

راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور

نشریه شماره ۳۵۹

وزارت نیرو
شرکت مدیریت منابع آب ایران
دفتر استانداردها و معیارهای فنی
<http://www.wrm.ir/standard>

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور
معاونت امور فنی
دفتر امور فنی، تدوین معیارها و
کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله
<http://tec.mporg.ir>

جمهوری اسلامی ایران
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور

نشریه شماره ۳۵۹

وزارت نیرو
شرکت مدیریت منابع آب ایران
دفتر پژوهشها و استانداردها

معاونت امور فنی
دفتر امور فنی، تدوین معیارها و
کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

فهرست برگه

پذیرا، ابراهیم

راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور / [تهیه‌کننده ابراهیم پذیرا] برای معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله؛ وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر پژوهشها و استانداردها. - تهران: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور اداری، مالی و منابع انسانی، مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات، ۱۳۸۵. ۱۱۴ ص.:: جدول. - (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله؛ نشریه شماره ۳۵۹) (انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور؛ ۸۵/۰۰/۱۷۱) ISBN 978-964-425-902-9

مربوط به بخشنامه شماره ۱۰۰/۱۶۶۵۵۶ مورخ ۱۳۸۵/۱۰/۵
کتابنامه: ص. ۱۰۹-۱۱۴

۱. خاک - آبشویی - دستنامه‌ها. ۲. خاک - بهسازی - دستنامه‌ها. ۳. خاک - نمکها. ۴. خاک - سدیم. الف. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله. ب. شرکت مدیریت منابع آب ایران. دفتر پژوهشها و استانداردها. ج. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات. د. عنوان. ه. فروست.

۱۳۸۵ ش. ۳۵۹ / س ۲۴ / TA ۳۶۸

ISBN 978-964-425-902-9

شابک ۹۰۲-۹ - ۹۶۴-۹۷۸-۴۲۵

راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور

تهیه‌کننده: معاونت امور فنی. دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله
ناشر: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور اداری، مالی و منابع انسانی، مرکز مدارک علمی، موزه و انتشارات

چاپ اول، ۵۰۰ نسخه

قیمت: ۱۳۰۰۰ ریال

تاریخ انتشار: سال ۱۳۸۵

لیتوگرافی: قاسملو

چاپ و صحافی: زحل چاپ

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.



بسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
رییس سازمان

شماره:	۱۰۰/۱۶۶۵۵۶	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۸۵/۱۰/۵	

موضوع:

راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران به پیوست نشریه شماره ۳۵۹ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله این سازمان، با عنوان «راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های خاک‌های شور» از نوع گروه سوم، ابلاغ می‌شود.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنماهای بهتری در اختیار داشته باشند، جایگزین کنند.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را برای دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله این سازمان، ارسال دارند.

امیر منصور برقی

معاون رییس جمهور و رییس سازمان

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور با استفاده از نظر کارشناسان برجسته، مبادرت به تهیه این دستورالعمل نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۳- در صورت امکان، متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
 - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، خیابان شیخ بهائی، بالاتر از ملاصدرا، کوچه لادن، شماره ۲۴
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله

<http://tec.mporg.ir>

صندوق پستی ۴۵۴۸۱-۱۹۹۱۷

بسمه تعالی

پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه (مطالعات امکان‌سنجی)، مطالعه و طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های عمرانی به لحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد.

نظام فنی و اجرایی طرح‌های عمرانی کشور (مصوبه مورخ ۱۳۷۵/۴/۴ هیأت محترم وزیران) بکارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است.

باتوجه به مراتب یاد شده و شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، امور آب وزارت نیرو (طرح تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای صنعت آب کشور) با همکاری معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله) براساس ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه اقدام به تهیه استانداردهای مهندسی آب نموده است. استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین شده است :

- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استانداردها و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات تهیه‌کننده استاندارد ضمن تشکر از کارشناسان محترم برای بررسی و اظهار نظر در مورد این استاندارد، امید است مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با بکارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیت‌های کشور تلاش نموده و صاحب‌نظران و متخصصان نیز با اظهار نظرهای سازنده در تکامل این استانداردها مشارکت کنند.

حبیب امین فر - معاون امور فنی

پاییز ۱۳۸۵

ترکیب اعضای تهیه کننده : کمیته و ناظران تخصصی

استاندارد «راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمکهای خاکهای شور» توسط آقای دکتر ابراهیم پذیرا تهیه شده است. گروه نظارتی که مسئولیت نظارت تخصصی بر تدوین این راهنما را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفباء عبارتند از :

مجتبی اکرم	شرکت مهندسين مشاور آساران	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی
مهین کاظم‌زاده	دفتر پژوهشها و استانداردها	لیسانس مهندسی راه و ساختمان
ژاله وزیری	مؤسسه تحقیقات خاک و آب	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی
مهدی همایی	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای خاک‌شناسی

اسامی اعضای کمیته تخصصی آبیاری و زهکشی بخش استاندارد دفتر پژوهشها و استانداردها که بررسی و تأیید این راهنما را به عهده داشته‌اند به ترتیب حروف الفباء عبارتند از :

ابراهیم پذیرا	واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران	دکترای مهندسی منابع آب
اسماعیل جباری	شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس هیدرولیک
محمد صادق جعفری	شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی
سید مجتبی رضوی نبوی	شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی
سید رحیم سجادی	وزارت جهاد کشاورزی	لیسانس آبیاری و زهکشی
محمد کاظم سیاهی	شرکت مهندسين مشاور پندام	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی و منابع آب
محمدحسن شمشیرساز	شرکت مهندسين مشاور پژوهاب	فوق لیسانس آبیاری و زهکشی
محمدحسین شیروی	کارشناس آزاد	لیسانس فیزیک
محمدجواد منعم	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای آبیاری و زهکشی
انسیه محرابی	دفتر پژوهشها و استانداردها	فوق لیسانس تأسیسات آبیاری

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	۱- هدف و دامنه کاربرد
۳	۱-۱ هدف
۳	۲-۱ دامنه کاربرد
۳	۲- کلیات
۳	۱-۲ منشأ نمک در منابع خاک و آب
۴	۲-۲ وضعیت کیفی خاکهای شور و سدیمی و اثرهای آن در کشاورزی
۵	۱-۲-۲ رده‌بندی و اصلاح خاکهای شور و سدیمی
۷	۲-۲-۲ اثر شوری و سدیمی بودن بر ویژگیهای خاک و عملکرد گیاهان
۱۰	۳- مبانی حرکت نمکها در نیمرخ خاک
۱۰	۱-۳ بیلان آب و نمک در خاک و ضرورت کنترل آن
۱۰	۲-۳ چگونگی پویایی نمکها در نیمرخ خاکها
۱۱	۱-۲-۳ مبانی پایه و نظری
۱۱	۲-۲-۳ حرکت نمکها در اثر پخشیدگی
۱۴	۳-۲-۳ حرکت نمک در اثر انتشار
۱۵	۴-۲-۳ حرکت نمک در اثر فرایندهای انتشار- پخشیدگی
۱۷	۵-۲-۳ بیان ریاضی پخشیدگی - انتشار
۲۱	۶-۲-۳ راهکارهای ریاضی و کاربردی
۲۳	۷-۲-۳ پدیده تأخیری یا بازدارندگی
۲۸	۴- مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک خاکهای شور
۲۸	۱-۴ کلیات
۲۹	۲-۴ فرایند شوری‌زدایی از نیمرخ خاکها
۳۳	۳-۴ مدل‌های تجربی آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها
۳۴	۱-۳-۴ مدل ریو (۱۹۵۷)
۳۶	۲-۳-۴ مدل دیلمان (۱۹۶۳)
۳۷	۳-۳-۴ مدل لافلر و شارما (۱۹۷۷)
۳۸	۴-۳-۴ مدل هافمن (۱۹۸۰)

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۹	مدل پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱)
۴۰	مدل ورما و گوپتا (۱۹۸۹)
۴۱	مدل پذیرا و کشاورز (۱۹۹۸)
۴۲	بحث و نتیجه‌گیری از مبحث کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمکها
۴۳	۴-۴ مدل‌های نظری آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها
۴۴	مدل مخزن منفرد (SR _M)
۴۵	مدل مخزن با مجرای فرعی (SRBM)
۴۶	مدل سری مخازن (SRM)
۴۹	مدل نظری ستون پیوسته خاک (TPTM)
۵۰	مدل انتقال-انتشار (پراکنش) هیدرودینامیکی (CDM)
۵۳	مدل تابع انتقال (TFM)
۵۵	مدل حل عددی (NM)
۵۶	بحث و نتیجه‌گیری از مبحث کاربردی مدل‌های نظری آبشویی نمکها
۵۸	پیوست ۱- روش اجرای آزمایشها، پردازش داده‌ها و شیوه نتیجه‌گیری از رقمها و اعداد حاصل از اجرای آزمونهای
۵۸	آبشویی خاکهای شور و سدیمی
۷۳	پیوست ۲- بعضی منحنیهای رخنه (BTC) نظری و تجربی [۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۵]
۷۵	پیوست ۳- مثال عملی از کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمک در خاکهای شور
۹۱	پیوست ۴- ارائه مثال عملی درمورد کاربرد مدل‌های نظری آبشویی نمک خاکهای شور
۱۰۹	منابع و مراجع

مقدمه

براساس داده‌های موجود از کل ۱۶۵ میلیون هکتار زمینهای سطح کشور، مساحتی حدود ۲۳/۵ میلیون هکتار یا ۱۴/۲ درصد کل در مقادیر متفاوت با مشکلات شوری، سدیمی بودن، زهداری و حالت ماندابی روبه‌رو بوده است. مقدار بیان‌شده مساوی ۳۰ درصد مساحت فلاتهای کم ارتفاع و دشتهای کشور نیز می‌باشد.^۱ اجزای مساحت ذکر شده شامل:

- ۷/۷ میلیون هکتار خاکهای "آریدی سولز"^۲ و آنتی سولز^۳ حاوی خاکهای شور و خاکهای رسوبی شور هستند، این خاکها به دلیل ویژگیهای ذاتی و کیفی به‌طور نسبی به آسانی قابل اصلاح و بهسازی هستند.
- ۸/۲ میلیون هکتار خاکهای باتلاقی شور به‌طور عمده جزو رده "آریدی سولز" و گروه بزرگ "آکوی سالیدز"^۴ هستند. اصلاح و بهسازی این خاکها نیاز به بررسی و اقدامهای خاص و پیچیده‌ای دارد.
- ۷/۶ میلیون هکتار شامل خاکهای تکامل نیافته و یا با تکامل بسیار کم نیمرخ خاک، که بر روی سنگهای آهکی و یا مارنهای گچی و آهکی تشکیل شده است. این گونه خاکها اغلب کم‌عمق و بخش وسیعی از آنها شور و سدیمی بوده و به‌دلیل فنی و اقتصادی برای اجرای عملیات بهسازی نامناسب هستند. این خاکها به‌طور عمده جزو رده "آنتی سولز"^۵ بوده و سطوح کمی از آنها در رده "آریدی سولز" قرار دارد.

لازم به ذکر است که فرایند شوری و سدیمی شدن خاکها، پدیده‌ای پویا و به‌طور دائم در حال تغییر است و به همین دلیل می‌توان تصور کرد که همه این رقمهای تغییرات کلی داشته باشند.

متخصصان کشاورزی، اقتصاددانان و جامعه‌شناسان بیشتر کشورهای جهان که منابع فیزیکی تولید آنها با مشکلات شوری و یا سدیمی بودن روبه‌روست، اعتقاد دارند که معضل گرایش به شوری منابع (آب و خاک) تولید در بخش کشاورزی، در آینده‌ای نه چندان دور ممکن است ابعاد اقتصادی و اجتماعی زندگی را در جوامع کشاورزی و روستایی با تنگناهای ویژه‌ای روبه‌رو کند و در نتیجه لزوم پیشگیری و مقابله با آن لازم است.

توجه: پیشنهاد می‌شود برای آگاهی بیشتر و استفاده مطلوب‌تر از مندرجات این راهنما در ارتباط با روش اجرای آزمایشها، پردازش داده‌ها و نتیجه‌گیری از رقمها و اطلاعات حاصل از اجرای آزمونهای آزمایشگاهی و میدانی (مزرعه‌ای)، موارد مندرج در "دستورالعمل آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی در ایران"، نشریه شماره ۲۵۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۱ مورد توجه قرار گیرد.

خاکهای شور و سدیمی را می‌توان به خاکهای شور^۵، خاکهای سدیمی^۶ و خاکهای شور و سدیمی^۷ رده‌بندی کرد. به‌طور خلاصه، خاکهای شور حاوی مقدار زیاد نمکهای محلول است، خاکهای سدیمی مقدار زیادی سدیم تبادلی دارند، در حالی که خاکهای شور و سدیمی هر دو ویژگی بیان‌شده را دارا هستند یعنی مقدار نمکهای محلول و سدیم تبادلی آنها زیاد است.

1 - دستورالعمل آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی در ایران، نشریه شماره ۲۵۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۱.

2 - Aridisols

3 - Entisols

4 - Aquisalsols

5 - Saline Soils

6 - Sodic Soils

7 - Saline Sodic Soils

در هر محلی از کشور که میزان تبخیر بر بارندگی فزونی دارد و نیز در حالت بالا بودن سطح ایستابی، شور شدن خاک و زمینها اجتناب‌ناپذیر بوده و توجه مجدد به این مهم که در ۹۰ درصد سطح کشور مقادیر بارندگی کمتر از ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در سال است به‌خوبی مشخص می‌شود که در این شرایط، کشاورزی در کشور به‌ویژه در زمینهای فاریاب همواره با مشکل شوری منابع آب و خاک روبه‌رو بوده است.

با توجه به موارد ذکر شده، ملاحظه می‌شود که شرایط اقلیمی خاص کشور، فرآیند تشکیل و گسترش خاکهای مسئله‌دار را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. خاکهای شور و سدیمی اغلب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و به‌طور گسترده در جلگه‌ها و دشتهای رسوبی و بویژه در دشتهای آبرفتی پراکنده هستند این زمینها یا از نظر وضعیت زهکشی طبیعی، ضعیف بوده و یا در چنین شرایطی تکوین و گسترش یافته‌اند.

۱- هدف و دامنه کاربرد

۱-۱ هدف

هدف از تهیه این راهنما، ارائه رهنمودهای لازم برای شناخت، بهسازی فیزیکی - شیمیایی مناسب و بهره‌برداری مطلوب از خاکهای متأثر از مشکلات شوری و سدیمی با استفاده از مدل‌های آبشویی نمکها از نیمرخ خاک است که بر اساس روابط نظری و تجربی بسط و با توجه به ویژگیهای محلی تعدیل یافته‌اند.

۱-۲ دامنه کاربرد

این راهنما برای بررسی و روند شوری‌زدایی برای شرایط متفاوت کیفیت آب و خاک کاربرد دارد.

۲- کلیات

۱-۲ منشأ نمک در منابع خاک و آب

با وجود شرایط اقلیمی مناسب در مناطقی با شبکه‌های آبیاری پیشرفته و مدرن، به‌طور کلی، تولید کشاورزی در زمینهای فاریاب، زیاد و مطلوب نیست. براساس مطالعات انجام شده بر روی عوامل طبیعی و غیرطبیعی محدودکننده میزان عملکرد محصول در واحد سطح، می‌توان به پایین بودن سطح دانش و مهارت تولیدکنندگان در بخش کشاورزی، گرانی و ناکافی بودن مواد شیمیایی مورد نیاز (کود، سم، هورمون و...)، ناکافی بودن عملیات ماشینی در امور زراعی و باغی و از همه مهم‌تر مشکل گرایش کیفیت منابع فیزیکی تولید (خاک و آب) به شوری و سدیمی شدن، و به دنبال آن نامطلوب شدن کیفی منابع اشاره کرد.

درباره مشکل اخیر، به‌استناد تجربیات بسیار که گاه قدمت زیادی دارد ولی به‌طور عمده به زمان حاضر مرتبط است، می‌توان ادعا کرد که شوری و سدیمی شدن منابع تولید (آب و خاک) در شبکه‌های آبیاری سنتی و جدید، کاهش میزان عملکرد محصول را تا حدود ۹۰ درصد و یا بیشتر به‌دنبال داشته است.

اصلاح، بهسازی و استفاده دوباره، متناوب و قابل تداوم از منابع خاک و آب مسئله‌دار، مستلزم هزینه زیاد، تخصص، تحقیق، پایش و بالاخره زمان و مدیریت ویژه بوده و در مقایسه با آنچه در کشاورزی با آب و خاک مناسب مطرح است، ابعاد اقتصادی، اجتماعی و فناوری بسیار متفاوتی دارد.

نامطلوبی و تخریب ویژگیهای کیفی منابع فیزیکی تولید (خاک و آب) در بخش کشاورزی، فقط مربوط به اقلیمهای خشک و نیمه‌خشک نیست بلکه شواهد موجود نشان می‌دهد که گستره این مشکلات در مناطق نیمه‌مرطوب نیز وجود دارد.

از نظر کاربرد و مصرف آب در کشاورزی، زمینهای شور و یا شور و سدیمی نیاز به آب آبیاری بسیار زیادی دارند. با توجه به این واقعیت که در دهه‌های اخیر، حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های دائمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌طور مرتب کمبود

عرضه آب مفید را نشان می‌دهند و ظرفیت آبیاری رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی به‌طور دائم در حال کاهش است، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در آینده‌ای نه چندان دور ممکن است مشکل شور شدن منابع (آب و خاک) تولید در بخش کشاورزی ابعاد اقتصادی و اجتماعی را در جوامع کشاورزی و روستایی با تنگناهای ویژه‌ای روبه‌رو کند.

۲-۲ وضعیت کیفی خاکهای شور و سدیمی و اثرهای آن در کشاورزی

در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک، فرایند شور شدن خاکها باعث سدیمی شدن خاک می‌شود. در شرایطی که آب آبیاری، حاوی مقدار زیادی نمکهای بی‌کربنات و کربنات سدیم باشد، تأثیر این نمکها باعث افزایش pH (واکنش) آب شده و در نتیجه سرعت فرایند قلیایی شدن^۱ خاک افزایش می‌یابد. استفاده از چنین آبهایی (با pH بیشتر از ۸) در آبیاری باعث عدم انحلال و یا ترسیب نمک کلسیم در محلول خاک می‌شود و اثرهای منفی یون سدیم را تشدید می‌کند. در نتیجه pH محلول خاک نیز احتمالاً افزایش می‌یابد و منجر به قلیایی شدن خاک می‌گردد و در نتیجه آن، سدیمی شدن خاک نیز رخ می‌دهد.

با توجه به آنچه گفته شد، کیفیت آب مصرفی در آبیاری محصولات کشاورزی، یکی از عوامل مهم در تغییر وضعیت کیفی خاکها و گرایش زمینها به شوری، سدیمی و قلیایی شدن است. بنابراین، در اینجا به بعضی از معیارهای لازم درباره کیفیت آبهای آبیاری، اشاره می‌شود. بررسی کیفیت شیمیایی آب آبیاری، به‌طور کلی بر مبنای موارد زیر است :

- غلظت یا تراکم نمکهای محلول در آب که به‌طور مستقیم بر روی میزان عملکرد محصولات زراعی و باغی اثر می‌گذارد.
- تراکم یا غلظت یون، بویژه که ممکن است در گیاه نوعی مسمومیت^۲ ایجاد کند و یا کیفیت محصولات را نامرغوب نماید.
- نسبت بین اجزای شیمیایی (کاتیونهای محلول) موجود در آب، که ممکن است موجب گسیختگی خاک‌دانه شود و ساختار خاک را تخریب و نفوذپذیری آن را کاهش دهد.

پژوهشهای زیادی در ارتباط با میزان شوری آب خاک^۳ و عملکرد گیاهان مختلف انجام شده است. شوری آب خاک، در درجه اول به میزان نمک محلول موجود در آب آبیاری بستگی دارد. افزون بر این غلظت نمک در آب خاک با مقدار رطوبت خاک تغییر می‌کند، زیرا جذب آب به‌وسیله ریشه گیاه و تبخیر، موجب کاهش میزان رطوبت و افزایش نسبی میزان نمک در آب خاک می‌شود. از این نظر، میزان شوری خاک معمولاً در عصاره اشباع^۴ اندازه‌گیری و گزارش می‌شود.

نکته : میزان شوری عصاره اشباع خاک در خاکهای رسی (به‌دلیل رقت) تقریباً نصف مقدار شوری آب خاک در حد رطوبت ظرفیت زراعی (FC)^۵ و یک چهارم میزان شوری آب خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (PWP)^۶ است.

رابطه میان سطوح مختلف شوری خاک و عملکرد محصولات گوناگون زراعی و باغی به صورت روابط مختلف بیان می‌شود که بر مبنای آزمایشها به‌دست آمده که در آنها با استفاده مداوم از آب شور، مقدار موردنظر شوری خاک را ثابت نگه می‌دارند. بر

1 - Alkalinization

2 - Toxicity

3 - Soil Water

4 - Saturation Extract

5 - Field Capacity (FC)

6 - Permanent Wilting Point (PWP)

پایه نتایج حاصل، جداولی که ارتباط بین میزان شوری آب مصرفی و عصاره اشباع خاک را در حد کاهش‌های ۰، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد عملکرد محصول گیاهان مختلف را نشان می‌دهد، ارائه شده است. این جدولها گیاهان را به چهار دسته حساس (S)، نسبتاً حساس (MS)، نسبتاً مقاوم (MT) و مقاوم (T) در برابر شوری تقسیم‌بندی می‌کند (۲۱، ۸۵). ضعف چنین آزمونهایی این است که نمی‌تواند بیانگر تغییرات واقعی کیفیت خاک و میزان عملکرد محصول در شرایط مزرعه باشد، زیرا برخلاف نتایج آزمایشهایی که در آن میزان شوری ثابت و یکنواخت نگه داشته می‌شود، در شرایط مزرعه، عموماً میزان شوری با عمق خاک تغییر می‌کند. و تنها پس از رسیدن به تعادل کامل شیمیایی (بین شوری خاک و آب آبیاری) آن‌هم در افقهای سطحی نیمرخ خاک می‌توان رابطه معنی‌داری بین نمک موجود در آب آبیاری و آب خاک برقرار کرد، زیرا در لایه‌های زیرین خاک و در بخش زیرین محدوده توسعه ریشه‌ها، میزان شوری خاک تقریباً با مقدار شوری آب حاصل از تراوشهای عمقی آبیاری برابر است و برحسب نوع خاک و عوامل دیگر، مقدار شوری خاک در لایه‌های زیرین حدود ۳ تا ۱۰ برابر غلظت نمکها آب آبیاری است. از سوی دیگر گیاه بیشترین میزان آب مورد نیاز مصرفی خود را از لایه‌های سطحی نیمرخ خاک دریافت می‌کند. به همین دلیل در مقایسه با توزیع یکنواخت شوری در ستون خاک، میزان کاهش واقعی عملکرد محصول در مزرعه کمتر است.

۱-۲-۲ رده‌بندی و اصلاح خاکهای شور و سدیمی

- خاکهای شور و یا سدیمی، بر پایه دو ویژگی مهم زیر، تعریف، ارزیابی و رده‌بندی می‌شوند:
- غلظت نمکهای محلول در حدی باشد که بر رشد و نمو گیاهان اثرهای نامطلوب بگذارد.
- درصد سدیم تبدلی (ESP)^۱ به میزانی باشد که پایداری خاک‌دانه‌ها بر اثر تخریب ساختمان خاک، تضعیف شود و ویژگیهای فیزیکی خاک نیز نامطلوب گردد.

۱-۱-۲-۲ خاکهای شور

در گذشته خاکهایی که میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_e)^۲ آنها بیش از ۴ دسی زیمنس بر متر (dS/m) و درصد سدیم تبدلی آن کمتر از ۱۵ بود، به‌عنوان خاکهای شور شناخته می‌شدند. در سالهای اخیر، بعضی پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که حد شوری عصاره اشباع خاک (هدایت الکتریکی) این‌گونه خاکها، ۲ دسی زیمنس بر متر منظور شود، زیرا بیشتر گیاهان بویژه درختان میوه و گیاهان زینتی در محدوده شوری ۲ تا ۴ دسی زیمنس بر متر آسیب‌پذیر می‌شوند. مشکل خاکهای شور، تراکم نمکهای محلول در فاز مایع خاک است که بیشتر به‌صورت کلرید، سولفاتها و گاهی نیترات هستند. هرچند نمکهای کم محلولی مانند سولفات کلسیم (CaSO₄) و کربنات کلسیم (CaCO₃) نیز در این نوع خاکها یافت می‌شود. خاکهای شور به‌دلیل وجود مقدار کم سدیم تبدلی در هم‌تافت تبدلی خود، نفوذپذیری مناسبی دارند.

اصلاح و بهره‌برداری از خاکهای شور با آبشویی نمکهای محلول و استفاده از آب مناسب و کافی امکان‌پذیر است. زیرا این نمکهای تراکم یافته در نیمرخ خاک، از انحلال‌پذیری مطلوبی برخوردارند که با به‌کارگیری آب آبشویی، به همراه تراوشهای عمقی، از محدوده گسترش ریشه به بخش زیرین خاک انتقال می‌یابند. در عمل بهتر است که ابتدا میزان هدایت الکتریکی

1 - Exchangable Sodium Percentage (ESP)

2 - Electrical Conductivity of Soil Extract

عصاره اشباع خاک (شوری) در افق‌های صفر تا ۵۰ سانتی‌متر سطحی نیم‌رخ خاک تا حد آستانه شوری برای کشت گیاه مورد نظر کاهش داده شود و تداوم آبشویی نمک‌های متراکم در لایه‌های زیرین، با تراوش‌های عمقی آب آبیاری به کار رفته انجام شود. اصلاح خاک شور ممکن است به دلایل متعدد از جمله محدودیت زهکشی طبیعی (داخلی خاک) و بالا بودن سطح ایستابی، نفوذپذیری کم خاک، پایین بودن میزان هدایت هیدرولیکی اشباع افق‌های نیم‌رخ خاک (لایه‌ای بودن ستون خاک)، کمبود آب مورد نیاز با کیفیت مناسب و یا هزینه‌های تأمین آب مورد نیاز، می‌تواند موجب مشکلاتی در آبشویی و آبیاری زمینها شود.

۲-۱-۲-۲ خاکهای سدیمی

از ویژگی‌های آشکار این نوع خاکها، دارا بودن میزان شوری عصاره اشباع خاک به مقدار کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر و درصد سدیم تبادلی بیشتر از ۱۵ است. در این نوع خاکها معمولاً مقدار نسبت جذب سدیم (SAR)^۱ محلول خاک بیشتر از ۱۳ است، در نتیجه ملاحظه می‌شود که اصلی‌ترین مشکل این خاکها، میزان سدیم است.

قابل توجه بودن مقدار سدیم و هدایت الکتریکی کم عصاره اشباع خاک، موجب گسیختگی خاک‌دانه‌ها و پراکنش ذرات رس می‌شود، زیرا وفور نمک‌های سدیم موجب تضعیف انعقاد خاک‌دانه‌ها و گسیختگی آنها می‌شود که به دنبال آن، پراکنش ذرات رس به وقوع خواهد پیوست.

pH خاکهای سدیمی در محدوده ۸/۵ تا ۱۰ متغیر است و این امر به دلیل هیدرولیز نمک کربنات سدیم است. کلر، سولفات و بی‌کربنات همراه با مقداری کربنات، از عمده‌ترین آنیونهای محلول در خاکهای سدیمی هستند. به دلیل اینکه در pH بالا، آنیون کربنات وجود دارد، در نتیجه کلسیم و منیزیم در خاک رسوب می‌کنند و به همین دلیل مقدار این کاتیونها در محلول خاک کاهش حاصل می‌یابد. کاتیونهای محلول و تبادل‌پذیر موجود در این خاکها افزون بر سدیم، حاوی پتاسیم نیز می‌باشد.

اصلاح خاکهای سدیمی می‌تواند با به‌کارگیری گچ (ژپیس) و کلرید کلسیم که زمینه جایگزینی یون کلسیم را به‌جای یون سدیم تبادلی فراهم می‌آورد، امکان‌پذیر باشد. در این شرایط کلسیم جایگزین سدیم شده و نمک سولفات سدیم (Na_2SO_4) یا کلرید سدیم (NaCl) به دست می‌آید که به دلیل انحلال‌پذیری زیاد قابل آبشویی و دفع است. نمک‌های سولفات کلسیم (گچ) و کلرید کلسیم، ضمن اینکه غلظت الکترولیتی خاک را افزایش می‌دهند، موجب افزایش نفوذپذیری خاک نیز می‌شوند. در خاکهای آهکی و یا خاکهای سدیمی با مقدار زیادی کربنات کلسیم (آهک)، می‌توان سدیم‌زدایی را با به‌کارگیری گوگرد عنصری و یا اسید سولفوریک غلیظ صنعتی نیز انجام داد، استفاده از مواد اصلاح‌کننده خاک، مستلزم عملیات ویژه‌ای است.

۳-۱-۲-۲ خاکهای شور و سدیمی

عصاره اشباع این‌گونه خاکها دارای هدایت الکتریکی بیش از ۴ دسی‌زیمنس بر متر و درصد سدیم تبادلی بیش از ۱۵ است. در نتیجه مشکل مضاعف این خاکها، بالا بودن میزان نمک‌های محلول و درصد سدیم تبادلی است. از آنجا که غلظت الکترولیتی (املاح محلول) فاز مایع خاک قابل ملاحظه است، در نتیجه pH آنها از ۸/۵ کمتر بوده و خاک منعقد می‌باشد.

هنگام اصلاح و بهسازی این نوع خاکها، باید دقت کافی داشت، زیرا ممکن است در فرایند آبشویی، نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاکها، موجب چیرگی یون سدیم در محلول خاک و همچنین موجب گرایش احتمالی این خاکها به سمت سدیمی شدن گردد، در نتیجه مقدار pH خاک از ۸/۵ فراتر رفته و گسیختگی خاک‌دانه‌ها نیز رخ می‌دهد.

1 - Sodium Adsorption Ratio (SAR)

برای اصلاح و بهسازی خاکهای شور و سدیمی، به کارگیری همزمان آب مناسب برای آبشویی نمکها و افزودن مواد اصلاح کننده دارای یون کلسیم (سولفات کلسیم یا کلرید کلسیم) برای جایگزینی با یون سدیم تبادلی، ضرورت دارد. بدین ترتیب نمکهای محلولی مانند کلرید سدیم و سولفات سدیم به دست می آید که به دلیل انحلال پذیری مطلوب به همراه تراوشهای عمقی از نیمرخ خاک آبشویی شده و به لایه های زیرین انتقال می یابد. روش دیگری که برای اصلاح این گونه زمینها پیشنهاد شده است آبشویی مقدماتی با آبهای شور حاوی کلسیم و منیزیم زیاد است. هرگاه شوری آب مورد نظر بسیار زیاد باشد، می توان از راه آمیختن با آب مناسب یا لب شور، آن را رقیق کرد. از جمله محاسن این روش، جایگزینی مقدماتی کلسیم به جای سدیم تبادلی است که پس از رسیدن به این مرحله، استمرار آبشویی نمکهای محلول باید با استفاده از آب مناسب انجام گیرد. از موارد قابل تعمق در اصلاح و بهسازی خاکهای سدیمی و یا شور و سدیمی، هزینه های مربوط به تأمین مواد اصلاح کننده خاک حاوی کلسیم و به کارگیری آن است. مواد اصلاح کننده باید به شیوه ای استفاده شوند که امکان انجام واکنشهای لازم بین کلسیم و سدیم تبادلی در خاک با سهولت نسبی فراهم باشد. بدین دلیل پیشنهاد شده است که مقداری گچ مورد نیاز پس از پخش روی سطح زمین با خاک لایه سطحی مخلوط شود. روش دیگر، می تواند افزودن گچ به آب آبشویی و یا آب مصرفی باشد.

۲-۲-۲ اثر شوری و سدیمی بودن بر ویژگیهای خاک و عملکرد گیاهان

مهم ترین اثر نامطلوب شوری در خاک، افزایش غلظت نمکهای محلول در فاز مایع خاک است. در نتیجه این پدیده، جذب آب به وسیله گیاه که مبتنی بر خاصیت اسمز است، حتی در صورت وجود رطوبت کافی در خاک، مختل، متوقف و گاه حالت معکوس به خود می گیرد. افزون بر این، بعضی یونهای موجود در عصاره اشباع خاک، مانند سدیم، کلر و بُر مسمومیت های خاصی را برای گیاهان به وجود می آورند. همان گونه که گفته شد در بیشتر حالتها، افزایش تراکم نمکهای محلول در خاک با افزایش یون سدیم تبادلی در هم تافت خاک همراه است. تأثیر منفی و جدی سدیم تبادلی پذیر در خاک بر کاهش رشد و نمو گیاهان را می توان به عواملی مانند مسمومیت گیاهی، عدم توازن مواد غذایی در گیاه، و بالاخره افزایش میزان pH خاک نسبت داد. ضمن اینکه اثرهای سدیمی بودن خاک، بر ویژگیهای فیزیکی نیز بسیار با اهمیت است.

۲-۲-۲-۱ اثر شوری و سدیمی بودن بر ویژگیهای خاک

شوری و سدیمی بودن، اثر زیادی بر ساختار خاک دارد. چون ساختار خاک بستگی به شیوه آرایش ذرات آن دارد و نفوذ و تحرک آب به سطح و درون خاک نیز به بافت و ساختار خاک بستگی مستقیم دارد، پس هرگاه میزان سدیم در خاک زیاد و مقدار شوری خاک، کم باشد، نفوذ پذیری، هدایت هیدرولیکی و تحرک آب در خاک، به دلیل تورم و پراکنده شدن ذرات رس و از بین رفتن خاک دانه ها، کاهش می یابد. به طور کلی نفوذ آب در خاک در مراحل اولیه که خاک خشک است، سریع بوده، لیکن پس از گذشت زمان، آهسته می شود و به حالت پایدار (نفوذ پایه اراضی) می رسد. متورم شدن ذرات رس، موجب کوچک تر شدن منافذ خاک می شود و تخریب خاک دانه ها نیز موجب کاهش خلل و فرجهایی می شود که مسیر جریان آب و نمکهای خاک هستند. بسته شدن بعضی از منافذ با ذرات رس جایگزین شده و تورم رسها، تأثیر قابل ملاحظه ای بر نفوذ و تحرک آب و هوا در خاک خواهد داشت، هر چند این عامل، تحت تأثیر نوع کانیها، نوع یونهای جذب شده بر سطح ذرات رس و غلظت نمکهای

محلول در فاز مایع خاک نیز قرار می‌گیرد. بیشترین میزان تورم، در رس‌های حاصل از کانیهای اسمکتیت^۱ اشباع از سدیم است. تورم ذرات خاک با کاهش غلظت نمکهای محلول در خاک، افزایش خواهد یافت.

هرگاه مقدار درصد سدیم تبدالی خاک بیش از ۱۵ باشد، بعضی رسهای تورم‌پذیر مانند مونت موریلونیت^۲، آب بیشتری را جذب و نگهداری می‌کنند. از سوی دیگر، هرگاه غلظت نمکهای محلول در خاک کاهش، و درصد سدیم تبدالی افزایش یابد، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک کاهش خواهد یافت.

نکته: هرگاه غلظت نمک آبی که از نیمرخ خاک خارج می‌شود، بیش از غلظتی باشد که در یک مقدار درصد سدیم تبدالی معین، و مقدار کاهش نفوذپذیری خاک در حدود ۱۰ تا ۱۵ باشد، استفاده از آبی با همان غلظت، موجب کاهش نفوذپذیری در نیمرخ خاک نمی‌شود.

۲-۲-۲-۲ اثر شوری خاک بر عملکرد گیاهان

شوری و سدیمی بودن خاک، اثرهای متفاوتی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد. برای مثال، سدیمی بودن خاک باعث مسمومیت گیاهی، اختلال در تغذیه گیاه از جمله کمبود کلسیم در گیاه می‌شود. در خاکهای با شوری زیاد نیز یونهای محلولی مانند کلر، سولفات، بی‌کربنات، سدیم، کلسیم و منیزیم و گاهی نیترات و پتاسیم با کاهش پتانسیل اسمزی، به گیاه آسیب می‌رسانند. ضمن اینکه حد تحمل گیاهان مختلف و حتی رقمهای مربوط به یک نوع گیاه خاص نسبت به یک یون به‌خصوص نیز متفاوت است.

آب مورد استفاده گیاه، تحت تأثیر دو عامل پتانسیل ماتریک و اسمزی است. هرگاه میزان آب درون گیاه توسط تبخیر و تعرق کاهش یابد، پتانسیلهای ماتریک و اسمزی نیز کاهش یافته و منفی‌تر می‌شوند. یونهای موجود در محلول خاک نیز بر فشار اسمزی تأثیر می‌گذارد.

با استفاده از رابطه زیر میزان عملکرد نسبی محصول را برای هر میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) برآورد کرد:

$$Y = 100 - b(EC_e - a) \quad (1-2)$$

که در آن:

a = مقدار هدایت الکتریکی (شوری) اشباع خاک برحسب دسی زیمنس بر متر، در آستانه کاهش میزان محصول،

b = درصد کاهش میزان عملکرد محصول به‌ازای افزایش هر واحد شوری افزون بر شوری آستانه،

Y = میزان نسبی عملکرد محصول برحسب درصد (در مقایسه با عملکرد محصول، هنگامی که شوری خاک مطرح نباشد)،

مقادیر a و b برای تعداد زیادی از گیاهان زراعی و باغی و ... در جداول مندرج در مراجع معتبر قابل دسترسی و استفاده

است (۱ و ۲۰).

تأثیر شوری بر رشد و نمو گیاه، به شرایط آب و هوایی، ویژگیهای خاک، عملیات زراعی، اعمال مدیریت بر آبیاری، نوع محصول مورد نظر، نوع رقم، مرحله رشد و ترکیب نمکها و حتی نوع نمک خاص بستگی دارد. شوری آب و خاک زمانی بر

1 - Smectite

2 - Montmorillonite

عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد که مقدار آن از شوری آستانه‌ای که در رابطه بالا با حرف a نشان داده شده است، فراتر رود. این مقدار در گیاهان متفاوت است. به‌هرحال، با مراجعه دوباره به رابطه ۱-۲ ملاحظه می‌شود که در بیشتر حالتها، میزان کاهش عملکرد محصول خطی است.

۳-۲-۲-۲ ملاحظات ویژه در کشاورزی و آبیاری در شرایط شوری منابع خاک و آب

همان‌گونه که گفته شد، همه آبهای مورد استفاده در آبیاری، دارای مقادیر و انواع مختلف نمکهای محلول هستند که میزان و نوع این نمکها، به نوع منبع و زمان بهره‌برداری از آن بستگی دارد. با افزودن آب آبیاری به خاک، مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آب استفاده شده، صرف رفع نیاز آبی گیاه و تبخیر از سطح خاک می‌شود که این امر، موجب تراکم و تغلیظ نمکها در خاک و همچنین موجب افزایش شوری در عصاره اشباع خاک می‌گردد. به‌طور اصولی و در صورت امکان، باید در آبیاری، از آبهای با کیفیت مناسب استفاده کرد. درغیراین‌صورت، مسئله به‌کارگیری و مصرف آبهای با کیفیت بینابینی^۱ و نامطلوب^۲ مطرح خواهد شد، که در این مورد، شرایط به‌کارگیری و مصرف این‌گونه آبها در مقایسه با آبهای مناسب در امر آبیاری، نیاز به اعمال اقدامهای ویژه دارد.

1 - Marginal
2 - Unsuitable

۳- مبانی حرکت نمکها در نیمرخ خاک

۱-۳ بیان آب و نمک در خاک و ضرورت کنترل آن

زمینهای زیر کشت و آبیاری، به طور مستمر مقدار زیادی نمک محلول را از دو منبع عمده، یعنی آب آبیاری و خیز مویبندی ناشی از سطوح ایستابی کم عمق (با کیفیتهای گوناگون) دریافت می کنند. اگر نمکهای افزوده شده به نیمرخ خاک، به نحوی از محدوده توسعه ریشه گیاهان در نیمرخ خاک آبشویی، تخلیه و دفع نشود شور شدن زمینهای موردنظر را می توان انتظار داشت. منشأ دیگر افزایش نمک و تراکم آن در نیمرخ خاک و حتی در محدوده توسعه ریشه گیاهان، خیز مویبندی از طریق آبهای زیرزمینی کم عمق است. سطوح ایستابی و به طور عمده کم عمق در مناطق زیر کشت آبیاری از دو طریق فرایندهای هیدرولوژیکی منطقه و یا تلفات بیش از حد استحصال، توزیع و به کارگیری آب آبیاری در سطح زمین و مزارع به وجود آمده و یا گسترش می یابند. پدیده خیز مویبندی در خاکهای سنگین و میان بافت ممکن است گاهی تا سطح خاک نیز ادامه یابد و ضمن تبخیر آب، (رطوبت) نمکهای موجود را در سطح زمین و مزرعه برجای گذارد.

هرگاه سطوح ایستابی کم عمق به طور پیوسته تغذیه شوند و تراکم نمک در آنها به حد زیان آور برای رشد و نمو در محیط رویش گیاهان نرسد، به شرط آنکه محدوده خیز آن به ناحیه توسعه ریشه گیاهان موردنظر نرسد، مشکلات کمی را در امور زراعی و عملکرد محصول به وجود می آورند. بنابراین در شرایطی که منبع تغذیه آبهای زیرزمینی منطقه از منشأ دیگر آن هم به طور پیوسته و گاهی با آبهای ورودی با کیفیت نامطلوب همراه باشد، فرایند شوری و به دنبال آن سدیمی شدن خاک می تواند قابل ملاحظه باشد، همچنین به دلیل تنوع منشأ تراوشهای عمقی تغذیه کننده سطوح ایستابی مناطق آبیاری، تأثیر نامناسب و شدید آنها بر زمینهای زراعی آیش (حتی موقت) قابل توجه خواهد بود. گاهی ممکن است منشأ تغذیه آبهای زیرزمینی کم عمق در زمینهای مورد آبیاری، به دلیل وجود حالت تحت فشار (آرتزین) آبهای زیرزمینی موضعی و یا منطقه ای نیز باشد.

با توجه به موارد گفته شده، ضرورت دارد همواره مقداری آب، افزون بر نیاز آبی گیاه، از محدوده توسعه ریشه گیاهان به پایین نفوذ کند و موجب آبشویی نمکها را از ناحیه رشد ریشه گیاهان شود. هرچند ممکن است این گونه تراوشهای عمقی در نهایت به آبخوانهای زیرزمینی تخلیه شوند. بنابراین در شرایطی که وضعیت زهکشی طبیعی (داخلی) خاک مناسب باشد، این تراوشها می توانند بدون افزایش قابل ملاحظه سطوح ایستابی، از منطقه خارج شوند. در بیشتر موارد، وضعیت زهکشی طبیعی (داخلی) خاکها برای این کار کافی نیست، در نتیجه ضرورت احداث و یا تعبیه زهکشهای کمکی یا اصلی، توجیه پذیر می شود. در چنین شرایطی، اعمال زهکشی در زمینهای زیر کشت و آبیاری، باعث دستیابی به دو منظور مهم، اصلی و همزمان در برقراری بیان آب و نمک در محدوده رشد و توسعه ریشه گیاهان خواهد شد.

۲-۳ چگونگی پویایی نمکها در نیمرخ خاکها

اگر نمکهای محلول در آب از راه استفاده از آبهای آبیاری با کیفیت نامطلوب و یا از راه خیز مویبندی (به دلیل وجود سطوح ایستابی کم عمق و شور) به خاک افزوده شوند، می توانند محیط رویش گیاهان را به گونه ای بسیار نامناسب تحت تأثیر قرار دهند. این شرایط در مناطق خشک و نیمه خشک، که بیشتر خاکهای آن بافت سنگین و شرایط طبیعی زهکشی (داخلی) نامناسبی

دارند، تسریع می‌شود. بنابراین باید نمکهای تراکم یافته تا عمق خاصی از نیمرخ خاک آبشویی شوند و با مدیریت مناسب در به‌کارگیری آب آبیاری، نمکهای محلول را آبشویی و خارج کرد.

به‌طور کلی، فرایند جایگزینی اختلاط‌پذیر^۱ فرایندی است که در آبشویی نمکهای غیرضروری و تراکم یافته از محدوده توسعه ریشه گیاهان، کاربرد دارد. این فرایند زمانی رخ می‌دهد که سیالی با سیال دیگر اختلاط یافته و جایگزین آن شود.

این تعریف بیانگر آن است که در بیشتر شرایط، آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مربوط به عمل ساده جایگزینی آب حاصل از نفوذ عمقی با عصاره اشباع محلول خاک نیست، بلکه مربوط به اثر دو فرایند همزمان پخشیدگی^۲ و انتشار^۳ نمکهای محلول در نیمرخ خاک است. در نتیجه این فرایند، آبی که به‌طور عمقی در خاک نفوذ می‌کند با رطوبت موجود در نیمرخ خاک آمیخته شده و سپس با ادامه نفوذ، نمکهای محلول نیز همراه با آن به اعماق خاک انتقال می‌یابند. هرچه آب مورد نیاز برای آبشویی کامل نمک، کمتر باشد بازده آبشویی^۴ بیشتر خواهد بود. بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک تابع عواملی مانند: میزان رطوبت خاک، مقدار آب آبشویی، اندازه و آرایش خلل و فرج خاک، روش آبشویی نمک و بالاخره پراکنش قائم و تراکم نمک در نیمرخ خاک است.

همان‌گونه که گفته شد، برای دستیابی به اهداف مدیریت مطلوب کاربرد آب؛ درک مفاهیم و عوامل مؤثر بر فرایندهای ذکر شده (پویایی نمک^۵ در خاک) اهمیت دارد. مدیریت کاربرد آب (آبیاری) باید از چنین اطلاعات و دستاوردهای علمی، به‌طور عملی بهره‌گیرد. تا افزون بر شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی خاک، از شوری و یا سدیمی شدن دوباره خاک که موجب انباشت نمک در نیمرخ خاک می‌گردد و در نتیجه این کار از اثرهای نامطلوب بر خاک، گیاه و محیط زیست جلوگیری به‌عمل آید.

۳-۲-۱ مبانی پایه و نظری

پویایی نمکهای محلول در فاز مایع خاک (محلول آب خاک)، به‌طور متناوب با کاربرد یا افزودن آب به خاک به‌وجود می‌آید. در این‌باره، می‌توان خاکهایی را تصور کرد که سرعت جریان در آن زیاد است، در این خاکها، عامل اصلی اختلاط آب و نمک و پویایی آن، انتشار است و برعکس در شرایطی که سرعت جریان در توده خاک بسیار کند باشد، عامل اختلاط و پویایی نمک در نیمرخ خاک، فرایند پخشیدگی است. بنابراین، در بیشتر حالتها اثر مشترک و همزمان عوامل انتشار و پخشیدگی در شرایط مزرعه، موجب پویایی نمک در خاک می‌شود. نظریه‌هایی که مبتنی بر شرایط ماکروسکوپی^۶ است، برای بیان این‌گونه فرایندها بسیار سودمند است و در زیر به آنها اشاره شده است.

۳-۲-۲ حرکت نمکها در اثر پخشیدگی

پخشیدگی یا حرکت گرمایشی مربوط به حرکت نامنظم ذرات منفردی به‌اندازه ملکول در اثر انرژی حرارتی آنهاست. این پدیده موجب می‌شود تا ذرات ریز (نمک) در فاز مایع (آب خاک) از مکانی با تراکم بیشتر به سمت محلی با تراکم نسبی کمتر حرکت

1 - Miscible Displacemet
2 - Diffusion
3 - Dispersion
4 - Leaching Coefficient
5 - Solute Movement
6 - Macroscopic

کنند. بیان ماکروسکوپی این حالت با استفاده از قانون اول فیک^۱ امکان پذیر است. فرایند پخشیدگی یا حرکت گرمایشی نمکهای محلول در محیط متخلخل را می توان با رابطه زیر ارائه کرد:

$$\frac{dQ}{dt} = -D.A.\frac{dC}{dx} \quad (۱-۳)$$

که در آن:

$$Q = \text{کل حجم مواد پخشنده در واحد حجم یا توده مورد نظر (L}^3\text{)} ،$$

$$t = \text{زمان (T)} ،$$

$$A = \text{سطح مقطعی که برای فرایند پخشیدگی مهیا می باشد (L}^2\text{)} ،$$

$$C = \text{غلظت ماده در توده یا حجم، بر حسب حجم ماده در واحد حجم محلول (L}^3\text{/L}^3\text{)} ،$$

$$x = \text{فاصله در جهت جریان (L)} ،$$

$$\frac{dc}{dx} = \text{گرادیان غلظت نمک، و}$$

$D =$ ضریب ثابت تناسب که ضریب پخشیدگی^۲ یا ضریب پخشیدگی مولکولی^۳ نامیده می شود (L^2/T) و می توان مقدار آن را برای سامانه آب خالص در شرایط گرمایی همسان^۴ و برای یونهای مختلف، از جدول ۱، استخراج کرد. چون خاک محیط متخلخل و غیریکنواختی بوده و شامل همتافت با بارهای الکتریکی متفاوت است، بنابراین ضریب پخشیدگی مؤثر یا D_p برای هر یون خاص کمتر از ضریب پخشیدگی معادل یا D_0 در سامانه آب خالص است. رابطه دو ضریب بیان شده را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

$$D_p = D_0 \cdot \theta \cdot \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \cdot a \cdot \gamma \quad (۲-۳)$$

که در آن :

$$\theta = \text{میزان رطوبت و عاملی برای کاهش سطح (A) است. بر حسب درصد حجمی،}$$

$$L = \text{طول مسیر یا معبر ماکروسکوپی پخشیدگی با مقیاس میانگین (L)} ،$$

$$L_e = \text{طول معبر یا مسیر واقعی در توده خاک (به دلیل اعوجاج حاصل در اثر آرایش ذرات خاک) که هر ذره، آن طول را می پیماید (L)} ،$$

$$a = \text{ضریبی برای کاهش میزان لزوجت یا گرانیوی آب، به دلیل وجود ذرات باردار در خاک (بدون بعد)، و}$$

$$\gamma = \text{ضریبی برای لحاظ نمودن اثر عامل بازدارنده دفع آنیونی^۵ که در اثر عبور جریان از کنار ذرات خاک با بار منفی (ذرات رس و مواد آلی) وجود دارد.}$$

1 - Fick Law

2 - Diffusion Coefficient

3 - Molecular Diffusion Coefficient

4 - Isothermal

5 - Anion Exclusion

با توجه به مطلب بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که L_e طولانی‌تر از L است. بنابراین باید گزینه یا توالی مکانی جهت جریان (به موازات جهت حرکت) یعنی dx در نسبت طول معابر یا مسیرها L/L_e ضرب شود تا اثر اعوجاج ذرات را شامل گردد. به دلیل اینکه بُعد واقعی جریان با جهت ماکروسکوپی آن زاویه‌ای تشکیل می‌دهد، در نتیجه اندازه‌گیری مقدار (L_e) به‌طور عملی بسیار دشوار است و به همین دلیل نسبت ذکر شده به‌صورت مربع (توان دوم) به کار گرفته می‌شود.

از آنجاکه همه ضرایب بیان شده یعنی (L/L_e) ، θ ، a و γ کوچک‌تر از واحد هستند، مقدار ضریب پخشیدگی مؤثر (D_p) همواره از ضریب پخشیدگی معادل (D_0) ، کوچک‌تر است.

کاهش رطوبت در خاکهای غیراشباع، موجب کاهش سطح موجود برای فرایند پخشیدگی و طولانی‌تر شدن نسبی مسیر حرکت جریان و در نتیجه افزایش میزان اثر جذب منفی و افزایش گرانیوی خواهد شد. بنابراین می‌توان D_p را برحسب θ و D_0 بیان کرد. نکته قابل توجه دیگر این است که پخشیدگی نمک در یک سامانه آب - رس عملاً مستقل از غلظت نمک (C) و فقط تابع میزان آب خاک است. مطالعات دیگری برای بیان رابطه بین D_p و رطوبت حجمی خاک (θ) انجام شده که نتیجه آن ارائه رابطه نهایی زیر است.

$$D_p(\theta) = D_0 \cdot a \cdot e^{b \cdot \theta} \quad (3-3)$$

این رابطه بیانگر آن است که ضریب پخشیدگی نمک^۱ تابع نمایی مثبتی از میزان آب خاک (θ) است. در رابطه اخیر عوامل a و b دو ثابت تجربی به‌شمار می‌روند.

• بررسی نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مقدار $b=10$ و مقدار a برای خاکهای لومی شنی $0/005$ و برای خاکهای رسی $0/001$ است این مقدار با توجه به سطح ویژه ذرات خاک، تغییر می‌کند. رابطه اخیر در شرایطی نتایج مطلوبی دارد که $[D_p(\theta)]$ در محدوده مکش آبی $0/3$ تا 15 بار قرار داشته باشد. این حدود در واقع محدوده‌ای است که در آن پدیده پخشیدگی اهمیت دارد.

به‌رحال، هرگاه طرفین رابطه ۳-۱ بر A تقسیم شود، رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\frac{dQ}{A \cdot dt} = -D \cdot \frac{dC}{dx} \quad (4-3)$$

از سوی دیگر با در نظر گرفتن رطوبت خاک و اثر آن در میزان آب درون خاک، رابطه ۳-۲ را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$D_p(\theta) = D_0 \cdot \theta \cdot \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \cdot a \cdot \gamma \quad (5-3)$$

با جایگزینی این رابطه در رابطه ۳-۴ قانون اول تعدیل شده فیک^۱ به دست می آید.

$$J_d = \frac{dQ}{A \cdot dt} = -D_o \cdot \theta \cdot \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \cdot a \cdot \gamma \cdot \frac{dC}{dx} \quad (۶-۳)$$

که شکل ساده شده آن به صورت زیر است :

$$J_d = -D_P(\theta) \frac{dC}{dx} \quad (۷-۳)$$

که در آن :

$C =$ غلظت نمک در محلول خاک بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر یا دسی‌زیمنس بر متر است، دیگر عوامل قبلاً تعریف شده‌اند.

۳-۲-۳ حرکت نمک در اثر انتشار

انتشار جریان گرانو^۲ یا جریان توده‌ای^۳ نمکهای محلول (به صورت یون در فاز محلول آب خاک) مرتبط با انتقال یونها به وسیله جریان آب است. به همین دلیل حمل نمکهای محلول می‌تواند در اثر پدیده انتشار یا کنوکسیون مبتنی بر سرعت جریان در محیط متخلخل باشد.

در خاکهای طبیعی با خلل و فرج ریز و درشت، سرعت جریان در خلل و فرج درشت‌تر به‌طور نسبی بیشتر از سرعت جریان در خلل و فرج ریز است. همچنین سرعت جریان در وسط مسیر بیشتر از کناره ذرات خاک است. این پدیده موجب انتشار نمک در محلول خاک می‌شود. از سوی دیگر، دو عامل سرعت میانگین جریان و انتشار مکانیکی^۴ (انتشار-پخشیدگی) یا انتشار هیدرودینامیکی^۵ (فرایند انتشار و پدیده جایگزینی اختلاط‌پذیر) موجب ایجاد تغییرات موضعی در سرعت جریان می‌شود. بدین ترتیب شبکه‌ای از تحرک ذرات نمک از محلهایی با غلظت بیشتر به سمت مناطقی با غلظت کمتر ایجاد می‌شود. که در نتیجه آن می‌توان اثر انتشار مکانیکی را همانند پخشیدگی فرض کرد. با در نظر داشتن این نظریه، می‌توان رابطه‌ای را شبیه رابطه ۱-۳ برای انتقال - انتشار نمک در توده خاک در شرایط ماکروسکوپی ارائه کرد.

برخی پژوهشهای آزمایشگاهی و نظری، امکان جایگزینی ضریب پخشیدگی مکانیکی (D_h) را به جای ضریب پخشیدگی مؤثر (D_p) فراهم آورده است. بررسیهای دیگر نشان داده است که مقدار ضریب انتشار مکانیکی در یک محیط متخلخل و

1 - Fick's Modified First Law
2 - Viscous Flow
3 - Mass Flow
4 - Mechanical Dispersion
5 - Hydrodynamic Dispersion

مشخص، تابعی از سرعت میانگین جریان است. تحقیق‌های دیگری نیز بیانگر این است که می‌توان ضریب انتشار مکانیکی را در شرایط جریان اشباع و پایدار به شرح زیر ارائه کرد:

$$D_h(\bar{V}) = D_m \cdot \bar{V} \quad (۸-۳)$$

که در آن :

$$\bar{V} = \text{میانگین سرعت منفذی جریان } (L.T^{-1}),$$

$D_m =$ ضریب ثابت تجربی که به ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل بستگی دارد و مقدار آن $۰/۳$ تا $۰/۵$ است.

همان‌گونه که از رابطه $۳-۸$ می‌توان پی برد مقدار ضریب پخشیدگی مکانیکی (D_h) با توان اول میانگین سرعت جریان، متناسب است.

و در پایان، می‌توان کل نمکی را که به وسیله فرایند انتشار - پخشیدگی (پدیده انتشار - پخشیدگی) از سطح ماکروسکوپی تشکیل می‌شود و وارد محیط متخلخل می‌شود (J_h)، به شرح زیر نوشت:

$$J_h = -D_h(\bar{V}) \frac{dC}{dx} + \bar{V} \cdot \theta \cdot C \quad (۹-۳)$$

در این رابطه؛ $[-D_h(\bar{V}) \frac{dC}{dx}]$ ، بیانگر انتقال نمک به وسیله فرایند انتشار، و $\bar{V} \cdot \theta \cdot C$ ، بیانگر حرکت نمک به وسیله میانگین سرعت جریان است.

۳-۲-۴ حرکت نمک در اثر فرایندهای انتشار - پخشیدگی

تأثیر همزمان و مشترک فرایندهای انتشار - پخشیدگی (پخشیدگی - انتشار) را می‌توان برای بیان حرکت نمک در خاک، از ترکیب رابطه‌های $۳-۷$ و $۳-۹$ به دست آورد.

$$J_s = J_d + J_h \quad (۱۰-۳)$$

$$J_s = -[D_h(\bar{V}) + D_p(\theta)] \frac{dC}{dx} + \bar{V} \cdot \theta \cdot C$$

با جایگزینی این دو عبارت :

$$-D(\bar{V}, \theta) = -[D_h(\bar{V}) + D_p(\theta)]$$

$$q = \bar{V} \cdot \theta$$

رابطه ۱۰-۳ به صورت ساده شده زیر در می آید:

$$J_s = -D(\bar{V}, \theta) \frac{dC}{dx} + q.C \quad (11-3)$$

در رابطه بالا :

q = شدت جریان (شار) حجمی آب در محلول بر حسب $(L.T^{-1})$ ،

D = ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی که ضریب همزمان پخشیدگی - انتشار است بر حسب $(L^2.T^{-1})$.

نظر به اینکه مقادیر (D) ، (\bar{V}) و (θ) ماکروسکوپی هستند، بنابراین، عبارت سمت راست رابطه های ۱۰-۳ و ۱۱-۳

مقادیر تقریبی بوده و مقدار (C) میانگین مکانی (فضایی) است.

از آنجاکه تغییرات میزان رطوبت خاک تأثیر فرایندهایی مانند: نفوذ، تبخیر، تعرق و توزیع مجدد رطوبت است، این امر به طور

متناوب موجب تغییر در میزان نمک، در فاز مایع خاک می شود.

تذکر این نکته نیز لازم است که، جریان پایدار و همگام به ندرت در طبیعت اتفاق می افتد. بنابراین همان گونه که در

رابطه های ۱۰-۳ و ۱۱-۳ نیز مشاهده می شود باید در شرایط عمومی و زودگذر این رابطه ها با رابطه پیوستگی جریان^۱ و یا

رابطه اصل بقای جرم^۲ (که بیان می دارد میزان تغییرات نمک در توده مشخصی از خاک باید با تغییرات میزان نمک ورودی و

خروجی برابر باشد) ترکیب شوند. با فرض $(\frac{\partial q'}{\partial t})$ به عنوان میزان تغییرات نمک در یک جزء و برقراری تساوی زیر :

$$\frac{\partial q'}{\partial t} = (\text{میزان نمک محلول در جریان خروجی}) - (\text{میزان نمک محلول در جریان ورودی})$$

و برای حالت جریان یک بعدی و عمودی، بیان ریاضی حالت زودگذر و عمومی پخشیدگی - انتشار فرایند انتقال نمک در

خاک را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

$$\frac{\partial q'}{\partial t} = \frac{\partial(C\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [D_h(\bar{V}) + D_p(\theta)] \frac{dC}{dz} \right\} - \frac{\partial(\bar{V}.\theta.C)}{\partial z} \quad (12-3)$$

نکته : در رابطه های قبلی تغییر عبارت dx به dz در رابطه بالا، به دلیل تأکید بر یک بعدی و قائم بودن جریان است.

رابطه ۱۲-۳ در شرایطی کاربرد دارد که پدیده های جذب کاتیونی^۴، دفع آنیونی^۵ و ترسیب نمک^۶ مدنظر نباشد. همچنین با

یادآوری اینکه $q = \bar{V}.\theta$ می تواند باشد، رابطه بالا را می توان به صورت زیر نشان داد.

$$\frac{\partial q'}{\partial t} = \frac{\partial(C\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [D_h(\bar{V}) + D_p(\theta)] \frac{dC}{dz} \right\} - \frac{\partial(q.C)}{\partial z} \quad (13-3)$$

1 - Flux

2 - Equation of Flow Continuity

3 - Equation of Mass Conservation

4 - Cation Adsorption

5 - Anion Exclusion

6 - Salt Precipitation

۳-۲-۵-۱ مفاهیم عمومی

با توجه به مطالب گفته شده می توان استنباط کرد که رابطه های ۳-۱۲ و ۳-۱۳ اشکال ریاضی شرایط زودگذر پخشیدگی - انتشار نمک در خاک می باشند. این رابطه ها را می توان برای مشکلات شوری در شرایط آیش زمینهای زراعی، همچنین در شرایطی که میزان غلظت C به عنوان مجموع نمک محلول در فاز مایع خاک باشد و یا برای غلظت یون خاصی در آب خاک با اعمال فرض ساده شده ای (در مورد اثر متقابل شیمیایی نمک^۱) مانند آنچه که قبلاً بیان گردید، به کار برد. برای حالت پایدار (همگام) و یک بعدی جریان آب و نمک، با این فرض که دو عامل (\bar{V}) و (θ) بدون تغییر (ثابت) هستند، رابطه ۳-۱۲ را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D_h + D_p] \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) - \bar{V} \theta \frac{\partial C}{\partial z} \quad (۱۴-۳)$$

با تقسیم دو طرف این رابطه بر θ و تنظیم آن، رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{(D_h + D_p)}{\theta} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \bar{V} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (۱۵-۳)$$

$$D' = [(D_h + D_p) / \theta] \quad \text{با استفاده از تساوی:}$$

رابطه ۳-۱۵ به شکل ساده زیر در می آید :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \bar{V} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن :

D' ضریب پخشیدگی و یا به عبارت دیگر ضریب ترکیبی پخشیدگی - انتشار است، این ضریب نه تنها بیان کننده پخشیدگی مولکولی است بلکه انتشار نمک در خاک را نیز در برمی گیرد. تجربه بعضی از پژوهشگران موید آن است که می توان مقدار این ضریب (D') را از برازش رقمهای تجربی در منحنی رخنه^۲ یا (BTC) در شرایط حل تحلیلی (و نه حل عددی) رابطه ۳-۱۶ به دست آورد.

1 - Chemical Interactions
2 - Breakthrough Curve (BTC)

به دلیل اینکه مقدار ضریب D' از منحنی رخنه به دست می آید، لازم است توضیح مختصری درباره آن بیان شود، افزون بر راهکارها و کاربردهای نسبتاً قدیمی، منحنی S شکل رخنه به صورتهای زیر تعریف شده است:

الف) منحنی رخنه، نمودار رابطه بین نسبتهای (C/C_0) در مقابل مقادیر آب منفذی (P) خروجی یا زه آب است. به گونه ای که هرگاه نسبت (C/C_0) بر روی محور قائم (Y) و مقادیر آب منفذی P بر روی محور افقی (X) در مختصات دوبعدی با جفتهای متناظر رسم شود نمودار به دست آمده را منحنی رخنه می نامند.

ب) منحنی رخنه، نمودار رابطه بین توزیع نسبی یک عنصر ردیاب، در مقابل زمان و یا حجم زه آب خروجی است، به گونه ای که هرگاه پراکنش (توزیع) نسبی عنصر ردیاب را بر روی محور قائم (Y) و زمان یا حجم آب خروجی (زه آب) را بر روی محور افقی (X) در مختصات دوبعدی با جفتهای متناظر رسم کنند، نمودار به دست آمده را منحنی رخنه می نامند.

به طور کلی منحنیهای رخنه دو شکل عمومی دارند. برحسب اینکه در مایع یا سیال جایگزین شونده غلظت نمکها بیشتر و یا کمتر از محلول اولیه (آب خاک) جایگزین شده باشد (برای مثال هرگاه خاک غیرشوری، با آب حاوی مقدار زیادی کلرید سدیم آبیاری شود) منحنی رخنه به دست آمده به سمت چپ تغییر وضعیت می دهد و درحالی که اگر خاک شوری با آب آبیاری با کیفیت مناسب آبیاری شود، منحنی رخنه به سمت راست تغییر وضعیت می دهد. در تعاریف بیان شده عوامل دارای معانی زیر هستند:

$$C = \text{غلظت نمک در آب خروجی (زه آب)},$$

$C_0 = \text{غلظت اولیه نمک در مایع یا سیال جایگزین شونده؛ حجم منفذی (PV)، حجمی از محیط متخلخل است که به وسیله}$

آب یا سیال اشغال می شود، مقدار آب منفذی (P) از رابطه زیر به دست می آید:

$$P = \frac{Q \cdot T}{V_0} \quad (3-17)$$

در این رابطه عوامل دارای معانی زیر هستند :

$P = \text{تعداد دفعاتی که حجم منفذی}^1 \text{ به وسیله آب اشغال می شود، بدون بعد،}$

$Q = \text{کمیت جریان در واحد زمان (} L^3 \cdot T^{-1} \text{)،}$

$T = \text{زمان، از موقعی که سیال جایگزین شونده وارد محیط متخلخل می شود (T)، و}$

$V_0 = \text{حجمی از محیط متخلخل است که توسط سیال اشغال می شود (} L^3 \text{).}$

حجم منفذی (PV) که از حاصل ضرب حجم نمونه خاک در تخلخل آن به دست می آید و به صورت $PV = \int_0^L \theta^*(z) dz$ ارائه

می شود که در آن، θ^* میانگین رطوبت حجمی خاک (L^3/L^3) ، z عمق خاک (L) و l طول ستون خاک (L) است.

تجربه نشان داده است که هرگاه یک محیط متخلخل دارای خلل و فرج پیوسته باشد، سرعت سریع جریان و انتشار طولی^۲ ممکن است تنها عامل اختلاط سیال جایگزین شونده و جایگزین شده باشد. بنابراین هرگاه تنها فرایند انتشار، مورد نظر باشد، رقمهای حاصل از آزمایشها به خوبی قابل برازش هستند. در حالت سرعت آهسته جریان در محیط متخلخل، ممکن است

1 - Pore Volume
2 - Longitudinal Dispersion

پخشیدگی مولکولی، تنها عامل فرایند اختلاط باشد که با رقمهای حاصل از آزمایشها، قابل برآزش است. موارد محاسبه ضرایب موردنظر در مباحث زیر بیان شده است.

۳-۲-۳-۵ حل رابطه برای شرایط انتشار

با استفاده از رابطه پیوستگی جریان و یا اصل بقای جرم، رابطه نهایی انتشار نمکهای محلول و یا آلاینده در محیط متخلخل را می توان به صورت زیر نوشت :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (18-3)$$

با برقرار کردن شرایط مرزی^۱ (BC) و شرایط اولیه^۲ (IC) به شرح زیر:

$$C = C_0 \quad z = 0 \quad t > 0 \quad (19-3)$$

$$C = 0 \quad 0 \leq z \leq L \quad t = 0 \quad (20-3)$$

حل ریاضی رابطه ۱۸-۳ با توجه به شرایط مرزی و اولیه ارائه شده در رابطه های ۱۹-۳ و ۲۰-۳ منجر به رابطه زیر می شود:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{(1-P)}{\sqrt{4D.P/V \cdot L}} \right] \right\} \quad (21-3)$$

در این رابطه عبارت erf بیانگر تابع خطایی^۳ است و با توجه به تعریف متمم تابع خطایی^۴ یا erfc که به شرح (erfc=1-erf) است، رابطه بالا را می توان به شکل زیر نوشت :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(1-P)}{2(D.P/V.L)^{0.5}} \right\} \quad (22-3)$$

در این رابطه :

P = تعداد حجمهای منفذی (دفعاتی که منافذ به وسیله آب یا سیال اشغال می شوند)، بدون بعد،

-
- 1 - Boundary Conditions (B.C)
 - 2 - Initial Conditions (I.C)
 - 3 - Error Function
 - 4 - Error Function Complement

V = میانگین سرعت جریان (از نوع جریان دارسی^۱)، بر حسب $(L.T^{-1})$ ، و
 L = طول محیط متخلخل مورد آزمون، (L) .

شیب منحنی (S) مربوط را می توان در نقطه $P=1$ به شرح زیر نوشت.

$$S = \frac{d(C/C_0)}{d.P} \Big|_{P=1} = \frac{1}{2(\pi.D/V.L)^{0/5}} \quad (23-3)$$

از طریق این رابطه می توان ضریب انتشار D را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$D = \frac{V.L}{(4\pi.S^2)} \quad (24-3)$$

در آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای شور با روش غرقاب دائم، هرگاه حجم محلول خاک با آب آبشویی جایگزین شود $(P=1)$ ، نسبت $C/C_0 = 0/5$ خواهد شد و هرگاه حجم محلول خاک با آب کاربردی دوبار جایگزین شود $(P=2)$ و مقدار نسبت به $C/C_0 = 0/2$ کاهش می یابد، در نتیجه ملاحظه می شود که هرگاه دو میزان آب منفذی در محلول خاک، جایگزین شود، ۲۰٪ مقدار نمک اولیه موجود در محلول خاک باقی خواهد ماند. با فرض اینکه در بعضی از انواع خاکها حجم خلل و فرج نصف حجم کل خاک در عمق مشخصی است، می توان نتیجه گرفت که در $P=2$ که دوبار در خلل و فرج خاک آب کاربردی جایگزین شود این رقم تقریباً معادل ضخامت لایه خاک (D_z) است. شایان ذکر است که موارد بیان شده در حالت بسیار مطلوب و عدم وجود مشکل خاص، به دست آمده است.

۳-۲-۴ حل رابطه برای شرایط پخشیدگی و انتقال توده ای

با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه ارائه شده در رابطه های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ و استفاده از آنها برای حل رابطه ۳-۱۶، راهکار تحلیلی رابطه مورد نظر را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1-P}{\sqrt{4D.P/V.L}} \right\} + \frac{1}{2} \exp(V.L/D') \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1+P}{\sqrt{4D.P/V.L}} \right\} \quad (25-3)$$

رابطه بالا را می توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{1-P}{2(D.P/V.L)^{0/5}} \right] + e^{(V.L/D')} \operatorname{erfc} \left[\frac{1+P}{2(D.P/V.L)^{0/5}} \right] \right\} \quad (26-3)$$

شیب منحنی (S) مربوط را می‌توان در نقطه $P = 1$ به صورت زیر محاسبه کرد:

$$S = \left. \frac{d(C/C_0)}{dP} \right|_{P=1} = \frac{1}{2(\pi D' / V.L)^{0.5}} \quad (27-3)$$

و با استفاده از رابطه ۳-۲۷ می‌توان ضریب انتشار هیدرودینامیکی یا D' را به شرح زیر محاسبه کرد.

$$D' = \frac{V.L}{4\pi S^2} \quad (28-3)$$

در رابطه‌های ذکر شده عوامل، دارای معانی قبلی هستند.

در هر دو حالت بیان شده در (مباحث ۳-۲-۵ و ۳-۳-۵) هرگاه مقادیر D و یا D' با معلوماتی مانند V و L مشخص شوند، می‌توان رابطه نسبت‌های C/C_0 در مقابل مقادیر P متناظر را رسم کرد که حاصل آن منحنی نظری رخنه^۱ خواهد بود. هرگاه رقم‌های تجربی در دسترس باشد، می‌توان به ترتیب نسبت به محاسبه مقادیر D و یا D' اقدام کرد. به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان اظهار داشت که ضریب انتشار (D) و یا ضریب پخشیدگی (D') به‌طور مستقیم به میانگین سرعت جریان^۲ سیال وابسته هستند.

تذکر: نتایج به‌دست آمده از تجزیه ابعادی این رابطه‌ها نشان می‌دهد که بُعد ضرایب برحسب ساتی مترمربع بر ساعت و یا مترمربع بر روز است. که باتوجه به ابعاد به‌کاررفته برای بیان دیگر متغیرها برحسب مورد می‌توان از هر بُعدی استفاده کرد.

۳-۲-۶ راهکارهای ریاضی و کاربردی

بعضی از پژوهشگران، در ارتباط با مسائل شوری خاک و لزوم پایش و تنظیم آن در نیمرخ خاک و در شرایط مزرعه‌ای، علاقه‌مند به بررسی چگونگی تغییرات غلظت یون ویژه‌ای در محلول خاک هستند. به‌دلیل اینکه توده خاک، محیط متخلخل و پیچیده‌ای است، براساس بررسی‌های انجام شده، مشاهده می‌شود که در شرایط واقعی، ممکن است یون‌های موجود در خاک، از نظر شیمیایی با اجزای سازنده خاک (رسها) واکنش دهند. که چنین پدیده‌ای به‌طور عمده شامل جذب سطحی کاتیونها به‌وسیله ذرات رس و گاه نیز پدیده دفع آنیونی است. به‌طور کلی هرگاه فازهای تبادل‌ی و یا محلول خاک به سرعت به تعادل شیمیایی برسند (در آینده این امکان فراهم می‌شود) که بتوان فرض کرد تأثیر متقابل بیان‌شده، فقط مرتبط با غلظت محلول خاک است، می‌توان از اثرهای جذب سطحی و دفع آنیونی^۳ چشم‌پوشی کرد. با استفاده از قانون اصل بقای جرم و به‌کارگیری آن برای جزو کوچکی از خاک، رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial[(C.\theta) + Q'(C)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - \frac{\partial(\bar{V}.\theta.C)}{\partial z} \quad (29-3)$$

1 - Theoretical BTC

2 - Average Flow Velocity

3 - Adsorption and Anion Exclusion

هرگاه $q = \bar{V} \cdot \theta$ در نظر گرفته شود رابطه ۳-۲۹ به صورت ساده‌تر زیر در می‌آید.

$$\frac{\partial[(C \cdot \theta) + Q'(C)]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial z} \quad (۳۰-۳)$$

در رابطه‌های بالا عوامل به کاررفته دارای معانی زیر است:

Q' = میزان دفع یا جذب یونها در واحد حجم خاک،

$(C \cdot \theta)$ = میزان نمک موجود در محلول خاک،

q = شدت جریان (شار) حجمی آب،

D = ضریب انتشار هیدرودینامیکی، و

ابعاد این عوامل قبلاً ذکر شده است.

با به کارگیری قانون زنجیره^۱ برای مقادیر جذب و یا دفع شده یونها در واحد حجم خاک در واحد زمان، می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{dQ'(C)}{dt} = \left(\frac{dQ'}{dC}\right) \cdot \left(\frac{dC}{dt}\right) \quad (۳۱-۳)$$

با استفاده از رابطه ۳-۳۱ و بسط عبارت سمت چپ رابطه ۳-۳۰، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial Q'}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial z} \quad (۳۲-۳)$$

با تنظیم رابطه بالا، نتیجه به شرح زیر خلاصه می‌شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left(\theta + \frac{\partial Q'}{\partial C}\right) + C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial z} \quad (۳۳-۳)$$

با بسط عبارت سمت راست رابطه ۳-۳۳ می‌توان آن را به شرح زیر نوشت:

$$[\theta(z, t) + b(C)] \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - q \frac{\partial C}{\partial z} - C \frac{\partial q}{\partial z} - C \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (۳۴-۳)$$

با یادآوری دوباره این مطلب که:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (3-35)$$

می‌توان شکل نهایی حل ریاضی رابطه ۳-۱۳ را از رابطه ۳-۳۵ به دست آورد:

$$[\theta(z, t) + b(C)] \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta, \bar{V}) \frac{\partial C}{\partial z}] - q(z, t) \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3-36)$$

که در آن تساوی، $[b(C) = dQ'(C)/dC]$ شیب حرارتی همسان جذب و یا دفع یونها^۱ است. بیان این نکته لازم است که تابع $b(C)$ به صورت میزان آب حجمی است و این عبارت در حالت‌های جذب کاتیونی و یا دفع آنیونی می‌تواند به ترتیب کمیت مثبت و یا منفی داشته باشد همچنین شایان ذکر است که رابطه‌های ۳-۱۳ و ۳-۳۴ از نظر ریاضی (به جز در مورد عبارت $[b(C)]$ در رابطه ۳-۳۴) یکسان بوده و تابع ذکر شده برای محاسبه مقادیر جذب و دفع یونها از واحد حجم، جزء خاک منظور شده است.

۳-۲-۱ پدیده تأخیری یا بازدارندگی

به طور کلی می‌توان نمک‌های موجود در نیمرخ خاک و یا سازندهای آبخوانی را به دو دسته بی‌اثر یا غیرفعال^۲ و واکنش‌گر^۳ تقسیم کرد. نمک‌های غیرفعال در توده خاک و یا در آب‌های زیرزمینی، واکنشی نشان نمی‌دهند و همچنین تحت تأثیر فشار زیست‌شناختی و یا شرایط رادیواکتیو در آنها تغییر حالتی (فیزیکی و شیمیایی) به وجود نمی‌آید. یکی از مناسب‌ترین نمونه‌های قابل ذکر، یون کلر است. نمکها یا عناصر واکنش‌گر می‌توانند تحت تأثیر روش‌های شیمیایی، زیست‌شناختی و یا رادیواکتیو قرار گیرند که در نتیجه این امر، از غلظت آنها کاسته می‌شود. واکنش‌های شیمیایی شامل جذب و دفع، تعویض یا تبادل کاتیونی، رسوب و انحلال‌پذیری دوباره و بالاخره واکنش‌های "اکسایش و احیاء" است. بسیاری از ترکیب‌های سمی شیمیایی می‌توانند از راه تجزیه زیست‌شناختی به مواد و یا ترکیب‌های ساده‌تری تبدیل شوند، و مشتقات نهایی حاصل ممکن است سرطان‌زا باشند. برای بیشتر مواد زائد و خطرناک فرایند جذب-دفع و واکنش‌های تبدیلی بین نمکها و بخش جامد توده خاک با اهمیت است. بسیاری از عناصر سنگین به سرعت روی سطح ذرات جامد محیط متخلخل جذب می‌شوند و سپس ذرات رس از طریق فرایند تبادل یونی از آنها نگهداری می‌کنند. مقدار جذب و دفع یا تبادل یونی بین یک نمک خاص و نوعی خاک مشخص را می‌توان به روش آزمایشگاهی به دست آورد.

1 - Exclusion or Adsorption Isotherm
2 - Conservative
3 - Reactive

در تحقیقات آزمایشگاهی فرایند جذب، باید مقدار مشخصی خاک را که دارای مقدار معینی نمک محلول است، انتخاب کرد و در نخستین اقدام، مقداری محلول با غلظتهای یونی متفاوت را تهیه کرد. مقدار مشخصی از محلول تهیه شده و با غلظتهای متفاوت قبلی، به نمونه‌های خاک از پیش وزن شده افزوده می‌شود. در مرحله بعد مقدار متفاوتی مواد خشک جاذب با مقداری از همان محلول تهیه شده مخلوط می‌شود، که هرکدام از این محلولهای مصرفی، غلظت مخصوص به خود را دارند. پس از اطمینان از برقراری غلظت تعادلی بین خاک و محلول، غلظت تعادلی هر نمونه تعیین می‌شود. مقدار نمک جذب شده به وسیله نمونه خاک، تناسب مستقیمی با فعالیت شیمیایی نمک دارد. مقدار جذب شده به وسیله نمونه خاک را می‌توان از اختلاف جرم نمکهای پیش از آزمایش و در محلول تعادلی، محاسبه کرد. با آزمایش نمونه‌ها، می‌توان مقدار نمک جذب شده در وزن واحد نمونه خاک (C*) را به عنوان تابعی از غلظت نمکهای محلول باقیمانده در محلول به دست آورد. جزییات بیشتر این فرایند در مباحث مربوط به شرایط همدمای لانگمویر^۱ و فروندلیخ^۲ در کتب مرجع ارائه شده است.

ویژگیهای جذبی معمولاً بر روی کاغذهای نموداری با روشی رسم می‌شوند که نمودار حاصل، رابطه بین جرم نمک جذب شده و واحد جرم خاک را به شکل تابعی از غلظت نمک نشان دهد. با به کارگیری هرکدام از رابطه‌های همدمای لانگمویر و یا فروندلیخ، می‌توان این روابط را تشریح کرد. این روابط برای بیان و بررسی پدیده تأخیری یا بازدارندگی به سهولت قابل استفاده است.

هرگاه بتوان رابطه جذبی را به صورت خط مستقیم بر روی کاغذ لگاریتمی رسم کرد، رابطه همدمای فروندلیخ^۳ به شرح زیر از آن قابل استخراج می‌باشد.

$$\log C^* = b \cdot \log C + \log K_f \quad (37-3)$$

که آن را به صورت زیر نیز می‌توان نمایش داد:

$$C^* = K_f \cdot C^b \quad (38-3)$$

که در آن :

C^* = جرم محلول جذب شده در واحد جرم خاک خشک،

C = غلظت نمکهای محلول، و

b, K_f = ضرایب رابطه هستند.

واحد C^* و C قبلاً شرح داده شده‌اند.

1 - Langmuir
2 - Freundlich
3 - Freundlich Isotherm

شیب خط رسم شده بر روی کاغذ لگارتیمی در رابطه‌های بالا با حرف b نشان داده شده است. در نمودار رسم شده C^* در برابر C که شیب آن خطی است، در نتیجه رابطه حاصل نیز خطی است و بنابراین مقدار b برابر ۱ است. در این شرایط مشتق نسبت به C رابطه زیر را به دست می دهد:

$$\frac{dC^*}{dC} = Kd \quad (39-3)$$

در این رابطه، Kd میزان ضریب توزیع یا پراکنش است و با استفاده از این ضریب می توان پیشینه نمکهای محلول^۱ را ضمن عبور از درون خاک، از طریق رابطه زیر به دست آورد.

$$\text{ضریب تأخیر یا بازدارندگی} = 1 + \left(\frac{P_b}{\theta}\right)(Kd) \quad (40-3)$$

در این رابطه عوامل به کاررفته معانی زیر را دارند:

P_b = جرم مخصوص ظاهری خاک خشک، بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب،

θ = رطوبت حجمی خاک، (L^3/L^3) ، بر حسب حجم ماده بر واحد حجم محلول،

Kd = ضریب پراکنش (توزیع) نمک در خاک است.

هرگاه نمکها، واکنش گر باشند، در مقایسه با جریان آب در خاک و یا آب زیرزمینی انتقال آنها به دلیل فرایند جذب با سرعت کمتری صورت می گیرد، میزان حرکت نمک را می توان با استفاده از رابطه تأخیر (بازدارندگی) به شرح زیر ارائه دارد:

$$V_e = V_x / [1 + (P_b / \theta)(Kd)] \quad (41-3)$$

در رابطه بالا :

V_x = میانگین سرعت خطی جریان، (سانتیمتر بر ثانیه یا دقیقه)، و

V_e = سرعت پیشینه نمکها، هرگاه غلظت نمک نصف غلظت اولیه آن باشد $(C/C_0 = 0/5)$ (سانتیمتر بر ثانیه یا دقیقه).

پتانسیل نمکها در آبهای زیرزمینی یا آب خاک تنوع زیادی از جمله ضرایب توزیع (پراکنش) و نمکهای خاکی ویژه دارند و ذرات رس به دلیل دارا بودن سطوح ویژه و مکانهای تبادل یونی بسیار زیاد، حامل بیشترین مقادیر (Kd) برای نمکهای خاص و غیرآلی (معدنی) می باشند، کاتیونها در مقایسه با آنیونها به صورت قوی تری جذب می شوند، در حالی که کاتیونها دو ظرفیتی در مقایسه با انواع یک ظرفیتی با سرعت بیشتری در فرایند جذب سطحی شرکت می کنند. عناصری مانند کلر ممکن است به صورت ضعیف جذب شوند و یا به صورت غیرجذبی در هنگام عبور از میان رسها باقی بمانند، سدیم به صورت ضعیف نگهداری

می‌شود، پتاسیم، آمونیوم، منگنز، سیلیس و آهن بطور متوسط نگه‌داشته شده و سرب، کادمیم، جیوه و روی، می‌توانند تا حد زیادی نگهداری شوند.

مواد شیمیایی آلی و مصنوعی در محلول می‌توانند به‌وسیله کربن آلی در خاک جذب شوند. در تعیین حرکت و بازدارندگی مواد شیمیایی آلی، هرگاه از مقدار جذب ویژه آنها در یک محل اطلاعی در دست نباشد، ابتدا باید مقدار انحلال آنها را در آب در نظر گرفت. تمایل نسبی هر ماده آلی برای باقیماندن به‌صورت محلول در آب، در مقایسه با حالتی که به‌وسیله کربن آلی نگهداری می‌شوند، مرتبط با ضریب توزیع آب-اکتانول آن ماده شیمیایی است که این امر بیانگر تمایل به محلول شدن آن ماده شیمیایی در آب و اکتانول (n) در حالتی که محلول محتوی هر دو، مورد تکان دادن قرار گیرد، می‌باشد. ضریب توزیع (تقسیم) آب (Koc) را می‌توان از انحلال‌پذیری آب و یا ضریب توزیع آب-اکتانول برآورد کرد.

مقدار (Kd) هر ترکیب آلی در یک خاک خاص را می‌توان با سهولت به‌دست آورد زیرا این مقدار به‌طور کلی از حاصل ضرب Kd آن ترکیب در درصد کربن آلی موجود در خاک، به‌دست می‌آید.

هرگاه خاک از ماسه سیلیکاتی خالص تشکیل شده باشد، مقدار بازدارندگی آن بسیار محدود خواهد بود.

به‌عنوان نتیجه‌گیری از فرایندهای انتشار، پخشیدگی و بازدارندگی، الگویی از توزیع نمکها با توجه به فاصله آنها از منبع آلاینده وجود دارد. هرگاه منشأ آلاینده حاوی چند نوع نمک باشد هر کدام دارای حالت بازدارندگی مشخص هستند که به وسیله ضریب Kd همان نمک، و در نتیجه مقداری در پیشینه نمک وجود خواهد داشت، شکل نامنظم به‌دست آمده می‌تواند بسیار پیچیده باشد.

- برای محاسبه این ضرایب در دماهای دیگر، کافی است نسبت $\frac{M_{25}}{M_t}$ که بیانگر نسبت لزوجت یا گرانیروی آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و دمای t ضرب کنیم.
- برای تعیین ضریب D یک نمک خاص از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$D_{+-} = \frac{D_+D_-(Z_+C_+ + Z_-C_-)}{(D_+Z_+C_+ + D_-Z_-C_-)} \quad (۳-۴۲)$$

D_{+-} ضریب پخشیدگی نمک موردنظر است که غلظت کاتیونها و آنیونهای آن به‌ترتیب C_+ و C_- و ظرفیت آنها به‌صورت قدر مطلق Z بیان شده است.

جدول ۱- ضرایب پخشیدگی (D) کاتیونها و آنیونها موجود در آب در ۲۵ درجه سانتیگراد [۳۷]

ضریب پخشیدگی (سانتی متر مربع بر ثانیه)	آنیونها		ضریب پخشیدگی (سانتی متر مربع بر ثانیه)	کاتیونها	
$5/26 \times 10^{-5}$	OH^-	هیدروکسید	$9/30 \times 10^{-5}$	H^+	هیدروژن
$1/48 \times 10^{-5}$	F^-	فلورید	$1/03 \times 10^{-5}$	Li^+	لیتوم
$2/03 \times 10^{-5}$	Cl^-	کلرید	$1/33 \times 10^{-5}$	Na^+	سدیم
$2/08 \times 10^{-5}$	Br^-	برومید	$1/96 \times 10^{-5}$	K^+	پتاسیم
$2/05 \times 10^{-5}$	I^-	یدید	$2/07 \times 10^{-5}$	Rb^+	روبیوم
$1/90 \times 10^{-5}$	NO_3^-	نیترات	$2/06 \times 10^{-5}$	Cs^+	سزیم
$1/72 \times 10^{-5}$	ClO_3^-	کلرات	$1/65 \times 10^{-5}$	Ag^+	نقره
$1/49 \times 10^{-5}$	BrO_3^-	برومات	$0/71 \times 10^{-5}$	Mg^{2+}	منیزیم
$1/08 \times 10^{-5}$	IO_3^-	یدیت	$0/79 \times 10^{-5}$	Ca^{2+}	کلسیم
$1/45 \times 10^{-5}$	IO_4^-	یدات	$0/79 \times 10^{-5}$	Sr^{2+}	استرونیوم
$1/19 \times 10^{-5}$	HCO_3^-	بی کربنات	$0/85 \times 10^{-5}$	Ba^{2+}	باریم
$1/09 \times 10^{-5}$	HC_3CO^-	استات	$0/72 \times 10^{-5}$	Cu^{2+}	مس
$1/07 \times 10^{-5}$	SO_4^{2-}	سولفات	$0/70 \times 10^{-5}$	Zn^+	روی
$0/99 \times 10^{-5}$	$\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$	کرومات	$0/73 \times 10^{-5}$	CO^{2+}	کبالت
$0/92 \times 10^{-5}$	CO_3^{2-}	کربنات	$0/93 \times 10^{-5}$	pb^{2+}	قلع

۴- مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک خاکهای شور

۱-۴ کلیات

تراکم و انباشت نمکها در نیمرخ خاک بر ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاکها از جمله، فشار اسمزی، نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی آن چنان اثری باقی می‌گذارد که در نتیجه آن ممکن است رشد و نمو بیشتر گیاهان زراعی و باغی دچار اختلال جدی و یا به‌طور کامل متوقف شود.

پیامد انحلال‌پذیری فوق‌العاده زیاد نمکهای سدیم (Na) و رسوب کربنات کلسیم (CaCO_3) در pH زیاد که معمولاً و به‌طور طبیعی اتفاق می‌افتد، موجب افزایش تراکم نمکها یا شوری (فرایند شورشدن^۱) و افزایش pH محلول خاک (فرایند قلیایی‌شدن) می‌شود که در نتیجه آن، سدیمی‌شدن خاک (فرایند قلیا یا سدیمی‌شدن^۲) سریع می‌شود.

بنابراین در برنامه‌های کشاورزی زمینهای مورد آبیاری، باید به‌منظور بازده اقتصادی فرآورده‌های کشاورزی و باغی مقدار شوری و سدیمی‌بودن خاک را تا حد مطلوب کاهش داد. از نظر عملی و تجربی می‌توان آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای شور و سدیمی را از راه استفاده از آب آبشویی^۳ با روشهای غرقاب دائم یا متناوب و یا با آبیاری بارانی انجام داد، که هر روش محدودیت و مزیت‌های خاص خود را دارد.

به‌طور کلی، اصلاح خاکهای شور کار پیچیده‌ای به‌شمار نمی‌رود، زیرا با به‌کارگیری مقدار مورد نیاز آب آبشویی با کیفیت مناسب، می‌توان نمکهای اضافی را از نیمرخ خاکها آبشویی کرد، مگر اینکه ویژگیهای زهکشی داخلی خاک به هر دلیلی نامناسب باشد و یا بافت خاک بسیار سنگین باشد، به‌هرحال در مورد نفوذ و تحرک آب در خاکهای شور در شرایط متعارف مشکل خاصی وجود ندارد.

با توجه به موارد گفته‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌نیاز موفقیت برنامه‌های آبشویی و اصلاحی خاکهای شور، به شرایط مطلوب زهکشی خاکها بستگی دارد، که اگر این امر به‌طور طبیعی فراهم نباشد، باید از راه مصنوعی آن را ایجاد کرد. انجام این امر با اقدام‌هایی مانند نصب زهکشهای زیرزمینی، احداث کانالهای باز زهکشی و یا در شرایطی، پمپاژ آب زیرزمینی آبخوانهای سطحی، امکان‌پذیر است. چون منظور از به‌کارگیری آب مورد نیاز برنامه‌های اصلاحی خاک، تخلیه (آبشویی) و دفع ترکیبهای معدنی (نمکها) نامطلوب از نیمرخ خاک است، بنابراین لازم است تراوشهای عمقی یا زه‌آب‌های حاصل، با روش مناسبی گردآوری و به خارج از محدوده مزرعه تخلیه و دفع شود زیرا در غیر این‌صورت موجب خیز سطح ایستابی (به‌طور عمده شور) شده و بر شدت مسئله می‌افزاید.

به‌هرحال، در صورت وجود شرایط زهکشی مناسب و مطلوب، دو پرسش کلیدی قبل از اقدام به شروع برنامه‌های اصلاحی خاکهای شور مطرح خواهد بود.

الف) چه میزان آب برای کاهش سطح شوری مورد نظر در نیمرخ خاک و تا عمق مشخص لازم است، و به‌کارگیری و نفوذ این میزان آب به سطح و درون نیمرخ خاک، چه مدت طول خواهد کشید. با توجه به اینکه در گستره وسیعی از زمینها و

1 - Salinization
2 - Alkalization (Sodification)
3 - Leaching Water

دشتهای مورد آبیاری و یا مستعد گسترش شبکه‌های آبیاری و زهکشی در کشور مشکل سدیمی بودن، نیز مربوط به زمینهای شور است، بنابراین سؤال دیگری نیز در این مورد، قابل بررسی است.

ب) آیا همزمان با فرایند شوری‌زدایی، پدیده سدیم‌زدایی^۱ خاکها نیز مطرح است و یا اینکه شوری‌زدایی خاکها موجب تشدید پدیده سدیمی شدن خاکها می‌شود که در آن صورت باید اقدامهای ویژه دیگری اعمال شود.

نکته: با توجه به منابع کلسیم موجود در بیشتر خاکهای شور و سدیمی زمینهای تحت آبیاری و دشتهای رسوبی (حاصل از رسوبهای زمینهای مرتفع و یا رودخانه‌ای) قابل کشت و آبیاری کشور، هنوز مورد شوری‌زدایی و گرایش به سدیمی‌شدن خاکها گزارش نشده است.

می‌توان با تقریب و دقت قابل قبولی با استفاده از فناوری مدل‌های شبیه‌سازی^۲ (همانندسازی) رایانه‌ای که به منظور مطالعه حرکت نمکها در آب خاک (محلول خاک) تدوین یافته‌اند، به پاسخ این دو پرسش (مقدار آب مورد نیاز و دوره زمانی لازم) دست یافت. استفاده از این روش در مورد بررسیهای آزمایشگاهی و در شرایط کنترل ستونهای خاک، نتایج مطلوبی به همراه داشته است.

جوریناک^۳ (۱۹۸۱) اعلام کرد که برای شرایط حاکم در مزرعه، استفاده از نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. زیرا طبیعت پارامترهای خاک در مزرعه تغییرات مکانی چشمگیری دارند و این امر باعث کاهش قابلیت اطمینان در ورودیهای مورد نیاز و همچنین موجب محدودیت در ارزشمندی مدل می‌شود.

بدین ترتیب، استفاده از مدل‌های تجربی^۴ به‌عنوان برآوردهای تقریبی و مقدماتی می‌تواند در دستیابی به اطلاعات مورد نیاز برنامه‌های اصلاحی خاک و زمین، به‌ویژه در شرایطی که در منطقه موردنظر بیشتر خاکها از نوع همگن و یک لایه باشند، بسیار سودمند باشد.

۲-۴ فرایند شوری‌زدایی از نیمرخ خاکها

دیلمان^۵ (۱۹۶۳) فرضهای ساده‌شده‌ای را برای اشتقاق رابطه آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها اعمال کرد و فرایند شوری‌زدایی (آبشویی) نمکها از نیمرخ خاکها را به شرح زیر ارائه کرد:

$$D_s \cdot \theta_v \cdot dC_{sw} = (C_{iw} \cdot dD_{iw}) - (C_{dw} \cdot dD_{dw}) \quad (1-4)$$

که در آن، D_s ضخامت لایه خاک، dC_{sw} تغییرات میزان نمک در آب خاک مرتبط با تغییرات عمق آب زهکشی، dD_{dw} در عمق معینی از خاک، θ_v میزان رطوبت حجمی خاک، C_{iw} و C_{dw} به ترتیب غلظت نمکهای محلول در آب آبیاری و آب

1 - Desodification
2 - Simulation Models
3 - Jurinak
4 - Empirical Models
5 - Dieleman

زهکشی (زه آب) و D_{dw} میزان آب نفوذ یافته (تراوشهای عمقی) می باشد. با توجه به رابطه کلی ارائه شده، فرضهای اعمال شده و مورد نیاز به شرح زیر خواهد بود:

الف) زه آب و یا آیشویی نمکها در نیمرخ خاک از ضخامت مشخصی و با رطوبت تا حدی بیشتر از حد ظرفیت مزرعه (FC) اتفاق می افتد.

$$C_{dw} = f \cdot C_{sw} \quad \text{و} \quad f \leq 1$$

ب) که در آن، f ضریب بازده آیشویی^۱ است. غلظت نمک در آب زهکشی شده از عمق معینی در خاک، برابر و یا کمتر از میانگین غلظت نمک آب خاک قبل از آیشویی است.

پ) عمق آب زهکشی (تراوشهای عمقی) متناسب با عمق آب به کار رفته (آیشویی) است به گونه ای که می توان نوشت :

$$D_{dw} = \frac{D_{iw}}{K} \rightarrow dD_{iw} = K \cdot dD_{dw}$$

که در آن، K ثابت تناسب^۲ است. با جایگزینی رابطه های ب و پ در رابطه ۴-۱ می توان نتیجه گرفت:

$$D_s \cdot \theta_v \cdot dC_{sw} = (K C_{iw} \cdot dD_{dw}) - (dD_{dw} \cdot f C_{sw}) \quad (۲-۴)$$

رابطه بالا را به صورت زیر نیز می توان نوشت :

$$D_s \cdot \theta_v \cdot dC_{sw} = dD_{dw} (K C_{iw} - f C_{sw}) \quad (۳-۴)$$

و یا :

$$\frac{dD_{dw}}{D_s} = \frac{\theta_v \cdot dC_{sw}}{(K C_{iw} - f C_{sw})} = \frac{\theta_v}{f} \left[\frac{dC_{sw}}{\frac{K C_{iw}}{f} - C_{sw}} \right] \quad (۴-۴)$$

با انتگرال گیری از رابطه ۴-۴ بین حدود $C_{sw} = C_{swo}$ و $D_{dw} = 0$ نتیجه زیر حاصل می شود:

$$-\frac{1}{D_s} \int_0^D dD_{dw} = -\frac{\theta_v}{f} \int_{C_{swo}}^{C_{sw}} \frac{dC_{sw}}{C_{sw} - \frac{K C_{iw}}{f}} \quad (۵-۴)$$

1 - Leaching Efficiency Factor
2 - Proportionality Constant

و یا :

$$\frac{D_{dw}}{D_s} = \frac{\theta_v}{f} \ln \frac{C_{swo} - \frac{K C_{iw}}{f}}{C_{sw} - \frac{K C_{iw}}{f}} \quad (6-4)$$

با جایگزینی $C = EC$ و با در نظر گرفتن $EC_{eq} = \frac{K EC_{iw}}{f}$ ، رابطه بالا به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\frac{D_{dw}}{D_s} = \frac{\theta_v}{f} \ln \frac{EC_o - EC_{eq}}{EC - EC_{eq}} \quad (7-4)$$

توجه : در رابطه ۴-۶ مقادیر غلظت نمکهای محلول (C) برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر و یا میلی‌گرم بر لیتر است که این مقادیر در رابطه ۴-۷ به صورت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، برحسب دسی زیمنس بر متر تغییر یافته است. در صورتی که در رابطه اخیر، $D_{lw} = D_{dw}$ (عمق خالص آب آشویی) و $EC_i = EC_o$ (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آشویی) و $EC_f = EC$ (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از آشویی) باشد، رابطه به شکل کلی زیر در می‌آید :

$$\frac{D_{lw}}{D_s} = \frac{\theta_v}{f} \ln \frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \quad (8-4)$$

و یا

$$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} = \exp[-(f \cdot D_{lw}) / (\theta_v \cdot D_s)] \quad (9-4)$$

در رابطه‌های ۴-۸ و ۴-۹ عوامل به کار رفته دارای معانی و ابعاد زیر است:

EC_i و EC_f به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، قبل و بعد از کاربرد و نفوذ عمق مشخصی از آب آشویی (D_{lw})، برحسب دسی زیمنس بر متر.

EC_{eq} ، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که با آب آبیاری (آشویی) به تعادل شیمیایی می‌رسد، بر حسب دسی‌زیمنس بر متر.

تذکر: EC_{eq} ، کمترین میزان شوری (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک) است که در لایه سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متری) نیمرخ خاک با استفاده از آب آبیاری و یا آشویی با کیفیت مشخص و پس از نفوذ کل عمق آب آشویی موردنظر، حاصل می‌شود.

f = ضریب بازده آشویی، بدون بعد،

D_{lw} = عمق خالص آب آشویی و میزان آبی که پس از تأمین کسر رطوبت خاک لایه مربوط، به طریق ثقلی و به صورت تراوشهای عمقی از ستون خاک لایه مربوط خارج می‌شود، سانتی‌متر یا متر ،

$\theta_v =$ رطوبت حجمی خاک ، سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب یا متر مکعب بر متر مکعب،

$D_s =$ عمق یا ضخامت لایه خاک (نسبت به سطح زمین) ، سانتی متر یا متر،

$Dl_w / D_s =$ نسبت عمق آب آشوبی به واحد عمق خاک، بدون بعد.

با به کارگیری هر کدام از رابطه‌های بیان شده، می‌توان عمق خالص آب آشوبی (Dl_w) و ضریب آشوبی (f) را به شرح زیر

محاسبه کرد :

$$Dl_w = D_s \cdot \left[\frac{\theta_v}{f} \ln \frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right] \quad (10-4)$$

$$f = \frac{D_s}{Dl_w} \cdot \theta_v \cdot \left[\ln \frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right] \quad (11-4)$$

تذکر : تفریق مقدار EC_{eq} (شوری یا هدایت الکتریکی تعادلی عصاره اشباع خاک)، از صورت و منفرجه کسر رابطه‌های مربوط، موجب می‌شود که نتایج حاصل، مستقل از عوامل خارجی مؤثر (از جمله میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاکها، کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در امر آشوبی و دیگر شرایطی که می‌تواند بر روی نتایج، اثرگذار باشد) باشد.

با توجه به موارد بالا، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود اعمال فرضهای ساده‌شده‌ای در اشتقاق رابطه آشوبی نمکها از نیمرخ خاکها رابطه‌های بیان شده در بالا در مقایسه با بعضی مدل‌های تجربی و یا حتی مدل‌های عددی^۱، که در بخشهای آتی به آن اشاره خواهد شد، از منطبق فیزیکی و ریاضی مناسبی برخوردار هستند. به گونه‌ای که با اعمال فرضهای بیان شده و با به کارگیری رابطه‌ها می‌توان مقدار تخلیه و دفع (آشوبی) منطقی نمکهای کاملاً محلول را در نیمرخ خاک طی فرایند آشوبی و با تقریب مناسبی، محاسبه یا برآورد کرد زیرا ترکیبهای معدنی (نمکها) با درجه انحلال پذیری زیاد در شرایط متعارف، حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد نمکهای موجود در نیمرخ خاکهای مبتلا را تشکیل می‌دهند و ترکیبهای معدنی (نمکها) کم محلول فقط حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد باقیمانده را شامل می‌شود که این ترکیب حاصل هوازگی مواد مادری تشکیل دهنده خاکها است و در حقیقت در بیشتر اوقات آشوبی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها مورد نظر است، که مبانی بیان شده در رابطه‌های بالا، درباره آنها کاربرد دارد.

نکته : هر چند قضاوت درباره ضریب بازده آشوبی (f) باید از طریق انطباق منحنیهای آشوبی^۲ یا شوری‌زدایی حاصل از رقمهای مزرعه‌ای (مشاهده‌ای) و برآورد شده از یک مدل مناسب (محاسبه شده) انجام شود، لیکن نتایج بعضی بررسیها نشان می‌دهد که مقدار این ضریب برای خاکهای شنی در شرایط آشوبی به روش غرقاب دائم، برابر با ۰/۶ تا ۰/۷ و ممکن است برای خاکهای رسی تا حد ۰/۳ کاهش یابد. مقدار عددی این ضریب، منعکس کننده بازده کاربرد آب آشوبی نمکهای محلول خاک است که می‌تواند طی فرایند آشوبی جایگزین آب خاک شود.

1 - Numerical Models
2 - Leaching Curves

۳-۴ مدل‌های تجربی آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها

مدل‌های تجربی، حاصل داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری تجربی (آزمایشگاهی و یا میدانی) می‌باشند که بر نوعی رابطه ریاضی برازش داده می‌شوند. بنابراین، در اشتقاق آنها هیچ‌گونه پیش فرض فیزیکی و ریاضی اعمال نشده است. هرچند مدل‌های تجربی قلمرو محدودی دارند و در محل خاصی یا در مورد مشکل خاصی از آنها استفاده می‌شود، لیکن در ارتباط با اهداف این دستورالعمل، مزیت‌هایی را به شرح زیر دارا می‌باشند:

الف) به‌کارگیری این مدل‌ها برای برآوردهای مقدماتی و تقریبی می‌تواند در دستیابی به اطلاعات مورد نیاز برنامه‌های اصلاح خاک و زمینهای در شرایطی بسیار سودمند باشد.

ب) این نوع مدل‌ها می‌توانند بخش مهمی از یک مدل پیچیده عددی باشند.

پ) هرچند این روابط تجربی در مقایسه با نتایج مطالعات پایه حرکت همزمان آب و نمک محدودیت‌هایی دارد لیکن از نظر کاربردهای عملی در برنامه‌های اجرایی اصلاح خاک و زمینها نسبت به نتایج حاصل از مدل‌های نظری برتری دارند.

ت) و سرانجام سهولت‌های محاسباتی و کاربردی این مدل‌ها از نظر صرف زمان، هزینه و عدم نیاز به تخصص ویژه‌ای، قابل ملاحظه است.

در طرح‌های مطالعاتی، پیشنهاد می‌شود که بررسی امکان اصلاح فیزیکی- شیمیایی خاکهای شور و یا شور و سدیمی، تعیین میزان آب لازم برای آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای شور، از طریق آزمونهای مزرعه‌ای انجام گیرد. نتایج حاصل از اجرای آزمایشها، این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان نسبت به تهیه و ارائه منحنیهای آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها (منحنیهای شوری و یا سدیم‌زدایی) اقدام کرد و با استفاده از آن، میزان آب لازم برای تعدیل میزان شوری و سدیمی بودن خاکها را تا حد مطلوب تعیین کرد.

شرح تفصیلی و چگونگی اجرا در دستورالعمل آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی ایران در نشریه شماره ۲۵۵، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور ارائه شده است. بر پایه اجرای آزمونهای مزرعه‌ای، اعداد و رقمهای لازم برای برازش، به نوعی رابطه ریاضی به‌دست می‌آید. در این مبحث روابط یا مدل‌های تجربی که کاربرد آن در جهان و ایران مرسوم بوده است با رعایت قدمت زمانی ارائه شده است.

شایان ذکر است که استفاده از روابط (مدل‌های) تجربی و منحنیهای آبشویی یا شوری‌زدایی (و یا سدیم‌زدایی) حاصل در محدوده نوع خاک، میزان شوری و یا درصد سدیم تبدلی اولیه نیمرخ خاک محل اجرای آزمون، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و با استفاده از آنها می‌توان عمق آب مورد نیاز را برای کاهش عملی میزان شوری و یا درصد سدیم تبدلی خاک و برای عمق معینی از لایه خاک برآورد کرد. مقادیر به‌دست آمده و یا برآورد شده (محاسبه شده) نیاز خالص آب آبشویی نمکها است و به منظور برآورد کل میزان آب کاربردی لازم برای آبشویی نمکهای خاک، باید به مقادیر تبخیر (از سطح آب و خاک) و میزان بارندگی نیز توجه کرد و این عوامل فراگیر را در محاسبات برنامه‌ریزی آبشویی و اصلاح خاک و زمینها در نظر گرفت.

براساس مطالعات مزرعه‌ای که در منطقه کوچیلا^۱ ایالت کالیفرنیا ایالات متحده در سالهای ۱۹۵۵ تا ۱۹۵۷ به وسیله ریو و همکاران (۱۹۵۵) و ریو (۱۹۵۷) انجام گردید، مشخص شد که منحنی آبشویی نمکها از نیمرخ خاک، از شکل عمومی خاصی پیروی می‌کند. تحقیقهای انجام شده بر روی نوعی خاک با بافت رسی سیلتی لومی که میزان شوری اولیه آن (EC_i) تا عمق ۳۰ سانتی‌متری معادل ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر ($EC_e=40$) و روش آبشویی آن غرقاب دائم بوده و رابطه تجربی هذلولی شکل^۲ زیر به دست آمد:

$$\frac{D_w}{D_s} = \frac{1}{5\left(\frac{EC_f}{EC_i}\right)} + 0/15 = \frac{EC_i}{5(EC_f)} + 0/15 \quad (۱۲-۴)$$

که می‌توان آن را به شرح زیر نیز ارائه داد :

$$\frac{D_w}{D_s} = \frac{0/2(EC_i)}{EC_f} + 0/15 = \frac{1}{5}\left(\frac{EC_i}{EC_f}\right) + 0/15 \quad (۱۳-۴)$$

EC_i و EC_f به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل و بعد از کاربرد عمق مشخصی از آب آبشویی (D_w)، برحسب دسی‌زیمنس بر متر D_w و D_s به ترتیب عمق ناخالص آب به کار رفته (آبشویی) و ضخامت لایه خاک (از سطح خاک)، برحسب متر،

(EC_i / EC_f) نسبت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آبشویی به هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از آبشویی، بدون بعد.

(D_w/D_s) نسبت عمق آب کاربردی (آبشویی ناخالص) به واحد عمق خاک، بدون بعد.

رابطه بین حجم منفذی (PV) با نسبت عمق آب آبشویی به عمق خاک (D_w/D_s) به صورت $[PV = D_w / D_s \cdot \theta^*]$ تعریف شده است که در آن θ^* میزان رطوبت حجمی خاک است.

با استفاده از تساویهای ارائه شده در رابطه ۴-۱۳ می‌توان عمق آب مورد نیاز آبشویی (D_w) را به شرح زیر برآورد یا محاسبه کرد:

$$D_w = D_s \left[\frac{0/2(EC_i)}{EC_f} + 0/15 \right] = D_s \left[\frac{1}{5}\left(\frac{EC_i}{EC_f}\right) + 0/15 \right] \quad (۱۴-۴)$$

1 - Coachella
2 - Hyperbolic

رابطه‌های ۱۲-۴ و ۱۳-۴ را به صورت زیر نیز می‌توان ارائه داد :

$$\frac{EC_i}{EC_f} = 5 \left(\frac{D_w}{D_s} - 0/15 \right) \quad (۱۵-۴)$$

و یا :

$$\frac{EC_f}{EC_i} = \frac{1}{5 \left(\frac{D_w}{D_s} - 0/15 \right)} = \left[5 \left(\frac{D_w}{D_s} - 0/15 \right) \right]^{-1} \quad (۱۶-۴)$$

هرگاه در رابطه اخیر تساویهای $[Y = EC_f / EC_i]$ و $[X = D_w / D_s]$ جایگزین شوند می‌توان رابطه را به شکل کلی زیر نوشت:

$$Y = [5(X - 0/15)]^{-1} \quad (۱۷-۴)$$

و یا :

$$X = \frac{1}{5Y} + 0/15 = \frac{0/2}{Y} + 0/15 \quad (۱۸-۴)$$

با استفاده از تساویهای جایگزین که در به دست آوردن رابطه‌های ۱۷-۴ و ۱۸-۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند روابط زیر نیز امکان پذیر و معنی دار است.

$$\%Y = 100 \left(\frac{EC_f}{EC_i} \right) = 100 [5(X - 0/15)]^{-1} \quad (۱۹-۴)$$

$$\%Y' = 100 - (\%Y) = 100 \{ 1 - [5(X - 0/15)] \}^{-1} \quad (۲۰-۴)$$

در رابطه‌های بالا:

$\%Y$ = درصد نمک اولیه باقیمانده

$\%Y'$ = درصد نمک اولیه شسته شده می‌باشند.

تذکر: در صورت در دسترس بودن اطلاعات لازم، بدون آنکه در روابط بیان شده تغییری ایجاد شود، می‌توان به جای D_w (عمق ناخالص آب آبخویی)، از DI_w (عمق خالص آب آبخویی) استفاده کرد. زیرا می‌توان میزان DI_w را با کسر میزان کمبود رطوبت خاک لایه مورد نظر D_s (تا حد ظرفیت زراعی) از عمق آب کاربردی D_w به دست آورد.

به گونه‌ای که در مبحث ۳-۲ گفته شد، دیلمان (۱۹۶۳)، بر این باور بود که میزان شوری تعادلی (EC_{eq}) به فرایندهای تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاکهای مورد آزمون، شوری آب آبتوی مورد عمل (EC_w) مربوط است. و هرگاه مقدار اخیر (EC_{eq}) از مقادیر شوری اولیه (EC_i) و نهایی (EC_f) کسر شوند، روابط حاصل یعنی: $[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})]$ و $[D_{lw} / D_s]$ به طور نظری از کیفیت آب آبتوی، وضعیت زهکشی داخلی خاک و میزان تبخیر مستقل می‌گردند و بدین ترتیب روابط (رابطه‌ها) و منحنیهای به دست آمده فقط به ویژگیهای خاک مورد آزمایش بستگی خواهد داشت.

بدین ترتیب با اعمال این پیشنهاد و جایگزینی $D_w = D_{lw}$ در رابطه ۴-۱۶، شکل نهایی رابطه یا مدل تجربی ریو (۱۹۵۷) به صورت زیر خواهد بود:

$$[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] = 1 + 5[(D_{lw} / D_s) - 0/15] \quad (۲۱-۴)$$

استفاده از شکل ساده شده رابطه ۴-۱۲ و حالت کامل شده رابطه ۴-۲۱ یا رابطه تجربی ریو (۱۹۵۷) که به عنوان مدل تجربی ریو شناخته می‌شود برای سالهای متمادی در بیشتر نقاط جهان و کشور ما، کاربرد داشته است.

توجه: به دلیل اینکه مدل تجربی ریو در شرایط شوری اولیه قابل ملاحظه خاک، اشتقاق یافته است، بدین دلیل استفاده از آن در شرایط شوری اولیه کم تا متوسط خاکها منجر به برآورد بیش از اندازه آب مورد نیاز آبتوی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها می‌شود.

۴-۳-۲ مدل دیلمان (۱۹۶۳)

با توجه بر آنچه در مبحث ۳-۲ تحت عنوان «فرآیند شوری زدایی از نیمرخ خاکها» بیان گردید و نظر به اینکه در اشتقاق رابطه‌های ۴-۸ و ۴-۹ بعضی مبانی فیزیکی و ریاضی مورد استفاده قرار گرفته، لیکن عده‌ای از پژوهشگران را اعتقاد بر آن است که این رابطه‌ها نوعی روابط تجربی - نظری می‌باشند و شکل کلی رابطه ۴-۹ را مدل دیلمان قلمداد می‌نمایند. به هر حال شکل نهایی رابطه مورد نظر به شرح زیر است.

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

عوامل این رابطه، در قبل تعریف شده‌اند.

به دلیل اینکه قبل از اقدام به آبتوی نمکهای محلول از نیمرخ خاک، ضریب بازده آبتوی (f) دقیقاً مشخص نیست، می‌توان میزان تقریبی آن را که به شدت به ویژگیهای فیزیکی خاک و روش اجرای آبتوی بستگی دارد از منابع منتشر شده به دست آورد، این امر موجب شد پژوهشگران در این مورد دو روش ساده‌سازی را اعمال کنند.

الف) مقدار ضریب (f) را معادل واحد فرض می‌کنند.

ب) مقدار آن را که رقمی اعشاری است، معادل مقدار عددی θ_v که آن هم رقمی اعشاری است، در نظر می‌گیرند.

با اعمال حالت ساده‌سازی مورد دوم، رابطه تجربی- نظری دیلمان به شرح زیر ساده می‌شود:

$$[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] = \exp[-(D_{lw} / D_s)] \quad (22-4)$$

به دلیل اینکه توان (exp) منفی است، اعمال فرضهای ساده بالا موجب اشتباه فاحش نمی‌شود بنابراین با در نظر گرفتن رابطه ۲۲-۴ رابطه زیر را می‌توان ارائه کرد.

$$D_{lw} = D_s \left[\ln \frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right] \quad (23-4)$$

عوامل رابطه‌ها، همانند رابطه‌های قبل تعریف می‌شوند.

۳-۳-۴ مدل لافلر و شارما (۱۹۷۷)

بر پایه بررسیها و آزمونهای مزرعه‌ای که در سال ۱۹۷۵ در منطقه هانسای- هاریانا^۲ هندوستان به وسیله لافلر و شارما (۱۹۷۷) به انجام رسید، مشخص شد که نتایج حاصل از کاربرد مدل ریو (۱۹۵۷) عمق آب آبخویی را برای خاکهایی با بافت سبک (شنی لومی تا سیلتی لومی)، بسیار بیشتر از میزان مورد نیاز برآورد می‌کند. آنها آزمایشهای مربوط را با دو روش غرقاب دائم و متناوب در خاکی که میزان شوری اولیه آن (EC_i) تا عمق ۸۰ سانتی متری، حداکثر معادل ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر (EC_e=۳۰) بود، انجام دادند و از رابطه تجربی مشابه برای برآزش بر نتایج حاصل به صورت هذلولی به شرح زیر استفاده کردند :

$$[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] = 0/062 (D_s / D_{lw}) + 0/034 \quad (24-4)$$

پارامترها در قبل تعریف شده‌اند.

با استفاده از هر کدام از رابطه‌های ۲۴-۴ و ۲۵-۴ می‌توان عمق آب مورد نیاز آبخویی را به شرح زیر محاسبه و یا برآورد کرد:

$$\frac{D_{lw}}{D_s} = \frac{0/062}{\left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/034 \right]} = 0/062 \left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/034 \right]^{-1} \quad (25-4)$$

و یا :

1 - Leffelaar and Sharma
2 - Hansai-Haryana

$$Dl_w = D_s \left[\frac{0/062}{\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/034} \right]^{-1} = 0/062 D_s \left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/034 \right]^{-1} \quad (26-4)$$

مدل تجربی لافلر و شارما (۱۹۷۷) مانند دو مدل تجربی - نظری دیلمان (۱۹۶۳) و مدل تجربی ریو (۱۹۵۷) در سالهای پی‌درپی، مورد توجه و مقایسه پژوهشگران بوده و بارها در مراجع به آنها اشاره شده است.

۴-۳-۴ مدل هافمن^۱ (۱۹۸۰)

این مدل که در سال (۱۹۸۰) به وسیله هافمن ارائه شد، نتیجه گردآوری، تجزیه و تحلیل مقادیر قابل ملاحظه‌ای آمار، رقمها و اطلاعات حاصل از اجرای آزمایشهای مزرعه‌ای در کشور ایالات متحده امریکا و دیگر نقاط جهان است. رابطه تجربی نتیجه شده در این مورد را می‌توان به شرح زیر ارائه کرد:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{K}{\left(\frac{D_w}{D_s}\right)} \quad (27-4)$$

که در آن، C و C_o به ترتیب معرف غلظت نمک در عصاره اشباع خاک قبل و بعد از کاربرد آب آبتوی برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر و یا میلی‌گرم بر لیتر، D_w عمق آب کاربردی (آبتوی) برحسب متر یا سانتی‌متر، D_s ضخامت لایه خاک مورد آبتوی برحسب متر یا سانتی‌متر و سرانجام K به‌عنوان یک ضریب تجربی^۲ بدون بعد معرفی شده است. بررسی اطلاعات موجود نشان می‌دهد که مقدار ضریب تجربی K برای خاکهای لومی شنی در روش آبتوی با غرقاب دائم، معادل ۰/۱ است و برای خاکهای رسی تا ۰/۳ تغییر می‌کند. همین مقدار را می‌توان برای خاکهایی با بافت لومی سیلتی، رسی سیلتی و سیلتی لومی نیز در نظر گرفت.

در آبتوی به‌روش غرقاب متناوب با عمق آبی معادل ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در هر تناوب، صرف‌نظر از نوع خاک می‌توان مقدار ضریب K را ۰/۱ در نظر گرفت. رابطه بیان‌شده در بالا را می‌توان به شرح زیر نیز ارائه داد:

$$\frac{C}{C_o} = K \left(\frac{D_s}{D_w} \right) \quad (28-4)$$

و یا:

$$K = \left(\frac{C}{C_o} \right) \left(\frac{D_w}{D_s} \right) \quad (29-4)$$

1 - Hoffman
2 - Empirical Coefficient

هرگاه تساوی $EC = C$ (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک برحسب دسی زیمنس بر متر) در رابطه اخیر جایگزین شود و $EC_i = C$ و $EC_f = C$ باشد و مقادیر EC_{eq} (شوری تعادلی) از صورت و مخرج عبارت تفریق شود، نتیجه زیر به دست می‌آید:

$$K = \left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) \left(\frac{D_w}{D_s} \right) \quad (30-4)$$

که بدین ترتیب عمق آب لازم برای آبخویی به شرح زیر قابل محاسبه یا برآورد می‌شود:

$$D_w = K \cdot D_s [(EC_i - EC_{eq}) / (EC_f - EC_{eq})] \quad (31-4)$$

۴-۳-۵ مدل پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱)

این مدل براساس مطالعات و آزمونهای متعددی که در سالهای متمادی در بخش مرکزی استان خوزستان انجام شد و پس از گردآوری، تجزیه و تحلیل تعداد قابل توجهی آمار و رقمهای مزرعه‌ای، استخراج گردید. بافت خاک منطقه به‌طور عمده سیلتی رسی تا رسی سیلتی است و میزان شوری اولیه آن (EC_i) تا عمق ۱/۵ متری معادل ۶۵ تا ۸۰ دسی زیمنس بر متر ($EC_e = 80-65$) و با روش آبخویی غرقاب متناوب و عمق آب کاربردی ۱۵۰ سانتی‌متر بوده که در ۱۵ تناوب ۰/۱ متری به‌مصرف رسیده است. رابطه تجربی حاصل به شکل هذلولی و به شرح زیر بوده است:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = \left[\frac{D_w}{D_s} \right]^{0/076} + 0/023 \quad (32-4)$$

و یا :

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = [0/076 (D_s / D_w)] + 0/023 \quad (33-4)$$

که عوامل و ابعاد به کار رفته در این رابطه‌ها، در قبل تعریف شده‌اند.

به گونه‌ای که ملاحظه می‌شود رابطه‌های به دست آمده در این بررسی، از نظر شکل کلی با مدل‌های تجربی ارائه شده ریو (۱۹۵۷) و لافلر و شارما (۱۹۷۷) شباهت کلی دارد، بنابراین در بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که نتایج حاصل از کاربرد رابطه‌های ۳۲-۴ و ۳۳-۴ با رقمهای مشاهده‌ای (مزرعه‌ای) در مقایسه با دو مدل اشاره شده، همخوانی بسیار مطلوب‌تری را

نشان می‌دهد که به دلیل اختلاف در بافت سنگین خاک و زیادتر بودن شوری عصاره اشباع افق‌های متفاوت نیمرخ خاکهای منطقه خوزستان بوده است.

پژوهشگران دیگر نظریه‌های مشابهی درباره کاربرد مدل‌های تجربی ریو (۱۹۵۷) و لافلر و شارما (۱۹۷۷) گزارش کرده‌اند. به‌هرحال با استفاده از هر کدام از رابطه‌های ۴-۳۲ و ۴-۳۳ می‌توان عمق آب موردنیاز آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای منطقه را به شرح زیر محاسبه یا برآورد کرد :

$$\frac{Dl_w}{D_s} = \frac{0/076}{\left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/023 \right]} = 0/076 \left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/023 \right]^{-1} \quad (34-4)$$

و یا

$$Dl_w = D_s \frac{0/076}{\left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/023 \right]} = 0/076 D_s \left[\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} - 0/023 \right]^{-1} \quad (35-4)$$

۴-۳-۶ مدل ورما و گوپتا^۱ (۱۹۸۹)

این پژوهشگران چگونگی آبشویی نوعی خاک سیاه^۲ را با دو روش آبشویی غرقاب دائم و متناوب و از طریق آزمایشهای مزرعه‌ای مطالعه کردند. خاک مورد آزمون، دارای هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک اولیه (EC_i) معادل ۲۴ دسی زیمنس بر متر ($EC_i = 24$) تا عمق ۰/۶ متری بوده است، کل ارتفاع آب کاربردی ۶۰ سانتی‌متر بوده که درحالت غرقاب متناوب با چهار تناوب ۰/۱۵ متری به‌کار رفته است. آنها آبشویی قابل ملاحظه نمکهای محلول در نیمرخ خاکها را پس از نفوذ ۱/۵ میزان آب منفذی^۳ گزارش کردند. رابطه‌های تجربی حاصل برای دو روش آبشویی ذکر شده به شرح زیر بوده است :

الف) روش غرقاب دائم

(۳۶-۴)

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0/099 (D_w / D_s)^{-1/27}$$

ب) روش غرقاب متناوب

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0/09 (D_w / D_s)^{-1/63} \quad (37-4)$$

1 - Verma and Gupta.

2 - Black soil.

3 - Pore Volume

عوامل رابطه‌ها، همانند رابطه‌های قبل تعریف می‌شوند.

با بررسی روابط تجربی ارائه‌شده و با تعمق در مرجع مربوط ملاحظه می‌شود که حدود ۸۰ درصد نمکهای اولیه لایه ۰-۵۰ سانتی‌متری نیمرخ خاک، پس از به‌کارگیری ۲۹ و ۳۰ سانتی‌متر آب آبخویی در روشهای آبخویی غرقاب دائم و غرقاب متناوب، از لایه مذکور آبخویی و خارج می‌شوند که مقادیر آب آبخویی ذکر شده ۱/۵ برابر مقدار آب منفذی است. این پژوهشگران اعلام کردند که در خاکهای رسی ریزدانه، مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آب خاک در تحرک و جابه‌جایی نمکهای محلول در نیمرخ خاک کمتر مؤثر است. افزون بر این، همان‌گونه که از روابط تجربی بالا نیز استنباط می‌شود، مزیت خاصی در روش آبخویی غرقاب متناوب نسبت به غرقاب دائم وجود ندارد. به‌رحال، با به‌کار بردن رابطه‌های ۴-۳۶ و ۴-۳۷ می‌توان عمق آب مورد نیاز آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای مورد مطالعه را به شرح زیر محاسبه یا برآورد کرد :

الف) روش غرقاب دائم

$$D_w = D_s \left[0.162 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{0.787} \right] \quad (4-38)$$

ب) روش غرقاب متناوب

$$D_w = D_s \left[0.228 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{0.613} \right] \quad (4-39)$$

۴-۳-۱ مدل پذیرا و کشاورز^۱ (۱۹۹۸)

مطالعه‌های مربوط به تهیه و تدوین این مدل تجربی، در زمینهای شور و سدیمی بخش جنوب شرقی استان خوزستان از طریق آزمایشهای مزرعه‌ای، بر روی کرت‌های مدل^۲ (کرت‌های کنترل شده) انجام شده است. خاک منطقه مورد آزمون، دارای بافت لومی‌رسی تا رسی‌سیلتی بوده و براساس روش رده‌بندی جامع خاک وزارت کشاورزی کشور آمریکا (USDA) تیپیک هاپلوسالید^۳ بوده است، مقادیر شوری اولیه (EC_i) تا عمق ۱ متری ۳۸/۲-۴۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر ($EC_i = 46/5 - 38/2$) و روش آبخویی غرقاب متناوب با عمق آب کاربردی ۱۰۰ سانتی‌متر که در چهار تناوب ۰/۲۵ متری به مصرف رسیده است. رابطه تجربی حاصل به‌صورت زیر است :

$$\left[(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq}) \right] = 0.0764 \left(\frac{DI_w}{D_s} \right)^{-0.864} \quad (4-40)$$

1 - Pazira and Keshavarz

2 - Model plotes

3 - Typic Haplosalid

عوامل این رابطه، در رابطه‌های قبل تعریف شده است.

با به‌کارگیری رابطه بالا، مقایسه‌ای بین رقم‌های نظری (محاسبه‌شده) و اعداد حاصل از آزمون مزرعه‌ای به‌عمل آمد که در آن مجموع مربع خطاها (SSE) برابر با ۰/۰۴۳۳ و ضریب همبستگی رقم‌های مربوط به آن برابر ۰/۸۸۲ به‌دست آمد که در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. افزون بر این، نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای و محاسبه‌شده از طریق مدل ریو (۱۹۵۷)، لافلر و شارما (۱۹۷۷) و پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱) و مدل رابطه ۴-۴۰ با هم مقایسه شدند که نتایج حاصل مؤید همخوانی مطلوب و رضایت‌بخش مدل اخیر در مقایسه با مدل‌های ذکر شده بوده است. در نتیجه می‌توان اظهار داشت که رابطه اخیر، برازش مناسب و مطلوبی را به نتایج رقم‌های شوری‌زدایی خاک‌های سنگین بافت منطقه مورد مطالعه، داشته است.

با کمک رابطه ۴-۴۰ می‌توان عمق آب مورد نیاز آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک‌های منطقه را به‌شرح زیر محاسبه و یا برآورد کرد:

$$\frac{DI_w}{D_s} = \left[0/0764 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{1/157} \right] = 0/051 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{1/157} \quad (4-41)$$

$$DI_w = D_s \left[0/051 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{1/157} \right] \quad (4-42)$$

مؤسسه تحقیقات خاک و آب^۱ (۱۳۷۶) بر پایه آزمایش‌های آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاکها و تهیه منحنی‌های شوری و سدیم‌زدایی که در سال‌های ۱۳۵۱-۱۳۷۶ (و به‌ویژه در سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۷۵) در مناطق مختلف کشور اجرا شده بود، ضمن گردآوری، تجزیه و تحلیل رقم‌های و اطلاعات موجود، نتایج حاصل را برای کل کشور و به تفکیک برای ۱۴ استان مختلف در سال ۱۳۷۷ به‌صورت یک نشریه فنی منتشر کرده است.

تذکر: ممکن است در دیگر نقاط جهان و کشور، مدل‌های تجربی دیگری به‌دست آمده باشند که به‌دلیل عدم ارائه نتایج در مجامع علمی داخلی و خارجی و توجه کمتر پژوهشگران به آنها، امکان دستیابی و ارجاع به متون مکتوب نبوده است.

۴-۳-۱ بحث و نتیجه‌گیری از مبحث کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمکها

مهمترین شکلهای ریاضی مرسوم و متداول برای بیان مدل‌های تجربی آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک به شرح زیر می‌باشند:

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی - وزارت کشاورزی

1- Sum Square Error (SSE)

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی تابع هذلولی^۱

این گروه شامل بر مدل‌های تجربی ریو (۱۹۵۷)، لافلر و شارما (۱۹۷۷)، هافمن (۱۹۸۰)، پذیرا و کاواچی (۱۹۸۰) است.

- مدل‌های تجربی یا شکل رابطه ریاضی تابع توانی^۲

این دسته شامل مدل‌های تجربی ورما و گوپتا (۱۹۸۹)، پذیرا و کشاورز (۱۹۸۹) است.

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی توابع نمایی^۳ یا نیم لگاریتمی^۴

این گروه شامل مدل‌های تجربی - نظری دیلمان (۱۹۶۳) است.

بررسی شکل عمومی مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که با اندک تغییری در شکل اولیه ضرایب و یا انجام بعضی تبدیلهای ساده، همه مدل‌های تجربی ارائه شده به دلیل سهولت اشتقاق و کاربرد، قابل تبدیل به رابطه‌ها خطی ساده‌ای هستند. بدیهی است که رسم منحنیهای مربوط و یا کاربرد نتایج، نیاز به تغییر شکل رابطه به صورت اصلی (اولیه) دارد.

۴-۴ مدل‌های نظری آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها

دهه ۱۹۹۰ را می‌توان دوره تدوین و پردازش مدل‌های نظری^۵ و کاربردی نامید.

مدل، مجموعه‌ای از رهنمودها، رابطه‌ها و یا برنامه‌های رایانه‌ای است که به منظور کمی کردن عملکرد یک سامانه با توجه به تابع هدف به کار گرفته می‌شود و از دیدگاه دیگر، مدل سامانه‌ای است شامل فرضیه‌ها، داده‌ها و دستاوردها، که چگونگی روابط درونی موجود بین اجزای سازنده را به زبان ریاضی بیان می‌دارد.

مدل‌های شبیه‌ساز (همانندساز) نیز مدل‌هایی هستند که با استفاده از آنها می‌توان اثرات پیوسته و متقابل فرایندهای حاکم در زمینه مسائل مورد نظر (در این مبحث موارد آب خاک و حرکت همزمان نمکها در نیمرخ خاک) بررسی کرد. همان گونه که در مبحث ۳-۴ بیان شد برخلاف مدل‌های تجربی، در اشتقاق مدل‌های نظری شرایط و اهداف مورد نظر از پیش فرضهای فیزیکی و ریاضی ساده تا پیچیده‌ای در اشتقاق مدلها یا روابط نظری استفاده می‌شود و به همین دلیل، دامنه کاربرد آنها محدود نیست.

در روابط یا مدل‌های نظری، تغییرات مقدار عامل موردنظر (شوری خاک) به ازاء کاربرد مقادیر معین آب آبشویی با کیفیت مشخص، قابل محاسبه و پیش‌بینی است و بدین ترتیب در یک مدل مناسب می‌توان عملیات مدیریتی مختلفی را در امر آبشویی نمکهای محلول اعمال و نتایج حاصل را مقایسه و آنها را برای مطالعات بعدی و یا بررسی فرایندهایی که در ساختار مدل گنجانیده نشده‌اند، اعمال، اصلاح و یا تعدیل کرد.

این مبحث به معرفی و تشریح تعدادی از مدل‌های معروف و کارآمد نظری آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها که استفاده از آنها عمومیت بیشتری دارد، پرداخته است.

1 - Hyperbolic Function

2 - Power Function

3 - Exponential Function

4 - Semi Logarithmic Function

5 - Theoretical Models

۴-۴-۱ مدل مخزن منفرد^۱ (SR_M)

ویرایش کامل این مدل و مخزن منفرد با مجرای فرعی^۲ به وسیله وان در مولن^۳ (۱۹۷۹) ارائه شده است. در این مدل، خاک به عنوان مخزنی با حجم (V) فرض می‌شود که دارای میزان رطوبت یا محلول خاکی (فاز مایع) با غلظت اولیه C_o است. طی فرایند آبشویی، آب آبشویی با غلظت C_i به تدریج جایگزین محلول خاک می‌شود. در این جایگزینی، دو حالت کلی را می‌توان در نظر گرفته شوند.

- هیچ‌گونه اختلاطی بین آب آبشویی و محلول خاک صورت نگیرد و محلول خاک به وسیله محلول جایگزین شونده (آب آبشویی) و با سرعت جریانی معادل Q (میزان جریان عبوری از مخزن) جایگزین شود که در این شرایط آن را جریان پیستونی^۴ نیز می‌نامند. در این نوع جریان، در زمان T (T=V/Q) تمامی محلول خاک (مخزن) به وسیله محلول جایگزین شونده یا آب آبشویی جایگزین می‌شود و غلظت زه‌آب خروجی از انتهای مخزن C_r به طور ناگهانی از C_r=C_o در زمان t₁(t₁=t_o) به C_r=C_i در زمان t₂=t_o+T تغییر خواهد کرد که در آن T زمان توقف^۵ می‌باشد. از آنجا که آبشویی نمکهای محلول از محیط متخلخل^۶ خاک، طی فرایندهای پیچیده فیزیکی و شیمیایی به وقوع می‌پیوندد و به دلیل تفاوت در اندازه خلل و فرج، سرعت جریان در خاک یکنواخت نیست. از این نظر جریان پیستونی در خاکها به ندرت اتفاق می‌افتد.

- طی فرایند جایگزینی محلول خاک با محلول جایگزین شونده (آب آبشویی)، اختلاط بین دو محلول در مخزن اتفاق می‌افتد که آنرا جایگزینی اختلاط پذیر می‌نامند در این شرایط نمکهای محلول خاک در اثر دو فرایند انتقال (انتشار) توده‌ای^۷ و پخشیدگی، حرکت همزمان یا جابه‌جایی دارند. با فرض اختلاط کامل بین محلول خاک و مایع جایگزین شونده (آب آبشویی) و ثابت بودن حجم مایع درون مخزن طی فرایند جایگزینی، رابطه بیلان نمکها را به صورت زیر می‌توان ارائه داد.

$$C_i \cdot Q \cdot dt = C_r \cdot Q \cdot dt + V \cdot dC \quad (4-43)$$

که در آن، C میانگین غلظت نمکهای محلول و موجود در مخزن، C_i غلظت نمکهای ورودی به مخزن (غلظت نمکهای موجود در آب آبشویی یا محلول جایگزین شونده)، C_r غلظت نمکهای خروجی از مخزن، t زمان (زمان آبشویی یا فرایند جایگزینی)، Q میزان جریان عبوری از سامانه (عبوری یا ورودی)، V حجم مخزن که به وسیله مایع اشغال می‌شود. در بیلان ارائه شده براساس رابطه ۴-۴۳، فرض شده که واکنشهایی مانند ته‌نشینی و یا انحلال دوباره^۸ نمکها، رخ نمی‌دهد.

-
- 1 - Single Reservoir Model (SR_M)
 - 2 - Single Reservoir with Bypass Model (SRBM)
 - 3 - Van Der Molen
 - 4 - Piston Flow
 - 5 - Time of Residence
 - 6 - Porous Media
 - 7 - Mass Transport
 - 8 - Dissolution

با اختلاط یا امتزاج کامل محلول خاک با آب آشویی، شرایط $C_r = C$ فراهم می‌شود که با قرار دادن این تساوی در رابطه بالا نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$C_i \cdot Q \cdot dt = C \cdot Q \cdot dt + V \cdot dC \quad (4-44)$$

$$\frac{dC}{(C - C_i)} = -\frac{Q}{V} \cdot dt \quad (4-45)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه بالا برای حدود $C = C_o$ در زمان $t = 0$ و C_t در زمان t نتیجه می‌شود:

$$\frac{(C_t - C_i)}{(C_o - C_i)} = e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \quad (4-45) \text{ - مکرر}$$

به دلیل اینکه $(T = V/Q)$ است بنابراین $(1/T = Q/V)$ خواهد بود با جایگزینی این عبارت در رابطه 4-45 و حل آن برای C_t نتیجه می‌شود:

$$C_t = C_i + (C_o - C_i) e^{-\frac{t}{T}} \quad (4-46)$$

که در آن، C_t غلظت نمک در جریان خروجی از مخزن (خاک) در زمان t است. چنانچه بتوان منطقه توسعه ریشه گیاه را نوعی مخزن با اختلاط کامل فرض کرد، در این صورت رابطه 4-46 را می‌توان برای حالت آشویی محدوده توسعه ریشه گیاه به کار برد، بنابراین ملاحظه می‌شود که به دلیل عدم اختلاط کامل نمکهای موجود در محلول خاک و آب آشویی، مدل ذکر شده نمی‌تواند بیانگر شرایط واقعی فرایند آشویی نمکهای محلول و تغییرات غلظت نمکها در خاکها باشد.

۴-۴-۲ مدل مخزن با مجرای فرعی (SRBM)

به دلیل اینکه اختلاط کامل بین آب استفاده شده و محلول خاک به طور عملی در خاکهای مورد آشویی و یا آبیاری، نامحتمل به نظر می‌رسد، در نتیجه بخشی از آب آشویی بدون اختلاط با محلول خاک، از درون خلل و فرج، درز و ترکهای موجود در خاک عبور کرده و به دلیل عدم اختلاط و امتزاج آنها با محلول خاک، در فرایند آشویی نقش مؤثری ندارند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن بخشی از آب آشویی (به نسبت f که همان ضریب بازده آشویی^۱ نمکهای محلول خاک است) که با محلول خاک اختلاط یافته و از محدوده توسعه ریشه گیاه (عمق موردنظر برای اصلاح و آشویی خاک) عبور می‌کند، مدل مخزن منفرد با

1 - Leaching Efficiency Coefficient

مجرای (معبّر) فرعی برای بیان دقیق تر فرایند آّبشویی نمکهای محلول در نیمرخ خاکها تدوین و پیشنهاد شده است. حال با معرفی f به عنوان ضریب بازده آّبشویی رابطه بیلان نمکها در این مدل را می توان به شرح زیر ارائه کرد:

$$\frac{dC}{(C - C_i)} = -\frac{f \cdot Q}{V} \cdot dt \quad (4-47)$$

حل رابطه 4-47 با انتگرال گیری از رابطه برای حدود $C = C_0$ در زمان $t = 0$ و $C = C_t$ در زمان t به صورت زیر است:

$$C_t = C_i + (C_0 - C_i) e^{-\frac{f \cdot t}{T}} \quad (4-48)$$

که در آن، f ضریب بازده آّبشویی (بدون بعد) و C_t غلظت نمک در جریان خروجی از مخزن (خاک) در زمان t و دیگر عوامل قبلاً تعریف شده اند.

در رابطه 4-48، هرگاه $C_i = 0$ فرض شود رابطه به شکل ساده زیر در می آید:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-\frac{f \cdot t}{T}} \quad (4-49)$$

لازم به تذکر است که در مطالعات شوری زدایی خاکها (آّبشویی نمکهای محلول) از مدل مخزن منفرد با مجرای فرعی به عنوان مبنای بررسیهای بیلان نمکها، استفاده می شود، همچنین بخشی از آب آّبشویی و یا ورودی به مخزن، به میزان $(1-f)$ با غلظتی معادل آب آّبشویی (C_i) و بدون داشتن نقش مؤثر در آّبشویی، از مجاری یا معابر فرعی سامانه خاک عبور می کنند.

4-4-3 مدل سری مخازن¹ (SRM)

مبنای نظری این مدل توسط وان در مولن (۱۹۷۳) مطرح گردید و همان گونه که اشاره شد ویرایش کامل این مدلها را در سال ۱۹۷۹ ارائه داد.

بررسی دقیق فرایند آّبشویی نمکهای محلول در محیط متخلخل و ناهمگن خاک، بیانگر این است که اختلاط و امتزاج کامل بین محلول خاک (فاز مایع) و آب آّبشویی در لایه های مختلف نیمرخ خاک به طور عملی دور از واقعیت های علمی است بنابراین عمق مؤثر اختلاط مایع جایگزین شونده (آب) با محلول جایگزین شده (محلول خاک)، دارای محدودیتهایی است. برای لحاظ کردن دامنه این محدودیتهای محاسبات مربوط و تعدیل نتایج حاصل به گونه ای که با مشاهدات واقعی همخوانی مناسبی داشته باشد، مدل نظری سری مخازن توسعه و تکامل یافته است.

1 - Series of Reservoir Model (SRM)

در این مدل، محدوده توسعه ریشه گیاه به چهار لایه متوالی (به‌طور ترجیحی هر لایه به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر) تقسیم‌بندی شده و هر لایه به عنوان یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. به‌گونه‌ای که در مخزن نخست، آن بخش از آب آبخویی که به مخزن وارد می‌شود، با محلول موجود در آن اختلاط یافته و در نتیجه فرایند آبخویی نمکها صورت می‌گیرد. زه‌آب (تراوشهای عمقی) خروجی از مخزن نخست، به‌عنوان آب آبخویی ورودی به مخزن دوم به‌شمار می‌رود، بدین ترتیب هر مخزن (لایه خاک) آب آبخویی را از لایه یا مخزن بالایی دریافت می‌کند. تکرار این امر، باعث می‌شود به‌تدریج از میزان آب آبخویی کاهش و بالعکس غلظت نمکهای محلول آن افزایش یابد.

در این مدل، همچنین فرض می‌شود که حرکت همزمان آب و نمک در هر مخزن از حد رطوبتی ظرفیت زراعی (FC) به بعد شروع شده و حجم آب درون هر لایه طی فرایندهای انحلال و آبخویی نمک ثابت می‌ماند. با در نظر گرفتن ضریب بازده آبخویی (f)، می‌توان رابطه بیلان نمک را برای لایه نخست به شرح زیر ارائه کرد.

$$C_r = f.C + (1-f)C_i \quad (۵۰-۴)$$

که عوامل رابطه قبلاً تعریف شده‌اند.

تعمق در اجزای رابطه ۴-۴۹ نشان می‌دهد که بخشی از عمق آب به‌کاررفته (به نسبت f) با محلول خاک اختلاط یافته و از منطقه توسعه ریشه خارج می‌شود و بخش دیگری (1-f) که غلظت آن برابر غلظت آب آبیاری (C_i) است، از درون خلل و فرج و درز و ترکهای سامانه خاک عبور کرده و بدون اختلاط با محلول خاک از مسیر یا مجاری فرعی می‌گذرد. با یادآوری رابطه ۴-۴۷ که به‌صورت زیر است :

$$\frac{dC}{(C - C_i)} = -f\left(\frac{Q}{V}\right).dt$$

و حل این رابطه در شرایط انتگرال‌گیری C=C_۰ در زمان t=۰ و C=C_۱ در زمان t، رابطه بیلان نمک برای لایه اول، به شرح زیر به‌دست می‌آید:

$$C_1 = C_i + (C_0 - C_i)e^{-\frac{f.t}{T}} \quad (۵۱-۴)$$

که در آن، C_۱ غلظت نمکهای خروجی از لایه یا مخزن اول (غلظت نمکهای محلول مخزن نخست پس از آبخویی) که به مخزن یا لایه دوم وارد می‌شود، T زمان توقف در لایه نخست و دیگر عوامل قبلاً تعریف شده‌اند.

با استفاده از اصل انطباق بر روی هم (توالی لایه‌ها) و استفاده از روش مشابه‌ای می‌توان میزان غلظت جریان خروجی (زه‌آب یا تراوشهای عمقی) از لایه‌های دوم، سوم و چهارم را به‌دست آورد. بنابراین غلظت نمکهای محلول در لایه آخر (n ام) با رابطه کلی زیر قابل محاسبه یا برآورد است:

$$C_N = C_i + (C_o - C_i) e^{-\frac{f \cdot t}{T}} \sum_{n=0}^{n=N+1} \left[1 + \frac{f^n \cdot t^n}{n! T^N} \right] \quad (52-4)$$

$$n! = 1 \times 2 \times 3 \times \dots \times n$$

در رابطه بالا، فرض شده که غلظت اولیه نمکها در همه لایه‌های خاک یکسان است (توزیع یا پراکنش یکنواخت شوری در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک). بنابراین هرگاه غلظت اولیه نمکها (C_o) در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک متفاوت باشد (توزیع یا پراکنش غیریکنواخت شوری در لایه‌های متفاوت نیمرخ خاک) باید به‌جای C_o ، از C مربوط به هر لایه استفاده شود. یعنی:

$$C_N = C_i + e^{-\frac{f \cdot t}{T}} \left[(C_o^I - C_i) \frac{(f \cdot t)^{N-1}}{(N-1)! T^{N-1}} + (C_o^{II} - C_i^I) \frac{(f \cdot t)^{N-2}}{(N-2)! T^{N-2}} + \dots + (C_o^N - C_i^{N-1}) \right] \quad (53-4)$$

که در آن، C_o^I و C_o^{II} و ... C_o^N به ترتیب غلظت اولیه نمکهای محلول لایه‌های اول، دوم و ... n ام و C_i و C_i^I و ... نیز به ترتیب غلظت نهایی نمکها در لایه‌های اول، دوم و ... پیش از آخر است. بعضی پژوهشگران رابطه زیر را برای تعیین مقدار (t/T) در رابطه‌های بالا، پیشنهاد می‌کنند:

$$\frac{t}{T} = \frac{D_w}{\theta_{fc} \cdot D_s} \quad (54-4)$$

که در آن D_w ، عمق آب استفاده شده آبخویی، D_s عمق خاک و θ_{fc} رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت مزرعه است. عوامل به‌کار رفته به ترتیب برحسب میلی‌متر، میلی‌متر (یا متر) و میلی‌متر آب در متر عمق خاک می‌باشند. برای تعیین میزان ضریب بازده آبخویی با در نظر گرفتن خاک به‌صورت یک مخزن منفرد با مجرای فرعی، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$f = \frac{\theta_{fc}}{Qt} \ln \frac{C_o - C_i}{C_f - C_i} = \frac{V}{Q \cdot t} \ln \frac{C_o - C_i}{C_f - C_i} \quad (55-4)$$

در رابطه بالا C_o و C_f به ترتیب غلظت اولیه و نهایی نمکهای محلول خاک قبل و بعد از آبیویی، C_i غلظت نمکهای آب آبیویی ورودی به هر لایه، θ_{fc} میزان رطوبت ذخیره شده در خاک تا رسیدن به حد ظرفیت زراعی و V حجم مخزن موردنظر است.

توجه: غلظت نمکها را در رابطه‌های بیان شده، می‌توان برحسب میلی‌گرم بر لیتر، یا میلی‌اکی‌والان بر لیتر و یا دسی‌زیمنس بر متر بیان کرد. Qt معادل عمق آب آبیویی (میلی‌متر یا سانتی‌متر حسب مورد) است.

۴-۴-۴ مدل نظری ستون پیوسته خاک^۱ (TPTM)

در این مدل، نیمرخ خاک به صورت ستون پیوسته‌ای^۲ در نظر گرفته می‌شود که اختلاط آب آبیویی (محلول جایگزین شونده) و محلول خاک در هر عمقی از آن می‌تواند صورت گیرد. بنابراین دامنه اختلاف مؤثر، محدود است. گلوچکف^۳ (۱۹۴۹) نظریه‌ای را ارائه داد که با استفاده از آن می‌توان رفتار چنین ستونی را رابطه‌بندی کرد. تطبیق و کاربرد این نظریه برای فرایند آبیویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک، منجر به رابطه زیر شده است.

$$\left[\frac{\partial q}{\partial v} \right]_{D_s} + \left[\frac{\partial C}{\partial D_s} \right]_V - K \left[\frac{\partial^2 C}{\partial D_s^2} \right]_V = 0 \quad (۵۶-۴)$$

که در آن، q میزان یونهای جذب شده به وسیله ذرات خاک و در حالت تعادل با محلولی به غلظت C است؛ D_s عمق خاک (از سطح خاک)، K نصف طول مؤثری که فرایند اختلاط در آن انجام می‌شود.

حل رابطه ۴-۷۶ برای تشریح فرایند آبیویی (شوری‌زدایی) نمکهای محلول از نیمرخ خاک همگن به صورت زیر است:

$$C - C_i = \frac{(C_o - C_i)}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{f.P-1}{\sqrt{2f.P}} \sqrt{N} - e^{2N} \cdot \operatorname{erfc} \frac{f.P+1}{\sqrt{2f.P}} \sqrt{N} \right] \quad (۵۷-۴)$$

که در آن:

$$P = D_w / \theta_{fc} \cdot D_s$$

$$N = D_s / 2K$$

D_w عمق خالص آب استفاده شده (آبیویی)، θ_{fc} میزان رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت مزرعه، erfc متمم تابع خطای^۴ و عوامل دیگر، قبلاً تعریف شده‌اند.

1 - Theoretical Plate Thickness Model (TPTM)

2 - Continuous Column

3 - Glueckauf

4 - Error Function Compliment

۴-۴-۵ مدل انتقال-انتشار^۱ (پراکنش) هیدرودینامیکی (CDM)

نیلسون و بیگار^۲ (۱۹۶۲) راه‌حلی برای رابطه دیفرانسیلی که در ابتدا به‌وسیله لاپیدوس و اموندسون^۳ (۱۹۵۲) مطرح شده بود، ارائه دادند که با استفاده از آن، امکان بیان فرایند اختلاط هر دو عامل مؤثر در آن، یعنی سرعت جریان (انتقال) و اثر پخشیدگی فراهم می‌شود.

در تجربه مشاهده شد که با سرعت میانگین V و ثابت بودن ضریب مشخص پخشیدگی D ، امکان بیان فرایند آبشویی نمکها (شوری‌زدایی) از ستون خاک فراهم است.

به‌هرحال، اقدامهای قابل توجهی برای بیان ریاضی فرایند جایگزینی اختلاط‌پذیر و حل رابطه دیفرانسیلی پیشنهادی که در آن تلفیق پدیده‌های پخشیدگی و انتشار (پراکنش) در نقل و انتقال نمکهای محلول در نیمرخ خاک به‌کار گرفته شده است، انجام شده که با توجه به آنچه در مقدمه همین مبحث به آن اشاره شد، راه‌حل تحلیلی برای رابطه یک بعدی اختلاط آب و نمک در خاک همگن را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial D_s^2} - V \frac{\partial C}{\partial D_s} \quad (۵۸-۴)$$

که در آن، D ضریب پخشیدگی، V سرعت میانگین جریان، D_s عمق خاک، C غلظت نمکهای محلول و t زمان است. با رعایت شرایط مرزی^۴ زیر:

- حدود شرایط مرزی

$$\begin{array}{lll} C = C_1 & D_s > 0 & t = 0 \\ C = C_0 & D_s = 0 & t > 0 \\ C = C_i & D_s \rightarrow \infty & t > 0 \end{array}$$

- با حل رابطه اصلی، و اعمال فرض همگام بودن جریان و فرایند جایگزینی اختلاط پذیر رابطه بالا را می‌توان به‌صورت زیر ارائه داد:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial D_s^2} - \frac{V}{D} \frac{\partial C}{\partial D_s} - \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (۵۹-۴)$$

1 - Convection Dispersion Model (CDM)

2 - Nielsen and Biggar

3 - Lapidus and Amundson

4 - Boundary Condition (BC)

با جایگزینی $D_s = x$ رابطه به صورت زیر در می آید :

$$\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{V}{D} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t}\right) = 0 \quad (60-4)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس^۱ رابطه ۶۰-۴ را می توان به شکل زیر ارائه کرد:

$$\frac{d^2 J_{x,s}}{dx^2} - \frac{V}{D} \frac{dJ_{x,s}}{dx} - \frac{S}{D} J_{x,s} = 0 \quad (61-4)$$

$$J_{x,s} = e^{mx} \quad (62-4)$$

$$\frac{d^2 J_{x,s}}{dx^2} = \frac{d^2 e^{mx}}{dx^2} = m^2 e^{mx} \quad (63-4)$$

$$\frac{dJ_{x,s}}{dx} = \frac{de^{mx}}{dx} = me^{mx} \quad (64-4)$$

با جایگزینی تساویهای مندرج در رابطه های ۶۲-۴، ۶۳-۴ و ۶۴-۴ در رابطه ۶۱-۴، نتیجه به شرح زیر است:

$$m^2 e^{mx} - \frac{V}{D} m e^{mx} - \frac{S}{D} e^{mx} = 0 \quad (65-4)$$

و یا :

$$\left[m^2 - \frac{V}{D} m - \frac{S}{D} \right] e^{mx} = 0 \quad (66-4)$$

که در آن :

$$e^{mx} \neq 0 \quad (67-4)$$

$$m^2 - \frac{V}{D} m - \frac{S}{D} = 0 \quad (68-4)$$

با استفاده از دستور گرامر حل رابطه درجه دوم ۴-۶۵ به صورت زیر است:

$$m = \frac{V}{D} \pm \sqrt{\frac{V^2}{D^2} + \frac{4S}{D}} \quad (۴-۶۹)$$

در نتیجه :

$$j_{x,s} = Ae^{m_1 \cdot x} + Be^{m_2 \cdot x} \quad (۴-۷۰)$$

از آنجا که :

$$L_{[C_x, t]} = L(C_0) = \frac{C_0}{S} \quad \text{برای} \quad x = 0 \quad (۴-۷۱)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} L[C_x, t] = \lim_{x \rightarrow \infty} L(0) = 0 \quad (۴-۷۲)$$

با توجه به رابطه‌های ۴-۷۱ و ۴-۷۲ می‌توان نتیجه گرفت که :

$$A = 0 \quad \text{و} \quad A + B = \frac{C_0}{S}$$

بنابراین :

$$J_{x,s} = \frac{C_0}{S} \left[e^{-\frac{V}{2D}x - \frac{x}{2} \left(\frac{V^2}{D^2} + \frac{4S}{D} \right)^{1/2}} \right] \quad (۴-۷۳)$$

با استفاده از تبدیل معکوس لاپلاس^۱ می‌توان نوشت :

$$C_{x,t} = \frac{1}{2} C_0 \left[\operatorname{erfc} \frac{x-V.t}{2\sqrt{D.t}} + e^{\frac{V.x}{D}} \operatorname{erfc} \frac{x+V.t}{2\sqrt{D.t}} \right] \quad (۴-۷۴)$$

با جایگزینی $x = Ds$ در رابطه قبلی، نتیجه به صورت زیر در می آید:

$$C = \frac{1}{2} C_o \left[\operatorname{erfc} \left[\frac{D_s - V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] + \exp \left[\frac{V.D_s}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{D_s + V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] \right] \quad (75-4)$$

رابطه بالا در نوشته های بسیاری از پژوهشگران با در نظر گرفتن واژه (C_i) به صورت های زیر نیز ارائه شده است:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left[\frac{D_s - V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] + \exp \left[\frac{V.D_s}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{D_s + V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] \right] \quad (76-4)$$

$$\frac{C - C_i}{C_o - C_i} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left[\frac{D_s - V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] + \exp \left[\frac{V.D_s}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{D_s + V.t}{\sqrt{4D.t}} \right] \right] \quad (77-4)$$

با پژوهش های انجام شده بیگار و نیلسون¹ (۱۹۷۶)، رابطه بین ضریب ظاهری پخشیدگی D و میانگین سرعت منفذی V که در مدل انتقال - انتشار، کاربرد دارند، معین شد. نتایج این مطالعات، نشان داد که پخشیدگی ظاهری به طور تقریبی با میانگین میزان سرعت جریان V ارتباط دارد و برای تعیین ضریب پخشیدگی، رابطه تجربی زیر سودمند و کاربردی است.

$$D = 0.6 + 2.93 V^{1/11} \quad (78-4)$$

۴-۴-۶ مدل تابع انتقال^۳ (TFM)

این مدل که توسط جوری^۴ (۱۹۸۲) توسعه داده شد برای پیش بینی چگونگی حرکت نمک های محلول خاک در منطقه توسعه ریشه گیاه ارائه گردیده، در این مدل فرض می شود که انتقال نمکها در خاک، تابع استوکستیک^۵ (تصادفی) از زمان و یا تابع آب آیشویی کاربردی است. در این مدل حرکت نمکها در محیط غیراشباع خاک تابع چگالی احتمالی^۶ نسبت به زمان فرض شده است. بنابراین، میزان غلظت یک نمک غیرواکنش گر^۷ در عمق $D_s = R$ ، پس از زمان کوتاه dt تقریباً برابر با $F_R(t)$ خواهد بود. با استفاده از اصل انطباق و برای یک مقدار فرضی نمک کاربردی در سطح خاک ($D_s = 0$)، میزان تراکم نمکها در عمق $D_s = R$ ، از طریق رابطه زیر به دست می آید.

$$C(R, t) = \int_0^\infty C_{in}(t - \bar{t}) \cdot F_R(\bar{t}) d\bar{t} \quad (79-4)$$

-
- 1 - Biggar and Nielsen
 - 2 - Average Pore Velocity
 - 3 - Transfer Function Model (TFM)
 - 4 - Jury
 - 5 - Stochastic Function
 - 6 - Probability Density Function
 - 7 - Nonreactive

که در آن، C_{in} میزان غلظت نمکها در آب آبهویی است که به سطح خاک ($D_s = \infty$) افزوده می‌شود. \bar{t} زمان لازم برای رسیدن نمکها به عمق معین از نیمرخ خاک ($D_s = R$ به $D_s = \infty$)، و $F_R(\bar{t})$ تابع چگالی احتمال است. با گسترش این مدل، می‌توان تابع چگالی احتمال را به صورت توزیع لوگ نرمال^۱ بیان کرد. در شرایطی که جریان آب آبهویی در نیمرخ خاک تقریباً حالت ماندگار^۲ فرض شود، می‌توان به جای t از حجم آب کاربردی در واحد سطح D_w استفاده کرد و با اعمال فرضهای بیان شده در تابع چگالی احتمال، نتیجه‌ای به شرح زیر است:

$$F_R(D_w) = \left[\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_w \right]^{-t} \cdot \exp \left[-\frac{(\ln D_w - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (۸۰-۴)$$

که در آن، σ و μ به ترتیب واریانس^۳ و میانگین^۴ است. برای حل تحلیلی رابطه‌های ۷۹-۴ و ۸۰-۴ روشهای مختلفی ارائه شده است. برای شرایط مرزی زیر:

$$\begin{aligned} C_{in}(D_w) &= \infty & D_w < \infty \\ C_{in}(D_w) &= C_0 & \infty < D_w < \Delta D_w \\ C_{in}(D_w) &= \infty & D_w > \Delta D_w \end{aligned}$$

راه حل رابطه ۷۹-۴ به صورت زیر جمع‌بندی شده است:

$$C(D_s, D_w) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(D_w \cdot R \cdot D_s)^{-\mu}}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{\ln(D_w - \Delta D_w) \cdot R \cdot D - \mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right] \right\} \quad (۸۱-۴)$$

که در آن، erf تابع خطای است و عوامل دیگر قبلاً تعریف شده‌اند.

در پژوهشهای انجام شده توسط جوری و اسپوزیتو^۵ (۱۹۸۵)، روابط بین پارامترهای به کاررفته در مدل تابع لوگ نرمال، یعنی μ و σ و پارامترهای به کاررفته در مدل انتقال-انتشار یعنی D و V مشخص شده است. به گونه‌ای که μ و σ تقریباً مرتبط با D و V و به شرح زیر است:

$$\sigma^2 = \ln(D_{s2}/D_{s1}^2) \quad (۸۲-۴)$$

$$\mu = 2\sigma^2 - \frac{\ln(D_{s2}/R^2 \cdot t^2)}{2} \quad (۸۳-۴)$$

-
- 1 - Lognormal Function
 - 2 - Steady State
 - 3 - Variance
 - 4 - Mean
 - 5 - Jury and Spósito

در رابطه‌های بیان شده عبارات به کاررفته به صورت زیر تعریف شده‌اند :

$$D_{s1} = (D/V) + V.t \quad (۸۴-۴)$$

$$D_{s2} = 4D.t + V^2.t^2 \quad (۸۵-۴)$$

۴-۴-۱ مدل حل عددی (NM)

مدل حل عددی، مدل ساده‌شده‌ای از رابطه بیلان نمکها است. در این مدل، نیمرخ خاک شامل چند لایه (مخزن) جداگانه لیکن متوالی در نظر گرفته می‌شود. به گونه‌ای که هرگاه مقدار آب به کاررفته معادل a (سانتی‌متر یا میلی‌متر) با غلظت نمک محلولی معادل EC_i بر حسب دسی زیمنس بر متر، به لایه (مخزن) اول وارد شود، که در آن قبلاً b (سانتی‌متر یا میلی‌متر) محلول خاک (رطوبت) با میزان هدایت الکتریکی یا غلظتی برابر EC_{01} وجود داشته باشد؛ بدین ترتیب می‌توان نوشت :

$$a.EC_i + b.EC_{01} = (a + b)EC_1 \quad (۸۶-۴)$$

و یا

$$EC_1 = \frac{a.EC_i + b.EC_{01}}{(a + b)} \quad (۸۷-۴)$$

که در آن، EC_1 هدایت الکتریکی (شوری) محلول حاصل از اختلاط محلول خاک با آب به کاررفته در لایه (مخزن) اول است. بازده آبشویی نمکهای محلول (درصدی از آب به کاررفته که با آب خاک اختلاط می‌یابد) در این حالت برابر واحد فرض شده است، هرگاه افزون بر a ، c سانتی‌متر یا میلی‌متر از آب (رطوبت) در لایه اول نگهداری شود، بنابراین مقدار $(a-c)$ سانتی‌متر یا میلی‌متر به صورت تراوشهای عمقی به دومین لایه نفوذ می‌کند که میزان شوری (هدایت الکتریکی تراوشهای عمقی و نفوذ یافته به دومین لایه) برابر EC_1 خواهد بود. در شرایطی که d سانتی‌متر یا میلی‌متر محلول خاک با میزان هدایت الکتریکی معادل EC_{01} قبلاً در آن لایه وجود داشته باشد، رابطه زیر را می‌توان ارائه داد.

$$(a - c)EC_1 + d.EC_{02} = (a - c + d)EC_2 \quad (۸۸-۴)$$

$$EC_2 = \frac{(a - c)EC_1 + d.EC_{02}}{(a - c + d)} \quad (۸۹-۴)$$

که در آن EC_2 هدایت الکتریکی یا شوری حاصل در لایه دوم (مخزن دوم) است، این محاسبات را می‌توان برای لایه‌های دیگر نیز تعمیم داد. به همین ترتیب، مقادیر متفاوت ضریب بازده آبشویی (f) را می‌توان به لایه‌های مختلف نسبت داد. در شرایطی که f_1 و f_2 به ترتیب بازده آبشویی لایه‌های اول و دوم باشند رابطه‌های ۸۷-۴ و ۸۹-۴ را می‌توان به شرح زیر ارائه کرد:

$$f_1 \cdot a EC_i + b EC_{01} = (f_1 \cdot a + b) EC_1 \quad (90-4)$$

و

$$f_2 (a - c) EC_1 + d EC_{02} = [f_2 (a - c) + d] EC_2 \quad (91-4)$$

با فرض اینکه جرم مخصوص ظاهری و میزان رطوبت همه لایه‌های نیمرخ خاک بدون تغییر باشند، رابطه بالا را می‌توان برای فرایند شوری‌زدایی (آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک) که شامل n لایه کاملاً مخلوط‌شونده و متوالی باشند، به شرح زیر ارائه داد:

$$EC_N = EC_i + (EC_o - EC_i) e^{-\frac{f \cdot t}{T}} \cdot \sum_{n=0}^{n=N} \frac{f^n \cdot t^n}{n! \cdot T^n} \quad (92-4)$$

که در آن EC_N هدایت الکتریکی محلول خاک در لایه یا مخزن n ام خاک، EC_i و EC_o به ترتیب هدایت الکتریکی آب آبیاری (آبشویی) و اولیه محلول مخزن نخست بر حسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند، f ضریب بازده آبشویی نمکهای محلول در نیمرخ خاک، t زمان و T نسبت حجم مخزن به سرعت جریان (شدت جریان یا $T = Q/V$) که در آن محلول خاک جایگزین می‌شود (زمان توقف)، به‌گونه‌ای که ملاحظه می‌شود در این روش (مدل) دقت محاسبات به انتخاب مقدار آب آبشویی ورودی (a) بستگی خواهد داشت. در شرایطی که مقدار آن کوچک انتخاب شود، محاسبات مربوط به تعیین غلظت مخازن (لایه‌ها) با دقت مناسب و مطلوب انجام خواهد شد.

نتایج حاصل از به‌کارگیری رابطه ۹۲-۴، تقریباً مشابه نتایجی است که با به‌کارگیری نظریه عملیات ستونی^۱ کلچکف (۱۹۴۹)، به‌دست آمده است.

تذکر: ضخامت لایه‌های فرضی و تعریف شده در مدل، مشخص کننده تعداد و ضخامت لایه‌ها (مخازن) در نیمرخ خاک (ستون) است که در این مدل، معمولاً ضخامت لایه‌ها (D_z)، ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

امروزه روشهای حل عددی که با استفاده از رایانه‌های پیشرفته انجام می‌شود، قادر است رابطه‌های نمایی پیچیده را با وارد کردن تغییرات پارامترهای مربوط با دقت زیادی حل کند. دقت محاسبات به مقدار تغییرات (گام محاسبات) بستگی دارد.

۴-۴-۱ بحث و نتیجه‌گیری از مبحث کاربردی مدل‌های نظری آبشویی نمکها

با استفاده از مدل‌های نظری آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها که در تعدیل و تکامل آنها، ضریب بازده آبشویی (f) منظور شده، می‌توان با انتخاب مقدار ضریب (f) مورد نظر و انجام محاسبات لازم، در نهایت به‌ازای مقادیر مختلف (عمق) آب آبشویی، غلظت نمکهای محلول لایه‌های متفاوت را پس از استفاده از آب آبشویی، برآورد کرد و با استفاده از آنها منحنی آبشویی

1 - Theory of Column Operation
2 - Step of Calculation

(شوری زدایی) نظری خاک^۱ را رسم کرد. به همان گونه که گفته شد، تهیه و رسم منحنی شوری زدایی (آبشویی) حقیقی خاک^۲، از راه آزمایشهای مزرعه‌ای امکان‌پذیر است. انطباق نسبی منحنیهای آبشویی واقعی و نظری خاک، می‌تواند بیانگر انتخاب مناسب مقدار ضریب بازده آبشویی (f) به کار گرفته شده در مدلها و محاسبات، همچنین تناسب مدل به کار رفته با شرایط طبیعی خاک باشد. بدین ترتیب مقایسه همخوانی و انطباق منحنی آبشویی واقعی خاک و منحنیهای آبشویی نظری که به‌ازای مقادیر متفاوت (f) حاصل شده، می‌تواند روشی مناسب برای برآورد ضریب بازده آبشویی خاکها باشد. افزون بر این، روشهای دیگری برای برآورد تقریبی ضریب بازدههای آبشویی خاکها وجود دارد که در برنامه‌های اجرایی می‌توان از آنها استفاده کرد. برای مثال با استفاده از رابطه زیر، می‌توان ضریب بازده آبشویی را با دقت تقریبی به‌دست آورد:

$$EC_{eq} = \frac{r \cdot EC_w}{f} \quad (93-4)$$

که در آن، f ضریب بازده آبشویی، EC_{eq} هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که با آب آبشویی به تعادل شیمیایی رسیده باشد، EC_w هدایت الکتریکی آب استفاده شده آبشویی است.

$$r = \frac{D_w}{D_p} \quad (94-4)$$

در رابطه بالا، D_w مقدار آب آبشویی به‌کاررفته، D_p مقدار آب نفوذ یافته (زهکشی) که به‌صورت تراوشهای عمقی از لایه مورد نظر خارج شده است.

هرگاه مقدار شوری تعادلی EC_{eq} مربوط به لایه ۰ تا ۵ سانتی‌متری اولیه نیمرخ خاک و پس از نفوذ تمامی میزان آب آبشویی (D_w) باشد، می‌توان $D_w = D_p$ را منظور کرد که در نتیجه آن رابطه ۹۳-۴ به‌صورت ساده زیر به‌دست می‌آید:

$$f = \frac{EC_w}{EC_{eq}} \quad (95-4)$$

همان‌گونه که بیان شد استفاده از رابطه‌های بالا، ضریب بازده آبشویی را با دقت تقریبی به‌دست می‌دهد. بنابراین در صورتی که مقدار دقیق f موردنظر باشد، استفاده از رابطه‌های مربوط به مدل‌های نظری آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک توصیه می‌شود.

1 - Theoretical Leaching Curve
2 - Experimental Leaching Curve

پیوست ۱

روش اجرای آزمایشها، پردازش داده‌ها و شیوه نتیجه‌گیری از رقمها و اعداد حاصل از اجرای آزمونهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی

۱- کلیات

همان‌گونه که در فصلهای قبل بیان شد، اصول اصلاح و بهسازی فیزیکی- شیمیایی خاکهای مبتلا به مشکلات شوری و سدیمی، شامل موارد زیر است:

(الف) آبشویی نمکهای انباشت شده در محدوده ریشه گیاهان،

(ب) انجام عملیاتی که منجر به جایگزینی یون کلسیم (Ca^{2+}) با یون سدیم (Na^+) در هم‌تافت تبادلی خاک شود، و

(پ) جلوگیری از شور و سدیمی شدن دوباره زمینهای اصلاح شده،

به‌منظور تهیه اطلاعات موردنیاز و دستیابی به اهداف موارد (الف) و (ب)؛ لازم است آزمایشهای اصلاح خاک و زمین یعنی آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها (شوری‌زدایی، سدیم‌زدایی و تهیه منحنیهای آبشویی) در منطقه مورد نظر انجام شود. نتایج آزمایشها امکان پاسخگویی به سؤالات مطرح شده در زمینه اصلاح و بهسازی خاکهای شور و سدیمی یعنی امکان اصلاح خاکها از طریق استفاده از آب آبشویی به تنهایی، گرایش یا عدم گرایش کیفیت شیمیایی آنها به سدیمی شدن، میزان آب لازم آبشویی و آب آبشویی همراه با مواد اصلاح‌کننده، ضرورت مصرف آب شور یا عدم توجیه مصرف آن و سرانجام زمان لازم برای تعدیل مشکل شوری و سدیمی بودن خاکها از طریق عملیات اصلاحی را فراهم می‌آورد.^۱

۲- بررسی اسناد و مدارک موجود

به‌منظور انجام دقیق‌تر آزمایشهای اصلاح خاک و زمینها در منطقه موردنظر، ابتدا باید اسناد و مدارک موجود در این زمینه گردآوری، رده‌بندی و مورد توجه، قرار گیرد. از جمله اسناد و مدارک قابل توجه در این ارتباط گزارش و نقشه‌های خاکشناسی و رده‌بندی زمینها (به‌ویژه نقشه خاکها، نقشه شوری و قلیابیت زمینها)، گزارش و نقشه‌های مطالعات تکمیلی خاکشناسی و بررسیهای آبیاری و زهکشی منطقه (چاهکهای مطالعاتی، پیرومترهای ساده و مرکب، لایه‌بندی خاکها، استقرار لایه محدودکننده، هدایت هیدرولیکی خاک، سرعت نفوذ آب به خاک و...) می‌باشند. از آنجا که فرایندهای شوری و سدیمی بودن خاکها پویا و تابع زمان و مکان است، بنابراین در صورتی که از زمان انجام مطالعات خاکشناسی و رده‌بندی زمینها مدت زمان زیادی گذشته و شیوه بهره‌برداری و مدیریت زمینها تغییر کرده باشد، باید نقشه شوری و قلیابیت خاکهای منطقه به روز شود.

۱- برای آگاهی تفصیلی از زمینه‌های عملی و کاربردی این پیوست "دستورالعمل آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی در ایران"، نشریه شماره ۲۵۵، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۱ مورد توجه قرار گیرد.

بررسی گزارشها و نقشه‌های ذکر شده، مطالعه‌کنندگان را از نظر انجام بررسیهای مزرعه‌ای و آزمایشگاهی یاری خواهد داد تا با صرف کمترین وقت و هزینه و بدون دوباره‌کاری در برنامه‌ریزی، اجرا و نتیجه‌گیری از آزمونهای موردنظر و با دقت نسبی زیادتری، به موفقیت برسند.

مطالبی که از گزارش و نقشه‌های خاکشناسی، رده‌بندی زمینها، مطالعات تکمیلی و بررسیهای زهکشی منطقه استخراج می‌شود و در مطالعات شوری و سدیم زدایی خاک و زمینها، از آنها استفاده می‌شود، شامل موارد کلی زیر است:

- ویژگیهای ذاتی خاکها شامل نفوذپذیری، بافت خاک (به‌ویژه لایه سطحی و لایه‌های زیرسطحی تا عمق ۱/۵ متری موردنظر است)، هدایت هیدرولیکی لایه‌های زیرسطحی، ظرفیت نگهداری آب در خاک، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و دیگر اطلاعاتی که به‌طور عمده در محل نیمرخ شاهد مطالعات خاکشناسی انجام و ثبت شده است.
- ویژگیهای کیفی خاکها شامل حالت و شدت درجات شوری و سدیمی بودن، عمق و کیفیت آب زیرزمینی، اثر آب‌ماندگی دائم و موقت در سطح و نیمرخ خاک و غیره ...
- ویژگیهای منطقه‌ای مانند فیزیوگرافی، توپوگرافی (شیبها از نظر حالت و شدت)، موارد مرتبط با فرسایش و افزایش (آبی و بادی)، سری و پراکنش فازها در سریهای مربوط و ...

پیشنهاد می‌شود بر پایه گزارش، نقشه‌های خاکشناسی و رده‌بندی زمینها، جدولهایی به شرح زیر تهیه و براساس مندرجات آنها درباره تعیین تعداد و تکرار آزمونهای لازم در زمینه آزمایشهای اصلاح خاک و زمینها اقدام شود.

- مساحت و درصد از مساحت کل سریهای خاک (و فازهای مربوط به هر سری) در محدوده مطالعاتی،
- وضعیت فازهای مربوط به هر سری خاک از نظر ویژگیهای بافت و نفوذپذیری لایه‌های زیرسطحی و تحت کلاسه‌های مربوط در محدوده مورد بررسی،
- توزیع مساحت سریهای متفاوت خاک در کلاسه‌ها و تحت کلاسه‌های مربوطه در خاکهای منطقه موردنظر،
- توزیع کلاسه‌های شوری و قلیابیت خاک و زمینها در سریهای خاک (و فازهای مرتبط به هر سری) در منطقه مطالعاتی،
- مساحت و درصد کلاسه‌های متفاوت شوری و قلیابیت خاک و زمینها در سریهای مختلف خاکهای منطقه مورد نظر.

تهیه و بررسی جدولهای بیان‌شده این امکان را فراهم می‌آورد تا ضمن مطالعه عوامل مختلف و متفاوت، مساحت و درصد زمینهای مشکل‌دار را با توجه به عوامل ذاتی، کیفی و منطقه‌ای خاکها، از نظر تعداد آزمونهای مورد نظر ارزیابی کرد.

به‌دلیل پرهزینه و وقت‌گیر بودن اجرای آزمایشهای اصلاح خاک و زمینها و تعدد عوامل مورد بررسی و اندازه‌گیری، بهتر است که حداقل آزمونهایی را که بتواند نتایج صحیح و منطقی را ارائه دهد، انتخاب و اجرا کرد. بنابراین ضروری است که در انتخاب نقاط از نظر تعداد و تکرار مکانهایی که معرف کلاس شوری و قلیابیت در فاز، سری و واحد فیزیوگرافی غالب منطقه مورد بررسی است انتخاب و آزمونهای لازم را انجام داد. به‌گونه‌ای که نتایج حاصل قابل گسترش و تعمیم به بخش قابل توجهی از زمینهای مبتلا باشد. در این راستا پیشنهاد می‌شود (۱) زمینهایی که مساحت بسیار کمی دارند از برنامه حذف شوند، (۲) زمینهای مبتلایی که شوری و قلیابیت آنها از کلاس S_2A_2 بالاتر است انتخاب و در برنامه گنجانده شود، (۳) چنانچه در یک سری خاک فازهای مختلفی با درجات شوری و قلیابیت متفاوت وجود داشته باشد، کلاسه‌های با درجه‌های شوری و قلیابیت

بالتر را انتخاب کرد، زیرا در صورتی که زمینهای با کلاسههای شوری و قلیابیت بالاتر، قابل اصلاح تشخیص داده شوند برای دیگر فازهای سری مربوط به کلاس شوری و قلیابیت پایینتر، قابل استفاده خواهد بود.

۳- روشهای اجرای آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی

آزمونهای اصلاح خاک و زمینها و یا بررسیهای اصلاح پذیری خاکها را می توان به روشهای آزمایشگاهی و صحرایی انجام داد. تعیین نوع آزمایش به درجه دقت، وسعت و دامنه کاربرد نتایج حاصل بستگی خواهد داشت. در زیر به روشهای متداول اشاره شده است:

۱-۳ آزمونهای آزمایشگاهی

برای انجام آزمون تعیین درجه اصلاح پذیری خاکهای شور، سدیمی و یا شور و سدیمی، از اعماق مختلف محلی که معرف زمینهای کلاس شوری و یا قلیابیت مربوط باشد به وسیله مته یا هر وسیله دیگری از خاک نمونه برداری می شود. نمونه ها ابتدا در هوای آزاد خشک و سپس کوبیده و از الک دو میلی متری گذرانده می شوند. مقادیری از خاک غربال شده را در استوانه آبشویی که مجرایی برای خروج زه آب در کف آن تعبیه شده است قرار داده و مقداری آب برای اشباع و ایجاد تراوشهای عمقی و ثقلی با روشهای غرقاب دائم و یا متناوب به ستون خاک اضافه کرده و با اندازه گیری شوری و نسبت جذب سدیم (SAR) اولیه و نهایی نمونه خاک و اندازه گیری حجم و شوری زه آبهای حاصل (تراوشهای عمقی ستون خاک) رابطه بین حجم آب خروجی با زمان و رابطه حجم آب خروجی، شوری و نسبت جذب سدیم زه آبها را تعیین کرده و از اعداد و رقمهای حاصل در آزمونهای آبشویی خاکهای شور و یا شور و سدیمی بهره گرفت.

آزمونهای بیان شده را می توان به صورت دیگری نیز اجرا کرد. بنابراین، در همه حال کوچک بودن نمونه خاک و دست خورده بودن آنها موجب کاهش دقت این گونه آزمایشها می شود و این امر باعث می شود که استفاده از نتایج حاصل در برنامه های اصلاح خاک و زمینهای مزرعه ای، خالی از اشکال نباشد.

۲-۳ آزمونهای مزرعه ای

به منظور رفع نقایص بیان شده و بهره مندی از مزیت های دیگری که در روش کار مندرج است انجام آزمایشهای اصلاح خاک و زمینها به طریق مزرعه ای پیشنهاد می شود. برای انجام این گونه آزمونها ابتدا لازم است نقاط مورد نظر، بر روی زمین مشخص و پس از آن ضمن بازدید صحرایی، مندرجات نقشه ها با عوارض سطح زمینها در محل مورد نظر، تطبیق داده شود. در مرحله بعد ضروری است که قطعه زمین یکنواخت به مساحت حدود ۱۰۰ مترمربع (۱۰×۱۰ متر) میخکوبی و یا علامت گذاری شده و سپس آزمونهای مورد نظر در این قطعه انتخابی، به مرحله اجرا درآید.

در انجام آزمونهای مزرعه ای اصلاح خاک و زمینها، به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه، پیشنهاد می شود محل انتخابی تا حد امکان در حواشی و یا مجاور نیمرخ شاهد مطالعات خاکشناسی محل باشد. انجام آزمایشهایی در مزرعه معمولاً با روشهای زیر به اجرا در می آید که هر کدام معایب و مزایای خاص خود را دارند.

الف) اجرای آزمایشها در کرت‌های کوچک

برای این منظور یک سری کرت به ابعاد 1×1 یا $1/5 \times 1/5$ و یا 2×2 متر با پشته‌های محکم (از خاکی غیر از خاک داخل کرت) ساخته و کف کرتها تا حد امکان مسطح می‌شود. تعداد کرت‌های مورد نیاز به کل عمق آب آیشویی، تناوب و عمق آب کاربردی در افزایش آب به خاک بستگی دارد. برای مثال در صورتی که کل عمق آب آیشویی ۱۵۰ سانتی‌متر و تناوب عمق آب کاربردی در هر بار ۱۰ سانتی‌متر باشد، ضروری است که ۱۶ قطعه کرت ایجاد شود و درحالی‌که همان میزان آب در شش نوبت ۲۵ سانتی‌متری به کار رود تعداد کرتها به هفت قطعه کاهش می‌یابد. در این مورد ذکر نکات زیر ضروری است.

- به منظور جلوگیری از جذب آب به وسیله پشته‌ها می‌توان اطراف کرتها را با ورقه پلاستیکی پوشش داد،
- کرتها در جهت طولی و عرضی باید حداقل یک متر از کرت هم جوار، فاصله داشته باشد،
- در مدت فرونشست آب در خاک و یا فاصله بین دوبار آبیاری، باید سطح کرتها به وسیله یک ورقه نایلونی پوشیده شود (برای جلوگیری از تبخیر آب از سطح خاک)،
- کرت اضافی، برای انجام آزمون در شرایط استغراق کامل در نظر گرفته می‌شود. در این کرت آب به شیوه‌ای اضافه می‌شود که همواره لایه‌ای از آب سطح کرت را بپوشاند و خاک همواره در حالت استغراق کامل باشد. در این کرت می‌توان سرعت نفوذ آب به خاک را در اولین و آخرین دوره استفاده از آب آیشویی، اندازه گرفت. افزون بر این می‌توان مقایسه‌ای بین دو روش آیشویی غرقاب دائم و متناوب را نیز انجام داد.
- در این روش، ابتدا اولین تناوب آب آیشویی به همه کرتها اضافه می‌شود و پس از نفوذ آب به خاک و با گذشت زمانی که آب ثقلی از عمق مورد نظر خارج شود، از اولین کرت، نمونه‌برداری به عمل می‌آید. معمولاً نمونه‌ها در سه تکرار با تناوب $0/2$ یا $0/25$ متری و تا عمق دلخواه از نیمرخ خاک برداشت می‌شود. پس از نمونه‌برداری، اولین کرت از دور آزمایش حذف می‌شود. سپس تناوب بعدی آب آیشویی به کرت‌های باقی مانده اضافه می‌شود.
- پس از نفوذ دومین تناوب آب کاربردی مجدداً از کرت شماره دو به شیوه‌ای که گفته شد نمونه‌برداری می‌شود به همین ترتیب افزودن نوبت بعدی آب آیشویی به دیگر کرتها استمرار می‌یابد. روند افزایش آب و نمونه‌برداری از دیگر کرتها تا نفوذ آخرین نوبت آب کاربردی به دو کرت باقیمانده، همانند آنچه بیان شد، ادامه می‌یابد.
- در این روش آزمایش، لازم است که از یک یا دو نقطه در جوار کرت‌های آزمایشی تا عمق مورد نظر از نیمرخ خاک نمونه‌برداری شود از این نمونه‌ها، برای اطلاع از ویژگی‌های شیمیایی همچنین تعیین میزان رطوبت خاک قبل از آیشویی استفاده می‌شود. بهتر است که در نقطه نمونه‌برداری شده در صورت امکان از خاک لایه‌بندی دقیق‌تری انجام و ثبت شود.
- تجزیه‌های شیمیایی مورد نظر بر روی نمونه‌های خاک قبل و بعد از اجرای آزمون آیشویی شامل هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، pH، کاتیونها و آنیونهای محلول، درصد کربنات کلسیم، میزان گچ، ظرفیت تبادل کاتیونی، سدیم قابل تعویض خاک و در صورت نیاز بُر است. تجزیه‌های شیمیایی مورد نظر روی نمونه‌های خاک در حین آیشویی عبارتند از هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، pH و کاتیونهای محلول (سدیم، کلسیم و منیزیم) است.

بدیهی است که در مورد همه نمونه‌ها می‌توان درصد سدیم تبادلی را از رابطه بین نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبادلی (ESP-SAR) محاسبه کرد و درباره نمونه‌های قبل و بعد از آبخویی افرون بر رابطه فوق می‌توان درصد سدیم تبادلی را مستقیماً از طریق آزمون (تجزیه‌ای) نیز به دست آورد.

در صورتی که نمونه آب مورد استفاده دارای دامنه تغییر در زمان کوتاه آبخویی نباشد، برداشت یک نمونه از آب مصرفی و یک نمونه آب زیرزمینی محل اجرای آزمایش (در صورت وجود)، برای انجام تجزیه کامل کافی است. در غیر این صورت لازم است از آب مصرف شده در هر بار نمونه برداری شود.

پیشنهاد می‌شود برای رعایت صرفه‌جویی در هزینه‌ها، نمونه‌های خاکی که در سه بار (مربوط به هر عمق) و برای هر نوبت استفاده از آب آبخویی برداشت می‌شود، در ابتدا در هوای آزاد، خشک، کوبیده و غربال شوند و پس از اختلاط آنها، برای هر عمق فقط یک نمونه مرکب خاک تهیه و برای تجزیه به آزمایشگاه ارسال شود.

دقت در مورد اجرای آزمایش، نمونه برداری، کنترل نمونه‌های خاک و آب برداشت شده موجب اطمینان در کاربرد و تعمیم نتایج حاصل خواهد شد. در حالتی که افزون بر آب آبخویی، استفاده از مقداری ماده اصلاحی خاک (گچ، اسید سولفوریک و غیره...) و یا مصرف آبهای لب شور و قابل دسترسی، نیز مدنظر باشد از نظر تعداد نمونه برداری و دیگر تمهیدات، مشابه حالت فوق عمل می‌شود.

ب) اجرای آزمایشها با استوانه‌های مضاعف

با توجه به اهداف اجرای آزمونها یعنی استفاده از آب آبخویی، روش آبخویی (غرقاب دائم یا متناوب)، مواد اصلاح کننده مصرفی و یا کاربرد آبهای لب شور و یا ترکیبی از آنها، تعداد استوانه‌های مضاعف و مورد نیاز از سه تا شش عدد، متغیر خواهد بود. بنابراین با توجه به تعداد استوانه‌های مضاعف کاربردی، آرایش آنها می‌تواند مثلثی، مربعی، دایره‌ای و یا مستطیلی باشد. نمونه برداری از خاک قبل از اجرای آزمونها، در روش مثلثی از محل برخورد سه میانه، در روشهای مربعی و مستطیلی از محل برخورد قطرها و در روش دایره‌ای از مرکز دایره و به همان وضعیت و شرایطی است که در مورد کرت‌های کوچک بیان شد. انجام نمونه برداری از خاک و آب و اعمال تجزیه‌های لازم قبل از انجام امر آبخویی، مشابه روش قبلی است. شیوه استقرار استوانه‌های مضاعف، مشابه انجام آزمون نفوذپذیری می‌باشد. به منظور تعیین سرعت نفوذ آب به خاک و اثرهای آبخویی بر روی آن، معمولاً اندازه‌گیری آن در اولین و آخرین نوبت مصرف آب آبخویی انجام می‌شود. در روشهای مستطیلی و دایره‌ای که معمولاً شش جفت استوانه مضاعف به کار می‌رود، مشابه کرت‌های کوچک پس از نفوذ اولین دور آب آبخویی و انجام نمونه برداری از اعماق مورد نظر، یک جفت از استوانه‌ها از دور آزمون حذف می‌شود و مطابق روش قبل افزودن آب آبیاری یا آبخویی تا استفاده از آخرین دور آب مصرفی ادامه می‌یابد. لیکن در حالتی که از سه یا چهار جفت استوانه مضاعف استفاده شود (روشهای مثلثی و یا مربعی) پس از استفاده هر نوبت آب آبخویی و انجام نمونه برداری از سطح خاک داخل استوانه‌ها، محل نمونه برداری شده با یک عدد لوله پی‌وی‌سی هم قطر مته نمونه برداری خاک (معمولاً ۵ سانتی‌متر) اشغال و فضای داخل آن که در واقع محل نمونه برداری از خاک سطح استوانه بوده با خاک پر و کوبیده می‌شود تا از فرار و نشت آب جلوگیری شود. نظر به اینکه بخشی از سطح استوانه داخلی به وسیله لوله اشغال می‌شود، لازم است که حجم معادل آب آن، در محاسبات افزایش آب به سطح استوانه‌های داخلی در نظر گرفته شود.

شیوه نمونه برداری، تناوب و تکرار نمونه برداریها، اعماق نمونه برداری و انواع تجزیه‌های شیمیایی دقیقاً مشابه روش اجرای آزمون در روش کرت‌های کوچک است.

۴- شیوه نتیجه‌گیری از اعداد و رقمهای حاصل از اجرای آزمونهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی

در بخش کلیات این مبحث در ابتدا لازم است جدولی شامل موارد زیر ارائه شود:

- شماره آزمون، سری خاک و شماره مرحله مربوط، کلاس شوری و قلیائیت زمینهای مورد آزمون (قبل از آبشویی نمکها)، محل اجرای آزمایش، عمق سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی خاک، عمق لایه محدوده کننده، سرعت نفوذ پایه زمینها (اولیه و نهایی) و بالاخره منبع و کلاس آب مصرف شده
 - شماره آزمایش، تاریخ نمونه‌برداری از آب مصرفی (روز، ماه و سال) هدایت الکتریکی، pH، کاتیونها و آنیونها محلول (سدیم، کلسیم، منیزیم، کلر، سولفات، کربنات و بی‌کربنات)، نسبت جذب سدیم و یا نسبت جذب سدیم تعدیل شده برای همه آزمونهای انجام شده، ارائه شود و پس از آن برای هر مورد آزمایش انجام شده، جدولی حاوی ویژگیهای فیزیکی لایه‌های مختلف نیمرخ خاک شامل:
 - اعماق نمونه‌برداری، ضخامت لایه‌های خاک، درصد رطوبت وزنی (ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی و رطوبت صحرائی)، جرم مخصوص خاک (ظاهری و حقیقی)، تخلخل کل خاک لایه‌ها (برحسب درصد)، نفوذپذیری (پرمابلتته) و بالاخره عمق آب مورد نیاز برای تأمین کسر رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه ارائه شود. بر مبنای اطلاعات مندرج در جدولهای بالا، ویژگیهای فیزیکی- شیمیایی خاکهای محل اجرای آزمایش مانند کلاس، وضعیت شوری و سدیمی بودن خاک، بافت، هدایت هیدرولیکی، عمق استقرار لایه محدوده کننده، عمق سطح ایستابی (و کیفیت آب زیرزمینی، به شرط در دسترس بودن اطلاعات)، سرعت نفوذ پایه زمینها (اولیه و نهایی) توصیف شود. همچنین ویژگیهای فیزیکی لایه‌های خاک طبقات نمونه‌برداری شده و عمق آب مورد نیاز برای تأمین کسر رطوبت لایه‌های مختلف نیمرخ خاک، به‌منظور استنتاج و موارد کاربردی، تفسیر شود.
- پس از آن به استناد رقمها و اطلاعات موجود از تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب مورد مصرف در هر آزمون (و تکرار مربوط) ارزیابی کیفیت شیمیایی آبهای مصرفی در امر آبشویی نمکها صورت پذیرد.
- همچنین لازم است، در هر آزمایش رقمهای تجزیه کامل شیمیایی خاک قبل از آبشویی نمکها و برای اعماق نمونه‌برداری شده در جدولی ارائه شود. بر مبنای اطلاعات مندرج در این جدول باید نسبت به تفسیر رقمها اقدام شود. در این تفسیر عوامل اصلی (شوری، pH، درصد سدیم تبادلی) و عوامل فرعی (کربنات کلسیم، گچ، کاتیونها و آنیونها محلول عصاره اشباع خاک) برای هر لایه و مجموع لایه‌های نمونه‌برداری شده مورد توجه قرار گیرد.
- پیشنهاد می‌شود، اطلاعات به‌دست آمده از نتایج تجزیه‌های آزمایشگاهی نمونه‌های خاک بعد از نفوذ و در هر نوبت آب آبشویی شامل عوامل اصلی (شوری، pH، کاتیونها محلول و درصد سدیم تبادلی) نیز در جدولی در متن گزارش ارائه شود.
- به همین ترتیب باید اطلاعات به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های خاک پس از استفاده از آخرین تناوب آب آبشویی نیز به‌صورت جدولی در متن گزارش ارائه شود. بهتر است که نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک لایه‌های موردنظر قبل و بعد از امر آبشویی نمکها در یک جدول و با عنوان "تغییرات کیفیت شیمیایی خاک، قبل و بعد از کاربرد عمق آب آبشویی مورد نظر در آزمون مربوط" ارائه گردد.

۱-۴ فرآوری و پردازش داده‌های شیمیایی خاکهای مورد آزمون

الف) ضریب بازده یا بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها

تجربه نشان داده است که بازده آبشویی نمک در خاکهای سبک بیشتر از خاکهای سنگین و رسی است زیرا در خاکهای سنگین بافت و رسی به دلیل ایجاد و توسعه سله‌های (درز و ترک در سطح خاک) عریض و گاهی عمیق، میزان بازده آبشویی نمک به دلیل عبور جریان آب از درون این شکافها کمتر است، هر چند مستقل از بافت خاک، مقدار بازده آبشویی نمک محلول (f) در نیمرخ خاک، بیشتر به روش آبشویی یا آبیاری بستگی دارد. برای مثال در شرایط آبیاری غرقابی، بازده آبشویی به مراتب بیشتر از دیگر روشهای آبیاری (بجز روش آبیاری بارانی) ثقلی است. ضمن آنکه مقدار آن در هر حالت با افزایش عمق در نیمرخ خاک افزایش می‌یابد.

کاربردهای عملی (تجربی) مقادیر بازده آبشویی مربوط به بافت خاک به شرح زیر ارائه شده است.

- برای خاکهای سیلت لوم تا لومی شنی ($f = 0.6 - 0.5$)
- برای خاکهای رسی سیلنتی، لومی شنی و لوم ($f = 0.5 - 0.4$)
- برای خاکهای سنگین بافت، رسی ($f = 0.3 - 0.2$)

همچنین روشهای دیگری برای برآورد تقریبی "ضریب بازده آبشویی" خاکها وجود دارد، که می‌توان در برنامه‌های اجرایی از آنها استفاده کرد. برای مثال با استفاده از رابطه زیر، امکان دستیابی به ضرایب بازده آبشویی با دقت تقریبی فراهم می‌شود.

$$EC_{eq} = \frac{R \cdot EC_w}{f} \quad (1)$$

که در آن، f ضریب بازده آبشویی (تقریبی و بدون بعد)، EC_{eq} هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که با آب کاربردی یا آبشویی به حال تعادل شیمیایی در آمده باشد و EC_w هدایت الکتریکی آب آبشویی است که مقادیر EC_{eq} و EC_w برحسب دسی‌زیمنس بر متر بیان می‌شود و مقدار R از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{D_w}{DI_w} \quad (2)$$

که در آن، D_w عمق ناخالص آب آبشویی یا کاربردی (سانتی‌متر یا متر) و DI_w عمق خالص آب آبشویی (سانتی‌متر یا متر) و یا مقدار آب نفوذ یافته (زهکشی شده) که به صورت تراوشهای عمقی از لایه مورد نظر خارج می‌شود. از طرفی رابطه ۱ را به صورت زیر نیز می‌توان ارائه داد.

$$EC_w = \frac{f \cdot EC_{eq}}{R} \quad (3)$$

همچنین با تلفیق روابط ۱ و ۲ رابطه زیر را می‌توان به‌دست آورد.

$$EC_w = \frac{EC_{eq} \cdot f \cdot D_{lw}}{D_w} \quad (4)$$

در روابط بیان‌شده، عوامل به‌کار رفته، قبلاً تعریف شده‌اند. از سوی دیگر هر گاه مقدار شوری تعادلی (EC_{eq}) مربوط به لایه ۰ تا ۵ سانتی‌متری اولیه نیم‌رخ خاک و پس از نفوذ تمامی میزان آب آبه‌سویی ناخالص (D_w) باشد، در این شرایط می‌توان $D_w = D_{lw}$ در نظر گرفت. که در نتیجه $R=1$ و رابطه ۱ به صورت ساده زیر در می‌آید:

$$EC_{eq} = \frac{EC_w}{f} \quad (5)$$

اعمال این ساده‌سازی یعنی $D_w = D_{lw}$ و به‌کارگیری آن در رابطه‌های ۳ و ۴ نیز باعث ایجاد رابطه‌ای مشابه رابطه ۵ خواهد شد.

هرگاه کیفیت آب کاربردی (شوری EC_w) برحسب دسی‌زمینس بر متر) نامشخص و یا غیرمنطقی باشد، با انتخاب مقدار ضریب بازده آبه‌سویی (f) متناسب با بافت خاک و اندازه‌گیری شوری تعادلی (EC_{eq}) برحسب دسی‌زمینس بر متر، می‌توان از روابط ۳ و ۴ استفاده کرده و می‌توان میزان شوری آب کاربردی در آبه‌سویی نمک (EC_w) را نیز با تقریب قابل قبولی برآورد کرد.

ب) رابطه بین عمق آب آبه‌سویی به‌کاررفته و تغییرات میزان شوری و درصد سدیم تبادلی خاکهای مورد آزمایش

به منظور بررسی چگونگی تغییرات مقادیر شوری و درصد سدیم تبادلی خاک در دوره آبه‌سویی، برابر رقمهای جدولهای ذکر شده (مربوط به هر تکرار آزمایش) و برای رقمهای هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و درصد سدیم تبادلی محاسبه‌شده (از رابطه تجربی ESP-SAR و یا روش تجزیه‌ای $CEC-Ex.Na^+$) می‌توان میانگین وزنی برای لایه‌های مورد نظر (برای مثال ۰ تا ۲۵، ۰ تا ۵۰، ۰ تا ۷۵، ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری) را محاسبه کرد و به استناد آن همچنین می‌توان با رقمهای حاصل از تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های خاک اعماق نمونه‌برداری شده (قبل از آبه‌سویی یعنی EC_i و ESP_i) جدولهای ذکر شده در زیر را تهیه کرد:

- رابطه بین عمق آب آبه‌سویی (کاربردی یا D_w ناخالص) و تغییرات میزان شوری خاک

- رابطه بین عمق آب آبه‌سویی (کاربردی یا D_w ناخالص) و تغییرات میزان درصد سدیم تبادلی خاک

شایان ذکر است که براساس اعداد و رقمهای حاصل از میانگین وزنی (محاسبه‌شده) که در دو جدول ذکر شده ارائه می‌شود، ستون خاک تا عمق مورد محاسبه (برای مثال تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری) به‌عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود که به یکباره می‌توان با استفاده از جدولهای ذکر شده تغییرات هر عامل (شوری یا درصد سدیم تبادلی) خاک را برای لایه مورد نظر (از سطح خاک تا عمق مطلوب و مورد نظر) و لایه‌های پایین‌تر با انتخاب عمق آب آبه‌سویی معینی برآورد کرد، که زمینه‌های کاربردی و عملی چنین جدولهایی (در شرایط خاکهای آزمایش شده) بیشتر است.

پ) منحنیهای شوری زدایی و سدیم زدایی خاکهای مورد آزمون

برای تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمونهای آبشویی نمکهای محلول باید منحنیهای شوری و سدیم زدایی خاک محللهای مورد آزمایش و به تفکیک هر آزمون تهیه و ارائه شود.

همان گونه که بیان شد، در جدولهای ذکر شده (موضوع بیان شده در مبحث ب) تغییرات میزان شوری و یا درصد سدیم تبدلی خاک لایه‌های مختلف را به ازاء مقادیر متفاوت آب به کاررفته (آب آبشویی ناخالص و یا D_w) ارائه می‌دهند. در عمل ممکن است مقداری از آب مصرف شده صرف رفع یا جبران کمبود رطوبت خاک اعماق مربوط شود و در فرایند آبشویی مؤثر نباشد. همچنین کاهش میزان شوری و یا درصد سدیم تبدلی خاک، از راه مصرف آب آبشویی به میزان زیاد، حتی در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک منجر به تعادل شیمیایی کامل با کیفیت آب آبیاری و یا آبشویی در کوتاه مدت نخواهد شد. بدین معنی که حداقل میزان شوری و یا درصد سدیم تبدلی خاک که با آب به کاررفته (با کیفیت مشخص) به تعادل شیمیایی می‌رسد، بجز در خاکهای سبک با شرایط زهکشی بسیار مناسب، از حداقل $1/5$ تا 2 برابر شوری و نسبت جذب سدیم آب آبیاری بیشتر است. اثر عامل یاد شده در جدولهای بیان شده، در نظر گرفته نمی‌شود.

به منظور رفع نقایص بیان شده منحنیهای شوری زدایی و سدیم زدایی خاکها، بر پایه رقمهای هدایت الکتریکی عصاره اشباع و درصد سدیم تبدلی خاک برای اعماق مربوط، با استفاده از رقمهای مندرج در جدولهای ارائه شده (رقمهای نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک قبل، حین و پس از آبشویی) همین طور رقمهای تجزیه فیزیکی لایه‌های خاک مربوط، برای هر آزمایش به شرح زیر تهیه می‌شود.

در یک دستگاه مختصات، بر روی محور Y رقمهای مربوط به نسبتهای $EC_f - EC_{eq} / EC_i - EC_{eq}$ و یا $ECP_f - ESP_{eq} / ESP_i - ESP_{eq}$ نشان داده می‌شود و بر روی محور X رقمهای مربوط به نسبتهای مختلف آب آبشویی به عمق خاک D_w / D_s آورده می‌شود که در آن :

$EC_f =$ هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک بعد از استفاده از عمق آب آبشویی مربوط (خالص یا D_w) برحسب دسی‌زیمنس بر متر،

$EC_i =$ هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از استفاده از عمق آب آبشویی مربوط (خالص یا D_w) برحسب دسی‌زیمنس بر متر،

$EC_{eq} =$ هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که با آب آبیاری و یا آبشویی به تعادل شیمیایی می‌رسد، برحسب دسی‌زیمنس بر متر،

$ESP_f =$ درصد سدیم تبدلی نهایی خاک پس از به کارگیری عمق آب آبشویی مربوط (خالص یا D_w)،

$ESP_i =$ درصد سدیم تبدلی اولیه خاک قبل از استفاده از عمق آب آبشویی مربوط (خالص یا D_w)، و

$ESP_{eq} =$ درصد سدیم تبدلی خاک که با آب آبیاری یا آبشویی به تعادل شیمیایی می‌رسد.

رقمهای EC_{eq} ، ESP_{eq} (شوری و درصد سدیم تبدلی) در واقع کمترین مقادیر شوری و درصد سدیم تبدلی خاکها می‌باشند که در لایه سطحی (۰ تا ۵ سانتی متری) نیمرخ خاک با استفاده از آب آبیاری یا آبشویی با کیفیت مشخص و موجود، حاصل می‌شوند.

$Dl_w =$ عمق خالص آب آبشویی، میزان آبی است که پس از تأمین کسر رطوبت خاک لایه مربوط به طریق ثقلی و به صورت تراوشهای عمقی از ستون خاک لایه مربوط خارج می‌شود، (متر یا سانتی‌متر).

$D_s =$ عمق یا ضخامت لایه خاک نسبت به سطح زمین، (متر یا سانتی‌متر).

کاهش مقادیر EC_{eq} و ESP_{eq} از صورت و مخرج کسرهای ذکر شده، موجب می‌شود که نتایج حاصل مستقل از عوامل خارجی مؤثر از جمله میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاکها، کیفیت آب آبیاری مورد استفاده و دیگر شرایطی که می‌تواند بر روی نتایج اثرگذار باشد، عمل کند. نظر به اینکه در رسم منحنیهای شوری زدایی و سدیم زدایی خاکها رقمهای محاسبه شده (میانگین وزنی)، مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین رسم منحنیهای مربوط به هر عمق به دلیل عدم تفاوت زیاد در چنین شرایطی معمولاً مرسوم نیست.

در مورد هر آزمون (و هر تکرار)، لازم است برای رسم منحنیهای شوری و سدیم زدایی خاکهای مورد آزمایش و برای اعماق مربوط جدولهای مربوط به رقمهای محاسبه شده X و Y (که شرح آنها در بالا بیان شد) تهیه و ارائه شود. براساس رقمهای مندرج در این جدولها، منحنیهای شوری زدایی و سدیم زدایی خاکهای محل مورد آزمایش، باید تهیه و در دو شکل جداگانه ارائه شود.

منحنیهای بیان شده، می‌توانند در محدوده نوع خاک، میزان شوری و درصد سدیم تبدالی اولیه نیمرخ خاک محل اجرای آزمون کاربرد داشته باشد، همچنین با استفاده از این منحنیها می‌توان عمق آب مورد نیاز را برای کاهش عملی میزان شوری و یا درصد سدیم تبدالی خاک و برای عمق معینی از لایه خاک برآورد کرد.

مقادیر استخراجی از منحنیهای بالا، مربوط به نیاز خالص آب آبشویی نمک است و به منظور برآورد کل میزان آب مصرفی لازم برای آبشویی نمکهای محلول خاک ضروری است که به مقادیر تبخیر (از سطح آب و خاک) و میزان بارندگی نیز توجه کرد و این عوامل فراگیر را در محاسبات برنامه ریزی آبشویی و اصلاح خاک و زمین در نظر گرفت.

نکته : کاربرد اعداد و رقمهای ذکر شده و کاربرد و تطبیق مدلهای تجربی و نظری آبشویی نمکهای خاکهای شور در پیوستهای آتی شرح داده شده است.

۲-۴ بررسی تغییرات نفوذپذیری خاکها در فرایند آبشویی نمکهای محلول

همان گونه که گفته شد، در آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی مرسوم است که در اولین دوره استفاده از آب آبشویی و در آخرین تناوب مصرف آب به کاررفته (آبشویی)، اقدام به اندازه گیری سرعت نفوذ آب به خاک و محاسبه سرعت نفوذ پایه زمینها^۱ می‌شود تا ضمن مقایسه نتایج، بتوان تأثیر آب آبشویی نمکهای محلول را بر چگونگی تغییرات میزان نفوذپذیری خاکها در اثر فرایند آبشویی (آب آبشویی به تنهایی و یا کاربرد آن به همراه مواد اصلاح کننده خاک و...) مورد بررسی و قضاوت قرار داد. روش اندازه گیری نفوذپذیری خاکها در این شرایط، مشابه اندازه گیری در شرایط متعارف و معمول مزرعه‌ای است، که شرح توصیفی و تفصیلی آن در استانداردهای مصوب ارائه شده است.

به منظور برازش بهترین مدل (رابطه) به داده‌های تجربی و با توجه به اهداف مورد نظر، می‌توان از روابط مختلفی استفاده کرد که در مورد آزمایش‌های تعیین درجه اصلاح پذیری خاکها (شوری‌زدایی، سدیم‌زدایی و تهیه منحنی‌های آبشویی نمک‌های محلول) استفاده از دو مدل (رابطه) زیر به دلیل سهولت‌های محاسباتی و کاربردی پیشنهاد می‌شود.

الف - رابطه کوستیاکف

رابطه کوستیاکف^۱ (۱۹۳۲) یک مدل کاملاً تجربی است. اصولاً مدل‌های تقریبی برآورد نفوذپذیری، بر پایه اصول حرکت آب خاک برای شرایط اولیه و مرزی ساده‌شده‌ای اشتقاق یافته‌اند. پارامترهای لازم این مدلها را باید با توجه به ویژگی‌های آب خاک تعیین کرد و برای آن دسته از مدل‌هایی که کاملاً تجربی هستند، لازم است پارامترهای مورد نیاز را از طریق رقم‌های آزمون‌های نفوذپذیری و یا دیگر روش‌های برآوردی، بسیار تقریبی مشخص کرد. به‌هرحال کوستیاکف رابطه تجربی زیر را برای تعیین یا برآورد نفوذ آب به خاک پیشنهاد کرده است.

$$D = ct^n \quad (6)$$

که در آن، D میزان نفوذ تجمعی (آب نفوذیافته) از شروع آزمایش (سانتی‌متر)؛ t ، زمان تجمعی از ابتدای آزمون (دقیقه)، و n و c ، ضریب‌های تجربی رابطه است.

این ضرایب برای خاک‌های مختلف متفاوت است، در ابتدا تصور می‌شد که اهمیت فیزیکی ندارند، یعنی مقادیر آنها بیانگر ویژگی‌های خاصی از خاک محل مورد آزمون نیست، لیکن بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که مقادیر این ضرایب، به نوع خاک، زمان، میزان رطوبت اولیه خاک، هدایت موینگی^۲ و هدایت هیدرولیکی^۳ آن بستگی دارند. مقدار ضرایب ذکر شده (c ، n) از برازش بهترین نمودار به داده‌های اندازه‌گیری شده (جفت‌های متناظر نفوذ و زمان تجمعی یعنی D و t) به دست می‌آید. شایان ذکر است که مقدار c همواره بزرگ‌تر از صفر و مقدار n بین صفر تا یک، دامنه تغییر دارند. بدیهی است که مشتق‌گیری از رابطه ۶ منجر به رابطه سرعت نفوذ لحظه‌ای به شرح زیر خواهد شد:

$$I_{ins} = n \cdot ct^{n-1} \quad (7)$$

هرگاه تساوی ($m = n - 1$) را که مقدار آن منفی و همواره از یک کوچک‌تر است در رابطه بالا جایگزین شود نتیجه به صورت زیر، ارائه خواهد شد:

$$I_{ins} = n \cdot ct^m \quad (8)$$

1 - Kostiakov, A.N (1932). In, A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, Soil Science Soc. Am. Proc, 41: 285-293

2 - Capillary Conductivity

3 - Hydraulic Conductivity

در این رابطه‌ها، I_{ins} ، سرعت نفوذ لحظه‌ای (سانتی‌متر بر دقیقه) می‌باشد. همان‌گونه که در حین اجرای آزمایش مشاهده می‌شود، در شروع فرایند نفوذ (افزودن آب به خاک) میزان نفوذ آب به خاک در شرایط غیر مرطوب، زیاد است و به تدریج با گذشت زمان، کاهش نسبی می‌یابد تا آنکه به مقدار ثابتی برسد که به اصطلاح آن را سرعت نفوذ پایه زمین (خاک) می‌نامند. بنابراین زمان لازم برای رسیدن به سرعت نفوذ پایه زمین نیز باید معلوم باشد، این عامل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$T_B = 600(1 - n) \quad (9)$$

که در آن، T_B برحسب دقیقه است. با جایگزینی T_B از رابطه ۹ در رابطه ۸، سرعت نفوذ پایه زمین (خاک) به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} I_B &= n.c T_B^m \\ I_B &= n.c [600(1 - n)]^m \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن، I_B برحسب سانتی‌متر بر دقیقه است.

در حالی که تساوی $K = 60n.c$ در رابطه بالا جایگزین شود، رابطه به شکل ساده زیر در می‌آید:

$$I_B = K (T_B)^m \quad (11)$$

که در آن، I_B برحسب سانتی‌متر بر ساعت است.

بررسی رابطه پایه‌ای γ نشان می‌دهد که هرگاه t به سمت بی‌نهایت میل کند، مقدار سرعت نفوذ، به جای رسیدن به مقدار ثابت به سمت صفر میل خواهد کرد که این امر واقعیت نداشته^۱ و مغایر تعریف قراردادی سرعت نفوذ پایه زمین (خاک) است. زیرا در یک خاک همگن، سرعت نفوذ نهایی (پایه زمین) حدوداً برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. افزون‌براین، پارامترهای به کار رفته در روابط یعنی n ، c را باید با رقمهای مشاهده‌ای و آزمایشی ارزیابی کرد و امکان تعبیر فیزیکی آنها وجود ندارد.

۱- فقط در خاکهای رسی و بسیار سنگین که هدایت هیدرولیکی اشباع آنها بسیار ناچیز می‌باشد، ممکن است سرعت نفوذ به حدود صفر برسد.

با توجه به موارد بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که کاربرد رابطه ۷ و روابط حاصل از آن، تا زمانی اعتبار کاربردی دارند که میزان سرعت نفوذ به هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برسد و از آن پس این روابط قادر به توصیف سرعت نفوذ در خاک نیستند بنابراین، دامنه کاربرد مدل کوستیاکف به صورت زیر قابل بیان است.

$$t \leq t_{\max} \quad t_{\max} = \left[\frac{K_s}{n.c} \right]^{1/(n-1)} \quad (12)$$

در رابطه بالا، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مزرعه مورد آزمایش است. بررسی نتایج آزمایشهای متعددی نشان داده است که برای برآورد سرعت نفوذ آب به خاک در کوتاه مدت (حدود چندساعت)، به کارگیری رابطه کوستیاکف مناسب است. در صورتی که در درازمدت مقادیر محاسبه شده از این رابطه از مقادیر اندازه گیری شده کمتر خواهد بود. بنابراین، استفاده از این مدل به منظور طراحی سامانه های آبیاری و به ویژه آبیاری سطحی پیشنهاد شده است.

ب) رابطه فیلیپ

رابطه ارائه شده به وسیله فیلیپ^۱ (۱۹۵۷)، یک مدل غیر تجربی است. به طور کلی مدلهایی که بر مبنای ویژگیهای فیزیکی خاک به دست آمده اند، در مقایسه با روابط تجربی بسیار پیچیده تر می باشند. این گونه مدلها بر مبنای اصل بقای جرم و حرکت آب در خاک و با اعمال بعضی فرضهای ساده به دست آمده اند. فیلیپ نخستین راهکار مجرد ریاضی برای حل رابطه جریان و جهت حالت نفوذ قائم را ارائه داد. وی رابطه ریچاردز^۲ (۱۹۳۱) را با استفاده از سری توابع نمایی برای نفوذ پذیری سطحی مستغرق که نیمرخ خاک آن همگن، عمیق و دارای توزیع رطوبت اولیه یکنواختی باشد، حل و پیشنهاد کرد که فقط دو عبارت اولیه بسط سری، مورد استفاده قرار گیرد. رابطه حاصل به شرح زیر است:

$$I = St^{0/5} + At \quad (13)$$

که در آن S و A پارامترهای مرتبط با میزان رطوبت اولیه و هدایت هیدرولیکی خاک می باشند. به عبارت دیگر، ضریب A مقداری ثابت و تابع هدایت هیدرولیکی خاک است و S به نام ضریب جذبی^۳ شناخته می شود. مقادیر این دو ضریب از برازش بهترین نمودار به داده های اندازه گیری شده (جفت های متناظر نفوذ و زمان تجمعی یعنی I و t) به دست می آیند. مشتق گیری از رابطه ۱۳ منجر به رابطه سرعت نفوذ می شود.

$$i = 0/5 St^{-0/5} + A \quad (14)$$

1 - Philip, J.R. (1957) a, b. the theory of infiltration, soil science, 83: 257-264 and 345-388

2 - Richards, L.A (1931). In, introduction to soil physics, hillel, D.1982. Academic press, New York. chapter 12:211-243

3 - Sorptivity Coefficient

با دقت در رابطه اخیر، ملاحظه می‌شود که پس از گذشت زمان طولانی، سرعت نفوذ آب به خاک، به مقدار A می‌رسد که مرتبط با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است.

یانگ^۱ (۱۹۶۸) پیشنهاد کرد که مقدار A را می‌توان به صورت $2K_s S/3$ و S را به شکل $(2MK_s S_e)^{0/5}$ تقریب نموده که در آن M مقدار تخلخل پرشونده K_s ^۲ هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و S_e مکش مؤثر در جبهه رطوبتی خاک^۳ است. برای محاسبه پارامترهای S و A در رابطه ۱۳ و بر مبنای رقمهای اندازه‌گیری شده آزمایشی (مزرعه‌ای) یعنی I (نفوذ جمعی) و t (زمان جمعی) می‌توان به شرح زیر عمل کرد. ابتدا طرفین رابطه ۱۳ را به t تقسیم کرده تا رابطه‌ای به شکل زیر به دست آید:

$$\frac{I}{t} = S \cdot \frac{1}{t^{0/5}} + A \quad (15)$$

هرگاه متغیرهای وابسته و مستقل موجود در رابطه اخیر به صورت زیر تغییر داده شوند.

$$Y = \frac{I}{t} \quad X = \frac{1}{t^{0/5}} = t^{-0/5} \quad (16)$$

رابطه ۱۵ را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد.

$$Y = S \cdot X + A \quad (17)$$

این رابطه در واقع نوعی رابطه خطی است که معمولاً به شکل زیر نشان داده می‌شود.

$$Y = b + a \cdot X \quad (18)$$

در رابطه اخیر $A = b$ و $S = a$ است. بنابراین با اعمال رگرسیون خطی بر روی رقمهای حاصل X و Y ، مقادیر ثابت رابطه یعنی a ، b و ضریب همبستگی رقمهای به کاررفته یعنی r به سهولت قابل محاسبه است. پس از مشخص شدن ضرایب رابطه، باید متغیرها را تغییر داد. بنابراین، در ابتدا لازم است طرفین رابطه ۱۵ را در t ضرب کرد که نتیجه به شکل زیر خواهد شد:

$$I = S \cdot t^{0/5} + At$$

1 - Young, E.G (1968) In, A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration. Soil Science. Soc. Am. Proc, 41 :285-293

2 - Fillable Porosity

3 - Soil Wetting Front

که این رابطه در واقع همان رابطه اصلی ۱۵ است که مقادیر عددی ضرایب S و A آن مشخص شده و برای تعیین رابطه سرعت نفوذ می‌توان آن را به صورت رابطه ۱۴ درآورد، با این تفاوت که اکنون مقادیر عددی ضرایب مربوط معین هستند. از جمله معایب رابطه فیلیپ، اعمال فرضهای یکنواختی (همگنی) و رطوبت اولیه در نیمرخ خاک است، زیرا این شرایط ممکن است در حالت مزرعه‌ای صدق نکند که بدین دلیل، امکان دارد نتایج حاصل از رابطه با داده‌های تجربی و مزرعه‌ای تطابق نداشته باشند. بنابراین تجربه نشان داده است که رابطه فیلیپ برای دوره‌های درازمدت (بیشتر از چند ساعت) نتایج مطلوب‌تری را به دست می‌دهد.

به دلیل اینکه آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها با روشهای غرقاب دائم و یا متناوب و حتی با روش بارانی، اقدامهایی نسبتاً درازمدت است، بنابراین باید تناسب تطابق‌پذیری رابطه فیلیپ در این زمینه در نظر گرفته شود.

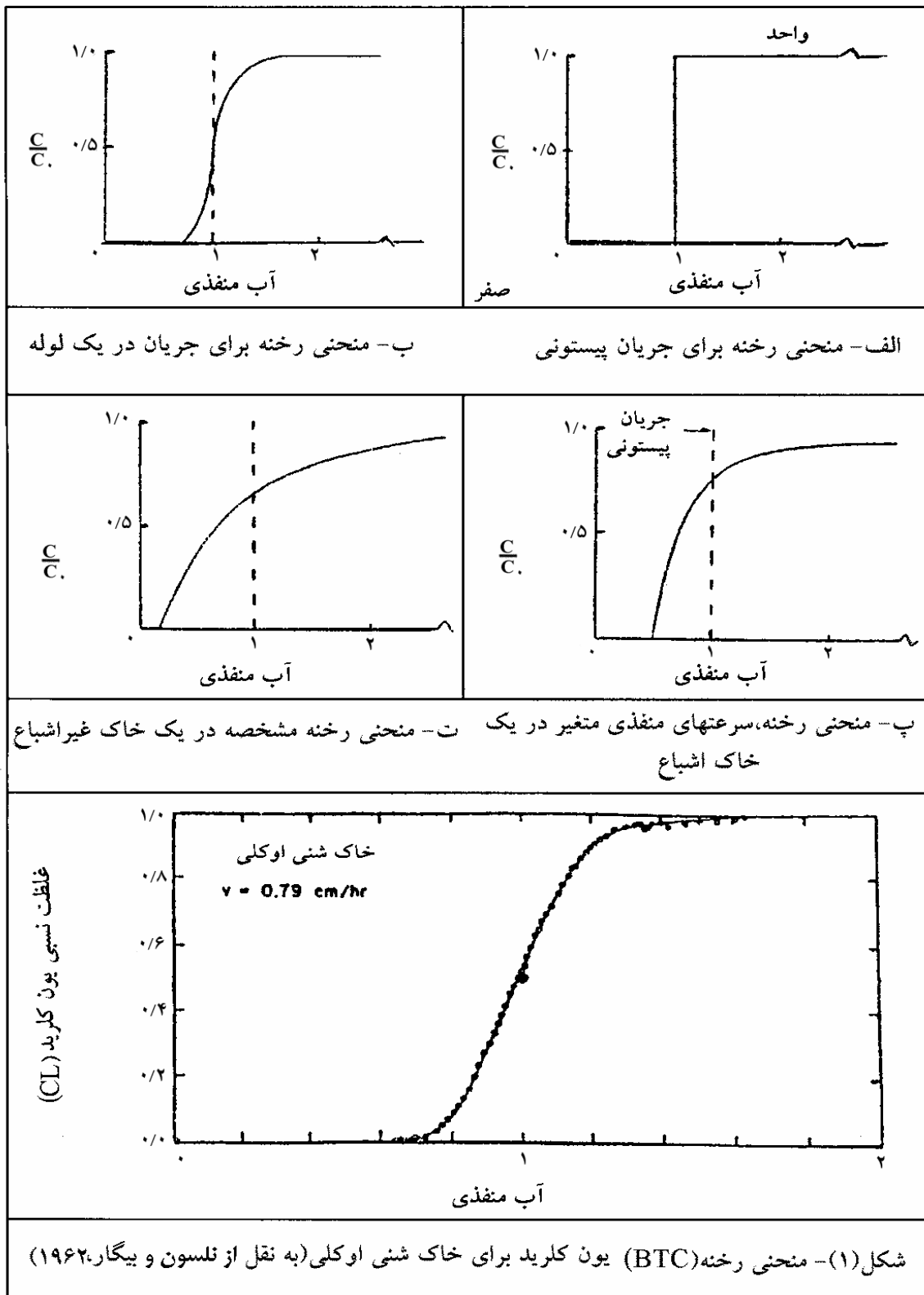
تذکر : روابط ۱۵ تا ۱۹ فقط در مورد خاکهای سبک و متوسط می‌تواند کاربرد داشته باشد، استفاده از این رابطه‌ها در مورد خاکهای سنگین بافت، به دلیل بروز ضرایب منفی در رابطه‌های مربوط به آنها، پیشنهاد نمی‌شود.

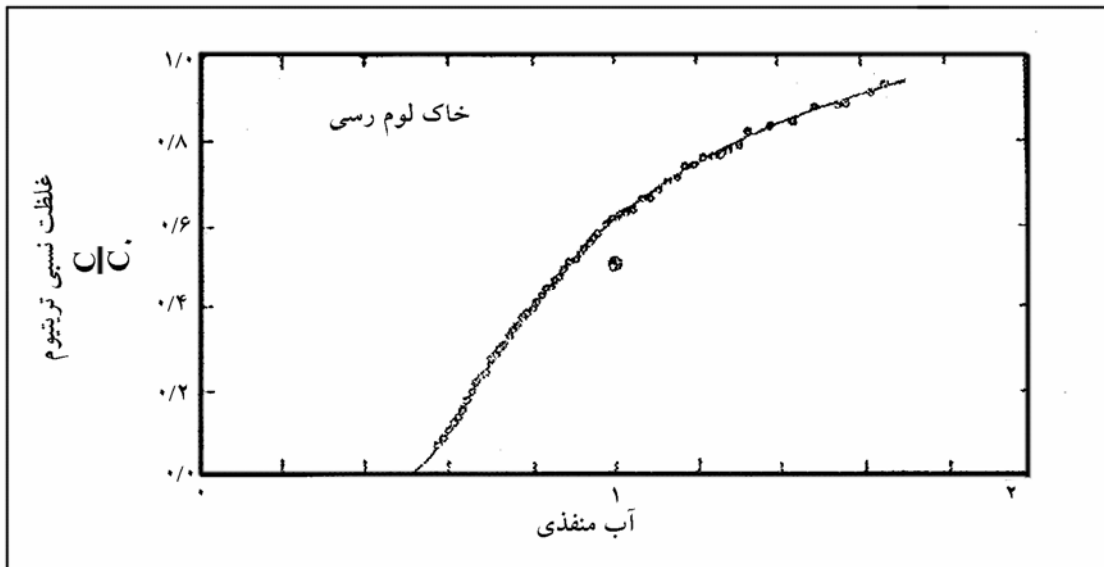
توجه : در بررسی چگونگی تغییرات نفوذپذیری خاکها از روشها و روابط متعدد دیگری نیز استفاده می‌شود که به دلیل رعایت مختصرنویسی از بیان آن خودداری می‌شود.

پیوست ۲

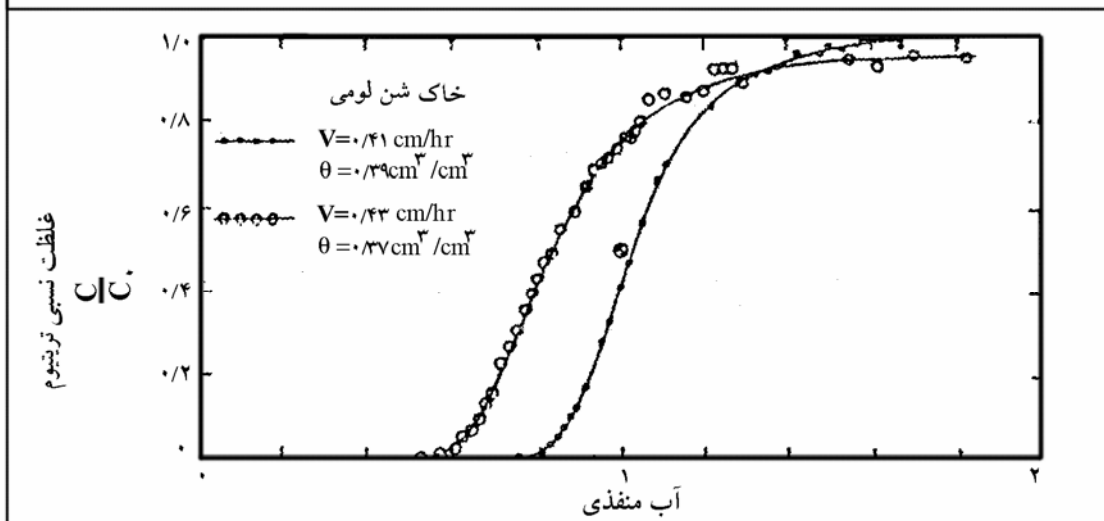
بعضی منحنیهای رخنه (BTC) نظری و تجربی

[۵۹، ۶۰، ۶۱، ۶۵]

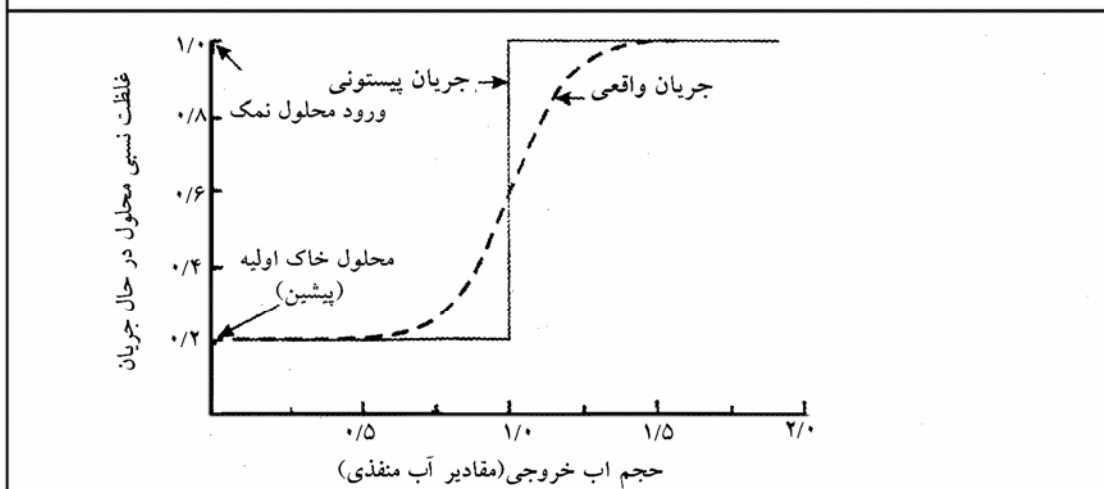




شکل (۲) - منحنی رخنه (BTC) یون تریتیوم برای خاک لومی رسی ایکلن (به نقل از نلسون و بیگلر، ۱۹۶۲)



شکل (۳) - منحنی رخنه (BTC) تریتیوم برای خاک شنی لومی بولو بادو مقدار میزان رطوبت (آب) (به نقل از نلسون و بیگار، ۱۹۶۲)



شکل (۴) - شمای تشریحی منحنی رخنه (BTC) زیگمونییدی (S، شکل)، در نوعی خاک شنی اشباع، طی فرایند جایگزینی محلول رقیق شده قبلی (موجود) به وسیله افزایش محلولی با میزان شوری پنج بار بیشتر (به نقل از هیلل، ۱۹۸۸)

پیوست ۳

مثال عملی از کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمک در خاکهای شور

شرح توصیفی و کامل روش اجرای آزمایشها، پردازش داده‌ها و شیوه نتیجه‌گیری از رقمها و اعداد حاصل از اجرای آزمونهای آبشویی خاکهای شور در پیوست ۱ ارائه شده است. در این پیوست نسبت به ارائه یک مثال عملی در مورد کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمکها در خاکهای شور اقدام شده است.

مثال ۱

قطعه زمینی با کیفیت شیمیایی شور و سدیمی در بخشی از زمینهای جنوب شرقی استان خوزستان انتخاب شد، از چهار نقطه و در سه مرحله، نمونه‌های خاک تهیه و برای انجام آزمایشهای لازم به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک قطعه انتخابی، در جدولهای ۱ و ۲ ارائه شده است. براساس رده‌بندی جامع وزارت کشاورزی کشور ایالات متحده (USDA)، خاک منطقه مورد مطالعه لومی‌رسی تا رسی سیلتی و از نظر رده‌بندی تیپیک هاپلوسالید^۲ بوده است.

آب به‌کاررفته در این تحقیق، از رودخانه زهره تأمین شد، نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است و کیفیت آن برای مصارف کشاورزی بینابینی قابل رده‌بندی است. عمق آب به‌کاررفته (آبشویی) در این بررسی، ۱۰۰ سانتی‌متر بوده که در چهار تناوب ۰/۲۵ متری به‌کار رفته است.

برای انجام این آزمون، کرت‌های مدل^۳ با چهار عدد ورق آهنی پیش‌ساخته، ایجاد شد که پس از نصب و کوبیده‌شدن در خاک، قطعه (کرت) آزمایشی یک مترمربعی را به‌وجود آورد. در مجموع شش کرت مدل بدین ترتیب ایجاد شد، شایان ذکر است که عمق کوبیده شدن اضلاع جانبی هر کرت مدل در نیمرخ خاک ۲۰ سانتی‌متر بوده است. اطراف هر کرت مدل با پشته‌های خاکی و مستحکم طوری محصور می‌شود که کرتی به ابعاد ۲×۲ مترمربعی، کرت مدل را احاطه کند. از این کرت به‌عنوان حوضچه محافظ^۴، در دوره اجرای آزمایش استفاده می‌شود، همان‌گونه که گفته شد روش آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک در این مطالعه، غرقاب متناوب بوده است. طی دوره نفوذ هر تناوب آب (آبشویی) به سطح خاک کرت‌های مدل، همچنین در فاصله زمانی بین دو تناوب آب به‌کاررفته (۳ تا ۴ روز به‌عنوان زمان توزیع مجدد رطوبت)، سطح کرت‌های مدل به‌دلیل جلوگیری از تبخیر با ورقه‌های نایلونی، پوشیده می‌شد.

۱- پذیرا، ابراهیم و عباس کشاورز (۱۳۷۸): بررسی و تعیین آب مورد نیاز اصلاحی خاکهای شور و سدیمی اراضی جنوب شرقی استان خوزستان، مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، جلد ۴ شماره ۱۶، ص ۱-۱۳.

2 - Typic Haplosalid

3 - Model plots

4 - Buffer pond

جدول ۱- ویژگیهای شیمیایی نمونه‌های خاک قبل از آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

درصد سدیم تبادلی *	ظرفیت کاتیونهای تبادلی، میلی‌اکی والان بر یکصد گرم خاک خشک	سدیم تبادلی میلی‌اکی‌والان بر یکصد گرم خاک خشک	گچ (سولفات کلسیم آبدار) %	کربنات کلسیم %	pH خاک	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	اعماق نمونه‌برداری خاک، سانتی‌متر
۲۵/۱۸	۱۹/۹۰	۵/۰۱	۰/۵۴	۳۲/۰۰	۷/۱۰	۴۶/۵۰	۲۵-۰
۴۵/۶۲	۱۳/۷۰	۶/۲۵	۰/۵۹	۳۲/۰۰	۶/۹۵	۳۶/۶۰	۵۰-۲۵
۴۴/۴۹	۱۱/۷۱	۵/۲۱	۰/۶۴	۳۳/۰۰	۷/۱۰	۳۸/۲۰	۷۵-۵۰
۳۶/۵۸	۱۶/۴۳	۶/۰۱	۰/۴۲	۳۴/۰۰	۷/۲۰	۳۶/۸۰	۱۰۰-۷۵

* ESP= Ex.Na+.100/CEC

جدول ۲- ویژگیهای فیزیکی نمونه‌های خاک مورد آزمون آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

میزان رطوبت خاک (درصد وزنی) *			نفوذپذیری		تخلخل کل نمونه خاک %	جرم مخصوص ظاهری خاک گرم بر سانتی‌مترمکعب	جرم مخصوص حقیقی خاک گرم بر سانتی‌مترمکعب	اعماق نمونه‌برداری خاک سانتی‌متر
پس از توزیع مجدد	حین آبخویی	قبل از آبخویی	توصیف	میلی‌متر بر ساعت				
۲۰/۹۳	۳۳/۰۰	۵/۸۰	متوسط	۱۰/۵	۴۲/۱۰	۱/۴۰	۲/۴۲	۲۵-۰
۱۸/۶۵	۳۲/۰۰	۷/۱۰	متوسط	۱۶/۶	۳۷/۷۰	۱/۵۲	۲/۴۴	۵۰-۲۵
۱۷/۰۰	۳۰/۰۰	۷/۵۰	متوسط	۱۰/۵	۴۰/۳۲	۱/۴۸	۲/۴۸	۷۵-۵۰
۱۷/۰۰	۳۰/۰۰	۱۲/۲۰	متوسط	۱۰/۵	۴۰/۳۲	۱/۴۸	۲/۴۸	۱۰۰-۷۵

* میزان کسر رطوبت تجمعی لایه‌های خاک قبل از کاربرد اولین دور آب آبخویی به ترتیب ۵/۲۹، ۹/۶۸، ۱۳/۱۴ و ۱۴/۹۷ سانتی‌متر بوده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی آب به‌کاررفته در آزمون آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

رده‌بندی *	نسبت جذب سدیم براساس دی‌گرام ویلکاکس	کلسیم+منیزیم، میلی‌اکی‌والان بر لیتر (Ca ²⁺ + Mg ²⁺)	سدیم، میلی‌اکی‌والان بر لیتر (Na ⁺)	واکنش خاک (pH)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
C ₃ S ₁	۲/۵۴	۶/۸۴	۴/۷۰	۷/۴۰	۱/۳۲

* براساس جدول راهنمای آزمایشگاه شوری خاک ایالات متحده امریکا، کتابچه شماره ۶۰ (۱۹۵۴)

SAR = برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر به توان $\frac{1}{2}$ است.

پس از نفوذ هر تناوب ۲۵ سانتی‌متری آب به سطح کرت‌های مدل و پس از گذشت مدت زمان لازم برای توزیع مجدد رطوبت در نیمرخ خاک که انجام نمونه‌برداری از خاک سطح کرت‌های مدل را تسریع و ممکن ساخته است، از اعماق مشابه (همانند اعماق ارائه‌شده در جدول‌های ۱ و ۲) در سه مرحله به‌طور تصادفی از سطح شش کرت مدل، نمونه‌برداری می‌شد. پس از برداشت نمونه‌های خاک، حفره ایجادشده در سطح کرت‌های مدل و تا عمق مربوط در نیمرخ خاک با لوله پی‌وی‌سی هم‌قطر مته نمونه‌برداری از خاک اشغال و بخش میانی لوله‌های تعبیه‌شده با خاک خشک و همجوار پر و به‌وسیله پیستونی کوبیده می‌شد تا از نشست و فرار آب از درون لوله‌ها جلوگیری شود. در هر دوره به‌کارگیری آب آشویی به کرت‌های محافظ نیز مقادیر لازم آب اضافه و سعی در هم سطح نگه‌داشتن عمق آب در کرت‌های مدل (میانی) و کرت‌های محافظ (بیرونی) به‌عمل می‌آمد. انجام این امر به منظور ایجاد اطمینان از نفوذ عمودی آب در کرت‌های مدل بوده است.

در مراحل افزایش اولین و آخرین میزان تناوب آب به‌کاررفته (۲۵ سانتی‌متر اول و ۲۵ سانتی‌متر نهایی)، افت سطح ایستابی از محل کرت‌های مدل (میانی) اندازه‌گیری و محاسبات لازم، برای سرعت نفوذ پایه (اولیه و نهایی) انجام شد تا بدین ترتیب بتوان در مورد اثر آشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاکها و در ارتباط با تغییرات سرعت نفوذ پایه زمینها را بررسی و قضاوت کرد.

در همه نمونه‌های خاک تهیه‌شده در آزمایشگاه عواملی مانند هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، مقدار pH، سدیم تبادلی (Ex. Na^+)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) اندازه‌گیری شده و بر مبنای رقم‌های سدیم تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی نمونه‌های خاک، درصد سدیم تبادلی محاسبه شده است.

تذکر: در این مثال موارد مرتبط با شوری زدایی خاک^۱ مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرد، موارد سدیم‌زدایی خاک^۲ از نظر روش تجزیه، تحلیل و نتیجه‌گیری دقیقاً مشابه شوری‌زدایی می‌باشد که به‌دلیل مختصرنویسی به این مورد اکتفا شده است.

جدول ۴ مقادیر شوری اولیه (EC_i) و نهایی (EC_f) عصاره اشباع خاک را قبل از استفاده از آب آشویی و پس از استفاده از مقادیر متفاوت آب (تناوب‌های آب آشویی) را در اعماق مختلف نمونه‌برداری‌شده، نشان می‌دهد.

حل مثال :

ابتدا ضروری است رقم‌های شوری خاک (هدایت الکتریکی عصاره اشباع) مربوط به قبل، حین و پس از آشویی که تهیه و در جدول ۴ ارائه‌شده، برای افق‌های متفاوت و موردنظر در نیمرخ خاک یعنی ۰ تا ۲۵، ۰ تا ۵۰، ۰ تا ۷۵ و ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری مورد توجه قرار گیرد و میانگین وزنی لایه‌های گفته‌شده، محاسبه گردد که نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه‌شده است.

توجه: در مورد رقم‌های مندرج در جدول ۵ به دلیل اینکه اعماق نمونه‌برداری خاک در جدول ۴ دارای تناوب یا تواترهای یکسانی بوده است (۲۵ سانتی‌متری) بدین دلیل رقم‌های محاسبه‌شده میانگین وزنی و میانگین حسابی آن برابر می‌باشد. در شرایطی که ضخامت لایه‌های نمونه‌برداری از نیمرخ خاک برابر نباشند، استفاده از رقم‌های میانگین وزنی علمی و منطقی‌تر است.

به‌دلیل آسانی محاسبات و کاربردی که در پی می‌آید، پیشنهاد می‌شود رقم‌های مندرج در جدول ۵ از طریق تعویض سطرها و ستونها به‌صورت جدول ۶ تهیه و ارائه شود.

1 - Desalination
2 - Desodification

الف) محاسبه ضریب بازده یا بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون

با توجه بر آنچه در مبحث ۴-۴-۸ متن راهنما با عنوان بحث و نتیجه‌گیری از مبحث کاربرد مدل‌های نظری آبشویی نمکها بیان شد، نظر به اینکه در این آزمایش میزان شوری نهایی (EC_f) مربوط به لایه ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری نیمرخ خاک (مندرج در جدول ۵)، به‌ازای کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر عمق آب آبشویی (D_w ، سانتی‌متر) برابر ۵/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر (dS/m) مشخص شده است و ملاحظه رقمهای مندرج در جدول ۲ که میزان کسر رطوبت لایه ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری نیمرخ خاک را قبل از آبشویی برابر ۱۴/۹۷ سانتی‌متر ارائه نموده است، و توجه به مندرجات جدول ۳ که میزان شوری آب کاربردی آبشویی را ۱/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر گزارش کرده است، ابتدا با استفاده از رابطه ۴-۹۴ مقدار ضریب مربوطه به‌شرح زیر محاسبه شده است.

$$r = \frac{D_w}{D_p} = \frac{100}{85/03} = 1/176$$

در رابطه بالا، D_w عمق ناخالص آب کاربردی (آبشویی) و D_p عمق خالص آب آبشویی که پس از تأمین کسر رطوبت لایه مربوطه به‌صورت تراوشهای عمقی از نیمرخ خاک خارج می‌گردد (مترادف با DI_w یا عمق خالص آب کاربردی یا آبشویی نمک می‌باشد).

سپس با استفاده از رابطه ۴-۹۳ مقدار ضریب بازده یا بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک، به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$f = \frac{r \cdot EC_w}{EC_{eq}} = \frac{1/176 \times 1/32}{5/08} = 0/30$$

ب) رابطه عمق آب آبشویی کاربردی (D_w) و تغییرات میزان شوری خاک (EC_e) مورد آزمون

با توجه به آنچه در مبحث ۴-۳-۱ متن راهنما گفته شده با استفاده از رابطه‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ و استفاده از رقمها و اعداد مندرج در جدول ۶ اقدام شد که نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. بررسی رقمهای جدول ذکر شده، بیانگر آن است که استفاده از ۱۰۰ سانتی‌متر آب مصرفی موجب آبشویی ۹۳/۷۰، ۹۰/۰۵، ۸۰/۵۵ و ۶۴/۲۵ درصد میزان نمک اولیه اعماق مربوطه (به‌طور میانگین) شده است. مقدار آب استفاده شده مذکور معادل با ۹/۵، ۵/۳، ۳/۳ و ۲/۵ واحد حجم آب منفذی برای اعماق گفته شده می‌باشد.

تذکر: برای آگاهی بیشتر از چگونگی محاسبه واحدهای حجم (آب یا رطوبت) منفذی به مبحث ۳-۲-۵-۲ متن راهنما مراجعه شود.

جدول ۴- مقادیر شوری اولیه (EC_i) و نهایی (EC_f) عصاره اشباع خاک، قبل از به کارگیری آب آبخویی و پس از به کارگیری مقادیر متفاوت آب آبخویی (ناخالص یا D_w) در اعماق مختلف نمونه برداری شده

هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب کاربردی					هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آبخویی EC_i (دسی زیمنس بر متر)	اعماق نمونه برداری از خاک (سانتی متر)	ردیف
میانگین EC_f (دسی زیمنس بر متر)	$D_w=100\text{Cm}$	$D_w=75\text{Cm}$	$D_w=50\text{Cm}$	$D_w=25\text{Cm}$			
	$EC_f (100)$	$EC_f (75)$	$EC_f (50)$	$EC_f (25)$			
۲/۹۲	۲/۳۱	۲/۶۲	۲/۹۳	۳/۸۳	۴۶/۵۰	۲۵-۰	۱
۵/۳۵	۲/۸۳	۳/۰۶	۴/۸۲	۱۰/۶۸	۳۶/۵۰	۵۰-۲۵	۲
۱۵/۳۲	۳/۳۰	۶/۹۷	۱۳/۴۷	۳۷/۵۳	۳۸/۲۰	۷۵-۵۰	۳
۳۲/۷۲	۱۱/۹۰	۲۹/۸۰	۴۲/۷۰	۴۶/۵۰	۳۶/۴۰	۱۰۰-۷۵	۴
۱۴/۰۷	۵/۰۸	۱۰/۶۱	۱۵/۹۸	۲۴/۶۳	۳۹/۴۲	میانگین	

* رقمهای (EC_f) متن جدول بر حسب دسی زیمنس بر متر می باشند.

جدول ۵- مقادیر محاسبه شده (میانگین وزنی) شوری اولیه (EC_i) و نهایی (EC_f) عصاره اشباع خاک، قبل از استفاده از آب آبخویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آبخویی (ناخالص یا D_w) در اعماق مختلف نیمرخ خاک

هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آبیاری					هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آبخویی EC_i (دسی زیمنس بر متر)	اعماق مختلف نیمرخ خاک (سانتی متر)	ردیف
میانگین EC_f (دسی زیمنس بر متر)	$D_w=100\text{Cm}$	$D_w=75\text{Cm}$	$D_w=50\text{Cm}$	$D_w=25\text{Cm}$			
	$EC_f (100)$	$EC_f (75)$	$EC_f (50)$	$EC_f (25)$			
۲/۹۲	۲/۳۱	۲/۶۲	۲/۹۳	۳/۸۳	۴۶/۵۰	۲۵-۰	۱
۴/۱۳	۲/۵۷	۲/۸۴	۳/۸۷	۷/۲۵	۴۱/۵۵	۵۰-۰	۲
۷/۸۶	۲/۸۱	۴/۲۲	۷/۰۷	۱۷/۳۵	۴۰/۴۳	۷۵-۰	۳
۱۴/۰۷	۵/۰۸	۱۰/۶۱	۱۵/۹۸	۲۴/۶۳	۳۹/۴۲	۱۰۰-۰	۴

* رقمهای (EC_f) متن جدول بر حسب دسی زیمنس بر متر می باشند.

** اعماق مختلف نیمرخ خاک در واقع لایه های تجمعی اعماق نمونه برداری شده از سطح خاک است.

همچنین مندرجات جدول ۷ نشان می‌دهد که آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای رسوبی، سنگین بافت، شور و سدیمی منطقه مورد مطالعه با روش غرقاب متناوب در کاهش نمکهای محلول (شوری) به‌ویژه در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک به دلیل تغییرات متناوب میزان رطوبت خاک مؤثر بوده است. به‌گونه‌ای که کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبشویی (ناخالص یا D_w) که معادل با ۰/۸۵ متر تراوشهای عمقی (D_p یا D_l_w ، آب خالص آبشویی) می‌باشد، باعث کاهش ۹۰/۰۵ و ۶۴/۲۵ درصد شوری اولیه افقهای ۰/۵ و ۱ متری نیمرخ خاک شده که میزان آب نفوذیافته به ترتیب معادل با ۴/۲۶ و ۲/۱۳ واحد حجم (آب) منفذی بوده است. به‌طور متوسط موجب آبشویی ۸۲/۱۴ درصد مقدار شوری اولیه نیمرخ خاک تا عمق ۱ متری شده است، به‌گونه‌ای که لایه سطح خاک تا عمق ۰/۷۵ سانتی‌متری پس از اتمام آبشویی از نظر کیفی بدون محدودیت شوری و در عمق ۰/۷۵ تا ۱ متری دارای شوری کمی بوده که در شرایط استفاده از عمق آب آبشویی بیشتر، این محدودیت نیز قابل رفع می‌باشد.

نتیجه اینکه، در مقایسه با دیگر مطالعات انجام‌شده در استان خوزستان، با روش غرقاب دائم و با شرایط حدوداً مشابه می‌توان اظهار کرد که چگونگی و شیوه کاهش نمکهای محلول، یکسان است لیکن از نظر دوره زمانی اجرای آزمایش، روش غرقاب متناوب در مقایسه با روش غرقاب دائم بیشتر به‌طول می‌انجامد.

پ) شوری‌زدایی خاک مورد آزمایش

همان‌گونه که گفته شد در جدول ۶ تغییرات میزان شوری (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک) لایه‌های مختلف خاک به‌ازاء مقادیر متفاوت عمق آب به‌کاررفته (آب آبشویی ناخالص یا D_w) ارائه شده است. در عمل ممکن است مقداری از آب آبشویی صرف رفع یا جبران کمبود رطوبت خاک اعماق مربوط شده و در فرایند آبشویی مؤثر نباشد. همچنین کاهش میزان شوری با به‌کارگیری آب آبشویی و به میزان زیاد حتی در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک منجر به حصول تعادل شیمیایی کامل با آب آبیاری و یا آبشویی در کوتاه‌مدت نخواهد شد. بدین معنی که کمترین میزان شوری که به حال تعادل شیمیایی کامل با آب کاربردی (با کیفیت مشخص) در می‌آید، بجز در خاکهای سبک با شرایط زهکشی بسیار مناسب، در دیگر موارد از شوری آب آبیاری، کمی بیشتر است (در این مطالعه ۱/۳۲ برابر شوری آب آبیاری حاصل شده است)^۱ اثر این عامل نیز در جدولهای بیان‌شده (جدول ۶ و ۷) در نظر گرفته نشده است.

به منظور رفع این مورد، بر پایه رقمهای هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و برای اعماق مربوط به آن، با استفاده از اعداد ارائه‌شده در جدول ۶ همین‌طور بهره‌مندی از رقمهای تجزیه فیزیکی نمونه‌های خاک لایه‌های مربوط (به زیرنویس جدول ۲ توجه شود) لازم است جدولی مربوط به رقمهای مورد نیاز به‌شرح زیر تهیه شود:

$$X = [D_{l_w} / D_s] \quad \text{و} \quad Y = [(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})]$$

1 - $EC_{eq} / EC_w = 1/32$

جدول ۶- مقادیر میانگین وزنی (محاسبه شده) شوری اولیه (EC_i) و نهایی (EC_f) عصاره اشباع خاک، قبل از کاربرد آب آشویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آشویی (ناخالص) در اعماق مختلف نیمرخ خاک

اعماق مختلف نیمرخ خاک D_s (سانتی متر)				عمق آب آشویی کاربردی D_w (سانتی متر)	ردیف
۱۰۰-۰	۷۵-۰	۵۰-۰	۲۵-۰		
۳۹/۴۲	۴۰/۴۳	۴۱/۵۵	۴۶/۵۰	۰ (قبل از آشویی)	۱
۲۴/۶۳	۱۷/۳۵	۷/۲۵	۳/۸۳	۲۵	۲
۱۵/۹۸	۷/۰۷	۳/۸۷	۲/۹۳	۵۰	۳
۱۰/۶۸	۴/۲۲	۲/۸۴	۲/۶۲	۷۵	۴
۵/۰۸	۲/۸۱	۲/۵۷	۲/۳۱	۱۰۰	۵
۱۴/۰۷	۷/۸۶	۴/۱۳	۲/۹۲	میانگین شوری خاک، پس از آشویی (EC_f)	

* رقمهای (EC_f, EC_i) متن جدول برحسب دسی زمینس بر متر می باشد.

** اعماق مختلف نیمرخ خاک در واقع لایه های تجمعی اعماق نمونه برداری شده از سطح خاک است.

جدول ۷- رابطه بین مقادیر مختلف عمق آب آشویی کاربردی و تغییرات میزان شوری عصاره اشباع خاک (EC_e)

میانگین EC_e	اعماق مختلف نیمرخ خاک D_s (سانتی متر)				درصد نمک اولیه	عمق آب آشویی کاربردی D_w (سانتی متر)	ردیف
	۱۰۰-۰	۷۵-۰	۵۰-۰	۲۵-۰			
۳۲/۷۷	۶۲/۴۸	۴۲/۹۱	۱۷/۴۷	۸/۲۴	باقیمانده (۱)	۲۵	۱
۶۷/۲۳	۳۷/۵۲	۵۷/۰۹	۸۲/۵۵	۹۱/۷۶	شسته شده (۲)		
۱۸/۴۱	۴۰/۵۴	۱۷/۴۹	۹/۳۱	۶/۳۰	باقیمانده شسته شده	۵۰	۲
۸۱/۵۹	۵۹/۴۶	۸۲/۵۱	۹۰/۶۹	۹۳/۷۰	باقیمانده شسته شده	۷۵	۳
۱۲/۵۲	۲۷/۰۹	۱۰/۴۶	۶/۸۶	۵/۶۹	باقیمانده شسته شده	۱۰۰	۴
۸۷/۴۸	۷۲/۹۱	۸۹/۵۴	۹۳/۱۴	۹۴/۳۱	باقیمانده شسته شده		
۷/۷۴	۱۲/۸۹	۶/۹۵	۶/۱۸	۴/۹۶	باقیمانده شسته شده	میانگین	
۹۲/۲۶	۸۷/۱۱	۹۳/۰۵	۹۳/۸۲	۹۳/۰۴	باقیمانده شسته شده		
۱۷/۸۶	۳۵/۷۵	۱۹/۴۵	۹/۹۵	۶/۳۰	باقیمانده شسته شده	میانگین	
۸۲/۱۴	۶۴/۲۵	۸۰/۵۵	۹۰/۰۵	۹۳/۷۰	باقیمانده شسته شده		

(۱) نمکهای اولیه باقیمانده

(۲) نمکهای اولیه شسته شده

که در آن : EC_i و EC_f به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل و بعد از استفاده از عمق آب آبخویی مربوط (خالص یا DI_w) برحسب دسی زیمنس بر متر و EC_{eq} هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که به حال تعادل شیمیایی با آب آبیاری و یا آبخویی در می‌آید، برحسب دسی زیمنس بر متر و $[DI_w / D_s]$ نسبت عمق آب آبخویی به واحد عمق خاک، که در آن DI_w عمق خالص آب آبخویی و آن میزان آبی است که پس از تأمین کسر رطوبت خاک طبقه مربوط به صورت ثقلی و تراوشهای عمقی از ستون خاک لایه مربوط خارج می‌شود و برحسب متر یا سانتی‌متر، D_s عمق یا ضخامت لایه خاک (نسبت به سطح زمین) برحسب متر یا سانتی‌متر می‌باشد.

همان‌گونه که در متن راهنما و پیوست ۱ نیز بیان شد، کاهش مقدار EC_{eq} (شوری تعادلی) از صورت و مخرج کسر گفته شده (Y) و مربوط، موجب خواهد شد تا نتایج حاصل از عوامل خارجی مؤثر از جمله میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاک، کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در امر آبخویی و دیگر شرایطی که بر روی نتایج تأثیرگذار است، مستقل باشد.

بر مبنای موارد گفته شده، به منظور تهیه رقمهای آبخویی (شوری‌زدایی) برای لایه‌های متفاوت نیمرخ خاک، محاسبات مربوط به آن انجام شد که نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. براساس رقمهای مندرج در این جدول می‌توان به تهیه منحنی شوری‌زدایی خاک مورد آزمایش اقدام کرد. به دلیل اینکه در رسم منحنی شوری‌زدایی خاک، از رقمهای محاسبه شده (میانگین وزنی) استفاده می‌شود و بنابراین رسم منحنیهای مربوط به هر عمق، به دلیل عدم تفاوت زیاد در چنین شرایطی معمولاً مرسوم نیست. باید یادآور شد که این منحنی در محدوده نوع خاک، میزان شوری اولیه نیمرخ خاک محل اجرای آزمون می‌تواند کاربرد داشته باشد. با استفاده از این منحنی، می‌توان عمق آب مورد نیاز برای کاهش عملی میزان شوری خاک و برای عمق معینی از لایه خاک را برآورد (محاسبه) کرد. مقادیر استخراجی از منحنی گفته شده، براساس نیاز خالص آب آبخویی نمک است و به منظور برآورد کل میزان آب لازم برای آبخویی خاک، باید به مقادیر کسر رطوبت خاک لایه مورد نظر (تا حد ظرفیت مزرعه)، تبخیر (از سطح آب و خاک) و میزان بارندگی نیز توجه کرد و این عوامل فراگیر را در محاسبات برنامه‌ریزی آبخویی و اصلاح خاک و زمین لحاظ داشت. شایان ذکر است که در این آزمون مقدار شوری تعادلی (EC_{eq}) برابر با $1/74$ دسی‌زیمنس بر متر در لایه ۰ تا ۵ سانتی‌متری نیمرخ خاک پس از عملیات آبخویی در نظر گرفته شده است.

ت) تحلیل آماری و ارائه مدل مناسب

رقمهای مندرج در جدول ۸ با استفاده از نرم‌افزار SPSS و برایش $13/5$ ، مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و ۱۱ مدل به رقمهای حاصل از اجرای آزمون برازش داده شد که خلاصه نتایج حاصل در جدول ۹ ارائه شده است.

به گونه‌ای که از این جدول می‌توان پی برد، مدل توانی^۱ با داشتن بزرگ‌ترین ضریب همبستگی (R^2) و انحراف معیار یا استاندارد (SD یا SE) برابر $0/413$ در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و پس از آن رابطه درجه سوم، معکوس، لگاریتمی، درجه دوم و چهار مدل یا رابطه (مرکب، لجستیک، رشد و نمایی) نیز هم مرتبه می‌باشند و در نهایت مدل‌های اس و خطی قرار دارند. بدین ترتیب رابطه برتر زیر را می‌توان ارائه داد:

$$Y = 0/053 X^{-1/154} \quad (1)$$

جدول ۸- اعداد شوری زدایی خاک محل مورد آزمون

عمق خالص آب آبشویی و نسبت‌های مربوط به آن (Y, X)					اعماق مختلف نیمرخ خاک سانتی‌متر	ردیف
۹۴/۷۱	۶۹/۷۱	۴۴/۷۱	۱۹/۷۱	D_{lw} (cm)	۰ تا ۲۵	۱
۳/۷۹	۲/۷۹	۱/۷۹	۰/۷۹	D_{lw} / D_s		
۰/۰۱۳	۰/۰۲۰	۰/۰۲۶	۰/۰۴۷	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۹۰/۳۲	۶۵/۳۲	۴۰/۳۲	۱۵/۳۲	D_{lw} (cm)	۰-۵۰	۲
۱/۸۱	۱/۳۱	۰/۸۱	۰/۳۱	D_{lw} / D_s		
۰/۰۲۱	۰/۰۲۸	۰/۰۵۳	۰/۱۳۸	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۸۶/۸۱	۶۱/۸۱	۳۶/۸۱	۱۱/۸۱	D_{lw} (cm)	۰-۷۵	۳
۱/۱۶	۰/۸۲	۰/۴۹	۰/۱۶	D_{lw} / D_s		
۰/۰۲۸	۰/۰۶۴	۰/۱۳۸	۰/۴۰۳	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۸۵/۰۳	۶۰/۰۳	۳۵/۰۳	۱۰/۰۳	D_{lw} (cm)	۰-۱۰۰	۴
۰/۸۵	۰/۶۰	۰/۳۵	۰/۱۰	D_{lw} / D_s		
۰/۰۸۹	۰/۲۳۶	۰/۳۷۸	۰/۶۰۷	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		

$$Y = [(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})] \quad \text{و} \quad X = D_{lw} / D_s$$

با جایگزینی متغیرهای مربوطه به جای Y و X رابطه به صورت زیر در می‌آید:

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) = 0/053 \left(\frac{D_{lw}}{D_s} \right)^{-1/154} \quad (۲)$$

که آن را به صورت‌های زیر نیز می‌توان ارائه داد :

$$\frac{D_{lw}}{D_s} = \left[0/053 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right) \right]^{0/866} = 0/0785 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{0/866} \quad (۳)$$

$$DI_w = D_s \left[0/0785 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right)^{0/866} \right] \quad (4)$$

که تقریباً مشابه رابطه‌های ۴-۴۰ و ۴-۴۳ است.

تذکر: خلاصه نتایج ارائه شده در جدول ۹/۰، به دلیل توانمندی‌های نرم‌افزار SPSS بوده است، به گونه‌ای که قبلاً در مبحث ۳-۸ بیان شد، روابط ریاضی مطلوب در مورد آزمونهای آبشویی نمک خاکهای شور به‌طور عمده شامل توابع هذلولی (معکوس)، توانی، لگاریتمی (یا نیمه لگاریتمی) و نمایی است که به دلیل سهولتهای کاربردی قابلیت تبدیل به رابطه‌های خطی را دارا هستند. بدیهی است پیش‌نیاز رسم منحنیهای مربوط و یا کاربرد نتایج، مستلزم تغییر شکل رابطه به صورت اصلی (اولیه) است. ضمن آنکه آماره‌های مدل‌های مرکب، لجستیک، رشد و نمایی در شرایطی یکسان هستند. کاربرد رابطه‌های درجه دوم و سوم در این مورد پیشنهاد نمی‌شوند.

ث) مقایسه نتایج با دیگر مدل‌های تجربی آبشویی نمک خاکهای شور

مدلهای تجربی معرفی شده از نظر ریاضی به شرح زیر قابل رده‌بندی هستند.

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی تابع هذلولی (هیپربولیک یا Inverse)

این گروه شامل مدل‌های تجربی ریو (۱۹۵۷)، لافلر و شارما (۱۹۷۷)، هافمن (۱۹۸۰)، پذیرا و کاواچی (۱۹۸۰)، است.

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی تابع توانی

این دسته شامل مدل‌های تجربی ورما و گوپتا (۱۹۸۹)، پذیرا و کشاورز (۱۹۸۹) است.

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی تابع نمایی^۱

این گروه شامل مدل تجربی - نظری دیلمان (۱۹۶۳) است.

- مدل‌های تجربی با شکل رابطه ریاضی تابع نیمه لگاریتمی و لگاریتمی^۲

این دسته شامل مدل تجربی حاصل از این تحقیق (مدل مندرج در ردیف دو، جدول ۹ است).

با توجه به اینکه در این بررسی بهترین مدل برازش شده از نظر شکل ریاضی، تابع توانی است، بنابراین براساس رقمها و اعداد ارائه شده مندرج در جدول ۸، مقایسه‌ای بین کاربرد آن (رابطه ۱) و مدل تجربی - نظری دیلمان (۱۹۶۳) و مدل‌های لافلر و شارما (۱۹۷۷)، ورما و گوپتا (۱۹۸۹) و مدل نیمه لگاریتمی جدید به عمل آمد.

رقمهای محاسبه شده از رابطه‌های ۴-۲۲، ۴-۲۴، ۴-۳۷، مدل نیمه لگاریتمی جدید و مدل تابع توانی (رابطه ۱) که شکل ریاضی آنها به صورت زیر قابل ارائه است:

$Y_1 = 0/0530X^{-1/154}$ - مدل توانی جدید (رابطه ۱)

$Y_2 = (0/062/X) + 0/034$ - مدل هذلولی (لافلر و شارما، ۱۹۷۷)

$Y_3 = 0/090X^{-1/630}$ - مدل توانی (ورما و گوپتا، ۱۹۸۹)

$Y_4 = \exp(-X)$ - مدل نمایی (دیلمان، ۱۹۶۳)

$Y_5 = 0/99 - 0/155 \ln . X$ - مدل نیمه لگاریتمی جدید

1 - Exponential

2 - Semi-Logarithmic and Logarithmic

جدول ۹- خلاصه نتایج تجزیه و تحلیل آماری و برازش مدل‌های مختلف به رقم‌های شوری زدایی مورد آزمون

ردیف	نام مدل		رابطه ریاضی مدل مربوطه	ضرایب ثابت				آماره‌های محاسبه شده مدل		
	فارسی	انگلیسی		a	b	c	d	ضریب همبستگی	انحراف معیار	سطح معنی دار بودن
۱	خطی	Linear	$Y = a.X + b$	-۰/۱۰۵۰	۰/۲۶۰	-	-	۰/۳۶۲	۰/۱۴۵	۰/۰۱۳۷
۲	لگاریتمی	Logarithmic	$Y = a + b.ln.X$	۰/۰۹۹۰	-۰/۱۵۵	-	-	۰/۷۶۰	۰/۰۸۸	۰/۰۰۰۰
۳	معکوس	Inverse	$Y = a + b/X$	۰/۰۰۷۶	۰/۰۶۳	-	-	۰/۸۶۰	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰۰
۴	درجه دوم	Quadrati	$Y = a + b.X + c.X^2$	۰/۴۲۳	-۰/۴۲۲	۰/۰۸۷	-	۰/۶۷۸	۰/۱۰۶	۰/۰۰۰۶
۵	درجه سوم	Cubic	$Y = a + b.X + c.X^2 + d.X^3$	۰/۵۵۷	-۰/۸۹۴	۰/۴۳۵	-۰/۰۶۳	۰/۸۱۹	۰/۰۸۳	۰/۰۰۰۱
۶	توانی	Power	$Y = a.X^b$	۰/۰۵۳	-۱/۱۵۴	-	-	۰/۸۸۹	۰/۴۱۴	۰/۰۰۰۰
۷	مرکب	Compound	$Y = a.b^X$	۰/۲۱۹	۰/۳۷۳	-	-	۰/۶۷۴	۰/۷۱۱	۰/۰۰۰۱
۸	اس	S	$Y = e^{(a/X+b)}$	-۳/۴۲۱	۰/۳۷۳	-	-	۰/۶۴۲	۰/۷۴۵	۰/۰۰۰۲
۹	لجستیک	Logistic	$Y = 1/(1/u + a.b^X)$	۴/۵۴۶	۲/۶۷۸	-	-	۰/۶۷۴	۰/۷۱۱	۰/۰۰۰۱
۱۰	رشد	Growth	$Y = e^{a+b.X}$	-۱/۵۱۴	-۰/۹۸۵	-	-	۰/۶۷۴	۰/۷۱۱	۰/۰۰۰۱
۱۱	نمایی	Exponential	$Y = a.e^{b.X}$	۰/۲۱۹	-۰/۹۸۵	-	-	۰/۶۷۴	۰/۷۱۱	۰/۰۰۰۱

* برای آگاهی بیشتر از چگونگی محاسبه آماره‌های مدل به مباحث ۱-۴ و ۲-۴ (پیوست ۴) مراجعه شود.

** مقدار (u) در مدل لجستیک (Logistic) کران (حد) بالا و عدد مثبتی است که باید از بزرگ‌ترین رقم متغیر وابسته، زیادتر باشد.

با رقم‌های مشاهده‌شده و مندرج در جدول ۹، با محاسبه مجموع مربعات انحرافات و با داشتن درجه آزادی یکسان (DF)، ضمن محاسبه واریانس یا پراش و انحراف معیار، مشخص شد که به ترتیب مدل‌های لافلرو شارما ۴-۲۴، مدل توانی جدید، مدل نیمه‌لگاریتمی جدید و مدل نمایی دیلمان ۴-۲۲ به رقم‌های مشاهده‌شده (Y_o) نزدیک‌تر می‌باشند. نتایج برازش‌شده در مدل توانی ورما و گوپتا ۴-۳۷ با رقم‌های مورد نظر همخوانی نداشته است.

مقادیر آماره‌های (شاخص‌های آماری) مربوط به مدل‌های مورد آزمون، به شرح جدول ۱۰ است:

جدول ۱۰ - مقادیر آماره‌های محاسبه‌شده برای مدل‌های مورد مقایسه

آماره مورد بررسی	مدل توانی جدید	مدل هذلولی لافلر و شارما	مدل توانی ورما و گوپتا	مدل نمایی دیلمان	مدل نیمه لگاریتمی جدید
مجموع مربعات انحرافات	۰/۰۹۱۱۵	۰/۰۷۴۱۱	۱۲/۸۰۳۸	۱/۸۳۸۸	۰/۱۱۰۳۴
واریانس (پراش)	۰/۱۷۱۳۹	۰/۰۰۴۹۴	۰/۸۵۵۳۰	۰/۱۲۲۵۰	۰/۰۰۷۳۰
انحراف معیار	۰/۴۱۳۹۹	۰/۰۷۰۳۰	۰/۹۲۳۸۰	۰/۳۵۰۱۰	۰/۰۸۵۴۴

پ) برآورد آب مورد نیاز برای اصلاح خاکها با استفاده از مدل‌های تجربی آبشویی نمک

برای تجزیه و تحلیل موارد ارائه‌شده، افزون بر آنچه گفته شد، در این مبحث به اعمال فرضیه‌های زیر می‌پردازیم:

- هرگاه هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، قبل از آبشویی به‌طور میانگین، تا عمق ۱ متری نیم‌رخ خاک برابر با ۴۰ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شود و در نظر باشد که این مقدار به ۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش داده شود، در شرایطی که شوری تعادلی عصاره اشباع خاک حاصل از اجرای آزمون آبشویی نمک، برابر با ۱/۷۴ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده باشد و در صورتی که اعماق اصلاحی خاک مورد نظر به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر (از سطح خاک) منظور شود، مقدار آب مورد نیاز اصلاحی^۱ چنین خاکی با کاربرد مدل‌های تجربی (آبشویی نمک) معرفی شده برای اعماق (لایه‌های خاک) مربوط چقدر خواهد بود و کاربرد کدام مدل یا مدل‌ها در این مورد پیشنهاد می‌شود.
- با استفاده از هشت مدل تجربی معرفی‌شده در این خصوص که خلاصه نتایج در جدول زیر ارائه‌شده است. با دقت در رقم‌های مندرج در جدول ۱۱ ملاحظه می‌شود به‌گونه‌ای که در مبحث (پ) بیان گردید، مدل توانی جدید با ویژگی‌های آماری مندرج در جدول ۱۰ در رتبه اول تناسب مدل انتخابی کاربردی قرار دارد و پس از آن به ترتیب مدل‌های پذیرا و کشاورز (۱۹۹۸)، لافلر و شارما (۱۹۷۷)، پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱) و مدل هافمن (۱۹۸۰) تناسب دارند و دیگر مدل‌های مورد استفاده و مقایسه یعنی روابط ورما و گوپتا (۱۹۸۹)، ریو (۱۹۵۷) و دیلمان (۱۹۶۳) تناسب لازم در خصوص برآورد آب مورد نیاز اصلاحی خاکهای منطقه مورد مطالعه را به دلیل برآورد مقادیر آب لازمه به ترتیب ۱/۷۳، ۳/۸۲ و ۵/۰۱ برابر بیشتر (در مقایسه با کاربرد مدل توانی جدید) نشان نمی‌دهند.

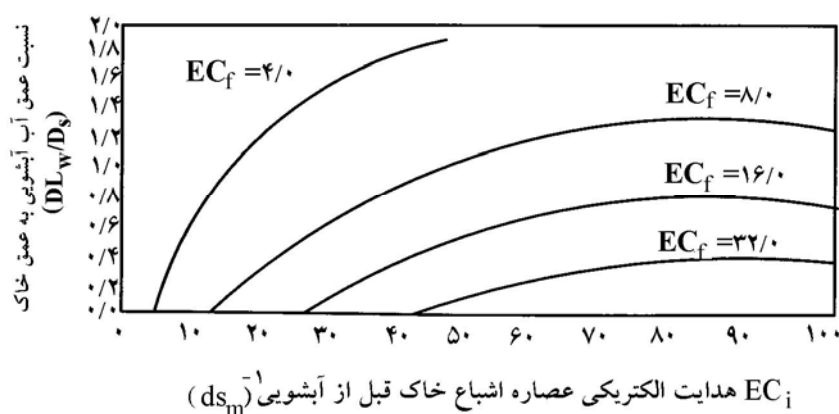
1 - Reclamation Requirement (RR).

شایان ذکر است که این چهار مدل، به عنوان مدل‌های با تناسب کاربردی زیاده‌تر، مقادیر آب لازم اصلاحی خاکها را به طور مقایسه‌ای (با مدل توانی جدید) به ترتیب ۱/۲۱، ۱/۳۴ و ۱/۶۹ برابر بیشتر برآورد می‌کنند که به هر حال به دلیل تجربی بودن این گونه مدلها، نتایج حاصل از کاربرد آنها به طور تقریبی منطقی تر به نظر می‌رسد.

تذکر دوباره این نکته لازم است که رقمهای مورد نیاز اصلاحی خاک محاسبه شده، نیاز خالص آب آبخویی نمک محلول می‌باشد و برای برآورد کل مقدار آب آبخویی لازم ضروری است که به مقدار تبخیر (از سطح آب و خاک)، میزان بارندگی و مقدار کسر رطوبت لایه‌های مورد نظر (تا حد ظرفیت مزرعه) نیز توجه شود و این عوامل را در محاسبات برنامه‌ریزی آبخویی و اصلاح خاک و زمین نیز در نظر گرفت.

ت) منحنی آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون با استفاده از مدل تجربی انتخابی

به گونه‌ای که در مبحث تجزیه و تحلیل آماری و ارائه مدل مناسب بیان شد، مدل انتخابی در مورد این آزمون از نظر ریاضی به صورت تابع توانی است که در مقایسه با دیگر مدل‌های تجربی معرفی شده، رابطه برتر به شمار می‌آید. برای آسانی برآورد آب مورد نیاز آبخویی، به تهیه منحنی آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک منطقه مورد مطالعه نیز، اقدام کرد. بدین ترتیب که عمق آب آبخویی (خالص) به عنوان تابعی از شوری خاک قبل از آبخویی نمک (EC_i) و برای سطوح شوری ۳۲، ۱۶، ۸ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر بعد از انجام آبخویی منظور می‌شود. بدین ترتیب با تعیین میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و تصمیم‌گیری در مورد سطوح شوری مورد نظر و با انتخاب لایه‌ای از خاک که اصلاح آن مورد نظر است، می‌توان مقدار عمق آب آبخویی مورد نیاز را برآورد کرد. نتایج حاصل که براساس رقمهای شوری‌زدایی خاکها (مندرج در جدول ۸ و رابطه‌های قبلی یعنی ۱ تا ۴) حاصل شد، در شکل ۱ نشان داده شده است.



ژشکل ۱- منحنی آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون در زمینهای

جنوب شرقی استان خوزستان

جدول ۱۱- خلاصه نتایج حاصل از کاربرد مدل‌های تجربی آبشویی نمک خاکهای شور، در زمینهای جنوب شرقی استان خوزستان

رتبه تناسب مدل کاربردی	میانگین‌های آب مورد نیاز اصلاح خاک (متر)		مقادیر آب مورد نیاز اصلاح خاک (متر)				مشخصات مدل تجربی مورد استفاده				ردیف
			اعمال اصلاحی خاک مورد نظر، D_s ، متر				شماره رابطه در راهنما	حالت ریاضی	سال ارائه	نام مدل	
	هندسی	وزنی	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵					
۷	۰/۷۵	۱/۰۲	۱/۳۶	۱/۰۲	۰/۶۸	۰/۳۴	(۱۴-۴)	هدلولی	۱۹۵۷	ریو	۱
۸	۰/۹۹	۱/۳۵	۱/۸۰	۱/۳۵	۰/۹۰	۰/۴۵	(۲۳-۴)	نمایی	۱۹۶۳	دیلمان	۲
۳	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۱۲	(۲۷-۴)	هدلولی	۱۹۷۷	لافلروشارما	۳
۵	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۱۵	(۳۲-۴)	هدلولی	۱۹۸۰	هافمن	۴
۴	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۲۶	۰/۱۳	(۳۶-۴)	هدلولی	۱۹۸۱	پذیراو کاواچی	۵
۶	۰/۳۸	۰/۵۱	۰/۶۸	۰/۵۱	۰/۳۴	۰/۱۷	(۴۰-۴)	توانی	۱۹۸۹	ورما و کوپتا	۶
۲	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۱۵	(۴۳-۴)	توانی	۱۹۹۸	پذیرا و کشاورز	۷
۱	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۰۹	پیوست سه (۴)	توانی	۲۰۰۳	جدید	۸

* در مورد کاربرد رابطه هافمن (۱۹۹۸۰) ابتدا مقدار ضریب مربوطه (K) بر پایه رقم‌های مندرج در جدول ۸ برابر حدود ۰/۱ به دست آمد که بدین ترتیب در رابطه ۴-۳۲، $K = ۰/۱$ به کار رفته است.

** به دلیل آنکه رقم‌های میانگین وزنی با مقادیر آب مورد نیاز اصلاحی خاک محاسبه شده لایه ۰/۷۵ متری شباهت داشته، نسبت به محاسبه میانگین هندسی اقدام شده است.

افزون بر شکل بالا، استفاده مستقیم از رابطه‌های بیان شده نیز منظور را عملی می‌کند. با این حال برای آسانی برآورد و قضاوت در مورد مقادیر آب آبخویی لازم و برای کاهش مقادیر شوری کلاسهای مختلف خاک و زمین در لایه‌های مختلف نیمرخ خاک محدوده مورد بررسی، جدول ۱۲ نیز تهیه و به‌عنوان راهنما ارائه شده است، شایان ذکر است که رقمهای محاسبه و ارائه شده در این جدول براساس رابطه ۴ این پیوست می‌باشد، که مدل مربوط به آن در این تحقیق به‌عنوان رابطه برتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۲- مقادیر آب لازم (خالص) برای کاهش عملی مقادیر شوری کلاسهای مختلف نیمرخ خاک در اعماق مربوط (واحد، هزار متر مکعب در هکتار)

کلاسهای شوری خاک قبل از آبخویی نمکهای محلول												کلاس شوری خاک پس از آبخویی نمکهای محلول	ردیف
S ₄			S ₃			S ₂			S ₁				
اعماق مختلف نیمرخ خاک- سانتی‌متر												S ₀	۱
۱۵۰ تا ۰	۱۰۰ تا ۰	۵۰ تا ۰	۱۵۰ تا ۰	۱۰۰ تا ۰	۵۰ تا ۰	۱۵۰ تا ۰	۱۰۰ تا ۰	۵۰ تا ۰	۱۵۰ تا ۰	۱۰۰ تا ۰	۵۰ تا ۰		
۱۵/۰۰	۱۰/۰۰	۵/۰۰	۱۰/۸	۷/۲۰	۳/۶۰	۵/۷۰	۳/۸۰	۱/۹۰	۲/۸۵	۱/۹۰	۰/۶۵	S ₂	۳
۶/۳۰	۴/۲۰	۲/۱۰	۴/۵	۳/۰۰	۱/۵۰	۲/۴۰	۱/۶۰	۰/۸۰	-	-	-	S ₃	۴
۳	۲	۱	۲/۲۵	۱/۵۰	۰/۷۵	-	-	-	-	-	-		
۱/۶۵	۱/۱۰	۰/۵۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

تذکر: در محاسبات جدول بالا، مقدار S₄ معادل ۴۵/۰ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار EC_{eq} برابر با ۱/۷۴ دسی‌زیمنس بر متر منظور شده است.

شرح علائم به این قرار است: S₀ < 4 ، S₁ = 8-4 ، S₂ = 16-8 ، S₃ = 32-16 ، S₄ > 32 دسی‌زیمنس بر متر.

ث) بررسی چگونگی تغییرات سرعت نفوذ پایه زمینها در فرایند آبخویی نمکهای محلول خاک

همان‌گونه که در مباحث قبل گفته شد، در مراحل افزایش اولین و آخرین میزان تناوب آب کاربردی یعنی ۲۵ سانتی‌متر اول و ۲۵ سانتی‌متر نهایی (که در این حالت عمق آب کاربردی به حدود ۱۰۰ سانتی‌متر می‌رسید)، افت سطح ایستابی از محل کرت‌های مدل (میانی) اندازه‌گیری و محاسبات لازم در مورد سرعت نفوذ پایه (اولیه و نهایی) خاک مورد آزمون انجام شد که نتایج به‌شرح زیر است:

$$I_{Bi} = 0/80 \quad \text{سانتی‌متر بر ساعت} \quad (۵)$$

$$I_{Bf} = 0/78 \quad \text{سانتی‌متر بر ساعت} \quad (۶)$$

بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که در هر دو حالت، سرعت نفوذ پایه خاک (زمین) از نظر توصیفی متوسط I_2 بوده و فرایند آبشویی نمکها، تغییر چشمگیری در آن ایجاد نکرده است. با توجه به این موضوع و همچنین بررسی اطلاعات مندرج در مقاله اصلی که نشان می‌دهد که فرایند شوری‌زدایی در اثر آبشویی، روند سدیم‌زدایی خاک را نیز به‌دنبال داشته است و می‌توان نتیجه گرفت که در چنین شرایطی، نیازی به استفاده از مواد اصلاح‌کننده خاک در برنامه‌های اصلاح خاک و زمین منطقه مورد مطالعه، نیست.

پیوست ۴

ارائه مثال عملی در مورد کاربرد مدل‌های نظری آبشویی نمک خاکهای شور

شرح توصیفی و کامل روش اجرای آزمایشها، پردازش داده‌ها و شیوه نتیجه‌گیری از رقمها و اعداد حاصل از اجرای آزمونهای آبشویی خاکهای شور در پیوست ۱ ارائه شده است. در این پیوست، مثالی عملی در مورد کاربرد مدل‌های نظری آبشویی نمک خاکهای شور نیز ارائه شده است.

مثال^۱

قطعه زمینی با کیفیت شیمیایی شور و سدیمی در بخش دیگری از زمینهای جنوب شرقی استان خوزستان انتخاب شد، از سه نقطه و در سه مرحله نمونه‌های خاک تهیه و برای انجام آزمایشهای لازم به آزمایشگاه ارسال شد. نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک قطعه انتخابی در جدولهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. خاک منطقه براساس رده‌بندی جامع وزارت کشاورزی ایالات متحده امریکا (USDA)، لومی تا رسی و از نظر رده‌بندی تیپیک سالورتیدز^۲ بوده است.

آب به‌کاررفته در این تحقیق از رودخانه جراحی تأمین شد، نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است و کیفیت آن برای مصارف کشاورزی بینابینی قابل رده‌بندی است. عمق آب کاربردی (آبشویی) در این بررسی، ۱۰۰ سانتی‌متر بود، که در چهار تناوب ۰/۲۵ متری به‌کار رفته است.

روش اجرای این آزمایش با استوانه‌های مضاعف بوده است که شرح تفصیلی چگونگی انجام آن در دستورالعمل آزمایشهای آبشویی خاکهای شور و سدیمی در ایران نشریه شماره ۲۵۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۱ و شرح کلی آن در پیوست ۱ ارائه شده است.

همان‌گونه که گفته شد روش آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک در این مطالعه غرقاب متناوب بوده است. طی دوره نفوذ هر تناوب آب کاربردی (آبشویی) به سطح خاک استوانه‌های مضاعف، همچنین در فاصله زمانی بین دو تناوب آب کاربردی (۲ تا ۳ روز به‌عنوان زمان توزیع مجدد رطوبت) سطح استوانه‌های مضاعف به‌دلیل جلوگیری از تبخیر به‌وسیله ورقه نایلونی، پوشیده می‌شد.

پس از نفوذ هر تناوب ۲۵ سانتی‌متری آب به سطح استوانه‌های مضاعف و پس از گذشت مدت زمان لازم برای توزیع مجدد رطوبت در نیمرخ خاک که انجام نمونه‌برداری از خاک سطح استوانه‌های درونی (میانی) را امکان‌پذیر و تسریع می‌کند از اعماق مشابه (همانند اعماق ارائه‌شده در جدولهای ۱ و ۲) در سه مرحله به‌طور تصادفی از سطح استوانه‌های مضاعف (درونی) نمونه‌برداری می‌شد. در هر دوره استفاده از آب آبشویی، به استوانه بیرونی نیز مقداری آب اضافه شده و سعی شده است عمق آب در استوانه‌های درونی (میانی) و استوانه‌های بیرونی هم‌سطح نگه داشته شوند. انجام این اقدام به منظور ایجاد اطمینان از نفوذ عمودی (قائم) آب در استوانه‌های درونی بوده است.

۱- گزارش مطالعات اصلاح و بهسازی خاک و زمین با تأکید بر موارد اصلاح فیزیکی- شیمیایی خاکهای شور و سدیمی دشت خلف‌آباد- استان خوزستان، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس (۱۳۶۷).

جدول ۱- ویژگیهای شیمیایی نمونه‌های خاک قبل از آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

درصد سدیم تبادلی	نسبت جذب سدیم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر		گچ (سولفات کلسیم آبدار) %	کربنات کلسیم %	pH خاک	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک دسی‌زیمنس بر متر	اعماق نمونه برداری خاک، سانتی‌متر
		سدیم (Na ⁺)	کلسیم + منیزیم (Ca ²⁺ + Mg ²⁺)					
۴۰/۲	۴۶/۴	۳۳۸/۰	۱۰۶/۰	۱/۶۰	۵۱/۰	۷/۷	۲۹/۰	۲۵-۰
۳۸/۷	۴۳/۷	۳۱۸/۰	۱۰۶/۰	۱/۶۵	۴۹/۰	۷/۷	۲۸/۰	۵۰-۲۵
۳۴/۷	۳۶/۹	۲۴۵/۰	۸۸/۰	۲/۱۵	۴۹/۰	۷/۸	۲۴/۵	۷۵-۵۰
۳۲/۶	۳۳/۷	۲۰۵/۰	۷۴/۰	۲/۳۲	۴۵/۰	۷/۸	۲۳/۵	۱۰۰-۷۵

* درصد سدیم تبادلی نمونه‌های خاک از رابطه تجربی $ESP = \frac{100(-0/0126+0/01475SAR)}{1+(-0/0126+0/01475SAR)}$ محاسبه شده است (ریچاردز، ۱۹۵۴).

** SAR = میلی اکی والان بر لیتر به توان $\frac{1}{2}$ است.

جدول ۲- ویژگیهای فیزیکی نمونه‌های خاک مورد آزمون آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

میزان رطوبت خاک (درصدوزنی)	نفوذپذیری (هدایت آبی)		تخلخل کل نمونه خاک %	جرم مخصوص ظاهری خاک، گرم بر سانتی‌متر مکعب	جرم مخصوص حقیقی خاک، گرم بر سانتی‌متر مکعب	اعماق نمونه برداری خاک، سانتی‌متر
	پس از توزیع مجدد	حین آبخویی				
۲۱/۸	۳۶/۴	۱۱/۱	۴۵/۳	۱/۴۱	۲/۵۸	۲۵-۰
۲۴/۸	۳۹/۳	۱۲/۵	۵۳/۰	۱/۲۵	۲/۶۶	۵۰-۲۵
۲۸/۹	۴۲/۴	۱۴/۳	۵۰/۷	۱/۳۰	۲/۶۴	۷۵-۵۰
۳۰/۳	۴۹/۶	۱۴/۹	۵۲/۲	۱/۲۷	۲/۶۶	۱۰۰-۷۵

* میزان کسر رطوبت تجمعی لایه‌های خاک قبل از کاربرد اولین دوره آب آبخویی به ترتیب ۳/۷۷، ۷/۶۱، ۱۲/۳۵ و ۱۷/۴۵ سانتی‌متر بوده است.

جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی آب کاربردی در آزمون آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک

رده بندی * براساس دیاگرام ویلکاکس	نسبت جذب سدیم	میلی‌اکی‌والان بر لیتر کلسیم + منیزیم (Ca ²⁺ + Mg ²⁺)	میلی‌اکی‌والان بر لیتر سدیم (Na ⁺)	pH	هدایت الکتریکی دسی‌زیمنس بر متر
C ₃ S ₁	۳/۶۷	۱۲/۰	۹/۰	۷/۸	۱/۸۶

* براساس جدول راهنمای آزمایشگاه شوری کشور ایالات متحده آمریکا، کتابچه شماره ۶۰ (۱۹۵۴)

SAR = برحسب میلی اکی‌والان بر لیتر به توان $\frac{1}{2}$ است.

در همه نمونه‌های خاک تهیه‌شده در آزمایشگاه عواملی مانند هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، pH، کاتیونهای محلول (سدیم، کلسیم و منیزیم) عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری می‌شود، مقدار نسبت جذب سدیم بر اساس رقمهای کاتیونهای محلول، و درصد سدیم تبدیلی نمونه‌های خاک با رابطه تجربی (ESP-SAR) محاسبه شده است. تذکر: در این مثال موارد مرتبط با شوری زدایی خاک به دلیل ضرورت اختصار و اهداف راهنما، مورد تجزیه، تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۴ مقادیر شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک را قبل از استفاده از آب آشویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب (تناوبهای آب آشویی) در اعماق نمونه‌برداری شده، نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر شوری اولیه و نهایی عصاره اشباع خاک، قبل از کاربرد آب آشویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آشویی (ناخالص) در اعماق مختلف نمونه‌برداری شده

ردیف	اعماق نمونه‌برداری از خاک (سانتی‌متر)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آشویی دسی‌زیمنس برمتر	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آشویی				میانگین EC_f دسی‌زیمنس برمتر
			$D_w = 25\text{Cm}$	$D_w = 50\text{Cm}$	$D_w = 75\text{Cm}$	$D_w = 100\text{Cm}$	
			$EC_f (25)$	$EC_f (50)$	$EC_f (75)$	$EC_f (100)$	
۱	۰ تا ۲۵	۲۹/۰۰	۱۳/۰	۷/۱۰	۴/۰۰	۲/۸۰	۶/۷۲
۲	۲۵ تا ۵۰	۲۸/۰۰	۱۶/۸۰	۱۱/۲۰	۷/۳۰	۴/۹۰	۱۰/۰۵
۳	۵۰ تا ۷۵	۲۴/۵۰	۱۷/۲۰	۱۳/۶۰	۱۰/۴۰	۷/۸۰	۱۲/۲۵
۴	۷۵ تا ۱۰۰	۲۳/۵۰	۱۶/۵۰	۱۷/۰۰	۱۷/۵۰	۱۷/۰۰	۱۷/۰۰
میانگین		۲۶/۲۵	۱۵/۸۷	۱۲/۲۲	۹/۸۰	۸/۱۲	۱۱/۵۰

* رقمهای (EC_f) متن جدول برحسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند.

حل مثال :

ابتدا باید رقمهای شوری خاک (هدایت الکتریکی عصاره اشباع) مربوط به قبل، حین و پس از آشویی که تهیه و در جدول ۴ ارائه شده و افقهای متفاوت و موردنظر در نیمرخ خاک یعنی ۰ تا ۲۵، ۰ تا ۵۰، ۰ تا ۷۵ و ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شده و میانگین وزنی لایه‌های ذکر شده، محاسبه شده است که نتایج حاصل در جدول ۵ آمده است.

توجه : در مورد رقمهای مندرج در جدول ۵ به دلیل اینکه اعماق نمونه‌برداری خاک در جدول ۴ دارای تناوب یا تواترهای یکسانی است (۲۵ سانتی‌متری) رقمهای محاسبه‌شده میانگین وزنی با میانگین حسابی آن برابر است. در شرایطی که ضخامت لایه‌های نمونه‌برداری از نیمرخ خاک برابر نباشند، استفاده از رقمهای میانگین وزنی، علمی‌تر و منطقی‌تر است.

به دلیل آسانی محاسباتی و کاربردی که به دنبال می‌آید، پیشنهاد می‌شود رقمهای مندرج در جدول ۵ از طریق تعویض سطرها و ستونها به صورت جدول ۶ تهیه و ارائه شود.

الف) محاسبه ضریب بازده یا بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون به طریق تجربی

با توجه به آنچه در مبحث ۴-۴-۸ بیان شد، نظر به اینکه در این آزمایش میزان شوری نهایی مربوط به لایه ۰ تا ۱۰۰ سانتی متری نیمرخ خاک (در جدول ۵) به ازای کاربرد ۱۰۰ سانتی متر عمق آب آبشویی (سانتی متر) برابر ۸/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشخص شده است و ملاحظه رقمهای جدول ۲ که میزان کسر رطوبت لایه ۰ تا ۱۰۰ سانتی متری نیمرخ خاک را قبل از آبشویی برابر ۱۷/۴۵ سانتی متر ارائه کرده است، و توجه به مندرجات جدول ۳ که میزان شوری آب کاربردی آبشویی را ۱/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر گزارش کرده است، ابتدا با استفاده از رابطه ۴-۹۴ مقدار ضریب مربوط به شرح زیر محاسبه شده است:

$$r = \frac{D_w}{D_p} = \frac{100}{82/55} = 1/21$$

در رابطه بالا، D_w عمق ناخالص آب کاربردی و D_p عمق خالص آب آبشویی که پس از تأمین کسر رطوبت لایه مربوطه به صورت تراوشهای عمقی از نیمرخ خاک خارج می‌شود (معادل D_{lw} یا عمق خالص آب کاربردی یا آبشویی نمکها است). سپس با استفاده از رابطه ۴-۹۳ مقدار ضریب بازده یا بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک، به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$f = \frac{r \cdot EC_w}{EC_{eq}} = \frac{1/21 \times 1/86}{8/12} = 0/28$$

ب) مورد شوری زدایی خاک مورد آزمایش

همان گونه که گفته شد در جدول ۶ تغییرات میزان شوری (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک) لایه‌های مختلف خاک به ازای مقادیر متفاوت عمق آب به کاررفته (آب آبشویی ناخالص) ارائه شده است. در عمل ممکن است مقادیری از آب آبشویی صرف رفع یا جبران کمبود رطوبت خاک اعماق مربوط شود و در فرایند آبشویی مؤثر نباشد. همچنین کاهش میزان شوری با مصرف آب آبشویی و به میزان زیاد حتی در لایه‌های سطحی نیمرخ خاک منجر به حصول تعادل شیمیایی کامل با کیفیت آب آبیاری و یا آبشویی در کوتاه مدت نمی‌شود. بدین معنی که کمترین میزان شوری که به حالت تعادل شیمیایی کامل با آب کاربردی (با کیفیت مشخص) در می‌آید، بجز در خاکهای سبک با شرایط زهکشی بسیار مناسب، در دیگر موارد از شوری آب آبیاری کمی زیادتر است (در این مطالعه ۱/۴۵ برابر شوری آب آبیاری حاصل شده است^۱) اثر این عامل نیز در جدول ۶ لحاظ نشده است.

1 - $EC_{eq} / EC_w = 1/45$

جدول ۵- مقادیر محاسبه شده (میانگین وزنی) شوری اولیه (EC_i) و نهایی عصاره اشباع خاک (EC_f)، قبل از کاربرد آب آشویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آشویی در اعماق مختلف نیمرخ خاک

میانگین EC_f دسی‌زیمنس بر متر	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آبیاری (EC_f)				هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آشویی (EC_i) دسی‌زیمنس بر متر	اعماق مختلف نیمرخ خاک (سانتی‌متر)	ردیف
	$D_w = 100\text{Cm}$	$D_w = 75\text{Cm}$	$D_w = 50\text{Cm}$	$D_w = 25\text{Cm}$			
۶/۷۲	۲/۸۰	۴/۰۰	۷/۱۰	۱۳/۰۰	۲۹/۰۰	۰ - ۲۵	۱
۸/۳۹	۳/۸۵	۵/۶۵	۹/۱۵	۱۴/۹۰	۲۸/۵۰	۰ - ۵۰	۲
۹/۶۷	۵/۱۷	۷/۲۳	۱۰/۶۳	۱۵/۶۷	۲۷/۱۷	۰ - ۷۵	۳
۱۱/۵۰	۸/۱۲	۹/۸۰	۱۲/۲۲	۱۵/۸۷	۲۶/۲۵	۰ - ۱۰۰	۴

* رقمهای (EC_f) متن جدول برحسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند.

** اعماق مختلف نیمرخ خاک در همان لایه‌های تجمعی اعماق نمونه‌برداری شده از سطح خاک است.

جدول ۶- مقادیر میانگین وزنی (محاسبه شده) شوری اولیه (EC_i) و نهایی عصاره اشباع خاک (EC_f)، قبل از کاربرد آب آشویی و پس از کاربرد مقادیر متفاوت آب آشویی در اعماق مختلف نیمرخ خاک

اعماق مختلف نیمرخ خاک، D_s برحسب سانتی‌متر				عمق آب آشویی کاربردی (D_w) (سانتی‌متر)	ردیف
۰ تا ۱۰۰	۰ تا ۷۵	۰ تا ۵۰	۰ تا ۲۵		
۲۶/۲۵	۲۷/۱۷	۲۸/۵۰	۲۹	۰ (قبل از آشویی)	۱
۱۵/۸۷	۱۵/۶۷	۱۴/۹۰	۱۳/۰۰	۲۵	۲
۱۲/۲۲	۱۰/۶۳	۹/۱۵	۷/۱۰	۵۰	۳
۹/۸۰	۷/۲۳	۵/۶۵	۴	۷۵	۴
۸/۱۲	۵/۱۷	۳/۸۵	۲/۸۰	۱۰۰	۵
۱۱/۵۰	۹/۶۷	۸/۳۹	۶/۷۲	میانگین رقمهای شوری خاک، پس از آشویی (EC_f)	

* رقمهای (EC_f, EC_i) متن جدول برحسب دسی‌زیمنس بر متر است.

** اعماق مختلف نیمرخ خاک در همان لایه‌های تجمعی اعماق نمونه‌برداری شده از سطح خاک است.

به منظور رفع این مورد، بر پایه رقم‌های هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و برای اعماق مربوط به آن، با استفاده از اعداد ارائه شده در جدول ۶ همین‌طور با بهره‌مندی از رقم‌های تجزیه فیزیکی نمونه‌های خاک لایه‌های مربوط (به زیرنویس جدول ۲ توجه شود) لازم است جدولی مربوط به رقم‌های مورد نیاز به شرح زیر :

$$X = [DI_w / D_s] \text{ و } Y = [(EC_f - EC_{eq}) / (EC_i - EC_{eq})]$$

که در آن : EC_f و EC_i به ترتیب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل و بعد از استفاده عمق آب آبخویی مربوط (خالص) برحسب دسی‌زیمنس بر متر و EC_{eq} هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که با آب آبیاری و یا آبخویی به حال تعادل شیمیایی می‌رسد برحسب دسی‌زیمنس بر متر و $[DI_w / D_s]$ نسبت عمق آب آبخویی به واحد عمق خاک، که در آن DI_w عمق خالص آب آبخویی و آن میزان آبی است که پس از تأمین کسر رطوبت خاک لایه مربوط به طریق ثقلی و به‌صورت تراوش‌های عمقی از ستون خاک لایه مربوط خارج می‌شود برحسب متر یا سانتی‌متر، D_s عمق یا ضخامت لایه خاک (نسبت به سطح زمین) برحسب متر یا سانتی‌متر است.

همان‌گونه که در متن راهنما و پیوست ۱ نیز بیان شد، کاهش مقدار EC_{eq} (شوری تعادلی) از صورت و مخرج کسر ذکر شده (Y) و مربوط، موجب خواهد شد تا نتایج حاصل مستقل از عوامل خارجی مؤثر از جمله میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاک، کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در آبخویی باشد و نیز دیگر شرایطی که می‌تواند بر روی نتایج تأثیرگذار باشد. بر مبنای موارد گفته شده، به منظور تهیه رقم‌های آبخویی (شوری‌زدایی)، برای لایه‌های متفاوت نیم‌رخ خاک محاسبات مربوط انجام شد که نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. براساس رقم‌های جدول می‌توان منحنی شوری‌زدایی خاک محل مورد آزمایش را تهیه کرد. به دلیل اینکه در رسم منحنی شوری‌زدایی خاک، رقم‌های محاسبه شده (میانگین وزنی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین به دلیل عدم تفاوت زیاد در چنین شرایطی رسم منحنی‌های مربوط به هر عمق معمولاً مرسوم نمی‌باشد. باید یادآور شد که این منحنی در محدوده نوع خاک، میزان شوری اولیه نیم‌رخ خاک محل اجرای آزمون می‌تواند کاربرد داشته باشد. با استفاده از این منحنی می‌توان عمق آب مورد نیاز برای کاهش عملی میزان شوری خاک و برای عمق معینی از لایه خاک را برآورد (محاسبه) کرد. مقادیر استخراجی از منحنی گفته شده، نیاز خالص آب آبخویی نمک است و به‌منظور برآورد کل میزان آب مورد استفاده لازم برای آبخویی خاک، باید به مقادیر کسر رطوبت خاک لایه مورد نظر (تا حد ظرفیت مزرعه)، تبخیر (از سطح آب و خاک) و میزان بارندگی نیز توجه کرد و این عوامل فراگیر را در محاسبات برنامه‌ریزی آبخویی و اصلاح خاک و زمینها لحاظ داشت. شایان ذکر است که در این آزمون، مقدار شوری تعادلی (EC_{eq}) برابر با $1/86$ دسی‌زیمنس بر متر در لایه ۵ سانتی‌متری سطح خاک پس از آبخویی حاصل شده است.

پ) تجزیه و تحلیل‌های آماری و ارائه مدل مناسب

رقم‌های مندرج در جدول ۷ از طریق کاربرد نرم‌افزار SPSS و ویرایش ۱۳/۵ مورد تحلیل آماری قرار گرفت و سه مدل به رقم‌های حاصل از اجرای آزمون برازش داده شد که خلاصه نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷- اعداد شوری زدایی خاک محل مورد آزمون

عمق خالص آب آبشویی و نسبت‌های مربوطه (Y, X)					ردیف	اعماق مختلف نیمرخ خاک، سانتی‌متر
۹۶/۲۳	۷۱/۲۳	۴۶/۲۳	۲۱/۲۳	DI_w (cm)		
۳/۸۵	۲/۸۵	۱/۸۵	۰/۸۵	DI_w / D_s		
۰/۰۰۴	۰/۰۴۹	۰/۱۶۷	۰/۳۹۱	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۹۲/۳۹	۶۷/۳۹	۴۲/۳۹	۱۷/۳۹	DI_w (cm)	۲	۵۰ - ۰
۱/۸۵	۱/۳۵	۰/۸۵	۰/۳۵	DI_w / D_s		
۰/۰۴۵	۰/۱۱۴	۰/۲۵۲	۰/۴۷۲	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۸۷/۶۵	۶۲/۶۵	۳۷/۶۵	۱۲/۶۵	DI_w (cm)	۳	۷۵ - ۰
۱/۱۷	۰/۸۳	۰/۵۰	۰/۱۷	DI_w / D_s		
۰/۱۰۰	۰/۱۸۵	۰/۳۲۴	۰/۵۲۹	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		
۸۲/۷۶	۵۷/۷۶	۳۲/۷۶	۷/۷۶	DI_w (cm)	۴	۱۰۰ - ۰
۰/۸۲۷	۰/۵۷۷	۰/۳۲۷	۰/۰۷۷	DI_w / D_s		
۰/۲۳۰	۰/۳۰۱	۰/۴۰۵	۰/۵۵۹	$\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}}$		

جدول ۸- خلاصه نتایج تحلیل‌های آماری و برازش مدل‌های مختلف
به رقم‌های شوری زدایی مورد آزمون

ردیف	نام مدل		رابطه ریاضی		ضرایب ثابت محاسبه شده		
	فارسی	لاتین	مدل	a	b	ضریب همبستگی	انحراف معیار
۱	معکوس (هذلولی)	Inverse	$y=a+b/X$	۰/۱۱۵	۰/۰۹۱۷	۰/۵۳۶	۰/۱۲۴
۲	توانی	Power	$y=a.X^b$	۰/۱۴۱	-۱/۲۹۰	۰/۶۸۳	۰/۷۴۲
۳	نمایی	Exponential	$y=a.eb.X$	۰/۶۹۵	-۱/۲۰۳	۰/۸۷۳	۰/۴۶۵

* برای آگاهی بیشتر از چگونگی محاسبه آماره‌های مدل به مباحث ۵-۱ و ۵-۲ توجه گردد.

به گونه‌ای که از جدول اخیر قابل ملاحظه است مدل نمایی^۱ با داشتن بزرگ‌ترین ضریب همبستگی (R^2) و انحراف معیار یا استاندارد (SD یا SE) برابر ۰/۴۶۵ در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و پس از آن رابطه توانی و معکوس یا هذلولی^۲ قرار دارند، بدین ترتیب مدل (رابطه) برتر را می‌توان به شرح زیر ارائه داد :

$$Y = 0/695 e^{-1/2030X} \quad (۱)$$

با جایگزینی متغیرهای مربوط به جای Y و X رابطه به صورت زیر در می‌آید:

$$\left(\frac{EC_f - EC_{eq}}{EC_i - EC_{eq}} \right) = 0/695 e^{-1/203 \left(\frac{Dl_w}{D_s} \right)} \quad (۲)$$

که آن را به صورت‌های زیر نیز می‌توان ارائه داد :

$$\frac{Dl_w}{D_s} = 0/833 \cdot \ln \left[0/695 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right) \right] \quad (۳)$$

$$Dl_w = 0/833 \cdot D \ln \left[0/695 \left(\frac{EC_i - EC_{eq}}{EC_f - EC_{eq}} \right) \right] \quad (۴)$$

به گونه‌ای که در بحث ۴-۳-۸ متن راهنما بیان شد، روابط ریاضی مطلوب در مورد آزمون‌های آبشویی نمک خاکهای شور، به طور عمده توابع هذلولی (معکوس)، توانی، لگاریتمی (یا نیمه‌لگاریتمی) و نمایی می‌باشند که نتایج ارائه شده در جدول ۸ نیز مؤید آن است. بدیهی است پیش‌نیاز رسم منحنیهای مربوطه و یا کاربرد نتایج، مستلزم مقایسه نتایج حاصل از کاربرد مدل (y_c ، محاسبه شده) و رقم‌های مشاهده شده (y_o) می‌باشد که نتایج مشاهده شده در این آزمون، قبلاً در جدول ۷ ارائه شده است.

ت) تعیین ضریب بازده آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون، با روش حل عددی

با توجه به آنچه در مبحث ۴-۴-۸ متن راهنما بیان شد، با به کارگیری مدل‌های نظری آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاکها که در تعدیل و تکامل آنها، ضریب بازده آبشویی (f) منظور شده، می‌توان با انتخاب مقدار ضریب (f) مورد نظر و انجام محاسبات لازم، در نهایت به‌ازای مقادیر مختلف (عمق) آب آبشویی مصرفی، می‌توان غلظت نمک‌های محلول لایه‌های متفاوت را پس از استفاده از آب آبشویی، برآورد و پیش‌بینی کرد و با استفاده از آنها، منحنی آبشویی (شوری‌زدایی) نظری خاک را رسم

1 - Exponential
2 - Inverse

کرد. همان گونه که گفته شد، می توان منحنی شوری زدایی (آبشویی) واقعی خاک را با آزمونهای مزرعه، تهیه و رسم کرد. انطباق نسبی رقمهای شوری زدایی واقعی و نظری خاک مورد آزمون، می تواند بیانگر انتخاب مناسب مقدار ضریب بازده آبشویی (f) باشد که در مدلها و محاسبات به کار رفته، همچنین مدل به کار رفته با شرایط طبیعی خاک متناسب باشد. بدین ترتیب مقایسه همخوانی و انطباق منحنی آبشویی واقعی خاک و منحنی آبشویی نظری که با انتخاب مقادیر متفاوت (f) حاصل شده، می تواند روشی مناسب برای برآورد یا محاسبه ضریب بازده یا بازده آبشویی نمک خاکهای شور مورد آزمون باشد.

همان گونه که در بخش ۴-۴-۷ به تفصیل گفته شد، با فرض اینکه جرم مخصوص ظاهری و میزان رطوبت همه لایه های نیمرخ خاک بدون تغییر باشند، می توان رابطه های ۴-۹۰ و ۴-۹۱ را برای فرایند شوری زدایی نیمرخ خاک که شامل n لایه کاملاً مخلوط شونده و متوالی است به شرح رابطه ۴-۹۲ نوشت.

رقمهای ارائه شده در جدول ۴ حاصل اجرای آزمون مزرعه ای آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک در شرایط آبشویی غرقاب متناوب است. به انضمام رقمهای تجزیه فیزیکی خاک مندرج در جدول ۲، همچنین میزان شوری آب کاربردی گزارش شده در جدول ۳، که برابر ۱/۸۶ دسی زیمنس بر متر است، با یک نرم افزار رایانه ای^۱ که مخصوص مدل حل عددی (NM) تدوین یافته بود، برای دو حالت زیر مورد استفاده قرار گرفت که نتایج به شرح زیر است :

• تعیین ضریب بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون، با فرض چهار لایه بودن خاک

در جدول ۹، نتایج حاصل از به کارگیری نرم افزار رایانه ای با روش حل عددی، برای داده های ورودی گفته شده، ارائه شده است. همان گونه که از جدول ۹ ملاحظه می شود، مقدار ضریب بازده آبشویی محاسبه شده با افزایش عمق، کاهش می یابد به گونه ای که بیشترین مقدار آن در لایه سطحی برابر ۰/۲۵ و کمترین آن در آخرین لایه معادل ۰/۰۵ است مقدار میانگین آن ۰/۱۳۷ می باشد (هرچند این رقم در این حالت کاربردی ندارد). بر مبنای رقمهای (f) محاسبه شده، برای هر لایه مجزا (اعماق مختلف نمونه برداری در نیمرخ خاک)، مقدار شوری نهایی (EC_f) هر لایه به ازای مقادیر متناوب آب آبشویی (y_c)، محاسبه می شود، سپس مقایسه ای بین رقمهای مشاهده شده (شوری نهایی) یعنی (y_o) و رقمهای محاسبه شده (y_c) به عمل آمد و افزون بر محاسبه مجموع مربعات انحرافات که در جدول مربوط مندرج است، با استفاده از نرم افزار SPSS ویرایش ۱۳/۵، مدل خطی به رقمهای مشاهده شده (y_o) و محاسبه شده (از روش حل عددی یعنی y_c) برازش داده شده است. که ضریب همبستگی مربوطه (R^2) برابر ۰/۹۳۰۵ و انحراف معیار یا استاندارد SD یا SE برابر ۱/۴۳۷ و در سطح ۱ درصد معنی دار بوده است بدین ترتیب رابطه زیر را می توان ارائه داد:

$$y_o = 0/8380y_c + 1/243 \quad (5)$$

1- حیدری، نادر (۱۳۷۳) بررسی نظریه های آبشویی و تعیین ضریب راندمان آبشویی خاکهای شور و سدیمی توسط روش حل عددی، پایان نامه درجه کارشناسی ارشد در رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

• تعیین ضریب بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون، با فرض تک لایه بودن خاک

در جدول ۱۰، نتایج حاصل از به کارگیری نرم افزار رایانه‌ای با روش حل عددی برای داده‌های بیان شده، ارائه شده است. به گونه‌ای که از جدول یاد شده استنباط می‌شود، مقدار ضریب بازده آبشویی محاسبه شده برای مجموع لایه‌ها (با فرض پیوسته بودن ستون خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی متری از سطح خاک) ۰/۳۵ برآورد شده است. بر مبنای این مقدار میانگین (f)، برای هر لایه مجزا (اعماق مختلف نمونه برداری در نیمرخ خاک)، مقادیر شوری نهایی (EC_f) هر لایه به ازای مقادیر متفاوت آب آبشویی (y_c) محاسبه شده است، سپس مقایسه‌ای بین رقمهای مشاهده شده (شوری نهایی) یعنی (y_o) و رقمهای محاسبه شده (y_c) به عمل آمد و افزون بر محاسبه مجموع مربعات انحرافات که در جدول مربوط ارائه شده است، با استفاده از نرم افزار گفته شده (SPSS ویرایش ۱۳/۵)، مدل خطی به رقمهای مشاهده شده (y_o) و محاسبه شده (از روش حل عددی یعنی y_c) برازش داده شده است، که ضریب همبستگی مربوط (R^2) برابر ۰/۸۳۶ و انحراف معیار یا استاندارد SD یا SE برابر ۲/۲ و در سطح ۱ درصد معنی دار بوده است و بدین صورت رابطه زیر را می‌توان ارائه داد.

$$y_o = 0/6270y_c + 3/891 \quad (6)$$

• با توجه به موارد گفته شده، مدل حل عددی (NM) برای برآورد بازده آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاک مورد آزمون و در دو حالت بیان شده، همچنین در برآورد یا محاسبه مقادیر شوری نهایی لایه‌های مختلف نیمرخ خاک (EC_f) به ازای مقادیر متفاوت آب آبشویی، مدل مناسبی به شمار می‌رود و روابط خطی با اطمینانی برای برآورد مقادیر شوری نهایی (EC_f) محاسبه یا برآورد شده از مقادیر مشاهده شده به دست داده است. به دلیل سهولت کاربرد در امور اجرایی و برنامه‌های اصلاح خاک و زمین، با فرض تک لایه بودن نیمرخ خاک، محاسبه یا برآورد ضریب بازده آبشویی (f) پیشنهاد می‌شود. مقدار ضریب محاسبه شده در این شرایط (۰/۳۵) با مقدار تقریبی محاسبه شده (۰/۲۸) (بیان شده در مبحث الف) همخوانی بیشتری دارد، هر چند مقدار محاسبه شده (f) از طریق مدل علمی تر می‌باشد. تذکر: از نظر مقدار ضریب همبستگی و رقم مجموع مربعات انحرافات و از نظر آماری، رابطه ۵ بر رابطه ۶ برتری دارد.

ث) کاربرد مدل‌های نظری آبشویی نمک خاکهای شور

با توجه به آنچه در مبحث ۴-۴ بیان شد، برخلاف مدل‌های تجربی، در اشتقاق مدل‌های نظری حسب مورد، شرایط و اهداف مورد نظر از پیش فرض‌های فیزیکی و ریاضی ساده تا پیچیده‌ای در اشتقاق مدل‌ها و یا روابط نظری استفاده می‌شود که به همین دلیل، دامنه کاربردی آنها محدود نیست، به گونه‌ای که در طرح‌های مطالعاتی بررسی امکانات شوری و یا سدیم‌زدایی خاکهای شور و سدیمی، تعیین میزان آب لازم برای آبشویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکهای مسئله‌دار، با اهمیت است. در بررسی‌های جاری و متداول با کاربرد مقادیر متفاوت آب آبشویی و تهیه نمونه‌های متعدد آب، خاک و زه‌آب، تغییرات میزان نمک طی فرایند آبشویی، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. اجرای این روشها که مرسوم‌ترین شیوه در اصلاح و بهسازی این خاکهاست، مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد و آزمونهای مزرعه‌ای (میدانی) است. در دهه‌های اخیر، پژوهشگران متعددی با بررسی و شناخت فرایندهای فیزیکی و شیمیایی که در آبشویی و انتقال همزمان آب و نمکهای محلول مؤثر می‌باشند، مدل‌هایی مبتنی بر روابط بین متغیرهای مربوط، را به صورت رابطه‌های ریاضی، روابط نظری و تجربی (به شرح پیوست ۳) ارائه دادند.

جدول ۹- مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آیشویی

در اعماق مربوطه، با روش حل عددی و فرض چهار لایه بودن خاک

مجموع مربعات انحرافات پس از آیشویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آیشویی										ضریب بازده آیشویی محاسبه شده از مدل (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آیشویی دسی زیمنس برمتر	اعماق نمونه برداری از خاک، سانتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۰/۱۹	۶/۸۵	۶/۷۲	۲/۹۰	۲/۸۰	۴/۱۰	۴/۰۰	۷/۰۰	۷/۱۰۰	۱۳/۴۰	۱۳/۰۰	۰/۲۵	۲۹/۰۰	۲۵ - ۰	۱
۲/۳۴	۱۰/۱۰	۱۰/۰۵	۴/۲۰	۴/۹۰	۶/۹۰	۷/۳۰	۱۱/۲۰	۱۱/۲۰	۱۸/۱۰	۱۶/۸۰	۰/۱۵	۲۸/۰۰	۵۰ - ۲۵	۲
۱۳/۳۱	۱۳/۹۷	۱۲/۲۵	۱۴/۷۰	۷/۸۰	۱۱/۷۰	۱۰/۴۰	۱۵/۳۰	۱۳/۶۰	۱۹/۹۰	۱۷/۲۰	۰/۱۰	۲۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۳۸/۲۸	۱۸/۱۰	۱۷	۱۶/۵۰	۱۷	۱۶/۸۰	۱۷/۵۰	۱۹/۱۰	۱۷	۲۱/۸۰	۱۶/۵۰	۰/۰۵	۲۳/۵۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۵۴/۱۲	۱۲/۲۵	۱۱/۵۰	۷/۷۰	۸/۱۲	۹/۸۷	۹/۸۰	۱۳/۱۵	۱۲/۲۲	۱۸/۳۰	۱۵/۸۷	۰/۱۳۷	۲۶/۲۵	میانگین	

* جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آیشویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول ۱۰ - مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آیشویی

در اعماق مربوطه، با روش حل عددی و فرض تک لایه بودن خاک

مجموع مربعات انحرافات پس از آیشویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آیشویی										ضریب بازده آیشویی محاسبه شده از مدل (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آیشویی دسی زیمنس بر متر	اعماق نمونه برداری از خاک، سانتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۱۷/۹۴	۴/۸۲	۶/۷۲	۲/۱۰	۲/۸۰	۲/۷۰	۴/۰۰	۴/۵۰	۷/۱۰۰	۱۰	۱۳	۰/۳۵	۲۹/۰	۲۵ - ۰	۱
۱۳/۳۴	۹/۸۰	۱۰/۰۵	۳/۴۰	۴/۹۰	۵/۶۰	۷/۳۰	۱۰/۶۰	۱۱/۲۰	۱۹/۶۰	۱۶/۸۰	۰/۳۵	۲۸/۰	۵۰ - ۲۵	۲
۳۱/۹۸	۱۵/۱۰	۱۲/۲۵	۷/۱۰	۷/۸۰	۱۱/۶۰	۱۰/۴۰	۱۷/۹۰	۱۳/۶۰	۲۳/۸۰	۱۷/۲۰	۰/۳۵	۲۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۱۰۴/۸۵	۱۸/۸۲	۱۷	۱۲/۲	۱۷	۱۷/۳۰	۱۷/۵۰	۲۱/۹۰	۱۷	۲۳/۹۰	۱۶/۵۰	۰/۳۵	۲۳/۳۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۱۶۸/۱۱	۱۲/۱۳	۱۱/۵۰	۶/۲۰	۸/۱۲	۹/۳۰	۹/۸۰	۱۳/۷۲	۱۲/۲۲	۱۹/۳۲	۱۵/۸۷	۰/۳۵	۲۶/۲۵	میانگین	

* جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آیشویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می گیرد.

در روابط یا مدل‌های نظری، تغییرات میزان عامل موردنظر (شوری خاک) به‌ازای مقادیر مشخص آب آشوبی (کاربردی) با کیفیت مشخص، قابل محاسبه و پیش‌بینی می‌باشد و بدین ترتیب در یک مدل مناسب می‌توان عملیات مدیریتی مختلفی را در آشوبی نمک‌های محلول اعمال و نتایج حاصل را مقایسه و آنها را برای مطالعات بعدی و یا بررسی فرایندهایی که در ساختار مدل لحاظ نشده، اعمال، اصلاح و یا تعدیل کرد.

رقم‌های ارائه‌شده در جدول ۴ که حاصل اجرای آزمون مزرعه‌ای آشوبی نمک از نیمرخ خاک در شرایط آشوبی غرقاب متناوب است، افزون بر رقم‌های تجزیه فیزیکی خاک ارائه‌شده در جدول ۲، میزان شوری آب آشوبی گزارش شده در جدول ۳ به میزان ۱/۸۶ دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر، با یک نرم‌افزار رایانه‌ای^۱ که جهت کاربرد چهار مدل معروف و مرسوم در مطالعات شوری‌زدایی یعنی: مدل سری مخازن (SRM)، مدل نظری ستون پیوسته (TPTM)، مدل انتقال- انتشار هیدرودینامیکی (CDM) و مدل حل عددی (NM) که شرح جزئیات نظری مبانی آنها به ترتیب در مباحث ۴-۴-۳، ۴-۴-۴، ۴-۴-۵ و به‌همین صورت در مبحث ۴-۴-۷ متن راهنما ارائه گردیده، مورد استفاده قرار گرفت که نتایج در جدول‌های ۱۱ تا ۱۴ به ترتیب ارائه شده است.

شایان ذکر است که رابطه‌های نهایی، مربوط به مدل‌های گفته‌شده روابط ۴-۵۳، ۴-۵۷، ۴-۷۵، ۴-۹۲ و روابط تکمیلی آنهاست. در مورد مدل‌های مورد استفاده، ذکر نکات زیر ضروری است:

- در مدل سری مخازن (SRM) میزان ضریب بازده آشوبی از طریق مدل برای هر لایه جداگانه (به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۲۳، ۰/۲۳) محاسبه و به‌کار رفته است و رقم ۰/۲۳۲ مندرج در جدول ۱۱ به‌صورت میانگین نوشته شده است.
- در مدل نظری ستون پیوسته (TPTM) مقدار ضریب بازده آشوبی از طریق مدل، برای هر لایه جداگانه (به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۱۸، ۰/۱۷ و ۰/۱۳) محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است و رقم ۰/۱۸۲ مندرج در جدول (۱۲) به‌صورت میانگین ارائه شده است.
- در مدل انتقال- انتشار هیدرودینامیکی (CDM) نیازی به محاسبه و در نظر گرفتن ضریب بازده آشوبی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک نیست.
- در مدل حل عددی (NM) که امکان کاربرد آن برای دو حالت فرض، چهار لایه و تک لایه خاک وجود دارد (که موارد قبلاً در مبحث (ت) به آن اشاره شد، در شرایط کاربرد حالت نخست، مقدار ضریب بازده آشوبی از طریق مدل برای هر لایه جداگانه (به ترتیب ۰/۲، ۰/۳۱، ۰/۳۳ و ۰/۲۸) محاسبه گردید، لیکن به‌دلیل بهره‌مندی از آنچه در مبحث (الف) مورد توجه بوده و به‌دلیل مقایسه نتایجی که در جدول ۱۰ ارائه گردید، رقم ۰/۲۸ به‌عنوان ضریب بازده آشوبی نمک به‌کار گرفته شده است.

۱- وزیر، ژاله (۱۳۷۴) ارزیابی مدل‌های شوری‌زدایی خاک با آزمایش مزرعه‌ای، پایان‌نامه درجه کارشناسی ارشد در رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

جدول ۱۱- مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آیشویی در اعماق مربوطه، با استفاده از مدل سری مخازن

مجموع مربعات انحرافات پس از آیشویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آیشویی										ضریب بازده آیشویی محاسبه شده از مدل (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آیشویی دسی زیمنس برمتر	اعماق نمونه برداری از خاک ساتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۰/۰۹	۶/۶۵	۶/۷۲	۲/۸۰	۲/۸۰	۴	۴	۶/۸۰	۷/۱۰	۱۳	۱۳	۰/۲۳۲	۲۹/۰	۲۵ - ۰	۱
۰/۲۶	۹/۸۵	۱۰/۰۵	۴/۸۰	۴/۹۰	۷	۷/۳۰	۱۰/۸۰	۱۱/۲۰	۱۶/۸۰	۱۶/۸۰	۰/۲۳۲	۴۸/۰	۵۰ - ۲۵	۲
۰/۴۹	۱۲/۱۲	۱۲/۲۵	۷/۷۰	۷/۸۰	۱۰	۱۰/۴۰	۱۳/۲۰	۱۳/۶۰	۱۷/۶۰	۱۷/۲۰	۰/۲۳۲	۲۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۱۱/۲۳	۱۷/۶۲	۱۷	۱۶/۵۰	۱۷	۱۷/۲۰	۱۷/۵۰	۱۷	۱۷	۱۹/۸۰	۱۶/۵۰	۰/۲۳۲	۲۳/۵۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۱۲/۰۷	۱۱/۵۶	۱۱/۵۰	۷/۹۵	۸/۱۲	۹/۵۵	۹/۸۰	۱۱/۹۵	۱۲/۲۲	۱۶/۸۰	۱۵/۸۷	۰/۲۳۲	۲۶/۲۵	میانگین	

* جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آیشویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول ۱۲- مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آبیویی در اعماق مربوطه، با استفاده از مدل نظری ستون پیوسته

مجموع مربعات انحرافات پس از آبیویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آبیویی										ضریب بازده آبیویی محاسبه شده از مدل (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آبیویی دسی زیمنس بر متر	اعماق نمونه برداری از خاک سانتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۲۲۱/۵۰	۱۲/۵۵	۶/۷۲	۱۱/۷۰	۲/۸۰	۱۴/۸	۴	۱۲	۷/۱۰	۱۱/۷۰	۱۳	۰/۱۸۲	۲۹/۰	۲۵ - ۰	۱
۳۶/۳۳	۱۰/۳۲	۱۰/۰۵	۶/۹۰	۴/۹۰	۱۱/۱	۷/۳۰	۱۰/۷۰	۱۱/۲۰	۱۲/۶۰	۱۶/۸۰	۰/۱۸۲	۲۸/۰	۵۰ - ۲۵	۲
۳۹/۸۰	۹/۶۷	۱۲/۲۵	۴/۸۰	۷/۸۰	۱۰/۹	۱۰/۴۰	۹/۵۰	۱۳/۶۰	۱۳/۵۰	۱۷/۲۰	۰/۱۸۲	۲۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۱۵/۶۹	۱۶/۳۷	۱۷	۱۸/۴۰	۱۷	۱۵/۱۰	۱۷/۵۰	۱۴/۴۰	۱۷	۱۷/۶۰	۱۶/۵۰	۰/۱۸۲	۲۳/۵۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۳۱۳/۳۲	۱۲/۲۳	۱۱/۵۰	۱۰/۴۵	۸/۱۲	۱۲/۹۷	۹/۸۰	۱۱/۶۵	۱۲/۲۲	۱۳/۸۵	۱۵/۸۷	۰/۱۸۲	۲۶/۲۵	میانگین	

• جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آبیویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول ۱۳ - مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آیشویی

در اعماق مربوطه، با استفاده از مدل انتقال - انتشار هیدرودینامیکی

مجموع مربعات انحرافات پس از آیشویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آیشویی										ضریب بازده آیشویی محاسبه شده از مدل (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آیشویی دسی زیمنس برمتر	اعماق نمونه برداری از خاک ساتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۱۳۱/۵۶	۱۲/۱۲	۶/۷۲	۱۰/۷۰	۲/۸۰	۹/۹۰	۴	۱۲/۴۰	۷/۱۰	۱۵/۵۰	۱۳	نیاز ندارد	۲۹/۰	۲۵ - ۰	۱
۶۹/۴۸	۱۲/۴۰	۱۰/۰۵	۱۱/۱۰	۴/۹۰	۱۲/۵۰	۷/۳۰	۱۱/۲۰	۱۱/۲۰	۱۴/۸۰	۱۶/۸۰	نیاز ندارد	۲۸/۰	۵۰ - ۲۵	۲
۳۹/۹۳	۱۰/۰۷	۱۲/۲۵	۸/۲۰	۷/۸۰	۱۰/۲۰	۱۰/۴۰	۹/۴۰	۱۳/۶۰	۱۲/۵۰	۱۷/۲۰	نیاز ندارد	۲۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۵۷/۷۸	۱۳/۴۵	۱۷	۱۴/۷۰	۱۷	۱۲/۱۰	۱۷/۵۰	۱۴/۸۰	۱۷	۱۲/۲۰	۱۶/۵۰	نیاز ندارد	۲۳/۵۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۲۹۸/۷۵	۱۲/۰۱	۱۱/۵۰	۱۱/۱۷	۸/۱۲	۱۱/۱۷	۹/۸۰	۱۱/۹۵	۱۲/۲۲	۱۳/۷۵	۱۵/۸۷	-	۲۶/۲۵	میانگین	

* جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آیشویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول ۱۴ - مقادیر هدایت الکتریکی عصاره اشباع نیمرخ خاک (مشاهده و محاسبه شده) پس از به کارگیری تناوبهای مختلف آب آیشویی در اعماق مربوطه، با استفاده از روش (مدل) حل عددی

مجموع مربعات انحرافات پس از آیشویی*	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای مختلف آب آیشویی										ضریب بازده آیشویی محاسبه شده از مدل تجربی (بدون بعد)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک قبل از آیشویی دسی‌زیمنس برمتر	اعماق نمونه برداری از خاک سانتی متر	ردیف
	میانگین		$D_w = 100\text{Cm}$		$D_w = 75\text{Cm}$		$D_w = 50\text{Cm}$		$D_w = 25\text{Cm}$					
	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده	محاسبه شده	مشاهده شده				
۱۶/۵۰	۸/۶۰	۶/۷۲	۵/۱۰	۲/۸۰	۶/۷۰	۴	۹	۷/۱۰	۱۳/۶۰	۱۳	۰/۲۸	۲۹/۰	۲۵ - ۰	۱
۳۶/۳۳	۱۰/۳۲	۱۰/۰۵	۶/۹۰	۴/۹۰	۱۱/۱	۷/۳۰	۱۰/۷۰	۱۱/۲۰	۱۲/۶۰	۱۶/۸۰	۰/۲۸	۲۸/۰	۵۰ - ۲۵	۲
۳۵/۱۰	۹/۶۰	۱۲/۲۵	۵	۷/۸۰	۸/۴۰	۱۰/۴۰	۱۲/۵۰	۱۳/۶۰	۱۲/۵۰	۱۷/۲۰	۰/۲۸	۳۴/۵۰	۷۵ - ۵۰	۳
۲۷/۹۰	۱۴/۸۲	۱۷	۱۵/۱۰	۱۷	۱۵/۵۰	۱۷/۵۰	۱۶/۷۰	۱۷	۱۲	۱۶/۵۰	۰/۲۸	۳۳/۵۰	۱۰۰ - ۷۵	۴
۱۰۴/۷۰	۱۰/۲۴	۱۱/۵۰	۷/۴۵	۸/۱۲	۹/۱۵	۹/۸۰	۱۱/۶۰	۱۲/۲۲	۱۲/۷۷	۱۵/۸۵	۰/۲۸	۲۶/۲۵	میانگین	

* جمع رقمهای تفاوت شوری مشاهده شده و محاسبه شده خاک پس از آیشویی در چهار عمق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

رقمهای شوری خاک مشاهده شده (EC_f) پس از کاربرد تناوبهای متفاوت آب آبیویی در اعماق مربوط با استفاده از مدل‌های سری مخازن، نظری ستون پیوسته، انتقال- انتشار هیدرودینامیکی و روش حل عددی و آنچه از طریق آزمون مزرعه‌ای حاصل شده بود (رقمهای مشاهده شده) از طریق محاسبه مجموع مربعات انحرافات رقمهای پس از آبیویی نمک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در نتیجه مشخص گردید که از نظر تناسب کاربردی با شرایط خاکهای منطقه مورد آزمون، نتایج مشاهده شده و شرایط اجرای آزمایش به ترتیب مدل‌های سری مخازن، حل عددی، انتقال- انتشار هیدرودینامیکی و مدل ستون پیوسته قرار دارند که رقمهای مرتبط با واریانس آماری محاسبه شده مربوط $0/۸۹۷۰$ ، $۲/۶۴۲$ ، $۴/۴۶۳$ و $۴/۵۷۰$ محاسبه شده است. بدین ترتیب برتری تناسب مدل سری مخازن به دیگر مدل‌های به کار رفته، بار دیگر تأیید می‌گردد. انحراف معیار نتایج حاصل از کاربرد مدل‌های گفته شده نیز معادل $۰/۸۹۷۰$ ، $۲/۶۴۲$ ، $۴/۴۶۳$ و $۴/۵۷۰$ محاسبه شده است.

تذکر: از آنجاکه رقمهای حاصل از اجرای آزمون آبیویی نمک محلول از نیمرخ خاک به روش غرقاب متناوب که در مزرعه اجرا شده بود، از طریق مدل‌های گفته شده منجر به حصول درجه تناسب کاربردی و انتخاب مدل برتر گردیده، در ابتدا به منظور کاربرد نتایج حاصل در مدل‌های گفته شده پیش‌بینی و اجرا نگردیده است بدین دلیل، استنباط می‌شود که در شرایط دیگر (حتی در یک منطقه مورد مطالعه) منجر به حصول نتیجه دیگری گردد. بدین دلیل، پیشنهاد می‌شود برای استفاده از مدل‌های نظری آبیویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک، برنامه‌ریزی، تدارک، انجام اندازه‌گیریهای لازم، گردآوری داده‌های مورد نیاز براساس نیاز ورودی مدل‌ها و توجه کامل به شرایط اولیه و مرزی مندرج در مبانی نظری آنها انجام شود، که در صورت اعمال این تمهیدات، دامنه کاربرد مدل انتخابی برتر با محدودیت همراه نبود و اطمینان بیشتری از تعمیم نتایج حاصل متصور خواهد بود. توجه: علاوه بر محاسبه مجموع مربعات انحرافات در جدول ۱۱، با استفاده از نرم‌افزار گفته شده مدل خطی به رقمهای مشاهده شده (y_o) و محاسبه شده (از روش سری مخازن یعنی y_c) برازش داده شده که ضریب همبستگی مربوطه (R^2) برابر با $۰/۷۹۱$ و انحراف معیار یا استاندارد SD یا SE برابر با $۲/۴۹۰$ و در سطح ۱% معنی‌دار بوده است، بدین ترتیب رابطه زیر را می‌توان در این خصوص ارائه داد:

$$y_o = 0/840y_c + 1/258 \quad (7)$$

که در آن y_o و y_c معانی پیشین را دارند.

توجه: بررسی رقم مجموع مربعات انحرافات ($۱۶۸/۱۱$) مندرج در جدول ۱۰ که به ازای مقدار ضریب بازده آبیویی برابر با $۰/۳۵$ حاصل شده و مندرجات جدول ۱۴ که رقم مجموع مربعات انحرافات را برابر با ($۱۰۴/۷۰$) با کاربرد مقدار ضریب بازده آبیویی معادل $۰/۲۸$ برآورد نموده، نمایانگر آن است که مقادیر شوری نهایی برآورد شده به طور مستقیم (در شرایط تساوی دیگر عوامل) تحت تأثیر ضریب بازده آبیویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک و گام‌های محاسباتی مورد استفاده در برنامه رایانه‌ای است.

منابع و مراجع

تذکر: منابعی که در متن به صورت پاورقی مورد اشاره قرار گرفته در فهرست منابع و مراجع تکرار نگردیده است.

- 1- Abrol, I.P., Yadav, J.S.P., and F.I. Massaud. 1988. Salt-affected soils and their management, FAO, Soils Buletin.No.39.
- 2- Abrol, I.P. and D.R. Bhumla. 1972. Field studies on salt leaching in a highly saline-sodic soil. Soil Science, 115:429-433.
- 3- Aylmore, L.A.G. and M. Karim. 1968. Leaching of fertilizer ions in soil columns. Transactions. 9th International Congress on Soil Science, 1:143-152.
- 4- Bachmat, Y., and J. Bear. 1964. The general equations of hydrodynamic dispersion in homogenous and isotropic porous mediums. Journal of Geophysical Research 69:2561-2567.
- 5- Bear, J. 1961a. On the tensor form of dispersion in porous media. Journal of Geophysical Research 66:1185-1197.
- 6- Bear, J. 1961b. Some experiments in dispersion. Journal of Geophysical Research 66:2455-2467.
- 7- Bernstein, L. 1962. Salt-affected soils and plants. The problems of the arid zones. Proceedings UNESCO Arid Zone Symposium, Paris.
- 8- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1960. Diffusion effects in miscible displacement occurring in saturated and unsaturated porous materials. Journal of Geophysical Research 65:2887-2895.
- 9- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1961. Miscible displacement in porous materials, Journal of Soil Science 12:188-197.
- 10- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1962a. Miscible displacement :II. Behavior of tracers. Soil Science Society of America Proceedings 26:125-128.
- 11- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1962b. Some comments on molecular diffusion and hydrodynamic dispersion in porous media. Journal of Geophysical Research 67:3636-3637.
- 12- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1962c. Improved leaching practices. California Agriculture Research Station 16:5.
- 13- Biggar, J.W., and D.R. Neilsen. 1963. Miscible displacement: V. Exchange process. Soil Science Society of America Proceedings 27:623-627.
- 14- Biggar, J.W. and D.R. Nielson. 1967. Miscible displacement and leaching phenomena. in Irrigation of Agricultural Lands. Hagan, R.M., Haise, H.R. and Edminster, T.W. (Editors), American Society of Agronomy, Madison, Wis., PP.254-274.
- 15- Biggar, J.W. and D.R. Nielson. 1976. Spatial variability of leaching characteristics of field soil. Water Resources Research, 42:78-84.
- 16- Bolt, G.H. and M.G.M. Bruggenwert, (Editors). 1976. Soil Chemistry, A. Basic Elements. Elsevier, Amsterdam, 281 P.
- 17- Bresler, E. and R.J. Hanks. 1969. Numerical method for estimating simultaneous flow of water and salt in unsaturated soils. Soil Science Society of America Proceedings. 33 827-832.

- 18- Bresler,E. 1981. Transport of salts in soils and sub-soils. *Journal of Agricultural Water Management*, 4:35-62.
- 19- Bresler, E. 1972. Control of soil salinity in optimizing the soil physical environment toward greater crop yields. D. Hillel. (Editor), PP.101-132. New York- London, Academic press.
- 20- Bresler,E,McNeal, B.I and D.L. Carter. 1982. *Saline and Sodic Soils, Principle, Dynamics, Modeling*, Springer-Verlag. Berlin.
- 21- Burd,J.S., and J.C.Martin.1923. Water displacement of soil and the soil solution, *Journal of Agricultural Science* 13:265-295.
- 22- Chairns,E.J., and J.M. Prausmtz.1960. Longitudinal mixing in packed beds. *Journal of Chemical Engineering Science* 12:20-34.
- 23- Collins,R.E. 1961. *Flow of fluids through porous materials*. Rainhold Publishing Corporation, New York. 270 P.
- 24- Corey,J.C., Nielsen D.R., and J.W. Biggar. 1963. Miscible displacement in saturated and unsaturated sandstone. *Soil Science Society of America Proceedings* 27:258-262.
- 25- Crank,J. 1965. *The mathematics of diffusion* .Oxford University Press, Aman House, London. 347 P.
- 26- Danckwerts, P.V. 1953. Continuous flow systems; distribution of residence times, *Journal of Chemical Engineering Science* 2:1-13.
- 27- Davidson,J.M., Neilsen ,D.R., and J.W. Biggar.1963. Measurements and description of water flow through Columbia silt loam and Hepena sandy loam. *Hiligardia* 34:601-517.
- 28- Day,P.R. and W.M. Forsythe. 1957. Hydrodynamic dispersion of solutes in the soil moisture stream. *Soil Science Society of America Proceedings*, 21:477-480.
- 29- Day,P.R. 1956. Dispersion of a moving salt water boundary advancing through saturated sand. *Transactions of the American Geophysical Union* 37:595-601.
- 30- De Josselin dejong,G. 1958. Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits. *Transactions of the American Geophysical Union* 39:67-74.
- 31- Dieleman, P.J. 1963. *Reclamation of salt -affected soils in Iraq*. Veenman, Wageningen, 175 P.
- 32- Dutt,G.R., and K.K. Tanji. 1962. Predicting concentrations of solutes in water percolated through a column of soil. *Journal of Geophysical Research* 67:3437-3439.
- 33- Dyer, K.L. 1965. Unsaturated flow phenomena in Panoche sandy clay loam as indicated by leaching of chloride and nitrate. *Soil Science Society of America Proceedigs*, 29:121-126.
- 34- Eaton,F.M. 1958. Salts in irrigation waters and soils. *California Citrograph* 44:4, 20-22.
- 35- Eloubaidy, A.F, Hussain, S.M. and M.T.Al-Taie.1993. Field evaluation of desalinization models, *Journal of Agricultural Water Management* , 24:1-13.
- 36- Eriksson, E. 1958. A note on dispersion of salt-water boundary moving through saturated sand. *Transactions of the American Geophysical Union*. 39:937-938.
- 37- Fetter,C.W. Jr. 1988.*Applied Hydrogeology* , John Willey ,2nd ed. PP 389-405.
- 38- Gardner,W.R., and R.H. Brooks. 1957. A descriptive theory of leaching .*Soil Science* 83:295-304.

- 39- Gardner,W.R., and M.S. Mayhugh. 1958. Solutions and tests for the movement of water in soil. Soil Science Society of America Proceedings 22:197-201.
- 40- Gardner,W.R. 1960. Review of research on water relations of plants in arid and semi-arid zones. II. Soil and water relations in arid and semi-arid conditions. In UNESCO publication, Water relations of plants in arid and semi-arid zones. PP 37-61.
- 41- Ghuman,B.S., Verma, S.M. and S.S. Prihar. 1975. Effect of application rate, initial soil wetness, and redistribution time on salt displacement by water. Soil Science Society of America Proceedings, 39:7-10.
- 42- Glueckauf,D. 1949. Activity coefficients in concentrated solutions containing several electrolytes. Nature, 163:414-415.
- 43- Gottfried,M.R. 1979. Introduction to engineering calculations, Schaum's outline series, McGraw-Hill Book.Co.233 P.
- 44- Hanks,R.J.,Klute,A.,and E., Bresler. 1969. A numerical method for estimating infiltration, redistribution, drainage and evaporation of water from soil. Water Resources Research 5, 1064-1069.
- 45- Hartley,O.S., and J. Crank. 1949.Some fundamental definitions and concepts in diffusion processes. Faraday Society Transactions 45:801-818.
- 46- Hoffman, G.J. 1980. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. PP: 49-64 in Proceedings of International American Salinity and Water Management, Technical Conference. Juar. Mecxico.
- 47- Homae,M.,Dirksen,C. and R.A. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions, Journal of Agricultural Water Management.57:89-109.
- 48- Jackson,R.D., Nielsen,D.R. , and F.S. Nakagama. 1963. On diffusion laws applied to porous materials. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service 41-86.
- 49- Jurinak,J.J. 1981. Salt-affected soils, Utah state university. Logan, Utah. Chapter V PP1-13.
- 50- Jury, W.A., Jarrell,W.M. and D. Devitt .1979. Reclamation of saline-sodic soils by leaching. Soil Science Society of America Journal.43:1100-1106.
- 51- Jury,W.A. and G.Sposito. 1985. Field calibration and validation of solute transport models for the unsaturated zone. Soil Science Society of America Journal, 49:1331-1341.
- 52- Jury,W.A. 1982. Simulation of solute transport using a transfer function model. Water Resources Research, 18:2,363-368.
- 53- Keller,J. and J.F. Alfaro. 1966. Effect of water application rate on leaching. Soil Science, 102:107-114.
- 54- Lane,J.W. and V.A,Ferrira. 1990. Sensitivity analysis in CREANS: A field-scale model for chemical, run-off and erosion from agricultural management systems .W. G.Knisel (Editor), 113-158 Vol. A. model , USDA. Conservation. Resources. Report No.26.
- 55- Lapidus,L. and N.R. Amundson. 1952. Mathematics of adsorption in beds .Journal of Physical Chemistry., 56:984-988.

- 56- Leffelaar,P.A.,and Pal Sharma.1977. Leaching of a highly saline-sodic soil. *Journal of Hydrology* 32:203-218.
- 57- Miller,R.J., Biggar ,J.W., and D.R. Nielsen. 1965.Chloride displacement in Panoche clay loam in relation to water movement and distribution . *Water Resources Research* 1:63-73.
- 58- Minhas,P.S, Sharma ,O.P., and S.G.Patil,(Editors). 1998 . 25 Years of research on management of salt-affected soils and use of saline water in agriculture, CSSRI, Karnal, India, 220 P.
- 59- Nielson, D.R., and J.W. Biggar. 1961. Miscible displacement in soils: I. Experimental information. *Soil Science Society of America Proceedings* 215:1-5.
- 60- Nielson, D.R., and J.W. Biggar. 1962a.Experimental consideration of diffusion analysis in unsaturated flow problems. *Soil Science Society of America Proceedings* 26:107-111.
- 61- Nielson,D.R., and J.W. Biggar. 1962b.Miscible displacement: II. Theoretical considerations. *Soil Science Society of America Proceedings* 26:216-221.
- 62- Nielson,D.R., and J.W. Biggar. 1963.Miscible displacement :IV. Mixing in glass beds .*Soil Science Society of America Proceedings* 27:10-13.
- 63- Nielson,D.R., Biggar, J.W.,and R.J. Miller. 1964. Soil profile studies aid, *Water Management for Salinity Control. California Agriculture* 18:4-5.
- 64- Nielson,D.R., Davidson,J.M., Biggar ,J.W. , and R.J. Miller. 1964. Water movement through Panoche clay loam soil .*Hilgardia* 35:491-506.
- 65- Oswal,M.C. 1983. *Soil physics*, Vikas Publishing House, PVT .Ltd .New Delhi.214 P.
- 66- Pazira, E. 1981.Hydrodynamics of salts in the soil, *Journal of Integrated Agricultural Water Use and Freshening Reservoirs* , Kyoto University, Japan,6:28-38.
- 67- Pazira,E. and T, Kawachi. 1981.Studies on appropriate depth of leaching water, Iran .A case study. *Journal of Integrated Agricultural Water Use and Freshening Reservoirs*, Kyoto University Japan, 6:39-49.
- 68- Pazira, E., Keshavarz A., and K.,Torii. 1998.Studies on appropriate depth of leaching water ,*International Workshop on the Use of Saline and Brackish-Water for Irrigation*, Indonesia.
- 69- Pazira, E., Vaziri,J. and A.,Keshavarz. 1998. Practical evaluation of soil desalinization models (A case study, Iran), *International Agricultural Engineering Conference*, Thailand.
- 70- Pazira,E. 1999.Land reclamation research on soil physico-chemical improvement by salt leaching in south-western part of Iran, *Innovation of Agricultural Engineering Technologies for the 21st Century* ,P.R. China.
- 71- Perkins,T.K., and O.C., Johnson. 1963. A review of diffusion and dispersion in porous media. *Society of Petroleum Engineering Journal*.3, 70-84.
- 72- Porter,L.K., Kemper ,W.D., Jackson ,R.D. ,and B.A. Stewart. 1960. Chloride diffusion in soils as influenced by moisture content .*Soil Science Society of America Proceedings* 24:460-463.
- 73- Reeve,R.C. 1953. Factors influencing drainage design in irrigated areas. *Journal of Agricultural Engineering* 34:88-90.

- 74- Reeve, R.C., Pillsbury, A.F., and L.V., Wilcox. 1955. Reclamation of a saline and high boron soil in the Coachella Valley of California .*Hilgardia* 24:69-91.
- 75- Reeve,R.C. 1957. The relation of salinity to irrigation and drainage requirements. Third Congress of International Commission on Irrigation and Drainage, Transactions 5:10.175-10.187.
- 76- Richards, L.A., (Editor). 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agricultural Handbook No. 60, USDA, Washington, D.C.
- 77- Rifai, M.N.E., Kaufman ,W.J. , and D.K. Todd. 1965. Dispersion phenomena in laminar flow through porous media. University of California, Institute of Engineering Research, Series. 93(2), 23 P.
- 78- Ritzma, H.P.(Editor). 1994. Drainage, Principle, and Applications, ILRI, Publication, No 16, 2nd ed. Wageningen, Netherlands.
- 79- Saffman, P.G. 1959. A theory of dispersion in a porous media. *Journal of Fluid Mechanics* 6:321-349.
- 80- Saffman, P.G. 1960. Dispersion due to molecular diffusion and microscopic mixing in flow through a network of capillaries. *Journal of Fluid Mechanics* 7:194-208.
- 81- Scheidegger,A.E. 1954. Statistical hydrodynamics of porous media .*Journal of Applied Physics* 25:994-1001.
- 82- Scheidegger,A.E. 1958. Typical solutions of differential equations of statistical theories through porous media .*Transactions of the American Geophysical Union*, 9:929-932.
- 83- Scheidegger,A.E. 1960.The physics of flow through porous media. The Macmillan Company, New York.313 P.
- 84- Scheidegger,A.E. 1961.General theory of dispersion in porous media. *Journal of Geophysical Research* 66:3273-3278.
- 85- Sepaskhah,A.R. and M.R.,Gharaat. 1977.Reclamation of saline-sodic soils in Khuzestan, Iranian *Journal of Agricultural Research*. Vol.5.No.1.
- 86- Sharma,S.K. and H.R., Manchanda. 1996. Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behavior of chloride and soluted-dominated soils. *Agricultural Water Management*.31:225-235.
- 87- Smith,G.W. 1965. Numerical solution of partial differential equations, Oxford University Press, London, 179 P.
- 88- Sparks,D.L.1995.Environmental soil chemistry, Academic Press, PP 219-232.
- 89- Spiegl, M.R. 1984, Mathematical handbook of formulas and tables, Schaum's outline series, McGraw-Hill Book. Co. 273 P.
- 90- Szabolcs, I 1989.Salt-affected soils, Boca Raton, Florida ,CRC Press.
- 91- Tanji, K.K (Editor). 1990. Agricultural salinity assessment and management .ASCE, USA, PP 410-431.
- 92- Tarkeltoub, R.W. and K.L., Babocock. 1971. A simple method for predicating salt movement through soil. *Soil Science*, 11:182-187.

- 93- Taylor, G.I. 1953. Dispersion of soluble matter in solvent flowing through a tube. Proceedings of the Royal Society of London 219A:186-203.
- 94- Van der Molen. W.H. 1956. Desalinization of saline soils as a column process. Soil Science 81:19-27.
- 95- Van der Molen, W.H. 1979. Salt balance and leaching requirement, Drainage Principles and Application, Vol. II, ILRI, The Netherlands.
- 96- Van Hoorn, J.W. 1981 Salt movement, leaching efficiency and leaching requirement. Agricultural Water Management, 4:409-428.
- 97- Von Rosenberg, D.V. 1956. On the mechanics of steady-state single phase fluid displacement from porous media. American Institute of Chemical Engineering 2:55-58.
- 98- Wang, Q., Horton, R. and L., Jaehoon. 2002. A simple model relating soil water characteristic curve and soil solute breakthrough curve, Journal of Soil Science 167-7:436-443.
- 99- Warrick, A.W., Biggar, J.W. and D.R., Nielson. 1971. Simultaneous solute and water transfer for an unsaturated soil. Water Resources. Research, 7(5):1216-1225.
- 100- Wilcox, L.V., and W.F. Resch. 1963. Salt balance and leaching requirement in irrigated lands. United States Department of Agriculture, Technical Bulletin, 1290.

*Guide line for Application of
Theoretical and Imperical Soil
Desalinization Models*

این نشریه

در طرحهای مطالعاتی بررسی اصلاح فیزیکی-شیمیایی خاکهای شور و یا شور و سدیمی، تعیین میزان آب لازم برای آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها با استفاده از آزمونهای مزرعهای با اهمیت توصیه شده است، در بررسیهای جاری و متداول با استفاده از مقادیر متفاوت آب آبخویی و تهیه نمونههای متعدد آب، خاک و زهآب، تغییرات نمک در فرایند آبخویی، مطالعه و بررسی می‌شود. اجرای این روشها که مرسومترین شیوه در اصلاح و بهسازی خاکهای ذکر شده است، مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد آزمونهای مزرعهای است. در سالهای اخیر با بررسی و شناخت فرایندهای فیزیکی و شیمیایی خاک مدلهایی بر پایه متغیرهای مربوط به صورت روابط ریاضی، معادلههای نظری و تجربی ارائه شده است. در این راهنما به معرفی و تشریح تعدادی از مدلهای معروف و کارآمد نظری و تجربی آبخویی نمکهای محلول از نیمرخ خاکها که استفاده از آنها عمومیت بیشتری دارد، پرداخته شده است.

معاونت امور اداری ، مالی و منابع انسانی
مرکز مدارک علمی ، موزه و انتشارات

978-964-425-902-9



9789644259029