

# ارزیابی مدل‌های تجربی شوری‌زدایی خاک‌های شور و تعیین مدل مناسب برای اراضی شمال اهواز

معروف سی‌وسه‌مرده<sup>۱\*</sup>، فریدون کاوه<sup>۲</sup>، ابراهیم پذیرا<sup>۳</sup>، حسین صدقی<sup>۲</sup> و سید جمیل قادری<sup>۱</sup>

## چکیده

شوری و افزایش سدیم خاک به علت تجمع نمک پدیده‌ای است که در اراضی فاریاب مناطق خشک و نیمه‌خشک اتفاق می‌افتد و اصلاح اراضی شور تأثیر بسزایی در افزایش تولید محصول دارد. کشاورزی فاریاب که از چند دهه قبل توسعه زیادی پیدا کرده است باعث افزایش شوری در اراضی آبی شده و افزایش اراضی آبی که در اثر تجمع نمک بصورت لم‌یزرع درآمده‌اند ساختار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌بوم محلی را تهدید می‌کند. هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان اعتبار مدل‌های تجربی شوری‌زدایی نمک‌های محلول خاک‌های شور و سدیمی و هم‌چنین ارایه فرمول تجربی مناسب جهت برآورد آب خاک‌شویی برای اصلاح خاک مناطق مورد نظر بوده است. بنابراین آزمایش خاک‌شویی روی ۲ سری خاک، یکی سری خاک ابوبقال در زیر گروه Typic Salorthids در رده اریدی سول (Aridisals) با کلاس شوری و قلیائیت  $S_4A_4$  (منطقه ۱) و دیگری سری خاک رامین در زیر گروه Typic Torrifluvents در رده انتی سول (Entisols) با کلاس شوری و قلیائیت  $S_3A_2$  (منطقه ۲)، با استفاده از آب رودخانه کارون با چهار تیمار ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر آب خاک‌شویی و در سه تکرار تا عمق نمونه‌برداری ۲۰۰ سانتی‌متری خاک در استوانه‌های مضاعف در جلگه خوزستان (شمال اهواز) انجام گرفت. نتایج نشان داد که با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر عمق آب خاک‌شویی در منطقه ۱، ۸۷/۱۲٪ و در منطقه ۲، ۸۴/۵۴٪ املاح تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری شسته شده‌اند. هم‌چنین نتایج ارزیابی ۱۸ مدل مختلف شوری‌زدایی نشان داد که در منطقه ۱، مدل تجربی درجه سوم و در منطقه ۲، مدل نمایی بالاترین همبستگی و دقت را دارا بودند.

واژه‌های کلیدی: شوری‌زدایی، مدل‌های تجربی، خاک‌شویی، جلگه خوزستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۸/۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۲۴

۱- عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، \*مسئول مکاتبات maroof\_33m@yahoo.com

۲- عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات، fhkaveh@yahoo.com

۳- عضو هیأت علمی گروه تخصصی خاک‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات، epazira675@yahoo.com

## مقدمه

مدیریت منابع آب و خاک یکی از مباحث مهم برای تأمین نیاز غذایی جمعیت در حال رشد جهان است. شوری خاک یکی از فرآیندهای مهم تخریب اراضی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید. در مناطق خشک و نیمه‌خشک اصلاح این قبیل خاک‌ها به‌وسیله خاک‌شویی نمک‌های محلول با کاربرد آب دارای کیفیت خوب انجام و در مورد خاک‌های سدیمی در صورت لزوم همراه با مصرف مواد اصلاح‌کننده صورت می‌گیرد.

پژوهشگران زیادی برای ارایه رابطه‌ی کمی تعیین آب مورد نیاز خاک‌شویی نمک‌های محلول تلاش کرده‌اند (Pazira, 2005). جهت تعیین آب مورد نیاز خاک‌شویی، آزمایشگاه شوری ایالات متحده رابطه زیر را ارایه داده است (Richards, 1954):

$$LR = \frac{D_{dw}}{D_{iw}} = \frac{C_{iw}}{C_{dw}} = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} \quad (1)$$

که در آن:  $D_{dw}$  = عمق معادل آب زهکشی (میلی‌متر یا متر)،  $D_{iw}$  = عمق آب آبیاری (میلی‌متر یا متر)،  $C_{iw}$  = غلظت نمک در آب آبیاری (میلی‌اکی والان بر لیتر)،  $C_{dw}$  = غلظت نمک در آب زهکشی (میلی‌اکی والان بر لیتر) و  $EC_{dw}$  و  $EC_{iw}$  به ترتیب نمایانگر هدایت الکتریکی آب زهکشی و آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد.

مدل‌های تجربی، حاصل داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری تجربی می‌باشند که به وسیله روابط ریاضی برازش داده می‌شوند. بنابراین، در اشتقاق آن‌ها هیچ‌گونه پیش فرض فیزیکی و ریاضی اعمال نشده است. هرچند از مدل‌های تجربی در محل خاصی یا در مورد مشکل خاصی استفاده می‌شود، لیکن این نوع مدل‌ها می‌توانند بخش مهمی از یک مدل پیچیده عددی بوده و به‌کارگیری آن‌ها برای برآوردهای مقدماتی و تقریبی می‌تواند در دستیابی به اطلاعات مورد نیاز برنامه‌های اصلاح خاک سودمند باشد (به‌نقل از Asensio et al., 2008). نتایج تحقیقات اسچوپس و هویمنس (Schoups and Hopmans, 2006) نشان می‌دهد که افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری باعث کاهش عدم قطعیت ورودی مدل خواهد شد. نتایج آنالیزهای فیزیکوشیمیایی خاک‌های با مقادیر هدایت الکتریکی و شن زیاد و مواد آلی کم انجام گرفته به‌وسیله شی‌چنچ و همکاران (Shi Cheng et al., 2006) نشان داده است که اصلاح آن‌ها نیازمند زمان طولانی است.

نتایج مطالعات ریو و همکاران (Reeve et al., 1995) و ریو (Reeve, 1975) منجر به رابطه تجربی به صورت زیر گردید:

$$\frac{D_w}{D_s} = \frac{EC_i}{5(EC_f)} + 0.15 \quad (2)$$

که در آن  $EC_i$  و  $EC_f$  به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل و بعد از کاربرد عمق مشخصی از آب خاک‌شویی (دسی‌زیمنس بر متر) و  $D_w$  و  $D_s$  به ترتیب عمق ناخالص آب خاک‌شویی و ضخامت لایه خاک برحسب متر یا سانتی‌متر می‌باشد. براساس نتایج مختلف در زمینه خاک‌شویی، مشخص شده است که نتایج حاصله از معادله فوق با ارقام آزمایش‌های صحرائی خاک‌شویی مطابقت خوبی ندارد. دلیل آن این است که شرایط آزمایش‌های خاک‌شویی مختلف (نظیر شوری اولیه و بافت خاک) با شرایط آزمایش‌های ریو متفاوت می‌باشد. عده‌ای از پژوهشگران عقیده دارند که رابطه‌های شوری‌زدایی نوعی روابط تجربی - نظری می‌باشند و شکل کلی رابطه را مدل دیلمان<sup>۱</sup> (۱۹۶۳) قلمداد می‌نمایند. به هر حال شکل نهایی رابطه مورد نظر به شرح زیر است.

$$[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] = \exp[-(f \cdot D_w) / (\theta_v \cdot D_s)] \quad (3)$$

در این رابطه،  $f$ ، راندمان خاک‌شویی،  $\theta_v$  میزان رطوبت حجمی (اعشار) و  $EC_{eq}$ ، هدایت الکتریکی تعادلی (بر حسب دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. بر پایه بررسی‌ها و آزمون‌های مزرعه‌ای که در منطقه هانسا-هاریانانا<sup>۲</sup> هندوستان به‌وسیله لافلر و شارما (Leffelaar and sharma, 1977) به‌انجام رسید، مشخص شد که نتایج حاصل از کاربرد مدل ریو عمق آب خاک‌شویی را برای خاک‌هایی با بافت سبک بسیار بیشتر از میزان مورد نیاز برآورد می‌کند. پذیرا و همکاران (Pazira et al., 1998) براساس مطالعات و آزمون‌های متعدد انجام شده در بخش مرکزی استان خوزستان مدلی به شکل هذلولی و به شرح زیر به‌دست آوردند:

(۴)

$$[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] = [0.076 (D_s / D_w)] + 0.023$$

ورما و گوپتا (Verma and Gupta, 1989) نیز رابطه‌های تجربی را برای دو روش خاک‌شویی دایم و متناوب به‌دست آوردند (Pazira, 2005). پذیرا و کشاورز طی مطالعه‌های مربوط به تهیه و تدوین مدل تجربی در زمین‌های شور و

1. Dileman

2. Hansai-Haryana

شوری و قلیابیت  $S_3A_2$  بوده است. در جدول (۱) نتایج تجزیه شیمیایی آب خاکشویی آورده شده است.

ابتدا قطعه زمین یکنواختی که معرف اراضی کلاس شوری و قلیابیت منطقه بود، انتخاب شد و تعداد شش استوانه مضاعف به فواصل مساوی روی محیط دایره‌ای به شعاع ۵ متر استقرار یافت. مرکز دایره فوق‌الذکر میخ‌کوبی و به فواصل ۲۵ سانتی‌متری از سطح خاک تا عمق دو متری نمونه‌برداری از خاک به وسیله مته صورت گرفت. سپس نمونه‌های خاک قبل و بعد از خاکشویی تجزیه شد. بعد از تناوب‌های آب کاربردی ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ متر و به فاصله زمانی ۷۲-۴۸ ساعت، از سطح استوانه‌های داخلی که نحوه نمونه‌برداری آن در شکل (۱) نشان داده شده است تا عمق آب نفوذ یافته با روش بیان شده اقدام به برداشت نمونه خاک گردید. تجزیه‌های شیمیایی روی نمونه‌های خاک شامل مقدار هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک، کاتیون‌های تبادل، میزان یون سدیم قابل تعویض، درصد اشباع، اسیدیته، آهک، گچ، کاتیون‌های محلول عصاره اشباع خاک (سدیم، کلسیم و منیزیم) و نهایتاً برآورد درصد سدیم تبادلی، آنیون‌های محلول عصاره اشباع خاک (کلر، سولفات، کربنات و بیکربنات) بوده است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک و عمق آب مورد نیاز برای تأمین کسر رطوبت و نیز مقادیر نفوذپذیری اندازه‌گیری شده به روش پلکانی با استفاده از استوانه‌های مضاعف در منطقه (۱) را نشان می‌دهد. جدول (۳) نیز نتایج تجزیه شیمیایی خاک را قبل از خاکشویی در منطقه (۱) نشان می‌دهد. بررسی این ارقام بیانگر آن است که خاک پیش از خاکشویی با متوسط شوری تا عمق ۲ متری برابر با  $55/39$  ds/m، شور و قلیابی (کلاس  $S_4A_4$ ) بوده است.

مشخصات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک و عمق آب مورد نیاز برای تأمین کسر رطوبت و نیز مقادیر نفوذپذیری اندازه‌گیری شده به روش پلکانی با استفاده از استوانه‌های مضاعف منطقه (۲) در جدول (۴) ارائه شده است. کسر رطوبت تا عمق ۲ متری به  $67/15$  سانتی‌متر رسید. بدین ترتیب کل ۲۵ سانتی‌متر تناوب اول به‌علاوه  $21/15$  سانتی‌متر از دومین آب کاربردی صرف جبران کسر رطوبت خاک می‌گردد.

طبق جدول (۵) شوری خاک پیش از خاکشویی در لایه ۰-۲۵ سانتی‌متری، متوسط و در لایه‌های ۲۵-۲۰۰ سانتی‌متر، متوسط و عمدتاً زیاد بوده است.

سدیمی بخش جنوب شرقی استان خوزستان رابطه تجربی را به‌صورت زیر ارائه کردند (Pazira et al, 1998):

$$(5) \quad \left[ \frac{D_w}{D_s} \right]^{-0.864} = 0.0764 (EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})$$

محسنی‌فر و همکاران (Mohsenifar et al., 2006) با استفاده از داده‌های اولیه و نهایی هدایت الکتریکی نسبت به عمق خالص آب آبیاری به عمق خاک، یازده مدل تجربی را در منطقه جنوب‌شرقی استان خوزستان مورد بررسی قرار دادند. از آنجایی‌که برخی از محققین فقط مدل‌های تجربی صحرائی و برخی دیگر مدل‌های تجربی بر پایه برازش روابط ریاضی را مورد بررسی قرار داده‌اند، هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان اعتبار مدل‌های مختلف تجربی شوری‌زدایی خاک‌های شور و سدیمی و تعیین مدل مناسب در پیش‌بینی شوری‌زدایی از نیم‌رخ خاک در اراضی شمال اهواز می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه بخشی از اراضی دهستان عنافجه در استان خوزستان و شمال شهر اهواز بین ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۲۴ دقیقه و ۲۵ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه و ۱۰ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد بررسی از نقطه نظر وضعیت آب و هوایی به طور کلی جزو اقلیم خشک با زمستان‌های معتدل و کوتاه و تابستان‌های گرم و طولانی با میزان بارندگی سالیانه  $252/1$  میلی‌متر، میانگین سالیانه درجه حرارت  $24/9$  درجه سلسیوس و میزان تبخیر سالیانه برابر با  $3222/5$  میلی‌متر است. در این تحقیق، آزمایش خاکشویی با آب رودخانه کارون با چهار تیمار ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر عمق آب خاکشویی و در سه تکرار بوسیله استوانه‌های مضاعف روی دو سری از خاک‌های منطقه انجام شد که یکی سری خاک ابوبقال (منطقه ۱) در زیر گروه Typic Salorthids در رده اریدی سول (Aridisals) دارای بافت رسی سیلتی و شوری و قلیابیت بسیار زیاد ( $S_4A_4$ ) و دیگری سری خاک رامین (منطقه ۲) در زیر گروه Typic Torrifluvents در رده انتی سول (Entisols) دارای بافت لومی شنی و در کلاس

همبستگی و دقت و مدل ریو و با ضریب همبستگی  $0/118$  و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با  $1/844$  کمترین همبستگی و دقت را داشته است.

شایان ذکر است که مدل‌های ریو، هافمن و پذیرا-کاواچی دارای ضریب همبستگی منفی بوده‌اند. معادله درجه سوم محاسبه شده به صورت رابطه (۶) می‌باشد.

$$R^2=0.79 \quad (6)$$

$$Y = -0.04X^3 + 0.298X^2 - 0.679X + 0.486$$

که در آن  $X$ ، عمق خالص آب آبیاری به عمق خاک و  $Y$ ، اختلاف هدایت الکتریکی نهایی با هدایت الکتریکی تعادلی به اختلاف هدایت الکتریکی اولیه با هدایت الکتریکی تعادلی می‌باشد. هم‌چنین مقایسه مقادیر مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده بوسیله معادله فوق (۶) در شکل (۴) نشان داده شده است.

در جداول (۱۱) و (۱۲) نیز به ترتیب ضرایب مدل‌های مختلف و آماره‌های ارزیابی در منطقه ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول (۱۲) در منطقه ۲، مدل نمایی با ضریب همبستگی  $0/893$  و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با  $0/102$  بالاترین همبستگی و دقت و مدل ورما و گوپتا با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با  $68/92$  کمترین دقت و مدل ریو و با ضریب همبستگی  $0/281$  کمترین همبستگی را داشته است. ضمناً مدل درجه سوم بعد از مدل‌های ورما و گوپتا و ریو کمترین دقت و همبستگی را داشته و مدل‌های هافمن و پذیرا-کاواچی دارای ضریب همبستگی منفی بوده‌اند. معادله نمایی محاسبه شده به صورت زیر می‌باشد:

$$R^2=0.80 \quad (7)$$

$$Y = 0.85.e^{-3.3.X}$$

مقایسه مقادیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی شده مدل فوق در شکل ۵ نشان داده شده است.

نهایتاً نتایج تحقیقات مدل‌های تجربی شوری‌زدایی نشان داد که در منطقه (۱) مدل درجه سوم و در منطقه (۲) مدل نمایی بیشترین همبستگی و دقت را دارا بودند که با نتایج سایر محققان قابل مقایسه است، به طوری که نتایج تحقیقات محسنی‌فر و همکاران (Mohsenifar et al., 2006) در دو منطقه در جنوب شرقی استان خوزستان نشان داده بود که در یک منطقه مدل درجه سوم و در منطقه دیگر مدل معکوس بیشترین همبستگی و دقت را داشته‌اند، هم‌چنین نتایج تحقیقات

جهت مقایسه نتایج حاصل از اجرای آزمون‌های مزرعه‌ای با نتایج حاصله از مدل‌های تجربی، از برنامه SPSS و Excel استفاده شد. عمق خالص آب آبیاری به عمق خاک به عنوان  $X$  (متغیر مستقل) و اختلاف هدایت الکتریکی نهایی با هدایت الکتریکی تعادلی به اختلاف هدایت الکتریکی اولیه با هدایت الکتریکی تعادلی  $(\frac{ECf - ECeq}{ECi - ECeq})$  به عنوان (متغیر وابسته)  $Y$  وارد گردید. سپس یازده مدل ارائه شده در جدول (۶) به علاوه مدل‌های تجربی مرسوم شوری‌زدایی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آماره‌های ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا، خطای حداکثر، خطای میانگین، خطای میانگین مطلق، خطای نسبی، انحراف معیار، ضریب تغییرات و ضریب جرم باقیمانده استفاده شد.

## نتایج و بحث

در جدول (۷) مقادیر شوری اعماق مختلف خاک با تناوب‌های خاک‌شویی مختلف در منطقه (۱) ارائه شده است که نشان می‌دهد شوری عصاره اشباع خاک در تمام تیمارها پس از خاک‌شویی کاهش یافته است. اثر افزایش آب کاربردی بیش از  $75$  سانتی‌متر (کاربرد آب خاک‌شویی  $100$  سانتی‌متر نسبت به  $75$  سانتی‌متر) در کاهش شوری لایه  $0-50$  سانتی‌متری بسیار اندک بود، لیکن بر کاهش شوری لایه‌های تحتانی مؤثر بوده است. با مصرف آب خاک‌شویی، افزایش شوری در لایه‌های زیرین خاک مشاهده گردید که بیانگر تجمع و تراکم نمک شسته شده از بخش فوقانی خاک در این عمق می‌باشد، به طوری که هرچه عمق آب خاک‌شویی بیشتر باشد تجمع نمک در لایه‌های پایین‌تری صورت می‌گیرد. هم‌چنین در شکل (۲) شوری لایه‌های مختلف خاک به‌ازای اعماق مختلف آب خاک‌شویی در لایه‌های مختلف خاک نشان داده شده است. مقادیر شوری اعماق مختلف خاک با تناوب‌های خاک‌شویی در جدول (۸) و تغییرات شوری لایه‌های مختلف خاک به‌ازای اعماق مختلف آب خاک‌شویی منطقه (۲) در شکل (۳) نشان داده شده است.

در جداول (۹) و (۱۰) به ترتیب ضرایب مدل‌های مختلف و آماره‌های ارزیابی در منطقه ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول (۱۰) مدل درجه سوم با ضریب همبستگی  $0/887$  و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با  $0/053$  بالاترین

در آزمون صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق اگرچه مدل‌های مذکور دارای بیشترین همبستگی و دقت بوده و ضرایب آن‌ها محاسبه شده‌اند، ولی پیشنهاد می‌شود به دلیل پویا بودن خصوصیات شیمیایی خاک در زمان‌ها، مکان‌ها و اقلیم‌های مختلف با بافت‌های متفاوت این آزمون‌ها در سایر نقاط جهت پروژه‌های اجرایی انجام و تصمیم‌گیری‌ها با استفاده از ضرایب و مدل‌های مربوط به آن منطقه باشد.

خاک‌شویی صورت‌گرفته توسط دیلمان (Deilaman, 1963) در منطقه بین‌النهرین نشان داده بود که مدل‌نمایی بهترین مدل تجربی شوری‌زدایی است. همچنین نتایج تحقیقات رجب‌زاده و همکاران (Rajabzadeh *et al.*, 2009) جهت تعیین بهترین مدل شوری‌زدایی نشان داده که مدل‌نمایی با ضریب همبستگی ۰/۷۳۵ بیشترین همبستگی را داشته است.

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی آب‌های استفاده شده در آزمون‌های خاک‌شویی

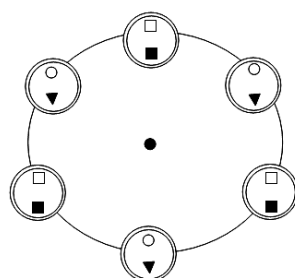
Table 1. Results of water chemical analysis used in leaching experiments

ردیف Row	محل آزمون‌ها Location of experiments	هدایت الکتریکی Electrical conductivity ( $\frac{dS}{m}$ )	T.D.S (mg/lit)	pH	غلظت Concentration (meq/lit)		SAR	طبقه‌بندی ویلکوس Willcox classification	Adj RNA
					$Na^{+}$	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$			
					1	Pilot No. 1			
2	Pilot No. 2	1.40	993	7.98	7.50	6.50	4.16	C3-S2	4.32

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک (ضخامت هر لایه ۲۵ سانتی‌متر) در منطقه ۱

Table 2. Soil physical properties in different layers at pilot no. 1 (each layer with 25 cm depth)

عمق Depth (cm)	ضخامت لایه Layer thickness (cm)	بافت خاک Soil texture	نفوذپذیری Permeability (mm/hr)	در صد رطوبت وزنی Gravity moisture percentage		وزن مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	کسر رطوبت Moisture deficit (d) (cm)	کسر رطوبت تجمعی Accumulated moisture deficit (cm)
				$\theta_{mFC}$	$\theta_{mc}$			
				0-25	25			
25-50	25	Silty clay loam	23.00	23.00	15.90	1.57	2.79	7.65
50-75	25	Silty clay loam	1.59	23.10	16.60	1.59	2.58	10.24
75-100	25	Silty loam	0.82	23.20	16.30	1.46	2.52	12.75
100-125	25	Silty loam	1.47	20.70	18.70	1.62	0.81	13.56
125-150	25	Silty clay loam	1.23	23.00	17.10	1.52	2.24	15.81
150-175	25	Silty clay loam	1.40	23.40	18.90	1.58	1.78	17.58
175-200	25	Silty clay loam	0.92	24.00	18	1.47	2.21	19.79



شکل ۱- نحوه آرایش استوانه‌های مضاعف در آزمون خاک‌شویی

Figure 1. Planning method of double rings in leaching experiment

- محل نمونه‌برداری خاک قبل از اجرای آزمون  
Soil sampling location before experiment
- محل نمونه‌برداری خاک پس از نفوذ ۰/۲۵ متر آب کاربردی  
Soil sampling location after 0.25 meter water infiltration
- محل نمونه‌برداری خاک پس از نفوذ ۰/۵۰ متر آب کاربردی  
Soil sampling location after 0.50 meter water infiltration
- محل نمونه‌برداری خاک پس از نفوذ ۰/۷۵ متر آب کاربردی  
Soil sampling location after 0.75 meter water infiltration
- ▼ محل نمونه‌برداری خاک پس از نفوذ ۱/۰ متر آب کاربردی  
Soil sampling location after 1.00 meter water infiltration

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی خاک قبل از خاک‌شویی در منطقه ۱

Table 3. Results of soil chemical analysis before leaching at pilot no. 1

عمق نمونه‌برداری Sampling depth	درصد اشباع Saturation percentage %SP	هدایت الکتریکی Electrical conductivity ECe (dS/m)	اسیدیته عصاره اشباع خاک pH	درصد مواد خشتی T.N.V	گچ Gypsum meq/100g soil	ظرفیت تبادل کاتیونی C.E.C meq/100g soil	سدیم قابل تبادل EX.Na+ meq/100g soil	نسبت جذب سدیم Sodium adsorption ratio SAR	درصد سدیم تبدلی Exchangable sodium percentage ESP1	درصد سدیم تبدلی Exchangable sodium percentage ESP2
0-25	37.40	160.00	7.20	29.20	62.00	10.40	4.20	135.90	40.40	66.60
25-50	34.30	73.00	7.70	30.30	39.70	11.60	3.70	58.20	31.90	45.80
50-75	49.70	48.20	7.90	30.70	26.10	11.40	2.30	50.00	20.20	42.00
75-100	55.30	37.00	8.00	32.60	10.70	12.50	3.00	43.90	24.00	38.80
100-125	43.40	35.50	7.90	34.40	9.70	11.20	2.70	41.50	24.10	37.50
125-150	50.20	34.10	8.00	34.80	13.90	12.20	3.00	39.80	24.60	36.50
150-175	50.60	29.00	8.00	34.80	15.40	11.20	4.30	31.50	38.40	31.20
175-200	59.20	26.30	8.10	33.70	8.60	10.80	3.70	32.60	34.30	31.90

$$ESP_1 = \left( \frac{Ex.Na^+}{C.E.C} \right) 100$$

$$ESP_2 = \frac{100(-0.0126 + 0.01475SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475SAR)}$$

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی لایه‌های مختلف خاک در منطقه ۲

عمق Depth (cm)	ضخامت لایه Layer Thickness (cm)	بافت خاک Soil texture	نفوذپذیری Permeability (mm/hr)	درصد رطوبت وزنی Gravity moisture percentage		وزن مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	کسر رطوبت Moisture deficit (d) (cm)	کسر رطوبت تجمعی Accumulated moisture deficit (cm)
				$\theta_{mFC}$	$\theta_{mc}$			
0-25	25	Silty loam	0.19	22.10	9.60	1.52	4.75	4.75
25-50	25	Silty clay	0.20	23.60	8.90	1.51	5.55	10.30
50-75	25	Silty clay loam	0.40	28.10	11.50	1.60	6.64	16.94
75-100	25	Silty clay loam	0.45	31.10	12.80	1.62	7.41	24.35
125-150	25	Silty clay loam	0.45	30.10	14.50	1.64	6.40	30.75
150-175	25	Silty clay loam	0.40	30.60	16.70	1.63	5.66	36.41
150-175	25	Silty clay loam	0.60	28.00	16.60	1.68	4.79	41.20
175-200	25	Silty clay loam	0.72	27.50	16.50	1.80	4.95	46.15

جدول ۵- نتایج تجزیه شیمیایی خاک قبل از خاک‌شویی در منطقه ۲

Table 5. Results of soil chemical analysis before leaching at pilot no. 2

عمق نمونه برداری Sampling depth	درصد اشباع Saturation percentage %SP	هدایت الکتریکی Electrical conductivity ECe (dS/m)	اسیدیته عصاره اشباع خاک pH	درصد مواد خشتی شونده T.N.V	گچ Gypsum meq/100g soil	ظرفیت تبادل کاتیونی C.E.C meq/100g soil	سدیم قابل تبادل EX.Na+ meq/100g soil	نسبت جذب سدیم Sodium adsorption ratio SAR	درصد سدیم تبادلی Exchangable sodium percentage ESP1	درصد سدیم تبادلی Exchangable sodium percentage ESP2
0-25	44.10	8.90	7.60	43.10	0	10.10	2.70	4.80	26.70	5.70
25-50	50.60	17.00	7.60	42.90	0	13.30	2.50	16.70	18.80	18.90
50-75	55.80	21.50	7.70	42.50	0	13.20	4.30	24.50	32.60	25.90
75-100	57.70	27.00	7.60	42.50	0	14.30	5.60	31.10	39.20	30.80
100-125	55.80	29.00	7.50	41.30	0	13.50	5.30	32.80	39.30	32.00
125-150	58.20	30.30	7.60	47.40	0	14.80	5.70	34.20	38.50	32.90
150-175	57.70	30.00	7.60	43.10	0	13.90	2.60	35.10	18.70	33.60
175-200	60.30	27.00	7.70	43.20	0	15.70	7.80	34.50	49.70	33.20

Table 6. Studied empirical models

جدول ۶- مدل‌های تجربی بررسی شده

ردیف Row	نام مدل	Model	مدل مربوطه Formula
1	خطی	Linear	$Y = aX + b$
2	لگاریتمی	Logarithmic	$Y = a \ln X + b$
3	معکوس	Inverse	$Y = a \frac{1}{X} + b$
4	درجه دوم	Quadratic	$Y = aX^2 + bX + c$
5	درجه سوم	Cubic	$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d$
6	توانی	Power	$Y = bX^a$
7	مركب	Compound	$Y = b.a^X$
8	اس	S	$Y = e^{\frac{a}{X} + b}$
9	لجستیک	Logistic	$Y = 1/(1/u + (b.a^X))$
10	رشد	Growth	$Y = e^{aX + b}$
11	نمایی	Exponential	$Y = b.e^{a.X}$

جدول ۷- مقادیر شوری اعماق مختلف خاک با تناوب‌های خاک‌شویی در منطقه ۱

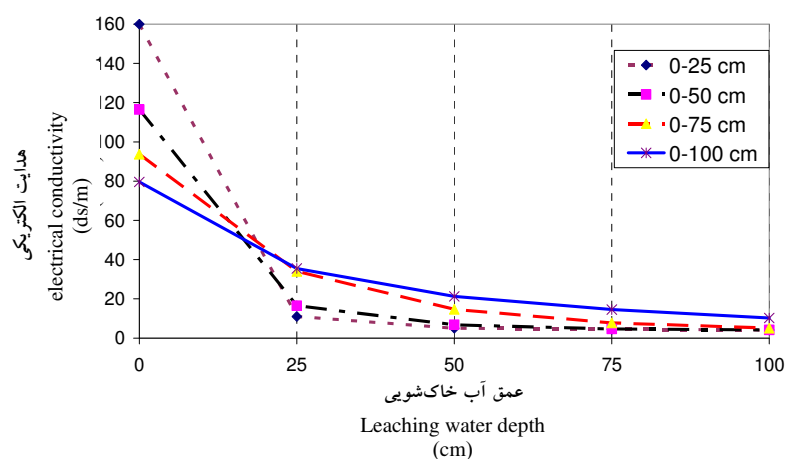
Table 7. Values of salinity in different soil depths with leaching water alternations at pilot no.1

ردیف Row	عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی قبل از خاکشویی Electrical conductivity before leaching ECi (dS/m)	هدایت الکتریکی خاک پس از کاربرد مقادیر مختلف آب خاکشویی Soil electrical conductivity after application of different values of leaching water (dS/m)			
			Dw=25 cm	Dw=50 cm	Dw=75 cm	Dw=100cm
			EC <sub>f</sub> (25)	EC <sub>f</sub> (50)	EC <sub>f</sub> (75)	EC <sub>f</sub> (100)
1	0-25	160.00	11.00	5.00	4.50	4.10
2	25-50	73.00	22.00	8.60	4.80	4.20
3	50-75	48.20	69.00	30.50	14.00	6.90
4	75-100	37.00	40.00	41.00	35.00	25.80
5	100-125	35.50	42.30	35.30	35.20	37.30
6	125-150	34.10	35.10	33.10	30.10	33.40
7	150-175	29.00	32.10	32.20	28.20	27.00
8	175-200	26.30	36.40	34.30	29.50	27.20

جدول ۸- مقادیر شوری اعماق مختلف خاک با تناوب‌های خاک‌شویی در منطقه ۲

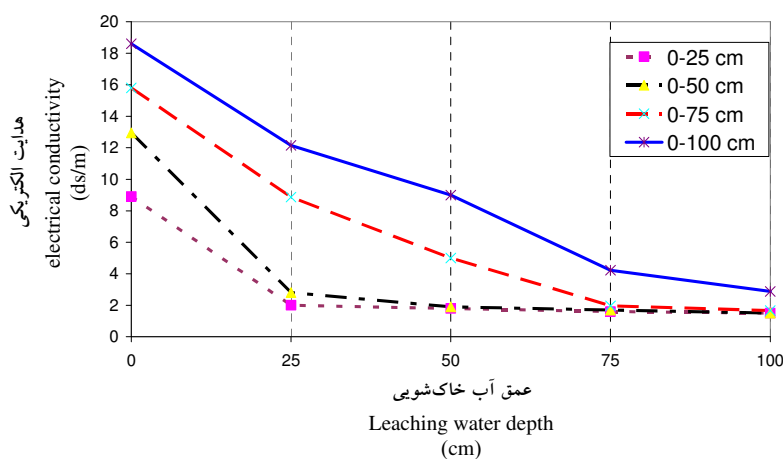
Table 8. Values of salinity in different soil depths with leaching water alternations in pilot no. 2

ردیف Row	عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی قبل از خاک‌شویی Electrical conductivity before leaching $EC_i$ (dS/m)	هدایت الکتریکی خاک پس از کاربرد مقادیر مختلف آب خاک‌شویی Soil electrical conductivity after application of different values of leaching water (dS/m)			
			$Dw=25\text{ cm}$	$Dw=50\text{ cm}$	$Dw=75\text{ cm}$	$Dw=100\text{ cm}$
			$EC_f(25)$	$EC_f(50)$	$EC_f(75)$	$EC_f(100)$
1	0-25	8.90	2.00	1.80	1.60	1.50
2	25-50	17.00	3.60	2.00	1.80	1.50
3	50-75	21.50	21.00	11.20	2.50	2.00
4	75-100	27.00	22.00	21.00	11.00	6.50
5	100-125	29.00	28.20	22.00	25.00	18.50
6	125-150	30.00	30.60	25.10	24.00	25.50
7	150-175	30.00	31.00	29.00	28.20	27.00
8	175-200	27.00	28.30	30.40	29.10	27.80



شکل ۲- مقایسه شوری لایه‌های مختلف خاک به‌ازای اعماق مختلف آب خاک‌شویی در منطقه ۱

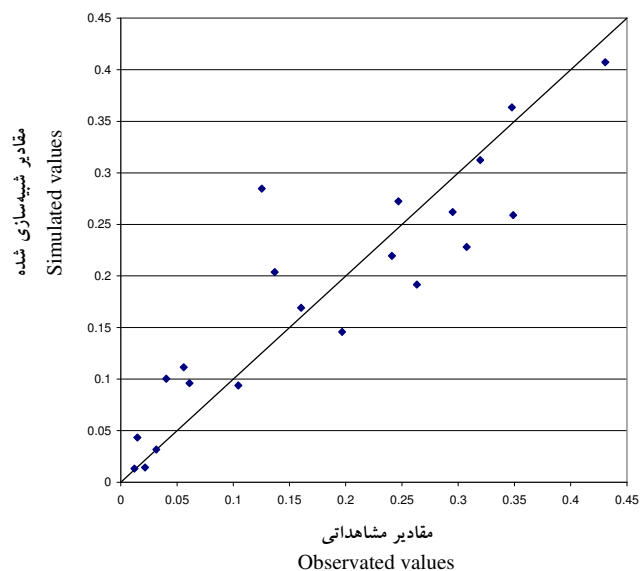
Figure 2. Salinity comparison of different soil layers at affected various depths of leaching water in pilot no. 1



شکل ۳- مقایسه شوری لایه‌های مختلف خاک به‌ازای اعماق مختلف آب خاک‌شویی در منطقه ۲

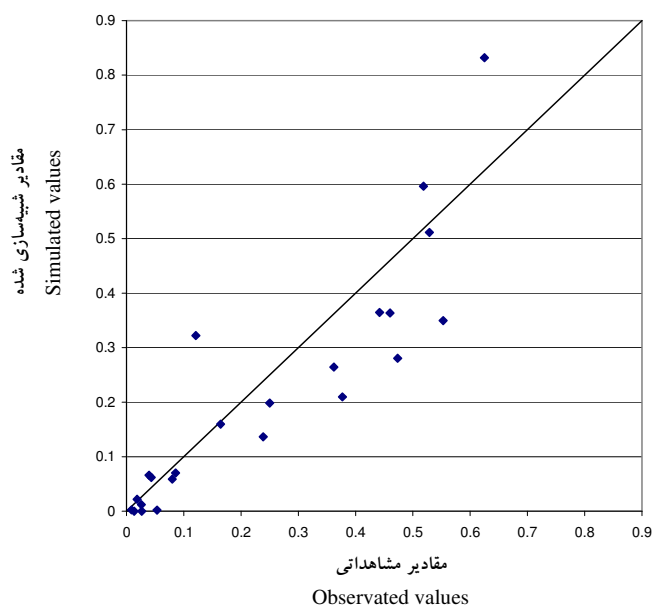
Figure 3. Salinity comparison of different soil layers at affected various depths of leaching water in pilot no. 2





شکل ۴- مقایسه مقادیر  $(ECf-ECeq)/(ECi-ECeq)$  مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل درجه سوم در منطقه ۱

Figure 4. observed values of  $(ECf-ECeq)/(ECi-ECeq)$  with simulated values by cubic model at pilot no. 1



شکل ۵- مقایسه مقادیر  $(ECf-ECeq)/(ECi-ECeq)$  مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل‌نمایی در منطقه ۲

Figure 5. comparison of observed values of  $(ECf-ECeq)/(ECi-ECeq)$  with simulated values by cubic model at pilot no. 2

جدول ۹- ضرایب انواع مدل‌های تجربی شوری‌زدایی در منطقه ۱

Table 9. Coefficients of various desalination empirical models in pilot no. 1

ردیف Row	نام مدل	Model	ضرایب ثابت Constant coefficients			
			a	b	c	d
1	خطی	Linear	-0.10	0.26		
2	لگاریتمی	Logarithmic	-0.14	0.11		
3	معکوس	Inverse	0.06	0.04		
4	درجه ۲	Quadratic	0.07	-0.37	0.39	
5	درجه ۳	Cubic	-0.04	0.30	-0.68	-0.49
6	مرکب	Compound	0.32	0.29		
7	توانی	Power	-1.34	0.06		
8	اس	S	-3.28	0.48		
9	رشد	Growth	-1.15	-1.23		
10	نمایی	Exponential	-3.50	0.85		
11	لجستیک	Logistic	0.32	3.43		
12	ریو	Reeve	5	-0.15		
13	دیلمان	Dileman				
14	لافلر و شارما	Leffelaar and sharma	0.06	0.03		
15	هافمن	hoffman	0.30			
16	پذیرا و کاواچی	Pazira and Kawachi	0.08	0.02		
17	ورما و گوپتا	Verma and gupta	-1.63	0.09		
18	پذیرا و کشاوارز	Pazira and Keshavarz	-0.86	0.08		

جدول ۱۰- نتایج آماره‌های انواع مدل‌های تجربی شوری‌زدایی در منطقه ۱

Table 10. Results of statistics of various desalination empirical models at pilot no. 1

نام مدل Model	آماره									
	ضریب همبستگی R	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	سطح معنی‌دار بودن Sig.	خطای میانگین MBE	خطای میانگین مطلق MAE	خطای حداکثر ME	خطای نسبی RE	ضریب جرم باقی مانده CRM	انحراف معیار SE	ضریب تغییرات C.V.
Linear	0.68	0.09	0.00	0.00	0.08	0.18	51.00	0.00	0.09	55.20
Logarithmic	0.85	0.06	0.00	0.00	0.05	0.13	31.40	0.00	0.11	69.57
Inverse	0.77	0.08	0.00	0.00	0.07	0.15	40.30	0.00	0.11	64.29
Quadratic	0.85	0.06	0.00	0.00	0.05	0.15	32.70	-0.01	0.11	68.86
Cubic	0.89	0.05	0.00	0.00	0.04	0.16	23.50	0.00	0.12	72.06
Compound	0.86	0.08	0.00	-0.03	0.07	0.18	40.70	0.20	0.08	46.02
Power	0.74	0.13	0.00	0.00	0.08	0.53	46.90	-0.01	0.20	122.58
S	0.51	0.32	0.01	0.02	0.14	1.47	85.10	-0.10	0.38	227.79
Growth	0.86	0.08	0.00	-0.03	0.07	0.18	40.60	0.20	0.08	46.01
Exponential	0.86	0.08	0.00	-0.03	0.06	0.14	35.00	0.17	0.14	88.09
Logistic	0.86	0.08	0.00	-0.03	0.07	0.18	40.60	0.20	0.08	46.00
Reeve	-0.12	1.84	0.59	0.13	0.80	7.69	485.20	-0.80	1.82	1104.29
Dileman	0.85	0.35	0.00	0.33	0.33	0.58	197.80	-1.98	0.40	243.30
Leffelaar and sharma	0.77	0.08	0.00	-0.01	0.06	0.16	39.40	0.04	0.11	64.42
hoffman	-0.68	0.38	0.00	0.12	0.28	1.13	167.80	-0.71	0.29	173.10
Pazira and Kawachi	-0.68	0.20	0.00	-0.07	0.17	0.40	100.50	0.43	0.10	58.45
Verma and gupta	0.66	0.54	0.00	0.21	0.21	2.33	129.90	-1.26	0.61	372.16
Pazira and Keshavarz	0.80	0.20	0.00	-0.03	0.06	0.18	37.70	0.18	0.10	61.69

جدول ۱۱- ضرایب انواع مدل‌های تجربی شوری‌زدایی در منطقه ۲

Table 11. Coefficients of various desalination empirical models at pilot no. 2

ردیف Row	نام مدل	Model	ضرایب ثابت Constant Coefficients			
			a	b	c	d
1	خطی	Linear	-0.15	0.37		
2	لگاریتمی	Logarithmic	-0.13	0.14		
3	معکوس	Inverse	0.003	0.21		
4	درجه ۲	Quadratic	0.11	-0.55	0.53	
5	درجه ۳	Cubic	-0.73	0.51	-1.05	0.65
6	مرکب	Compound	0.31	0.34		
7	توانی	Power	-0.81	0.07		
8	اس	S	0.01	-2.20		
9	رشد	Growth	-1.17	-1.09		
10	نمایی	Exponential	-3.30	0.85		
11	لجستیک	Logistic	3.21	2.96		
12	ریو	Reeve	5	-0.15		
13	دیلمان	Dileman				
14	لافلر و شارما	Leffelaar and sharma	0.06	0.03		
15	هافمن	hoffman	0.30			
16	پذیرا و کاواچی	Pazira and Kawachi	0.08	0.02		
17	ورما و گوپتا	Verma and gupta	-1.63	0.09		
18	پذیرا و کشاوارز	Pazira and Keshavarz	-0.86	0.08		

جدول ۱۲- نتایج آماره‌های انواع مدل‌های تجربی شوری‌زدایی در منطقه ۲

Table 12. Results of statistics of various desalination empirical models at pilot no. 2

نام مدل Model	آماره									
	ضریب همبستگی R	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	سطح معنی دار بودن Sig.	خطای میانگین MBE	خطای میانگین مطلق MAE	خطای حداکثر ME	خطای نسبی RE	ضریب جرم باقی مانده CRM	انحراف معیار SE	ضریب تغییرات C.V.
Linear	0.66	0.16	0.00	0.00	0.14	0.25	59.70	0.00	0.14	58.23
Logarithmic	0.83	0.12	0.00	0.00	0.10	0.23	42.30	0.00	0.17	71.71
Inverse	0.44	0.19	0.03	0.00	0.17	0.33	71.20	0.00	0.09	38.81
Quadratic	0.86	0.11	0.00	0.00	0.09	0.26	38.00	0.00	0.18	75.66
Cubic	0.38	8.25	0.07	-2.72	2.75	36.37	1147.40	11.37	8.33	3477.50
Compound	0.88	0.15	0.00	-0.07	0.12	0.31	50.10	0.29	0.11	47.89
Power	0.48	0.75	0.02	0.07	0.26	3.50	108.30	-0.29	0.82	342.95
S	0.41	0.22	0.05	-0.10	0.17	0.44	70.80	0.42	0.16	65.23
Growth	0.88	0.15	0.00	-0.07	0.12	0.31	50.00	0.29	0.11	47.87
Exponential	0.89	0.10	0.00	-0.03	0.07	0.21	30.70	0.11	0.22	90.20
Logistic	0.88	0.15	0.00	-0.07	0.12	0.31	50.00	0.29	0.11	47.86
Reeve	0.28	10.33	0.19	2.14	2.87	49.15	1196.50	-9.34	10.39	4337.3
Dileman	0.87	0.33	0.00	0.31	0.31	0.62	127.70	-1.28	0.41	169.57
Leffelaar and sharma	0.44	1.87	0.03	0.35	0.48	8.96	202.60	-1.48	1.95	815.57
hoffman	-0.66	0.44	0.00	0.02	0.36	1.13	149.90	-0.07	0.27	113.67
Pazira and Kawachi	-0.66	0.30	0.00	-0.15	0.24	0.60	100.90	0.63	0.17	69.42
Verma and gupta	0.40	68.92	0.06	14.65	14.66	330.50	6119.90	-61.20	69.00	2881.80
Pazira and Keshavarz	0.46	1.11	0.03	0.17	0.32	5.31	135.40	-0.71	1.19	499.02

## References

## منابع

- Asensioa MI, Ayusob B, Ferraguta L, Sangalli G (2008) Numerical methods for modelling leaching of pollutants in soils. 23(8): 1045-1055.
- Anonymous (2006) Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soil. <http://www.fao.org/ag/agl>.
- Dieleman PJ (1963). Reclamation of salt-affected soils in Iraq. Veenman, Wageningen, 175 pp.
- Haidari N (1994) Studing of leaching models and determine leaching efficiency at saline and sodic soils. M.Sc. Thesis. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran. Karaj, Iran. 125 pp. [In Persian with English Abstract].
- Leffelaar PA, Sharma P (1977) Leaching of a highly saline-sodic soil. Journal of Hydrology. 32: 203-218.
- Mohsenifar K, Pazira A, Najafi P (2006) Evaluation of different types of leaching models in two pilots of south east Khoozestan province. 18th World Congress of Soil Science. Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Pazira E (2005) Application and Evaluation of empirical and theoretical leaching models of salt-affected soils. Volume 276, Iranian Water Resources Management Company. 275 pp . [In Persian with English Abstract].
- Pazira E, Keshavarz A, Torii K (1998) Studies on appropriate depth of leaching water. International Workshop on the Use of Saline and Brackish-Water for Irrigation, Indonesia.
- Rajabzadeh F, Pazira E, Mahdian MH, Mahmoudi S, Heidarizadeh M (2009) Leaching saline and sodic soils along with reclamation-rotation program in the mid-part of Khuzestan, Iran. Journal of Applied Science 9: 4020-4025.
- Richards LA (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkalin soils. United States Department of Agriculture, Washington DC.
- Shi Z, Cheng JL, Huang MX, Zhou LQ (2006) Assessing reclamation levels of coastal saline lands with integrated stepwise discriminant analysis and laboratory hyperspectral data. Pedosphere 16(2): 154-160.