

## مقاله پژوهشی

# امکان سنجی کاهش اثرات منفی یون‌های پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری گرگان با کمک گیاه‌پالایی و مغناطیس کردن برای استفاده در آبیاری کم‌فشار

مهدی ذاکری‌نیا<sup>۱\*</sup> و مجتبی مانده‌گاری کهن<sup>۲</sup>

## چکیده

ازجمله روش‌های اصلاح آب‌های نامتعارف می‌توان به گیاه‌پالایی، روش‌های شیمیایی و همچنین روش مغناطیسی کردن آب اشاره کرد. در این طرح آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با سه عامل و سه تکرار برای بررسی امکان استفاده از پساب تصفیه‌خانه شهری گرگان (به‌عنوان یک منبع آبی دائمی نامتعارف) انجام شد. عامل اول کیفیت آب (شامل دو نوع آب شاهد و پساب خروجی تصفیه‌خانه شهری)، عامل دوم مغناطیس کردن (آب شاهد و پساب) و عامل سوم گیاه‌پالایی در سه سطح بدون گیاه، پالایش با گیاه نی و پالایش با بامبو در نظر گرفته شد. چهار زمان ماند آب و پساب در ظروف گیاه‌پالایی به‌ترتیب شامل ۳، ۵، ۷ و ۱۰ روز در نظر گرفته شد. در انتهای زمان‌های مذکور، سختی آب، غلظت یون کلسیم، کربنات و بی‌کربنات اندازه‌گیری و تحلیل آماری شد. نتایج تجزیه واریانس بر پارامترهای مذکور نشان داد که سختی آب پس از ۵ تا ۷ روز، تحت تأثیر معنی‌دار کیفیت آب، تیمار مغناطیسی و گیاه‌پالایی قرار گرفته است. گیاه‌پالایی نی باعث افزایش سختی کلی و سطوح کلسیم بعد از ۱۰ روز شد؛ درحالی‌که بامبو، اثر معنی‌داری بر این دو پارامتر نداشت. سطح کربنات پس از ۷ روز تحت تأثیر نوع گیاه‌پالایی و پس از ۱۰ روز تحت تأثیر معنی‌دار توسط تمامی تیمارها قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** آب نامتعارف، پساب، مغناطیس کردن، گیاه‌پالایی، نی، بامبو.

**ارجاع:** ذاکری‌نیا م. و مانده‌گاری کهن م. ۱۴۰۳. امکان سنجی کاهش اثرات منفی یون‌های پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری گرگان با کمک گیاه‌پالایی و مغناطیس کردن برای استفاده در آبیاری کم‌فشار. نشریه پژوهش آب ایران. ۵۴: ۸۳-۹۶. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2024.14893.2626>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

\* نویسنده مسئول: [mzakerinia@gu.ac.ir](mailto:mzakerinia@gu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

## مقدمه

افزایش جمعیت جهان، همگام با گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به‌همراه خشکسالی‌های پی‌درپی در اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک، موجب افزایش تقاضا برای آب شده است. همچنین کشور ایران براساس شاخص مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب<sup>۱</sup>، از نظر استفاده از منابع آبی تجدیدپذیر، در وضعیت بحران شدید آبی قرار دارد (Azadi and Savalanpoor, 2017). این موضوع باعث بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب با کیفیت مطلوب شده و در نتیجه، فشار بیش از اندازه به این منابع وارد آمده است. با توجه به شرایط اقلیمی کشور ایران، امکان افزایش حجم منابع آب مورد استفاده در بخش کشاورزی وجود نداشته و افزایش تولیدات کشاورزی صرفاً می‌بایست از منابع آب محدود فعلی تأمین شود. استفاده از روش‌های علمی و فنی برای به‌کارگیری سایر منابع آبی مانند آب‌های نامتعارف از جمله پساب‌ها در بخش کشاورزی خصوصاً در اراضی شمالی استان گلستان که جزو مناطق نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود، از ضروریات است. معمولاً بارندگی در مناطق جنوبی و مرکزی استان گلستان مناسب بوده و تأمین آب شهرها و روستاهای متمرکز این مناطق، با خطوط انتقال آب چند ده کیلومتری صورت می‌گیرد؛ اما مناطق شمالی استان گلستان به دلیل بارش کم، جزو مناطق نیمه‌خشک محسوب شده و اکثر آب‌های مناطق میانی و شمالی استان از نوع غیرمتعارف بوده و در سال‌های اخیر با رشد روزافزون جمعیت، همگام با گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به همراه خشکسالی‌های پی‌درپی، منجر به افزایش تقاضای آب و به‌اوج‌رسیدن بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده است. این امر سبب واردآمدن فشار بیش از حد بر منابع آبی باکیفیت و استفاده اجتناب‌ناپذیر از منابع آب نامتعارف موجود شده است. با توجه به وجود منابع متناهی از آب‌های غیرمتعارف در نقاط میانی، وجود اراضی مرتعی وسیع در شمال استان و کیفیت نامناسب آب‌های زیرزمینی این مناطق، به نظر می‌رسد استفاده از آب‌های نامتعارف در این مناطق ضروری باشد. این امر می‌بایست همراه با امکان‌سنجی بهره‌برداری فنی و اقتصادی و ارائه الگوی کشت مناسب باشد.

انواع آب نامتعارف شامل آب شور و لب‌شور، زه‌آب اراضی کشاورزی بالادست، پساب (خانگی، صنعتی، کشاورزی، شیلات) و آب باران هستند (Feigin et al., 1991).

با افتتاح و راه‌اندازی سامانه تصفیه فاضلاب شهری گرگان در استان گلستان، در بخش‌هایی از اراضی پایین‌دست آن از پساب فاضلاب برای کشاورزی استفاده می‌شود که باوجود تصفیه اولیه، استفاده از آن ممکن است اثرات نامطلوبی بر کیفیت محصول، تجهیزات آبیاری و بهداشت عمومی داشته باشد.

بنابراین استفاده از منابع آبی نامتعارف، اجتناب‌ناپذیر بوده و لازم است تا با اتخاذ راهبردهای مناسب، بهترین بهره‌برداری از آن‌ها با کمترین آثار زیست‌محیطی انجام شود. یکی از این راهبردها، توسعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است. در استان گلستان، تصفیه‌خانه فاضلاب گرگان ظرفیت ۳۰ هزار مترمکعب در شبانه‌روز در سال ۱۳۸۲ آغاز و بهره‌برداری آزمایشی از آن در اردیبهشت ۱۳۹۲ انجام شده است. این تصفیه‌خانه در قسمت شرق گرگان قرار دارد و شامل تصفیه مقدماتی، اولیه، ثانویه و ضدعفونی پساب است. تصفیه اولیه، خود شامل دو قسمت است: ۱- مرحله اولیه که عمدتاً شامل پمپاژ فاضلاب ورودی، تصفیه آشغال‌گیری، شن‌گیری و در بعضی از حالت‌ها، خردکردن مواد درشت است؛ ۲- عملیات مرحله اول شامل خارج‌ساختن ترکیبات جامد آلی یا غیرآلی از طریق رسوب‌دادن آن‌ها و نیز کف‌گیری کردن موادی است که در سطح آب شناور هستند (Abdollah poor, 2017).

ازسویی در سال‌های اخیر در کل ایران و به‌ویژه در استان گلستان، استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار مانند قطره‌ای در دستور کار دولت و کشاورزان قرار گرفته است. با توسعه این سامانه‌ها اگر منابع آب شیرین یافت نشود، کشاورزان مجبور خواهند بود از آب‌های نامتعارف متنوعی نظیر آب‌های شور، پساب زهکشی، پساب شهرک‌های صنعتی و نیز پساب فاضلاب شهری در سامانه‌های مذکور که با هزینه فراوان احداث شده‌اند، استفاده کنند؛ اما استفاده از آب‌های مذکور بدون توجه به پیامدهای آن، ممکن است باعث گرفتگی و تخریب قطره‌چکان‌ها و لوازم پمپاژ آبیاری شود؛ بنابراین قبل از اقدام وسیع در این زمینه لازم است روش‌های تصفیه آب‌های مذکور از نظر فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی ارزیابی شود. روش‌های شیمیایی علاوه بر هزینه نسبتاً زیاد، ممکن است عوارض

قلیائیت محسوب می‌شوند که بر pH آب تأثیر گذاشته و به‌طور مستقیم و غیرمستقیم رشد و نمو گیاهان را مختل می‌کند (Valdezand Reed, 2007). همچنین ممکن است با استفاده از پساب فاضلاب در سیستم‌های آبیاری تحت فشار، این یون‌ها با ترکیب با یون‌های کلسیم و منیزیم، رسوبات کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) و کربنات منیزیم ( $\text{MgCO}_3$ ) ایجاد کنند که به انسداد قطره‌چکان‌ها و گرفتگی لوله‌ها می‌انجامد (Khoramiyan and Paknejad, 2014; Hasanpour Estahbanati, 2019). برای مثال، استفاده از آب‌های نامتعارف در روش پرهزینه آبیاری قطره‌ای می‌تواند با گرفتگی قطره‌چکان‌ها مواجه و از نظر اقتصادی و فنی این روش آبیاری را با مشکل مواجه کند (Liu and Huang, 2009). به این دلیل استفاده از روش‌های اصلاحی برای به‌کارگیری آب‌های نامتعارف الزامی است. ازجمله روش‌های اصلاح آب‌های نامتعارف می‌توان به گیاه‌پالایی، روش‌های شیمیایی و همچنین روش مغناطیسی کردن آب اشاره کرد. هرکدام از این روش‌ها دارای معایب و مزایای است.

از سویی معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود آب، طراحان مهندسی آبیاری، سامانه‌های آبیاری قطره‌ای را برای اراضی باغی و حتی اراضی زراعی مانند گیاهان ردیفی در نظر می‌گیرند، اما در این مناطق اکثر آب‌های در دسترس نامتعارف بوده و در سیستم آبیاری قطره‌ای توصیه‌شده، باعث گرفتگی قطره‌چکان‌ها خواهد شد. به‌طور کلی عوامل گرفتگی قطره‌چکان‌ها در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که شامل گرفتگی فیزیکی که توسط مواد فیزیکی معلق موجود در آب نظیر ذرات غیرآلی شن، سیلت، رس و پلاستیک، ذرات آلی نظیر گیاهان و جلبک‌ها، جانوران آبی و باکتری‌ها ایجاد می‌شود، گرفتگی شیمیایی که ناشی از رسوبات حاصل از کربنات کلسیم و منیزیم، سولفات کلسیم، هیدروکسید فلزات سنگین، سیلیکات‌ها، سولفیدها، روغن و مواد مشابه، کودهای فسفاته، آمونیاکی، آهن، مس، روی و منگنز است و گرفتگی بیولوژیکی که توسط فیلان‌ها، لجن‌ها، نهشته‌های میکروبی و باکتری‌ها حادث می‌شود (Alizadeh, 2001).

روش‌های مختلفی برای جلوگیری از رسوب املاح در داخل لوله‌ها و گرفتگی قطره‌چکان‌ها وجود دارد. برخی از این روش‌ها استفاده از مواد شیمیایی نظیر اسید

نامطلوب در محیط‌زیست ایجاد کند؛ بنابراین در این تحقیق سعی شده است از روش‌های بیولوژیکی نظیر گیاه‌پالایی و روش فیزیکی مانند مغناطیس کردن پساب‌های مذکور، استفاده شود، تا هم هزینه‌های تصفیه پایین باشد و هم عوارض زیست‌محیطی حداقلی ایجاد کند.

در تصفیه‌خانه‌ها عموماً بعد از فرایند تصفیه اولیه که مکانیکی است، با عمل تصفیه ثانویه که عموماً زیستی است، مواد آلی و معلق را از پساب جدا می‌کنند. برای حذف نیترژن، فسفر، مواد آلی سخت، فلزات سنگین و نمک‌های محلول از تصفیه پیشرفته استفاده می‌شود. پس از ته‌نشین شدن فاضلاب در استخر، ته‌نشینی نهایی و پیش از وارد کردن آن به منبع‌های طبیعی آب، باید فاضلاب گندزدایی (عموماً با کلر) شود که در بعضی کشورها به‌عنوان آخرین مرحله تصفیه، تلقی می‌شود. هرچند پساب فاضلاب در مقایسه با حجم آب آبیاری مورد نیاز کم است، ولی بهره‌برداری از همین مقدار باعث می‌شود که آب‌های باکیفیت بالاتر را بتوان در مصارف بااهمیت‌تر به‌کار برد (Abedi and Najafi, 2001). استفاده از پساب فاضلاب در کشاورزی علاوه بر تأمین نیاز آبی گیاه زراعی، مواد غذایی گیاه را نیز تأمین می‌کند. اغلب گیاهان هنگامی که با پساب فاضلاب آبیاری می‌شوند، دارای عملکرد بیشتر و نیاز کودی کمتری هستند که باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود (Bura et al., 1987).

باوجود فرایندهای تصفیه در مراکز تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، استفاده مستقیم از این نوع پساب‌ها می‌تواند صدمات و آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به محصولات کشاورزی، خاک، انسان و محیط‌زیست وارد نماید.

ازجمله معیارهای کیفیت آب می‌توان به شوری یا مقدار کل املاح، مقدار سدیم ( $\text{Na}^+$ )، میزان کربنات ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) و بی‌کربنات ( $\text{HCO}_3^{-1}$ )، سختی و عناصر سمی اشاره کرد. مقادیر بیش از حد هر کدام از این پارامترها در آب‌های مختلف از جمله پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها می‌تواند باعث مشکلات زیست‌محیطی برای انسان‌ها، گیاهان و خاک شود. در گیاهان این مسأله باعث ایجاد اختلال در جذب عناصری همچون منگنز، آهن، منیزیم، روی، پتاسیم و فسفر، توسعه ریشه گیاه و خسارت به عملکرد آن می‌شود. پارامترهای بی‌کربنات و کربنات عوامل اصلی

سولفوریک، گچ و سولفور دی‌اکسید است که از نظر فنی مشکل و هزینه‌بر خواهد بود. راه‌های ساده‌تر و ارزان‌قیمت که تأثیرات جانبی آن سلامت محیط‌زیست و انسان را نیز به خطر نیندازد، نظیر گیاه‌پالایی و روش مغناطیس‌کردن پساب نیز وجود دارد که در این تحقیق از این روش‌ها استفاده شده است.

### گیاه‌پالایی

استفاده از تصفیه بیولوژیکی گیاهان برای پاکسازی آب‌های نامتعارف و خاک آلوده، به‌عنوان یکی از راه‌های سازگار با محیط‌زیست، با عنوان گیاه‌پالایی<sup>۱</sup> مطرح شده است. فرایند گیاه‌پالایی، به‌دلیل کارایی مناسب و کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری، روشی پایدار، طبیعی، ارزان، آسان، دوستدار محیط‌زیست و کاربردی و درعین‌حال بدون نیاز به دانش بالا، برای کاهش خطرات محیط‌زیستی است (Kamari and Farshadpoor, 2012). این روش فاقد هرگونه اثرات تخریبی برای محیط زیست بوده و این فرایند برای کاهش، تثبیت یا حذف مواد آلاینده و پاکسازی اراضی و آب‌های آلوده به فاضلاب، توسط گیاهان طبیعی است که در آب‌های کم‌عمق و اراضی آلوده‌شده به ضایعات آلی و فلزات سنگین، کارایی بالایی از خود نشان داده است. استفاده از گیاهان آبری شناور به‌علت سرعت رشد بالا، راهبری آسان، هزینه کم و اثربخشی زیاد، سبب زدایش آلاینده‌ها و فلزات سنگین از فاضلاب‌ها و بهبود کیفیت آب شده و به محیط‌زیست نیز آسیبی نمی‌رساند. همچنین برای تصفیه پساب‌های آلوده به مواد نفتی، اغلب از سیستم‌های بیولوژیکی هوازی مثل لجن فعال استفاده می‌شود. درصد حذف مواد آلاینده در این سیستم‌ها، بستگی به میزان فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود دارد. برخی از مواد مثل متانول، گلوکز و... باعث تسریع و بهبود این فعالیت می‌شوند و بعضی دیگر حالت بازدارنده دارند (Parvin and Kazemi, 2005). ازجمله گیاهانی که در فرایند گیاه‌پالایی به‌کار می‌روند می‌توان به آذولا، نخل مرداب، شاه‌تره آبی، خرفه، آفتابگردان، پامپاس گراس، عدسک آبی، وتیورگراس، بامبو و نی اشاره کرد. انتخاب گونه گیاهی مناسب علاوه بر ویژگی‌های آلی و معدنی پساب، به سازگاری و رشد مناسب گیاه مذکور در محیط‌های

آلوده (آب و خاک) بستگی خواهد داشت؛ بنابراین اقلیم منطقه و شرایط آب و هوایی محیط کشت از عوامل مؤثر بر عملکرد پالایش گیاهان و درنتیجه معیار انتخاب آن‌ها محسوب می‌شوند (Najafpoor et al., 2009).

(Liu & Huang, 2009) گرفتگی سه نوع قطره‌چکان را با استفاده از آب تازه و پساب تصفیه‌شده فاضلاب بررسی کردند. کیفیت آب در ورودی و خروجی قطره‌چکان‌ها نشان داد که رسوب شیمیایی آب به‌دلیل pH بالا و غلظت بالای یون‌ها مخصوصاً در پساب تصفیه‌شده فاضلاب، دلیل اصلی گرفتگی قطره‌چکان‌ها بوده است. براساس مطالعه صورت‌گرفته توسط (Najafpoor et al., 2009) با بررسی کارایی گیاه عدسک آبی در میزان جذب نیترات از محیط آبی در شرایط آزمایشگاهی اعلام کردند که این گیاه می‌تواند نیترات را در غلظت‌های پایین از محلول‌های آبی جذب کند؛ اما با افزایش غلظت نیترات این جذب کاهش می‌یابد، در فاضلاب خانگی که غلظت نیترات کم است، این گیاه قادر به حذف نیترات خواهد بود. (Amiri et al., 2009) در پژوهش خود اثرات گیاه علف چشمه را در پالایش فاضلاب بررسی کردند و دریافتند این گیاه به‌عنوان یک فیلتر زیستی دارای قابلیت بالای حذف مواد آلی و مغذی است. در مطالعه دیگری که به‌منظور بررسی حذف نیتروژن موجود در فاضلاب خانگی توسط انواع مختلف تالاب‌های مصنوعی انجام گرفت، میزان حذف کل مواد معلق COD، نیتروژن آمونیاکی، نیتروژن کل و کل فسفر به‌ترتیب برابر با ۸۹ و ۸۵ و ۸۳ و ۸۳ و ۶۴ درصد بوده است.

تصفیه آب آلوده با گیاهان، روش‌های مناسبی برای حذف آلاینده‌ها محسوب می‌شوند که علاوه بر هزینه کم، فناوری ساده و مصرف انرژی پایین در اصلاح و بهبود محیط‌زیست نقش مؤثری دارند و می‌توانند به‌عنوان روش‌های پالایش بیولوژیکی (ثانویه) جایگزین روش‌های متداول شوند (Ghaderi, 2004).

مطالعات گذشته حاکی از آن است که گیاهان زیادی با قابلیت پالایش آلودگی‌های شیمیایی آب‌ها در طبیعت وجود دارند که البته استفاده از آن‌ها، منوط به دسترسی به آن‌ها در منطقه، وجود شرایط مساعد اقلیمی برای رشد آن‌ها و از سویی کم‌هزینه‌بودن کشت و داشت این گیاهان است؛ از این‌رو با در نظر گرفتن نکات ذکرشده، گیاهان بامبو و نی برای این پژوهش مد نظر قرار گرفتند.

اردک، بامبو و نی در گیاه‌پالایی استفاده می‌شوند. انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب به ویژگی‌های فاضلاب، سازگاری گیاه و شرایط محیطی بستگی دارد. مطالعات اثربخشی گیاهان مختلف را در حذف آلاینده‌ها، نیترات‌ها و فلزات سنگین از فاضلاب نشان داده‌اند (Amiri et al., 2013; Liu & Huang, 2009). بامبو که در مناطق مرطوب و معتدل رشد می‌کند، تحمل بالایی در برابر فلزات سنگین و عناصر شیمیایی دارد. نی که در آب‌وهوای گرم و مرطوب گسترده است، به‌طور مؤثر مواد مغذی را جذب می‌کند و زیست‌توده زیادی برای جذب دارد (Kadlec & Wallace, 2008).

گیاه‌پالایی به‌عنوان یک فرایند مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست مناسب برای کشورهای مانند ایران قابل‌استفاده بوده و می‌تواند به‌عنوان جایگزین یا مکمل برای روش‌های متداول تصفیه فاضلاب باشد (Fallahi et al., 2012). فرایند مغناطیسی‌کردن پساب، شامل عبور دادن آب از میان یک آهنربای دائمی (مغناطیس پایدار) قوی مستقر شده روی خطلوله تغذیه‌کننده است (Herzog et al., 1989). به عبارت دیگر آب مغناطیسی، آبی است که از یک میدان مغناطیسی قوی که مطابق با محاسبات معینی ایجاد شده، عبور کرده و در نتیجه باعث تغییر و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود (Khoshravesh and Kiani, 2015). Kiani, 2015. تصفیه مغناطیسی آب یک موضوع بحث‌برانگیز مربوط به سال ۱۹۳۰ مخصوصاً در کشور روسیه است. برای نخستین‌بار اثر مغناطیس روی آب توسط دانشمندان روسی مشاهده شد؛ بنابراین موضوع مذکور دارای تاریخچه طولانی است که هنوز تحقیق و بحث درباره آن ادامه دارد. محققان بسیاری اثرات میدان مغناطیسی را بر آب مطالعه کرده‌اند، اما به‌دلیل پیچیدگی ساختمان مولکول آب و رفتار متنوع آن در شرایط فیزیکی و شیمیایی متفاوت، نتایج مشابهی در رابطه با نحوه تأثیر میدان مغناطیسی بر آب گزارش نشده است (Zanhenh Yosefabi et al., 2012). شکل ۱، نمایی از نحوه مغناطیس‌کردن آب را نشان می‌دهد. با مغناطیس‌شدن آب، مولکول‌های آب (شامل کاتیون‌ها و آنیون‌ها) از حالت بی‌نظمی به‌صورت مرتب درآمده و نوع پیوند اکسیژن-هیدروژن از حالت مثلثی به شکل یک خط تغییر می‌کند و در این شرایط هیدروژن‌های مثبت دارای

گیاه بامبو و نی از شاخه Plantae، راسته Pales بوده، اما بامبو از خانواده Rusceae و نی از خانواده Poaceae است. بامبو در اکثر مناطق دنیا به‌خصوص مناطق مرطوب و معتدل رشد می‌کند. از ویژگی‌های گیاه بامبو آن است که تولید زیست‌توده عظیم داشته و در برابر سمیت فلزات و عناصر شیمیایی تحمل بالایی دارد.

گیاه نی در اکثر دنیا و به‌خصوص اقلیم‌های گرم و مرطوب ایران به‌صورت وحشی رشد کرده و عمده تکثیر آن از طریق ریشه است. این گیاه دارای زیست توده بزرگی در ناحیه برگ، ساقه و ریشه است که همگی این نواحی به‌عنوان سطح جذب محسوب می‌شوند. رشد افقی و عمودی ریشه نی، ذرات خاک را به هم متصل کرده و سطوح گسترده‌ای را برای جذب مواد غذایی مانند نیتروژن و فسفر و سایر یون‌ها فراهم می‌سازد (Kadlec and Wallace, 2008).

تکثیر، پرورش و سازگاری گیاهان نی و بامبو در آب بسیار مناسب و آسان و از سویی کم‌هزینه است. همچنین در سرتاسر ایران، اقلیم نسبتاً مناسبی برای رویش این گیاهان وجود داشته و راندمان گیاه‌پالایی آن‌ها نیز بالاست. براین‌اساس و با توجه به کم‌تر بودن هزینه این روش در مقایسه با سایر روش‌های حذف نیترات، می‌توان نتیجه گرفت که گیاه‌پالایی، فرایندی مقرون‌به‌صرفه، سازگار با محیط‌زیست و مورد قبول برای کشور است (Fallahi et al., 2012).

(Chen et al., 2015) در بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی بامبو و نی به روش هیدروپونیک اعلام کردند که گیاه بامبو نقش مؤثرتری در کاهش سمیت فلزات سنگین ایفا می‌کند. همچنین بامبو در حذف سدیم، کلر و پتاسیم آب نسبت به نی مؤثرتر بوده است.

در این تحقیق کارایی این دو گیاه در اصلاح تکمیلی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری گرگان، برای حذف آلاینده‌ها و ذراتی که ممکن است در آبیاری قطره‌ای باعث گرفتگی شوند، ارزیابی شد.

گیاه‌پالایی یک روش سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه آب و خاک آلوده است. این رویکرد پایدار و مقرون‌به‌صرفه، نیازی به تخصص سطح بالا ندارد و از گیاهان طبیعی برای کاهش، تثبیت یا حذف آلاینده‌های فاضلاب و آب‌های آلوده استفاده می‌کند (Najafpoor et al., 2009). گیاهان مختلفی از جمله آذولا، سنبل آبی،

محلول، کیفیت آب و pH بستگی دارد (Chibowski et al., 2005). (Grewal and Maheshwari, 2011) گزارش کردند که با توجه به تیمار مغناطیسی، برخی از تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی آب (عمدتاً پیوند هیدروژنی، قطبیت، کشش سطحی، هدایت الکتریکی، اسیدیته و حلالیت نمک‌ها) رخ می‌دهد و ممکن است این تغییرات در خواص آب، بر رشد گیاهان اثر بگذارد. ایشان اعلام کردند که با مغناطیس کردن آب، اسیدیته آن کاهش و هدایت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. علت این امر را تغییرات در پیوند هیدروژنی و افزایش تحرک پذیری یون‌ها اعلام کردند.

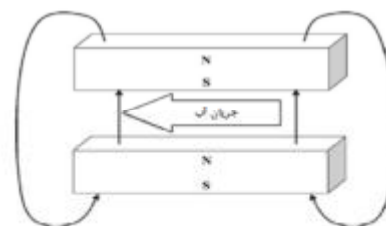
با جمع‌بندی تحقیقات بالا به نظر می‌رسد که با استفاده از روش مغناطیس کردن پساب، می‌توان تا حدی از عوارض استفاده مستقیم از آب‌های نامتعارف در آبیاری اجتناب کرد. زیرا استفاده مستقیم از آب‌های نامتعارف برای مقابله با بحران آب در برخی موارد می‌تواند صدمات و آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به انسان، دام و محیط‌زیست وارد کند. به این دلیل استفاده از روش‌های اصلاحی برای به‌کارگیری آب‌های نامتعارف الزامی است.

همچنین استفاده از آب‌های نامتعارف در روش پرهزینه آبیاری قطره‌ای می‌تواند با گرفتگی قطره‌چکان‌ها مواجه و از نظر اقتصادی و فنی این روش آبیاری را با مشکل مواجه کند؛ از این رو در این طرح با کمک روش گیاه‌پالایی و تکنیک مغناطیس کردن، امان استفاده از پاب تصفیه‌خانه شهری گرگان (به‌عنوان ک منع آبی دائمی نامتعارف) در آبیاری کم‌فشار بررسی شد. براین اساس این مطالعه با این فرض انجام می‌گیرد که گیاه‌پالایی بر کاهش گرفتگی قطره‌چکان‌ها در به‌کارگیری آب‌های نامتعارف اثر مثبت داشته و تأثیر مغناطیس کردن آب معمولی و پساب در جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها در تعامل با گیاه‌پالایی ممکن است مضاعف باشد؛ از این رو هدف این تحقیق بررسی تأثیر گیاه‌پالایی بر آب‌های با کیفیت متفاوت (معمولی و پساب) بر گرفتگی قطره‌چکان‌ها با امکان‌سنجی استفاده بدون چالش از آب‌های نامتعارف در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای است.

### مواد و روش‌ها

استان گلستان با وسعت ۲۰۳۸۰ کیلومتر مربع در شمال ایران، منطقه کلیدی کشاورزی با اقلیم‌های متنوع و منابع

نیروی بیشتری شده و ضمن تشکیل مولکول‌های کوچک‌تر از آب، سبب افزایش تعداد مولکول‌های آب در واحد حجم و همچنین افزایش قدرت حلالیت آب می‌شود (Leather Wood, W. R. 2005).



شکل ۱- طرح کلی قرارگیری دستگاه‌های مغناطیسی و ایجاد میدان مغناطیسی (Mohammadian et al., 2016)

تاکنون انواع متنوعی از تصفیه‌کننده‌های مغناطیسی توسط شرکت‌های مختلف ساخته و عرضه شده است. با وجود تنوع شکل و ساختار، مکانیسم عملکرد این دستگاه‌ها تقریباً یکسان است. بدین‌صورت که میدان مغناطیسی ایجادشده در دستگاه هنگام عبور سیال از آن، روی سیال اعمال می‌شود (Herzog et al., 1989).

اثر و خاصیت آب مغناطیسی از ده‌ها دقیقه تا صدها ساعت گزارش شده است. برخی از مطالعات گذشته نشان داد هنگامی که آب در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، خواص آن از جمله ثابت-دی الکتریک، ویسکوزیته، نیروی کشش سطحی، نقطه جوش، نقطه انجماد و هدایت الکتریکی در مقایسه با آب معمولی تغییر می‌کند. آب مغناطیسی دارای کاربردهای گسترده در صنعت، کشاورزی و پزشکی است (Teixeria da Silna and Dobranszki, 2016). پالایش آب از طریق اعمال میدان مغناطیسی که جزو روش‌های تصفیه فیزیکی به‌شمار می‌رود، برخی ویژگی‌های آن را مانند آرایش بارهای الکتریکی مولکول‌های آب، چگالی، کشش سطحی و سرعت تبخیر تغییر می‌دهد (Leather Wood, 2005). به بیان دیگر بعضی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب مانند کشش سطحی، قابلیت حل نمک‌ها، ضریب شکست نور و اسیدیته آبی که در معرض میدان مغناطیسی قرار گرفته است، تغییر می‌کند (Castro Palacio et al., 2007). تغییرات حاصل از اعمال میدان مغناطیسی بر آب آبیاری به عواملی مانند شدت میدان، جهت میدان، مدت زمان در معرض‌گذاری میدان مغناطیسی، نرخ جریان

اتمام این مرحله، تیمارهای آزمایشی اعمال و ۳۶ گلدان شامل ۱۲ تیمار و سه تکرار انتخاب شد. درون هر گلدان ۲ نهال با ارتفاع یکسان ۶۰ سانتی‌متر و حجم ریشه‌ای مشابه جای‌گذاری شد. در هر گلدان ۸ لیتر آب و پساب متناسب با تیمارهای مدنظر اعم از آب مغناطیسی و بدون مغناطیس اضافه می‌شد. به‌منظور مغناطیس‌کردن تیمارهای آب و پساب از دستگاه مولد میدان مغناطیسی، واقع در آزمایشگاه مکانیک بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (شکل ۳) استفاده شد. در این دستگاه دو رشته سیم‌پیچ به دور دو هسته فلزی مجزا از هم (با تعداد دور ۳۰۰۰) پیچیده شده است. حداکثر شدت میدان مغناطیسی تولیدی ۱/۲ تسلا، وزن ۱۵۰ کیلوگرم و مساحت ۸۰ سانتی مترمربع است. با توجه به اینکه میدان مغناطیسی از طریق ایجاد جریان الکتریسته تولید می‌شود، برای ایجاد این جریان، از دستگاه منبع تغذیه استفاده شد که دارای یک صفحه نمایشگر، پیچ‌های تنظیم‌کننده ولتاژ و آمپر و یک قسمت الکتریسته است که توسط سیم‌های رابط به دستگاه متصل می‌شود و حداکثر ولتاژ و آمپر تولیدی توسط این دستگاه به‌ترتیب ۵۰ ولت و ۱۰ آمپر است. میزان شدت میدان مغناطیسی با استفاده از دستگاه کوچکی به‌نام تسلاسنج مشخص شد. برای این کار با حرکت دادن پیچ‌های تنظیم‌کننده ولتاژ و آمپر، میزان شدت میدان مغناطیسی به کمک تسلاسنج کنترل و شدت میدان مغناطیسی مدنظر به‌دست آمد. در این پژوهش برای شدت ۱ تسلا، ۳۹ ولت و ۴/۸ آمپر لازم بود.



شکل ۳- نحوه مغناطیس‌کردن آب و پساب در آزمایشگاه

ابتدا در هر مرحله هر دو نوع آب آبیاری با بازکردن شیرآلات مخصوص آبیاری قطره‌ای با عبور از شیر بین دو هسته فلزی، مغناطیس شده و بطری‌های ده لیتری پس از پر شدن (به میزان لازم) برای اعمال تیمارهای آزمایش منتقل شدند. بعد از اعمال تیمارهای مدنظر و گذشت

آبی قابل‌توجه است. این استان بین طول ۵۳ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۸ دقیقه شمالی واقع شده و با کشورهای ترکمنستان، سمنان، خراسان شمالی و دریای خزر همسایه است. درحالی‌که پتانسیل آب قابل‌توجهی دارد، کیفیت و در دسترس بودن آب در سراسر منطقه متفاوت است (Gholami, et al., 2014). همچنین در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی که دنیا و حتی شمال کشور ایران را نیز متأثر کرده است، منابع آبی محدودیت بیشتری یافته است؛ به‌نحوی‌که کشاورزان برای تأمین آب مورد نیاز گیاهان، به سمت استفاده از آب‌های نامتعارف نظیر آب‌های شور، فاضلاب‌های شهری و حتی صنعتی روی آورده‌اند؛ از این‌رو در این پژوهش، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با سه عامل و در سه تکرار انجام شد. عامل اول کیفیت آب (شامل دو نوع آب شاهد و پساب خروجی تصفیه‌خانه شهری)، عامل دوم مغناطیس‌کردن (آب شاهد و پساب) و عامل سوم گیاه‌پالایی در سه سطح بدون گیاه، با گیاه نی و بامبو در نظر گرفته شد. همچنین چهار زمان ماند آب و پساب در ظروف گیاه‌پالایی به‌ترتیب شامل ۳، ۵، ۷ و ۱۰ روزه در نظر گرفته شد. خصوصیات شیمیایی آب شاهد و برخی خصوصیات شیمیایی پساب مورد استفاده در این مطالعه که از خروجی نهایی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر گرگان واقع در ۲ کیلومتری جاده آق‌قلا (شکل ۲) و از آخرین مرحله تصفیه تهیه می‌شد، در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲- تصفیه‌خانه فاضلاب شهری گرگان

در مهر ۱۳۹۷ گیاه نی از اطراف آب‌بندان محمدآباد گرگان و گیاه بامبو نیز از محوطه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شد. گیاهان بعد از شست‌وشو و قلمه‌گیری به‌صورت هیدروپونیک در گلخانه پرورش داده شدند. پس از گذشت ۲ ماه از استقرار آن‌ها و سازگاری گیاه با محیط آبی، گیاه شروع به رشد برگ‌ی و ریشه‌زایی کرد. بعد از

زمان ماند (در فواصل زمانی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ روزه) در نهایت داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از روش نمونه‌گیری آب از هر گلدان صورت می‌گرفت و پارامترهای سختی کل، کلسیم، کربنات و بی‌کربنات با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد؛ بنابراین ۱۴۴ نمونه آزمایشی در طی این مدت برداشته شد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی آب و پساب مورد استفاده در آزمایش

| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SAR                    | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | pH  | EC     | کیفیت آب  |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-----|--------|-----------|
| mg.lit <sup>-1</sup>          | mg.lit <sup>-1</sup>          | (meq/l) <sup>0.5</sup> |                | (meq/l)          |                  |                 | -   | (dS/m) |           |
|                               |                               | ۰/۵۷                   | ۰/۰۹           | ۲/۳              | ۳/۱              | ۰/۹             | ۷   | ۰/۵۸   | آب معمولی |
| ۱۲۰                           | ۶۱                            | ۰/۶۶                   | ۰/۴۵           | ۴/۴              | ۵/۲              | ۱/۲             | ۸/۲ | ۱/۵    | پساب      |

## نتایج و بحث

معنی‌دار شده است. اثر متقابل کیفیت آب و گیاه‌پالایی نیز فقط در زمان ۷ روز در سطح ۵ درصد بر سختی کل معنی‌دار شده است. اثر متقابل کیفیت آب و مغناطیس‌کردن آب نیز بعد از گذشت ۵ روز در سطح ۱ درصد بر سختی کل معنی‌دار شده است. در بقیه تیمارها اثرات متقابل بر سختی نمونه‌ها در زمان‌های مختلف تفاوت معنی‌دار ایجاد نکرده است. این درحالی است که بعد از گذشت ۱۰ روز تفاوت سختی در تیمارهای آب و پساب معنی‌دار نبوده است. در جدول ۳، به‌عنوان نمونه، مقایسه میانگین اثر ساده و متقابل کیفیت آب و گیاه‌پالایی بعد از زمان ماند ۵ روز ارائه شده است.

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی مختلف بر سختی کل نمونه‌های آب بعد از گذشت زمان‌های ماند ۳، ۵، ۷ و ۱۰ روزه در جدول ۲ ارائه شده است. بعد از گذشت ۳ روز، اثر تمامی تیمارها به‌صورت انفرادی و به‌صورت اثر متقابل معنی‌دار نبوده است؛ اما اثر کیفیت آب بعد از گذشت ۵ و ۷ روز بر سختی کل آب در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. همچنین سختی آب تحت‌تأثیر مغناطیس بعد از گذشت ۵ روز معنی‌دار نبوده، اما در زمان ۷ روز در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. اثر گیاه‌پالایی در زمان ماند ۵ روز، در سطح احتمال ۵ درصد و در زمان ماند ۷ روز در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر کیفیت آب، اصلاح با مغناطیس و گیاه‌پالایی بر سختی کل آب در زمان‌های ماند مختلف براساس میانگین مربعات

| زمان ماند روز       |                     |                      |                     | df | منابع تغییرات                       |
|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----|-------------------------------------|
| ۱۰                  | ۷                   | ۵                    | ۳                   |    |                                     |
| ۴/۶۹ <sup>ns</sup>  | ۲۳/۳۶ <sup>*</sup>  | ۶۱/۳۶ <sup>*</sup>   | ۲/۰۵ <sup>ns</sup>  | ۱  | کیفیت آب (A)                        |
| ۲/۸۹ <sup>ns</sup>  | ۴۳/۱۲ <sup>**</sup> | ۱/۰۶ <sup>ns</sup>   | ۲۲/۰۹ <sup>ns</sup> | ۱  | اصلاح با مغناطیس (B)                |
| ۲۱/۱۵ <sup>ns</sup> | ۲۳/۵۸ <sup>**</sup> | ۳۱/۳۴ <sup>*</sup>   | ۶/۶ <sup>ns</sup>   | ۲  | اصلاح با گیاه‌پالایی (C)            |
| ۹/۹۴ <sup>ns</sup>  | ۱۶/۸۸ <sup>*</sup>  | ۲۶/۶۹ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۵ <sup>ns</sup>  | ۱  | کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC)         |
| ۵/۶ <sup>ns</sup>   | ۰/۰۹ <sup>ns</sup>  | ۱۰۵/۱۹ <sup>**</sup> | ۲۷/۸۲ <sup>ns</sup> | ۲  | کیفیت آب × مغناطیس (AB)             |
| ۱۱/۶۴ <sup>ns</sup> | ۰/۸۲ <sup>ns</sup>  | ۲۰/۱۱ <sup>ns</sup>  | ۱۹/۳۹ <sup>ns</sup> | ۲  | مغناطیس × گیاه‌پالایی (BC)          |
| ۰/۳۴ <sup>ns</sup>  | ۱/۱۰ <sup>ns</sup>  | ۱۹/۸۴ <sup>ns</sup>  | ۰/۵۲ <sup>ns</sup>  | ۲  | کیفیت × مغناطیس × گیاه‌پالایی (ABC) |
| ۶/۷۴                | ۴/۰۷                | ۸/۴۶                 | ۶/۳۶                | ۲۴ | خطای فرعی                           |
| ۲۶۱/۱۹              | ۲۴۹/۱۳              | ۶۴۵/۱۸۶              | ۲۸۶/۴۳              | ۳۵ | خطای کل تصحیح‌شده                   |

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد، \* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ns غیرمعنی‌دار



جدول ۳- مقایسه میانگین اثر ساده و متقابل تیمارهای کیفیت آب و گیاه‌پالایی بر سختی بعد از زمان ماند ۵ روز

| نوع پارامتر                     | سطح فاکتور            | مقایسه میانگین |
|---------------------------------|-----------------------|----------------|
| کیفیت آب (A)                    | پساب (A1)             | ۱۱/۳۴ a        |
|                                 | آب معمولی (A2)        | ۸/۷۳ b         |
|                                 |                       |                |
| گیاه‌پالایی C                   | نی (C1)               | ۱۱/۲۳ a        |
|                                 | بامبو (C2)            | ۸/۲a           |
|                                 | بدون گیاه‌پالایی (C3) | ۱۰/۶۸ a        |
|                                 |                       |                |
| اثر کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC) | A1×C1                 | ۱۵/۵۶a         |
|                                 | A1×C2                 | ۳۶/۹bc         |
|                                 | A1×C3                 | ۹/۱ bc         |
|                                 | A2×C1                 | ۶/۹ c          |
|                                 | A2×C2                 | ۷/۳c           |
|                                 | A2×C3                 | ۱۲/۲۶ bc       |
|                                 |                       |                |

نشان داد که اثر متقابل پساب و گیاه‌پالایی نی باعث افزایش سختی کل نسبت به بقیه تیمارها شده است. مقادیر تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف در زمان ماند متفاوت بر میزان کلسیم در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که میزان کلسیم نمونه‌های آب به‌جز تیمار اصلاح گیاه‌پالایی در زمان ماند ۱۰ روزه، تغییر محسوسی نداشته است.

از آنجا که اثر متقابل تیمارهای کیفیت آب و گیاه‌پالایی بر سختی کل طی زمان ماند ۷ روز در جدول ۲ معنی‌دار شده بود، در جدول ۴ مقایسه میانگین آن‌ها ارزیابی شده است. به‌نظر می‌رسد زمان ماند ۷ روز باعث افزایش معنی‌دار سختی کل پساب نسبت به آب معمولی شده است. همچنین گیاه‌پالایی با نی باعث افزایش سختی شده است؛ اما سختی آب و پساب با بامبو و بدون گیاه اختلاف معنی‌داری نداشت. اثر متقابل کیفیت آب و گیاه‌پالایی نیز

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر ساده و متقابل تیمارهای کیفیت آب و گیاه‌پالایی بر پارامتر سختی بعد از زمان ماند ۷ روز

| نوع پارامتر                     | سطح فاکتور             | مقایسه میانگین |
|---------------------------------|------------------------|----------------|
| کیفیت آب (A)                    | پساب (A1)              | ۸/۶۳ a         |
|                                 | آب معمولی (A2)         | ۷/۰۲b          |
|                                 |                        |                |
| اصلاح آب (B)                    | مغناطیس کردن (B1)      | ۶/۷۳ b         |
|                                 | بدون مغناطیس کردن (B2) | ۸/۹۲a          |
|                                 |                        |                |
| گیاه‌پالایی                     | نی (C1)                | ۹/۳۱ a         |
|                                 | بامبو (C2)             | ۷/۶۳ab         |
|                                 | بدون گیاه‌پالایی (C3)  | ۶/۵۳ b         |
|                                 |                        |                |
| اثر کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC) | A1×C1                  | ۱۱/۱۳ a        |
|                                 | A1×C2                  | ۷/۱۳b          |
|                                 | A1×C3                  | ۷/۶۳ b         |
|                                 | A2×C1                  | ۷/۵ b          |
|                                 | A2×C2                  | ۸/۱۳ b         |
|                                 | A2×C3                  | ۵/۴۳ b         |
|                                 |                        |                |

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر کیفیت آب، اصلاح با مغناطیس و گیاه‌پالایی بر کلسیم آب در زمان‌های ماند مختلف

| منابع تغییرات                           | df | زمان ماند (روز)    |                     |                     |                     |
|-----------------------------------------|----|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                         |    | ۱۰                 | ۷                   | ۵                   | ۳                   |
| کیفیت آب (A)                            | ۱  | ۰/۷۵ <sup>ns</sup> | ۴/۱۳ <sup>ns</sup>  | ۴/۲۷ <sup>ns</sup>  | ۱ <sup>ns</sup>     |
| اصلاح با مغناطیس (B)                    | ۱  | ۰/۰۴ <sup>ns</sup> | ۰/۲۴ <sup>ns</sup>  | ۳/۲۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۷۱ <sup>ns</sup> |
| اصلاح با گیاه‌پالایی (C)                | ۲  | ۲/۲۵ <sup>**</sup> | ۳/۳۰۹ <sup>ns</sup> | ۰/۰۳۹ <sup>ns</sup> | ۰/۷۳ <sup>ns</sup>  |
| اثر کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC)         | ۱  | ۰/۱۵ <sup>ns</sup> | ۷/۱۹ <sup>ns</sup>  | ۲/۰۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۷۲ <sup>ns</sup>  |
| اثر کیفیت آب × مغناطیس (AB)             | ۲  | ۰/۰۷ <sup>ns</sup> | ۸/۰۲ <sup>ns</sup>  | ۳/۰۰۴ <sup>ns</sup> | ۰/۵۳ <sup>ns</sup>  |
| اثر مغناطیس × گیاه‌پالایی (BC)          | ۲  | ۰/۲۶ <sup>ns</sup> | ۱/۰۲ <sup>ns</sup>  | ۲/۵۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۲ <sup>ns</sup>  |
| اثر کیفیت × مغناطیس × گیاه‌پالایی (ABC) | ۲  | ۰/۲۳ <sup>ns</sup> | ۳/۳۲ <sup>ns</sup>  | ۱/۶ <sup>ns</sup>   | ۰/۲۴ <sup>ns</sup>  |
| خطای فرعی                               | ۲۴ | ۰/۲۹               | ۴/۸۲                | ۲/۲۳                | ۰/۴۶                |
| خطای کل تصحیح شده                       | ۳۵ | ۱۳/۵۲              | ۱۵۷/۵۹              | ۷۶/۵۶               | ۱۶/۸۸               |

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد، \* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ns غیرمعنی‌دار

میزان کربنات نمونه‌ها اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد گذاشته است، اما در زمان ماند ۱۰ روز، اثرات ساده تیمارهای کیفیت آب، اصلاح مغناطیس و گیاه‌پالایی معنی‌دار شده و اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نبوده است.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای گیاه‌پالایی بر پارامتر کلسیم بعد از زمان ماند ۱۰ روز

| نوع پارامتر   | سطح فاکتور            | مقایسه میانگین    |
|---------------|-----------------------|-------------------|
| گیاه‌پالایی C | نی (C1)               | ۲/۴۳ <sup>a</sup> |
|               | بامبو (C2)            | ۱/۶۸ <sup>b</sup> |
|               | بدون گیاه‌پالایی (C3) | ۱/۶۸ <sup>b</sup> |

مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف گیاه‌پالایی در زمان ماند ۱۰ روز برای کلسیم (جدول ۶) نشان‌دهنده آن است که مقادیر کلسیم نمونه‌های آب در تیمار گیاه‌پالایی با نی بیشتر از تیمارهای بامبو و بدون گیاه‌پالایی است؛ بنابراین استفاده از گیاه‌پالایی با بامبو در این زمینه مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند، زیرا تفاوت معنی‌داری با بدون گیاه‌پالایی ندارد.

تجزیه واریانس اثرات تیمارهای مختلف در زمان‌های متفاوت بر میزان کربنات نمونه‌های آب در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که در زمان ماند ۳ و ۵ روز، این تیمارها بر میزان کربنات تأثیری نداشته است. همچنین در زمان ماند ۷ روز، فقط نوع گیاه‌پالایی در

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر کیفیت آب، اصلاح با مغناطیس و گیاه‌پالایی بر کربنات آب در زمان‌های ماند مختلف

| منابع تغییرات                           | df | زمان ماند روز       |                     |                     |                     |
|-----------------------------------------|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                         |    | ۱۰                  | ۷                   | ۵                   | ۳                   |
| کیفیت آب (A)                            | ۱  | ۳ <sup>**</sup>     | ۰/۶۳ <sup>ns</sup>  | ۳/۰۰۴ <sup>ns</sup> | ۴ <sup>ns</sup>     |
| اصلاح با مغناطیس (B)                    | ۱  | ۱/۴۴ <sup>*</sup>   | ۰/۶۴ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۴ <sup>ns</sup>  |
| اصلاح با گیاه‌پالایی (C)                | ۲  | ۵/۹۲ <sup>**</sup>  | ۱۴/۵۲ <sup>**</sup> | ۲/۶۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۷ <sup>ns</sup>  |
| اثر کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC)         | ۱  | ۰/۰۱۷ <sup>ns</sup> | ۰/۳۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۸ <sup>ns</sup>  | ۰/۰۵۳ <sup>ns</sup> |
| اثر کیفیت آب × مغناطیس (AB)             | ۲  | ۰/۲۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۶۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۴ <sup>ns</sup>  |
| اثر مغناطیس × گیاه‌پالایی (BC)          | ۲  | ۰/۰۵ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۴۹ <sup>ns</sup>  | ۲/۲۵ <sup>ns</sup>  |
| اثر کیفیت × مغناطیس × گیاه‌پالایی (ABC) | ۲  | ۰/۱۲ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۲۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۳۳ <sup>ns</sup>  |
| خطا فرعی                                | ۲۴ | ۰/۲۷                | ۰/۷۵                | ۱/۳۵                | ۰/۹۶۶               |
| خطا کل تصحیح شده                        | ۳۵ | ۲۳/۵۲               | ۵۰/۲۶               | ۴۲/۸۶               | ۳۵/۰۴               |

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد، \* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ns غیرمعنی‌دار

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر ساده و متقابل تیمارهای کیفیت آب و گیاه‌پالایی بر پارامتر کربنات بعد از زمان ماند ۱۰ روز

| نوع پارامتر   | سطح فاکتور             | مقایسه میانگین    |
|---------------|------------------------|-------------------|
| کیفیت آب (A)  | پساب (A1)              | ۰/۸۴ <sup>b</sup> |
|               | آب معمولی (A2)         | ۱/۴۲ <sup>a</sup> |
| اصلاح آب (B)  | مغناتیس کردن (B1)      | ۱/۳۳ <sup>a</sup> |
|               | بدون مغناتیس کردن (B2) | ۰/۹۳ <sup>b</sup> |
| گیاه‌پالایی C | نی (C1)                | ۱/۸۶ <sup>b</sup> |
|               | بامبو (C2)             | ۱/۰۶ <sup>b</sup> |
|               | بدون گیاه‌پالایی (C3)  | ۰/۴۶ <sup>c</sup> |

نتیجه تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر مقادیر بی‌کربنات در نمونه‌های آب در جدول ۱۰ نشان داده شده است. به جز تیمار گیاه‌پالایی در زمان ماند ۳ روز، بقیه تیمارها اثر معنی‌داری بر بی‌کربنات نمونه‌های آب نگذاشته است. به نظر می‌رسد که تیمارهای مختلف کیفیت، اصلاح مغناتیس و گیاه‌پالایی در زمان‌های ماند مختلف اثر معنی‌داری بر یون بی‌کربنات نداشته است؛ از این رو اصلاح یا کاهش این یون به روش‌های ذکر شده در این تحقیق مؤثر نخواهد بود. این نتایج با تحقیق (2021) *et al. mohammad mirzaei* مبنی بر اینکه زمان ماندهای کمتر از ۵ روز و طولانی‌تر از ۱۰ روز نامناسب هستند، همخوانی دارد.

باتوجه به آنکه اثر ساده گیاه‌پالایی بر کربنات آب در تیمارهای مختلف، فقط در زمان ماند ۷ روز معنی‌دار شده است، فقط در جدول ۸ مقایسه میانگین مقادیر کربنات در این زمان ارائه شده است. مقادیر کربنات در تیمار گیاه‌پالایی نی بیشتر از مقادیر گیاه‌پالایی بامبو و بدون گیاه‌پالایی بوده است. براین اساس کربنات در حضور ریشه نی نسبت به بامبو و بدون گیاه، افزایش معنی‌دار یافته است.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر ساده گیاه‌پالایی بر پارامتر کربنات بعد از زمان ماند ۷ روز

| نوع پارامتر   | سطح فاکتور            | مقایسه میانگین    |
|---------------|-----------------------|-------------------|
| گیاه‌پالایی C | نی (C1)               | ۲/۲ <sup>a</sup>  |
|               | بامبو (C2)            | ۱/۱۳ <sup>b</sup> |
|               | بدون گیاه‌پالایی (C3) | ۰ <sup>c</sup>    |

مقادیر کربنات در تیمارهای مختلف بعد از زمان ماند ۱۰ روز در جدول ۹ ارائه شده است. همچنین اثر مغناتیس کردن نیز باعث افزایش معنی‌دار کربنات بعد از ۱۰ روز شده است. در این جدول نیز مشخص است که با گذشت ۱۰ روز، گیاه‌پالایی با نی و بامبو باعث افزایش معنی‌دار مقادیر کربنات در نمونه‌های آب شده است.

جدول ۱۰- تجزیه واریانس اثر کیفیت آب، اصلاح با مغناتیس و گیاه‌پالایی بر بی‌کربنات آب در زمان‌های ماند مختلف

| منابع تغییرات                           | df | زمان ماند (روز)    |                     |                    |                    |
|-----------------------------------------|----|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                                         |    | ۱۰                 | ۷                   | ۵                  | ۳                  |
| کیفیت آب (A)                            | ۱  | ۰/۴۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۷ <sup>ns</sup>  | ۰/۶۳ <sup>ns</sup> | ۰/۳۶ <sup>ns</sup> |
| اصلاح با مغناتیس (B)                    | ۱  | ۰/۴۴ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱۷ <sup>ns</sup> | ۰/۰۱ <sup>ns</sup> | ۳۵/۲ <sup>ns</sup> |
| اصلاح با گیاه‌پالایی (C)                | ۲  | ۰/۵۵ <sup>ns</sup> | ۰/۴۱ <sup>ns</sup>  | ۰/۵۹ <sup>ns</sup> | ۵/۴ <sup>*</sup>   |
| اثر کیفیت آب × گیاه‌پالایی (AC)         | ۱  | ۰/۲۳ <sup>ns</sup> | ۰/۹۶ <sup>ns</sup>  | ۰/۶۵ <sup>ns</sup> | ۰/۸۵ <sup>ns</sup> |
| اثر کیفیت آب × مغناتیس (AB)             | ۲  | ۰/۱۵ <sup>ns</sup> | ۱/۱۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۵ <sup>ns</sup> | ۰/۵۳ <sup>ns</sup> |
| اثر مغناتیس × گیاه‌پالایی (BC)          | ۲  | ۰/۰۷ <sup>ns</sup> | ۰/۴۸ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۱ <sup>ns</sup> | ۱/۷۲ <sup>ns</sup> |
| اثر کیفیت × مغناتیس × گیاه‌پالایی (ABC) | ۲  | ۰/۱۶ <sup>ns</sup> | ۰/۳۳ <sup>ns</sup>  | ۰/۱۱ <sup>ns</sup> | ۰/۶۵ <sup>ns</sup> |
| خطا فرعی                                | ۲۴ | ۰/۵۶               | ۰/۶۴                | ۰/۳۴               | ۱/۴۱               |
| خطا کل تصحیح شده                        | ۳۵ | ۱۶/۵۱              | ۲۰/۹۶               | ۱۱/۹۸              | ۵۴/۵۵              |

\*\* معنی‌داری در سطح ۱ درصد \* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ns غیرمعنی‌دار.

در این خصوص نتایج این تحقیق با نتایج (Zanhenneh et al., 2012) همخوانی داشت. ایشان با هدف

نتایج اعمال اصلاح آب در پساب در زمان ماند متفاوت، اختلاف معنی‌داری در بی‌کربنات نشان نداد (جدول ۱۱).

روزه، در موارد متعدد تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد بدون گیاه‌پالایی نداشته است. استفاده از زمان ماند بیشتر از آن با وجود آنکه محتمل است به نتایج بهتری بیانجامد، مشکلات عدیده‌ای در زمینه تأمین حجم مخزن ذخیره پساب و مساحت استخر یا تالاب مدنظر برای گیاه‌پالایی را به‌دنبال خواهد داشت؛ به شکلی که مدیریت هزینه و برنامه‌ریزی گیاه‌پالایی را با مشکل مواجه خواهد کرد و احتمالاً از نظر کاربردی با استقبال مواجه نخواهد شد.

### سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و در قالب طرح تحقیقاتی انجام شده است که بدین‌وسیله از ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

### منابع

1. Abdollahpour Z. 2017. Investigating and comparing the effect of magnetized and non-magnetized water types (ordinary water, salt water, and wastewater) on the quantity and quality of effluent and the performance of rapeseed. Master's thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan. (In Persian).
2. Abedi M. and Najafi. P. 2001. Use of purified wastewater in agriculture. Publications of Iran's National Irrigation and Drainage Committee, Tehran, 248 p. (In Persian).
3. Alizadeh A. 2001. Drought and the need to increase water productivity. Scientific quarterly journal of extension, drought and agricultural drought). (In Persian).
4. Amiri S. Karimi N. Farmanifard M. and Lari Yazdi H. 2013. evaluation of the ability of spring grass to purify wastewater with different qualities in laboratory conditions, the first bioremediation conference on biology. Tehran.
5. Azadi A. & Savalanpour Ardabili H. 2017. Water crisis management (comparative study). Tehran, Iran: Islamic Council Research Center. <https://sid.ir/paper/791337/fa>
6. Bura R. B. R. Sheikh R. Cort R. Cooper and Rire D. 1987. Reclaimed water for irrigation of vegetables eaten raw. 1987. Calif. Agric. 41(7-8):4-7
7. Castro Palacio J. C. Morejon L. P. Velazquez Abud L. and Govea A. P. 2007.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از آب مغناطیسی بر میزان آبشویی خاک شور با بافت لوم سیلتی، در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تیمار مغناطیسی (شاهد و اعمال میدان مغناطیسی ۶۵۰۰ و ۸۰۰۰ گوس) و ۳ تکرار مجموعاً در ۹ ستون انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که میزان آبشویی سدیم، پتاسیم، کلسیم و سولفات در تیمارهای مغناطیسی به‌طور معنی‌داری در سطح ۵ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین کاربرد تیمارهای مغناطیسی مختلف اثر معنی‌داری بر آبشویی منیزیم و بی‌کربنات نداشت و میزان آبشویی کلسیم به‌طور معنی‌داری در تیمارهای مغناطیسی کمتر از تیمار شاهد بود.

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر ساده تیمارهای گیاه‌پالایی بر بی‌کربنات بعد از زمان ماند ۳ روز

| نوع پارامتر   | سطح فاکتور            | مقایسه میانگین    |
|---------------|-----------------------|-------------------|
| گیاه‌پالایی C | نی (C1)               | ۲/۳ <sup>a</sup>  |
|               | بامبو (C2)            | ۱/۵ <sup>b</sup>  |
|               | بدون گیاه‌پالایی (C3) | ۰/۹۶ <sup>b</sup> |

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روش گیاه‌پالایی با نی و بامبو به‌طور کلی به‌جز موارد معدود، تأثیر رضایت‌بخشی بر کاهش عناصر اصلی گرفتگی قطره‌چکان‌ها اعم از سختی، کلسیم، کربنات و بی‌کربنات نداشته است. این نتایج در زمان‌های ماند کوتاه قطعی و در زمان‌های ماند طولانی‌تر تا حدی قابل‌قبول بوده است. همچنین نتایج اصلاح آب‌ها با عمل مغناطیس‌کردن نیز نتوانسته است اثر رضایت‌بخش ویژه‌ای بر کاهش عناصر مشکل‌زا ایجاد کند. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل آن است که شدت میدان مغناطیسی به‌کار رفته در این تحقیق (در حدود ۱ تسلا)، تأثیری در اصلاح فیزیکی آب و پساب نداشته است. با بررسی مقادیر پارامترهای مورد نظر در این پژوهش، مشخص شد که استفاده از نی حتی می‌تواند باعث افزایش عناصر گرفتگی قطره‌چکان‌ها نیز شود؛ بنابراین در صورتی که برای حذف عناصر دیگر غیر از عناصر آزمایش‌شده در این تحقیق، لازم باشد برای تصفیه تکمیلی پساب‌های تصفیه‌خانه فاضلاب از گیاه‌پالایی استفاده شود، بهتر است از گیاه نی در این زمینه استفاده نشود. استفاده از گونه بامبو در زمان ماند دست‌کم ۱۰

17. Kadlec R.H. and Wallace S. 2008. Treatment wetlands. CRC press; Jul 22. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
18. Kamri A. and Farshadfar M. 2012. New plant treatment technology to create a sustainable environment. Biosecurity Scientific Quarterly, 5(2): 107-121.
19. Khoramiyan M. and Paknejad A. R. 2014. Recognition the causes of emitter clogging and troubleshooting strategies in the drip irrigation system. Technical Journal. Jahad Agricultural Organization of Khuzestan. (In Persian).
20. Khoshravesh M. and Kiani A. R. 2015. The Effect of Magnetized Saline Water on Infiltration and Electrical Conductivity in Different Soil Textures. Iranian journal of Irrigation and Drainage, 9(4):646-654
21. Leather Wood W. R. 2005. Influence of salt stress on germination, root elongation and carbohydrate content of five salt tolerant and sensitive taxa. MSc. Thesis, Department of Horticultural Science, North Carolina State University. Microbiology and Biotechnology, 13: 689-692. <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/1912>
22. Liu H. and Huang G. 2009. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. Agricultural Water Management, 96(5): 745-756. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.014>
23. Mohammadian M. Fatahi R. and Nouri Imamzadei M. R. 2016. Studying the effect of magnetized saline water on yield and yield components of green pepper plant. Irrigation Science and Engineering Journal, 39(1): 121-130. (In Persian).
24. Mohammadmirzaee M. Zakerinia M. and Farasati F. 2021. The effects of phytoremediation of treated urban wastewater on the discharge of surface and subsurface drippers (Case study: Gorgan wastewater treatment plant in northern Iran). Cleaner Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100210>.
25. Najafpour A. A. Qasimzadeh F. Tayban S. M. Yousefzadeh H. and Noddoost F. 2009. Investigating the efficiency of blue lentil plant in the amount of nitrate absorption from the water environment in laboratory conditions. The 12th National Environmental Health Conference of Iran. Shahid Beheshti University of Medical Sciences. Aban. (In Persian)
26. Parvin N. and Kazemi A. 2005. Bioactivity Improvement in Activated Stimulation of pinus tropicalis M. seeds by magnetically treated water. International Agrophysics, 21: 173-177.
8. Chen J. Shafi M. Li S. Wang Y. Wu J. and Ye Z. 2015. Copper induced oxidative stresses, antioxidant responses and phytoremediation potential of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). Scientific reports. Sep 4; 5: 13554. <https://doi.org/10.1038/srep13554>
9. Chibowski E. Szczes A. and Holysz L. 2005. Influence of Sodium Dodecyl Sulfate and Static Magnetic Field on the Properties of Freshly Precipitated Calcium Carbonate. ACS public, 21: 8114-8122. DOI: 10.1021/la050575f
10. Fallahi F. Ayiti B. and Ganji H. 2012. Nitrate removal by plant treatment process. Journal of Water and Wastewater, 23(1): 57-61 (In Persian).
11. Feigin A. Ravina I. and Shalhevet J. 1991. Irrigation with treated sewage effluent: management for environment protection. Springer-Verlag pub. Berlin
12. Ghaderi A. A. 2004. Investigating the role of plants in the natural purification of urban polluted water; Purification of polluted urban water in Tehran with artificial reeds. Geography and Development, 2 (series 3), 107-120. <https://sid.ir/paper/77429/fa>
13. Gholami M. Shakeri A. Raghimi M. Masoodi Nejad M. Aghagoli H. Mehrjoo A. Kaboli A. Eslami A. and Radmehr M. 2014 research on non-conventional water and its conversion using new technologies to quality water for drinking and so on from an environmental point of view, applied research project of the regional water organization of Golestan province. (In Persian)
14. Grewal H. S. and Maheshwari B. L. 2011. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and Chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. Bioelectromagnetics, 32: 58-65. DOI: 10.1002/bem.20615
15. Hasanpour Estahbanati A. 2019. Irrigation Water Quality and Soil Salinity. Agricultural and Natural Resources Engineering Organization of Iran, 1: 1-23. (In Persian).
16. Herzog R. E. Qihong S. Patil T. J. N. and Katz J. L. 1989. Magnetic water treatment: The effect of iron on calcium carbonate nucleation and growth. Longmuir, 5: 861-867. [https://aquavital.at/wp-content/uploads/2023/07/Magnetic\\_water\\_treatment\\_the\\_effect\\_of\\_i.pdf](https://aquavital.at/wp-content/uploads/2023/07/Magnetic_water_treatment_the_effect_of_i.pdf)

- Sludge Treatment of Petroleum Refinery Wastewater. *Journal of water and waste water*, 15(2): 23-28.
27. Teixeira da Silva J. A. and Dobranszki J. 2016. Magnetic fields: how is Plant growth and development impacted? *Protoplasma*, 253: 231-248. DOI: 10.1007/s00709-015-0820-7
28. Valdez-Aguilar L. A. and Reed D. W. 2007. Response of selected greenhouse ornamental plants to alkalinity in irrigation water. *Journal of plant nutrition*, 30(3): 441-452.
29. Zanganeh Yousafabadi A. Behzad M. and Borumandnesb S. 2012. The effect of using magnetic water on the leaching rate of cations and anions in saline soil in laboratory conditions. *Water and soil (agricultural sciences and industries) magazine*, 26(3): 680-689. (in Persian)