این ترکیب‌ها همراه با حجم نسبی زیادی گلیسرین، از یاخته‌ها در برابر نور شدید و فشار اسمزی در محیط‌های بسیار شور محافظت می‌کنند. اهمیت تجاری این گونه، به دلیل استفاده گسترده آن در تولید محصول‌های آرایشی و مکمل‌های غذایی طبیعی، بسیار زیاد است و نقش کلیدی در توسعه زیست‌فناوری‌های مرتبط با محیط‌های شور دارد (Ganesan et al., 2020). ارزش تجاری ریزجلبک‌ها به مقدار خالص بودن آن‌ها وابسته است، به‌طوری‌که قیمت این محصول‌ها بسته به خالص بودن، از کمتر از یک دلار تا ۱۳۵ دلار در هر گرم و در بخش‌های دارویی تا ۴۶۰۰ دلار متغیر است. بر پایه گزارش‌ها، گردش مالی جهانی ریزجلبک‌ها در سال ۲۰۲۰ بیش از ۱۲ میلیون دلار است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به بیش از ۴۰۰ میلیون دلار برسد. افزون بر این، بازار جهانی فوکوگزانتین^۴، به عنوان یک مکمل غذایی ارزشمند، در سال ۲۰۲۰ حدود ۶۰۰ میلیون دلار برآورد شده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۵ به ۷۸۰ میلیون دلار افزایش یابد. تولید ریزجلبک‌ها در خاورمیانه و آفریقا نیز برپایه پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۲۷ رشد ۷/۲ برابری را تجربه خواهد کرد. این در حالی است که بیشتر این تولیدها در اروپا به مصرف می‌رسند، اروپای غربی با سهم ۳۳ درصدی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده ریزجلبک‌ها بوده و ۸۰٪ از این تولیدها در صنایع غذایی به‌کار می‌روند. در حالی که صنعت داروسازی نیز رشد چشمگیری را در این بخش تا سال ۲۰۳۰ خواهد داشت (Elloumi et al., 2020; Abu-Ghosh et al., 2021).

آبزی‌پروری

استفاده از شورابه به‌عنوان منبعی برای پرورش موجودهای آبزی مانند تیلاپیا، سی‌باس و آرتمیا (*Artemia salina*) در ترکیب با کشت ریزجلبک‌ها، ظرفیت‌های بالقوه فراوانی را به ویژه در زمینه‌های محیط‌زیستی و اقتصادی ارائه می‌دهد (Darre & Toor., 2018). این رویکرد، افزون بر کاهش اثرهای زیست‌محیطی ناشی از تخلیه پساب، می‌تواند منبع اقتصادی جدیدی برای جامعه‌های محلی فراهم آورد. همراه کردن آبزی‌پروری و کشت ریزجلبک‌ها در سیستم‌های مدیریتی، امکان

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

تولید محصول‌های جانبی با ارزش غذایی و اقتصادی زیاد را میسر می‌سازد (خندان بارانی و همکاران، ۱۴۰۲). آرتیمیا، به‌عنوان یکی از سخت‌پوستان کلیدی در زنجیره‌های غذایی محیط‌های شور و بسیار شور با شوری ۹۰ تا ۲۵۰ گرم در لیتر، نقشی حیاتی در تأمین غذای زنده و مغذی برای پرورش گونه‌های مختلف آبزیان دارد. این گونه، با توان تولید حدود ۳۰۰۰ کیلوگرم در هر هکتار، به عنوان منبعی اساسی و ارزشمند در آبی‌پروری شناخته می‌شود (Van Stappen et al., 2020). برپایه گزارش‌های دولتی، تیلاپیا به عنوان گونه‌ای محبوب شناخته می‌شود که این محبوبیت ناشی از ویژگی‌هایی مانند رژیم غذایی گیاهی، محتوای پروتئینی زیاد، رشد سریع و توانایی تحمل تراکم زیاد است. گرچه وزن نهایی گونه زلی^۱ (حدود ۳۰۰ گرم) ممکن است محدودیت‌هایی از دید ارزش تجاری ایجاد کند، اما استفاده از این گونه در تولید پودر ماهی می‌تواند این محدودیت‌ها را به‌طور مؤثری جبران کند (فاطمی و سلیمانی، ۱۴۰۱). در همین راستا، بررسی‌ها نشان می‌دهند که گونه زلی می‌تواند در شوری ۴۵ گرم بر لیتر نیز به‌طور مطلوبی رشد کند (El-Sayed, 2006).

بررسی‌های گوناگون، بدون تمرکز بر منشأ گونه‌ها، نشانگر این است که برخی از گونه‌ها توانایی تحمل شوری‌های زیاد را در دامنه گسترده‌ای از شرایط محیطی دارا هستند. به ویژه، گونه‌های مختلف ماهی همچون خامه‌ماهی^۲ می‌توانند شوری را تا ۱۵۸ گرم بر لیتر، کفال راه‌راه^۳ تا ۱۲۲ گرم بر لیتر، تیلاپیای موزامبیک^۴ تا ۱۲۰ گرم بر لیتر، ماهی سرخ‌خو^۵ تا ۶۰ گرم بر لیتر، ماهی صافی^۶ تا ۵۰ گرم بر لیتر، تیلاپیای آبی^۷ تا ۴۵ گرم بر لیتر و سی باس آسیایی^۸ و ماهی شانک زردباله^۹ تا ۴۸ گرم بر لیتر شوری را تحمل نمایند (Mozanzadeh et al., 2021; Seale et al., 2024). افزون بر این، خرچنگ‌های آبی^{۱۰} نیز توانایی تحمل شوری تا ۶۶ گرم بر لیتر را دارا هستند. اگرچه این گونه‌ها با فرهنگ و بازار ایران همخوانی چندانی ندارند، اما در بررسی‌های جذب فلزهای سنگین، عملکرد چشمگیری از خود نشان داده‌اند (Guerin & Stickle, 1992).

استخراج نمک و فلزهای محلول از شورابه‌ها

بر پایه سندهای بالادستی، استخراج فلزها از شورابه‌ها در ایران امکان‌پذیر است، اما این سندها اغلب به شورابه‌های حاصل از آب‌شیرین‌کن‌ها اشاره‌ای ندارند. با این حال، ماهیت شور و مایع بودن این شورابه‌ها امکان استفاده از آن‌ها را در بررسی‌های مرتبط فراهم می‌سازد. برپایه گزارش‌های زیربنایی، ایران حدود ۶۰ پلایا دارد که بیشتر در فلات مرکزی قرار دارند. از مهمترین این پلایاها می‌توان به پلایای خور و بیابانک، کویر بزرگ نمک، باتلاق گاوخونی و دریاچه نمک قم اشاره کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که برداشت کربنات لیتیوم با خلوص ۹۷٪ از شورابه‌های کویر خور و بیابانک از راه روش رسوب‌دهی عملی است. غلظت لیتیوم در آب دریا اندک است و برای استخراج آن نیاز به روش‌های پیچیده و پرهزینه مانند تبادل یونی با حلال‌های آلی است. در مقابل، ترکیب شورابه‌های حاصل از آب‌شیرین‌کن‌ها یا شورابه‌های پلایاها امکان استخراج لیتیوم را با روش‌های ساده‌تر، مانند رسوب‌دهی، فراهم می‌کند (شیخی و شاکری، ۱۳۹۹). ایران با حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال، ظرفیت زیادی برای بهره‌برداری از شورابه‌ها به عنوان منبع لیتیوم دارد. هزینه کم مواد اولیه، سرعت زیاد فرآیند و توانایی جداسازی حجم زیاد رسوب‌ها، روش رسوب‌دهی را برای استخراج لیتیوم از شورابه‌ها اقتصادی می‌کند (نعمتی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، ترکیب شورابه با فاضلاب برای برداشت فسفر از لجن فاضلاب با تشکیل استروویت^{۱۱}، ضمن کاهش آلودگی و هزینه‌ها، بازیافت منابع معدنی و حفاظت از محیط زیست را آسان می‌سازد. این فسفر به عنوان کود زراعی به چرخه مصرف بازمی‌گردد (Peeva et al., 2022; Wang et al., 2023). بررسی انجام

1. *Coptodon zillii* or Redbelly tilapia
4. *Oreochromis mossambicus*
7. *Oreochromis aureus*
10. *Callinectes sapidus*

2. *Chanos chanos*
5. *Lutjanus griseus*
8. *Lates calcarifer*
11. Struvite

3. *Mugil cephalus* L.
6. *Siganus rivulatus*
9. *Acanthopagrus latus*

شده در کشور عربستان سعودی نشان داد که حجم روزانه ۳۳۹۳۶۰۰ متر مکعب شورابه، منبعی غنی برای برداشت مواد معدنی ارزشمند با کاربردهای گوناگون اقتصادی است (Abdulsalam et al., 2017). سدیم با غلظت ۲۲,۹۲۰ میلی گرم در لیتر و تولید سالانه ۲۳۳۹۰۱۷۸ تن، اغلب در تولید کودها استفاده می شود و ارزش سالانه ای معادل ۹/۹ میلیارد دلار دارد. منیزیم با غلظت ۲/۸۰۰ میلی گرم در لیتر و تولید ۳۴۶۸۲۵۹ تن در سال، در تولید آلیاژها به کار می رود و ارزش اقتصادی آن حدود ۸/۳ میلیارد دلار است. پتاسیم و کلسیم نیز به ترتیب با غلظت های ۸۶۵ و ۸۶۰ میلی گرم در لیتر و تولید سالانه ۱۰۷۱۴۴۴ و ۱۰۶۵۲۵۱ تن، در تولید کودها و آلیاژها استفاده شده و ارزش اقتصادی سالانه ای برابر با ۳۲۷ و ۲۱۵ میلیون دلار داشته اند. افزون بر این، مس با غلظت ۲۴ میلی گرم در لیتر و تولید سالانه ۲۹/۷۲۷ تن، ارزشی معادل ۱۶۷ میلیون دلار داشته است. این داده ها اهمیت اقتصادی استخراج مواد معدنی از شورابه را نشان. با توجه به افزایش تقاضای جهانی این فلزها در سال های گذشته و رشد چشمگیر قیمت ها، اهمیت و سودآوری این منابع بیش از پیش نمایان شده است (Abdulsalam et al., 2017; Urrea et al., 2019).

نتیجه گیری

بازچرخش شورابه به عنوان الگویی چندمنظوره و پایدار، نقشی کلیدی در مدیریت منابع آبی و توسعه پایدار منطقه های خشک و نیمه خشک دارد. این سیستم، به جای دفع شورابه، از آن برای پرورش ماهیان متحمل به شوری، استخراج نمک و کشت علوفه بهره می برد و ضمن کاهش فشار بر منابع آب شیرین، بهره وری تولید مواد غذایی را افزایش می دهد. بررسی تجربه های جهانی و گونه های متحمل به شوری نشان می دهند که این رویکرد می تواند با حمایت های مناسب، افزون بر تقویت امنیت غذایی و اقتصادی، فرصت های ارزشمندی برای توسعه پایدار ایجاد کند. چالش هایی مانند محدودیت های قانونی و مقررات زیست محیطی، مسئله های بهداشتی، پیچیدگی های اجرایی در سطح گسترده و ضرورت هماهنگی مؤثر میان نهادهای دولتی و خصوصی، از جمله دغدغه های اساسی در این زمینه به شمار می آید. همچنین، نگرانی هایی درباره تأثیرهای بلندمدت و پایداری محیط زیستی این طرح ها و تضمین عملکرد پایدار آن ها در رویارویی با تغییرات اقلیمی و نوسان های اقلیمی وجود دارد. با این وجود، از راه برنامه ریزی دقیق، به کارگیری فناوری های نوین و تقویت همکاری های بین المللی، می توان این چالش ها را شناسایی، مدیریت و به طور مؤثر حل نمود. با توجه به یافته های این بررسی، پیشنهاد می شود که پژوهش های بیشتری در زمینه تاب آوری گیاهان منطقه های بیابانی، افزایش گونه های علفی از راه کشت آبکشت و همچنین، مهندسی ژنتیک برای افزایش تحمل به شوری در محصولات های کشاورزی در زمین های خشک ایران انجام شود. با توجه به بحران روزافزون کمبود منابع آب شیرین در منطقه و حجم چشمگیر شورابه نسبت به آب شیرین تولیدی از فرایند شیرین سازی، اهمیت راهبردی این طرح به روشنی برجسته می شود.

منابع

- افتخاری، مهدی؛ رهایی، علیرضا؛ عبدالحسین زاده، محمد؛ هرورانی، حسین؛ عبدالهی، محمدرضا؛ ورمزیاری، حجت؛ اعلائی بروجنی، پژمان. (۱۴۰۱). ضرورت اتخاذ اقدامات عاجل برای جلوگیری از افول صنعت دام سبک کشور. (ش.م: ۱۸۱۵۱). مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی.
- اسدی، مراد؛ عبدالمنافی جهرمی، نرجس السادات. (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل شاخص های کلان بخش آب در سه ماهه اول سال ۱۴۰۳ (گزارش فصلی ۱). (ش.م: ۱۹۹۹۳). ماهنامه گزارش های کارشناسی مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی، ۳۲(۶).

مروری بر بهره‌گیری از شورابه آب شیرین‌کن‌ها در پرورش گونه‌های گیاهی، جانوری و جلبکی متحمل به شوری

اسدی، مراد؛ مظاهری، مهدی؛ عبدالمنافی، نرجس السادات. (۱۴۰۰). بررسی تحلیلی شرایط موجود و تبیین وضعیت آینده بحران آب در کشور. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

امیری، سیامک؛ مظاهری، مهدی. (۱۴۰۲). چالش‌های ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در کشور، بررسی شرایط فعلی و بحران فرونشست زمین. (ش.م: ۱۸۸۸۴). ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۱(۲). بهروزی، خورگو، سینا؛ پرورش، حسین؛ مصلحی، مریم؛ خلیل‌آریا، آژیر. (۱۴۰۱). تأثیر پساب آب شیرین‌کن بر برخی از خصوصیات رویشی نهال‌های حرا (*Avicennia marina* Forssk. Vierh). مجله جنگل ایران، ۱۴(۳)، ۳۲۹-۳۴۰. دهقانی، فیروزآبادی بهار؛ آزادی، امین؛ وفا، نرگس. (۱۳۹۹). واحدهای آب شیرین‌کن ۱. خلاصه مدیریتی - مطالعه تطبیقی قوانین تخلیه پساب گرم و شور واحدهای آب شیرین‌کن به آب دریا و ارائه چارچوب قانون (۱۳۹۹)، (ش.م: ۱۷۰۴). مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

شیخی، نگین؛ شاکری، سرور. (۱۳۹۹). بررسی روش‌های استحصال لیتیم از شورابه‌ها. فصلنامه پژوهش در شیمی و

مهندسی شیمی، ۵(۲۱)، ۲۲-۲۸. از <https://civilica.com/doc/1556481>

رحیمی، صدیقه؛ محقر، مانده؛ یوسف‌طالشی، هستی؛ عباسی، شیدا. (۱۴۰۳). گیاه پالایی در محیط‌های آلوده: بررسی عملکرد گیاهان خردل‌هندی و عدسک آبی و جلبک‌های اسپروئیر و قهوه‌ای. سومین همایش بین‌المللی زیست‌شناسی و علوم آزمایشگاهی، همدان. از <https://civilica.com/doc/2066467>

عباسی، حسن؛ ابادی، ساره؛ نجفی، پیام؛ بهارلویی، ژیلا؛ محمدی‌قهساره، احمد. (۱۳۹۷). استفاده از لئو مینور و سیانوباکتری در کاهش کلیرم و کلیرم مدفوعی در دو نوع پساب فاضلاب. اولین کنفرانس ملی توسعه پایدار در علوم کشاورزی و منابع طبیعی با محوریت فرهنگ زیست‌محیطی، تهران. از <https://civilica.com/doc/783553>

فاطمی، سید محمدرضا؛ سلیمانی‌مورچه‌خورتی، الهه. (۱۴۰۱). رویکردها و سیاست‌های توسعه پرورش ماهی تیلاپیا در کشور. ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۳۰(۲).

میری، محدثه؛ نبوی، سیدمحمدباقر؛ دوست‌شناس، بابک؛ صفاهیه، علیرضا؛ لقمانی، مهران. (۱۳۹۳). اثرات تغییرات شوری و دمای ناشی از آب نمک تخلیه شده از کارخانه ی آب شیرین‌کن بر روی ساختار جمعیت پرتاران در خلیج چابهار. مجله علوم و فنون دریایی، ۱۳(۳)، ۴۱-۵۰.

مظاهری، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی جوانب مختلف شیرین‌سازی آب دریا در استان‌های ساحلی (۱۴۰۰)، (ش.م: ۱۷۶۴۴)، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

مظاهری، مهدی؛ عبدالمنافی جهرمی، نرجس السادات؛ سامانی، جمال؛ محمدولی، افشین؛ حسین، صمدی محسن. (۱۳۹۶). بررسی بحران آب و پیامدهای آن در کشور (ش.م: ۱۵۶۰۸). مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

نعمتی، مسعود؛ سراج، پیام؛ صراف‌پور، امیرحسین. (۱۳۹۷). بررسی پتانسیل‌های کشور جهت اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز لیتیم به عنوان مهم‌ترین ذخیره ساز انرژی در دنیا. ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۸(۲۶).

نوشادی، مسعود؛ ولی‌زاده، حسین. (۱۳۹۵). تأثیر گیاه وتیور در کاهش شوری و املاح خاک. آب و خاک، ۳۰(۳)، ۷۹۶-۸۰۴. از <https://civilica.com/doc/666861>

- عابدی کوپایی، جهانگیر؛ قدس مطهری، امیر؛ نجفی، نیلوفر. (۱۳۹۷). بررسی پتانسیل گیاه وتیورگراس برای کاهش شوری زه آب‌های کشاورزی، دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، اصفهان. از <https://civilica.com/doc/856142>
- ورمزیاری، حجت؛ اعلائی بروجنی، پژمان. (۱۳۹۹). تحلیل چالش‌های توزیع و تأمین خوراک مرغداری‌های کشور. (ش.م: ۱۷۲۶۰)، ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. ۲۸(۸).
- Abdulsalam, A., Idris, A., Mohamed, T.A. & Ahsan, A. (2017). An integrated technique using solar and evaporation ponds for effective brine disposal management. *International Journal of Sustainable Energy*, 36(9), 914–925.
- Asghari, A., Fazilati, M., Latifi, A. M., Salavati, H. & Choopani, A. (2016). A review on antioxidant properties of Spirulina. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 3(1), 345-351.
- Abu-Ghosh, S., Dubinsky, Z., Verdelho, V. & Iluz, D. (2021). Unconventional high-value products from microalgae: A review. *Bioresource Technology*, 329, 124895. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124895>
- Bajji, M., Kinet, J.M. & Lutts, S. (1998). Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex halimus* L. and their corresponding callus cultures. *Plant science*, 137(2), 131-142.
- Carter, J. M. & Nippert, J.B. (2011). Physiological responses of *Tamarix ramosissima* to extreme NaCl concentrations. *American Journal of Plant Sciences*, 2(06), 808.
- Carpena, M., García-Pérez, P., García-Oliveira, P., Chamorro, F., Otero, P. et al. (2023). Biological properties and potential of compounds extracted from red seaweeds. *Phytochemistry Reviews*, 22(6), 1509-1540.
- Cuong, D.C., Van Minh, V. & Truong, P. (2015). Effects of sea water salinity on the growth of vetiver grass (*Chrysopogon Zizanioides* L.). *Modern Environmental Science and Engineering*, 1(4), 185-191.
- Darre, N.C., & Toor, G.S. (2018). Desalination of water: a review. *Current Pollution Reports*, 4, 104-111.
- Elloumi, W., Jebal, A., Maalej, A., Chamkha, M. & Sayadi, S. (2020). Effect of mild salinity stress on the growth, fatty acid and carotenoid compositions, and biological activities of the thermal freshwater microalgae *Scenedesmus* sp. *Biomolecules*, 10, 1515. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/biom10111515>
- ElBarmelgy, A., Ismail, M.M. & Sewilam, H. (2021). Biomass productivity of *Nannochloropsis* sp. grown in desalination brine culture medium. *Desalin Water Treat*, 216, 306-314.
- El-Sayed, A.F.M. (2006). Tilapia culture in salt water: environmental requirements, nutritional implications and economic potentials. *Avances en Nutricion Acuicola*.
- Ganesan, R., Manigandan, S., Samuel, M.S., Shanmuganathan, R., Brindhadevi, K. et al. (2020). A review on prospective production of biofuel from microalgae. *Biotechnology Reports*, 27, e00509.
- Ghobashy, M.O., Bahattab, O., Alatawi, A., Aljohani, M.M. & Helal, M.M. (2022). A novel approach for the biological desalination of major anions in seawater using three microalgal species: A kinetic study. *Sustainability*, 14(12), 7018.
- Graham, E.J.S., Dean, C.A., Yoshida, T.M., Twary, S.N., Teshima, M. et al. (2017). Oil and gas produced water as a growth medium for microalgae cultivation: A review and feasibility analysis. *Algal Research*, 24, 492-504.
- Guerin, J.L. & Stickle, W.B. (1992). Effects of salinity gradients on the tolerance and bioenergetics of juvenile blue crabs (*Callinectes sapidus*) from waters of different environmental salinities. *Marine Biology*, 114, 391-396.
- Khan, M.N., Li, Y., Mu, Y., Sultan, H., Baloch, A. et al. (2024). Recent advances in nano-enabled plant salt tolerance: Methods of application, risk assessment, opportunities and future perspectives. *Journal of Integrative Agriculture*.
- Klein, B. & Davis, R. (2023). Algal biomass production via open pond algae farm cultivation: 2022 state of technology and future research (No. NREL/TP-5100-85661). *National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden CO (United States)*.
- Kurkova, E.B., Kalinkina, L.G., Baburina, O.K., Myasoedov, N.A. & Naumova, T.G. (2002). Responses of *Seidlitzia rosmarinus* to salt stress. *Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 29, 221-229.

- Lu, S., Gao, X., Wu, P., Li, W., Bai, X., Sun, M. & Wang, A. (2019). Assessment of the treatment of domestic sewage by a vertical-flow artificial wetland at different operating water levels. *Journal of Cleaner Production*, 208, 649-655.
- Maleki, T., Attaeian, B. & Mohammadparast, B. (2023). Salinity affects leaf physiologic and biochemical traits of Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.). *Environmental Resources Research*, 11(1), 77-82.
- Mozanzadeh, M. T., Safari, O., Oosooli, R., Mehrjooyan, S., Najafabadi, M.Z. *et al.* (2021). The effect of salinity on growth performance, digestive and antioxidant enzymes, humoral immunity and stress indices in two euryhaline fish species: Yellowfin seabream (*Acanthopagrus latus*) and Asian seabass (*Lates calcarifer*). *Aquaculture*, 534, 736329.
- Oron, G., Appelbaum, S. & Guy, O. (2023). Reuse of brine from inland desalination plants with duckweed, fish and halophytes toward increased food production and improved environmental control. *Desalination*, 549, 116317.
- Oren, A. (2007). Diversity of organic osmotic compounds and osmotic adaptation in cyanobacteria and algae. In *Algae and cyanobacteria in extreme environments* (pp. 639-655). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Peeva, G., Yemendzhiev, H. & Nenov, V. (2022). Precipitation of struvite from digested sewage sludge by sea water brine and natural flocculants. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 57(2).
- Rodrigues, M.J., Monteiro, I., Castañeda-Loaiza, V., Placines, C., Oliveira, M.C. *et al.* (2020). Growth performance, *in vitro* antioxidant properties and chemical composition of the halophyte *Limonium algarvense* Erben are strongly influenced by the irrigation salinity. *Industrial Crops and Products*, 143, 111930.
- Sree, K. S., Adelmann, K., Garcia, C., Lam, E. & Appenroth, K. J. (2015). Natural variance in salt tolerance and induction of starch accumulation in duckweeds. *Planta*, 241, 1395-1404.
- Swain, A.K., Sahoo, A., Jena, H. M. & Patra, H. (2018). Industrial wastewater treatment by aerobic inverse fluidized bed biofilm reactors (AIFBBRs): a review. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 61-74.
- Seale, A.P., Cao, K., Chang, R.J., Goodearly, T. R., Malintha, G.H.T. *et al.* (2024). Salinity tolerance of fishes: Experimental approaches and implications for aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*.
- Tawfik, M.M., Thalooh, A.T. & Zaki, N. M. (2012). Exploring saline land improvement through testing *Leptochloa fusca* and *Sporobolus virginicus* in Egypt. In *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture* (pp. 615-629). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Tisarum, R., Chaitachawong, N., Takabe, T., Singh, H.P., Samphumphuang, T. & Cha-Um, S. (2022). Physio-morphological and biochemical responses of dixie grass (*Sporobolus virginicus*) to NaCl or Na₂SO₄ stress. *Biologia*, 77(11), 3059-3069.
- Torshizi, M.R., Miri, A., Shahriari, A., Dong, Z. & Davidson-Arnott, R. (2020). The effectiveness of a multi-row *Tamarix* windbreak in reducing aeolian erosion and sediment flux, Niatak area, Iran. *Journal of environmental management*, 265, 110486.
- Urrea, S.A., Reyes, F.D., Suárez, B.P. & de la Fuente Bencomo, J.A. (2019). Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. *Desalination*, 450, 54-63.
- Van Stappen, G., Sui, L., Hoa, V.N., Tamtin, M., Nyonje, B. *et al.* (2020). Review on integrated production of the brine shrimp *Artemia* in solar salt ponds. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 1054-1071.
- Wang, X., Shi, C., Hao, X., van Loosdrecht, M.C. & Wu, Y. (2023). Synergy of phosphate recovery from sludge-incinerated ash and coagulant production by desalinated brine. *Water Research*, 231. Retrieved from: [119658.https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119658](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119658)

A Review of Utilization of Brine from Desalination Plants in the Cultivation of Salt-Tolerant Plant, Animal and Algal Species

Feizi, M. and Hamidian, A.H.^{1, 2}

In recent years, the increasing scarcity of freshwater resources has resulted in a greater dependence on seawater, which incurs significant costs. Currently, only one-third of the water extracted from the sea is converted into freshwater, while the remainder is discharged back into the environment as brine. The reuse of brine with innovative and sustainable approaches can serve as a source for the cultivation of salt-tolerant fish, salt extraction, and forage farming in these regions. This study examined 110 publications that investigated various aspects of brine recycling from desalination plants in Iran, explored the challenges, opportunities, and economic benefits of this system and presented a conceptual model derived from the studies. This research investigates the critical issue of feedstock scarcity arising from the inefficiencies inherent in conventional agricultural systems. Additionally, it provides an analysis of the economic advantages associated with the extraction of mineral salts and valuable metals. The study aims to contribute to the discourse on sustainable agricultural practices and resource optimization in the context of addressing feedstock limitations. Additionally, the study presents three plant species, four fish species, three microalga species, and one crustacean species with high protein content, all of which exhibit tolerance to brine salinity and show potential for cultivation in saline environments.

Key Words: Artemia, Halophytes, Reuse, Salinity adaptation, Sea water.

1. Corresponding Author Email: a.hamidian@ut.ac.ir

2. Ph.D. Student and Professor of University of Tehran (Invited Scholar of I.R. Academy of Sciences), respectively.