

بررسی مدل سینتیکی کاهش شوری آب به روش گیاه‌پالایی به وسیله‌ی سه گونه گیاه شورزی

قربانعلی دزواره^۱، حسین گنجی دوست^{۲*}، بیتا آیتی^۳

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

h-ganji@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۱/۲]

چکیده - تصفیه و استفاده دوباره از فاضلاب در تالاب‌ها روشی جایگزین، کم‌هزینه و درعین‌حال دوستدار محیط‌زیست است. در بیشتر موارد، درجه‌ی شوری در فاضلاب تصفیه شده، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش می‌یابد. استفاده از روش گیاه‌پالایی می‌تواند به مقدار زیاد این مشکل را برطرف سازد. در این پژوهش برای ارزیابی توانایی کاهش شوری آب به وسیله‌ی سه گونه گیاه شورزی فرانکینیا، آتریپلکس و فستوکا، آزمایش‌هایی با غلظت‌های مختلف شوری آب انجام شد و سپس تحلیل سینتیکی روند کاهش شوری و سرعت جذب نمک به وسیله‌ی گیاهان در معادلات و مدل‌های سینتیکی صورت پذیرفت. از سوی دیگر با تطبیق داده‌های موجود با مدل سینتیکی مایکل-متن و لاینوربرک، در خصوص تبعیت هر یک از گیاهان مورد آزمایش از مدل‌های یاد شده نتایج حاصل شد. بر اساس نتایج این پژوهش گیاهان فرانکینیا، فستوکا و آتریپلکس در طول دوره تیمار با آب شور با افزایش میزان شوری، ابتدا دارای معادلات سینتیکی از مرتبه ۱ با ضرایب همبستگی ۰/۹۷، ۰/۹۵ و ۰/۹۷ بوده و به تدریج با افزایش میزان شوری سه گیاه یاد شده دارای معادلات سینتیکی از مرتبه ۲، ۰ و ۱ بودند که در نتیجه گیاه آتریپلکس در برابر تنش شوری مقاوم‌تر تشخیص داده شد. در بازه کاهش شوری نیز، پیروی گیاهان فرانکینیا و آتریپلکس از معادلات مرتبه ۲، عملکرد بهتر این گیاهان در کاهش شوری نسبت به گیاه فستوکا را اثبات کرد. بیش‌ترین تبعیت داده‌های گیاه فرانکینیا از مدل لاینوربرک و گیاه آتریپلکس از مدل مایکل-متن نیز در این پژوهش نشان داده شد.

واژگان کلیدی: فرانکینیا، فستوکا، آتریپلکس، کاهش شوری، مدل سینتیکی

۱- مقدمه

شور به ویژه در نواحی ساحلی و استفاده از آن‌ها برای آبیاری گیاهان در مناطقی که با کمبود آب شیرین مواجه است، ضروری به نظر می‌رسد [۲]. بنابراین مطالعه روی تصفیه آب و فاضلاب‌های شور اهمیت کاربردی دارد. تصفیه و استفاده دوباره از فاضلاب به خصوص فاضلاب شور در تالاب‌ها روشی مناسب، کم‌هزینه و درعین‌حال دوستدار محیط‌زیست است. عامل اصلی اغلب فرایندهای تصفیه که در تالاب‌های مصنوعی صورت می‌پذیرد، سازوکارهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی شامل اکسیداسیون، جذب، واجذب، ته‌نشینی و تجزیه

کمبود آب منجر به انجام پژوهش‌های گسترده در خصوص یافتن منابع آب جایگزین شده است. یکی از راهکارهای موجود، بازیافت فاضلاب برای استفاده در آبیاری است. فاضلاب تصفیه شده سرشار از مواد مغذی برای رشد گیاهان بوده اما در مقایسه با آب شیرین از درجه شوری بالایی برخوردار است [۱]. کلرید سدیم یکی از مواد غیر آلی است که بیشتر در فاضلاب‌های با بار آلی دیده می‌شود و در فاضلاب بسیاری از صنایع مانند شیمیایی و لبنی وجود دارد. از سوی دیگر وجود منابع عظیم آب‌های

باشد) بر حسب (mg/L) و M جرم توده گیاه بر حسب (Kg) است. V_{max} و K_m برای واکنش‌های آنزیمی به وسیله‌ی تحلیل روند سرعت اولیه v در غلظت‌های مختلف نمک، تخمین زده می‌شود و سپس مقادیر در نظر گرفته شده برای این دو پارامتر دوباره در رابطه فوق برای به دست آوردن v مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که مقادیر به دست آمده با هم تناسب داشته باشند. در عمل تخمین صحیح و دقیق V_{max} از روی غلظت و سرعت کار بسیار مشکلی است و تا حد زیادی تابع مجانب شدن منحنی v نسبت به C می‌باشد [۴].

برای دستیابی به مقادیر V_{max} و K_m از روی خطوط مستقیم نمودار، معادله مایکل-منتن می‌تواند بازنویسی شود. رایج‌ترین مدل تبدیل معادله فوق، رابطه ۲ است که به وسیله‌ی هانس لاینور و دین برک^۶ بیان شد:

$$\frac{1}{v} = \frac{K_M}{v_{max}} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{v_{max}} \quad (2)$$

بنابراین داده‌ها به وسیله‌ی این رابطه و این بار فارغ از مقدار M تحلیل سینتیکی می‌شود [۵].

در این پژوهش، نرخ کاهش شوری به وسیله‌ی سه گونه گیاه فرانکینیا، فستوکا و آتریپلکس در محیط تالابی و تحت شرایط آزمایشگاهی، نسبت به زمان مطالعه شد تا بتوان به این وسیله سرعت پالایش نمک از محیط آبی به وسیله‌ی سه گونه گیاه یاد شده، تعیین و آستانه تحمل این گیاهان به شوری و شرایط ماندآبی را مشخص نمود. عملکرد آنزیم‌های گیاه در کمک به شکستن مولکول‌های بزرگ موجود در شیره گیاهی به مولکول‌های کوچکتر و در نتیجه منفی‌تر شدن فشار اسمزی درون بافت گیاه نسبت به محیط شور اطراف ریشه این قابلیت را به گیاهان شورزی می‌دهد که بتوانند محلول آب، نمک و مواد غذایی را جذب کرده و با سازوکارهای مختلف (تجمع نمک در بافت، استخراج نمک و ...) چرخه عمر خود را در محیط‌های با درجه شوری بالا کامل نمایند. به همین سبب استفاده از مدل‌های سینتیکی مزبور نیز برای بیان نرخ کاهش شوری به وسیله‌ی این گیاهان مناسب است [۹].

بیولوژیکی است [۳]. همچنین واکنش‌های صورت پذیرفته در فرایند گیاه‌پالایی به دلیل پیروی از فعل و انفعالات آنزیمی، مانند هر واکنش شیمیایی دیگر، می‌تواند به صورت معادلات سینتیکی و به شکل ریاضی بیان شود. سرعت پیشرفت واکنش جذب شوری در فرایند گیاه‌پالایی به وسیله‌ی اندازه‌گیری نرخ تولید محصولات (زیست توده) و یا نرخ کاهش غلظت نمک قابل سنجش است [۴]. تاکنون پژوهش‌های مختلفی برای تعیین معادلات سینتیکی کاهش شوری و همچنین گیاه‌پالایی شوری انجام شده است. به عنوان نمونه در پژوهشی تبعیت رفتار گیاه ذرت^۱ در کاهش شوری سدیمی از مدل مایکل-منتن^۲ به اثبات رسید [۵]. در مطالعه‌ای دیگر نیز کاربرد مدل لاینوربرک^۳ در تعیین بیشینه سرعت جذب، فعل و انفعالات آنزیمی و میزان جذب ترکیبات معدنی از جمله سیانید، آرسنیک و کلرید سدیم به وسیله‌ی درخت بید^۴، با ضریب همبستگی ۹۸/۲ نشان داده شد [۶]. مقایسه توانایی میزان حذف سیانید به وسیله‌ی برخی گیاهان چینی نیز به وسیله‌ی معادلات سینتیکی و مدل مایکل-منتن مورد بررسی قرار گرفت [۷]. علاوه بر این موارد راجز و همکاران [۸] گزارش دادند از مدل‌های مختلف ریاضی و سینتیکی برای تخمین سرعت جذب عناصر آلاینده به وسیله‌ی گیاه از محیط خاک و آب می‌توان استفاده کرد. در اغلب فرایندهای گیاه‌پالایی، به ویژه گیاه‌پالایی ترکیبات معدنی، مدل سینتیکی جذب آلاینده از مدل مایکل-منتن (رابطه ۱) تبعیت می‌کند [۹]:

$$v = \frac{v_{max} C}{K_M + C} \times M \quad (1)$$

که در آن v نرخ کاهش غلظت آلاینده نسبت به وزن گیاه بر حسب (mg/kg)، C غلظت آلاینده در محلول بر حسب (mg/L)، V_{max} بیشینه سرعت جذب در بازه زمانی بر حسب (mg/Kg/h)، K_m ثابت نیمه اشباع و معیار فعالیت‌های آنزیمی (غلظت آلاینده، جایی که سرعت حذف نصف سرعت حداکثر

1 Zea mays
2 Michaelis-Menten
3 Lineweaver-Burk
4 Salix babylonica L.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- انتخاب گیاهان

گیاهان مورد استفاده در این پژوهش از سه گونه گیاه شورزی فرانکینیا^۱، فستوکا^۲ و آتریپلکس^۳ و با مقاومت‌های مختلف به شوری و شرایط تالابی انتخاب شد تا بتوان تأثیر این پارامترها را بر سرعت جذب و سیستیک واکنش‌ها را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. مشخصات گیاهان انتخابی در جدول ۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این سه گونه گیاهی علاوه بر بومی بودن و سازگاری آن‌ها با شرایط اقلیمی ایران، ایجاد تنوعی از مقاومت به شوری و تحمل شرایط ماندآبی و همچنین ترکیب این دو رفتار به وسیله گیاهان منتخب بود. گیاه آتریپلکس که گونه‌ای شورزی اجباری است، مقاومت بسیار بالایی در برابر شوری از خود نشان می‌دهد ولی با این حال نسبت به تحمل شرایط ماندآبی از مقاومت برخوردار نیست. گیاه فستوکا در مقابل سازگاری خوبی با شرایط مرطوب و ماندابی داشته و نسبت به تنش شوری، مقاومت بالا (در حد آتریپلکس) از خود نشان نمی‌دهد. گیاه فرانکینیا نیز در این بین ضمن تحمل نسبی شوری و شرایط ماندآبی و مرطوب می‌تواند تأثیر توامان این دو ویژگی را در تصفیه آب شور به روش گیاه‌پالایی مورد آزمایش قرار دهد.

۲-۲- روش آزمایش

دانه‌های گیاهان یاد شده ابتدا از مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شد. سپس این دانه‌ها در محیط کشت و روی کاغذ صافی مرطوب کشت داده شدند. پس از یک هفته از آغاز کشت جوانه‌های اولیه پدیدار شدند که بعد از سه هفته میانگین ارتفاع جوانه‌ها به حدود ۶ سانتی‌متر رسیده و گیاهان آماده انتقال به گلدان‌های آزمایش شدند. گلدان‌های آزمایش شامل ظروفی شفاف (برای رؤیت وضعیت ریشه) حاوی دانه‌های پرلیت (برای استقرار گیاه) و سنگ‌های هوادهی متصل به پمپ هواده (برای پراکنش یکنواخت املاح در راکتور و اکسیژن رسانی به ریشه)

بودند که هر یک از آن‌ها به وسیله‌ی آبی با شوری مشخص به همراه میزان ثابتی از محلول غذایی پرشده و گیاهان به صورت هیدروپونیک در آن قرار گرفتند. محلول هیدروپونیک حاوی آب‌های شور با هدایت‌های الکتریکی ۵۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و یک محلول حاوی مواد مغذی با نام تجاری "زربار" تهیه شد [۱]. در ادامه تعداد هشت گیاه در هر گلدان کشت شد و برای هر تصفیه از چهار ظرف استفاده شد. به منظور برآورد تأثیرات فیزیکی شیمیایی مانند ته‌نشینی و هوادهی، چهار ظرف نیز به عنوان شاهد استفاده شد که در آن‌ها هیچ‌گونه گیاهی وجود نداشت. تصویر پایلوت آزمایشی در شکل (۱) نشان داده شده است. ابتدا در تمامی گلدان‌ها میزان شوری یکسان بوده و هر دو روز یک بار با اضافه کردن ۲۰۰ میلی‌لیتر محلول حاوی NaCl با در نظر داشتن حجم محلول موجود در هر گلدان، شوری محلول تنظیم و به گلدان‌ها اضافه شد تا به صورت تدریجی علاوه بر جلوگیری از وارد آمدن شوک به گیاهان، میزان هدایت الکتریکی مورد نظر حاصل شود. همزمان با این کار میزان هدایت الکتریکی گلدان‌های حاوی گیاه و شاهد نیز اندازه‌گیری شد به این ترتیب روند کاهش شوری به وسیله گیاه در هر تیمار مشخص شده و از داده‌های حاصل برای تحلیل سیستیک استفاده شد. بهترین تطابق داده‌ها با معادله-های سیستیک در همبستگی‌های خطی مشاهده شد و ضریب R^2 به عنوان ضریب همبستگی، معیار تصمیم‌گیری برای تعیین مرتبه واکنش قرار گرفت [۹]. برای محاسبه پارامترهای اصلی مدل، شامل v (نرخ کاهش غلظت نمک به وزن گیاه)، C (غلظت نمک در محلول) و M جرم توده گیاه (میزان هدایت الکتریکی راکتورها بطور پیوسته و هر دو روز یکبار اندازه‌گیری می‌شد)، میزان غلظت نمک از رابطه $EC (dS/m) \times 640 = mg/L$ [۱]، به دست آمد (دلیل استفاده از هدایت الکتریکی و تبدیل آن به واحدهای جرمی، اندازه‌گیری مداوم و دقت بهتر و سرعت عمل این روش بود). وزن گیاه نیز در هر مرحله با اندازه‌گیری نمونه-ای با شرایط مشابه به هر تیمار در هر ۲ روز محاسبه شد. پارامترهای جرم توده گیاه و V_{max} نیز به همین ترتیب حاصل شده و داده‌ها در مدل سیستیک قرار گرفت.

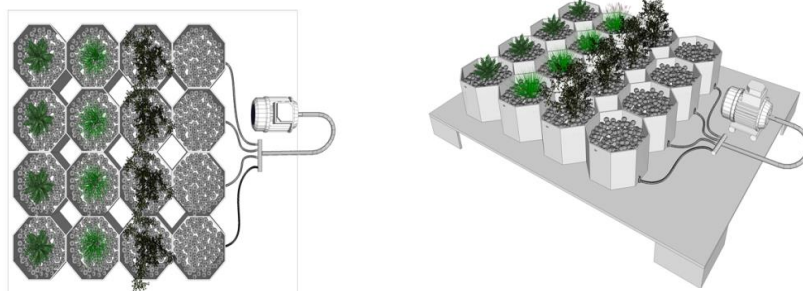
1 *FrankeniaThymifolia*

2 *FestucaOvina*

3 *Atriplex Cinerea*

جدول (۱) مشخصات گیاهان انتخاب شده برای انجام آزمایش‌ها [۵].

نام گیاه	گونه	خانواده	ویژگی
<i>Frankenia</i>	<i>Thymifolia</i>	<i>Frankeniaceae</i>	رشد سریع/حجم ریشه بالا/ساقه‌های خزنده/برگ‌های تخم‌مرغی و گل‌های مجتمع/مقاومت به شرایط مرطوب/آفتاب کامل/سازگاری نسبی با شوری/پوشش بالا/نیاز به مراقبت کم/گرما دوست/بومی ایران
<i>Festuca</i>	<i>Ovina</i>	<i>Poaceae</i>	رشد متوسط وسیله‌ی/حجم ریشه بالا/برگ‌های سوزنی سبز و خاکستری/رشد سریع برگ‌ها و قابلیت برداشت مکرر/مقاوم به خشکی/گرما دوست/بومی ایران
<i>Atriplex</i>	<i>Cinerea</i>	<i>Amaranthaceae</i>	گیاه همیشه سبز/شورزی اجباری/ریشه‌های راست و عمیق/مقاوم به خشکی/مقاوم به گرما و سرما/بومی ایران



شکل (۱) پایلوت شبیه‌سازی وتلند مصنوعی.

۲-۳- مواد مورد استفاده

مواد اصلی استفاده شده در پژوهش، شامل دانه‌های گیاهان مورد آزمایش، خاک پرلیت، محلول کود مایع زربار، پودر NaCl شرکت Merck، آب مقطر و محلول کالبراسیون دستگاه هدایت الکتریکی با نام Milwaukee و شماره MA 9061 بود.

۲-۴- تجهیزات مورد استفاده

تجهیزات اصلی استفاده شده در پژوهش شامل EC متر پرتابل ساخت شرکت Martini مدل Mi 805 و ترازوی دیجیتال ساخت شرکت Kern مدل PLS 360-3 بود.

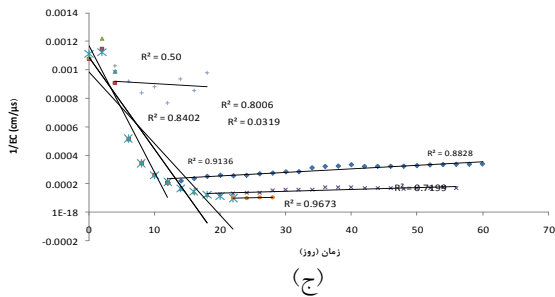
۳- نتایج

۳-۱- معادلات سینتیکی کاهش شوری

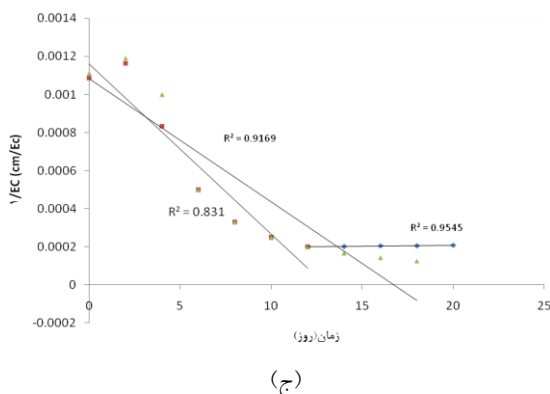
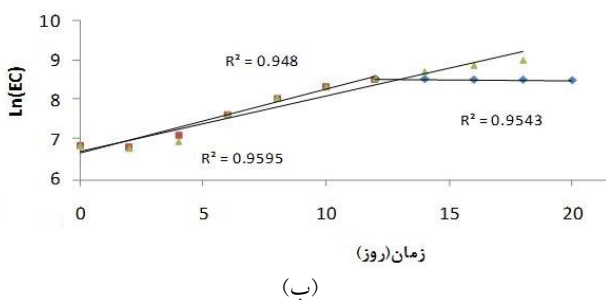
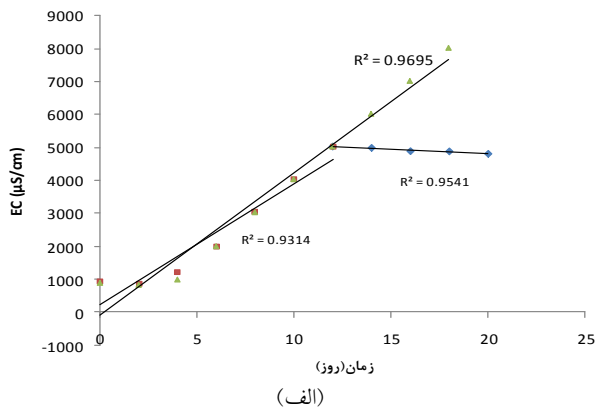
با توجه به شکل (۲) که با استفاده از داده‌های مربوط به روند کاهش هدایت الکتریکی در راکتورهای حاوی گیاه فرانکینیا در معادلات سینتیکی مرتبه‌های صفر، ۱ و ۲ رسم شده است، می‌توان نتیجه گرفت تا قبل از بروز سمیت و خشک شدن گیاه به وسیله‌ی شوری، غلظت نمک عامل کنترل کننده و تأثیر گذار در معادلات سینتیکی واکنش است [۱۱]. به این ترتیب در راکتور

با سطح شوری ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در بازه افزایش شوری (از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) تا روز دهم، واکنش سینتیکی کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه از مرتبه ۱ تبعیت می‌کند (با ضریب همبستگی ۹۵ درصد) که در توجیه آن می‌توان گفت نرخ کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه نسبت به زمان با میزان غلظت نمک رابطه لگاریتمی داشته و این حالت در بازه افزایشی راکتورهای با سطح شوری ۸۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر نیز مشاهده می‌شود (با ضرایب همبستگی ۹۶ و ۹۷/۷). به تدریج به دلیل طولانی‌تر بودن بازه زمانی مرحله افزایش شوری در سطوح بالاتر شوری و همچنین افزایش غلظت نمک از آستانه تحمل گیاه، واکنش سینتیکی در این بازه و در راکتور ۱۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر با ضریب همبستگی نسبتاً کوچکی از مرتبه ۲ تبعیت می‌کند و بیانگر کاهش سرعت جذب نمک با افزایش غلظت آن بوده و سرعت جذب با عکس غلظت نمک رابطه مستقیم دارد.

در بازه کاهش شوری نیز در تیمارهای ۵۰۰۰ و ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر واکنش‌های سینتیکی از مرتبه ۲ بوده و ضمن بیان کاهش سرعت جذب با افزایش سطح شوری،



شکل (۲) تطابق داده‌های گیاه فرانکینیا با مرتبه‌های مختلف معادلات سینتیکی، الف- مرتبه صفر ب-مرتبه یک ج-مرتبه دو.

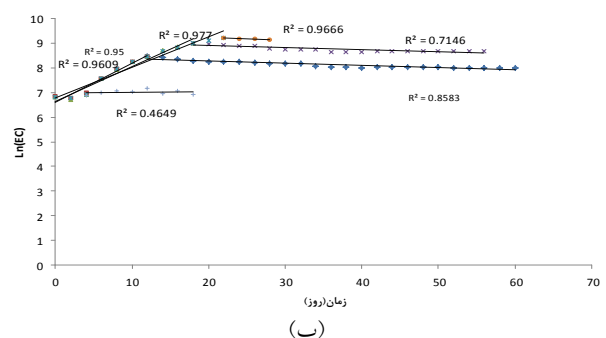
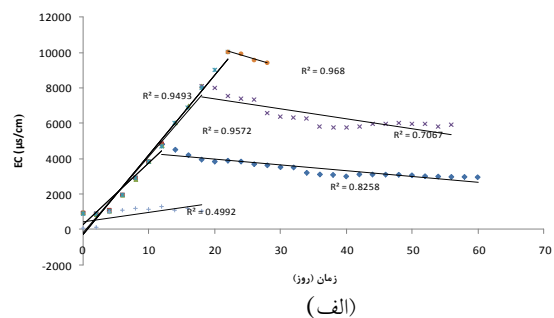


شکل (۳) تطابق داده‌های گیاه فستوکا با مرتبه‌های مختلف معادلات سینتیکی، الف-مرتبه صفر ب-مرتبه یک ج-مرتبه دو.

در شکل (۴) نیز مرتبه سینتیکی واکنش کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه آتریپلکس نشان داده شده است. در این گیاه نیز

حاکی از کمتر شدن سرعت جذب با گذشت زمان و اشباع شدن ظرفیت جذب نمک به وسیله‌ی گیاه و بروز سمیت در آن است. نکته قابل توجه در مرتبه واکنش سینتیکی تیمار ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر نیز پیروی روند بازه کاهش شوری از مرتبه صفر و تفاوت جزئی آن با مرتبه‌های ۱ و ۲ است، که نشان‌دهنده آغاز خشک شدن گیاه و بی‌تأثیر بودن نوسانات غلظت نمک در این مرحله و این تیمار است. با توجه به معادلات سینتیکی بیش‌ترین میزان هماهنگی در سطوح شوری ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر مشاهده می‌شود که این موضوع حاکی از یکنواختی بیشتر داده‌ها و به عبارتی رفتار به نسبت ثابت گیاه در این سطح شوری است که این امر به دلیل بروز علائم سمیت و خشک‌شدگی تدریجی گیاه است. همچنین نوسان بیشتر داده‌ها در سطوح پایین‌تر شوری نشان‌دهنده رفتار قوی‌تر گیاه در جذب نمک و کاهش شوری است.

با توجه به شکل (۳) که به طور مشابه به بررسی روند کاهش میزان شوری به وسیله‌ی گیاه فستوکا و تعیین مرتبه سینتیکی واکنش آن می‌پردازد، می‌توان نتیجه گرفت که در بازه افزایش شوری در راکتور ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، سینتیک واکنش از مرتبه ۱ بوده و در بازه افزایشی راکتور ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر به دلیل حساسیت نسبی گیاه به شوری سینتیک واکنش از مرتبه صفر است. در مرحله کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه در راکتور ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر نیز سینتیک واکنش از مرتبه ۱ در نظر گرفته می‌شود.



ضرایب همبستگی شکل‌ها و توجه به پیروی واکنش سینتیکی گیاه فستوکا در بازه افزایشی راکتور ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر متر، از مرتبه صفر و در شرایط مشابه هماهنگی واکنش سینتیکی مربوط به جذب شوری به وسیله‌ی گیاه آتریپلکس با مرتبه ۱ قابل مشاهده است. جدول (۲) ضرایب همبستگی مرتبه‌های مختلف معادلات سینتیکی را برای سه گونه گیاه مورد آزمایش در بازه‌های اشاره شده نشان می‌دهد.

مرحله افزایش شوری در راکتور ۵۰۰۰ و ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر دارای واکنش سینتیکی مرتبه ۱ بوده و در بازه کاهش شوری از مرتبه ۲ است نکته مهمی که در مقایسه این گیاه با گیاه فستوکا به این ترتیب مشاهده می‌شود این است که با وجود خشک شدن گیاه آتریپلکس پس از ۲۰ روز، تا لحظه آخر گیاه آتریپلکس کاهش قابل قبولی در میزان شوری از خود نشان داده و خشکیدن آن به دلیل شرایط محیطی از جمله وضعیت سیستم بوده است [۱۲]. به علاوه این گیاه بر خلاف گیاه فستوکا دچار تنش شوری نشد که این نکته با در نظر گرفتن

جدول (۲) ضرایب همبستگی مرتبه‌های مختلف معادلات سینتیکی برای تیمارهای مختلف گیاهی.

مرحله	نام گیاه و مرتبه واکنش									هدایت الکتریکی ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
	آتریپلکس			فستوکا			فرانکینیا			
	مرتبۀ ۲	مرتبۀ ۱	مرتبۀ ۰	مرتبۀ ۲	مرتبۀ ۱	مرتبۀ ۰	مرتبۀ ۲	مرتبۀ ۱	مرتبۀ ۰	
افزایش شوری و سازگاری	۸۹/۸	۹۲/۳	۸۹/۳	۹۱/۶	۹۵/۹	۹۳/۱	۹۱/۳۶	۹۵	۹۲/۴	۵۰۰۰
کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه	۸۲/۶	۸۲	۸۱/۴	۹۵/۴۵	۹۵/۴۳	۹۵/۴۱	۸۸/۲	۸۵/۸	۸۲/۵	
افزایش شوری و سازگاری	۹۳/۲	۹۷/۰۱	۸۸/۷	۸۳/۱۱	۹۴/۸	۹۶/۹۵	۸۴	۹۶	۹۵/۷	۸۰۰۰
کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷۱/۹	۷۱/۴	۷۰/۶	
افزایش شوری و سازگاری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸۰	۹۷/۷	۹۴/۹	۱۰۰۰۰
کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۶/۷	۹۶/۶	۹۶/۸	
افزایش شوری و سازگاری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۴۶/۴	۴۹/۹	۱۲۰۰۰
کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

جدول (۳) پارامترها و ضرایب همبستگی مدل مایکل-متن در تطبیق با داده‌های سه گیاه.

مرحله	گیاهان مورد آزمایش/ضرایب مدل						هدایت الکتریکی ($\mu\text{s/cm}$)
	آتریپلکس		فستوکا		فرانکینیا		
	R^2 (%)	V (mg Na/Kg/h)	R^2 (%)	V (mg Na/Kg/h)	R^2 (%)	V (mg Na/Kg/h)	
افزایش شوری و سازگاری	۹۰/۱	۶/۸	۹۸/۴	۵/۵۴	۹۵/۷	۳/۹۲	۵۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	۹۴/۴	۱۰/۵	۶۸/۱	۶/۸۵	۹۱/۵	۱۷/۸۶	
افزایش شوری و سازگاری	۹۶/۴	۹/۷۳	۹۶/۲۶	۹/۱۳	۹۶/۸	۵/۴۵	۸۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	.	.	.	.	۹۷	۱۸/۶۵
افزایش شوری و سازگاری	۹۸/۳	۱۰/۹	۱۰۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	.	.	.	.	۹۴/۷	۱۴/۸۶
افزایش شوری و سازگاری	۹۱/۲	۱۶/۳	۱۲۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	.	.	.	.	.	.

۳-۲- تعیین مدل سینتیکی کاهش شوری

پس از تحلیل و تعیین مرتبه سینتیکی واکنش‌ها، بررسی مدل سینتیکی جذب شوری در بین گیاهان مورد آزمایش، انجام شد. ضرایب همبستگی و ۷ در تطبیق داده‌های سه گیاه با مدل مایکل-متن در جدول ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین حالت پیروی از مدل سینتیکی مایکل-متن در گیاه فرانکینیا مربوط به تیمار ۸۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده و ضرایب همبستگی در این دو حالت برابر ۹۷ و ۹۸/۳ درصد است که این امر حاکی از آن است که فعالیت‌های آنزیمی مشارکت‌کننده در جذب و کاهش شوری به وسیله گیاه در بیشینه حالت خود بود و گیاه پس از این بازه دچار تنش و خشکی شد [۱۳].

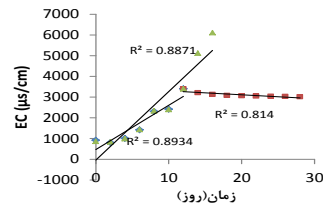
از سوی دیگر میزان سرعت جذب نمک به وسیله گیاه، همواره در بازه بعد از دوره سازگاری (مرحله کاهش شوری به وسیله گیاه) نسبت به مرحله سازگاری و افزایش شوری بیشتر است که البته باید در نظر داشت که این تفاوت بین سرعت‌ها در

هر تیمار با تیمار دیگر فرق داشته و مقدار آن در تیمارهای با سطوح پایین‌تر شوری بیشتر است و این بیانگر سازگاری گیاه و عملکرد مطلوب آن در غلظت‌های کمتر نمک است.

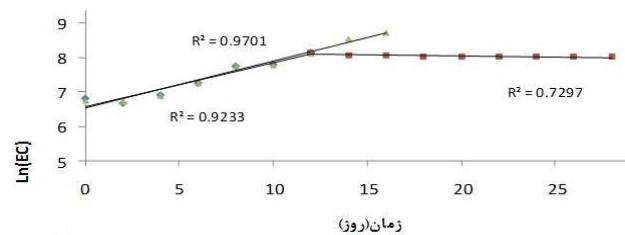
در جدول ۴ نیز محاسبه پارامترهای مدل لاینووربرک برای سه گونه گیاهی و ضرایب همبستگی مربوطه آمده است. با توجه به پارامتر V_{max} مربوط به مدل لاینووربرک نیز، بیشینه سرعت و میزان جذب نمک در بازه کاهش شوری تیمار ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر برابر $28/3 \text{ mg/Kg/h}$ مشاهده می‌شود که خود مؤید سازگاری گیاه و راندمان بهینه آن در گیاه-پالایی شوری در این بازه است. از سوی دیگر پارامتر K_m که معیاری برای تشخیص فعالیت‌های آنزیمی است در این بازه برابر بیش‌ترین مقدار خود، $12/3$ است. نزدیک بودن نسبی مقادیر K_m نیز بین بازه‌های مشابه در یک گیاه و حتی بین گیاهان مختلف حاکی از فعالیت آنزیم‌های مشابه در این گیاهان است.

V_{max} و K_m برای گیاه فستوکا نیز می‌توان گفت برخلاف گیاه فرانکینیا، این گیاه در کاهش شوری فاضلاب تنها در بازه سازگاری اولیه تیمار ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، نسبتاً از مدل سینتیکی مایکل-متن پیروی می‌کند و ضریب همبستگی آن در هر دو بازه از مقدار متناظر آن در مدل لاینووربرک بیشتر است که این امر وابسته بودن امر کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه را به جرم آن نشان می‌دهد. در همین حال پایین بودن ضریب همبستگی این مدل در بازه کاهش شوری به وسیله‌ی گیاه (۶۸/۱ درصد) و همچنین کوچک بودن پارامتر K_m (۰/۵۳) نشان‌دهنده نبود حضور فعالیت آنزیمی به وسیله‌ی گیاه در جذب شوری، خشک شدن آن و غالب بودن جذب سطحی نمک به ریشه و همچنین بر فیزیکی بودن ماهیت جذب شوری به وسیله‌ی گیاه دلالت دارد چرا که در سطوح پایین‌تر شوری (بازه افزایش شوری در تیمار ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر متر) میزان ضریب همبستگی، سرعت جذب نمک، حداکثر سرعت جذب و K_m بیشتر و به ترتیب برابر ۹۸/۴ درصد، ۵/۵۴ mgNa/Kg/h، ۶/۳۳ mgNa/Kg/h و ۵/۴۱ mg/L مشاهده شد.

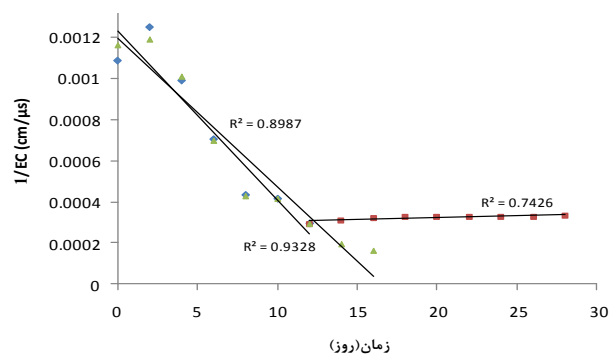
در تحلیل سینتیکی گیاه آتریپلکس نیز همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان شوری در تیمارها ضرایب همبستگی، سرعت جذب نمک، بیشینه سرعت جذب و K_m بیشتر شده و اثباتی بر مطلب بیان شده در مراجع مبنی بر تعلق این گیاه به خانواده گیاهان شورزی اجباری است چرا که علاوه بر سازگاری گیاه با شوری، افزایش فعالیت‌های آنزیمی و سرعت جذب در مدت زمان ثابت با افزایش شوری در تیمارهای گیاه آتریپلکس، افزایش می‌یابد. نکته‌ای که ذکر آن در اینجا ضروری به نظر می‌رسد، بیان این مهم است که خشک شدن نسبتاً زود هنگام گیاه آتریپلکس در مدت ۲۰ روز، نه به دلیل افزایش شوری، بلکه به خاطر عدم سازگاری گیاه با محیط تالابی بوده و روند، میزان کاهش شوری و جذب نمک به وسیله‌ی گیاه، تا لحظه خشک شدن به صورت قابل قبولی صورت پذیرفته که البته میزان بالای تجمع سدیم در بافت‌های این گیاه نیز شاهد دیگری بر اثبات این ادعاست.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴) تطابق داده‌های گیاه آتریپلکس با مرتبه‌های مختلف معادلات سینتیکی، الف-مرتبه صفر ب-مرتبه یک ج-مرتبه دو.

کوچک‌تر بودن مقدار K_m بیانگر کمتر بودن فعالیت‌های آنزیمی مشارکت‌کننده در گیاه‌پالایی بوده و در ابتدای آزمایش به دلیل سازگار نبودن گیاه در آن بازه و همچنین در انتهای آزمایش به دلیل بروز تنش شوری و خشکی گیاه به طور مشخص دیده می‌شود [۱۳]. لازم به ذکر است که در این بررسی پیروی داده‌های گیاه فرانکینیا از مدل سینتیکی لاینووربرک در کاهش شوری فاضلاب به دلیل بالاتر بودن مقدار ضرایب همبستگی تأیید شد. همچنین به طور مشابه در تحلیل پارامترهای ضریب همبستگی،

جدول (۴) پارامترها و ضرایب همبستگی مدل لاینووربرک در تطبیق با داده‌های سه گیاه

مرحله	گیاهان مورد آزمایش/ضرایب مدل									هدایت الکتریکی ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
	آتریپلکس			فستوکا			فرانکینیا			
	R^2 (%)	K_m (mg/l)	V_{max} (mg Na/Kg/h)	R^2 (%)	K_m (mg/l)	V_{max} (mg Na/Kg/h)	R^2 (%)	K_m (mg/l)	V_{max} (mg Na/Kg/h)	
افزایش شوری و سازگاری	۸۹/۸۲	۱۰/۷۷	۸/۹	۹۰/۵۲	۵/۴۱	۶/۳۳	۹۹/۸	۲/۷۳	۶/۲۹	۵۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	۸۸/۸۹	۱۳/۱۹	۱۰/۹	۶۱/۷۳	۰/۵۳	۸/۸	۹۱/۹	۱۱/۲۳	۲۵/۸۵	
افزایش شوری و سازگاری	۹۳/۳	۱۴/۸	۱۲/۳	۹۳/۳	۰/۷	۱۲/۹	۹۸/۸	۶/۹۱	۱۵/۹	۸۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۷/۷	۱۲/۳	۲۸/۳	
افزایش شوری و سازگاری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۸/۷	۸/۰۵	۱۸/۵۳	۱۰۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۵/۳	۷/۳	۱۶/۸۱	
افزایش شوری و سازگاری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹۲/۵۴	۷/۴۹	۱۷/۲۳	۱۲۰۰۰
کاهش شوری به وسیله گیاه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	

۴- نتیجه گیری

میزان شوری سه گیاه مذکور از معادلات سینتیکی از مرتبه ۲، صفر و ۱ تبعیت کردند. به طور کلی گیاه آتریپلکس در برابر تنش شوری مقاوم‌تر تشخیص داده شد. در بازه کاهش شوری نیز، پیروی گیاهان فرانکینیا و آتریپلکس از معادلات مرتبه ۲، عملکرد بهتر این گیاهان در کاهش شوری نسبت به گیاه فستوکا را اثبات کرد. بیش‌ترین تبعیت داده‌های گیاه فرانکینیا از مدل لاینووربرک و گیاه آتریپلکس از مدل مایکل-متن نیز در این تحقیق مشاهده شد. در مقایسه نتایج حاصل با پژوهشهای مشابه از جمله پژوهشی که به وسیله اپستین و همکاران [۱۴] در خصوص سازوکار جذب نمک‌های معدنی از جمله سدیم و پتاسیم به وسیله گیاه جو انجام شد، باوجود پیروی سازوکار جذب نمک در بیشتر گیاهان شورزی از مدل مایکل-متن، به

نتایج به دست آمده به دلیل رفتار متغیر گیاه در طول دوره رشد و تأثیرپذیری آن از بسیاری از عوامل داخلی و خارجی، نباید روندی ثابت، یک مدل سینتیکی و همچنین مرتبه‌ای واحد برای ارزیابی واکنش‌ها، معادلات و فعل و انفعالات صورت پذیرفته در گیاه‌پالایی گیاهان مختلف و سینتیک کاهش آلاینده را انتظار داشت ولی با این حال می‌توان با بررسی رفتار گیاه در بازه‌های کوچک‌تر و به تفکیک نوع گیاه و مقدار غلظت آلاینده، تحلیلی ریاضی از رفتار گیاهان مورد آزمایش در فرایند گیاه‌پالایی را نتیجه گرفت.

طبق بررسی به عمل آمده گیاهان فرانکینیا، فستوکا و آتریپلکس در طول دوره تیمار با آب شور، ابتدا در غلظت‌های پایین شوری دارای معادلات سینتیکی از مرتبه ۱ بوده و به تدریج با افزایش

- [4] Cornish-Bowden, A., 1995, *Fundamentals of enzyme kinetics*, Portland Press, London, UK.
- [5] Marschner, H., 1964, Einfluss von Calcium auf die Natriumaufnahme und die Kaliumabgabe isolierter Gerstenwurzeln. *Z. f. Pflanzenernaehrung. Duengung, Bodenk.* 107:19-33.
- [6] Larsen, M., Ucisik, A., and Trapp, S., 2005, Uptake, metabolism, accumulation and toxicity of cyanide in willow trees, *Env. Sci. Technol.*, (accepted 13 Jan.).
- [7] Yu., X., Zhou, P., Zhou, X., and Liu, Y., 2005, Cyanide Removal by Chinese Vegetation Quantification of the Michaelis- Menten Kinetics, *ESPR – Environ Sci & Pollut Res*, 12 (4): 221–226.
- [8] Raguž, V., Jarsjö, J., Grolander, S., Lindborg, R., & Avila, R. 2013, Plant uptake of elements in soil and pore water: Field observations versus model assumptions. *Journal of Environmental Management*, 126, 147-156.
- [9] Henderson, PJF., 1992, Statistical analysis of enzyme kinetic data, In: Eienthal R, Danson MJ (eds), *Enzyme assays*, IRL Press, Oxford, UK.
- [10] Itziar, A., and Carlos, G., 2001, Phytoremediation of organic contaminants in soils. *Bioresour. Technol.*, 79:273–276.
- [11] NSRC., 2006, Production of halophytes as forage Crops. Final report of the joint project between National Salinity Research Center (NSRC) and International Center for Biosaline Agriculture (ICBA).
- [12] Stenhouse, J., and Kijne, J.W., 2006, Prospects for productive use of saline water in West Asia and North Africa, Research Report no. 11.
- [13] Jacobson, M.E., Chiang, S.Y., Gueriguian, L., Westholm, L.R., Pierson, J., Zhu, G., and Saunders, F., 2003, M. Transformation kinetics of trinitrotoluene conversion in aquatic plants. In: McCutcheon SC, Schnoor JL (eds), *Phytoremediation– Transformation and Control of Contaminants*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 409–427.
- [14] Oertli, J., 1967, The salt absorption isotherm, *Physiologia plantarum*, 20:1014-1026.
- دلیل ماهیت کاتالیستی آنزیم‌های این گیاه مدل آنزیمی هالدن^۱ هماهنگی بیشتری را در گیاه جو از خود نشان داد. نرخ کاهش و جذب عنصر سدیم در گیاه جو از غلظت ۰ تا ۱۰۰ میلی‌اکی-والان بر لیتر به صورت خطی و از واکنش مرتبه ۲ بود که این رفتار مشابه رفتار گیاه فرانکینیا استفاده شده در این پژوهش در بازه افزایش شوری بود. در خصوص عنصر پتاسیم نیز با افزایش غلظت این عنصر پیروی واکنش کاهش شوری از مرتبه ۱ نتیجه شد که رفتار مشابهی به وسیله گیاه آتریپلکس در بازه افزایش شوری سدیمی در این پژوهش مشاهده شد.
- ### ۵-تشریح و قدردانی
- این پژوهش حاصل پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس بود که بدین وسیله از مساعدت‌ها و حمایت‌های معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.
- ### ۶-مراجع
- [1] Shelef, O., Gross, A., Liu, R., and Rachmilevitch, S., 2012, The use of *Bassia indica* for salt phytoremediation in constructed wetlands, *Water research*, 46:3967–3976.
- [۲] معظمی، ن.، ۱۳۸۲. چکیده طرح کاشت دانه‌های روغنی با آب دریا، پژوهشکده بیوتکنولوژی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران.
- [۳] هاشمی‌نیا، م.، کوچکی، ع. و قهرمان، ن.، ۱۳۷۶. بهره‌برداری از آب‌های شور در کشاورزی پایدار، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.