

## حذف هم‌زمان شوری و بار آلی طی فرایند گیاه‌پالایی

حسین کلهر<sup>۱</sup>، حسین گنجی‌دوست<sup>۲\*</sup>، بیتا آیتی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس  
۲. استاد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس  
۳. دانشیار مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۸/۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۶

### چکیده

در این تحقیق عملکرد دو گیاه وتیور و نخل مرداب در حذف هم‌زمان شوری و بار آلی بررسی شده است. این گیاهان با پنج کیفیت مختلف با شوری به ترتیب ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ dS/m و COD به ترتیب ۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰، ۷۵ و ۰ mg/L و آب خالص (به‌عنوان شاهد) آبیاری شد. هر دو گیاه در راکتورهایی با شوری کمتر عملکرد بهتری در حذف شوری و بار آلی نشان دادند. نشانه‌های مسمومیت شوری شامل سوختگی و پلاسیدگی در برگ‌ها در وتیور و نخل مرداب به ترتیب در هدایت الکتریکی بالاتر از ۷/۵ و ۵ dS/m مشاهده شد. در وتیور میزان کاهش بار آلی در تیمارهای مختلف از ۶۰٪ الی ۱۲٪ متغیر بود و میزان کاهش شوری نیز در تیمارهای گوناگون از ۵۳٪ الی ۴٪ مشاهده شد. برای نخل مرداب میزان کاهش بار آلی در تیمارهای مختلف و از ۴۹٪ الی ۵٪ متغیر بود و میزان کاهش شوری نیز در تیمارهای گوناگون از ۲۹٪ الی ۱٪ مشاهده شد. طبق نتایج برآزش رگرسیون تعمیم‌یافته، وجود بار آلی بر مشخصات مورفولوژیکی گیاهان تأثیر قابل‌توجهی نداشت و تنها میزان شوری فاضلاب کنترل‌کننده مشخصات رشدی گیاهان بود.

### کلیدواژه

گیاه پالایی، فاضلاب شور، نخل مرداب، وتیور.

### ۱. سرآغاز

میکروارگانیزم‌ها را نیز کاهش می‌دهد. به همین دلیل، روش‌های مختلف بیولوژیکی و فیزیکی-شیمیایی در تصفیه فاضلاب‌های شور مطالعه شده است (Aloui et al., 2009). مسئله شوری آب در کشور مسئله‌ای اساسی و قابل توجه است. طبق تعریف انجمن بین‌المللی کاوش‌های دریایی در سال ۱۹۰۲ مقدار کل مواد جامد حل‌شده در یک کیلوگرم آب بر حسب گرم هنگامی که تمام کربنات‌ها اکسید شده، برم و ید با کلرید جایگزین شده و تمام مواد آلی اکسید شده باشد، شوری نام دارد. این تعریف کارآمد است اما استفاده از آن برای طراحی آزمایش مشکل است (Smith et al., 2006).

نمک‌های معدنی یکی از آلاینده‌های اصلی آب‌های سطحی و زیرزمینی در دنیاست. وجود این نمک‌ها علاوه‌بر ایجاد شوری در آب، جنس خاک را تغییر می‌دهد و رشد محصولات کشاورزی را با مشکل مواجه می‌کند (Smith et al., 2006). حضور بیش از حد آن‌ها علاوه‌بر ایجاد مسمومیت، پتانسیل آب را کاهش می‌دهد. به‌رغم وجود مولکول‌های آب در محیط به دلیل آنکه ظرفیت واکنش این مولکول‌ها در اشغال یون‌های موجود قرار می‌گیرد، گیاه قادر به جذب آب نیست و با نوعی تنش کمبود آب نیز مواجه می‌شود (Hasegawa et al., 2000). شوری فعالیت

می‌کند، فاضلاب‌های شور به‌طور معمول به روش‌های فیزیکی - شیمیایی تصفیه می‌شود. روش‌های اصلی مورد استفاده شامل تبخیر، تبادل یونی، الکترودیالیز، اسمز معکوس و روش‌های شیمیایی است. روش‌های شیمیایی بیشتر برای حذف نمک‌های سولفاتی، کربناتی یا نمک‌های حاوی منیزیم به‌کار می‌رود (Kim, 2011). روش‌های حرارتی قابلیت بهره‌برداری بلندمدت، تولید آب با کیفیت بالا، نیاز به نگهداری کمتر و هزینه نگهداری کمتر دارد. با این حال مصرف انرژی بالا، راندمان پایین، خوردگی تجهیزات، نیاز به زمین وسیع و هزینه اولیه بیشتر از معایب آن به‌شمار می‌رود. روش‌های غشایی، نسبت به روش‌های حرارتی، نیاز به انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه کمتری دارد، بازدهی بهتری دارد و می‌توان در دمای محیط از آن استفاده کرد. از معایب سیستم‌های غشایی نیاز به تخلیه و تعویض غشا، وابستگی نوع غشا به میزان کلر موجود در آب و نیاز به شستشو و نگهداری دقیق است (Younos and Tulou, 2005). گیاه‌پالایی روشی ارزان، در دسترس و دوستدار محیط‌زیست برای حذف آلاینده‌های مختلف از خاک و فاضلاب شناخته شده است (Almansoori et al., 2015). منظور از گیاه‌پالایی کاربرد گیاهان برای رفع یا کنترل آلودگی‌های آب و خاک است. گیاهان با استفاده از سه اندام ریشه، ساقه و برگ آلاینده‌های گوناگون را از خاک یا آب دریافت و با انتقال به بافت‌های خود آن را جمع‌آوری می‌کنند (Guittouy-Philippe et al., 2015). نمک‌های محلول، فلزات سنگین، مشتقات نفت و روغن و مواد رادیواکتیو از جمله آلاینده‌هایی است که تاکنون با استفاده از این روش از محیط‌های مختلف حذف شده است. در دو دهه گذشته، استفاده از گیاه‌پالایی در تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، همچنین تصفیه خاک‌های کم‌عمق و آلوده رونق گرفته است. خورشید تأمین‌کننده اصلی انرژی در این روش است و به لحاظ نوع مواد ثانویه ناشی از تصفیه بسیار پاک است (Zhang et al., 2010).

هدف از این تحقیق عبارت است از مقایسه عملکرد دو

صنایع بسیاری از جمله غذایی، چرم‌سازی و دباغی و پالایشگاه‌های نفت فاضلاب شور تولید می‌کنند. صنایع غذایی به دو منظور عمده مزه‌دهی و نگهداری از نمک NaCl استفاده می‌کنند. بیشترین مقدار نمک در صنایع غذایی و کشاورزی در تولید کنسروهای مختلف، صنایع لبنی، تولید مواد غذایی شور و نمک سود، همچنین فرآوری ماهی استفاده می‌شود. آب دریا و اقیانوس نیز که هنگام تخلیه ماهی در محل کارخانه جمع‌آوری می‌شود به دلیل حضور غلظت قابل‌ملاحظه نیتروژن، پروتئین و فسفر جزو فاضلاب‌های شور به‌شمار می‌رود. در صنایع چرم‌سازی و دباغی برای پیشروی مناسب و به‌منظور رسیدن به محصولی یکنواخت از نمک NaCl استفاده می‌شود. فاضلاب قسمت‌های مختلف دباغی حاوی نمک تا میزان ۸۰ g/L است (Lefebvre and Moletta, 2006).

سدیم یا کلرید عامل محدودکننده تصفیه بی‌هوازی است (Zhang et al., 2012). غلظت بالای نمک با افزایش فشار اسمزی باعث پلاسمولیز شدن سلول‌ها و مرگ میکروارگانیسم‌های موجود در فاضلاب می‌شود. کوچک شدن اندازه و تراکم میکروارگانیسم‌ها در آب شور به‌همین دلیل است (Miao et al., 2015). برخلاف تأثیر معکوس نمک روی فعالیت باکتری‌ها، استفاده از فرایند لجن فعال برای فاضلاب‌های با شوری حداکثر ۸ g/L مورد قبول است. بازده در این حالت به نوع میکروارگانیسم‌ها، فاز لجن و سرعت تدریجی افزایش نمک در طول دوره سازگاری بستگی دارد (Liu et al., 2015). در سیستم SBR حذف نیتروژن و فسفر به دلیل تأثیر معکوس نمک بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، در فاضلاب شور کاهش می‌یابد (Uygun, 2006). افزایش شوری تا ۳۵ g/L در MBR علاوه بر کاهش راندمان حذف نیتروژن، بازدهی حذف پلیمرهای زیستی، اسیدهای هیومیک و مواد آلی با جرم مولکولی پایین را به شدت کاهش می‌دهد (Johir et al., 2013).

از آنجا که نمک فرایندهای بیولوژیکی را دچار اختلال

مقادیر مختلف بار آلی به هر گیاه، همچنین مقایسه مقادیر حذف در تانک‌های حاوی گیاه با تانک‌های شاهد بود. پایلوت بر اساس روش غرقابی دائم تنظیم شد. در این روش از سکوی نگهدارنده‌ای استفاده شد که معمولاً یک صفحه گیاه را نگه می‌دارد و مستقیماً روی محلول تقویت‌شده شناور است. یک پمپ هوا نیز علاوه بر تأمین اکسیژن مورد نیاز ریشه‌ها، اختلاط در محلول را نیز فراهم می‌کرد (Schwarz, 1995).

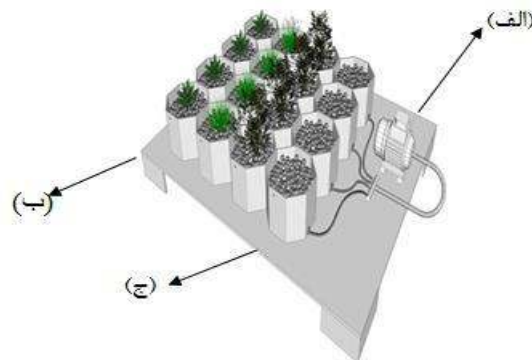
برای اندازه‌گیری COD و شوری به‌ترتیب از اسپکتروفتومتر Hach مدل DR 4000 و EC متر Martini مدل MI 805 استفاده شد. سنجش قطر ساقه با کولیس ورنیه با دقت ۰/۰۱ سانتی‌متر و سنجش سطح برگ با دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ DeltaT area meter mk2 صورت گرفت. برای خشک‌کردن برگ از آون ATF و برای توزین از ترازوی دیجیتالی مدل PJ300 ساخت شرکت Mettler با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. به‌منظور برقراری هدایت الکتریکی در محلول از NaCl محصول Merck و برای تأمین COD مورد نیاز از نشاسته فوق خالص شرکت Merck و برای تهیه محلول‌ها از آب مقطر Pokon دو بار تقطیر استفاده شد. گیاهان با کود مایع ساخت کشور هلند تغذیه شد. نکته قابل ذکر اینکه تمامی آزمایش‌ها با سه بار تکرار انجام شد.

گیاه و تیور و نخل مرداب در حذف هم‌زمان بار آلی و شوری فاضلاب و نیز مشخصات مورفولوژیکی دو گیاه تحت تأثیر تنش‌های شوری و بار آلی. با اطلاعات به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان علاوه بر تصفیه زیستی و ارزان فاضلاب شور، به هدف‌های جانبی مانند ایجاد زیبایی، تولید خوراک برای دام‌ها، همچنین جلوگیری از فرسایش خاک دست یافت.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد و تجهیزات

بخش راه‌اندازی سیستم شامل تهیه گیاه بالغ، ساخت پایلوت آزمایشگاهی، آماده‌سازی فاضلاب مصنوعی، تعیین غلظت‌های مختلف فاضلاب، تعیین تعداد گیاهان در هر تانک، انتقال گیاهان به پایلوت و در نهایت اضافه‌کردن فاضلاب به راکتورها بود. به‌منظور اطمینان از کارایی و سلامت گیاهان، به گیاهان ریشه‌دار با عمر حداقل دو ماه نیاز بود. به‌همین منظور، با مراجعه به مزرعه و تیور متعلق به انجمن ایرانی ترویج و توسعه گیاه و تیور در تنکابن، گیاه مورد نیاز تهیه شد. نخل مرداب نیز از مرکز پرورش گیاهان آپارتمانی سیحون تأمین و به آزمایشگاه منتقل شد. پایلوت دارای هفده راکتور ناپیوسته با حجم ۱/۷ لیتر و از جنس پلکسی‌گلاس بود (شکل ۱). هدف از کاربرد چنین پایلوتی ایجاد بستر مناسب برای شبیه‌سازی تالاب مصنوعی، وجود تانک‌های متعدد به‌منظور اعمال سطوح مختلف شوری و



شکل ۱. پایلوت مورد استفاده در تحقیق الف) پمپ هوا، ب) راکتورهای حاوی گیاه، ج) راکتور شاهد

## ۲.۲. روش کار

بررسی شود. در هر راکتور میزان ۵ mL کود مایع برای تأمین عناصر مغذی و حفظ نسبت NPK به مقدار ۵:۷:۷ مورد نیاز گیاه اضافه شد. یکبار کوددهی با این میزان برای دوره دومه رشد گیاه کفایت می‌کرد که بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده کود انتخاب شد. در جدول ۲ آرایش راکتور و نحوه قرارگیری راکتورهای شاهد و حاوی گیاه ارائه شده است.

مطابق جدول ۱، پنج نوع فاضلاب با مقادیر متفاوت هدایت الکتریکی و بار آلی به صورت مصنوعی تهیه و در طول چهار دوره به ترتیب ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روزه بررسی شد. هر دو گیاه وتیور و نخل مرداب علاوه بر تیمار با پنج نوع فاضلاب ذکر شده، با تیمار آب مقطر به عنوان شاهد نیز آبیاری شد. تعداد پنج راکتور فاقد گیاه نیز با فاضلاب‌های ذکر شده آبیاری شد تا تأثیر صرف هوادهی بر کاهش میزان پارامترهای هدایت الکتریکی و COD

جدول ۱. مقدار شوری و COD در محلول‌های مختلف

هدایت الکتریکی (μS/cm)	COD (mg/L)	شماره فاضلاب
۰	۳۰۰	۱
۲۵۰۰	۲۲۵	۲
۵۰۰۰	۱۵۰	۳
۷۵۰۰	۷۵	۴
۱۰۰۰۰	۰	۵

جدول ۲. چیدمان راکتورها و نوع فاضلاب و گیاه هر راکتور

بدون گیاه ۱	نخل مرداب ۱	وتیور ۱
بدون گیاه ۲	نخل مرداب ۲	وتیور ۲
بدون گیاه ۳	نخل مرداب ۳	وتیور ۳
بدون گیاه ۴	نخل مرداب ۴	وتیور ۴
بدون گیاه ۵	نخل مرداب ۵	وتیور ۵
-	نخل مرداب در آب خالص	وتیور در آب خالص

## ۳.۲. تعیین تعداد گیاهان در هر راکتور

فرایند خاک‌سازی به خاک برمی‌گردد. برای شبیه‌سازی گیاه‌پالایی گیاهان متفاوت، از توابع رشد و مرگ مختلفی استفاده شد. با توجه به اینکه حذف مواد آلی در ناحیه ریزوسفری انجام می‌شود، پایلوت باید به گونه‌ای طراحی می‌شد تا درصد حجمی ریزوسفر در هر تانک، برابر درصد حجمی ریزوسفر در تالاب مصنوعی باشد. از آنجا که ۲٪ تا ۳٪ حجم کل خاک، خاک ریزوسفری است (Lavelle

برای محاسبات این پژوهش از مدل مصلحی مصلح‌آبادی و همکاران (۱۳۹۰) استفاده شد. در این مدل همان‌طور که ریشه‌های جدید در خاک نفوذ می‌کند و فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد، خاک اطراف ریشه نیز تبدیل به ریزوسفر می‌شود. با مرگ ریشه، ریشه و ریزوسفر مربوط به آن به ناحیه مرگ ریشه منتقل می‌شود که سرانجام طی

برابر ۱/۲ و در نتیجه میزان ریشه مورد نیاز حدود ۴۳/۴۷ میلی‌لیتر شد. حجم ریشه یک شاخه و تیور بالغ بعد از دو ماه آبیاری با فاضلاب شور حاوی بار آلی  $14/5 \text{ cm}^3$  است (Wang et al., 2009). در نتیجه، تعداد و تیور در هر تانک برابر ۳ در نظر گرفته شد. حجم ریشه نخل مرداب رشد یافته در فاضلاب شهری در شرایط بالغ  $16/11 \text{ cm}^3$  است (Bhatia and Goyal, 2017).

### ۳. نتایج

#### ۱.۳. توانایی و تیور در حذف شوری و بار آلی

همان‌طور که در شکل ۲ الف مشاهده می‌شود، گیاه و تیور پس از اعمال فاضلاب حاوی بار آلی تنها، COD موجود را با شیب تند اما کاهشی حذف کرد. طبق نتایج حاصل، روند افزایش راندمان حذف تا انتهای روز هشتم ادامه یافت، اما پس از ده روز از شروع بارگذاری به راندمان تقریباً ثابتی رسید و روند کاهش COD با شیب بسیار کمی ادامه پیدا کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، گیاه و تیور در مقایسه با راکتور شاهد (فاقد گیاه)، عملکرد قابل توجهی در حذف بار آلی نشان داده است. لازم به ذکر است که در این تیمار آثار سمی بودن در برگ، ساقه و ریشه هیچ کدام از گیاهان مشاهده نشد. با وجود عدم مشاهده آثار سمیت در گیاهان کاهش تدریجی میزان حذف در هر راکتور نشان‌دهنده اشباع بافت‌ها یا اتمام ظرفیت جذب سطحی ریشه از مواد آلی است. از سوی دیگر، تعادل ماده آلی موجود در فاضلاب محیطی ریشه و مواد غذایی مورد مصرف باکتری‌های ریزوسفری دلیل دیگری بر کاهش تدریجی راندمان حذف بار آلی در هر راکتور نسبت به زمان است (چکشیان خراسانی و یغمایی، ۱۳۹۰). پس از رسیدن به شرایط پایدار حذف بار دوره‌های بعدی شروع شد. در دور دوم تا چهارم گیاه با شیب و راندمان نهایی کمتری بار آلی را حذف کرد.

شکل ۲ ب حذف بار آلی و شوری در  $\text{mS/cm}$   
 $\text{COD}=225 \text{ mg/L}$  و  $\text{EC}=2500$  را نشان می‌دهد.

(and Spain, 2001)، باید تعداد گیاهان به گونه‌ای طراحی شود تا حجم ریزوسفر ایجاد شده ۳٪ حجم داخلی راکتور باشد. اندازه‌گیری دقیق تجربی حجم ریزوسفر بسیار مشکل است. در تحقیقات مختلف روش‌هایی برای تخمین درستی از این پارامتر ارائه شده است (رابطه ۱). برای محاسبه حجم لایه‌های ریزوسفر، سیستم استوانه‌ای با شعاع  $r$  و لایه‌هایی به ضخامت  $RT$  در نظر گرفته شد که در آن  $i$  معرف لایه نام است و از لایه‌های داخلی شروع می‌شود. با واحد فرض کردن یک ناحیه ریزوسفر، حجم ریزوسفر از رابطه (۲) محاسبه شد.

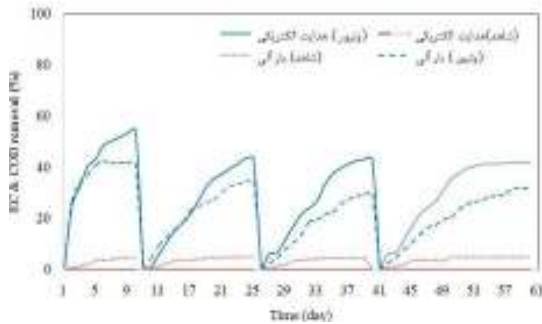
$$V_i = \pi L ([r+(i)RT]^2 - [r+(i-1)RT]^2) \quad (1)$$

$$V_i = \pi L ([r+RT]^2 - [r]^2) \quad (2)$$

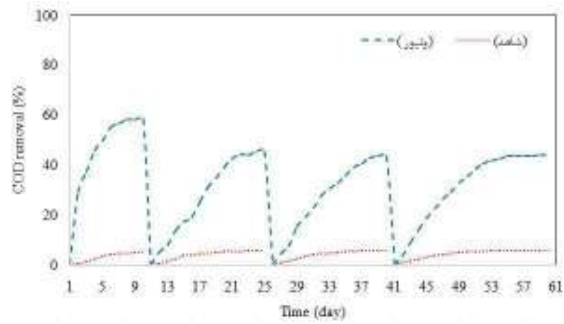
به علاوه، به رابطه‌ای بین حجم ریشه و حجم ریزوسفر نیاز بود. در این رابطه فرض بر این بود که فاکتور مهم در تولید ریزوسفر، تغییر در طول ریشه است و نه در قطر آن. با توجه به این فرض، ضریب حجمی ویژه ریزوسفر برای هر لایه از رابطه (۳) به دست آمد که در آن  $\alpha$  نسبت شعاع به ضخامت لایه  $i$  ریزوسفر ( $r/RT$ ) است.

$$\beta_i^{\max} = (2\alpha + 2i - 1) / \alpha^2 \quad (3)$$

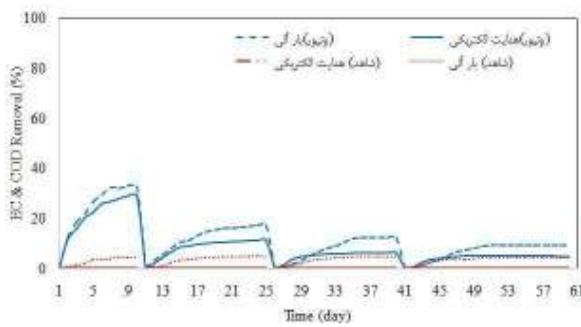
برای سیستم‌های با چگالی کم ریشه، رابطه بالا تخمین خوبی از حجم ریزوسفر خواهد بود اما در سیستم‌های با چگالی بالای ریشه که برای گیاه‌پالایی مورد نیاز است، این رابطه مقادیری بیش از مقدار واقعی را نشان می‌دهد که این امر به دلیل همپوشانی لایه‌های ریشه‌های مختلف است (White and Brown, 2010). برای فرض، برای در نظر گرفتن این همپوشانی از مقدار  $\beta_{\max}$  برابر ۰/۴ استفاده می‌شود (عزتیان، ۱۳۸۶). با فرض یک لایه ریزوسفر (Thoma et al., 2004) و برآوردهای موجود از طول و شعاع ریشه، همچنین ضخامت لایه ریزوسفر، تعداد گیاهان در هر تانک برای دو گیاه نخل مرداب و تیور به دست آمد. با توجه به فرض تحقیق مبنی بر توانایی گیاهان به حذف مواد آلی و با در نظر گرفتن ضریب حجمی ویژه ریزوسفر  $\beta_{\max}=0/4$ ، مقدار نهایی ضریب حجمی ریزوسفر



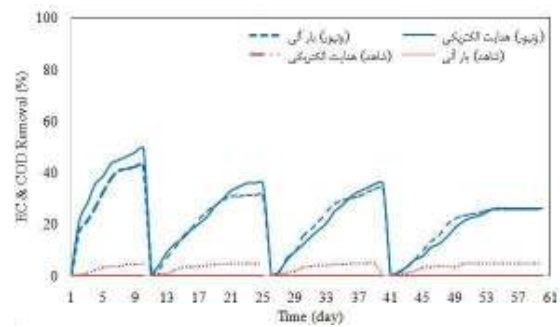
(ب)



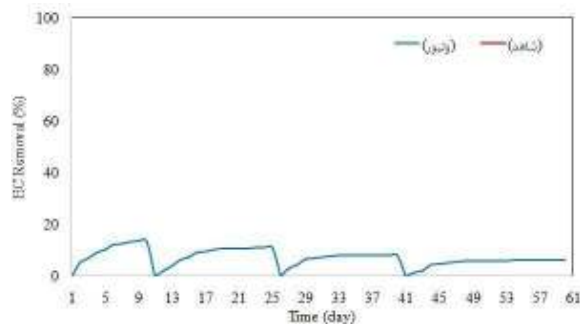
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۲. حذف هدايت الکتریکي و بار آلي در گياه وتيور

الف)  $EC=0$  dS/m و  $COD=300$  mg/L (ب)  $EC=2500$  mS/cm و  $COD=225$  mg/L (ج)  $EC=5000$  mS/cm و  $COD=150$  mg/L (د)  $COD=0$  mg/L و  $EC=10000$  mS/cm (ه)  $EC=7500$  mS/cm و  $COD=75$  mg/L

دور دوم و سوم مشاهده نشد. نکته جالب توجه در اين نمودار، افزايش زمان رسيدن به حد نهايي تصفيه، کاهش راندمان و کاهش شيب حذف شوري و بار آلي در دور دوم و سوم نسبت به بارگذاري اوليه است. همچنين، اختلاف ميان راندمان راکتور فاقد گياه و راکتورهاي داراي گياه در اين نمودار نيز کاملاً مشهود است. از سوي ديگر، مشاهده

همان گونه که ملاحظه مي شود، حذف شوري در هفته اول بيش از بار آلي است. در طول دوره رسيدن به شرايط پايدار در دور دوم پانزده روز و دور سوم نيز نتايج مشابهي به دست آمد. علي رغم عدم مشاهده آثار سمی در گياه، راندمان در دور دوم کمتر از دور اول بود ولي در ادامه تفاوت چنداني ميان راندمان حذف بار آلي و شوري در

در شکل ۲ میزان حذف شوری در راکتور حاوی  $EC=10 \text{ ds/m}$  ارائه شده است. طبق نتایج حاصل شوری در ابتدای واکنش با نرخ بیشتری حذف می‌شود، به شکلی که در دور اول تا سوم به ترتیب پس از ۱۰، ۵ و ۴ روز میزان نهایی حذف مشاهده شده است. در این راکتور آثار سوختگی به شکل پلاسیدگی و زردی در سطح وسیع‌تری از برگ و ساقه مشاهده شد، به طوری که در انتهای دور سوم در عمل هیچ نقطه سبزرنگی در گیاه وجود نداشت که نشانگر امکان ادامه فتوسنتز و جذب آب از پایلوت باشد.

### ۲.۳. توانایی نخل مرداب در حذف شوری و بار آلی

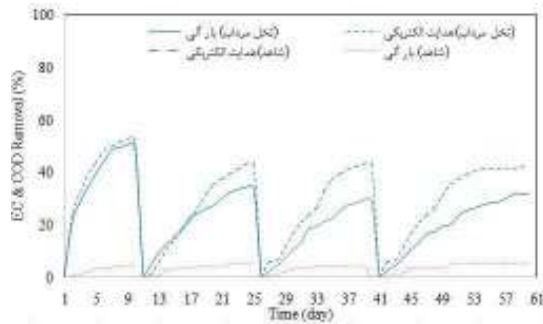
نتایج حاصل از اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و بار آلی در راکتورهای حاوی گیاه نخل مرداب و شاهد (فاقد گیاه) در طول چهل روز برای راکتورهای حاوی هدایت الکتریکی صفر، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و دارای COD به ترتیب ۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰، ۷۵ و ۰ میلی‌گرم بر لیتر در شکل ۳ ارائه شده است.

در شکل ۳ الف میزان و سرعت حذف بار آلی در راکتورهای با COD معادل  $300 \text{ mg/L}$  ارائه شده است. گیاه نخل مرداب در روز هفتم تقریباً به راندمان نهایی خود در حذف بار آلی رسید. مقایسه راکتورهای حاوی گیاه نخل مرداب نشان می‌دهد که میزان حذف در تیمار مذکور، نسبت به نمونه شاهد اختلاف زیادی دارد و تأثیر وجود گیاهان در حذف بار آلی کاملاً مشهود است. در سه تکرار بعدی تنش بار آلی وارد بر گیاه نخل مرداب موجب کاهش شیب حذف بار آلی شد و زمان رسیدن به حذف نهایی را بیشتر می‌نماید. میزان حذف در دور دوم کمتر از دور اول است. این نشان‌دهنده عملکرد بهتر گیاه در زمان بارگذاری اولیه و سازگار شدن گیاه پس از ۲۵ روز از شروع آزمایش است.

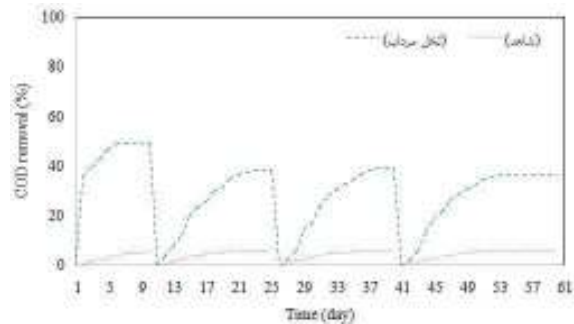
می‌شود که کاهش بار آلی و بالابردن هدایت الکتریکی فاضلاب نسبت به راکتور قبل موجب کاهش راندمان حذف ده روزه گیاه و تیور به میزان حدود ۱۰٪ شده است. گیاه در این بارگذاری رفتاری مشابه با راکتور اول نشان داده است. تنش شوری، میزان حذف بار آلی را تنها اندکی کاهش داد. به عبارتی، تنش هدایت الکتریکی تا  $2/5 \text{ ds/m}$  بر رفتار گیاه و تیور تأثیری نداشته است. نکته قابل توجه، افزایش راندمان حذف بار آلی در بارگذاری سوم، نسبت به بارگذاری دوم است؛ به این معنا که گیاه در فاصله ۱۰ تا ۲۵ با تنش‌های محیطی سازگار شد که با نتایج چکشیان خراسانی و یغمایی (۱۳۹۰) مشابه است.

در شکل ۲ ج میزان و سرعت حذف بار آلی در راکتورهای با بار آلی  $150 \text{ mg/L}$  و هدایت الکتریکی  $5000$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. گیاه و تیور نیز با کاهش اندک راندمان حذف بار آلی روبه‌رو بوده است، ولی از لحاظ شکل ظاهری تغییری در وضعیت گیاه و تیور مشاهده نشد. با توجه به عدم مشاهده آثار سمی و شباهت فرم نمودارهای راندمان حذف با راکتورهای پیشین می‌توان گفت آستانه تحمل شوری در تیور بیش از  $5 \text{ ds/m}$  است. با این حال، تجمع نمک در بافت‌ها راندمان حذف در دور دوم و سوم بارگذاری را تا ۷٪ نسبت به راکتور قبلی کاهش داده است.

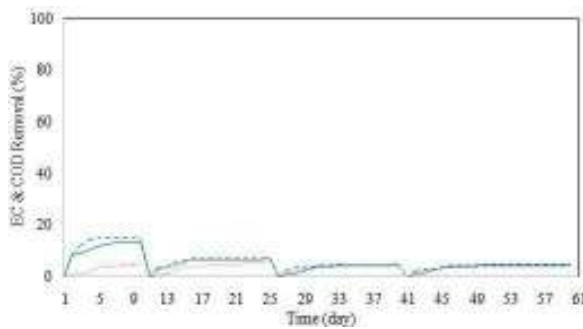
در شکل ۲ د میزان و سرعت حذف بار آلی در راکتورهای با بار آلی  $75 \text{ mg/L}$  و هدایت الکتریکی  $7500$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. گیاه و تیور در روز پنجم به میزان حذف نهایی خود رسیده است. کاهش شدید راندمان حذف نسبت به راکتورهای قبلی و مشاهده آثار سوختگی در برگ‌ها حاکی از تأثیر تنش شوری بر گیاه است؛ بنابراین، آستانه تحمل شوری گیاه باید غلظتی در حدود  $5 \text{ ds/m}$  تا  $7/5 \text{ ds/m}$  باشد. همچنین، افت شدید راندمان در سه دوره متوالی حاکی از کاهش عملکرد گیاه در جذب آب و مواد محلول در آن است (جلالی و همایی، ۱۳۸۹).



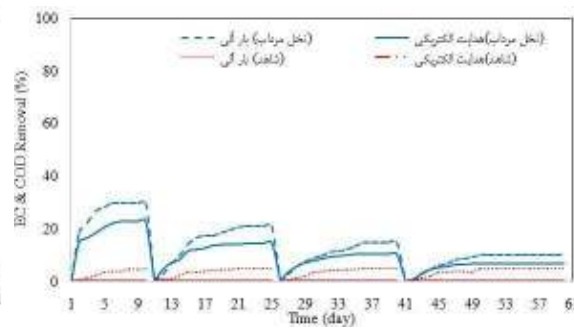
(ب)



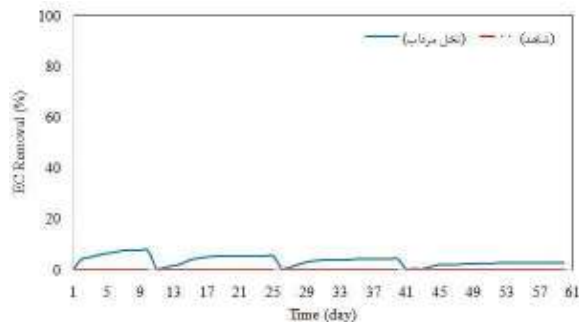
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۳. حذف هدایت الکتریکی و بار آلی در گیاه نخل مرداب

الف)  $COD=300 \text{ mg/L}$  و  $EC=0 \text{ mS/cm}$  (ب)  $COD=225 \text{ mg/L}$  و  $EC=2500 \text{ mS/cm}$  (ج)  $COD=150 \text{ mg/L}$  و  $EC=5000 \text{ mS/cm}$   
 د)  $COD=75 \text{ mg/L}$  و  $EC=7500 \text{ mS/cm}$  (ه)

راندمان حذف شوری از خود نشان می‌دهد. از لحاظ سرعت حذف نیز، نخل مرداب تقریباً پنج روز پس از اعمال فاضلاب به راندمان نهایی خود رسیده است. در بارگذاری بعدی، نخل مرداب با شیب کمتر حذف را انجام داده است. با این حال، روند کاهش بار آلی با دو شیب متفاوت به نقطه نهایی نزدیک شده است. نکته جالب توجه

در شکل ۳ میزان و نرخ کاهش هدایت الکتریکی و COD در راکتورهای با بار آلی  $225 \text{ mg/L}$  و هدایت الکتریکی  $2500$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. الگوی کاهش هدایت الکتریکی و بار آلی تقریباً مشابه حالت قبل است. با این حال راکتور حاوی نخل مرداب نسبت به تیمار شکل قبل، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در



شوری در راکتور مشابه است. در دور بعدی بارگذاری، میزان راندمان به صورت پلکانی کاهش پیدا کرده است. در این مرحله هیچ نشانه‌ای از علایم تنش در برگ گیاه مشاهده نشد. ایجاد ریشه‌های جدید در توده ریشه‌ای و ساقه‌های جدید به صورت انشعابی در کناره‌های زیرین نخل مرداب در این تیمار مشاهده شد.

در شکل ۳ میزان و سرعت کاهش هدایت الکتریکی در گیاه نخل مرداب در راکتورهای با COD معادل  $150 \text{ mg/L}$  و هدایت الکتریکی  $5000$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کاهش حذف بار آلی نسبت به راکتور قبل بیش از  $15\%$  است. این کاهش با توجه به ظاهر شدن آثار سمی در برگ‌ها توجیه‌پذیر است. این کاهش زیاد نشان‌دهنده حد آستانه تحمل شوری در گیاه نخل مرداب بین  $2/5 \text{ dS/m}$  تا  $5 \text{ dS/m}$  است. با این حال، گیاه تا دو دور بعدی بارگذاری به فعالیت حیاتی و فتوسنتز ادامه داده است. ادامه حذف با وجود ایجاد علایم سوختگی و کاهش مصرف آب روزانه، حاکی از کاهش فعالیت حیاتی و فتوسنتز گیاه است (Liao et al., 2003).

شکل ۳ راندمان حذف بار آلی و شوری را در گیاه نخل مرداب در شرایط  $\text{COD}=70 \text{ mg/L}$  و  $\text{EC}=7500$  نشان می‌دهد. در این شکل، افت شدیدی در راندمان حذف بار نسبت به نمودارهای قبلی مشاهده می‌شود. رسیدن به بخش عمده راندمان حذف در گیاه نخل مرداب تنها یک روز پس از بارگذاری به معنای کاهش کارایی گیاه تحت تأثیر تنش‌های وارد بر آن است، به نحوی که میزان کاهش هدایت الکتریکی توسط نخل مرداب به صورت دفعی و خطی به دست آمده است. گیاه نخل مرداب در روز سوم پس از بارگذاری به میزان حذف نهایی خود رسیده است. این مقدار در مقایسه با تیمارهای قبلی نخل مرداب کاهش بسیار شدیدی نشان می‌دهد. از ابتدای روز سوم، شیب حذف بار آلی در گیاه نخل مرداب به تدریج کاهش پیدا کرد، به طوری که عملکرد گیاه در روزهای پنجم و

بیشتر بودن راندمان حذف بار آلی در نخل مرداب نسبت به شوری در راکتور مشابه است. در دور بعدی بارگذاری، میزان راندمان به صورت پلکانی کاهش پیدا کرده است. در این مرحله هیچ نشانه‌ای از علایم تنش در برگ گیاه مشاهده نشد. ایجاد ریشه‌های جدید در توده ریشه‌ای و ساقه‌های جدید به صورت انشعابی در کناره‌های زیرین نخل مرداب در این تیمار مشاهده شد.

در شکل ۳ الف میزان و سرعت حذف بار آلی در راکتورهای با COD معادل  $300 \text{ mg/L}$  ارائه شده است. گیاه نخل مرداب در روز هفتم تقریباً به راندمان نهایی خود در حذف بار آلی رسید. مقایسه راکتورهای حاوی گیاه نخل مرداب نشان می‌دهد که میزان حذف در تیمار مذکور، نسبت به نمونه شاهد اختلاف زیادی دارد و تأثیر وجود گیاهان در حذف بار آلی کاملاً مشهود است. در سه تکرار بعدی تنش بار آلی وارد بر گیاه نخل مرداب موجب کاهش شیب حذف بار آلی شد و زمان رسیدن به حذف نهایی را بیشتر می‌نماید. میزان حذف در دور دوم کمتر از دور اول است. این نشان‌دهنده عملکرد بهتر گیاه در زمان بارگذاری اولیه و سازگار شدن گیاه پس از ۲۵ روز از شروع آزمایش است.

در شکل ۳ ب میزان و نرخ کاهش هدایت الکتریکی و COD در راکتورهای با بار آلی  $225 \text{ mg/L}$  و هدایت الکتریکی  $2500$  میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. الگوی کاهش هدایت الکتریکی و بار آلی تقریباً مشابه حالت قبل است. با این حال راکتور حاوی نخل مرداب نسبت به تیمار شکل قبل، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در راندمان حذف شوری از خود نشان می‌دهد. از لحاظ سرعت حذف نیز، نخل مرداب تقریباً پنج روز پس از اعمال فاضلاب به راندمان نهایی خود رسیده است. در بارگذاری بعدی، نخل مرداب با شیب کمتر حذف را انجام داده است. با این حال، روند کاهش بار آلی با دو شیب متفاوت به نقطه نهایی نزدیک شده است. نکته جالب توجه بیشتر بودن راندمان حذف بار آلی در نخل مرداب نسبت به

تغییرات هدایت الکتریکی و COD فاضلاب درون راکتورها (میانگین حذف بار آلی) نسبت به زمان در شکل ۴ ارائه شده است.

برای یافتن میانگین مورد قبول از سه دوره آزمایش، میانگین اعداد گرفته شد. سپس، بازه میانگین اعداد به علاوه و منهای سه برابر مربع واریانس بازه اطمینان در نظر گرفته شد. داده‌هایی که در این بازه قرار می‌گرفت داده قابل اعتماد و داده‌هایی که در این بازه قرار نمی‌گرفت داده پرت منظور شد. سپس، با میانگین‌گیری دوباره از اعداد قابل اعتماد، میانگین درصد حذف بار آلی و شوری در هر گیاه محاسبه شد. طبق نتایج حاصل، در تمامی راکتورها میزان حذف بار آلی در وتیور بیش از نخل مرداب است.

در شکل ۵، مقایسه میانگین کاهش هدایت الکتریکی در راکتورهای مختلف در گیاه نخل مرداب و وتیور ارائه شده است. در این نمودار نیز می‌توان مشاهده کرد که در تمامی راکتورها میزان حذف بار آلی در وتیور بیش از نخل مرداب است. بیشتر بودن میزان حذف به ویژگی‌های ذاتی گیاه وتیور، تحمل بیشتر این گیاه به تنش‌های شوری و سازوکارهای متفاوت گیاه‌پالایی ارتباط دارد (Wu and Dodge, 2005).

ششم تقریباً یکسان به نظر می‌رسد. این موارد نشان‌دهنده کاهش عملکرد گیاه نخل مرداب و رسیدن به راندمان ثابت در انتهای روز ششم از شروع بارگذاری آلی است. در سه دوره متوالی بارگذاری مجدد نیز گیاه نخل مرداب با کاهش ۷٪، ۵٪ و ۴٪ میزان شوری و بار آلی در عمل بازدهی خود را از دست داد.

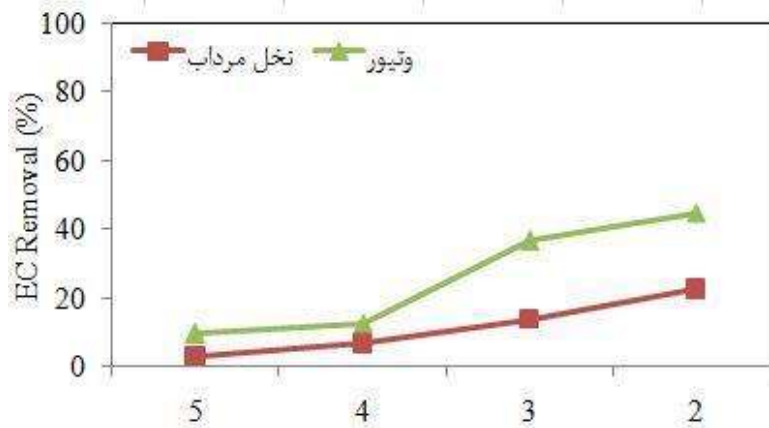
در شکل ۳، میزان و سرعت حذف شوری در راکتورهای با هدایت الکتریکی ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر ارائه شده است. کاهش هدایت الکتریکی در گیاه نخل مرداب تقریباً بر نمونه شاهد منطبق است. نمودار مؤید این مطلب است که گیاه در اولین ساعات اعمال تیمار شور، فعالیت حیاتی خود را از دست داده است. خشک‌شدن یکباره و مشاهده آثار سوختگی شدید روی برگ نخل مرداب در راکتور با شور هدایت الکتریکی ۱۰ dS/m مؤید این مطلب است که گیاه در عمل نقشی در حذف شوری و به تبع کاهش هدایت الکتریکی در راکتور نداشته است.

### ۳.۳. مقایسه نتایج حذف بار آلی و شوری

برای مقایسه نتایج روند کاهش هدایت الکتریکی و COD در دو گونه گیاه مورد آزمایش، منحنی‌های مربوط به



شکل ۴. مقایسه راندمان حذف بار آلی در دو گیاه نخل مرداب و وتیور



شکل ۵. مقایسهٔ راندمان کاهش هدایت الکتریکی در دو گیاه نخل مرداب و وتیور

تولید ریشه‌های بیشتر برای مقابله با شوری استفاده کند. در این سازوکار، گیاه با افزایش حجم ریشه، ورود نمک از طریق سیستم ریشه‌ای را محدود کرد و از رسیدن نمک به اندام‌های حساس جلوگیری به‌عمل می‌آورد (Larcher, 1995). ریشهٔ گیاه در راکتور با هدایت الکتریکی  $ds/m$  ۷/۵ تا روز چهارم از آزمایش به‌طور طبیعی رشد داشته است، اما در بیست روز پایانی آزمایش، تغییر شیب افزایش حجم ریشه وجود دارد. دلیل این امر ناشی از کاهش مقاومت گیاه در اثر قرارگیری مداوم تحت تنش شوری زیاد است. در راکتور دارای هدایت الکتریکی  $ds/m$  ۱۰، کاهش حجم ریشه از ابتدای آزمایش با شیب زیاد مشاهده می‌شود. روند تغییرات حجم ریشه در این راکتور حاکی از غلبهٔ تنش شوری بر مقاومت گیاه و خشک‌شدگی ریشه‌هاست. شکل ظاهری ریشه‌ها نیز در این مرحله با تغییر رنگ به قهوه‌ای تیره و شکنندگی مؤید خشک‌شدگی ریشه است.

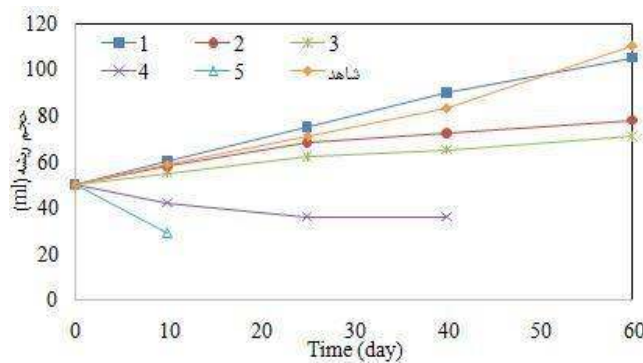
تغییرات حجم ریشهٔ گیاه نخل مرداب در ترکیب‌های گوناگون فاضلاب در شکل ۷ ارائه شده است. بیشترین افزایش حجم ریشه در راکتور شاهد و راکتور فاقد شوری با بار آلی معادل  $mg/L$  ۳۰۰ مشاهده می‌شود. در این دو ترکیب، فاضلاب حجم ریشهٔ نخل مرداب بیش از ۱۰۰٪ افزایش از خود نشان داده است.

#### ۴.۳. بررسی مشخصات مورفولوژیکی

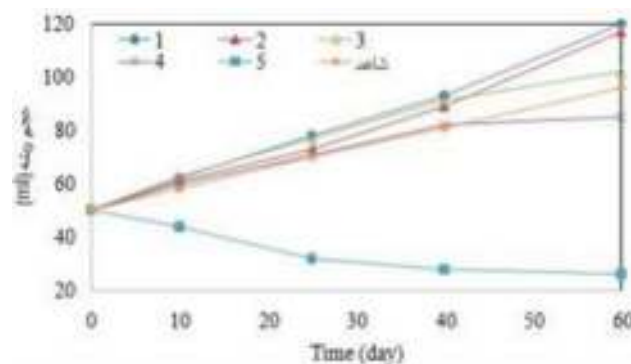
در بررسی واکنش گیاهان به انواع فاضلاب‌های مورد استفاده قبل و بعد از تیمار با فاضلاب، پارامترهای مختلف مورفولوژیکی شامل وزن خشک، سطح برگ، حجم ریشه و قطر ساقه در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری شد. در ادامه در نتایج به‌دست آمده در این‌باره بحث خواهیم کرد.

#### ۱.۴.۳. روند تغییرات حجم ریشه

تغییرات مجموع حجم ریشه در گیاه وتیور در هر راکتور در شکل ۶ ارائه شده است. در راکتور اول که فاضلاب تنها حاوی بار آلی معادل  $mg/L$  ۳۰۰ است، ریشه بیشترین رشد را نشان داده و حجم آن تا  $mL$  ۱۲۰ یعنی بیش از دو برابر حجم اولیه افزایش داشته است. وتیور در راکتور با هدایت الکتریکی  $ds/m$  ۲۵۰۰ آلی معادل  $mg/L$  ۲۲۵ رشد خوبی از خود نشان داد و می‌توان گفت با توجه به کاهش بار آلی در این راکتور، شوری موجود تأثیر قابل‌توجهی بر رشد ریشه‌های گیاه نداشته است. در راکتور با هدایت الکتریکی  $ds/m$  ۵ و بار آلی  $mg/L$  ۱۵۰، حجم ریشه در طول مدت دو ماه در حدود دو برابر شده است. میزان رشد بیشتر ریشه در سه راکتور اشاره‌شده نسبت به راکتور شاهد، نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت بار آلی، به‌عنوان افزودنی حاوی کربن، در بهبود رشد گیاه است. همچنین، وجود هدایت الکتریکی تا سقف  $ds/m$  ۵ باعث شد تا گیاه از سازوکار



شکل ۶. تغییرات حجم ریشه گیاه نخل مرداب در فاضلاب‌های با شوری مختلف



شکل ۷. تغییرات حجم ریشه گیاه و تیور در فاضلاب‌های با شوری مختلف

در این مقطع توده ریشه‌ای به رشد خود ادامه می‌دهد، ولی این رفتار ریشه با سایر ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه، از جمله پدیدار شدن لکه‌های زرد رنگ مسمومیت روی برگ‌های نخل مرداب همخوانی دارد. پلاسیدگی برگ‌های گیاه در حالی که هنوز سبز رنگ است، در این تیمارها اتفاق افتاد. این نوع مرگ گیاهی با عنوان کلروز به دلیل ناکارایی ریشه در رساندن آب کافی به قسمت‌های هوایی گیاه اتفاق افتاده است (بنی‌جمالی، ۱۳۸۴). در تیمار هدایت الکتریکی  $7/5$  dS/m و بار آلی  $75$  mg/L ریشه کاهش حجم یافت. به تعبیر دیگر، رشد آن منفی شد و به  $30\%$  میزان رسید. این کیفیت فاضلاب، فعالیت زیستی ریشه گیاه کاملاً مختل شد و در عمل پس از روز ۲۵م از شروع آزمایش حتی رشد منفی از خود نشان نداد. در تیمار بدون بار آلی و دارای هدایت الکتریکی  $10$  dS/m نخل مرداب، ریشه

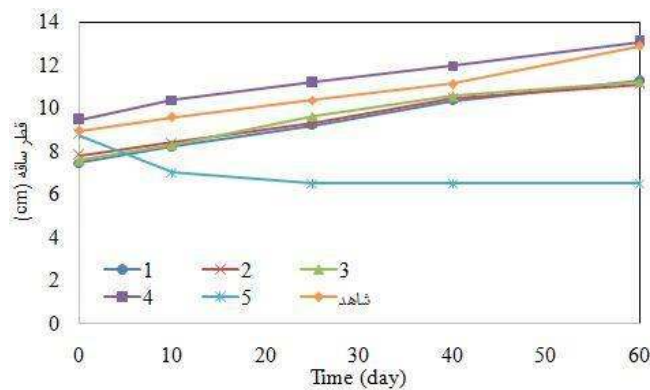
گیاه نخل مرداب از کرین موجود در فاضلاب به‌عنوان ماده غذایی استفاده می‌کند. بالاتر بودن درصد حذف COD در این راکتور نیز ممکن است به دلیل ترشح آنزیم آلفا آمیلاز از بافت‌های ریشه گیاه نخل مرداب یا باکتری‌های ریزوسفری موجود در توده ریشه‌ای گیاه باشد. آلفا آمیلاز در حضور نشاسته و محصولات هیدرولیزی نشاسته مانند مالتوز القا می‌شود. این آنزیم در جانوران، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها وجود دارد (Reddy et al., 2004). کاهش قابل‌ملاحظه رشد حجم ریشه در هدایت الکتریکی  $5$  dS/m و  $2/5$  dS/m گویای تأثیر بیشتر شوری نسبت به بار آلی در کاهش عملکرد و کاهش مشخصات رشدی ریشه گیاه است. کاهش شیب رشد حجم ریشه در این دو راکتور نشانه‌ای از کاهش کارکرد و عدم سازگاری گیاه با شرایط پس از چهل روز از گذشت آزمایش است.

راکتوری حاوی تنها بار آلی، با ۴۸٪ رشد قطری بیشترین میزان افزایش قطر نسبت به قطر اولیه را نشان می‌دهد. پس از آن گیاه در راکتور بیشترین افزایش قطر را داشت. در تمام راکتورها روند تغییرات قطر ساقه با شیب مثبت و تقریباً یکسان افزایش داشته است. با این حال، در راکتور با هدایت الکتریکی ۱۰ dS/m این روند تغییر کرد و شیب منفی از خود نشان داد که نشان‌دهنده جمع شدن و کرنش ناشی از تنش شوری است. ساقه گیاه و تیور به دلیل ماشوره‌ای (بندبند) بودن پس از خشک شدن و مرگ گیاهی یا به اصطلاح نکرور، دیگر تغییراتی در قطر نشان نمی‌دهد. نمودار روز ۲۵ام تا پایان آزمایش نیز مؤید این نکته است.

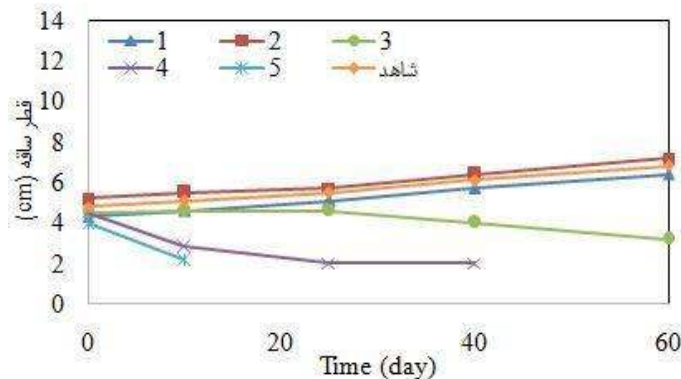
بلافاصله پس از بارگذاری و پس از ده روز از شروع آزمایش بیش از ۴۰٪ حجم اولیه خود را از دست داد. در این دو تیمار، ریشه به رنگ سیاه تیره درآمد و ریزریشه‌های مویی به طور کامل ریزش کرد. کاهش حجم ریشه به دلیل هوازگی ریشه‌ها بود (Armstrong et al., 1992). به همین دلیل در نمودار و محاسبات مورفولوژیکی دخالت داده نشد.

### ۲.۴.۳. روند تغییرات قطر ساقه

روند تغییرات قطر ساقه در روزهای ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۶۰ پس از شروع آزمایش در گیاه‌های تیور و نخل مرداب در شکل ۸ و ۹ ارائه شده است. مطابق شکل ۸، گیاه در



شکل ۸. تغییرات قطر ساقه گیاه تیور در فاضلاب‌های با شرایط مختلف



شکل ۹. تغییرات قطر ساقه نخل مرداب در فاضلاب‌های با شرایط مختلف

مختلف شوری و بار آلی در گیاه‌های وتیور و نخل مرداب ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰، روند افزایش سطح برگ در راکتور با هدایت الکتریکی  $0 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $300 \text{ mg/L}$  در گیاه وتیور مشابه راکتور شاهد است. این بدان معناست که بار آلی نقش مؤثری در تغییر شاخصه‌های رشد برگ گیاه وتیور ندارد. در دو راکتور ذکر شده، سطح برگ با شیب ملایمی در تمام مدت آزمایش افزایش یافت که منجر به رشد حدود ۲۰ درصدی در انتهای دوره آزمایش شده است. در راکتور حاوی فاضلاب با هدایت الکتریکی  $2/5 \text{ dS/m}$  و COD برابر  $225 \text{ mg/L}$ ، سطح برگ وتیور در ده روز ابتدای آزمایش مقدار کمی افزایش نشان داد. اما، این افزایش در سری دوم تیمار با فاضلاب، افزایش بیشتری نسبت به دور اول داشت. دلیل این امر سازگار شدن گیاه وتیور با شوری موجود در راکتور است، زیرا تا پایان آزمایش سطح برگ با شیب ثانویه به رشد خود ادامه داد. در راکتور با سطح هدایت الکتریکی  $5 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $150 \text{ mg/L}$ ، در ۲۵ روز ابتدایی آزمایش سطح برگ با شیبی مشابه راکتورهای  $0 \text{ dS/m}$  و  $2/5 \text{ dS/m}$  تغییر کرد. پس از یک ماه از شروع آزمایش در گیاه وتیور پنجه‌های سبز رنگ، برگ‌گی شکل و فاقد ساقه ماشوره‌ای مشاهده شد که از بالای ریشه و در کناره ساقه رشد کرد. پنجه‌زنی باعث افزایش ناگهانی سطح برگ در قرائت بعدی نتایج شد. پنجه‌زنی فرایند مقاومتی گیاهان در برابر شوری و سایر شوک‌های غیرطبیعی است که با افزایش حجم گوشتی گیاه باعث کاهش تنش وارد به بافت‌های گیاه می‌شود. در نهایت، این امر نشان‌دهنده رسیدن وتیور به آستانه تحمل شوری در این کیفیت فاضلاب است (Liao et al., 2003).

در راکتور با هدایت الکتریکی  $7/5 \text{ dS/m}$ ، شیب تغییرات از نمودار شاهد اندکی کمتر است، اما درصد تغییر سطح برگ از نمودار شاهد  $12\%$  کمتر است. در نهایت، در راکتور با شوری  $10 \text{ dS/m}$  و فاقد بار آلی از ابتدای آزمایش کاهش سطح برگ مشاهده می‌شود. با این حال، شیب

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، روند تغییرات ضخامت ساقه در تیمارهای شاهد، فاضلاب نوع ۱ و ۲ دارای شیب مثبت و افزایشی است. با این حال، به دلیل ماهیت گیاه نخل مرداب، تغییرات قطر ساقه در این گیاه چندان قابل توجه نیست، زیرا رشد ساقه نخل مرداب بیشتر به صورت طولی و با ضخامت تقریباً ثابت انجام می‌گیرد. در تیمار هدایت الکتریکی  $5 \text{ dS/m}$  و COD معادل  $150 \text{ mg/L}$ ، گیاه تا ۲۵ روز پس از شروع بارگذاری تا حدودی در برابر تنش‌های وارد مقاومت نشان داد. نشانه این مقاومت عدم تغییر در قطر ساقه بود. با این حال پس از روز ۲۵م آزمایش و تجدید بارگذاری، مقاومت گیاه به اتمام رسید و سیر نزولی قطر ساقه در این تیمار مشاهده شد. در دو نوع فاضلاب ۴ و ۵ نیز از همان ابتدای بارگذاری، قطر ساقه به دلیل شوک وارد به گیاه سیر نزولی با شیب بسیار منفی داشت. این تغییر ناگهانی در قطر ساقه با برگ‌های زرد و ریشه‌های قهوه‌ای تیره مشاهده شد و در سایر بخش‌های گیاه تطابق داشت. در تیمار ۴، قطر تا روز ۲۵م آزمایش کاهش پیدا کرد و پس از آن ساقه‌های گیاه کاملاً خشک شد و بی‌آب بدون فعالیت حیاتی در راکتور باقی ماند. بعد از چهل روز، عدم تغییر در قطر ساقه، مؤید خشک شدن نهایی ساقه نخل مرداب در تیمار مذکور بود.

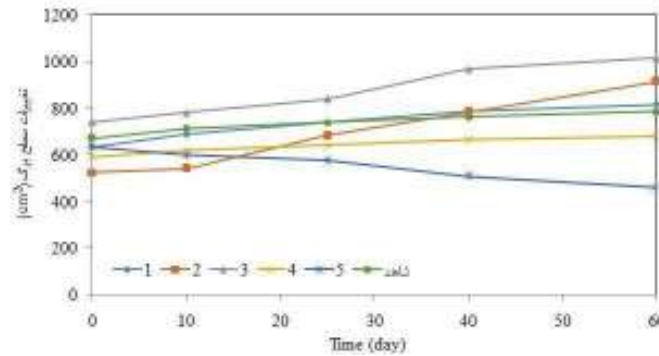
در مورد تیمار با فاضلاب ۵، خشک شدن ساقه در روز چهارم از شروع آزمایش مشاهده و اطلاعات در همان روز ثبت شد. با این حال، به دلیل اندازه‌گیری همه مقادیر در پایان دور اول آزمایش‌ها، میزان قطر ساقه در این تیمار نیز در روز دهم گزارش شد. به دلیل مؤثر نبودن این اختلاف شش‌روزه در بررسی داده‌های مورفولوژیکی، برای یک‌دست ماندن نمودارها، مقدار نهایی قطر ساقه در تیمار با هدایت الکتریکی  $10 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $10 \text{ mg/L}$ ، در روز دهم گزارش شد.

### ۳.۴.۳. روند تغییرات سطح برگ

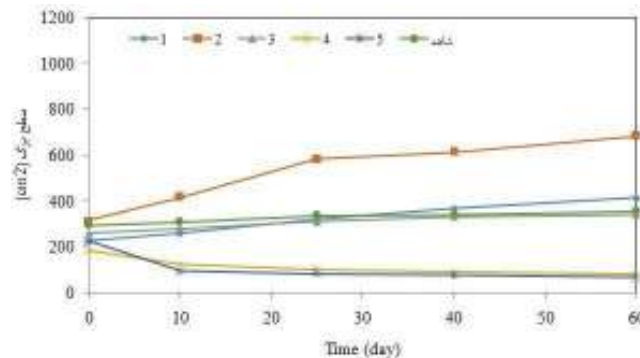
در شکل ۱۰ و ۱۱، روند تغییرات سطح برگ در سطوح

دو دلیل مسمومیت، و زرد شدن و میچاله شدن برگ‌ها و ریختن برگ‌های وتیور و جدا شدن آن‌ها از بافت کلی گیاه صورت گرفت (Liao et al., 2003).

کاهش سطح برگ پس از ۲۵ روز از شروع آزمایش شدت بیشتری به خود گرفت و گیاه تا انتهای آزمایش ۲۸٪ از سطح برگ خود را از دست داد. این کاهش سطح برگ به



شکل ۱۰. تغییرات برگ گیاه وتیور در فاضلاب‌های با شرایط مختلف



شکل ۱۱. تغییرات سطح برگ گیاه نخل‌مرداب در فاضلاب‌های با شرایط مختلف

مشخصات مورفولوژیکی نیز تأثیر بار آلی بر این افزایش تا سطح اطمینان حداقل ۹۵٪ را تأیید می‌کند. میانگین سطح برگ در راکتور حاوی هدایت الکتریکی  $2/5 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $225 \text{ mg/L}$ ، در ۲۵ روز اول افزایش داشت. این افزایش حاکی از فعال‌شدن سازوکارهای دفاعی گیاه نخل‌مرداب در برابر شوری است. رقیق‌کردن غلظت یون‌ها یکی از سازوکارهای دفاعی در برابر شوری در بافت‌های گیاهی است. گیاهان این عمل را با افزایش حجم ذخیره‌هایشان به وسیله توسعه ساختمان‌های گوشتی، آبدار و ضخیم انجام می‌دهند (کریمی و همکاران، ۱۳۸۵).

همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، در راکتور دارای بار آلی  $300 \text{ mg/L}$  و فاقد شوری، رشد گیاه در ۲۵ روز ابتدای آزمایش با سرعت بالا و در ۳۵ روز پایانی آزمایش با سرعت کمتری اتفاق افتاده است. با این حال، روند صعودی تغییر سطح برگ در کل مدت آزمایش مشاهده می‌شود. این روند نشان‌دهنده تأثیر مثبت و مؤثر بار آلی تا  $300 \text{ mg/L}$  بر افزایش سطح برگ است. در این راکتور سطح برگ تا پایان دوره آزمایش رشد ۶۰٪ از خود نشان می‌دهد که نسبت به افزایش سطح برگ در محلول شاهد ۴۰٪ بیشتر است. تحلیل آماری نتایج مربوط به

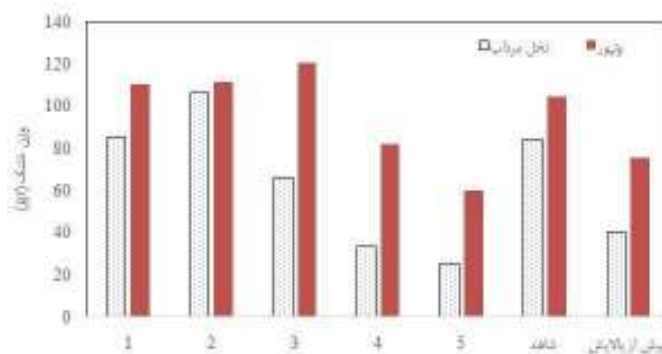
وتیور نشان‌دهنده درصد کمتر آب موجود در این گیاه نسبت به نخل مرداب است. گیاه وتیور در تمام تیمارها به جز فاضلاب با شوری  $10 \text{ dS/m}$  و فاقد بار آلی که روند کاهشی داشت، افزایش وزن خشک نسبت به مقادیر وزن خشک اولیه را از خود نشان داد. میزان افزایش وزن خشک در راکتور با شوری  $5 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $150 \text{ mg/L}$  نسبت به سایر تیمارها بیشتر است. میزان تولید زیست‌توده وتیور در سه تیمار ابتدایی بیش از شاهد و نشان‌دهنده شرایط مساعد وتیور در این ترکیبات فاضلابی برای رشد و نمو است. وزن خشک گیاه نخل مرداب در سه تیمار اول نسبت به حالت اولیه آزمایش رشد داشته است. اما، روند تغییرات وزن خشک در تیمارهای با هدایت الکتریکی  $7/5 \text{ dS/m}$  و  $10 \text{ dS/m}$  کاهش داشته است. همچنین، میزان زیست‌توده در دو تیمار اولیه نسبت به راکتور شاهد افزایش نشان می‌دهد که بیانگر کاهش قابل‌ملاحظه توانایی فتوسنتز در گیاه بر اثر شوک حاصل از شوری است.

شکل ۱۳ نشان‌دهنده مقدار حجم ریشه اولیه و در پایان دوره شصت روزه آزمایش در هر دو نوع گیاه و مقایسه مقادیر رشد در راکتورهای شاهد فاقد شوری و بار آلی است. در تمام راکتورها رشد ریشه وتیور نسبت به نخل مرداب بیشتر بود. در راکتورهای با هدایت الکتریکی بالا که هر دو نوع گیاه با کاهش حجم ریشه روبه‌رو بود، میزان کاهش حجم ریشه در نخل مرداب بیش از وتیور مشاهده شد.

با توجه به عدم‌رشد قابل‌توجه ساقه و ریشه نخل مرداب در این تیمار، می‌توان نتیجه گرفت نخل مرداب با تجمع دادن مواد سمی در برگ‌های خود فرایند گیاه‌پالایی را به‌انجام می‌رساند. شیب افزایش سطح برگ در این تیمار پس از روز چهارم روند کاهشی داشته و رشد سطح برگ با شیبی مشابه گیاه موجود در محلول شاهد صورت گرفته است. به دلیل مشاهده‌نشدن علائم ظاهری مسمومیت در برگ‌ها، گیاه با شوری و بار آلی موجود در فاضلاب سازگار می‌شود. در تیمار با شوری  $5 \text{ dS/m}$  و بار آلی  $150 \text{ mg/L}$  نخل مرداب به‌صورت تدریجی به رشد خود ادامه داد و سطح برگ در پایان دوره آزمایش رشد  $30\%$  داشت. در دو تیمار با هدایت الکتریکی  $7/5 \text{ dS/m}$  و  $10 \text{ dS/m}$ ، سطح برگ گیاه به‌سرعت و به‌شدت کاهش یافت. این کاهش همراه با خشک‌شدگی و پلاسیدگی برگ‌ها همراه بود و به دلیل کاهش و از بین رفتن سبزینه در برگ‌ها، در عمل فتوسنتز متوقف شد. در این دو راکتور، ریزش برگ‌های جوان و مسمومیت حاشیه برگ‌های مسن‌تر نیز مشاهده شد.

#### ۴.۴.۳. مقایسه نتایج مورفولوژیکی

در این بخش نتایج وزن خشک، حجم ریشه، قطر ساقه و سطح برگ بین دو گونه گیاهی قبل و بعد از تیمار با فاضلاب در شکل ۱۲ تا ۱۵ مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۲، با وجود یکسان‌سازی وزن تر گیاه‌های انتخابی قبل از اعمال تیمارهای فاضلابی، وزن خشک بیشتر گیاه

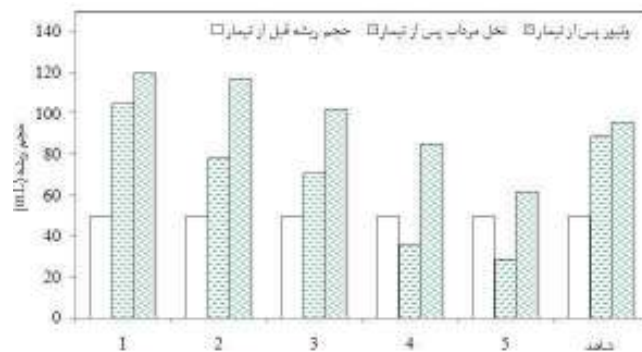


شکل ۱۲. مقایسه تغییرات وزن خشک گیاه‌های وتیور و نخل مرداب در فاضلاب‌های مختلف



می‌شود، استفاده از گیاه وتیور توصیه می‌شود. وتیور به دلیل مقاومت بیشتر ریشه در برابر تنش شوری، در هدایت الکتریکی تا  $7/5 \text{ dS/m}$  نیز فرایندهای گیاه‌پالایی ریشه‌ای (ریزورمدیشن) را به انجام می‌رساند (Brandt et al., 2006).

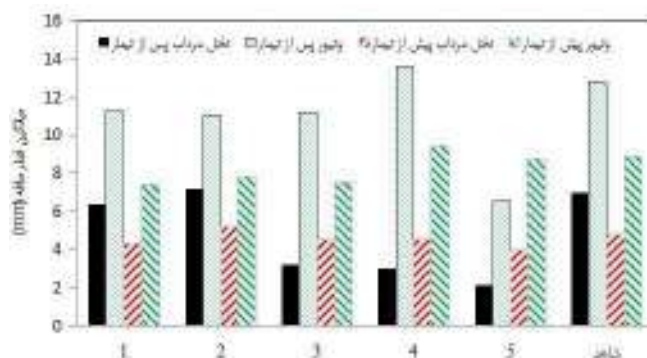
در نهایت، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که ریشه گیاه وتیور، نسبت به نخل مرداب، به تنش‌های شوری مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفتیم، حذف بار آلی در فاضلاب شهری و فاضلاب‌های با کیفیت مشابه توسط ریشه انجام می‌شود. لذا، در تالاب‌های مصنوعی یا طبیعی که با فاضلاب شهری شور آبیاری



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات حجم ریشه گیاه‌های وتیور و نخل مرداب در فاضلاب‌های مختلف پیش و پس از تیمار

رطوبت بافتی، کاهش بیشتری در قطر ساقه بروز ندهد، در حالی که ساقه گیاه نخل مرداب در اثر کاهش رطوبت، روند کاهش قطر خود را تا خشک شدن ساقه به‌طور کامل ادامه می‌دهد و میزان قطر ساقه به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. لذا، با وجود معنادار بودن تفاوت میان قطر ساقه وتیور و نخل مرداب، نمی‌توان به پارامتر قابل اطمینان سنجش مقاومت وتیور در مقابل تنش‌های منجر به خشکی گیاه بی‌اعتنا بود (Zhang et al., 2014).

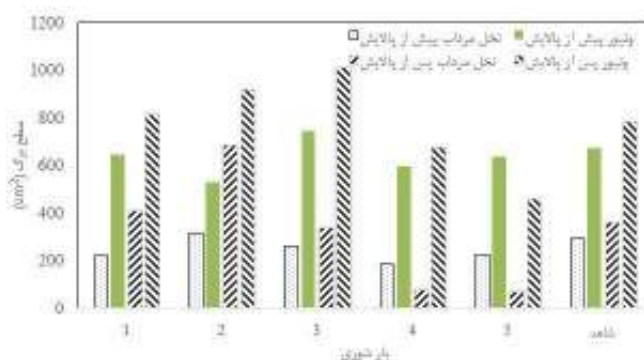
در شکل ۱۴، مقایسه میانگین قطر ساقه دو گیاه، قبل و پس از انجام آزمایش‌ها در راکتورهای حاوی فاضلاب و راکتور شاهد ارائه شده است. به نظر می‌رسد در مورد قطر ساقه نیز گیاه وتیور، نسبت به نخل مرداب، مقاومت بهتری در برابر تنش شوری نشان می‌دهد. در این نمودارها باید توجه داشت که ساقه وتیور حالتی ماشوره‌ای و ساختاری گره‌ای دارد. این ساختار باعث می‌شود گیاه بعد از خشک شدن نسبی و ازدست دادن مقدار مشخصی از



شکل ۱۴. مقایسه تغییرات میانگین قطر ساقه گیاه‌های وتیور و نخل مرداب در فاضلاب‌های مختلف پیش و پس از تیمار

با توجه به افزایش سریع میانگین سطح برگ در نخل مرداب در تیمارهای ۰ dS/m تا ۵ dS/m، در طراحی تالاب‌های مصنوعی یا طبیعی تصفیه فاضلاب شور، باید به سرعت بالای تولید زیست توده در صورت استفاده از این گونه گیاهی توجه داشت. همچنین، تمهیداتی برای خارج کردن برگ‌ها از محل تصفیه اندیشید، زیرا در صورت هرس نکردن، برگ‌ها به آب داخل تالاب بازمی‌گردد. این بازگشت به تالاب باعث برگشت نمک ذخیره‌شده در برگ‌ها به آب می‌شود. همچنین، افزایش COD به دلیل بازگشت ماده آلی به صورت برگ گیاه و نیز کاهش اکسیژن محلول در آب به دلیل اکسید شدن برگ‌ها و بروز شرایط بی‌هوایی از دیگر تهدیدات استفاده از نخل مرداب در فاضلاب‌های شور است (Tuttolomondo et al., 2015).

در شکل ۱۵، تغییرات میانگین سطح برگ دو گیاه، پیش و پس از انجام آزمایش‌ها در راکتورهای حاوی فاضلاب و راکتور شاهد ارائه شده است. گیاه نخل مرداب در فاضلاب با شوری ۰ dS/m و ۲/۵ dS/m نسبت به و تیور افزایش بیشتری در سطح برگ نشان داد. رشد برگ نخل مرداب در تیمار با هدایت الکتریکی ۰ و بار آلی mg/L ۳۰۰ به میزان ۴۶٪ بیش از رشد برگ و تیور است. همچنین، در تیمار با هدایت الکتریکی ۲/۵ dS/m و بار آلی mg/L ۲۲۵ این مقدار ۲۴٪ بیشتر بود. در تیمار با شوری ۵ dS/m و بار آلی mg/L ۱۵۰، میزان رشد سطح برگ نخل مرداب با و تیور تنها ۶٪ تفاوت دارد. در تیمار ۷/۵ dS/m و بار آلی mg/L ۷۵، نسبت رشد برگ نخل مرداب به و تیور به ۴۰٪ رسید که حاکی از عملکرد ضعیف نخل مرداب نسبت به و تیور در تیمارهای شورتر از ۷/۵ dS/m است.



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات میانگین سطح برگ گیاه‌های و تیور و نخل مرداب در فاضلاب‌های مختلف پیش و پس از تیمار

میزان جذب نمک در گیاه نخل مرداب در هدایت الکتریکی ۲۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در حدود ۳۰٪ و در و تیور در حدود ۵۳٪ مشاهده شد. روند کاهش میزان بار آلی نیز در هر دو گونه با افزایش سطح شوری کاهش یافت، به طوری که بیشترین راندمان کاهش COD در گیاه نخل مرداب در هدایت الکتریکی ۰ و بار آلی mg/L ۳۰۰ در حدود ۵۰٪ و در گیاه و تیور در حدود ۵۸٪ مشاهده شد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها و ماهیت گیاهان بیشترین میزان سطح برگ، وزن خشک و قطر ساقه مربوط به گیاه

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از روش گیاه‌پالایی، در سطوح مختلف شوری و بار آلی به طور متوسط در هر واحد گیاه و تیور ۱۷٪ و در هر واحد گیاه نخل مرداب ۱۵٪ کاهش شوری و فاضلاب را در پی داشته است. سایر نتایج این تحقیق به شرح زیر است.

روند کاهش میزان هدایت الکتریکی در هر دو گونه با افزایش سطح شوری کاهش یافت، به طوری که بیشترین

شاهدی بر سازوکار رقیق‌کردن در گیاه‌پالایی نخل مرداب است. این سازوکار در وتیور نیز به دلیل مشاهده پنبه‌های سبزرنگ مشاهده شد. میزان هدایت الکتریکی محلول با تغییر شاخصه‌های آب‌کشی گیاه، همچنین از بین بردن توازن آنزیم‌های گیاه، باعث کاهش میزان برداشت آب، خشکی گیاه و در نتیجه عدم انتقال آلاینده‌ها از محیط غرقابی به داخل بافت‌های گیاه می‌شود. به‌طور کلی، گیاه وتیور در مقایسه با نخل مرداب برای گیاه‌پالایی انواع فاضلاب شور حاوی بار آلی مناسب‌تر تشخیص داده شد.

وتیور و بیشترین حجم ریشه مربوط به گیاه نخل مرداب به‌دست آمد. تمامی این مشخصات با توجه به آستانه تحمل شوری گیاه، از زمان انتقال به پایلوت تا بروز سمی شدن و پژمردگی در گیاهان مذکور روند افزایشی داشت و از آن به بعد ثابت ماند یا در اثر از بین رفتن گیاه و تخریب بافت مربوط دچار کاهش شد.

کلروز در گیاه وتیور حاکی از تجمع بیشتر نمک در ریشه و نشان‌دهنده فرایند گیاه‌پالایی ریشه‌ای در این گیاه است. ایجاد آثار سمی در برگ‌های نخل مرداب و نیز پنبه‌زنی این گیاه در شوری‌های پیش از آستانه خشکی نیز

## منابع

- بنی‌جمالی س.م. ۱۳۸۴. کلروز ناشی از کمبود آهن در افاقای چتری *Robinia pseudoacacia 'umbraculi feria*. چهارمین کنگره علوم باغبانی، تهران، دانشگاه فردوسی.
- جلالی، و. همایی، م. ۱۳۸۹. مدلسازی اثر زمان اعمال تنش شوری محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا، *مجله به‌زراعی کشاورزی*، سال ۱۲(۱): ۲۹-۴۰.
- چکشیان خراسانی، ع. یغمایی، س. ۱۳۹۰. بررسی عددی مدل ریاضی فرایند زیست‌درمانی گیاهی - میکروبی در ریزوسفر، اولین همایش ملی گیاه‌پالایی، کرمان، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی.
- عزتیان، ر. ۱۳۸۶. مطالعات آزمایشگاهی و ارائه مدل ریاضی به‌منظور پالایش خاک‌های آلوده به مواد نفتی به روش گیاه‌پالایی با استفاده از گیاهان بومی، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشکده محیط‌زیست، گروه مهندسی محیط‌زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- کریمی، ق. قربانعلی، م. حیدری شریف‌آباد، ح. عصاره، م.ح. ۱۳۸۵. بررسی مکانیسم‌های مقاومت به شوری در گونه مرتعی *Atriplex verrucifera*، *مجله منابع طبیعی*، ۱۹(۴): ۴۲-۴۸.
- مصلحی مصلح‌آبادی، پ. وثوقی، م. قدیریان، م. ۱۳۹۰. ارائه مدل ریاضی مستقل از پارامترهای محیطی در فرایند حذف آلودگی خاک به روش گیاه‌پالایی، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۲(۱): ۸۵-۹۱.
- Almansoori, A.F. Hasan, H.A. Idris, M. Abdullah, S.R.S. Anuar, N. 2015. Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil. *Ecological Engineering*. 84: 113-120.
- Aloui, F. Khoufi, S. Loukil, S. Sayadi, S. 2009. Performances of an activated sludge process for the treatment of fish processing saline wastewater. *Desalination*. 246(1): 389-396.
- Armstrong, J. Armstrong, W. Beckett, P.M. 1992. Phragmites australis: Venturi-and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation. *New Phytologist*. 120(2): 197-207.
- Bhatia, M. Goyal, D. 2014. Analyzing remediation potential of wastewater through wetland plants: a review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 33(1): 9-27.
- Brandt, R. Merkl, N. Schultze-Kraft, R. Infante, C. Broll, G. 2006. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*. 8(4): 273-284.

- Guittonny-Philippe, A. Petit, M.E. Masotti, V. Monnier, Y. Malleret, L. Coulomb, B. Combroux, I. Baumberger, T. Viglione, J. Laffont-Schwob, I. 2015. Selection of wild macrophytes for use in constructed wetlands for phytoremediation of contaminant mixtures. *Journal of Environmental Management*. 147: 108-123.
- Hasegawa, P.M. Bressan, R.A. Zhu, J.K. Bohnert, H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Biology*, 51(1): 463-499.
- Johir, M.A.H. Vigneswaran, S. Kandasamy, J. BenAim, R. Grasmick, A. 2013. Effect of salt concentration on membrane bioreactor (MBR) performances: Detailed organic characterization. *Desalination*. 322: 13-20.
- Kim, D.H. 2011. A review of desalting process techniques and economic analysis of the recovery of salts from retentates. *Desalination*. 270(1): 1-8.
- Larcher, W. 1995. *Physiological plant ecology* (3 rd), 390. Springer Publishing.
- Lavelle, P. Spain, A. 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Lefebvre, O. Moletta, R. 2006. Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review. *Water Research*. 40(20): 3671-3682.
- Liao, X. Luo, S. Wu, Y. Wang, Z. 2003. Studies on the abilities of *vetiveria zizanioides* and *cyperus alternifolius* for pig farm wastewater treatment. *International Conference on Vetiver and Exhibition*. 3: 174-181.
- Liu, M. Yang, Q. Peng, Y. Liu, T. Xiao, H. Wang, S. 2015. Treatment performance and N<sub>2</sub>O emission in the UASB-A/O shortcut biological nitrogen removal system for landfill leachate at different salinity. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- Miao, Y. Liao, R. Zhang, X.X. Liu, B. Li, Y. Wu, B. Li, A. 2015. Metagenomic insights into salinity effect on diversity and abundance of denitrifying bacteria and genes in an expanded granular sludge bed reactor treating high-nitrate wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 277: 116-123.
- Reddy, N.S. Nimmagadda, A. Rao, K.S. 2004. An overview of the microbial  $\alpha$ -amylase family. *African Journal of Biotechnology*. 2(12): 645-648.
- Schwarz, M. (1995). *Culture methods*. In *Soilless Culture Management*. Springer Berlin Heidelberg, 33-91.
- Smith, M.J. Flowers, T.H. Duncan, H.J. Alder, J. 2006. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on germination and subsequent growth of grasses and legumes in freshly contaminated soil and soil with aged PAHs residues. *Environmental Pollution*. 141(3): 519-525.
- Thoma, G. Lam, T. Ziegler, S. Wolf, D. 2004. *Novel approach to measurement of rhizosphere effect in phytoremediation*. In Report on IPEC conference.
- Tuttolomondo, T. Licata, M. Leto, C. Leone, R. La Bella, S. 2015. Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Arundo donax* L. and *Cyperus alternifolius* L.—Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*. 74: 79-92.
- Uygur, A. 2006. Specific nutrient removal rates in saline wastewater treatment using sequencing batch reactor. *Process Biochemistry*. 41(1): 61-66.
- Wang, S. Xu, Z. Li, H. 2009. Influence of plant tillering and root volume on flow pattern and water purification of vertical down flow wetlands for domestic wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 59(1): 55-63.
- White, P.J. Brown, P.H. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*. 105(7): 1073-1080.
- Wu, L. Dodge, L. 2005. Landscape plant salt tolerance selection guide for recycled water irrigation. A Special Report for the Elvenia J Slosson Endowment Fund, University of California, Davis Article. 40: 75-88.
- Younos, T. Tulou, K.E. 2005. Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 132(1): 3-10.
- Zhang, X. Gao, B. Xia, H. 2014. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 106: 102-108.
- Zhang, J. Zhang, Y. Quan, X. 2012. Electricity assisted anaerobic treatment of salinity wastewater and its effects on microbial communities. *Water Research*. 46(11): 3535-3543.
- Zhang, B.Y. Zheng, J.S. Sharp, R.G. 2010. Phytoremediation in engineered wetlands: Mechanisms and applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2: 1315-1325.