FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 2, Summer, (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Environmental Management of Agricultural Drainage Water Use in Iran: A Comparative Study of International Experiences and Prospect

Elham Ebrahimi Sarindizaj[1*] ; Shiva Omidi[2]

[*]1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2. MSc. Student, Department of Environment, Urmia University, Urmia, Iran
[*]Email Address: e.ebrahimi@urmia.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2024/07/10
Revised Date:
2024/07/20
Accepted Date:
2024/07/29
Published Date:
2025/07/26

Keywords:
Nonconventional Water,
Water Security,
Agricultural Drainage,
Water Quality,
Environmental Sustainability,

ABSTRACT

Water resource limitations, factors, increasing population growth, climate change, and increasing competition between different water-consuming sectors, have affected the continuous water supply. Environmental sustainability and food security directly relate to the management of agricultural water use (the largest consumer of available water resources). To find a solution to overcome the water crisis in the world, it is necessary to pay special attention to non-conventional water resources. To identify the compounds and pollutants, the challenges, and the application of drainage water reuse, in the present article, by proposing a comparative study of international experiences, different approaches and potentials of drainage reuse for irrigation have been evaluated. Due to the results, with the social resistance reduction regarding the drainage water reuse, the use of biological filters, new drainage systems, and technologies for the purposeful treatment and use of the valuable potential of drainage water, results such as helping the sustainability of the environment, and improving the quality of resources have led to increased productivity and regional stability in line with the sustainable development goals. Using similar experiences, although currently, many obstacles are in the development of drainage reuse systems in Iran, the planned and appropriate reuse of drainage water can be considered as a solution to the growing challenges of water shortage and the perspective with the technology advancement and the understanding of the need for sustainable agriculture. With proper planning and management, this approach can reduce pressure on resources and have positive eco-environmental effects on water and food security in Iran.

Cite this article: Elham Ebrahimi Sarindizaj, Shiva Omidi (2025). Environmental Management of Agricultural Drainage Water Use in Iran: A Comparative Study of International Experiences and Prospect, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(2) , Pages 10085 – 10097.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Due to the limited water resources, factors such as increasing population growth, climate change, and increased competition between different water-consuming sectors have affected the continuous water supply. The sustainability of water resources and providing food security has a direct relationship with water use management in the agricultural sector (the largest consumer of available water resources). Therefore, to solve the world's water crisis, it is necessary to pay special attention to non-conventional water sources. The future vision for promoting water-saving agriculture involves leveraging technological advances, regulatory frameworks, and public awareness to ensure sustainable practices. Research on the sustainable use of wastewater in agriculture is gaining significance, with a focus on refining technical aspects and addressing social considerations. By integrating these approaches with sound legislation and economic analysis, the future of water-saving agriculture looks promising for ensuring food security and environmental sustainability.

Material and Methods

Due to the high salinity of agricultural drainage and the short-term and long-term effects of irrigation with runoff on soil quality and its effect on fertility, the use of runoff without proper treatment and desalination is not recommended at all. To identify the compounds and pollutants, the challenges, and the drainage reuse, in this article, by presenting a comparative study of international experiences, different approaches to the use and drainage reuse for the irrigation of crops have been evaluated. These experiences included the use of different methods: effective pre-treatment of drainage water, desalination (thermal hybrid fossil-solar desalination), reverse osmosis, multi-effect distillation, irrigation tanks in the field, artificial wetlands, drainage pits, and irrigation canals, filter column system-based on zeolite and iron, self-purification and mixing of drainage water with fresh water until reaching the standard. In addition to this, an effort was made to develop a conceptual model concerning the technical, environmental, and managerial aspects of the reuse of agricultural drainage, to provide a basic platform for the conceptual modelling of drainage recycling based on the above-mentioned materials and to provide a starting point for comprehensive environmental management in future studies.

Results

Learning from successful experiences in countries emphasizes the importance of sound legislation, strict water management systems, and promoting water conservation practices to enhance agricultural water use efficiency and protect water resources. If under specific conditions, controls, and restrictions, the use of agricultural drainage in crop irrigation can be suitable for hydroponic cultivation related to salinity-resistant crops. In this type of cultivation, the plant receives its required nutrients in the form of solution from water. Of course, drainage reuse in this method also requires a detailed examination of products and operational feasibility (considering an acceptable level of product loss). Since, in addition to water restrictions, one of the main challenges of Iran in moving towards the goals of sustainable development is the limitation of land and suitable soil resources, these lands are accompanied by environmental issues.

Conclusion

Considering the inability to use agriculture drainage (direct use and without expensive purification and desalination), some industries have the potential to use it with special considerations. Of course, a proposed method can include the use of drainage in hydroponic cultivation (in a controlled manner) to achieve significant productivity from the drainage reuse while ensuring soil stability. Considering salinity-resistant products, in the hydroponic method, soil pollution will not be a critical issue, water will be saved and the cost of production will be reduced. Therefore, with proper planning and management, this approach can contribute to reducing the pressure on water resources and leave positive economic and environmental effects on water and food security in Iran.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰، شماره ۲
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

مدیریت زیست محیطی بازمصرف زهاب کشاورزی در ایران: مطالعه تطبیقی تجربه‌های بین‌المللی و چشم‌انداز آتی

الهام ابراهیمی سرین دیزج[1*]، شیوا امیدی[2]

*۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
*ایمیل نویسنده مسئول: e.ebrahimi@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۴/۲۰
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۴/۳۰
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۰۸
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۰۵/۰۴

کلید واژه ها:
آب غیرمتعارف،
امنیت آبی،
کیفیت آب،
پایداری محیط زیست.

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب، عواملی چون رشد روزافزون جمعیت، تغییر اقلیم و افزایش رقابت بین بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب، عرضه مستمر آب را تحت تأثیر مضاعف قرارداده است. پایداری محیط زیست و تأمین امنیت غذایی رابطه مستقیمی با مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی (بزرگترین مصرف‌کننده منابع آب دردسترس) دارد. لذا، برای رسیدن به راهکاری برای برون‌رفت از بحران آب در جهان، توجه ویژه‌ای به منابع آب غیرمتعارف، ضروری می‌باشد. در راستای شناخت ترکیبات و آلاینده‌ها، چالش‌ها و کاربرد بازمصرف زه‌آب، در مقاله حاضر با ارائه یک مطالعه تطبیقی از تجربیات بین‌المللی، رویکردهای مختلف کاربرد و پتانسیل بازمصرف زه‌آب ارزیابی شده است. بر اساس نتایج، با کاهش مقاومت اجتماعی در خصوص بازمصرف زه‌آب کشاورزی، کاربرد فیلترهای زیستی، سامانه‌های زهکشی و فناوری‌های نوین جهت تصفیه و استفاده هدفمند از پتانسیل‌های ارزشمند زه‌آب، نتایجی مانند کمک به پایداری محیط زیست، بهبود کیفیت منابع، افزایش بهره‌وری و پایداری منطقه‌ای در راستای اهداف توسعه پایدار را به دنبال داشته است. با استفاده از تجربه‌های مشابه هرچند که در وضعیت فعلی، موانع متعددی در زمینه توسعه بازمصرف زه‌آب کشاورزی در ایران وجود دارد اما بازمصرف برنامه‌ریزی شده و مناسب زه‌آب می‌تواند به عنوان راه حلی برای چالش‌های روبه رشد کمبود آب تلقی شده و چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای با پیشرفت فناوری و درک نیاز به کشاورزی پایدار ارائه دهد. با برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح، این رویکرد می‌تواند ضمن کاهش فشار بر منابع، اثرات اقتصادی و محیط‌زیستی مثبتی در امنیت آبی و غذایی در ایران برجای بگذارد.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI:10.22034/JESS.2024.467111.2271

۱-مقدمه

آب از مهم‌ترین عوامل توسعه در جهان بوده است و از دیرباز، آبادانی‌ها در مجاورت منابع آب رخ داده و فعالیت‌های کشاورزی به‌عنوان نخستین دخالت بشر در طبیعت، از منابع آب در دسترس (رودخانه‌ها و چشمه‌ها) بهره می‌گرفتند. با توجه به محدودیت منابع آب شیرین در جهان، با رشد تقاضای آب در بخش کشاورزی با افزایش جمعیت و تقاضای جهانی غذا، تأمین آب به‌صورت یک چالش در سطح جهان درآمده است. بسته به نوع محصول، طول دوره رشد، اقلیم و الگوهای بارش، حجم آب موردنیاز محصولات در فصول مختلف متفاوت است . که این امر نیز باعث پیچیدگی تأمین تقاضای روزافزون آب در کشاورزی شده است. فشار بر منابع آب در اثر افزایش رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تغییر اقلیم، گسترش شهرنشینی، فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی پیامدهای قابل‌توجهی را بر ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی تحمیل می‌کند. چالش تنش آبی (زمانی که تقاضا برای آب سالم و قابل‌استفاده در یک منطقه معین از عرضه بیشتر شود)، یک مشکل جهانی رو به وخامت است. به طور متوسط حدود ۷۰ درصد از آب شیرین جهان برای کشاورزی استفاده می‌شود و بقیه بین مصارف صنعتی (۱۹ درصد) و شهری و خدمات (۱۱ درصد) تقسیم می‌شود . به‌طورکلی، کشاورزی به تولید محصولات غذایی با بهره‌گیری از منابع پایه و هدف تأمین امنیت غذایی (دسترسی تمام افراد یک جامعه، به غذای کافی و سالم در بستر توسعه پایدار) می‌پردازد. مدیریت مؤثر منابع آب در شبکه‌های آبیاری به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب بسیار مهم است. شبکه‌های آبیاری در ایران بیش از ۸۰٪ از منابع آب را مصرف می‌کنند و عملکردی بسیار کمتر از حد انتظار ارائه می‌کنند . آلودگی اراضی کشاورزی، به‌عنوان یکی از چالش‌ها و تهدیدهای پیش روی منابع است که می‌تواند منشأ زمین‌ساختی داشته یا در اثر فعالیت‌های بشری همانند استفاده از پساب‌ها، فعالیت صنایع و دفع نامناسب پسماند ایجاد شده باشد. این آلودگی‌ها (عناصر غذایی، نمک‌ها، سموم و رسوبات) با جذب توسط گیاه وارد چرخه غذایی شده و سلامت انسان و کارایی اکوسیستم را به مخاطره می‌اندازد. این مسئله، دووجهی می‌باشد؛ به آن معنی که کشاورزی خود یکی از متضررین بخش‌ها از آلودگی‌های محیط زیستی محسوب می‌شود؛ امّا خود این بخش نیز با مصرف بخش عمده‌ای از منابع آب در دسترس و عرضه حجم بالای آب برگشتی، تأثیر غیرقابل‌انکاری بر کاهش کیفیت منابع دارد.روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش آلاینده‌های حاصل از فعالیت‌های کشاورزی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به کشت نواری ، تناوب زراعی ، مدیریت زهکشی و زهاب و کشاورزی حفاظتی اشاره نمود. برای ایجاد شرایط مساعد برای رشد گیاه، منابع آبی مانند حجم آب حاصل از بارش، ذوب برف، رواناب، نفوذ آب از ارتفاعات، سرریز از مجاری جریان بایستی از طریق سیستم‌های زهکشی کشاورزی به طور مؤثری مدیریت شود تا آب ساکن یا اضافی از اراضی کشاورزی حذف شود. زهکشی کشاورزی فرایند حذف آب اضافی (آب آزاد یا آب گرانشی) از سطح یا زیر خاک، برای ایجاد شرایط مساعد برای رشد گیاه است. که با جلوگیری از فرسایش و شستشوی مواد مغذی، امکان کاشت اوایل بهار را فراهم کرده و می‌تواند در احیای تالاب‌ها و آبیاری اراضی کشاورزی استفاده شود. با توجه به مصرف بالای آب در این بخش که کشاورزی را به پرمصرف‌ترین بخش تبدیل می‌کند ، سالانه حجم قابل‌توجهی زهاب تولید می‌شود که نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب را بیش‌ازپیش نمایان می‌کنند.زهاب کشاورزی، تنوع مکانی و زمانی بالایی در حجم دارد که به اقلیم، نوع خاک، نوع محصول، توپوگرافی، روش آبیاری و سطح آب زیرزمینی وابسته است. به‌عنوان مثالی از حجم خروج مواد مغذی ارزشمند (مانند نیترات و فسفات) از مزارع کشاورزی، می‌توان به ایالات متحده امریکا با حجم تقریبی معادل روزانه ۱۷۰ میلیون مترمکعب اشاره کرد. افزون بر تأثیر قابل‌توجه بازمصرف زهاب کشاورزی بر تأمین تقاضا و بهبود بهره‌وری آب، کیفیت زهاب تعیین‌کننده نوع گیاه مناسب کشت بوده و آلاینده‌های موجود در زهاب (مانند رسوبات، آفت‌کش‌ها و مواد مغذی) نقش مهمی در کاربرد زهاب برای تولیدات گیاهی ایفا می‌کنند. بر اساس آمار سازمان ملل، برداشت از کل منابع تجدیدپذیر آب شیرین موجود جهان به ۱۸/۴ درصد در سال ۲۰۱۸ رسیده است و مناطق آسیای مرکزی و جنوبی با تنش آبی بالا و شمال آفریقا با تنش آبی بحرانی مواجه هستند . همچنین ۲۰ درصد از اروپا تحت تأثیر تنش آبی قرار دارند. با ادامه وضعیت موجود و تغییرات اقلیمی، تنش آبی تشدید شده و آسیب‌های گسترده‌ای از منظر سلامت عمومی و اجتماعی، توسعه اقتصادی و تجارت جهانی می‌تواند ایجاد شود. بیشتر مطالعات پیشین در خصوص شبکه‌های آبیاری در ایران صرفا بر مدیریت بهینه آب متمرکز بوده اند که این رویکرد حتی در صورت موفقیت، الزامی برای عملکرد مطلوب تولید غذا و حرکت به‌سوی امنیت غذایی ایجاد نمی‌کند. در همین راستا، در بسیاری از کشورها از منابع آب غیرمتعارف به‌عنوان راهی برای نزدیک‌تر شدن به پایداری منابع آب و محیط زیست، برای آبیاری محصولات کشاورزی، زمین‌های ورزشی، جنگل‌ها و فضای سبز استفاده می‌شود. هرچند که منابع آب متعارف (آب‌های زیرزمینی و سطحی) به دلیل عواملی چون سهولت برداشت و دسترسی، نیاز کمتر به زیرساخت و کیفیت نسبی بالای آب در مقایسه با منابع آب غیرمتعارف (مانند فاضلاب شهری، آب شور و زهاب کشاورزی) به طور قابل‌توجهی بیشتر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند؛ در پاسخ به چالش‌های ذکرشده، بازمصرف زهاب کشاورزی به‌عنوان یک روش مدیریت پایدار آب شناخته شده است. موارد استفاده مجدد از زهاب به طور کلی می‌تواند شامل استفاده در آبیاری غرقابی، آبشویی اولیه اراضی شور، پرورش گیاهان مقاوم به شوری، توسعه و بهبود وضعیت زیستگاه‌های طبیعی و تالاب‌ها باشد. البته بازمصرف زهاب (مانند سایر منابع آب غیرمتعارف)، چالش‌هایی را به دنبال دارد؛ در مناطق با حاصلخیزی بالا، وجود اجزایی مانند آفت‌کش‌ها، نمک‌ها، فلزات، مواد سمی و غلظت بالای جامدات محلول کل (TDS) می‌تواند مانع از استفاده مجدد مستقیم از آن شود. در رسوبات بدنه‌های آبی، فلزات سنگین با اتصال به ذرات می‌توانند به طور گسترده‌ای در

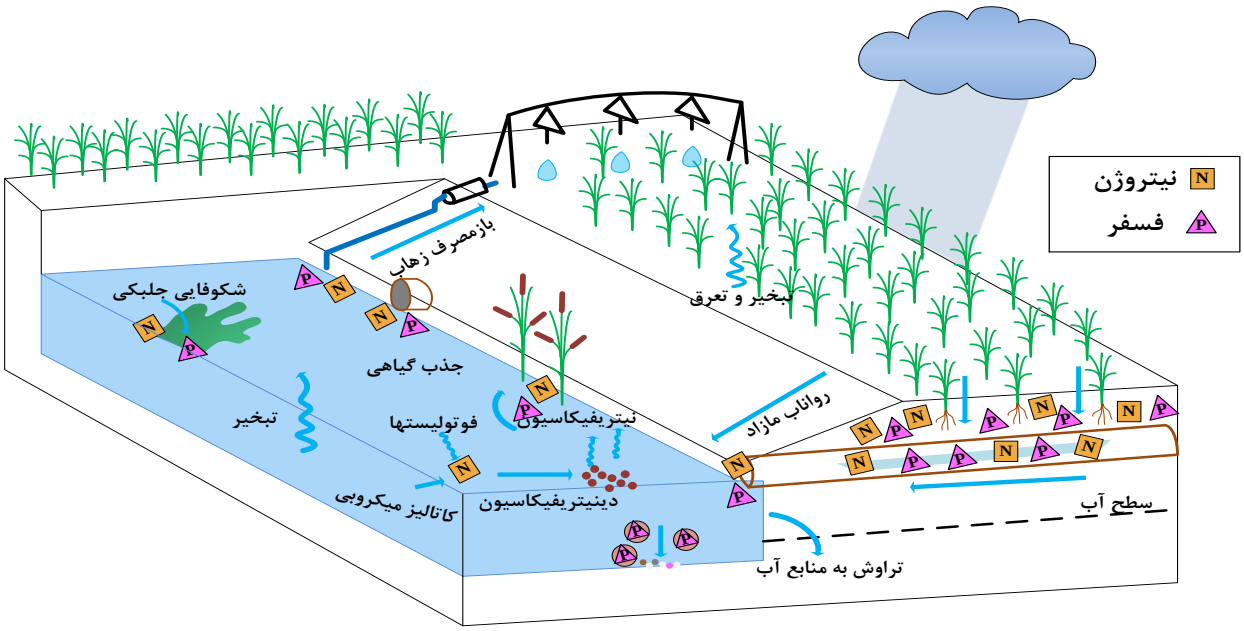
[1] **Total Dissolved Solids (TDS)**

زنجیره‌های غذایی پخش شده و یون‌های فلزی موجود در زنجیره‌های غذایی می‌توانند توسط آبزیان جذب شوند و بر وضعیت فیزیولوژیکی آنها تأثیر منفی بگذارد. مطالعات مختلفی وجود بقایای آفت‌کش‌ها در اکوسیستم‌های آبی مختلف را نشان داده است. در کنار تأثیرهای بالقوه زهاب کشاورزی در صنعت پرورش ماهی، توجه به این نکته مهم است که تصفیه و استفاده مجدد از زهاب کشاورزی تنها به تأمین آب آبیاری محدود نمی‌شود، بلکه برای جلوگیری از شورشدن آب شیرین، تغذیه‌گرایی و سایر آلودگی‌های زیست‌محیطی (مانند آلودگی سلنیوم) نیز ضروری است. در صورت مساعد بودن شرایط و برآورد حداقل‌های موردنیاز، زهاب می‌تواند در همان منطقه به‌عنوان آب آبیاری تکمیلی مجدداً استفاده شود. مطابق با پیشینه پژوهش، سیستم‌های بازیافت آب، زهکشی آبیاری و کیفیت آب را به هم مرتبط می‌کنند و به کشاورزان اجازه می‌دهند تا به مسائل مربوط به تولید محصول پرداخته و درعین‌حال مباشرت محیط‌زیست خود را بهبود بخشند. در ایران نیز مانند سایر کشورها با شرایط مشابه، پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای گسترش استفاده از منابع آب جایگزین برای آبیاری وجود دارد. در مقاله حاضر، در کنار اشاره به چالش‌های پیش‌روی منابع آبی و تأثیر این چالش‌ها بر پایداری منابع و امنیت غذایی، ابتدا ویژگی‌های زهاب کشاورزی به‌عنوان یک منبع غیرمتعارف آب، استراتژی‌های بالفعل استفاده مجدد و فرصت‌های بالقوه برای کاربردهای کشاورزی بررسی می‌شود. باتوجه‌به تنوع زمانی و مکانی بالای مزارع (روش‌های مدیریت منحصربه‌فرد، انواع محصول، اقلیم و انواع خاک)، تلاش شده است تا یک رویکرد منطقه‌ای برای ارزیابی فرصت‌های فعلی و بالقوه برای استفاده مجدد از زهکشی کشاورزی برای آبیاری اتخاذ شود و در پایان با بهره‌گیری از تجربه‌های مشابه جهانی، چالش‌ها و فرصت‌هایی که در بازیافت و بازمصرف زهاب کشاورزی وجود دارد، راهکارهایی جهت گسترش استفاده مجدد از زهکشی کشاورزی برای آبیاری در ایران و بهبود بهره‌وری پیشنهاد می‌شود. ازآنجا که تاکنون، مدل مفهومی در ارتباط با ابعاد فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی آثار بازمصرف زهاب کشاورزی توسعه نیافته است، در این مقاله تلاش شده است تا بر اساس مطالب فوق‌الذکر، یک بستر اولیه برای مدل‌سازی مفهومی بازیافت زهاب ارائه شود تا نقطه شروعی بر مطالعات آتی جامع فراهم آورد.

۲-روش انجام تحقیق

مصرف کودها و سموم شیمیایی مختلف، سبب می‌شود که زهاب‌های خروجی از اراضی بالادست، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها را وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی کرده و با در معرض خطر قرار دادن کیفیت این منابع آب و محیط‌زیست، تهدیدی جدی برای سلامت بشر ایجاد کنند. به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی و میکروبی منابع آب غیرمتعارف و منابع آب شیرین، چالش‌های جدیدی دررابطه‌با کیفیت آب بروز پیدا می‌کند. زهاب کشاورزی منبع اصلی مواد مغذی (عمدتاً نیتروژن و فسفر) پراکنده در آب‌های شیرین است که باعث ایجاد تغذیه‌گرایی (شکوفایی جلبکی) می‌شود. چنین شرایطی، متعاقباً بر بقای آبزیان تأثیر گذاشته و می‌تواند منجر به تخریب اکوسیستم‌ها شود. یکی از روش‌های بررسی سیستم‌های پیچیده، بهره‌گیری از تفکر سیستمی و رویکرد پویایی‌های سیستم است که در آن، سیستم از حلقه‌های منفی و مثبت تشکیل شده است که توسط روابط بازخوردی بین عناصر سیستم پشتیبانی می‌شوند. هدف معمول یک مطالعه پویایی سیستم، درک چگونگی و چرایی ایجاد پویایی پدیده است. حلقه‌های علت و معلولی ابزاری مفید جهت مطالعه روند تغییرات و علل آنها، درک فرایندهای فیزیکی و نتیجه اطلاعات و طراحی و شبیه‌سازی پیامدهای سیاست‌ها در یک سیستم است. به‌این‌ترتیب می‌توان بر اساس بازخوردهای موجود در سیستم، فعل‌وانفعالات عناصر سیستم، ساختار و الگوی رفتاری سیستم را تعیین و بر مبنای آن، سیاست‌گذاری نمود . در مطالعه حاضر پس از بررسی و موشکافی مزایا و معایب بازمصرف زهاب و استفاده از تجربیات مختلف در نقاط مختلف جهان، الگوهای رفتاری چنین سیستمی، استخراج شود. برای استفاده از زهاب در کنار بهبود مدیریت آب و حفظ ساختار و نفوذ خاک، انتخاب محصولاتی با سطح مناسبی از تحمل شوری، ضروری است. براین‌اساس، اگر بتوان چالش‌های مذکور را رفع کرد، تصفیه و استفاده مجدد از زهاب کشاورزی باعث بهبود وضعیت کمبود آب که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، کشاورزان با آن روبرو هستند، شده و نگرانی‌های مربوط به سمیّت مربوط به موادی از جمله نیترات، آرسنیک، بور، کادمیوم، سرب، جیوه، مولیبدن، نیکل، سلنیوم، نقره، اورانیوم، وانادیم را در کنار مسائل مرتبط با تجمع نمک را نیز برطرف می‌کند. این رویکرد می‌تواند موجب کاهش تغذیه‌گرایی و تنش در سفره‌های آب‌های زیرزمینی در مناطقی که مشکل کمبود آب وجود ندارد، شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، خواص زهاب کشاورزی می‌تواند بر ویژگی و عملکرد خاک تأثیر بگذارد. به‌طوری‌که بازمصرف کنترل شده و مدیریت شده زهاب، بازده و بهره‌وری محصول را افزایش می‌دهد و حتی ممکن است موجب بهبود خاک نیز شود. در واقع، تصفیه و بازمصرف زهاب کشاورزی به ارزش محصولات تحت آبیاری نیز وابسته است. استفاده مجدد و سیستم‌های ذخیره‌سازی مستقیم تنها در خصوص محصولات با ارزش اقتصادی بالا، دارای توجیه است. به‌عنوان نمونه، معمولاً تصفیه پیشرفته در برخی مناطقی که محصولات با ارزش بالا (مانند زعفران، گوجه‌فرنگی، انگور، توت‌فرنگی، مرکبات یا آجیل و خشکبار) رشد می‌کنند، باصرفه است. از سوی دیگر، به دلیل تنوع الگوهای اقلیمی و بارش، مقدار جریان زهکشی جذب شده سالانه جهت مدیریت و بارهای مواد مغذی متفاوت بوده و بازیافت آب زهکشی در فصل خشک غیر رویش مرطوب و فصل رشد خشک بیشترین فرصت دارد . مشخصات آب آبیاری با کیفیت خوب شامل بی‌رنگی، بی‌بویی و بدون کف بودن، با pH خنثی، حداقل کدورت، TDS کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و رسانایی ویژه کمتر از ۱۵۰ میلی‌ثانیه بر سانتی‌متر است؛ پس منابع آب غیرمتعارف جهت بازمصرف در کشاورزی، باید اجزای حیاتی مؤثر بر شرایط گیاه و خاک در طول کاربرد طولانی‌مدت را دارا باشد. در شکل ۱، جزئیات سیستم‌های مناسب بازیافت زهاب با فرایندهای تصفیه طبیعی (نیترات‌زدایی،

فتولیز (تجزیه ماده شیمیایی به اجزای ساده‌تر در اثر تابش شعاع نوری) و ته‌نشینی مواد مغذی) در مخزن از منظر هیدرولوژیکی نشان داده شده است.



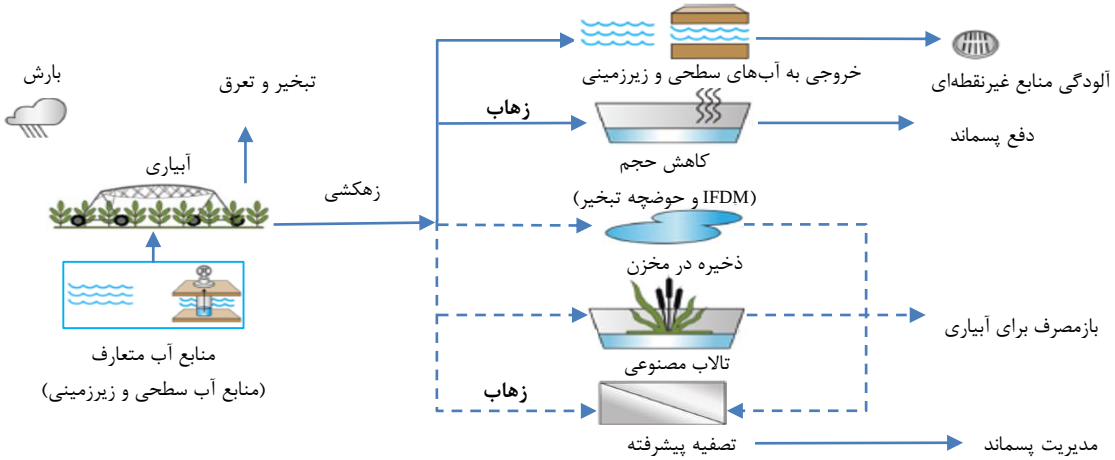
شکل ۱. سیستم‌های بازیافت زهاب همراه با فرآیندهای تصفیه طبیعی در مخزن، برگرفته از Hejase et al. (2021)

ایران از کشورهای در منطقه خشک و نیمه‌خشک بوده و بیشتر آب خود را برای کشاورزی مصرف می‌کند. این امر باعث شده است که در برخی از مناطق کشور، آب کمیاب شده و بیلان آب منفی و بحران آبی به وجود آید. نظر به محدودیت منابع آب در ایران، یافتن منابع جدید تأمین آب امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر، با توجه به راندمان پایین آبیاری در منطقه، حجم عظیمی از آب به‌صورت رواناب سطحی و زهاب عمقی هدر می‌رود؛ بنابراین استفاده مجدد از زهاب کشاورزی، یکی از بهترین راهکارها برای جبران کمبود آب است. بازیافت آب زهکشی (یا بازمصرف زهاب) می‌تواند منجر به افزایش عملکرد محصولات، کاهش آلایندگی آب‌های سطحی و استفاده مجدد از مواد مغذی در ایران شود. هرچند که میزان منافع و هزینه‌های مربوط به این فرایند به طور مشخصی تعیین نشده است و نیاز به مطالعات بیشتر دارد، امّا پتانسیل بالای ایران برای کاربرد مجدد زهاب به‌عنوان یک منبع آب غیرمتعارف، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر وضعیت کمّی و کیفی منابع داشته باشد. به دلیل مدیریت نادرست و استفاده از روش‌های سنتی آبیاری، بیش از ۹۰ درصد منابع آبی کشور ایران در بخش کشاورزی مصرف می‌کند. در این شرایط، آب‌بران پایین‌دست علاوه بر مواجهه با کمبود آب، با آب آلوده‌تری نسبت به بالادست سروکار دارند (به علت وجود آب برگشتی آبیاری و تلفات نفوذ عمقی) . در ایران، مطالعاتی در زمینه بازمصرف زهاب انجام شده است که اکثر مطالعات در شرایط آزمایشگاهی بوده و مطالعات زیادی در مزرعه و شرایط واقعی در منابع مشاهده نشده است، جز موارد مانند بررسی تصفیه زهاب با فیلتر زیستی ، و آبیاری نیشکر با زهاب . در اندک مطالعاتی که در مبحث ارزیابی استفاده مجدد از زهاب کشاورزی انجام شده است می‌توان به پژوهش رضایی (۱۳۹۸) اشاره کرد که استفاده از زهاب کشاورزی وارده به تالاب خرمشهر (ناصری) را در طرح‌های شورورزی امکان‌سنجی نمودند. نمونه‌برداری مربوط به زهاب کشاورزی در منطقه مطالعاتی آنها به‌صورت دوره‌ای و در محدوده جامعی نبوده؛ ولی نتایجشان نشان داد که منطقه ازنقطه‌نظر آلودگی زهاب به آفت‌کش‌ها با مشکل جدی مواجه نبوده است. هرچند که تالاب خرمشهر هنوز هم از نظر آلودگی به فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌ها، مورد سؤال می‌باشد و بنابراین بازمصرف زهاب نمی‌تواند توصیه شود. ازاین‌رو لازم است از تجربیات کشورهای پیش‌گام در این زمینه، بهره گرفته و با محلی‌سازی آنها، با چالش‌های احتمالی بازمصرف زهاب کشاورزی در ایران مقابله و از فرصت‌های ارزشمند آن استفاده نمود. علی‌رغم نیاز کشت هیدروپونیک به تخصص و سرمایه اولیه در مقایسه با کشت خاکی، مزایایی مانند عملکرد بالا، نیاز به نیروی کار کم، عدم نیاز به رعایت تناوب کشت، یکنواختی رشد گیاهان، کاهش اتلاف آب، امکان تأمین مواد غذایی متناسب با نیاز، استفاده کمتر از مواد شیمیایی و در نتیجه سالم‌تر بودن محصولات کشاورزی دارد.

- **تجربه‌های بازمصرف زهاب کشاورزی**

همان‌طور که ذکر شد، بر اساس مطالعات انجام شده، زهاب آبیاری می‌تواند سبب تأثیر قابل‌توجه بر رشد محصول، آسیب به محصولات زراعی، افزایش شوری و جلوگیری از جذب سایر مواد مغذی، بهبود خواص و عملکرد خاک و ارائه منبع کافی از مواد مغذی موردنیاز برای رشد گیاهان شود. چالش‌های مربوط به شوری می‌توانند شکل، اندازه و رشد گیاهان را تغییر دهند، سبب کاهش تبخیر و تعرق شده و یا باعث

مصرف بیشتر آب (مانند نیاز به آبشویی) شوند . تجربیات بین‌المللی نشان می‌دهد که در مناطق دچار کم‌آبی، استفاده از زهاب برای تکمیل منابع آب (به‌ویژه برای مصارف آبیاری) از اهمیت خاصی برخوردار است. برای حذف آب اضافی آبیاری و بارش در مزارع کشاورزی از سیستم‌های زهکشی مهندسی، از جمله زهکشی زیرسطحی و زهکشی سطحی مصنوعی، استفاده می‌شوند. این سیستم با مناطق با تقاضای آبیاری زیاد، سازگار نیست. از دیگر روش‌های کاربرد مجدد زهاب، استفاده مکرر و پشت‌سرهم از آن در اراضی کشاورزی و در قالب سیستم مدیریت زهکشی تجمیع شده در مزرعه[2]است. در این روش، آب با شوری کمتر برای آبیاری گیاهان حساس به شوری و زهاب زیرزمینی حاصل از آن برای آبیاری گیاهان مقاوم به شوری (مانند پنبه، سورگوم، گندم، جو، چغندرقند و ...) استفاده می‌شود. سپس، زهاب تولیدی از این بخش برای آبیاری درختچه‌های مقاوم به شوری (مانند اکالیپتوس، تاغ، گز و ...) استفاده شده و زهاب حاصله نیز برای آبیاری گیاهان شوررو استفاده می‌شود. در نهایت، زهاب با شوری خیلی زیاد و حجم کم، برای استخراج نمک به حوضچه‌های تبخیری خورشیدی تخلیه می شود. لازم به ذکر است که سطح تحت آبیاری در مقایسه با مرحله قبل از آن کاهش می‌یابد. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که حجم زهاب به کم‌ترین مقدار و غلظت آن به مقداری برسد که گیاه دیگری نتواند تحمل کند . در مناطق مستعد، بازمصرف مستقیم زهاب نیازمند نصب حوضچه‌های ذخیره‌سازی و سیستم‌های پمپاژ است. از انواع این سیستم‌ها، سیستم زهکشی کاشی معمولی است که از لوله‌های زیر زمینی ساخته می‌شود که باعث هدایت آب از ریشه گیاهان به آب‌های سطحی یا کانال‌های مجاور اراضی می‌شود . شکل ۲ مسیرهای متداول زهاب و مسیرهای بالقوه برای بازمصرف زهاب را نشان می‌دهد.



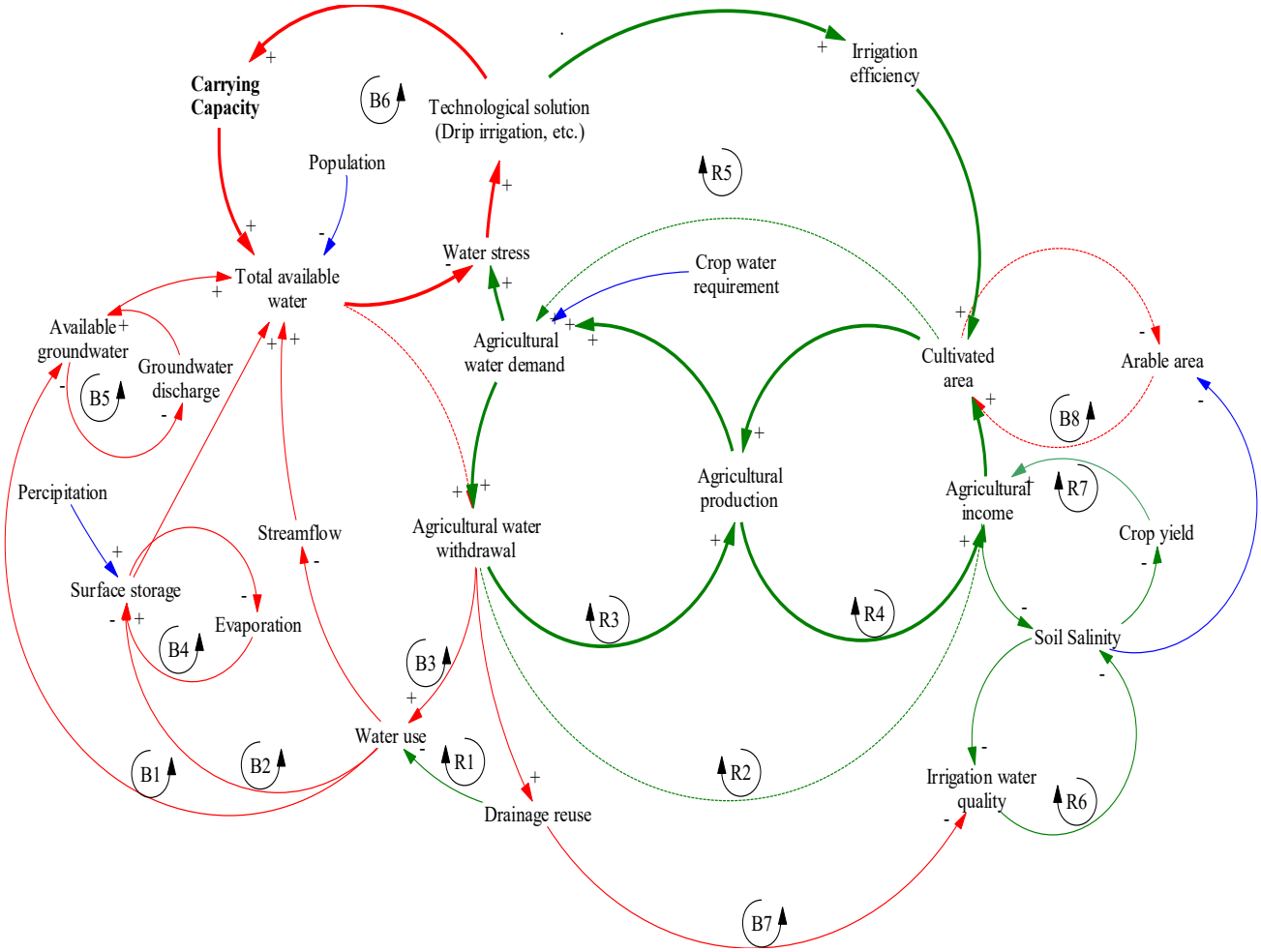
شکل ۲. زهاب کشاورزی در مسیرهای متداول (خطوط پیوسته) و بالقوه (خطوط منقطع)

بازمصرف زهاب وابسته به ویژگی‌های منطقه‌ای بوده و متأثر از وضعیت توپوگرافی، هیدرولوژیکی، اقلیمی و حتی اوضاع اقتصادی و اجتماعی منطقه موردمطالعه است. این مسئله لزوم نیاز به بررسی بیشتر و نظارت دقیق بر کنترل کیفیت هنگام بازمصرف زهاب را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، دانش و تحقیقات کافی در زمینه بازمصرف زهاب کشاورزی وجود ندارد و به اطلاعات بیشتری در مورد استفاده مجدد از زهاب برای توسعه کشاورزی و کمک به مقابله با چالش جهانی کمبود آب شیرین نیاز است. شایان ذکر است که به دلیل شوری زیاد زهاب کشاورزی و تأثیر کوتاه‌مدت و بلندمدت آبیاری با زهاب بر کیفیت خاک و تأثیر بر حاصلخیزی آن، استفاده از زهاب بدون تصفیه مناسب و نمک‌زدایی به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود. درصورتی‌که در شرایط خاص و تحت کنترل‌ها و محدودیت‌های مشخص، استفاده از زهاب کشاورزی در آبیاری محصولات، می‌تواند برای کشت هیدروپونیک مربوط به محصولات مقاوم به شوری مناسب باشد. در این نوع کشت، گیاه برخلاف روش سنتی، نه در خاک، بلکه در سیالی از محلول‌های غذایی قرار می‌گیرد تا بستر هماهنگی جهت رشد گیاه به‌صورت هیدروپونیک فراهم شود. این نوع کشت در روش‌های گلخانه‌ای، پرکاربرد است که به‌این‌ترتیب، گیاه مواد مغذی موردنیاز خود را به‌صورت محلول، از آب دریافت می‌کند. یکی دیگر از مزایای این سیستم، قابلیت اجرا و استفاده از آن در سطوح مختلف اعم از سطوح وسیع گلخانه‌ای به شکل تجاری و سطوح کوچک می‌باشد. البته بازمصرف زهاب در این روش نیز خود نیاز به بررسی دقیق محصولات و امکان‌سنجی عملیاتی (با لحاظ یک سطح از افت محصول قابل‌قبول) دارد. اما نکته قابل‌توجه آن این است که در روش هیدروپونیک، با لحاظ محصولات مقاوم به شوری، آلودگی خاک، جزو مسائل بحرانی نخواهد بود. از سوی دیگر، ازآنجاکه آب به‌صورت چرخشی در حرکت است، در مصرف آب صرفه‌جویی شده و هزینه تمام شده تولید، کاهش پیدا می‌کند.

[2] Integrated on-Farm Drainage Management (IFDM)

۳- نتایج و بحث

در زمینه مدیریت محیط زیست، علاوه بر محدودیت‌های آبی، یکی دیگر از چالش‌های اصلی ایران در حرکت کشاورزی به‌سوی اهداف توسعه پایدار، زمین و منابع خاک است. مساحت قابل‌توجهی از زمین‌های زراعی کشور ایران در گروه نامناسب و بسیار ضعیف قرار دارند. این زمین‌ها در کنار بازدهی پایین برداشت محصول، ممکن است باعث آسیب‌های زیست‌محیطی همراه باشند (شوری بیشتر، پست‌شدن پوشش گیاهی، فرسایش خاک و نظایر آن) که در آینده می‌تواند منجر به کاهش بیشتر محصولات و سبب تهدید امنیت غذایی شود (شکل ۳). خود این مسئله با تأثیر روی تمایل به افزایش مصارف از منابع موجود (مانند افزایش سطح زیر کشت، فناوری‌های مختلفی که منجر به افزایش مصرف آب در بلندمدت می‌شوند و ...) شده و جهت تولید محصولات بیشتر، باعث مواجهه پایداری محیط زیست با خطرات بزرگ‌تر می‌شود. مساله بازمصرف زهاب، پیچیده بوده و نیازمند ملاحظات بسیاری است. اما شکل ۳ به عنوان پایه‌ای برای جمع‌بندی عوامل موثر بر این مساله، ارائه شده است. این شکل بر مبنای بازخوردهای مثبت (افزایش متغیر با افزایش متغیر دیگر و برعکس) و منفی (افزایش متغیر با کاهش متغیر دیگر و برعکس) و حلقه‌های علت و معلولی تقویتی و تعادلی متغیرهای تاثیرگذار بر مبنای تفکر سیستمی تعیین شده است.



شکل ۳. چرخه علت و معلولی بازمصرف زهاب در مدیریت منابع

بخشی از شکل ۳، برگرفته از ابراهیمی (۱۴۰۱) می‌باشد (بخش خطوط پررنگ) که نشاندهنده الگوی رفتاری محدودیت رشد سیستم می‌باشد. سایر بخش‌ها که مربوط به تاثیر بازمصرف زهاب بر منابع آب و خاک هستند، مربوط به پژوهش حاضر هستند. علاوه بر الگوی رفتاری مذکور، می‌توان اشاره کرد که حلقه های تعادلی B7 و تقویتی R2 می‌توانند نشانه‌ای از الگوی رفتاری راه‌حل‌های منجر به شکست باشند. همانطور که از شکل برمی‌آید، ازآنجاکه بازمصرف زهاب به‌عنوان یک منبع آبی نامتعارف و راه‌حلی برای تخفیف مشکل تأمین آب مطرح می‌شود، اما به دلیل ویژگی‌های نامناسبش، استفاده نادرست از آن می‌تواند باعث مشکلات بزرگ‌تری شود (الگوی راه‌حل‌های منجر به شکست)، نحوه استفاده مناسب از آن در کشاورزی از حساسیت قابل‌توجهی برخوردار است. جدول ۱، یک جمع‌بندی از تحقیقات انجام شده در حوضه استفاده مجدد زهاب کشاورزی در کشورهای مختلف جهان در قالب جدولی با تمرکز بر شاخص‌هایی چون منابع زهاب کشاورزی، ترکیبات و آلاینده‌ها، چالش‌ها، روش استفاده، اهداف، کاربرد، برنامه‌های توسعه و تحقیق آتی در خصوص زهاب را ارائه می‌کند.

جدول ۱. مقایسه رویکردها و بسترهای مختلف بازمصرف زهاب کشاورزی و چالش‌های متناظر در برخی کشورهای پیشتاز در جهان

	ترکیبات و آلاینده‌ها	چالش‌ها	روش استفاده از زه‌آب	اهداف و موارد استفاده از زه‌آب	برنامه توسعه و تحقیق آتی
حوزه آبریز دره مرکزی کالیفرنیا (Stuber et al, 2016)	_ نمک	_بیلان آبی حساس به اختلالات _بهره‌وری پایین اراضی _تخلیه جریان‌های آب‌نمک غلیظ به محیط‌زیست و انتشار کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی جهت نمک‌زدایی	_نمک‌زدایی (نمک‌زدایی حرارتی هیبریدی فسیلی - خورشیدی) _اسمز معکوس _تقطیر چند اثری	_آبیاری محصولات باارزش بالاتر یا انتقال به سایر مصرف‌کنندگان _افزایش بهره‌وری _پایداری تجارت کشاورزی منطقه‌ای	_توسعه فناوری‌های کشاورزی دقیق و ارزیابی مناسب ریسک سرمایه‌گذاری _استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر _آرایش پنل‌های خورشیدی برای راندمان بالا
حوضه آبریز گریکلان، سوئد (Hasselquist et al, 2018)	_کودها، آفت‌کش‌ها و مواد مغذی اضافی مانند فسفر و نیتروژن	_کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش عمق ناحیه غیراشباع _مشکلات کمیت و کیفیت آب	_گودال‌ها و سیستم‌های زهکشی زیرسطحی	_جمع‌آوری رواناب سطحی و آب‌های زیرزمینی اضافی	_آزمایش‌های میدانی، آنالیز هزینه‌ها و شبیه سازی‌های بلند مدت.
حوضه رودخانه یانگ تسه چین (Shao et al, 2013)	_مواد مغذی فسفر و نیتروژن	_تبخیر و تعرق و تراوش و نفوذ قابل‌ملاحظه _ افزایش رسوب آب زهکشی کشاورزی و رواناب	_مخازن آبیاری در مزرعه _تالاب‌های مصنوعی _گودال‌های زهکشی و کانال‌های آبیاری	-مهار جریان آب اضافی آبیاری و آب باران جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی _استراتژی کارآمد برای تضمین تأمین آب در خشکسالی _ذخیره موقت آب باران و رواناب حوضه جهت کاهش سیل در مناطق پایین‌تر _ نیتراتزدایی	_بهینه‌سازی فرایندهای جمع‌آوری و هدایت و تصفیه _مدیریت اکولوژیکی مطلوب در OFT جهت بازمصرف زه‌آب
دانمارک (Florea, 2022)	_مواد مغذی فسفر و نیتروژن	_گرفتگی جزئی فیلتر _حذف مواد مغذی و حفظ آمونیوم	_سیستم ستون فیلتر مبتنی بر زئولیت و آهن	_جلوگیری از تغذیه گرایی و صرفه‌جویی در انرژی مورد استفاده برای بازیافت نیترات _حذف مواد مغذی و حفظ آمونیوم از زه‌آب	_تلفیق فیلتراسیون با سایر روش‌های بازمصرف زه‌آب
حوزه رود نیل در کشور مصر (Barnes, 2012; Ohman et al, 2012)	_آلودگی باکتریایی (کلی‌فرم) - نمک و فلزات سنگین _آلودگی صنعتی	_محدودیت منابع آب و افزایش فشار بر اکوسیستم‌های طبیعی _نشت آلودگی به سفره‌های زیرزمینی _عدم کفایت تصفیه فاضلاب زه‌آب در جلوگیری از تخلیه فلز در محیط _ روی‌آوردن به محصولات سودآور اما پر آب‌بر (مانند برنج)	_ پیش‌تصفیه مؤثر زه‌آب _خود پالایی _ پمپاژ زه‌آب کشاورزی _اختلاط زه‌آب با آب شیرین تا رسیدن به استاندارد	_بهبود شرایط اقتصادی اجتماعی _تثبیت تپه‌های ماسه‌ای متحرک و توسعه زیستگاه‌های کشاورزی و تالاب‌ها _مدیریت کمیت و جهت جریان _تطابق با استانداردهای کیفیت سخت‌گیرانه بین‌المللی _دستیابی به راه‌حل کوتاه‌مدت افزایش تأمین آب _ دسترسی به منابع کم هزینه بدون نیاز به زیرساخت‌های کلان	_تجزیه و تحلیل دوره‌ای آب در طول سال‌های کاشت جهت کنترل و تنظیم مجدد نسبت اختلاط _آنالیزهای میکروبی _نیاز فوری به استراتژی‌های مؤثر برای تصفیه منابع زه‌آب قبل از اختلاط با رود نیل _تعیین سیاست‌های کلان مدیریت آب

در بخش‌های بعدی، تفصیلی از مطالعات بازمصرف زهاب در نقاط مختلف جهان ارائه شده است:

- **وضعیت بازمصرف زهاب کشاورزی در مصر**

مصر، کشوری خشک در انتهای طولانی‌ترین رودخانه جهان، دارای بیلان آبی منفی است و رود نیل ۹۶ درصد از آب این کشور را تأمین می‌کند. ذخیره سالانه آب آن از نیل، بارندگی در امتداد سواحل مدیترانه و آب‌های عمیق زیرزمینی تقریباً ۵۷/۷۰ میلیارد متر مکعب است. اما مصارف کشاورزی، صنعت، شهری و خدمات مصر حدود ۷۲/۴۰ میلیارد متر مکعب آب می‌باشد . در این راستا، از دیرباز استراتژی‌های مختلف با هدف افزایش استفاده از زهاب کشاورزی برای مقابله با کم‌آبی اتخاذ شده است و حجم قابل‌توجهی از آب‌های مصرفی، چندین بار مورداستفاده قرار می‌گیرند. با این حال، استراتژی‌های بازمصرف زهاب مذکور، با روند روبه‌افزایش آلودگی گسترده در سیستم زهکشی تهدید می‌شوند . شبکه‌های زهکشی، حجم زیادی از فاضلاب خانگی و صنعتی را (عمدتاً بدون هیچ تصفیه‌ای) دریافت می‌کنند و زهاب آلوده، کیفیت آب را هنگام مخلوط‌شدن با آب آبیاری، تغییر می‌دهد؛ بنابراین، بهینه‌سازی کمیّت و کیفیت آب زهکشی بازمصرفی، دغدغه اصلی برنامه‌ریزی استراتژیک برای مدیریت بهینه منابع آب در مصر است . بازمصرف زهاب نشان می‌دهد که چگونه انسان‌ها چرخه آب را در مصر تغییر می‌دهند. به‌جای اینکه آب به‌سادگی از بارش (در مناطق منبع آفریقای شرقی نیل)، به جریان سطحی (از طریق نیل و مزارع)، نفوذ (از طریق خاک) و بازگشت به اتمسفر از طریق تعرق حرکت کند؛ کشاورزان از مجموعه‌ای از فناوری‌ها برای هدایت مجدد آب از زهکش‌ها به مزارع استفاده می‌کنند و بازمصرف زهاب یک حلقه اضافی به چرخه مذکور اضافه می‌کند. به‌طوری‌که بارش در چرخه هیدرولوژیکی جریان می‌یابد، از طریق پمپ‌ها به لوله‌های زیرسطحی نصب شده در امتداد زهکش‌ها حرکت کرده و به گودال‌های آبیاری حفر شده توسط کشاورزان می‌ریزد تا مجدداً مصرف شود .

- **وضعیت بازمصرف زهاب کشاورزی در امریکا**

کالیفرنیا (بزرگ‌ترین منطقه کشاورزی در ایالات متحده)، بیشترین تأثیر را از کمبود آب در بخش کشاورزی (به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف کننده آب با تقریباً ۸۰ درصد کل مصرف) متحمل می‌شود. کالیفرنیا دارای بیلان آبی حساس به اختلالات بوده و پیش‌بینی شده است که گرمایش جهانی (انتشار گازهای گلخانه‌ای) ناشی از فعالیت‌های انسانی، احتمال شرایط منجر به خشکسالی استثنایی در کالیفرنیا را تقویت می‌کند. علاوه بر مسئله کمبود آب، عملیات کشاورزی با افزودن کودها و مواد معدنی بیشتر، مسئله تجمع نمک و کاهش بهره‌وری کشاورزی را تشدید می‌کند. به‌عنوان نمونه‌ای از روش‌های تصفیه زهاب کشاورزی، از تقطیر چند اثره (MED[3]) ادغام شده با انرژی حرارتی خورشیدی متمرکز (CST[4]) به نام ثابت خورشیدی متمرکز (CSC[5])، برای تصفیه آب زهکشی کشاورزی (جدول ۱) و امکان‌سنجی اسمز معکوس در کالیفرنیا مورد مطالعه قرارگرفته‌است. علاوه بر هزینه بالا، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی این روش، قابلیت اطمینان آن در تصفیه زهاب دارای غلظت بالایی از نمک‌ها، ذرات و مواد آلی است.

- **وضعیت بازمصرف زهاب کشاورزی در اروپا**

در کشورهای اروپایی، مانند کشورهای سوئد ، دانمارک و بلژیک زهکشی کشاورزی یک روش معمول برای بهبود بهره‌وری محصول است و رطوبت خاک را بهبود می‌بخشد. در بررسی تأثیرات بازمصرف زهاب در اروپا، نشان داد که در کنار مزایا و معایب بازمصرف زهاب کشاورزی، تأثیر آن بر چرخه هیدرولوژی می‌تواند جالب‌توجه باشد. به‌طوری‌که زهکشی آب کشاورزی می‌تواند به طور قابل‌توجهی سطح آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد و بر هیدرولوژی حوضه تأثیر بگذارد. استفاده از زهاب کشاورزی می‌تواند منجر به کاهش ۵۰ درصدی در جریان اضافی اشباع آب زیرزمینی و افزایش ۱۸/۴ میلی‌متری در زهکشی آب به رودخانه‌ها شود. بر اساس مطالعه ایشان، علاوه بر موارد مذکور، پیامدهای منفی بازمصرف زهاب بر کیفیت آب در پایین‌دست حوضه قابل‌توجه است و آلاینده‌ها، مواد مغذی، آفت‌کش‌ها و غیره می‌توانند با سرعت بیشتری، از طریق آب تخلیه شده به سمت رودخانه‌ها، حرکت کنند؛ بنابراین، بررسی و به‌کارگیری اقدامات لازم برای به‌حداقل‌رساندن تأثیر سیستم‌های زهکشی برای مدیریت پایدار حوضه بسیار مهم است. بر اساس مطالب فوق‌الذکر، اهمیت استفاده مجدد از زهاب کشاورزی و استفاده از قابلیت‌های طبیعی چون فیلترهای زیستی و سامانه‌های زهکشی زیرسطحی و فناوری‌های نوین جهت تصفیه و هدایت هدفمند به‌قدری قابل‌توجه است که کشورهای پیش‌گام، برنامه‌های بلندمدتی برای افزایش توانمندی‌های خود در این حوزه، سرمایه‌گذاری و سیاست‌گذاری‌های کلان و استفاده از فناوری‌های نوین و منابع انرژی تجدیدپذیر، جهت مقابله بهینه با چالش‌ها و بهره‌مندی هرچه بیشتر از پتانسیل‌های بازمصرف زهاب لحاظ کرده‌اند. تحقیقات مرتبط با استفاده سیستم زهکشی نشان دادند که در حوزه تصفیه طبیعی پتانسیل‌های خوبی در قالب ایجاد سامانه‌های فیلتراسیون گیاهی وجود دارد، زهاب کشاورزی با داشتن مواد مغذی، نیاز به مصرف کود شیمیایی را کاهش و عملکرد محصولات را افزایش می‌دهد. منابع آبی حاصل از زهاب کشاورزی مدیریت شده می‌تواند با اختصاص این منابع برای آبیاری محصولات با ارزش بالاتر یا انتقال به مصرف‌کنندگان شهری یا صنعتی، باعث رونق تجارت آب و پایداری بلندمدت تجارت کشاورزی منطقه‌ای شود. این منابع آب غیرمتعارف، خصوصیات نزدیکی به استانداردهای آب‌های مناسب برای آبیاری را دارا هستند، همچنین بازیابی آب شیرین از این منابع می‌تواند با هزینه‌های بسیار کمتری نسبت به تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی انجام شود. افزون بر موارد مذکور، این منابع روشی مؤثر و مناسبی در جهت مدیریت برنامه‌ها و اهداف زیست‌محیطی برای تثبیت تپه‌های ماسه‌ای متحرک، احیای خاک‌های بیابانی و توسعه زیستگاه‌های کشاورزی – اکولوژیکی جدید نیز فراهم می‌کنند که می‌تواند باعث بهبود شرایط اقتصادی اجتماعی منطقه شود. توسعه فناوری‌های کشاورزی دقیق و تلفیق استراتژی‌های مختلف و توجه به مسئله بهینه‌سازی در فرایندهای جمع‌آوری و هدایت و تصفیه بسیار مهم و لازم می‌باشد، جهت بهینه‌سازی، سرمایه‌گذاری مناسب در جهت سیاست‌گذاری‌های مناسب، ضروری است. از سوی دیگر، نظر به معایبی که برای بازمصرف زهاب در بخش کشاورزی ذکر شد و نیاز به تصفیه و نمک‌زدایی اولیه برای ایجاد کیفیت مناسب زهاب در جهت حرکت به‌سوی پایداری محیط زیست و منابع آب و خاک، به نظر می‌رسد استفاده از زهاب در کاربردهای غیرکشاورزی، از برخی جهات بهتر باشد. در بخش صنعت، ازآنجاکه عمده مصرف آب صنایع مربوط به مصارف غیرفرآیندی، نظیر شست‌وشو، گرمایش و سرمایش و یا تولید الکتریسیته می‌شود، آب باکیفیت با خلوص بسیار بالا، موردنیاز نبوده و با فرایندهای تصفیه نه‌چندان پیشرفته، امکان آماده‌سازی پساب برای بازیافت و استفاده مجدد در واحدهای صنعتی وجود دارد. ازاین‌رو، پتانسیل کاربرد در برخی صنایع می‌تواند با رعایت الزامات مربوطه پیشنهاد شود.

[3] **Multi-effect Distillation**
[4] **Concentrated Solar Thermal**
[5] **Concentrated Solar Constant**

۴- نتیجه‌گیری

در استفاده مجدد از زهاب هم‌زمان دو هدف می‌تواند برآورده شود: اول اینکه با استفاده مجدد از آب مصرف‌شده و رهاشده می‌توان آثار زیست محیطی منفی مربوطه را کاهش داد و دوم اینکه زهاب، به دلیل داشتن مواد مغذی، یک منبع مناسب برای آبیاری است. اگر آب آبیاری با کیفیت مناسب محدود و کمیاب باشد، استفاده مجدد از زهاب کشاورزی، در اراضی فاریاب قابلیت‌های بسیاری می‌تواند داشته باشد؛ ویژگی‌های خاص زهاب کشاورزی همانند شوری نیاز به مدیریت مناسب دارد و هر گیاهی را نمی‌توان با زهاب آبیاری نمود. به طور خلاصه ازآنجایی‌که بیشترین حجم منابع آب کشاورزی، ناشی از بارندگی و رواناب ناشی از بارندگی می‌باشد، آب زهکشی‌شده و رواناب حاصل از بارش با محتوای خاک مزارع آلوده می‌شود (ترکیباتی چون مواد مغذی و نمک و کودها و آفت‌کش‌ها). پیشنهاد می‌شود در کشت‌های هیدروپونیک از بازمصرف زهاب استفاده شود تا احیاناً با مصرف بلندمدت و کنترل نشده زهاب در اراضی فاریاب، فرسایش خاک و افزایش شوری و نیز ازبین‌رفتن قابلیت حاصلخیزی خاک، تجربه نشود. با بررسی تجربیات بین‌المللی می‌توان درس‌های ارزشمندی در مورد اثربخشی رویکردهای مختلف، اهمیت مقررات و مقبولیت عمومی آموخت. پیمودن این مسیر با پیشرفت‌های فناوری و شناخت روزافزون جهانی از نیاز به صرفه‌جویی در آب و کشاورزی پایدار، امیدوارکننده است و چشم‌انداز آینده به طور خلاصه می‌تواند شامل فناوری‌های نوین، چارچوب‌های نظارتی، مقررات و استانداردهای مناسب، ارتقای آگاهی و پذیرش عمومی، تحلیل اقتصادی صحیح، ادغام با شیوه‌های کشاورزی پایدار و قابلیت کاربرد عملیاتی زهاب، به‌ویژه در مناطق درحال‌توسعه باشد. تمام مواردی که می‌توان در مسیر تحقیقات آتی متصور بود، متأثر از اهداف و سیاست‌های کلان برای مدیریت آب (از ملزومات کشاورزی پایدار) هستند. استفاده مجدد از زهاب کشاورزی در صورت وجود برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت شده، نقش مهمی در آینده مدیریت آب و تولید مواد غذایی دارد. همچنین ازآنجاکه عمده مصرف آب صنایع مربوط به مصارف غیرفرآیندی (شست‌وشو، گرمایش و سرمایش و یا تولید الکتریسیته) می‌شود، با فرایندهای تصفیه نه‌چندان پیشرفته، امکان آماده‌سازی زهاب جهت استفاده مجدد در واحدهای صنعتی وجود دارد. از این رو، پتانسیل کاربرد در برخی صنایع می‌تواند با رعایت الزامات مربوطه پیشنهاد شود و ضمن کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و سطحی در دسترس، اثرات اقتصادی و محیطزیستی مثبت، نقش مهمی در آینده مدیریت آب و تولید مواد غذایی ایفا نموده و همچنین راه‌حلی پایدار برای چالش‌های روبه‌رشد کمبود آب ارائه می‌دهد. باتوجه‌به پژوهش‌های بسیار اندک و محدود این موضوع در داخل ایران و بنا به بحران آبی حال حاضر و تشدید روزافزون آن، ضرورت مطالعات بیشتر و همچنین عملیاتی ساختن بازمصرف زهاب در مدیریت منابع آب در ایران احساس می‌شود.

منابع

- Abdel-Azim, R., Allam, M. 2005. Agricultural drainage water reuse in Egypt: strategic issues and mitigation measures. In: Hamdy, A., El Gamal, F., Lamaddalena, N., Bogliotti, C., Guelloubi, R. (Eds.), Non-conventional Water Use: WASAMED Project. Bari: CIHEAM/EU DG Research. Options Mediterran eennes: Serie B. Etudes et Recherches; n.53, pp. 105 e117.
- Allam, A., Fliefle, A., Tawfik, A., Yoshimura, Y., El Saadi, A. 2015. A simulation-based suitability index of the quality and quantity of agricultuarla drainage water for reuse in irrigation. Sci. Total Environ. 536, 79e90. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.029
- Ashu, A., & Lee, S. I. 2018. Reuse of agriculture drainage water in a mixed land-use watershed. Agronomy, 9(1), 6. https://doi.org/10.3390/agronomy9010006.
- Barnes, J. 2014. Mixing waters: The reuse of agricultural drainage water in Egypt. Geoforum, 57, 181-191. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.11.019.
- Basic Agricultural Study, 2023. Drainage system in agriculture - Basic Agricultural Study. https://agriculturistmusa.com/drainage-system-in-agriculture/. Accessed on 26 Feb 2024.
- Diffenbaugh, N. S., Swain, D. L., & Touma, D. 2015. Anthropogenic warming has increased drought risk in California. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(13), 3931-3936. https://doi.org/10.1073/pnas.1422385112
- FAO and UN Water, 2021. Progress on Level of Water Stress. Global status and acceleration needs for SDG Indicator 6.4.2, 2021. Rome. https://doi.org/10.4060/cb6241en
- FAO, 1992. A commodity system assessment methodology. https://www.fao.org/3/a-x5405e/index.html. Accessed on 1 June, 2024.
- Florea, A. F., Lu, C., & Hansen, H. C. B. 2022. A zero-valent iron and zeolite filter for nitrate recycling from agricultural drainage water. Chemosphere, 287, 131993. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131993

- Hasselquist, E. M., Lidberg, W., Sponseller, R. A., Ågren, A., & Laudon, H. 2018. Identifying and assessing the potential hydrological function of past artificial forest drainage. Ambio, 47, 546-556.
- Hejase, C. A., Weitzel, K. A., Stokes, S. C., Grauberger, B. M., Young, R. B., Arias-Paic, M. S., ... & Dionysiou, D. D. 2021. Opportunities for treatment and reuse of agricultural drainage in the United States. ACS ES&T Engineering, 2(3), 292-305. https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00277
- Klobucista, C., & Robinson, K. 2023. Water Stress: A Global Problem That's Getting Worse. Council on Foreign Relations.
- MWRI (Ministry of Water Resources and Irrigation), 2002. Survey of Nile System Pollution Sources. Agricultural Policy Reform Program. Report No.64.
- Nindwani, B. A., Lashari, B. K., Memon, A. A., Laghari, K. Q., Hammad, H. M., & Farhad, W. 2014. Impact of drainage water use for crop irrigation. Sci. Int, 26, 273-278.
- Othman, A. A., Rabeh, S. A., Fayez, M., Monib, M., & Hegazi, N. A. 2012. El-Salam canal is a potential project reusing the Nile Delta drainage water for Sinai desert agriculture: Microbial and chemical water quality. Journal of Advanced Research, 3(2), 99-108. https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.04.003
- Reinhart, B., and Frankenberger, J. 2020. "Potential Benefits of Drainage Water Recycling: A case study from Indiana", National Institute of Food and Agriculture U.S. Department of Agriculture. https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ABE/ABE-165-W.pdf. Accessed on June 1, 2024.
- Shao, D., Tan, X., Liu, H., Yang, H., Xiao, C., & Yang, F. 2013. Performance analysis of on-farm irrigation tanks on agricultural drainage water reuse and treatment. Resources, conservation and recycling, 75, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.011.
- Soltan, M., Hassaan, M., & Khattaby, A. 2016. Agricultural drainage water as a source of water for fish farming in Egypt. Ecology and Evolutionary Biology, 1(3), 68-75. doi: 10.11648/j.eeb.20160103.15
- Stuber, M. D. (2016). Optimal design of fossil-solar hybrid thermal desalination for saline agricultural drainage water reuse. Renewable Energy, 89, 552-563. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.025
- Thompson, J., Rahardianto, A., Gu, H., Uchymiak, M., Bartman, A., Hedrick, M., ... & Cohen, Y. 2013. Rapid field assessment of RO desalination of brackish agricultural drainage water. Water research, 47(8), 2649-2660. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.013
- Yimer, E. A., Riakhi, F. E., Bailey, R. T., Nossent, J., & van Griensven, A. 2023. The impact of extensive agricultural water drainage on the hydrology of the Kleine Nete watershed, Belgium. Science of The Total Environment, 885, 163903. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163903.
- ابراهیمی، الهام. ۱۴۰۱. ارزیابی مجانب‌های رشد بخش کشاورزی در یک سیستم آبی محیط زیستی. رساله دکتری. دانشگاه تهران، ایران.
- ابراهیمی، الهام.، برخورداری، حسام. ۱۴۰۲. مدیریت بازمصرف زهاب کشاورزی در ایران: چالش‌ها و فرصت‌ها. دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- ابراهیمی، الهام؛ ضرغامی، مهدی. (۱۳۹۶). مقایسه تأثیر سیاست‌های احیا تحت تأثیر تغییر اقلیم به کمک پویایی سیستم‌ها؛ مطالعه موردی زیست بوم دریاچه ارومیه .تحقیقات منابع آب ایران. (۴)۱۳، ۱۸۴-۱۸۹.
- اصلانی، مصطفی.، منعم، محمد جواد.، باقری، علی. ۱۴۰۲. توسعه مدل مفهومی پیوند آب، غذا و انرژی (Nexus) در مدیریت آب در شبکه‌های آبیاری با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۴ (۲۸) :۳۶-۱۶
- حسن اقلی، علیرضا. (۱۳۸۵). مدیریت زه آب‌های حاصل از سامانه‌های زهکشی و کاربرد مجدد آن در کشاورزی، چهارمین کارگاه فنی زهکشی و محیطزیست، تهران.
- رجب زاده، فائزه؛ و پذیرا، ابراهیم. (۱۴۰۱). مدیریت زهاب های حاصل از آبیاری زراعت نیشکر در دشت خوزستان. مدیریت آب در کشاورزی، ۹(۱)، ۱۱۹-۱۳۴.
- رضایی، حامد. (۱۳۹۸). کشاورزی و آلودگی منابع آب، موسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی: ۵۶۸.
- زندی، سعید؛ سلطانی محمدی، امیر، گلابی، منا؛ اندرزیان، بهرام. (۱۳۹۹). بررسی تأثیر آبیاری با زهاب بر عملکرد کینوا در شرایط آب و هوایی اهواز، مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۳)، ۴۵-۵۶.

- سلطانی، نجمه؛ جوکار، مهرانگیز. (۱۳۹۴). نقش تناوب زراعی در تنوع بیولوژیکی خاک. کنگره پیشگامان پیشرفت.
- شریفی‌پور، مجید؛ لیاقت، عبدالمجید؛ ناصری، عبدعلی؛ نوذری، حامد؛ حاجیشاه، محمود؛ زرشناس، محسن؛ هویزه، حمید؛ نصری، منوچهر. (۱۳۹۹). مدیریت زهاب شبکه های آبیاری و زهکشی جنوب غربی استان خوزستان. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۱(۲)، ۵۲۵-۵۳۹.
- غلامی، مصیب؛ علی بیگی، امیرحسین؛ پاپ زن، عبدالحمید. (1400). دانش، نگرش و رفتار کشاورزان استان کرمانشاه در مورد کشاورزی حفاظتی. پژوهش مدیریت آموزش کشاورزی، ۱۳(۵۷)، ۱۳۱-۱۴۷.
- فرصتیان، سیده انسیه؛ مجنون حسینی، ناصر؛ حسینی، سیدمحمدباقر؛ محمدی، ولی اله. (۱۳۸۸). بررسی کشت مخلوط نواری سورگوم علوفه ای با لوبیا چشم بلبلی و سویا. مجله علوم گیاهان زراعی ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۰(۳)، ۱۴۳-۱۵۰.
- نیسی، لمیا؛ لطیفی، سیدمحمدجواد. (۱۳۹۴). استفاده مجدد از زهاب در کشاورزی، دومین همایش بین المللی و پنجمین همایش ملی پژوهش های محیطزیست و کشاورزی ایران، همدان.
- واحدی ترشیزی، محمد.، فتحی، مهران.، زمانی، سحر.، حسینی میقانی، عاطفه. ۱۳۹۶. معرفی کشت هیدروپونیک به عنوان روشی نوین در توسعه کارآفرینی کشاورزی. نشریه کارآفرینی در کشاورزی ۴(۲)، ۴۳-۶۰.