

## "مقاله پژوهشی"

## کارایی گیاه بولاغ اوتی (*Nasturtium aquaticum*) در پالایش زیستی مواد مغذی پساب پرورش ماهی قزل آلائی رنگین کمان

مهرداد جلیل<sup>۱</sup>، مهرداد فتح الهی<sup>۱\*</sup>، رسول زمانی احمد محمودی<sup>۱</sup>

۱- گروه شیلات و محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۳

### چکیده

برای بررسی روند تصفیه زیستی پساب پرورش ماهی قزل آلائی رنگین کمان، از یک حوضچه تالابی استفاده شد. بعد از خارج سازی گیاهان غیر از گونه هدف و پوشش کامل از گیاه بولاغ اوتی (*Nasturtium aquaticum*) شش ایستگاه انتخاب شدند، که شامل: چشمه تامین آب، خروجی پرورش ماهی، نقطه ابتدای حوضچه تالابی و سه نقطه متوالی به عنوان نقاط سنجش بودند. سپس داده های به- دست آمده با هم مقایسه و روند صعودی و نزولی تغییرات آنها بررسی شدند. میانگین تاثیرات کاهشی حوضچه پالایش گیاهی برای همه پارامترهای گفته شده به صورت درصد با ایستگاه های مربوط در این تحقیق ارزیابی شد. از میان پارامترها، اکسیژن محلول نوسانات و تاثیرگذاری بیشتر بر روند زیستی پالایش پساب داشته است و سایر پارامترها در همه ایستگاه ها یکنواخت یا اختلاف کمی داشتند. نترات سنجش شده پساب در ایستگاه های بعد از خروجی کاهش زیادی نداشته است، که علت این روند بالا بودن نسبی ازت در چشمه و نیز عدم جذب نترات توسط گیاه بود. اثر پالایشی گیاهان حوضچه بر نیتريت تحت تاثیر غلظت اکسیژن محیط (ثبت شده در ایستگاه ها) قرار داشت. آمونیاك تحت تاثیر گیاه پالایی در ایستگاه ها نسبت به غلظت آن در خروجی کاهش یافت. دلیل بیشترین کارایی حوضچه پالایش در کاهش آمونیاك می تواند قدرت جذب آمونیاك نسبت به سایر مواد مغذی توسط گونه بولاغ اوتی باشد.

**کلمات کلیدی:** بولاغ اوتی، تصفیه زیستی، پساب پرورش ماهی

## مقدمه

آمونیاک و فسفات از مهم ترین پارامترهای پرورش آلوده کننده در صنعت پرورش آبزیان پرورشی است که از راه متابولیسم و نیز تجزیه مواد آلی مانند غذاهای خورده نشده و نیز مدفوع از استخرها خارج می شود (خوش نواز و همکاران ۱۳۹۴؛ پورعلی فشتمی و همکاران ۱۳۹۶؛ عرب مارکده و همکاران ۱۳۹۴؛ Chang et al., 2009; Goudreau et al., 1993). مطالعات نشان داده است مقادیر کم نیتروژن (mg/lit) و فسفات (۰/۴ mg/lit) در آب های آرام باعث رشد سریع انواع جلبک ها و سپس کاهش غلظت اکسیژن محلول و نفوذ نور به زیر آب شده که نابودی ماهی ها و میکروارگانیسم ها در شرایط غیرهوازی می گردد. همه این فرآیندها سبب پدیده غنی شدن آب ها می شود. علاوه بر بروز مشکلات ناشی از این پدیده برای محیط زیست، بهای خالص سازی این آب ها نیز امری هزینه بر و نامطلوب است (Camargo and Alonso, 2006) در سال های اخیر روش های تصفیه طبیعی مناسب و کم هزینه مثل گیاه پالایی مورد توجه دستداران محیط زیست است که طی آن، آلودگی ها از طریق تجزیه مستقیم، پالایش غیرمستقیم با حمایت جمعیت های میکروبی و جذب از خاک یا آب و تغلیظ در ناحیه ریشه یا بافت گیاه تصفیه می شوند (Mc Hazrat et al., 2003; Cutcheon and Schnoor, 2003; Nakase et al., 2019).

ایجاد یک محیط لازم مانند بسترهای لازم و نیز درجه حرارت و نور برای فعالیت ارگانیسم های مصرف کننده مواد مغذی آلوده کننده آب و محلول مانند بنیان های ازت و فسفات، با چالش های بسیاری روبرو است. برای سیستم های غیرماکروفتی ارائه یک

جایگاه نشستن باکتریایی برای نیتریفای کردن باکتری ها ضروری است، درحالی که در سیستم های ماکروفتی با گستردن برگ های خود در همه بدنه آبی هم می توانند به کاهش کلسیم و سلیس و سایر مواد محلول نیز پردازند (Nakase et al., 2019). محیط آبی باعث برخی از تغییرات در این گیاهان مصرف کننده آمونیاک و فسفات شده است. این گیاهان دارای کوتیکول نازک هستند، چون نیازی به محافظت از آب داخل خود ندارند و روزنه های برگ باز زیادی دارند. در حقیقت ساقه های سخت و سلول های گارد در برگ های شناور شده پهن وجود ندارد. ریشه های کوچک آب را مستقیم از برگ ها وارد گیاه کرده و تنفس از آب ها و گرفتن گازهای محلول را انجام می دهند. با انتقال این گیاهان به داخل آب، کلنی آن ها در عرض چند ماه به آدپتاسیون لازم می رسد و کارکرد بیولوژیک آن ها شروع می شود. پروژه تصفیه پساب توسط گیاهان آبرزی غوطه ور یا Emergent Hydrophyte Treatment System با هدف حذف فسفات ها و نترات ها از آب در اروپا نیز اجرا شد. در نتایج این کار علاوه بر راندمان و کارایی سیستم، نوع گیاه کاشت شده با توجه به منطقه، طراحی هندسی و ابعاد ضروری آن، آبیاری و نوع آن، نوع بستر و طراحی آن، جنبه های کار از جمله افزایش گیاهان مهاجم و گونه های مهاجم و احتمال شیوع بیماری ها. مورد نظر بود که توسط اعضای محقق این پروژه از انجمن بین المللی محققان آلودگی آب ها و کنترل آن (International Association on Water Pollution Research and Control یا IAWPC) انجام شد (Brix and Schierup, 1998). در مطالعه کنونی با الهام از مدیریت کرانه ها (management of riparian zone) با به کارگیری یک

گیاه بومی به نام بولاغ اوتی یا نام محلی بکلو با کاربرد خوراکی سعی شد تا معضل رواناب‌های پساب پرورش ماهی‌ها برای کاهش فسفات و نیترات محلول واردشونده به رودخانه‌ها بررسی شود. نقش اصلی گیاه در این سیستم تأمین اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم‌های هتروتروف در ناحیه ریشه، جذب مواد مغذی، افزایش و تثبیت هدایت هیدرولیکی بستر برای حذف مواد مغذی آلوده کننده آب است (Vymazal, 2010). این گیاه اختصاصاً در کنار جویبارها، چشمه‌ها، نواحی مردابی و در مجاورت آب‌های زلال جاری می‌روید و به علف چشمه معروف است و پراکندگی آن در همه نواحی مشابه تا ارتفاعات ۲۰۰۰ متری یافت می‌شود. طول ساقه آن به تناسب شرایط محیط در جریان‌های آب کم عمق، کوتاه ولی در جریان‌های آب نسبتاً عمیق که از ۲ متر هم تجاوز می‌کند. موطن اصلی آن در اروپای مرکزی و غربی بوده، اما امروزه در تمامی دنیا گسترده شده است. علف چشمه به طور خودرو در اغلب جریان‌های آب مناطق مختلف در ایران در همه منطق سرد و کوهستانی می‌روید.

## مواد و روش‌ها

### انتخاب ایستگاههای نمونه برداری

تحقیق در واحد پرورش ماهی سرپوشیده شرکت خاویارگستر واقع در شهرستان فارسان چهار محال و بختیاری با منبع تامین آب ورودی یک چشمه با مجوز برداشت سی لیتر آب در ثانیه برای تولید بچه ماهی انجام شد. در کانال مجاور با عرض حدود ۲ متر و بیست سانتی متر با دیواره و کف بستر کاملاً گلی، با قابلیت رویش گیاهان آبزی (لاگون دست ساخت) در

ابتدای آزمایش، سایر گیاهان بجز گونه بولاغ اوتی به صورت هرس دستی از کف رفع شد تا گیاه در حوضچه پالایش غالب گردد (در خرداد ماه). ایستگاه ۱، در محل ورودی چشمه، ایستگاه ۲، در محل خروجی پرورش ماهی، ایستگاه ۳ در ابتدای حوضچه پالایش و ایستگاههای ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۵ متر، ۱۰ متر و ۲۰ متری از ابتدای حوضچه انتخاب شدند تا با سنجش میزان نوترینتها تاثیر حوضچه گیاهی بر کاهش آنها معلوم شود. برای سنجش مواد مغذی سه دوره با فواصل تقریباً ۱۵ روز در نظر گرفته شد. اولین نمونه برداری در دهه آخر تیر ماه انجام شد و سپس ۱۵ روز بعد سنجش بعدی و نمونه برداری آخر از ایستگاههای ۶ گانه نیز سه روز بعد از نمونه برداری سری دوم صورت پذیرفت. از نمونه‌های نیترات، نیتريت، ازت آمونیاکی و فسفات ۵ تکرار و برای مصرف کنندگان زیستی و شیمیایی اکسیژن یعنی  $BOD_5$  و COD سه تکرار در آزمایشگاه سنجش شد. برای سنجش هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، دما و پی اچ سه تکرار در محل (*in situ*) ثبت شد. برای سنجش، بیشتر به درصد کاهش میزان مواد سنجش شده به عنوان کارایی تصفیه حوضچه پالایش مورد نظر در این تحقیق توجه شد که با ضریب آن یعنی رابطه:

مقدار مواد محلول در خروجی / اختلاف مقدار مواد محلول در خروجی و ایستگاه \* ۱۰۰ = کارایی تصفیه %

برای هر پارامتر به صورت درصد معلوم شد. از ایستگاههای نمونه برداری، به منظور اندازه گیری  $BOD_5$ ، COD، TAN (نیتروژن آمونیاکی)، نیترات ( $NO_3$ )، نیتريت ( $NO_2$ ) و ارتوفسفات، نمونه آب برداشت و در شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل و با دستگاه

اسپکتروفتومتر HACH مدل ۳۹۰۰ و معرف‌های ساخته شده مطابق با روش‌های Standard method سنجش با استفاده از روش رنگ‌سنجی صورت گرفت. برای سنجش BOD از دستگاه BODTrak II™ HACH مدل DOC53/80363/022 استفاده شده است.

## نتایج

در طول دوره آزمایش میانگین دمای ایستگاه‌ها متوسط کم‌ترین دمای اندازه‌گیری شده در هر سه دوره مربوط به ایستگاه ۱ و بعد از آن ایستگاه ۳ بوده و بالاترین متوسط دما در ایستگاه ۲ و ۶ ثبت شد. درج و ثبت دما برای ثبت دامنه دمایی در مدت آزمایش در حوضچه پالایش آزمایشی اهمیت دارد. دامنه تغییرات سنجش شده ۱۳/۹ تا ۱۵/۳ سانتی گراد که به نظر می‌رسد دمای بالا و مورد انتظاری برای حوضچه در منطقه در فصل تابستان و رویش گیاهان نباشد. به‌طور کلی روند افزایشی را از ایستگاه چشمه به انتها نشان داد و برای سه دوره سنجش این تغییرات (دامنه تغییرات) در دوره اول تا سوم به اندازه ۱/۷، ۱/۲، ۲/۳ سانتی گراد بوده است. pH محیط نیز نقش مهمی در تعیین غلظت گونه‌های آنیون موجود در محلول دارد. دامنه متوسط تغییرات pH در سه دوره سنجش به ترتیب ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۵ و تنش زیادی از این حیث متوجه ایستگاه‌ها نبوده است. بیش‌ترین نوسانات pH در خروجی مزرعه در دوره دوم سنجش بین ایستگاه چشمه و خروجی مشاهده می‌شود.

در سنجش اکسیژن در ایستگاه‌ها، افزایش اکسیژن محلول (ساعت بین ۷ تا ۸ صبح) از مقدار ۶/۳ میلی گرم در لیتر بالاتر نبود ولی میزان کمینه ۲/۲۷ میلی گرم در لیتر نیز در ایستگاه‌ها به ثبت رسید که کم‌ترین آن در هر سه بار نمونه‌برداری در ایستگاه ۶ اتفاق افتاده است. این کمبود اکسیژن که حدود ۴۰ درصد اشباع است، به دلیل مصرف شیمیایی یا زیستی اکسیژن در این ایستگاه است. به‌طور کلی ایستگاه شش کم‌ترین اکسیژن را در میان ایستگاه‌ها داشته است. کاهش اکسیژن در حوضچه در میزان پارامترهای وابسته به اکسیداسیون و احیا تاثیر خواهد داشت.

## نتایج سنجش پارامترهای شیمیایی در محل نمونه برداری

در جدول ۱ نتایج میانگین پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده در محل آورده شده است. جدول ۲ نیز بیان‌کننده مقدار کمینه و بیشینه مقادیر سنجش شده در ایستگاه‌ها در همه سنجش‌هاست. این مقادیر شرایط زیست گیاه و نیز محدودیتهای ایستگاه را به خصوص در وضعیت اکسیژن محلول نشان می‌دهد.

### سنجش پارامترهای شیمیایی مرتبط زیستی

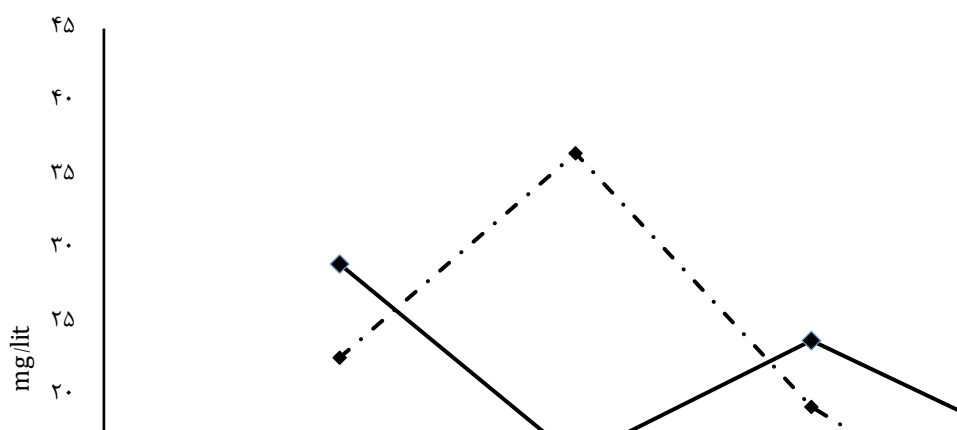
اندازه‌گیری سنجه آب ایستگاه برای مصرف بیولوژیک اکسیژن BOD<sub>5</sub> نشان داد که به‌طور کلی میزان مصرف در ایستگاه آخر یعنی دورترین منطقه از خروجی توسط روندهای بیولوژیک فزونی می‌یابد.

جدول ۱: نتایج سنجش پارامترهای شیمیایی در محل نمونه برداری

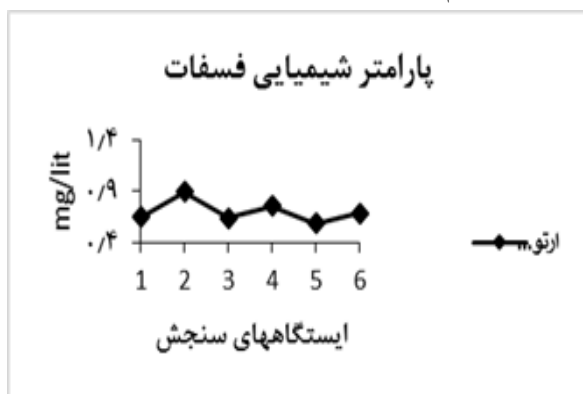
| ایستگاه | DO (ppm)   | pH         | EC ( $\mu\text{sim/cm}$ ) | t°C         |
|---------|------------|------------|---------------------------|-------------|
| یک      | ۴/۵ ± ۰/۵۱ | ۷/۷ ± ۰/۰۵ | ۶۴۸/۳ ± ۷/۱               | ۱۳/۸ ± ۰/۵۰ |
| دو      | ۵/۷ ± ۰/۴۹ | ۸/۰ ± ۰/۲۱ | ۶۵۹/۱ ± ۲۲/۴              | ۱۴/۹ ± ۰/۵۰ |
| سه      | ۵/۲ ± ۰/۶۸ | ۷/۸ ± ۰/۰۶ | ۶۵۷/۳ ± ۲۲/۵              | ۱۴/۷ ± ۰/۴۷ |
| چهار    | ۵/۳ ± ۰/۶۷ | ۷/۹ ± ۰/۱۳ | ۶۴۲/۲ ± ۱۳/۱              | ۱۴/۶ ± ۰/۴۶ |
| پنج     | ۴/۸ ± ۱/۲۴ | ۷/۹ ± ۰/۰۴ | ۶۶۱/۷ ± ۲۴/۸              | ۱۴/۹ ± ۰/۵۲ |
| شش      | ۳/۶ ± ۱/۱۸ | ۷/۸ ± ۰/۰۹ | ۶۵۸/۸ ± ۸/۸               | ۱۵/۳ ± ۰/۶۹ |
| متوسط   | ۴/۹ ± ۰/۷۳ | ۷/۹ ± ۰/۱۱ | ۶۵۴/۶ ± ۷/۶               | ۱۴/۷ ± ۰/۴۸ |
| بیشینه  | ۵/۷        | ۸/۰        | ۶۶۱/۷                     | ۱۵/۳        |
| کمینه   | ۳/۶        | ۷/۷        | ۶۴۲/۲                     | ۱۳/۸        |

جدول ۲: کمینه و بیشینه هر ایستگاه در کل سنجش های ایستگاهها

| ایستگاه | DO  |     | pH  |     | EC    |       | t°C  |      |
|---------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|------|------|
|         | min | max | min | max | min   | max   | min  | max  |
| یک      | ۴/۴ | ۵/۲ | ۷/۷ | ۷/۹ | ۶۲۰/۰ | ۶۵۷/۰ | ۱۴/۱ | ۱۴/۵ |
| دو      | ۳/۴ | ۶/۳ | ۷/۷ | ۸/۴ | ۶۲۷/۰ | ۶۸۸/۰ | ۱۴/۳ | ۱۵/۶ |
| سه      | ۲/۳ | ۶/۰ | ۷/۶ | ۸/۱ | ۶۳۴/۰ | ۶۸۹/۰ | ۱۴/۲ | ۱۵/۴ |
| چهار    | ۲/۳ | ۵/۹ | ۷/۶ | ۸/۲ | ۶۵۰/۰ | ۶۵۶/۰ | ۱۴/۶ | ۱۵/۳ |
| پنج     | ۴/۱ | ۵/۹ | ۷/۶ | ۸/۴ | ۶۴۰/۳ | ۶۸۳/۰ | ۱۳/۵ | ۱۵/۷ |
| شش      | ۳/۴ | ۴/۹ | ۷/۸ | ۸/۲ | ۶۲۷/۷ | ۶۷۱/۰ | ۱۴/۲ | ۱۵/۹ |

COD و BOD<sub>5</sub>شکل ۱: میانگین سنجش شده اکسیژن مصرف زیستی BOD<sub>5</sub> و شیمیایی COD در حوضچه پالایش.\*مقدار BOD<sub>5</sub> در ۱۰ ضرب شده است تا در ایستگاهها تغییرات آن با جلوه بهتری نشان داده شود.

تأثیر واحد پرورش ماهی بر آن نسبت به آب چشمه (ایستگاه دوم) قابل مشاهده است. در طول دوره آزمایش، بیشترین مقدار فسفات در ایستگاه خروجی مزرعه پرورش ماهی (ایستگاه ۲) با میانگین معادل ۰/۸۹ میلی گرم بر لیتر و کمترین مقدار در ایستگاه ۵ معادل ۰/۵۹ میلی گرم بر لیتر بوده است.



شکل ۲: میانگین سنجش شده ارتوفسفات در حوضچه پالایش. در پارامترهای نیتروژن، شامل TAN، نیتريت و نیترات مطابق با شکل ۳ کاهش میزان این مواد در حوضچه قابل مشاهده است. برای میزان TAN اندازه‌گیری شده نتایج نشان داد که آب خروجی کارگاه میزان بالایی از آمونیاک را نسبت به چشمه وارد حوضچه پالایش می‌کند، ولی در امتداد ایستگاه‌ها این مقدار روندی کاملاً کاهشی دارد. میانگین مقدار TAN اندازه‌گیری شده در مرحله اول از ۳/۹۷ میلی گرم در لیتر در مرحله اول به ۰/۸۷ میلی گرم در لیتر در ایستگاه ۴ رسید. این مقدار در مراحل دوم و سوم در ایستگاه ۴ تقریباً ثابت باقی مانده و نوسانات آن در ایستگاه‌های بعد از خروجی پرورش ماهی پایین بوده است. نوسانات و تغییرات در شکل مربوطه قابل مشاهده است (شکل ۳). میزان نهایی مقدار نیتريت توسط حوضچه به کاهش تقریباً ثابتی در ایستگاه انتهایی می‌رسد. میانگین مقادیر نیتريت اندازه‌گیری شده نیز تا مرحله سوم کاهش قابل

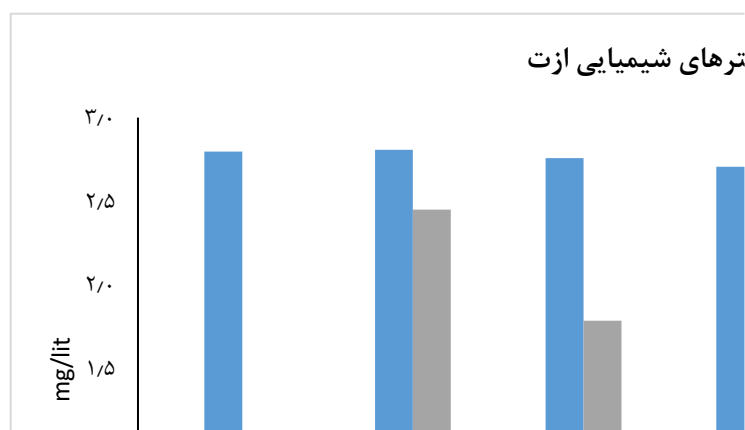
مقادیر BOD<sub>5</sub> در ایستگاه دوم یعنی خروجی از کارگاه در هر سه دوره نمونه‌برداری نسبت به چشمه بیش‌تر شده ولی در ادامه با نوسانات زیادی روبرو می‌شود. مصرف زیستی اکسیژن در انتهای حوضچه پالایش یعنی در انتهای حوضچه پوشیده با گیاه هدف، دچار افزایش شده است. در دوره‌های سنجش شده دامنه میزان مصرف زیستی اکسیژن از ۰/۸ تا ۴/۵ میلی گرم در لیتر در نمونه‌ها تغییر نمود. اختلاف میان ایستگاه‌ها در دامنه ۲/۵، ۳/۵ و ۲/۸ میلی گرم در لیتر به ترتیب در سه دوره سنجش بوده است. مقادیر نشان می‌دهد نقش عوامل زیستی در از بین بردن اکسیژن در ایستگاه اخراج بقیه ایستگاه‌ها بیشتر است.

با توجه به مقادیر ثبت شده برای پارامتر COD به‌طور کلی این پارامتر در خروج از پرورش ماهی (ایستگاه ۲) دچار افزایش شده و سپس در طول مسیر روند نزولی را طی می‌کند (شکل ۱). دامنه تغییرات در مقدار مصرف شیمیایی اکسیژن در طول دوره سنجش از ۵/۲ تا ۳۷/۴ و در بین ایستگاه‌ها در سه دوره به ترتیب ۲۴/۱، ۲۵/۸، ۲۸/۵ میلی گرم در لیتر و از خروجی تا انتها کاهش یافته است. روند COD در ایستگاه‌های بعد از خروجی با کاهش قابل توجه همراه بوده به نحوی که در ایستگاه ۴ در مرحله سوم به کمترین مقدار معادل ۵/۲۵ میلی گرم در لیتر می‌رسد. در ایستگاه ۵ و ۶ نیز نسبت به ایستگاه ۴ افزایش اندکی قابل مشاهده است اما با این حال مقدار و روند آن ثباتی نسبی دارد.

### نتایج تغییرات مواد مغذی

روند تغییرات فسفات در ایستگاه‌های مختلف نوسان زیادی دارد و از روند کاهش مشخص پیروی نمی‌کند. ولی با رشد گیاه در حوضچه، کاهش فسفات بعد از

مشاهده ولی در ایستگاه انتهایی در همه موارد سنجش شده با افزایش همراه بوده است. با این وجود به نظر می‌رسد که استقرار گیاه توانسته باشد در تغییر این پارامتر مؤثر باشد.



شکل ۳: میانگین سنجش شده پارامترهای ازته (آمونیاک، نیتريت و نیترات) در حوضچه پالایش

### عملکرد کاهشی ایستگاهها نسبت به خروجی

در جدول‌های ارائه شده عملکرد هر ایستگاه نمونه‌برداری برای کاهش مواد دفعی آلوده‌کننده خروجی بجز برای فسفات که به طور کلی زیاد نبوده است، محاسبه شده است.

### فسفات

مقدار ارتوفسفات از ایستگاه سه به شش مقدار کاهشی غیر متوالی ولی متناوب را نشان می‌دهد. در بین کارایی ایستگاه‌ها نسبت به ایستگاه قبلی خود نوسان مقادیر به شکل مقادیر جدول ثبت شده است (جدول ۳)

میانگین‌های ثبت شده برای نیترات (شکل ۳)، روند کاهش ملایم در ایستگاه‌های بعد از خروجی پرورش ماهی را نشان می‌دهد. در مرحله آخر شیب کاهش و مقدار کاهش از ایستگاه ۵ به سمت ۶ قابل توجه است. در کل دوره مطالعه کم‌ترین میانگین نیترات مربوط به ایستگاه ۶ معادل ۲/۴۰ میلی‌گرم بر لیتر و بیش‌ترین میانگین مربوط به ایستگاه خروجی پرورش ماهی (ایستگاه ۲) معادل ۲/۸۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. نیترات آب ورودی و چشمه به طور طبیعی از مقدار بالایی برخوردار است.

جدول ۱: میانگین درصد کاهشی مقادیر ارتوفسفات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سه دور

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل % |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ۳       | ۲۸/۱                            | ۲۸/۱                                  |
| ۴       | ۲۱/۵                            | -۱۷/۷                                 |
| ۵       | ۴۰/۰                            | ۲۱/۸                                  |
| ۶       | ۳۵/۲                            | -۱۶/۱                                 |

—منفی بودن مقادیر به معنای افزایش مقدار پارامتر آلودگی ست ؛ ایستگاه دوم خروجی پرورش ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است ؛ درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته شده است.

## نیترات

به ایستگاه قبلی خود نوسان مقادیر به شکل مقادیر

جدول ثبت شده است (جدول ۴)

مقدار نیترات از ایستگاه سه به شش مقدار کاهشی

فزاینده را نشان می‌دهد. در بین کارایی ایستگاه‌ها نسبت

جدول ۲: متوسط درصد کاهشی مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سه دوره

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل % |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ۳       | ۳/۲                             | ۱/۷                                   |
| ۴       | ۵/۰                             | ۱/۹                                   |
| ۵       | ۱۲/۳                            | ۱/۶                                   |
| ۶       | ۱۴/۴                            | ۹/۷                                   |

ایستگاه دوم خروجی پرورش ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است؛ درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته شده است.

## نیتريت

بعضی ایستگاه‌ها دارد. این تغییرات نشان‌دهنده تاثیر

کامل شرایط اکسیژنی حوضچه (جدول ۱) بر تولید

نیتريت سمی از سایر متابولیت‌های نیتروژنی است.

در جدول ۵ نسبت کاهشی به درصد برای هر

ایستگاه نسبت به خروجی و نیز نسبت به ایستگاه پیشین

آورده شده است. نوسان نیتريت و نیز مقادیر منفی درج

شده در جدول که نشان از افزایش نسبت نیتريت در

جدول ۳: میانگین درصد کاهشی مقادیر نیتريت اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سه دوره

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل % |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ۳       | ۵/۰                             | ۵/۰                                   |
| ۴       | ۳۹/۴                            | ۲۶/۲                                  |
| ۵       | ۴۷/۹                            | ۱۱/۱۵                                 |
| ۶       | ۲۰/۰                            | ۵۳/۸ *                                |

منفی بودن مقادیر به معنای افزایش مقدار پارامتر آلودگی است؛ ایستگاه دوم خروجی پرورش ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است؛ درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته شده است.

## TAN یا ازت آمونیومی

تنها در ایستگاه آخر احتمالاً با تاثیر کمبود اکسیژن

کمی متوقف شده است (جدول ۶).

با توجه به نتایج جدول زیر به نظر می‌رسد بیش‌ترین

اثر گیاه پالایی در دامنه تغییرات آمونیومی روی داده

است. اثر کاملاً فزاینده جذب آمونیوم توسط گیاهان

جدول ۴: میانگین درصد کاهش مقادیر TAN اندازه گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سه دوره

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل % |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ۳       | ۲۳/۳                            | ۲۳/۳                                  |
| ۴       | ۵۷/۸                            | ۴۶/۵                                  |
| ۵       | ۶۴/۰                            | ۹/۶                                   |
| ۶       | ۴۹/۳                            | - ۴۰/۰                                |

منفی بودن مقادیر به معنای افزایش مقدار پارامتر آلودگی است؛ ایستگاه دوم خروجی پرورش ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است؛ درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته شده است.

### - مقادیر COD و BOD<sub>5</sub>

مقدار کاهش نسبت به ایستگاه ما قبل خود کاهش

نیست. در پارامتر BOD<sub>5</sub> تغییرات ایستگاه‌ها نسبت به هم و ایستگاه اولیه نظم و روند منظمی وجود ندارد و نتیجه کنش در برابر هم عوامل زیستی مصرف کننده اکسیژن با مواد آلی محلول موجود و نیز شرایط شیمیایی محیط روند تغییری را به وجود آورده است.

در دو جدول ۷ و ۸ تغییرات مصرف اکسیژن بیولوژیک و شیمیایی ایستگاه‌ها که بازگوکننده شرایط اکسیژنی و مواد آلی و شیمیایی اکسیژن‌خواه در حوضچه است مشاهده می‌شود. در مقدار پارامتر شیمیایی مصرف اکسیژن حوضچه پالایش روند کلی کاهش COD را نشان می‌دهد و در دو ایستگاه آخر

جدول ۷. میانگین درصد کاهش مقادیر COD اندازه گیری شده در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سه دوره

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل % |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
| ۳       | ۴۷/۳                            | ۴۷/۳                                  |
| ۴       | ۷۴/۰                            | ۵۲/۳                                  |
| ۵       | ۶۶/۷                            | - ۵۰/۶                                |
| ۶       | ۶۰/۳                            | - ۱۸/۹                                |

منفی بودن مقادیر به معنای افزایش مقدار پارامتر آلودگی است؛

ایستگاه دوم خروجی پرورش ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است؛

درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته شده است.

جدول ۸. میانگین درصد کاهشی مقادیر BOD5 اندازه گیری شده در ایستگاه های نمونه برداری در سه دوره

| ایستگاه | کاهش هر پارامتر<br>نسبت به خروجی % | کاهش در ایستگاه نسبت به<br>ایستگاه قبل % |
|---------|------------------------------------|------------------------------------------|
| ۳       | - ۷۰/۹                             | - ۷۰/۹                                   |
| ۴       | - ۱۴/۹                             | ۳۲/۲                                     |
| ۵       | ۱۱/۰                               | ۲۲/۸                                     |
| ۶       | - ۱۹۳/۵                            | - ۲۷۷/۳                                  |

منفی بودن مقادیر به معنای افزایش مقدار پارامتر آلودگی ست ؛ ایستگاه دوم خروجی پرورش

ماهی و ایستگاه اول چشمه تامین آب است ؛ درصد کاهش نسبت به ایستگاه دوم در نظر گرفته

شده است.

## بحث

مکانیزم های مؤثر در کاهش و تغییر و تحول فرم های مختلف نیتروژن در طول زمان در تالاب ها در گیاهانی که قادر به رشد در پساب هستند، شامل فرآیندهای آمونیفیکاسیون، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، از دست دادن یا گرفتن آب یا یون هیدروکسید آمونیاک و جذب گیاهی است (Kivaisi, Rajarajasri Pramail Davi and Gowri, 2001؛ Nakase *et al.*, 2019). گونه های گیاهی بسیار کمی به طور گسترده در وتلند های ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته اند (Vymazal, 2013a & b). در آزمایش انجام شده گیاه بولاج اوتی که در بسیاری از مناطق کوهستانی و چشمه ای چهارمحال و بختیاری با دمایی به نسبت کم آب می روید، به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده توانست فرم های مختلف آلوده کننده نیتروژنی را در روندی کاهشی کنترل نماید و با اندکی تغییر می توان کارایی واکنش های مطلوب را افزایش داد.

از میان پارامترهای شیمیایی سنجش شده و متابولیت های آلوده کننده آب خارج شده از پرورش ماهی آمونیاک، نیتريت و نیترات هدف تحقیق بوده و

پارامترهایی مانند دما، pH، هدایت الکتریکی کم و بیش ماهیتی مستقل داشته و فراهم کننده شرایط واکنش های شیمیایی مورد نظر برای این تحقیق هستند. دما در منطقه حوضچه آزمایش به عنوان اولین عامل تعیین کننده سرعت واکنش های شیمیایی و نیز بیوشیمیایی و نیز فتوسنتز مقداری بیش از حدود ۱۶ سانتی گراد در حوضچه ندارد و از سویی نمی تواند کنترل خاصی بر آن اعمال شود، ولی انتخاب یک گیاه بومی سازگار به دمای پایین می تواند کارایی تصفیه در دمای کم را بهتر نماید (عواطفی نژاد و اسراری ۱۳۹۵؛ صالح زاده و رضایی ۱۳۹۶). هر چند با توجه به مقادیر ثبت دما، تغییرات زیاد غلظت اکسیژن در آب نمی تواند ناشی از تغییرات دمای آب در ایستگاه های مختلف ارزیابی گردد و حاصل واکنش های شیمیایی و زیستی اکسیژن خواه خواهد بود. در تحقیق جاری بعد از استفاده از آب در پرورش ماهی مطمئناً اکسیژن محلول کاهش می یابد و اشباعیت و غلظت اکسیژن در حالیکه دمای آب منطقه بالا نیست از مقدار زیادی برخوردار نیست و شرایط برای اختلاط فیزیکی اکسیژن در آب نیز فراهم نیست.

تأثیر بی‌اکسیژنی بر روی برخی از بینان‌های شیمیایی در پرورش ماهی قبلا نشان داده شده است. جدا شدن فسفات‌ها از خاک در شرایط بی‌اکسیژنی باعث محلول ماندن این پارامترها در آب تالاب‌هاست. جذب فسفات در خاک در حضور نور رویش ماکروفیت‌ها را رقم می‌زند و از تولیدات بدنه آبی یعنی فیتوپلانکتون‌ها می‌کاهد. شرایط کاهش اکسیژنی بر این روند می‌افزاید (خوش نواز و همکاران ۱۳۹۴). علاوه بر شرایط بی‌اکسیژنی ناشی از ورودی اولیه اکسیژنی و عدم تلاطم آب مصرف اکسیژن توسط فرایندهای زیستی و شیمیایی یعنی  $BOD\%$  و  $COD$  نیز کاهش اکسیژن را به وجود می‌آورد (Lamchaturapater et al., 2007).

مصرف شیمیایی اکسیژن  $COD$  در ایستگاه‌های بعد از خروجی در ایستگاه‌های ۳ تا ۶ نشان می‌دهد که مقدار مصرف شیمیایی اکسیژن در آب رو به کاهش می‌گذارد. بعد از خروج آب از ایستگاه دوم به عنوان پساب، واکنش‌های شیمیایی تحت تأثیر اکسیژن و زمان و مواد مورد تجزیه روند خود را آغاز و تا انتهای حوضچه پالایش مواد دریافتی در پساب از نظر مقدار تجزیه شده و کاهش می‌یابند. این روند در ترند کاهشی میزان مصرف شیمیایی اکسیژن در نتایج به چشم می‌خورد.

در برخی از مطالعات تفاوت معنی‌داری در فسفر در بین تیمارهای گیاهی و بدون گیاه مشاهده نشده است و کاهش غلظت فسفر در تیمارهای بدون گیاه احتمالاً به خاطر جذب به‌وسیله جلبک‌ها و باکتری‌ها و رسوب‌گذاری شیمیایی فسفر با کلسیم، آهن و آلومینیوم در خاک می‌باشد (خوش نواز و همکاران ۱۳۹۴؛ Lamchaturapater et al., 2007). به‌نظر می‌رسد

کاهش نیافتن فسفات آب در حوضچه پالایش به دلیل امکان فراهم شدن شرایط حلالیت فسفات‌های غیر محلول بستر به آب رخ دهد. وجود پوشش کامل گیاهی از گیاه بولاغ اوتی در ایستگاه ۵ و ۶ شرایط بی‌اکسیژنی را ناشی از افزایش مواد آلی در زیر سطح آب فراهم می‌کند.

نیتروژن آمونیاکی مهم‌ترین شکل نیتروژن برای گیاهان است. در بسیاری از گونه‌ها رجحان یکی از دو شکل نیتروژن بر دیگری با سن، شرایط کشت و مخصوصاً pH محیط تغییر می‌کند. به‌طور کلی گیاهان جوان یون آمونیوم ( $NH_4^+$ ) را بر نیترات ( $NO_3^-$ ) ترجیح داده و آن را بهتر از نیترات جذب و بیش‌تر از آن مصرف می‌کنند. این حالت در گوجه فرنگی، ذرت، برنج و ... دیده می‌شود و نیشکر و پنبه از این قاعده مستثنی هستند. هم‌چنین pH محیط در جذب ترکیبات نیتروژنی نقش مؤثری دارد، به‌طوری که پایین آمدن pH باعث جذب و تحلیل نیترات‌ها می‌شود و در صورتی که بالا رفتن آن باعث جذب یون‌های آمونیوم می‌گردد. در پساب مزارع آبی‌پروری چون هر دو فرم ازت (آمونیاکی و نیتراتی) در محیط اب وجود دارد، لذا گیاه بسته به شرایط رشد و محیطی، توانایی جذب هر دو شکل را داشته و از تجمع آمونیاک جلوگیری می‌نماید (Nakase et al., 2019). ناپایداری مولکول نیتريت، سمی‌ترین ماده متابولیت برای ماهیان و تمایل شدید واکنش‌دهنده آن با اکسیژن و هموگلوبین باعث شده است تا توجه خاصی بر آن معطوف گردد. این خاصیت باعث شده است تا از در یک سیستم هوادهی ساده مشکل آن برطرف و تیمار نیتريت سمی در تصفیه‌کننده‌ها براحتی صورت پذیرد. در نتایج به دست آمده از ایستگاه‌ها تولید نیتريت بالا در خروجی تایید

می‌شود و سپس روند کاهش غلظت آن در نمودار مربوطه از ایستگاه دو به بعد نسبت به ایستگاه دو و کاهش نقطه به نقطه آن قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد در کاهش نیتريت مهم‌ترین عامل نه توده گیاهی جذب‌کننده نیتروژن که میزان اکسیژن محلول آب نقش عمده‌ای داشته باشد. روند کاهش نیتريت و شیب آن در ایستگاه ۵ به ۶ صعودی می‌گردد که می‌تواند بر اثر کاهش نسبی اکسیژن محلول باشد.

با توجه به میزان نیتريت چشمه (آب ورودی) در قبل از ورود به پرورش ماهی پتانسیل غلظت نیتريت قابل ملاحظه بوده و جذب گیاهان نتوانست روند کاهش نیتريت را در حوضچه پالایش رقم بزند. این فرایند می‌تواند علاوه بر نیترا ته بودن چشمه نشان‌دهنده عدم تمایل به جذب نیتريت توسط گونه غالب بولاغ اوتی باشد. ریشه‌های بولاغ اوتی که از ساقه‌های واجد برگ جدا هستند، تمایل و توانایی جذب آمونیاک را به جای نیتريت دارند. مقدار آمونیاک سنجش شده در ایستگاه دوم یعنی خروجی پرورش ماهی نشان می‌دهد که تاثیر پرورش ماهی بر میزان آمونیاک آب چشمه بالاست و در تمهیدات آزمایشی تصفیه، کاهش آمونیاک می‌توانست در دو صورت رقم بخورد: واکنش‌های شیمیایی مصرف‌کننده اکسیژن، و مصرف موجودات میکروارگانیسمی تولیدکننده نیتريت و گیاهان ماکروفیت. تبدیل و واکنش‌های میکروارگانیسمی برای تبدیل آمونیاک به مولکول‌های نیتريت نیاز به ماند بیشتر و هوادهی داشته ولی در صورت جذب آمونیاک برای فتوسنتز در ریشه گیاه کاهش بار آمونیاکی اتفاق خواهد افتاد. برآوردها از روند کاهشی میزان آمونیاک در همه ایستگاه‌های خروجی نسبت به میزان آن در خروجی داشته و ایستگاه‌های بجز ایستگاه آخر در مقابل ایستگاه

قبل از خود نیز کاهش آمونیاک را نشان داده‌اند. محتملا ایستگاه آخر به دلیل شرایط بی‌هوایی بیش‌تر و کاهش اکسیژن محلول در این کاهش سهم بیش‌تری را ایفا نموده است.

گیاهان آبرزی با انتشار اکسیژن به‌وسیله فرآیند فتوسنتز در محیط‌های آبی اکسیژن لازم برای اکسیداسیون آمونیوم به نیتريت را به‌وسیله باکتری فراهم می‌کنند از سوی دیگر فرآیند تنفس گیاهی می‌تواند سطح اکسیژن در تالاب‌ها را کاهش داده و فرآیند دنیتريفیکاسیون را فعال کند و نیتريت را به گاز نیتروژن تبدیل نماید و نیز از سرعت تمام واکنش‌های اکسیداسیون بکاهد (Chang et al., 2009؛ Nakase et al., 2019). در این پژوهش ایستگاه آخر که با پوشش و زمان ماند پساب بیشتر شرایط انبوه‌تر از رویش را دارد، در واکنش‌های کاملاً تاثیرگیرنده از اکسیژن مانند تغییرات نیتريت و یا آمونیاک به دلیل شرایط بی‌هوایی بیشتر، تالاب (میزان متوسط اکسیژن در ایستگاه‌ها) دچار عملکردی ضعیف‌تر می‌گردد. در اصول تصفیه نیاز به هوادهی از طریق دستگاه‌های دمنده هوا و دیفوزرها برای افزایش کارایی حوضچه کاملاً مشهود است و در صورت فراهم بودن این ابزار کارایی حوضچه پالایش افزایشی و مناسب خواهد بود. استفاده از دستگاه‌های اکسیژن و هوادهی باعث می‌شود تا در حوضچه آرامش یکنواختی اکسیژن از نظر اشباعیت فراهم و حوضچه تحت تاثیر شبانه‌روزی تولید و مصرف اکسیژن قرار نگیرد.

در نتایج کلی پژوهش، تأثیر تالابی نیمه طبیعی و دست‌ساز با یک گیاه سازگار بومی غالب در حذف مواد مغذی محسوس بوده است. این گیاه قابلیت افزایش گسترش در سطح را داشته و در صورت فراهم

سیدحسینی، م.ح.، ۱۳۹۶. مقایسه اقتصادی مزارع ساحلی پرورش ماهیان خاویاری. نشریه توسعه آبرزی پروری، ۱۱(۲)، ۳۷-۲۳.

۲ خوش نواز، ص.، برومندنسب، س.، معاضد، ه.، ناصری، ع.ع.، ایزدپناه، ز.، ۱۳۹۴. حذف فسفات فاضلاب کشاورزی شرکت کشت و صنعت کارون با استفاده از گیاه وتیور در تالاب مصنوعی جریان سطحی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶ (۳)، ۵۰۹-۵۱۸.

۳ صالح زاده، م.، رضایی، ح.، ۱۳۹۶. ارزیابی حذف نیترات و فسفات از فاضلاب شهری با استفاده از گیاهان آبرزی نی و لویی. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷(۳): ۶۷-۵۹.

۴ عرب مارکده، م.، شالوئی، ف.، فتح الهی، م.، پیرعلی، ا.، ۱۳۹۴. اثر آستاگزانتین بر شاخصهای رشد و رنگ پذیری الیه ماهی قزل آلائی رنگین-کمان (*Oncorhynchus mykiss*)، نشریه توسعه آبرزی پروری، ۱۳(۲)، ۹۶-۲۳.

۵ عوافی نژاد، گ.، اسراری، ا.، ۱۳۹۵. بررسی حذف نیترات از محیط آبی در فرایند گیاه پالایی توسط سنبل آبی (*Eichhornia crassipes*). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲(۲): ۱۵۱-۱۴۱.

6 Brix, H., 1987. Double benefites of macrophyte revival. 1987. Water quality international Journal, 2, 22-23.

7 Camargo, J., Alonso, A., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. Journal of Environ. International, 32, 831-849.

8 Chang, H., Yang, X., Fang, H., 2009. In situ nitrogen removal from the eutrophic water by microbial plant intergrated system. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 17, 521-531.

نبودن شرایط مثلاً نوری در بدنه آبی با تغییر نوع برگ‌ها از غوطه ور به سطح و بیرون آب گسترش خود را نشان می‌دهد. در ضمن با وجود سازگاری این گیاه به سرما، بسیاری از چشمه‌ها نیز محل رویش این گیاه در مناطق کوهستانی می‌باشد. در تالاب‌ها، ریشه‌های انبوه سبب افزایش جمعیت‌های میکروبی نسبت به تالاب‌های بدون گیاه می‌شوند و در حذف مواد مغذی فرآیندهای میکروبی نقش اصلی در تبدیل پساب ازته را که مانع جدی در پرورش ماهی و افزایش تراکم ماهی در استخرهاست، دارند (Zimmo et al., 2004).

با توجه به نتایج، این نتیجه کلی قابل تصور است که با توجه به قدرت پالایش گیاه بومی بولاغ اوتی یا بکلو، قدرت پالایش و حذف عناصر غذایی پساب پرورش ماهی را دارد و علاوه بر هزینه کم، فناوری ساده و مصرف انرژی پایین در اصلاح و بهبود پساب کارایی خوبی دارد. این گیاه با توجه به قدرت رویش در آب‌های سرد و نیز افزایش سطوح فتوسنتزی می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای حوضچه‌های پالایش باشد. گیاه با توجه به استحکام کم ساقه‌ها به راحتی از محیط خارج شده و یا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد و برای هرس مشکل زیادی را برای مدیریت رویشگاه ایجاد نمی‌کند.

## سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم از زحمات تمام کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند سپاسگزاری نمایم.

## منابع

۱ پورعلی فشتمی، ح.ر.، یزدانی ساداتی، م.ع.، عبدالملکی، ش.، محسنی، م.، پورغلام، م.،

pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilization ponds. *Journal Water Researches*, 3, 8913-92.

- 9 Goudreau S.E. Richard J. Sheehan N& R.J. 1993. Effects of wastewater treatment plant effluents on freshwater mollusks in the upper Clinch River, Virginia, USA. *Hydrobiologia*, 252, 211-230.
- 10 Hazrat, A., Ezzat, K., Muhammad Anwar, S., 2013. Phytoremediation of heavy metals, Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- 11 Kivaisi, A.K., 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Journal of Ecology Engineering*, 16, 545-560.
- 12 Lamchaturapatr, J., Won, Yi, S., Rhee, J.S., 2007. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland, *Journal of Ecology Engineering*, 29, 287-293.
- 13 McCutcheon, S.C., Schnoor, J.L., 2003. Phytoremediation transformation and control of contaminants. John Wiley and Sons, New York, 33-38.
- 14 Nakase, C., Zurita, F., Nani, G., Reyes, G., Fernández-Lambert, G., Cabrera-Hernández A., Sandoval, L., 2019. Nitrogen Removal from Domestic Wastewater and the Development of Tropical Ornamental Plants in Partially Saturated Mesocosm-Scale Constructed Wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 23,
- 15 Rajarajasri Pramail Davi, I., Gowri, V.S., 2007. Biological treatment of aquaculture waters by seaweeds. *Industrial Pollution Control*, 23(1), 135-140.
- 16 Vymazal, J., 2010. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Sciences Technology*, 45(1), 66-69.
- 17 Vymazal, J., 2013a. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development. *Water Researches*, 47, 4795-4811.
- 18 Vymazal, J., 2013b. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecology Enginiering*, 61, 582-592.
- 19 Zimmo, O.R., Van der Steen, N.P., Gijzen, H.J., 2004. Nitrogen mass balance across