

## حذف بُر آب آلوده توسط دو گیاه آبی (*Ruppia maritima* L. و *Zannichellia palustris* L.)

امیر پرنیان<sup>\*۱</sup>

[amir.parnian86@gmail.com](mailto:amir.parnian86@gmail.com)

مصطفی چرم<sup>۲</sup>

نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۰۷

### چکیده

**زمینه و هدف:** با افزایش جمعیت نیاز به منابع آب مناسب افزایش یافته است. گیاهان آبی بومی آب‌های ایران نقش به‌سزایی در خود پالایی منابع آب دارند. گیاه پالایی با گیاهان آبی روشی موثر و ارزان جهت افزایش کیفیت آب‌ها برای مصارف مختلف است. **روش بررسی:** در این پژوهش، طی ۱۲۰ ساعت کشت گلخانه‌ای دو گیاه آبی زانیشلیا و شورابی در آب آبیاری آلوده‌شده با ۴ سطح مختلف آلودگی بُر (۰، ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر)، گیاه پالایی محیط‌های آبی آلوده به بُر امکان‌سنجی شد. **نتیجه‌گیری:** نتایج حاصله نشان داد که این گیاهان بُر را به مقدار زیادی جذب زیستی کردند و کارایی حذف بُر در هر دو گیاه به بیش از ۷۰٪ رسید. شاخص جذب بُر در دو گیاه زانیشلیا و شورابی به ترتیب ۰/۵۱ تا ۸/۱۶ و ۰/۱۸ تا ۸/۱۴ میلی‌گرم در ظرف در بازه‌ی آلودگی مورد مطالعه به‌دست آمد. شاخص تولید زیست‌توده گیاهی گیاه زانیشلیا با افزایش آلودگی کاهش داشت اما این شاخص در بازه‌ی زمانی و غلظتی پژوهش تغییر معنی‌داری نداشت که نشان‌دهنده‌ی مقاومت بیشتر شورابی به آلودگی بُر است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش پالایش سبز بُر با این گیاهان از آب‌های آلوده پیشنهاد می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** بُر، آب آلوده به بُر، گیاهان آبی، گیاه پالایی.

\*۱- (مسوول مکاتبات): دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران.

## **Boron removal from contaminated water by two aquatic plants of *Zannichellia palustris* L. and *Ruppia maritima* L.**

**Amir Parnian** <sup>1\*</sup>

[amir.parnian86@gmail.com](mailto:amir.parnian86@gmail.com)

**Mostafa Chorom** <sup>2</sup>

**Nematolah Jaafarzadeh Haghghi Fard** <sup>3</sup>

### **Abstract**

**Background and Objective:** With the increase of population, the demand for proper water resources is increased. Native Iranian aquatic plants have a significant role in self-remediation of water resources. Phytoremediation by aquatic plants is a low cost and effective way to increase the quality of waters for different purposes.

**Method:** In this study, phytoremediation of boron-contaminated aquatic environments was examined by cultivating two aquatic plants of *Zannichellia palustris* L. and *Ruppia maritima* L. in the greenhouse over 120 h in boron-contaminated water with adding different concentrations (0, 1, 5 and 10 mg L<sup>-1</sup>).

**Conclusion:** The obtained results showed that these plants are able to uptake high amount of boron, and the boron removal efficiency in both plants observed to be more than 70%. Uptake indices in *Zannichellia palustris* L. and *Ruppia maritima* L. were calculated as 0.51 to 8.16 mg per pot and 0.18 to 8.14 mg per pot, respectively. Biomass production measurement index of *Zannichellia palustris* L. reduced with increase of boron contamination, while this index for *Ruppia maritima* L. had no significant change, indicating that *Ruppia maritima* L. has a higher resistance to boron contamination. According to the results, boron phytoremediation of contaminated waters by these plants is proposed.

**Keywords:** Boron, Boron-contaminated water, Aquatic plants, Phytoremediation.

---

1- PhD of Soil Science, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. \* (Corresponding Author)

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

3- Professor, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Science, Ahvaz, Iran.

## مقدمه

هر چند بُر از عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان است، اما به علت نزدیک بودن سطوح مسمومیت و کمبود آن در گیاهان مشکلات فراوانی را برای بسیاری از گیاهان ایجاد می‌کند. کمبود بر به صورت تأثیر بر رشد مریستم‌ها، کار معمول سلول و تأخیر واکنش‌های سلولی نمایان می‌شود. سمیت بُر به صورت زردی نوک برگ‌ها، لکه، فساد و ریزش میوه‌ها بارز می‌گردد (۱). هم چنین مقادیر بالای بر برای انسان مضر است و حد سمیت مقدار بُر در آب آشامیدنی برای انسان ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیان شده است (۲). بر در متابولیسم نیتروژن، مس و کلسیم موثر بوده و کمبودش در حیوانات بر عملکرد بخش‌های مختلفی از بدن آن‌ها تأثیر منفی دارد. نیاز به بُر در جیره‌ی غذایی انسان و سایر پستانداران بسیار ناچیز بوده، اما عملکرد آن به درستی شناخته شده نیست (۳). سازمان بهداشت جهانی (WHO) نیاز روزانه به بُر را برای انسان ۱ تا ۱۳ میلی‌گرم در روز اعلام کرده است (۴). مصرف طولانی مدت غذا و آب آلوده به بر سبب مشکلات قلبی عروقی، انسداد شرایین، مشکلات عصبی و تناسلی می‌گردد (۴). بُر هم چنین سبب تغییر در ترکیب خون، اثر بر اعصاب، بدشکلی‌های فیزیکی و کاهش رشد ذهنی کودکان می‌شود. بُر به مقدار زیاد در میوه‌های خشک و تازه، سبزی‌ها و آجیل موجود است و اغلب کمبود آن در پستانداران دیده نمی‌شود (۴ و ۵).

بُر به مقدار فراوان در آب‌های زیرزمینی، آب‌های شور، چشمه‌های آب گرم مخصوصاً در مناطق دارای توان زمین گرمایشی و یا تکتونیک یافت می‌شود (۶ - ۸). این عنصر در پساب‌های صنعتی، آب‌های متأثر از مناطق ساحلی و زهاب‌های کشاورزی دیده می‌شود (۹). بُر اغلب در محیط‌های آبی به صورت اسید بوریک یافت می‌شود که در pHهای بیشتر از pKa اسید بوریک به فرم  $B(OH)_4^-$  تبدیل و در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به صورت پلی بُرات درمی‌آید (۱۰ - ۱۲). آلودگی بُر از مشکلات استفاده از آب‌های زیرزمینی، بازچرخش زه آب‌های کشاورزی و بازیافت زه آب‌های معادن است. برای رفع این مشکل روش‌های متعددی برای حذف بُر از محیط‌های آبی معرفی شده است. روش‌هایی که اغلب برای حذف بُر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اغلب شامل ترسیب و لخته سازی، تبادل یونی، فیلترسازی غشایی، استفاده از رزین‌های انتخاب‌گر B و

جذب سطحی آن به کمک ترکیبات و یا مواد مختلف می‌باشند (۱ و ۱۳). گیاه‌پالایی روشی موثر در حفظ کیفیت منابع آب است (۱۴). گیاه‌پالایی را می‌توان در جهت پالایش عناصر سمی، آلاینده‌های گوناگون و افزایش کیفیت آب‌ها به کار برد (۱۵). گیاه استخراجی<sup>۱</sup> نوعی روش پالایش است که شامل استفاده از گیاه در حذف آلاینده‌ها از آب و خاک‌هاست. در این روش گیاه پس از جذب آلاینده از محیط و انباشت آن در بافت‌های خود از محیط خارج شده و دفع می‌گردد (۱۶).

گیاهان می‌توانند فیلتر زیستی مناسبی برای انواع مختلفی از عناصر کمیاب از محیط‌های آبی باشند. در بسیاری از مطالعات انجام شده در این زمینه، کاهش چشمگیر غلظت عناصر کمیاب گزارش شده است (۱۳، ۱۷ - ۲۴). گرچه گیاه‌پالایی بُر از آب‌های کشاورزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، اما بر اساس پژوهش‌های محدود انجام شده، گیاهان می‌توانند بُر را نیز در خود تجمع داده و از محیط خارج کنند (۲۵ - ۲۸).

استفاده از گیاه‌پالایی در پالایش هر محیطی که گیاه بتواند در آن بروید مورد توجه است. در گیاه‌پالایی محیط‌های آلوده باید عوامل زیر را در نظر گرفت (۲۹): ۱- توان بالای جذب آلاینده. ۲- تولید زیست‌توده بالا. ۳- قدرت انتقال زیاد آلاینده از اندام جذبی به اندام قابل برداشت. ۴- بومی بودن و سازگاری با شرایط اقلیمی منطقه‌ی پالایش به جهت کاهش هزینه‌ی کاشت و داشت.

ایران دارای تنوع گونه‌های گیاهی بسیاری است. استفاده از گیاهان بومی به علت مقاومت در برابر شرایط سخت محیطی، گیاه‌پالایی آلاینده‌ها را امری موفق، مناسب و کم هزینه خواهد نمود که از جنبه بوم‌شناختی نیز بی‌خطر و کم هزینه می‌باشد. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی پالایش آب منطقه‌ای آلوده به بُر توسط گیاهان مقاوم به شوری بومی مناطق جنوب ایران و حذف بُر آب آلوده توسط دو گیاه دولپه (*Ruppia maritima* L.) و تک لپه (*Zannichellia palustris* L.) انجام شد.

## مواد و روش‌ها

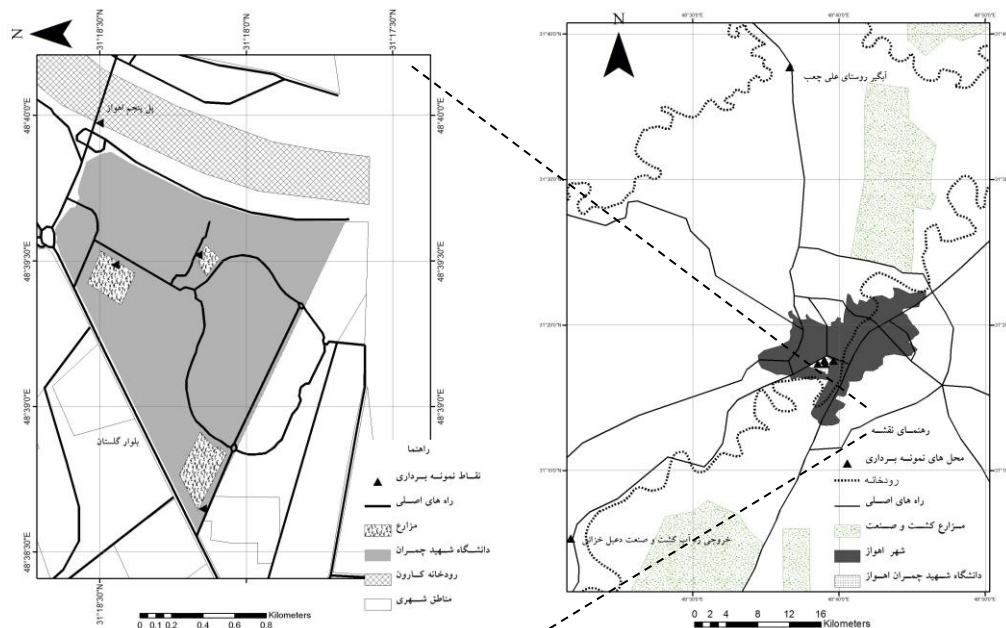
## محل آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، در ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه

برای به دست آوردن تخمینی از مقدار آلودگی و تهیه غلظت‌های بُر برای آزمایش‌های نهایی پالایش بُر، نمونه‌هایی از آب آبیاری مورد استفاده و زه آب‌های منطقه در بازه‌ی زمانی اسفندماه ۱۳۹۲ تا تیرماه ۱۳۹۳، از آب‌های آبیاری و زه آب‌های مزارع تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز، مزارع حومه‌ی شهر اهواز و یک واحد نیشکر پایین دست اهواز جمع‌آوری گردید (شکل ۱) و اندازه‌گیری‌ها انجام شد.

عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی، با ارتفاع متوسط ۲۰ متر از سطح دریا، در بهار ۱۳۹۳ انجام شد. طی مراحل آزمایش شرایط اقلیمی شامل دمای محیط رشد  $1 \pm$  ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، میانگین رطوبت  $25 \pm 55\%$ ، تشعشع کل بین  $650 \text{ W m}^2$  تا  $1100 \text{ W m}^2$  و تشعشع خالص بین  $400 \text{ W m}^2$  تا  $1050 \text{ W m}^2$  در نوسان بود.

### نمونه‌برداری آب و زهاب



شکل ۱- محل‌های نمونه‌برداری

Figure 1-Sampling sites

### جدول ۱- ویژگی‌های آب‌های پایش شده

Table 1- Characteristics of examined waters

B	Na	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	EC (dS/m)	pH	محل نمونه‌برداری
۱/۳۳ تا ۰/۷	۳۷۵±۲۵	۴۰ ± ۲	۲/۲ ± ۰/۲	۷/۵۲ ± ۰/۳۲	آب رودخانه کارون نزدیک پل پنجم
۱/۲۸ تا ۰/۸	۳۷۰ ± ۲۰	۴۲ ± ۲	۲/۱ ± ۰/۲	۷/۸۱ ± ۰/۴۰	آب کانال آبیاری دانشکده کشاورزی
۴/۵ تا ۳	۲۰۰۰ ± ۵۰	۴۱ ± ۱	۱۲/۵ ± ۰/۳	۷/۸۴ ± ۰/۲۳	زه آب مزرعه شماره دو
۸ تا ۴	۳۰۷۰ ± ۶۰	۴۰ ± ۱	۱۸/۵ ± ۰/۵	۸/۲۵ ± ۰/۱۵	زه آب مزرعه رو به روی کوی استادان
۱/۳ تا ۱/۱	۱۳۰۰ ± ۳۰	۵۴ ± ۲	۶/۸ ± ۰/۴	۷/۴۲ ± ۰/۲۸	زه آب نیشکر دعبیل خرابی
۵/۵ تا ۴/۵	۳۱۵۰ ± ۴۰	۴۵ ± ۳	۲۱ ± ۵/۴	۸/۶۶ ± ۰/۲۰	آب گیر روستای علی چعب

رشد می‌کند. این گیاه در خاورمیانه (ایران، ترکیه، عراق و پاکستان) گسترده است (۳۰). نزدیک‌ترین رویش‌گاه این گیاه نسبت به شهر اهواز، در جاده‌ی اهواز- اندیمشک، در روستای علی چعب توسط خانم دکتر مهری دیناروند، عضو هیات‌علمی

جمع‌آوری، کشت، تطبیق، تکثیر و آماده‌سازی گیاهان برای حذف بُر

گیاه شورابی (*Ruppia maritima* L.) گیاهی دولپه و آبزی از خانواده‌ی Ruppiales، به صورت برگ معلق در آبگیرها

(۳۲). مقدار  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+$  بر اساس روش استاندارد برای آزمایش آب و پساب (۳۱) اندازه گیری گردید.

#### شاخص درصد حذف

این شاخص از تقسیم اختلاف غلظت کاهش یافته روزانه بر در محلول کشت و شاهد بر غلظت اولیه تیمار شده مطابق رابطه شماره ۱ به دست آمد (۲۹).

(۱)  $\text{حذف} = \frac{\text{غلظت اولیه} - \text{غلظت نهایی}}{\text{غلظت اولیه}} * 100$

#### تعیین مقدار شاخص کلروفیلی

عنصر بر جذب شده و هم چنین شوری بی شک اثراتی بر گیاهان دارند. با توجه به این که تغییر میزان این عنصر می تواند برای رشد و نمو گیاهان ضروری یا مضر باشد و چون این اثرات گاهی فیزیولوژیک بوده و نمود مورفولوژیک ندارند، بنابراین مقدار کلروفیل به عنوان یکی از مهم ترین شاخص های زیستی و بیوشیمیایی و نشان دهنده درجهی تنش وارد شده بر گیاه (۳۳ و ۳۴) بوده که به صورت روزانه به کمک دستگاه کلروفیل متر<sup>۱</sup>، در نمونه های گیاهی تحت تماس با این عنصر اندازه گیری و قرائت شد.

#### تعیین وزن تر گیاهان

نمونه های گیاهی با یک الک برداشت شده و با آب دیونیزه شستشو شدند و برای ۲ دقیقه بین ۲ کاغذ خشک کن قرار گرفتند. سپس گیاهان توزین شدند تا وزن تر آنها به دست آید (۱۳).

#### تعیین شاخص تولید زیست توده گیاهان<sup>۲</sup>

شاخص تولید زیست توده گیاهی (Pr) به کمک رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$Pr = \frac{FW_2 - FW_1}{\Delta t} \quad (2)$$

$FW_1$  و  $FW_2$  وزن تر خالص گیاه (گرم) در زمان ۱ و ۲ (روز) و  $\Delta t$  اختلاف بین زمان ۱ و ۲ است (۱۳).

#### تعیین وزن خشک گیاهان

نمونه های گیاه با آب دیونیزه شستشو شده، در آون در دمای ۶۵ درجهی سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شدند تا کاملاً خشک گردیده و سپس با ترازو (با دقت ۱ درصد) توزین شدند (۲۹).

مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان شناسایی شد. این گیاه به شوری بسیار مقاوم، دارای گل و دانه بوده و از طریق غیرجنسی (قطعه قطعه شدن) نیز قابل تکثیر است (۳۰). گیاه زانیشلیا یا علف تالاب شاخی شکل (*Zannichellia palustris* L.) گیاهی تک لپه از تیره قاشق و اش سانان، خانواده ی گوشابیان و مقاوم به شوری است. این گیاه برگ معلق بوده و در آبگیرها و رودهای ایران یافت می شود. این گیاه ریشه، گل و دانه دارد و از طریق غیرجنسی (قطعه قطعه شدن) نیز قابل تکثیر است (۳۰). نزدیک ترین رویش گاه زانیشلیا نسبت به شهر اهواز، در کانال آبیاری دانشگاه شهید چمران اهواز، واقع در شهر اهواز، توسط محققان این پژوهش شناسایی شد.

گیاهان از نهرهای آبیاری کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز و آبگیر روستای علی چعب در جاده ی اهواز- اندیمشک جمع آوری شدند. پس از شستشو با آب شهر، به مدت ۲ هفته در گلخانه ی تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز در ظروف ۳۵ لیتری مسطح تحت شرایط کنترل شده دما و رطوبت برای تطبیق با محیط کشت، نگهداری شدند، تا رشد، تطبیق و تکثیر یافته و آماده ی کاربرد در پالایش بر گردند (۱۳).

#### پالایش بر از آب آلوده

کشت در ظروفی پلاستیکی حاوی ۱ لیتر آب آبیاری صاف شده (عمق آب ۱۰ سانتی متر) انجام شد که با افزودن اسید بوریک جامد ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )، به بر با سطوح ۰، ۱، ۵، ۱۰ میلی گرم بر لیتر آلوده شده بود. در ادامه ۲۵ گرم از گیاهان پس از شستن با آب دیونیزه به هر یک از ظروف منتقل گردید. برای تعیین میزان جذب ظروف و مقدار رسوب احتمالی بر، ظروفی با غلظت های یاد شده و بدون گیاه در نظر گرفته شد (۱۳).

طی دوره ی کشت از آب آلوده برای تعیین مقدار بر جذب شده نمونه برداری شد، ضمناً با در نظر گرفتن تبخیر روزانه، هر روز سطح آب ظروف با آب دیونیزه ثابت نگه داشته شد و هوادهی نیز بی وقفه توسط پمپ های هوای کوچک آکواریوم به ظروف انجام گردید (۱۳).

#### آنالیزهای آب

نمونه های آب پس از اندازه گیری pH و EC و گذراندن از کاغذ صافی واتمن ۴۲، آماده سازی و با رنگ سنجی (اسپکتروسکوپی) به کمک azomethine-H مقدار عنصر بر آنها قرائت شد

## شاخص جذب

شاخص جذب<sup>۱</sup> هر عنصر از حاصل ضرب مقدار وزن ماده‌ی خشک در غلظت عنصر در اندام قابل برداشت به دست آمد. این شاخص معیاری مناسب برای تعیین پالایش عناصر فلزی بوده و در واقع قوی‌ترین معیار برای تعیین توان پالایش گیاه است. (۳۵).

## آنالیز نمونه‌های گیاه

نمونه‌های گیاه خشک شده در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به طور کامل خرد شده و ۱ گرم از آن در بوتله‌های چینی ۳۰ میلی‌لیتری ریخته شد و تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و خاکستر حاصله، با ۵ قطره آب تر گردید. سپس ۱۰ میلی‌لیتر سولفوریک اسید ۰/۳۶ نرمال به آن افزوده و یک ساعت در دمای اتاق به حال خود رها شد. سپس نمونه با میله‌ی شیشه‌ای به هم زده و با کاغذ صافی صاف گردید. میزان بُر نمونه‌ها با رنگ‌سنجی (اسپکتروسکوپی) به کمک azomethine-H قرائت گردید (۳۲).

## آنالیز آماری

این آزمایش به صورت گلخانه‌ای و در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. آب آبیاری با افزودن یوریک اسید

با سطوح ۰، ۱، ۵، ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر آلوده شده بود و قبل از اجرا، مقدار بُر اندازه‌گیری گردید. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از آمار توصیفی برای نمایش مقادیر جذب بُر و نیز آمار تحلیلی برای تعیین اختلاف معنی‌دار آماری در مقادیر جذب بُر و غلظت اولیه به وسیله‌ی گیاه، با استفاده از نرم‌افزار آماری Excel 2010 و SPSS 16 صورت گرفت.

## نتایج و بحث

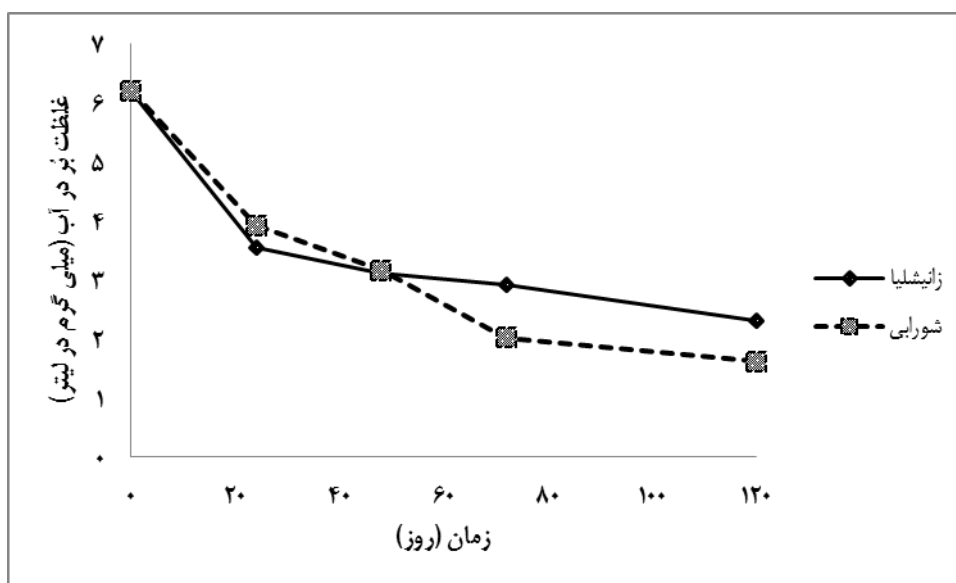
## غلظت روزانه‌ی بُر در آب آلوده

اندازه‌گیری منظم غلظت بُر طی دوره‌ی تیمار گذاری ۱۲۰ ساعته نشان داد که مقدار بُر روندی کاهشی در محیط رشد گیاهان داشته است. این کاهش با توجه به بسته بودن سیستم نشانگر حذف بُر از محیط و در نتیجه پالایش آب آلوده است. در شکل ۲ روند کلی تغییرات ۱۲۰ ساعته غلظت بُر در آب برای سطح آلودگی ۵ میلی‌گرم در لیتر ارایه شده است. این روند نشانه جذب زیستی و پالایش مقدار قابل توجه بُر توسط هر دو گیاه از محیط است. در تمامی سطوح آلودگی بُر کاهش چشم‌گیری رخ داده است. معادلات برازش شده‌ی تغییرات کاهش غلظت بُر در سطح آلودگی حاصل از افزودن ۵ میلی‌گرم در لیتر برای هر دو گیاه در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- معادلات کاهش غلظت بُر برای غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر

Table 2- B reduction equations for initial concentration of 5 mg/l

R <sup>2</sup>	معادله‌ی کاهش غلظت بُر برای غلظت ۵ میلی گرم در لیتر	نوع گیاه جاذب
0.94	$C = 5.4556 e^{-0.011t}$	شورابی
0.81	$C = 4.9883 e^{-0.007t}$	زانیشلیا
0.84	$C = -0.0362t + 5.2934$	شورابی
0.70	$C = -0.0273t + 5.0609$	زانیشلیا
0.99	$C = 0.0004t^2 - 0.0847t + 6.0673$	شورابی
0.90	$C = 0.0004t^2 - 0.0751t + 5.8228$	زانیشلیا



شکل ۲- تغییرات ۵ روزه‌ی غلظت بُر در آب تحت تیمار گیاهان آبی برای سطح آلودگی حاصل از افزودن ۵ میلی گرم در لیتر

Figure 2- B concentration change during 5 days in water treated by hydrophytes with for initial B addition of 5 mg/l

در هر دو گیاه افزایش داشت، اما به طور کلی مقدار جذب در گیاه زانیشلیا بیشتر از گیاه شورابی بود. علت می‌تواند تفاوت فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاهان باشد و همان طور که اشاره شد هر دو گیاه تفاوت‌هایی از نظر سیستم آوندی (یکی تک لپه و دیگری دولپه است)، تفاوت در شاخص کلروفیلی (جدول ۵)، شکل برگ و اندازه‌ی برگ‌ها دارند.

مقادیر غلظت نهایی هر یک از تیمارها برای هر دو گیاه در جدول ۳ نشان داده شده است. این جدول کاهش بیش از ۷۳ درصد بُر را در گیاه شورابی و بیش از ۷۲ درصدی آن را در گیاه زانیشلیا به ترتیب در سطوح ۵ و ۱۰ میلی گرم بر لیتر آلودگی نشان می‌دهد. بیشترین راندمان جذب در سطح آلودگی حاصل از افزودن ۵ میلی گرم بر لیتر بُر در ظرف حاوی گیاه شورابی مشاهده شده است. شاخص درصد جذب با افزایش غلظت بُر آب

جدول ۳- تغییرات غلظت و جذب بُر در گیاهان (غلظت‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر)

Table 3-B concentration change and uptake in plants (concentrations in mg/l)

۱۰	۵	۱	۰	مقدار بُر اضافه شده به آب (mg/l)
۱۱/۲	۶/۲	۲/۲	۱/۲	غلظت اولیه اندازه‌گیری شده بُر در آب آلوده (mg/l)
۳/۰۲	۱/۶۲	۱/۵۲	۱/۰۱	غلظت نهایی بُر در آب آلوده (mg/l) تحت تیمار گیاه شورابی
۳/۰۳	۲/۳۱	۱/۲۹	۰/۶۹	غلظت نهایی بُر در آب آلوده (mg/l) تحت تیمار گیاه زانیشلیا
۱۱/۱۲	۵/۵۸	۲/۱۵	۱/۱۸	غلظت نهایی بُر در آب آلوده (mg/l) بدون تیمار گیاهی
۷۲/۶۷	۷۳/۹۳	۳۰/۹۱	۱۵/۳۵	درصد حذف بُر در آب تحت تیمار گیاه شورابی
۷۲/۹۱	۶۲/۷۳	۴۱/۱۹	۴۲/۴۳	درصد حذف بُر در آب تحت تیمار زانیشلیا

روند بیانگر کاهش مقدار جذب نسبت به غلظت محیط است و می‌تواند ناشی از اختلال حاصل از سمیت بُر در مکانیسم جذب و کاهش سطح جذبی گیاه باشد. همچنین علت افزایش مجدد شاخص جذب را می‌توان به از دست رفتن بخشی از نفوذپذیری انتخابی غشاء سلول‌های سطح جذبی گیاه نسبت داد. خلف و زردائویی (۱۷) تناسب افزایش مقدار روی پالایش‌شده را با افزایش غلظت روی در محلول رشد گیاه عدسک آبی متناسب گزارش کردند. مارین و اورن (۱۳) هم نتایج مشابهی از افزایش جذب با افزایش غلظت را در پالایش بُر به کمک عدسک آبی ارائه نمودند.

مارین و اورن (۱۳) در حذف بر، خلف و زردائویی (۱۷) در پالایش روی به کمک عدسک آبی (*Lemna gibba*) از محیط آبی و پرینیان و همکاران (۲۹) در گیاه‌پالایی نیکل از محیط هیدروپونیک به کمک علف شاخی (*Ceratophyllum demersum L.*) نتایج مشابهی را به دست آوردند.

#### شاخص جذب بُر در گیاهان

همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، شاخص جذب با افزایش غلظت بُر در آب آلوده افزایش داشته است. اما پس از تقسیم شاخص جذب گیاهان بر غلظت اولیه بُر در آب، متوجه کاهش آن نسبت‌ها در هر دو گیاه در غلظت ۲/۲ میلی‌گرم بر لیتر بُر و افزایش آن در غلظت‌های بیشتر می‌شویم. علت این

جدول ۴- مقایسه مقادیر نهایی بُر در گیاهان با غلظت اولیه آن در آب آلوده

Table 4- Final B concentrations in plants

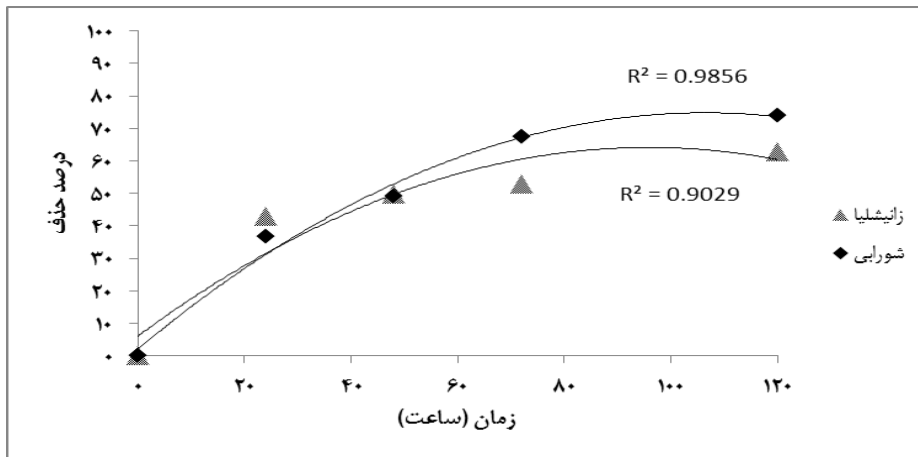
۱۱/۲	۶/۲	۲/۲	۱/۲	غلظت اولیه بُر در آب آلوده (mg/L)
۸/۱۶	۳/۸۸	۰/۹۱	۰/۵۱	شاخص جذب بُر در تیمارهای گیاه زانیشلیا (mg/pot)
۸/۱۴	۴/۵۸	۰/۶۸	۰/۱۸	شاخص جذب بُر در تیمارهای گیاه شورابی (mg/pot)
۰/۷۳ <sup>a</sup>	۰/۶۳ <sup>b</sup>	۰/۴۱ <sup>c</sup>	۰/۴۳ <sup>c</sup>	نسبت شاخص جذب به غلظت اولیه بُر در تیمارهای گیاه زانیشلیا
۰/۷۳ <sup>a</sup>	۰/۷۴ <sup>a</sup>	۰/۳۱ <sup>c</sup>	۰/۵۱ <sup>b</sup>	نسبت شاخص جذب به غلظت اولیه بُر در تیمارهای گیاه شورابی

#### درصد حذف روزانه بُر در آب آلوده

استفاده شده و درصد حذف نهایی در جدول شماره (۳) آمده است.

حذف روزانه بُر از پساب شبیه‌سازی شده با محاسبه‌ی درصد حذف بُر بیان شده است. از این شاخص برای نشان دادن میزان حذف گیاهی بُر از هر ۴ غلظت آلودگی، در شکل شماره (۳)





شکل ۳- تغییرات ۵ روزهی درصد جذب بُر در گیاهان با غلظت اولیهی ۶/۲

Figure 3-B remediation percentage of plants during 5 days for initial B concentration of 6.2 mg/l

#### شاخص تولید زیست توده

به کمک این شاخص، می توان میزان تولید زیست توده ی گیاه را در سطوح مختلف آلودگی مورد سنجش قرار داد (۱۳). بنابراین با استفاده از آن، مقدار وزن تر زیست توده ی تولید شده توسط گیاهان در محیط رشد، نسبت به مقدار اولیه ی وزن تر زیست توده در طول زمان کشت گیاهان، مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول (۵) شاخص تولید زیست توده ی گیاهان زانشلیا و شورابی برای سطوح مختلف آلودگی بُر در آب آلوده نشان داده است.

در تمامی تیمارها با افزایش زمان، کل مقدار جذب افزایش داشت و ۵ روز پس از شروع تیمار گذاری حداکثر درصد جذب بُر حاصل شد. با افزایش زمان میزان پالایش و حذف بُر از آب، تجمع بُر در گیاهان آبی افزایش می یابد. همان طور که مشاهده می شود و مطابق مطالعات میشر و تریپاتی (۲۰)، میرتزیکی و همکاران (۱۹) و پرنیان و همکاران (۲۹) کاهش چشمگیری در غلظت عناصر کمیاب رخ داده است. بر اساس این نتایج بازه ی راندمان پالایش بُر از آب آلوده بین ۱۵/۳۵٪ و ۷۳/۹۳٪ بوده است.

#### جدول ۵- شاخص تولید زیست توده ی گیاهان و شاخص کلروفیل برای سطوح مختلف آلودگی

Table 5- Biomass production measurement and chlorophyll index for different contamination levels

۱۱/۲	۶/۲	۲/۲	۱/۲	تیمار (میلی گرم بُر در لیتر)
۰/۸۸ <sup>b</sup>	۱/۰۰ <sup>ab</sup>	۱/۰۲ <sup>a</sup>	۱/۱۲ <sup>a</sup>	تولید زیست توده گیاهی زانشلیا (گرم بر روز در هر ظرف)
۰/۷۱ <sup>a</sup>	۰/۷۲ <sup>a</sup>	۰/۷۰ <sup>a</sup>	۰/۷۳ <sup>a</sup>	تولید زیست توده گیاه شورابی (گرم بر روز در هر ظرف)
۸/۱ <sup>a</sup>	۸/۲ <sup>a</sup>	۷/۵ <sup>b</sup>	۸/۱ <sup>a</sup>	شاخص کلروفیلی زانشلیا
۲۵/۶ <sup>a</sup>	۲۵/۶ <sup>a</sup>	۲۶/۵ <sup>a</sup>	۲۵/۴ <sup>a</sup>	شاخص کلروفیلی شورابی

گیاه شورابی به آلودگی بُر بیشتر از گیاه زانشلیا است. هم چنین عدم تغییر معنی دار شاخص تولید زیست توده در شورابی نشان دهنده ی مقاومت بیشتر آن گیاه در برابر تنش بُر تا غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر است. در نتایج مارین و ارون (۱۳) و باک و همکاران (۲۵) در پالایش بُر به کمک عدسک آبی و پرنیان و همکاران (۲۹) در پالایش نیکل به کمک علف شاخی به کاهش مقدار شاخص زیست توده با افزایش سطح آلودگی اشاره شده

در اثر آلودگی بُر در گیاه زانشلیا، با افزایش مقدار آلودگی ماده ی تر کمتری تولید و رشدشان کمتر شد و در نتیجه شاخص تولید زیست توده کاهش یافت. این بیانگر اثر منفی بُر بر رشد گیاه زانشلیا است. اما در گیاه شورابی تغییر معنی داری در شاخص زیست توده ایجاد نشد و نشانگر مقاومت بالای این گیاه به بُر بود. با توجه به تولید زیست توده ی کمتر و افزایش شاخص جذب با افزایش مقدار آلودگی می توان نتیجه گرفت که مقاومت

- American diet, J. Am. Diet. Assoc., Vol. 99 (3), pp. 335-340.
- 4- Şimşek, A., Korkmaz, D., Velioğlu, Y.S., Ataman, O.Y., 2003. Determination of boron in hazelnut (*Corylus avellana* L.) varieties by inductively coupled plasma optical emission spectrometry and spectrophotometry, Food Chem., Vol. 83, pp. 293-296.
  - 5- Melnik, L.A., Butnik, I.A., Goncharuk, V.V., 2008. Sorption-membrane removal of boron compounds from natural and waste waters: ecological and economic aspects, J. Water Chem. Technol., Vol. 30 (3), pp. 167-179.
  - 6- Badruk, M., Kabay, N., Demircioglu, M., Mordogan, H., Ipekoglu, U., 1999. Removal of boron from wastewater of geothermal power plant by selective ion-exchange resins. I. Batch sorption-elution studies, Sep. Sci. Technol, Vol. 34 (13), pp. 2553-2569.
  - 7- Melnyk, L., Goncharuk, V., Butnyk, I., Tsapiuk, E., 2005. Boron removal from natural and wastewaters using combined sorption membrane process, Desalination, Vol. 185, pp. 147-157.
  - 8- Wyness, A.J., Parkaman, R.H., Neal C., 2003. A summary of boron surface water quality data throughout the European Union, Sci. Total Environment, Vol. 314-316, pp. 255-269.
  - 9- Loizou, E., Kanari, P.N., Kyriacou, G., Aletrari, M., 2010. Boron determination In the Multi element national water monitoring program: the absence of legal limits, J. Verbr. Lebensm., Vol. 5, pp. 459-463.
  - 10- Kabay, N., Güler, E., Bryjak, M., 2010. Boron in seawater and methods for its separations-a review, Desalination, Vol. 261, pp. 212-217.
  - 11- Edzwald, J.K., Haarhoff J., 2011. Seawater pretreatment for reverse osmosis: chemistry, contaminants, and است. به عبارت دیگر سمیت بُر با افزایش غلظت محلول تا ۱۰ میلی گرم بر لیتر افزایش داشته و سبب کاهش سرعت رشد گیاه زانیشلیا گردیده است، درحالی که این افزایش غلظت اثر معنی داری بر رشد گیاه شورابی نداشته است.
- مقدار سبزینه**
- به کمک دستگاه سبزینه سنج مقدار عدد اسپد گیاهان مورد استفاده در پژوهش اندازه گرفته شد. که در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان داد که تغییرات معنی دار و چشمگیری در مقدار سبزینه‌ی هر دو گیاه با افزایش غلظت بُر تا سطح آلودگی ۱۰ میلی گرم بر لیتر رخ نداده است.
- نتیجه گیری**
- گیاه پالایی با گیاهان آبی زانیشلیا و شورابی روشی مناسبی برای حذف بُر از آب‌های آلوده است. طی دوره ۵ روزه کشت، گیاهان کارایی بالایی در پالایش آب آلوده به بُر از خود نشان دادند. کارایی حذف بُر از آب‌های آلوده تا حداکثر ۷۳٪ در گیاه شورابی و ۷۲٪ در گیاه زانیشلیا رسید. بر اساس نتایج حاصله، افزایش زمان ماند سبب کاهش میزان بُر محلول می‌گردد و این افزایش در گیاه شورابی مقدار بیشتری داشت. گیاه زانیشلیا با افزایش غلظت بُر نشانه‌های کاهش رشد و مسمومیت از خود نشان داد اما گیاه شورابی در بازه‌ی آلودگی مورد آزمون مقاوم‌تر بود و کاهش رشدی نداشت. این روش سبب پالایش کامل بُر در کوتاه مدت نمی‌گردد اما مقدار قابل توجهی از آن را از محیط آبی حذف و بازیافت می‌کند، همچنین با توجه به ارزان و کارا بودن، روشی موثر در پالایش آب‌های آلوده خواهد بود و برای پالایش آب‌ها، پساب‌ها و زهاب‌های آلوده به بُر توصیه می‌شود.
- منابع**
- 1- Wolska, J., Bryjak, M. 2013. Methods for boron removal from aqueous solutions- A review. Desalination, Vol. 310, pp. 18-24.
  - 2- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۸، «آب آشامیدنی- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی»، استاندارد ملی ایران، شماره‌ی ۱۰۵۳، چاپ چهارم، تهران، صفحه‌ی ۱۰.
  - 3- Rainey, C.J., Nyquist, L.A., Christensen, R.E., Strong, P.L., Dwight, Culver, B., Coughlin, J.R., 1999. Daily boron intake from the

- heavy metals from industrial wastewater, *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 3451-3457.
- 19- Miretzky P., Saralegui, A., Cirelli, A.F., 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere*, Vol. 57, pp.997-1005.
- 20- Mishra, V. K., Ttipathy, B.D., 2008. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes, *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 7091-7097.
- 21- Mishra, S., S. Srivastava, R.D. Tripathi, R. Kumar, C.S. Seth, Gupta D.K., 2006. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and response of antioxidants in response to its accumulation. *Chemosphere*, Vol. 65, pp.1027-1039.
- 22- Aravind, P., Prasad, M.N.V., 2005. Cadmium-Zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L., pp. adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Journal of Plant Physiology*, Vol. 17(1), 3-20.
- 23- Saygideger, S., Dogan, M., Keser, G., 2004. Effect of lead and pH on lead uptake, chlorophyll and nitrogen content of *Typha latifolia* L. and *Ceratophyllum demersum* L. *International Journal of Agricultural and Biology*, Vol. 6(1), pp.168-172.
- 24- Saygideger, S., Dogan, M. 2004. Lead and cadmium accumulation and toxicity in the presence of EDTA in *Lemna minor* L. and *Cratophyllum demersum* L. *Bulltan Environmental Contamination Toxicology*, Vol. 73, pp.182-189.
- 25- Bocuk, H., Yakara, A., Turker, O.C., 2013. Assessment of *Lemna gibba* L. (duckweed) as a potential ecological coagulation, *Water Res*, Vol. 45, pp. 5428-5440.
- 12- Tu, K.L., Ngheim, L.D., Chivas, A.R. 2010. Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination, *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 75, pp. 87-101.
- 13- Marin, D.C.C.M., Oron, G., 2007. Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: A potential method for the remediation of boron-polluted waters. *Water Research*, Vol. 41, pp.4579-4584.
- 14- Fox, L. J., Struik, P. C., Appleton, B. L., Rule, J. H., 2008. Nitrogen phytoremediation by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms). *Water Air Soil Pollutant*, Vol. 194, pp.199-207.
- 15- Schröder, P., J. Navarro-Aviñó, H. Azaizeh, A. G. Goldhirsh, S. DiGregorio, T. Komives, G. Langergraber, A. Lenz, E. Maestri, A. Memon R., Ranalli A., Sebastiani L., Smrcek S., Vanek T., Vuilleumier S., Wissing, F., 2007. Using phytoremediation technologies to upgrade waste water treatment in europe. *Environmental Science Pollutant Reserch*, Vol. 14(7), pp.490-497.
- 16- Abul Kashem, Md., Singh, B.R., Imamul Huq, S. M., Kawai, Sh., 2008. Cadmium phytoextraction efficiency of arum (*Colocasia antiquorum*), radish (*Raphanus sativus* L.) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) grown in hydroponics. *Water Air Soil Pollutant*, Vol. 192, pp.273-279.
- 17- Khellaf, N., Zerdaoui M., 2009. Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, *Lemna gibba* L., *Bioresource Technology*, Vol. 100, 6137-6140.
- 18- Khan, S., Ahmad, I., Shah, M.T., Rehman, Sh., Khaliq, A., 2009. Use of constructed wetland for the removal of

- ۳۰- قهرمان. احمد، ۱۳۷۳، «کومورفیت‌های ایران (سیستماتیک گیاهی)، جلد چهارم». انتشارات دانشگاه تهران، ۷۶۸ صفحه.
- 31- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th ed. APHA, Washington DC
- 32- . 2005.
- 33- Bakirdere, S., Örenay, S., Korkmaz, M., 2010. Effect of Boron on Human Health. The Open Mineral Processing Journal, Vol. 3, pp. 54-59.
- 34- Wang, D., Wen, F., Xu, C., Tang, Y., Luo, X., 2012. The uptake of Cs and Sr from soil to radish (*Raphanus sativus* L.)- potential for phytoextraction and remediation of contaminated soils. Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 110, pp. 78-83.
- 35- Demiral, T., Türkan, I., 2005. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. Environmental and Experimental Botany, Vol. 53 (3), 247-257.
- ۳۶- علیزاده. آذین، ۱۳۸۶، «مقایسه تأثیر کلات کننده- های آلی، سنتزی و کمپوست در پالایش خاک‌های آلوده به عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل تحت کشت کلزا». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، صفحه ۸۶.
- indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent. Ecological Indicators, Vol. 29, pp. 538-548.
- 26- Abreu, C.A., Coscione A.R., Pires, A.M., Paz-Ferreiro, J., 2012. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 123, pp. 3-7.
- 27- Turker, O.C., Bocuk, H., Yakar, A., 2013. The phytoremediation ability of a polyculture constructed wetland to treat boron from mine effluent. Journal of Hazardous Materials, Vol. 252–253, pp. 132-141.
- 28- Tatar, S.Y., Öbek E., 2014. Potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. for accumulation of Boron from secondary effluents. Ecological Engineering, Vol. 70, pp. 332–336.
- ۲۹- پرنیان. امیر، چرم. مصطفی، جعفر زاده حقیقی فرد. نعمت اله و دیناروند. مهری، ۱۳۹۰، «گیاه‌پالایی نیکل از محیط هیدروپونیک به کمک علف شاخی (*Ceratophyllum demersum* L.)». مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، سال دوم، دوره ۶، صفحه ۷۵-۸۴.