dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

بررسی کارایی گیاه *سالیکورنیا اروپایی* در گیاه‌پالایی نمک از محلول‌ها

ابوالفضل فرزی[1]، سید مهدی برقعی[2]، منوچهر وثوقی[2]

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) ۴۴۶۶۵۵۲۴ (۰۵۱) farziabolfazl@yahoo.com
۲- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت ۹٤/۱۲/۱۳ پذیرش ۹۵/٤/۳۱)

چکیده

هالوفیت‌ها گیاهانی هستند که قادراند غلظت‌های بالای نمک را تحمل کنند. این گیاهان کاربردهای متعددی دارند که یکی از آن‌ها گیاه‌پالایی آلاینده‌های مختلف از محیط زیست است. گیاه‌پالایی نمک توسط گیاهان هالوفیت اخیراً مورد توجه محققان واقع شده است. در این مقاله گیاه‌پالایی نمک از محلول‌ها با استفاده از گیاه هالوفیتی سالیکورنیا اروپایی مورد مطالعه قرارگرفت. گیاه سالیکورنیا اروپایی با استفاده از سیستم کاشت هیدروپونیک و در سه سطح شوری مختلف (هدایت الکتریکی تقریباً برابر با ۲۰۰۰، ٦۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) با زمان ماند ۷ روز و با سه تکرار برای هر سطح شوری کشت داده شد و پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و کلراید و نیز نسبت جذب سدیم (SAR) قبل و بعد از تصفیه توسط گیاه مذکور اندازه‌گیری و درصدهای متوسط کاهش پارامترهای مذکور محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که این گیاه مقادیر EC را در سطوح شوری EC~2000 µs/cm، EC~6000 µs/cm و EC~10000 µs/cm به ترتیب ۱٦/۷۵، ۱۷/۰۵ و ۱۸/۱۱ درصد، یون کلسیم را ۲۸/۷۱، ۲۷/۱۸ و ٤۰/٤۳ درصد، منیزیم را ۳۱/٦٤، ۲۵/۳۵ و ۱۷/٤٦ درصد، سدیم را ۲۰/٤۱، ۱۷/۲۹ و ۲۳/۸۹ درصد و کلراید را ۲۳/۲٤، ۱۸/۸٤ و ۲۲/۱٦ درصد کاهش داده است. بر اساس نتایج این تحقیق گیاه سالیکورنیا اروپایی که به‌عنوان یکی از گزینه‌های استفاده زراعی با قابلیت آبیاری توسط آب‌های شور مطرح است، می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی برای گیاه‌پالایی نمک نیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی نمک، هیدروپونیک، شوری، سالیکورنیا، هالوفیت

۱- مقدمه

هالوفیت‌ها یا گیاهان شورزیست، گیاهان مهم و قابل‌ملاحظه‌ای هستند که قادراند غلظت‌هایی از نمک را تحمل کنند که ۹۹ درصد گیاهان دیگر در این شرایط قادر به حیات نیستند (Flower et al. 1986).

حدود ۱۱/۱ درصد فلور گیاهی جهان را هالوفیت‌های مقاوم به شوری تشکیل می‌دهند که تعداد گونه‌های این گیاهان حدود ۳۶۴۰ گونه است (Yensen 2006). هالوفیت‌ها در خانواده‌های گیاهی مختلفی پراکنده شده‌اند. ۵۷ درصد هالوفیت‌ها از ۱۳ خانواده می‌باشند که در این میان خانواده کنوپودیاسه (اسفناجیان) و خانواده گرامینه به ترتیب با دربرداشتن ۲۵ و ۱۰ درصد هالوفیت‌های دنیا در صدر این فهرست هستند (Gelen et al. 2009).

دامنه وسیعی از کاربرد هالوفیت‌ها در نقاط مختلف دنیا وجود دارد. کاربردهای بالقوه و بالفعلی مانند استفاده از آن‌ها برای تأمین علوفه دام‌ها، استفاده به‌عنوان گیاه دارویی، استفاده به‌عنوان دانه روغنی، استفاده برای تولید سوخت زیستی موارد متعددی از کاربردهای این گیاهان است که توسط محققان مختلف مورد بررسی قرارگرفته است (Kafi et al. 2010; Khan & Qaiser 2006; Weber 2007; Abdelgadir et al. 2009).

مهم‌ترین کاربرد این گیاهان با توجه به خصوصیات بی‌نظیر آن‌ها در تحمل شرایط نامطلوب، استفاده از آن‌ها برای گیاه‌پالایی آلاینده‌های مختلف از محیط‌های آلوده اعم از خاک و آب است. گیاه‌پالایی که یکی از مهم‌ترین شاخه‌های بیوتکنولوژی محیط‌زیست است، تکنولوژی نسبتاً نوظهوری است که گیاهان و میکروارگانیسم‌های مستقر در محیط ریشه آن‌ها را برای حذف، تجزیه یا جذب آلودگی‌های موجود در خاک، رسوبات، آب زیرزمینی، آب سطحی و حتی اتمسفر به کار می‌گیرد (Ceotto 2008). محققان دریافته‌اند که گیاهان می‌توانند برای تصفیه بسیاری

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

از انواع آلودگی از قبیل هیدروکربن‌های نفتی، حلال‌های کلردار، حشره‌کش‌ها، فلزات، رادیونوکلئیدها و مواد مغذی اضافی به‌کار روند (Chappell 1997).

استفاده از گیاهان هالوفیتی برای کاشت در وتلندهای مصنوعی برای تصفیه فاضلاب‌های شور یکی از کاربردهای این گیاهان در بحث گیاه‌پالایی است. فاضلاب حاصل از مزارع پرورش ماهی و میگوی آب شور، فاضلاب برخی از صنایع مانند دباغی و فاضلاب شهری بعضی از مناطق به‌عنوان فاضلاب‌های شور شناخته می‌شوند. یکی از روش‌های حذف مواد مغذی از این فاضلاب‌ها استفاده از وتلند مصنوعی است ولی گیاهان معمول مورد استفاده در وتلندهای مصنوعی تحمل شرایط شوری بالا را نداشته و قابل کاربرد برای این منظور نیستند. بنابراین از وتلندهای مصنوعی کاشته شده با هالوفیت‌ها برای این منظور استفاده می‌شود (Ouyang 2002). در این زمینه تحقیقات متعددی وجود دارد. امکان‌پذیری استفاده از وتلند مصنوعی برای حذف آلودگی از فاضلاب شور توسط هشت گیاه مختلف در سال ۲۰۰۵ مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد به‌غیر از دو گونه، بقیه گونه‌های گیاهی مورد مطالعه به شوری مقاوم هستند و درصد حذف BOD بین ۷۲/۴ تا ۷۸/۹، درصد حذف مواد معلق ۴۳/۲ تا ۵۶ درصد، درصد حذف نیتروژن آمونیاکی ۶۷/۴ تا ۷۶/۵ و درصد حذف فسفر کل ۲۸/۹ تا ۴۴/۹ به‌دست آمد (Klomjek & Nitisoravut 2005). در پژوهش مذکور با توسعه یک مدل ریاضی، رفتار سیستم و کارایی تصفیه وتلند مصنوعی تحت شرایط متأثر از شوری مورد بررسی قرار گرفت. سینتیک زیست تخریب‌پذیری مواد ارگانیک از مرتبه اول در نظر گرفته شد و غلظت نمک به‌عنوان بازدارنده رشد لحاظ شد و همبستگی پیرسون بین خروجی مدل و داده‌های تجربی حذف BOD برابر با ۰/۸۷۲ به‌دست آمد. اثر شوری بر حذف کربن آلی محلول و مواد مغذی از فاضلاب شهری در وتلند مصنوعی حاوی مانگرو در سال ۲۰۰۸ بررسی و مشاهده شد که با افزایش شوری فاضلاب از ۰ به ۳۰ قسمت در هزار (ppt) درصد حذف کربن آلی محلول، نیتروژن آمونیاکی و نیتروژن غیرآلی به ترتیب از ۹۱، ۹۸ و ۷۸ درصد به ۷۱، ۸۳ و ۵۶ درصد افت می‌کند (Wu et al. 2008).

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۲ استفاده از سیستم وتلند مصنوعی حاوی گیاهان آروندو و سارکوکورنیا برای تصفیه فاضلاب با شوری بالا حاصل از صنعت دباغی مورد بررسی قرار گرفته و حذف COD بین ۵۱ تا ۸۰ درصد، حذف BOD بین ۵۳ تا ۹۰ درصد، حذف فسفر کل بین ۴۰ تا ۹۳ درصد، حذف نیتروژن آمونیاکی بین ۳۱ تا ۸۹ درصد و نیتروژن کلدال بین ۴۱ تا ۹۰ درصد گزارش شده است (Buhamann & Papenbrock 2012).

در سال ۱۹۹۹ در پژوهشی از گیاهان هالوفیتی سوئدا استروا، سالیکورنیا بیگلووی و آتریپلکس بارکلایانا به‌عنوان بیوفیلتر برای حذف مواد مغذی از فاضلاب شور مزارع دریایی پرورش ماهی استفاده شد و حذف ۹۹ و ۹۷ درصد برای فسفر کل و فسفر قابل حل و ۹۸ و ۹۴ درصد برای نیتروژن کل و نیتروژن غیرآلی به‌دست آمد (Brown et al. 1999). مفاهیم پایه، کاربردهای فعلی و چشم‌انداز آینده استفاده از هالوفیت‌ها برای بیوفیلتر مواد مغذی از فاضلاب شور مزارع دریایی در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ مرور شده است (Buhmann et al. 2012). در پژوهش مذکور بر روی بهینه‌سازی شرایط کشت گیاه هالوفیتی تریپولیوم پانونیکوم برای بیوفیلتر مواد مغذی از فاضلاب‌های شور مزارع دریایی تحقیق و مشخص شد حداقل غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نیتروژن و ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر فسفر برای رشد بهینه و تولید بیومس قابل قبول لازم است و در غلظت‌های نمک کمتر از آب دریا، تولید بیومس و جذب مواد مغذی بهتر صورت می‌گیرد.

استفاده از گیاه سالیکورنیا اروپایی به‌عنوان بیوفیلتر برای حذف مواد مغذی از فاضلاب‌های شور مزارع دریایی در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ بررسی شد در شرایط بارگذاری معمولی، حذف نیتروژن غیرآلی محلول ۹۸/۲ درصد و در شرایط پیک بارگذاری بین ۳۰ تا ۵۸ درصد به‌دست آمد و رابطه خطی بین معکوس درصد حذف و بارگذاری حاصل شد (KE-Fu 1991).

در مطالعات اشاره شده کاربرد هالوفیت‌ها عمدتاً بر حذف مواد مغذی از فاضلاب‌های شور به‌منظور بازچرخانی یا تخلیه ایمن در محیط‌زیست متمرکز بوده است. کاربرد دیگری که می‌توان برای گیاهان هالوفیت تصور کرد و به سبب طبیعت این گیاهان در جذب و تجمع نمک، به‌نظر می‌رسد طبیعی‌ترین کاربرد آن‌ها باشد، گیاه‌پالایی نمک از محیط‌های مختلف است. گیاه‌پالایی نمک از خاک‌ها از دهه‌های گذشته در مطالعاتی مورد توجه بوده ولی گیاه‌پالایی نمک از محلول‌هایی مانند فاضلاب‌های شور، اخیراً با توجه به اثرات زیست‌محیطی استفاده مجدد از فاضلاب‌های شور مورد توجه قرارگرفته است (Rabhi et al. 2012; Albaho et al.).

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

2000; Ravindran et al. 2007; Zorrig et al. 2012)

افزایش جمعیت جهان و نیاز روزافزون به تولید غذا و توسعه کشاورزی از یک طرف و کمبود منابع آب مورد نیاز برای پوشش دادن این نیاز جهانی از طرف دیگر، باعث شده توجه بشر به استفاده از منابع نامتعارف آب مانند آب‌ها و فاضلاب‌های شور جلب شود (Initiative 2012). استفاده از آب‌های شور برای آبیاری باعث وقوع شوری ثانویه خاک و در نتیجه کاهش تولید کشاورزی و ضربه به کشاورزی پایدار می‌شود (Zhou et al. 2013; Heillel 2000).

بنابراین روی‌آوردن به روش‌های کاهش شوری آب برای استفاده در کشاورزی و سایر نیازها به‌عنوان یک ضرورت رخ می‌نماید. از سوی دیگر استفاده از روش‌های رایج شوری‌زدایی مانند تقطیر و اسمز معکوس مستلزم مصرف انرژی بالا بوده و اقتصادی نیست. لذا روی آوردن به فناوری‌های ارزان و دوستدار محیط‌زیست مانند گیاه‌پالایی برای کاهش شوری آب، می‌تواند نویدبخش تحولی عظیم باشد. در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد که در آن با استفاده از گیاه باسیا ایندیکا در سه آزمایش مختلف یعنی در سیستم هیدروپونیک، وتلند مصنوعی زیرسطحی جریان قائم و وتلند مصنوعی زیرسطحی جریان قائم همراه با بازچرخانی، کارایی این گیاه در کاهش شوری مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. گیاه باسیا ایندیکا به‌خوبی در هر سه سیستم رشد کرد و شوری آب را بین ۲۰ تا ۶۰ درصد در مقایسه با سیستم بدون گیاه کاهش داد (Shelef et al. 2012). همچنین در سال ۲۰۱۰ استفاده از گیاهان شورزیست به‌منظور بازچرخانی نمک از فاضلاب انسانی در سیستم زیست بازتولید پشتیبان مورد مطالعه قرار گرفته است (Balnokin et al. 2010).

در پژوهش حاضر به بررسی کارایی گیاه سالیکورنیا اروپایی در گیاه‌پالایی نمک از محلول‌ها در سیستم هیدروپونیک پرداخته شد. با کاشت گیاه سالیکورنیا اروپایی در سیستم هیدروپونیک و استفاده از سه سطح شوری مختلف به‌عنوان متغیر مستقل، درصد کاهش شاخص‌های شوری از قبیل هدایت الکتریکی(EC)، و غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و کلراید و نیز نسبت جذب سدیم(SAR) به‌عنوان متغیرهای وابسته به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. گیاه سالیکورنیا اروپایی یکی از گیاهان هالوفیتی با پراکندگی نسبی بالا در ایران و جهان است. سالیکورنیا اروپایی گیاهی یک‌ساله به ارتفاع ۸ تا ۳۶ سانتی‌متر و قطر تاج تا ۳۵ سانتی‌متر، گاهی با ساقه اصلی مشخص گاهی بدون ساقه اصلی مشخص و از پایین به‌طور یکنواخت منشعب، افراشته و یا به‌ندرت گسترده، بدون کرک، سبز، سبز متمایل به زرد، نارنجی و ارغوانی است. زمان گلدهی و رسیدن دانه فصل پاییز است و در مناطق رویشی مختلف در حاشیه دریاچه‌های شور، رودخانه‌های با آب شور یا دریاهای شور دیده می‌شود (Assadi 2001). تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که این گیاه توانایی بالایی در تولید دانه‌های سرشار از روغن دارد. عملکرد دانه این گیاه مناسب بوده و دانه آن حاوی ۲۸ درصد روغن است که سالیکورنیا را به‌عنوان گزینه مناسبی برای تولید دانه‌های روغنی مطرح می‌سازد (Glenn et al. 1991; Davy et al. 2001).

به سبب طبیعت شورزیست و مردابی این گیاه به نظر می‌رسد گزینه خوبی برای گیاه‌پالایی نمک باشد. تحقیق میدانی اسلام زاده در سال ۲۰۰۶ بر روی این گیاه در منطقه دریاچه مهارلو در استان فارس نیز نشان داد که میزان سدیم جذب شده در این گیاه در منطقه مذکور در ساقه‌ها و ریشه‌ها به ترتیب ۳۱۵۰۰ و ۱۱۰۴۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه بوده است (Eslamzadeh 2006).

۲- مواد و روش‌ها

بذر گیاه اروپایی از گیاهان موجود در بستر و حاشیه رودخانه کال شور واقع در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر اسفراین واقع در استان خراسان شمالی ایران با طول و عرض جغرافیایی ۳۶/۷۸ و ۵۷/۵۹ در فصل پاییز ۱۳۹۳ جمع‌آوری شد. بذرهای جمع‌آوری شده در ابتدای بهار ۱۳۹۴ در گلدان‌های مشبک کوچک حاوی ماسه کاشته شد. پس از جوانه‌زنی و رشد نسبی پس از دو هفته هر مجموعه ۸ تایی از گلدان‌ها بر روی یک ورقه کارتن پلاست سوراخ شده قرار داده شد و مجموعه آماده شده بر روی ظروف هیدروپونیک پلاستیکی ۵ لیتری تیره قرار داده شد. با توجه به اینکه قرار بود آزمایش در سه غلظت مختلف انجام شود تعداد ظروف هیدروپونیک آماده‌شده به طریقه فوق نه ظرف حاوی گیاه (با احتساب سه غلظت و سه تکرار برای هر غلظت) بود. سه ظرف فاقد گیاه نیز برای کنترل و ملاحظه آثار پدیده‌های دیگر، به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد و بنابراین مجموع ظروف هیدروپونیک

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

استفاده‌شده در این آزمایش ۱۲ عدد بود که نمایی کلی از آن در شکل ۱ دیده می‌شود.

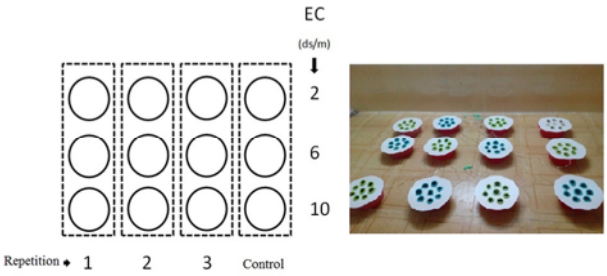


Fig. 1. A general view of the pilot plant used

شکل ۱- نمایی کلی از پایلوت مورد استفاده در تحقیق

ظروف هیدروپونیک به‌مدت ۸ هفته با آب معمولی با EC کمتر از ۱۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر که با استفاده از کود شیمیایی اگریمل NPK(20, 20, 20, TE) تغذیه شده بود، پر شد و به‌طور هفتگی تعویض شد. ظروف هیدروپونیک مذکور چه در زمان رشد اولیه و چه در زمان آزمایش‌های بعدی با استفاده از پمپ هوا و قرار دادن یک سنگ آکواریم در مرکز هر ظرف، هوادهی می‌شد.

از آغاز هفته یازدهم آب موجود در ظروف هیدروپونیک با آب شور با سطوح مختلف شوری بر مبنای آزمایش‌های طراحی شده به اضافه کود شیمیایی فوق‌الذکر تعویض و مرحله آزمایش شروع شد. محلول‌های شور با رقیق‌سازی آب رودخانه شور که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است، در سه سطح مختلف EC~2000 µs/cm، EC~6000 µs/cm و EC~10000 µs/cm تهیه شد (جدول ۲). با در نظر گرفتن زمان ماند یک‌هفته‌ای، مشخصات محلول در ابتدای هر هفته (قبل از تصفیه) و انتهای هر هفته (بعد از تصفیه) به‌مدت ۵ هفته اندازه‌گیری شد. مشخصات مورد نظر برای اندازه‌گیری عبارت بودند از هدایت الکتریکی (EC) و غلظت یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم و کلراید. برای اندازه‌گیری EC از دستگاه EC متر دیجیتال مدل ELEMEIRON(cpc-505) و برای اندازه‌گیری سدیم از دستگاه فلیم فتومتر دیجیتالی ساخت شرکت طیف آزمون پارس مدل 310c استفاده شد و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم و کلراید نیز با استفاده از تیتراسیون مطابق با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. در طول دوره آزمایش برای حذف آثار پدیده تبخیر و تعرق، در پایان هر روز میزان تبخیر صورت گرفته از هر کدام از ظروف هیدروپونیک با استفاده از آب مقطر جبران می‌شد. پس از پایان آزمایش، نتایج آزمایش و غلظت‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای مورد مطالعه، توسط نرم‌افزار IBM SPSS 22 تجزیه و تحلیل و مقادیر متوسط حذف و انحراف معیار و سایر آماره‌های مربوط محاسبه شد. برای آزمون نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک[1] استفاده شد. برای مقایسه نتایج ظروف حاوی گیاه با ظروف شاهد از آزمون t مستقل و برای مقایسه نتایج آزمایش در سطوح شوری مختلف از تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون توکی[2] استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات آب رودخانه کال شور مورد استفاده برای ساخت محلول‌ها

Table 1. Characteristics of the saline water (used in preparing solutions)

EC (µs/cm)	TDS (mg/L)	Concentration of ions (mg/L)			
		Ca	Mg	Na	Cl
48200	30848	898	1215	7996	16227

جدول ۲- مشخصات آب تصفیه نشده در سطوح مختلف شوری (میانگین ۱۵ نمونه)

Table 2. Characteristics of untreated water with different salinity levels (means of measurements taken from 15 samples)

Salinity Level	EC (µs/cm)	Concentration of ions (mg/L)			
		Ca	Mg	Na	Cl
EC~2000	1993	46.3	54.9	434	666.7
EC~2000	6104	64.2	133.9	1154.8	1737.5
EC~2000	10009	102.1	229.4	1822.3	3065.6

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رشد گیاه

گیاه سالیکورنیا اروپایی به خوبی در هر سه سطح شوری مورد مطالعه رشد نمود. ارتفاع گیاه و قطر ساقه در آغاز و پایان آزمایش برای تعیین نرخ رشد گیاه در سطوح شوری مرتبط اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل ۲ ارائه شده است. نرخ رشد در سطوح شوری EC~2000 µs/cm، EC~6000 µs/cm و EC~10000 µs/cm به ترتیب برابر با ۲/۸۷، ۲/۸۲ و ۲/۷۲ سانتی‌متر در هر هفته اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج تحلیل واریانس، تفاوت معنی‌داری در سطوح بین نرخ رشد در سه سطح شوری وجود ندارد. علاوه بر ارتفاع گیاه و قطر ساقه، وزن خشک بیومس تولیدی نیز در پایان

[1] Shapiro Wilk
[2] Tukey

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

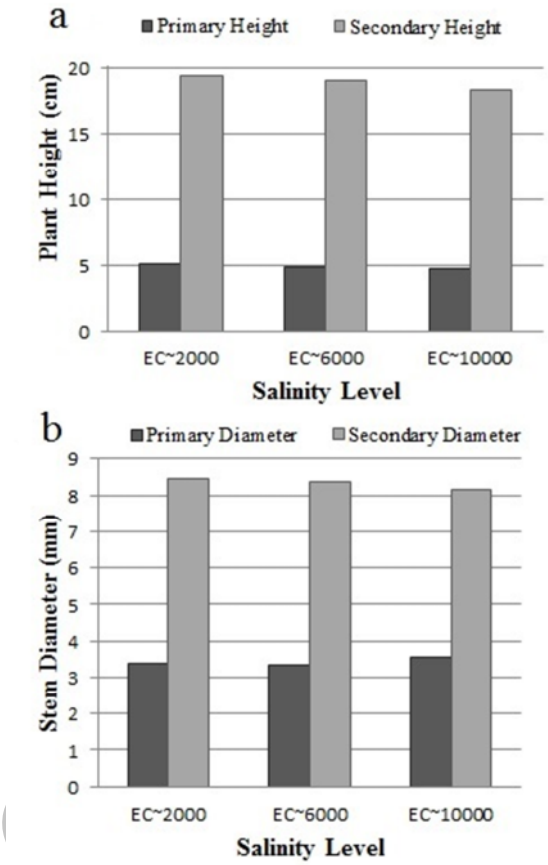


Fig. 2. Plant growth at different salinity levels: a) plant height, and b) stem diameter (n = 24, p < 0.05)

شکل ۲- نمودار رشد گیاه در سطوح مختلف شوری a) ارتفاع گیاه b) قطر ساقه (n=24, p<0.05)

آزمایش اندازه‌گیری شد و در سطوح شوری EC~2000 µs/cm، EC~6000 µs/cm و EC~10000 µs/cm به ترتیب برابر با ۸/۶۵، ۸/۴۷ و ۸/۳۱ گرم وزن خشک به ازای هر گیاه به دست آمد.

۳-۲- کاهش هدایت الکتریکی

نخستین مشخصه مورد مطالعه در این تحقیق هدایت الکتریکی آب است. هدایت الکتریکی یکی از شاخص‌های اصلی سنجش شوری آب است. طبق آزمایش‌های انجام‌شده، اثر گیاه سالیکورنیا اروپایی بر هدایت الکتریکی آب در هر سه سطح قابل ملاحظه بود. به‌طوری‌که این گیاه هدایت الکتریکی آب با EC~2000 µs/cm را بین ۱۳/۹۹ تا ۲۰/۲۴ درصد و به‌طور متوسط ۰/۴۵±۱۷/۰۵ درصد، آب با EC~6000 µs/cm را بین ۱۵/۴۴ تا ۱۷/۸۴ درصد و به‌طور متوسط ۰/۱۹ ± ۱۶/۷۵ درصد و آب با EC~10000 µs/cm را بین ۱۴/۴۲ تا ۲۱/۴۱ درصد و به‌طور متوسط ۰/۴۸ ± ۱۸/۱۱ درصد کاهش دادند. تفاوت این کاهش در مقایسه با کاهش صورت گرفته در ظروف کنترل طبق نتایج آزمون t مستقل در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود و بیانگر تأثیر گیاه بر کاهش هدایت الکتریکی آب است(شکل ۳). بر اساس نتایج تحلیل واریانس، تفاوت معنی‌داری در سطوح مختلف شوری در مورد کاهش هدایت الکتریکی وجود ندارد.

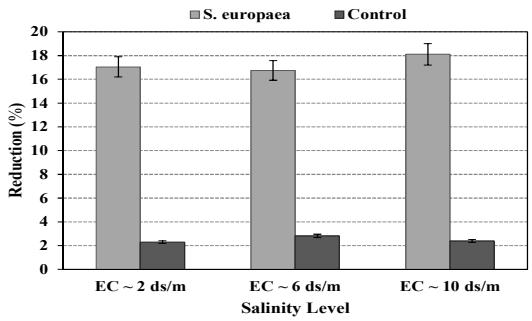


Fig. 3. Effect of Salicornia europaea on reducing EC at different salinity levels (n = 15, p < 0.05)

شکل ۳- تأثیر گیاه سالیکورنیا بر کاهش EC در سطوح مختلف شوری (n=15, p<0.05)

۳-۳- تحلیل عناصر

علاوه بر هدایت الکتریکی، غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و کلراید نیز در آب، قبل و بعد از تصفیه توسط گیاه سالیکورنیا اروپایی اندازه‌گیری و مطالعه شد. در مورد همه این یون‌ها نیز تأثیر گیاه سالیکورنیا قابل‌توجه بوده و طبق نتایج آزمون t مستقل در سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقایسه با کاهش حاصل‌شده در ظروف شاهد، تفاوت معنی‌دار بود (شکل ۴). یون کلسیم در EC~2000 µs/cm بین ۲۵/۰۰ تا ۳۱/۸۲ درصد و به‌طور متوسط ۰/۵۱ ± ۲۸/۷۱ درصد، در EC~6000 µs/cm بین ۲۳/۳۳ تا ۳۱/۲۵ درصد و به‌طور متوسط ۰/۶۵ ± ۲۷/۱۸ درصد و در EC~10000 µs/cm بین ۱۶/۶۷ تا ۵۳/۰۶ درصد و به‌طور متوسط ۲/۸ ± ۴۰/۴۳ درصد کاهش یافت(شکل ۴-a). آنالیز واریانس در مورد این پارامتر تفاوت معنی‌داری بین کاهش در دو گروه EC~2000 µs/cm و EC~6000 µs/cm نشان نداد ولی تفاوت بین این دو گروه در مقایسه با گروه سوم یعنی EC~10000 µs/cm معنی‌دار بود.

Archive

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

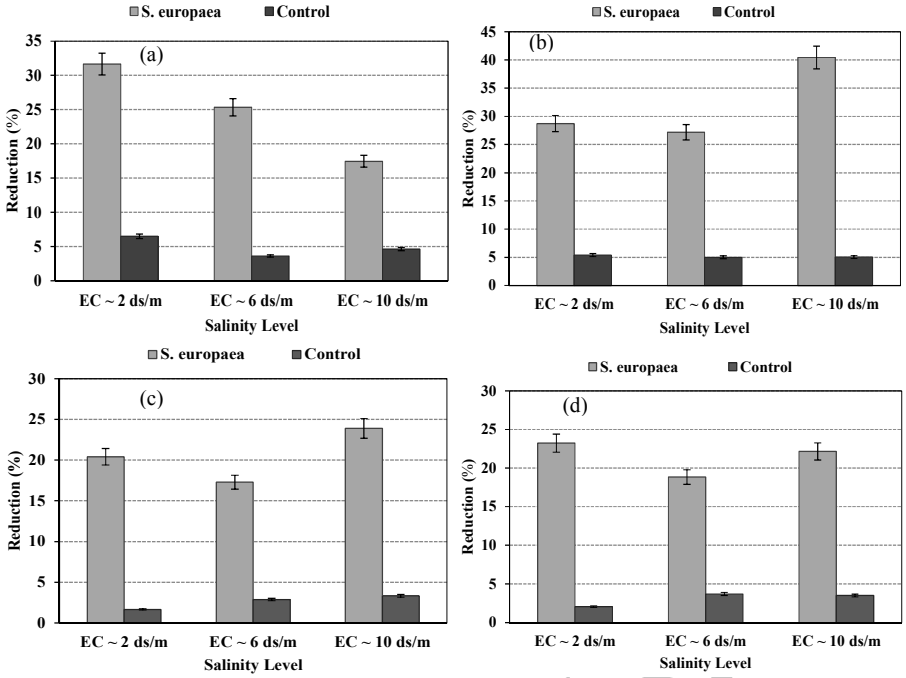


Fig. 4. Effect of *Salicornia europaea* on reducing the dominant ions at different salinity levels: a) Ca, b) Mg, c) Sodium, and d) Chloride ($n = 15$, $p < 0.05$)

شکل ۴- تأثیر گیاه سالیکورنیا بر کاهش غلظت یون‌های غالب در سطوح مختلف شوری a) کلسیم b) منیزیم c) سدیم d) کلراید ($n=15$, $p<0.05$)

تأثیر گیاه سالیکورنیا اروپایی بر یون منیزیم نیز قابل ملاحظه بوده و طبق نتایج آزمون t مستقل در سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقایسه با کاهش ایجاد شده در ظروف شاهد، تفاوت معنی‌دار بود. یون منیزیم در EC~2000 µs/cm به میزان بین ۲۵/۰۰ تا ۳۷/۷۴ درصد و به‌طور متوسط ۰/۹۹ ± ۳۱/۶۴ درصد، در EC~6000 µs/cm بین ۲۱/۳۰ تا ۲۸/۳۰ درصد و به‌طور متوسط به میزان ۰/۶۵ ± ۲۵/۳۵ درصد و در EC~10000 µs/cm بین ۱۳/۹۸ تا ۲۰/۸۳ درصد و به‌طور متوسط به مقدار ۰/۵ ± ۱۷/۴۶ درصد کاهش را نشان می‌دهد(شکل ۴-b). نتایج آنالیز واریانس در مورد این عنصر بیانگر تفاوت معنی‌دار کاهش در سه گروه نسبت به هم است و به نظر می‌رسد با افزایش شوری میزان تأثیر گیاه کاهش می‌یابد. در ارتباط با کاهش سدیم نیز تأثیر گیاه سالیکورنیا اروپایی قابل‌توجه بوده و طبق نتایج آزمون t مستقل در سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقایسه با کاهش ایجادشده در ظروف شاهد، تفاوت معنی‌دار بود. یون سدیم در EC~2000 µs/cm بین ۱۸/۶۷ تا ۲۱/۵۶ درصد و به‌طور متوسط در حدود ۰/۲۵ ± ۲۰/۴۱ درصد، در EC~6000 µs/cm بین ۱۶/۱۶ تا ۱۸/۲۰ درصد و به‌طور متوسط در حدود ۰/۱۷ ± ۱۷/۲۹ درصد و در EC~10000 µs/cm بین ۲۰/۸۴ تا ۲۶/۵۷ درصد و به‌طور متوسط به مقدار ۰/۴۴ ± ۲۳/۸۹ درصد کاهش نشان داد (شکل ۴-c). نتایج آنالیز واریانس در مورد این عنصر نشانگر تفاوت معنی‌دار کاهش در سه گروه نسبت به هم است. در مورد یون کلراید نیز تأثیر گیاه سالیکورنیا اروپایی قابل‌ملاحظه بوده و طبق نتایج آزمون t مستقل در سطح اطمینان ۹۵ درصد در مقایسه با کاهش ایجاد شده در ظروف شاهد، تفاوت معنی‌دار است. یون سدیم(Cl^-) در EC~2000 µs/cm در حدود ۰/۶۴ ± ۲۳/۲۴ درصد، در EC~6000 µs/cm در حدود ۰/۵۲ ± ۱۸/۸۴ درصد و در EC~10000 µs/cm به مقدار ۰/۶۴ ± ۲۲/۱۶ درصد کاهش یافت(شکل ۴-d). نتایج آنالیز واریانس در مورد این عنصر نیز نشانگر تفاوت معنی‌دار کاهش در سه گروه نسبت به هم است.

۳-۴-کاهش نسبت جذب سدیم(SAR)

یکی از شاخص‌های سنجش شوری نسبت جذب سدیم(SAR) است که بیانگر نسبت سدیم به کلسیم و منیزیم است و با رابطه زیر تعریف می‌شود

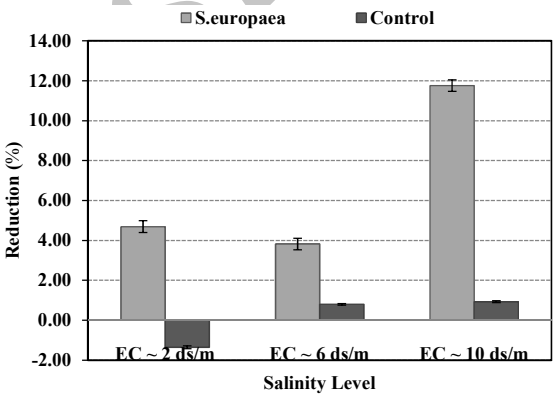
Archive of SID

www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]+[Mg^{2+}]}{2}}} \quad (۱)$$

نتایج آزمایش‌ها، تأثیر مثبت گیاه سالیکورنیا اروپایی در کاهش میزان پارامتر SAR را نشان داد و اختلاف‌ها در مقایسه با ظروف شاهد در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود. نتایج این مقایسه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود درصد کاهش SAR در EC~2000 µs/cm در حدود ۰/۵۳ ± ۴/۶۹ درصد در EC~6000 µs/cm در حدود ۰/۲۹ ± ۳/۸۲ درصد و در EC~10000 µs/cm در حدود ۰/۵۲ ± ۱۱/۷۵ درصد بود که این مقادیر در ظروف شاهد به ترتیب ۰/۱۵ ± ۱/۳۶، ۰/۲۳ ± ۰/۷۹ و ۰/۱۵ ± ۰/۹۲ درصد بود.



شکل ۵- تأثیر گیاه سالیکورنیا بر کاهش SAR در سطوح مختلف شوری (n=15, p<0.05)

Fig. 5. Effect of *Salicornia europaea* on reducing SAR at different salinity levels (n = 15, p < 0.05)

گیاه سالیکورنیا اروپایی برای طیف گسترده‌ای از محلول‌های نمک تحمل نشان داد و چرخه زندگی خود را در تمام محلول‌ها تکمیل نمود (شکل ۲). این طیف گسترده تحمل با توجه به محیط طبیعی زندگی این گیاه که قبلاً در بخش مواد و روش‌ها معرفی شد، قابل پیش‌بینی بود. سالیکورنیا اروپایی در طبیعت تا حدود ۳۶ سانتی‌متر رشد می‌کند (Assadi 2001). بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، این گیاه به‌طور متوسط تا حدود ۵۳ درصد رشد طبیعی، رشد کرده است. این رشد محدود همان‌طور که شلف و همکاران نیز اذعان کرده‌اند ممکن است به دلیل زمان رشد کمتر در دوره آزمایش در مقایسه با دوره رشد طبیعی این گیاه و نیز متفاوت بودن محیط رشد و احیاناً سوء تغذیه ناشی از آن باشد (Shelef et al. 2012).

آزمایش‌های قابلیت سالیکورنیا اروپایی برای کاهش شوری آب در سیستم هیدروپونیک منجر به نتایج امیدوارکننده‌ای شد. این گیاه شوری آب و غلظت عناصر غالب موجود در آب شور را کاهش داد (شکل ۳ و ۴). اگرچه میزان نمک تجمع یافته در بیومس گیاه اندازه‌گیری نشده است ولی با انجام موازنه جرمی می‌توان مقدار تقریبی آن را تخمین زد. با استفاده از موازنه جرمی برای سدیم میزان تقریبی سدیم تجمع یافته در گیاه در سطوح شوری EC~2000 µs/cm، EC~6000 µs/cm و EC~10000 µs/cm به ترتیب برابر ۵/۸۸، ۱۲/۲۸ و ۲۸/۱۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک گیاه به دست می‌آید (با این فرض که کل تجمع در اندام‌های هوایی صورت گرفته باشد). اسلام زاده در سال ۲۰۰۶ میزان تجمع سدیم در اندام‌های هوایی و ریشه را به ترتیب ۳۵/۵ و ۱۲/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک اندازه‌گیری کرده است. نتایج این مقاله در مقایسه با نتایج اسلام زاده در سال ۲۰۰۶ و بالنوکین[1] در سال ۲۰۱۲ نشانگر مقادیر کمتری است که با توجه به طول دوره آزمایش در مقایسه با طول دوره رشد گیاه منطقی به نظر می‌رسد (Eslamzadeh 2006; Balnokin et al. 2010). به عبارتی دیگر با ادامه آزمایش تا اتمام دوره رشد گیاه، رسیدن به میزان تجمع گزارش شده توسط دو محقق فوق امکان‌پذیر خواهد بود.

هدایت الکتریکی و غلظت عناصر غالب آب در ظرف‌های شاهد نیز به میزان اندکی کاهش یافت که می‌تواند ناشی از افزودن آب به‌دلیل جبران تلفات تبخیر و نیز مقداری جذب سطحی بر روی جداره ظروف و ماسه موجود در گلدان‌های مشبک باشد. علاوه بر این، نفوذ و حرکت نمک به سمت بالا و سطح رویین ماسه داخل گلدان‌های مشبک در اثر مویینگی و تبخیر آب و تجمع نمک در سطح بالایی نیز ممکن است پدیده دیگری باشد که باعث می‌شود قسمتی از عناصر را حذف کند. این نمک جمع شده در سطح، ممکن است در حین جبران تبخیر فرصت شسته شدن و حل دوباره را نیافته باشد.

بحث دیگری که در ارتباط با این تحقیق مطرح است، نقش مهم تبخیر از سطح خاک و گیاه در کاستن از تأثیر این گیاه در عملی

[1] Balnokin

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2017.45873

شدن کاهش شوری محلول‌های شور است. تبخیر و تعرق به‌طور طبیعی در جهت عکس هدف یعنی کاهش شوری عمل می‌کنند. بنابراین در کاربردهای عملی‌تر باید تمهیدی برای کاهش آثار آن اندیشید. کاری که در این تحقیق به‌دلیل تمرکز بر روی عملکرد گیاه، با جبران آب تبخیر شده صورت گرفت. برای استفاده‌های عملی می‌توان به روش‌های کاهش تبخیر از سطح خاک مانند استفاده از مواد عایق و روشن در سطح خاک یا استفاده از دانه‌بندی درشت‌تر در سطوح فوقانی برای کاهش اثرات مویینگی توسل جست.

اگرچه هدف این مقاله گیاه‌پالایی نمک از آب‌ها و فاضلاب‌های شور توسط گیاه هالوفیتی سالیکورنیا اروپایی به‌عنوان یک تکنولوژی سبز نمک‌زدایی بود ولی می‌توان از جنبه دیگری نیز به آن نگاه کرد. استفاده از گیاهان جنس سالیکورنیا برای تولید دانه‌های روغنی می‌تواند به‌عنوان کاربرد زمینه‌ای بیومس تولید شده در کنار گیاه‌پالایی نمک، مطرح باشد. به‌عبارت دیگر این گیاه و بسیاری دیگر از هالوفیت‌ها، حتی در صورت عدم موفقیت در گیاه‌پالایی نمک، می‌توانند به‌عنوان گیاهان زراعی در کشاورزی شورزیست مطرح شده و برای استفاده از زمین‌ها و آب‌های شور در جهت تولید غذا و استفاده از آب‌های نامتعارف به‌کار روند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی گیاه سالیکورنیا اروپایی در گیاه‌پالایی نمک از محلول‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. گیاه سالیکورنیا که به‌عنوان یکی از گزینه‌های استفاده زراعی با قابلیت آبیاری توسط آب‌های شور و تولید روغن و استفاده‌های خوراکی مطرح شده است می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی برای گیاه‌پالایی نمک نیز مورد استفاده قرار گیرد. گیاه‌پالایی نمک از محلول‌ها یکی از زمینه‌های تحقیقاتی جدید در گیاه‌پالایی است که با توجه به نیازهای آبی موجود و کاهش منابع آب خام و لزوم استفاده از آب‌های نامتعارف مانند فاضلاب‌های شور ضرورت پیدا کرده و مورد توجه واقع شده است. استفاده از گیاهان زراعی مانند گیاه سالیکورنیا برای این منظور می‌تواند ضمن بهره‌گیری از قابلیت گیاه پالایی این گیاهان استفاده‌های مفید انسانی را نیز به همراه داشته باشد که مشکل دفع بیومس در گیاهان غیرمفید با این کار مرتفع می‌شود. گیاه سالیکورنیا اروپایی در سطوح مختلف شوری مورد مطالعه در این تحقیق به‌خوبی رشد کرد و پتانسیل خوبی برای جذب سدیم و سایر عناصر مرتبط با شوری مانند کلسیم، منیزیم و کلر از خود به نمایش گذاشت. استفاده از این گیاه در سیستم‌های واقعی‌تر مانند وتلندهای مصنوعی به‌اضافه بهینه‌سازی شرایط بهره‌برداری و عملکرد این سیستم‌ها برای غلبه بر مشکلات و محدودیت‌هایی مانند تبخیر از سطوح می‌تواند این گیاه را به‌عنوان یک گزینه جدی برای گیاه‌پالایی نمک مطرح کند. افزون بر این با توجه به تنوع فلور گیاهان هالوفیت در ایران و جهان، جستجو برای یافتن دیگر گیاهان مناسب برای کاهش شوری می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آتی باشد.

References

Abdelgadir, H.A., Johnson, S.D. & Van Staden, J., 2009, "Promoting branching of a potential biofuel crop Jatropha curcas L. by foliar application of plant growth regulators", *Plant Growth Regulation*, 58(3), 287-295.

Albaho, M.S. & Green, J.L. & Suaeda S., 2000, "A desalinating companion plant for greenhouse tomato", *Hortscience*, 35(4), 620-623.

Assadi, M., 2001, *Flora of Iran*, Research Institute of Farests and Rangelands, Iran. (In Persian)

Balnokin, Y., Nikolai, M., Larisia, P., Alexander, T., Sofya, U., Christophe, L. et al., 2010, "Use of halophytic plants for recycling NaCl in human liquid waste in a bioregenerative life support system", *Advances in Space Research*, 46, 768-774.

Brown, J.J., Glenn, E. P., Fitzsimmons, K.M. & Smith, S.E., 1999, "Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent", *Aquaculture*, 175, 255-268.

Buhmann, A. & Papenbrock, J., 2012, "Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives", *Environmental and Experimental Botany*, 92, 122-133.

Buhmann, A.K., Wailer, H., Wecker, B. & Papenbrock, J., 2015, "Optimization of culturing conditions and selection of species for theuse of halophytes as biofilter for nutrient-rich saline water", *Agricultural Water Management*, 149,102-114.

Archive of SID
www.SID.ir

Ceotto, E., 2008, "Grasslands for bioenergy production, A review", *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 47-55.

Chappell, J., 1997, *Phytoremediation of TCE using populus*, US Environmental Protection Agency, Technology Innovation Office, USA.

Davy, A.J., Bishop, G.F. & Costa, C.S.B., 2001, "Salicornia L.(Salicornia pusilla J. Woods, S. ramosissima J. Woods, S. europaea L., S. obscura PW Ball & Tutin, S. nitens PW Ball & Tutin, S. fragilis PW Ball & Tutin and S. dolichostachya Moss)", *Journal of Ecology*, 89(4), 681-707.

Eslamzadeh, T., 2006, "Salicornia europaea, a bioaccumulator in Maharloo salt lake region", *International Journal of Soil Sciences*, 1(1), 75-80.

Flowers, T., Hajibagheri, M. & Clipson, N., 1986, "Halophytes". *Quarterly Review of Biology*, 61(3), 313-337.

Glenn, E.P., Mckeon, C., Gerhart, V., Nagler, P.L., Jardan, F. & Artiola, J., 2009, "Deficit irrigation of a landscape halophyte for reuse of saline waste water in a desert city", *Landscape and Urban Planning*, 89, 57-64.

Glenn, E.P., Oleady, J.W., Carolyn Wastson, M., Lewis Thompson, T. & Kuehi, R.O., 1991, "Salicornia bigelovii Torr.: An oilseed halophyte for seawater irrigation", *Science*, 251(4997), 1065-1067.

Hillel, D., 2000, Salinity management for sustainable Irrigation: Integrating science, environment, and economics, World Bank Publications.

Initiative, W.E.F.W., 2012, *Water security: The water-food-energy-climate nexus*, Island Press, USA.

Kafi, M., Asadi, H., & Ganjeali, A., 2010, "Possible utilization of highsalinity waters and application of low amounts of water for production of the halophyte Kochia scoparia as alternative fodder in saline agroecosystems", *Agricultural Water Management*, 97, 139-147.

KE-FU, Z., 1991, "Desalinization of saline soils by Suaeda salsa", *Plant and Soil*, 135, 303-305.

Khan, M.A. & Qaiser, M., 2006, "Halophytes of Pakistan: Characteristics, distribution and potential economic usages, in Sabkha ecosystems", Springer, Netherlands.

Klomjek, P. & Nitisoravut, S., 2005, "Constructed treatment wetland: A study of eight plant species under saline conditions", *Chemosphere*, 58, 585-593.

Nitisoravut, S. & Klomjek, P., 2005, "Inhibition kinetics of salt-affected wetland for municipal wastewater treatment", *Water Research*, 39, 4413-4419.

Ouyang, Y., 2002, "Phytoremediation: Modeling plant uptake and contaminant transport in the soil–plant–atmosphere continuum", *Journal of Hydrology*, 266(1-2), 66-82.

Rabhi, M., Ferchichi, S., Jouini, J., Hamrouni, M.H., Koyro, H.W. Ranieri, A. et al. 2012, "Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte Sesuvium portulacastrum L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop", *Bioresource Technology*, 101, 6822-6828.

Ravindran, K.C., Venkatesan, K., Balakrishnan, V., Chellappan, K. P. & Balasubrama nian, T., 2007, "Restoration of saline land by halophytes for Indian soils", *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 2661-2664.

Shelef, O., Gross, A., & Rachmilevitch, S., 2012, "The use of Bassia indica for salt phytoremediation in constructed wetlands", *Water Research*, 46, 3967-3976.

Webb, J.M., Quinta, R., Papadimitriou, S., Norman, L., Rigby, M., 2012, "Halophyte filter beds for treatment of saline wastewater from aquaculture", *Water Research*, 46, 5102-5114.

Weber, D. R., Ansari, B., and Khan, M.A., 2007, "Potential of halophytes as source of edible oil", *Journal of Arid Environments*, 68(2), 315-321.

Wu, Y., Tam, N.F.Y. & Wong, M.H., 2008, "Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms", *Marine Pollution Bulletin*, 57, 727-734.

Yensen, N.P., 2006, "Halophyte uses for the twenty-first cetury", *Ecophysiology of High Salinity Tolerant Plants*, 40, 367-396.

Zhou, Y., Tigane, T., Li, X., Truu, M., Truu, J. & Mander, Ü., 2013, "Hexachlorobenzene dechlorination in constructed wetland mesocosms", *Water Research*, 47, 102-110.

Zorrig, W., Rabhi, M., Ferchichi, S., Smaoui, A. & Abdelly, Ch., 2012, "Phytodesalination: A solution for salt-affected soils in arid and semi-arid regions", *Journal of Arid Land Studies*, 22(1), 299 -302.

Archive of SID
www.SID.ir