پیش‌بینی شوری خاک با استفاده از مدلهای ماندگار در اراضی شور تحت کشت گندم در مناطق معتدل استان فارس

فاطمه رسولی[۱*] و علی کیانی پویا

کارشناس ارشد مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس؛ **rasouli@farsagres.ir**

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس؛ **ali.kiani@farsagres.ir**

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تجمع نمک اضافی در منطقه ریشه گیاهان عامل اصلی محدود کننده در تولید گیاهان به شمار می‌رود. شوری و توزیع آن در خاکهای اراضی زراعی در زمان‌های مختلف متفاوت بوده و تابع اثر متقابل بین بارندگی، آبیاری، تبخیر وتعرق، آبشویی و زهکشی می‌باشد. این روابط واثرات متقابل آنها بسیار پیچیده بوده، از این رو استفاده از مدلهای ریاضی برای پیش بینی پاسخ سیستمهای زراعی به شرایط فوق و ارزیابی نهایی کیفیت آب بسیار سودمند می‌باشند. در تحقیق حاضر، ۳ مدل ماندگار WATSUIT، هافمن و ونگنوختن (مدل نمایی، ذوزنقه و۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ جذب آب) و تابع تولید (CWPF)، تشریح شده و نتایج پیش بینی شوری خاک از طریق آنها با داده‌های مزرعه ای مقایسه گردید. داده‌های ورودی مورد نیاز جهت اجرای مدلها و شوری‌های خاک اندازه‌گیری شده، از کرت‌های آزمایشی و مزارع کشاورزان در سالهای مختلف (۴ سال) در استان فارس جمع آوری گردید. مقایسه مدلها نشان داد مدل WATSUIT نسبت به سایر مدلها شوری خاک را کمتر و مدل CWPF این مقادیر را بیشتر از سایرمدلها پیش بینی نمودند. ارزیابی آماری داده های پیش بینی شده و داده های مزرعه ای، بوسیله دو شاخص خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) و شاخص تطابق (d) انجام شد. شاخصهای آماری نشان دادند مدل جذب آب ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ هافمن و ونگنوختن(۱۹۸۳) از کمترین مقدار خطا برخوردار بوده، بدین ترتیب توانایی این مدل در پیش بینی شوری خاک از سایر مدلها بیشتر بود. نتایج حاصل همچنین نشان داد مدل CWPF شوری خاک را با خطای زیادی پیش بینی نموده از این رو مدل مناسبی برای پیش بینی شوری خاک به شمار نمی‌آید

واژه های کلیدی: مدل‌های ماندگار، شوری آب، شوری خاک، استان فارس

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تجمع نمک اضافی در منطقه ریشه گیاهان عامل محدود کننده اصلی در تولید محصول به شمار می‌رود. مکانیسم غالبی که سبب انباشتگی نمک در این مناطق می‌گردد، فرایند تبخیر و تعرق است. یونهای موجود در محلول خاک، ترکیب کاتیون‌ها در کمپلکس‌های تبادلی خاک را تحت تأثیر قرار داده و از این طریق سبب بروز تغییراتی در نفوذپذیری و شخم پذیری خاک می‌گردد. شوری و توزیع آن در خاک در اراضی زراعی در زمانهای مختلف متفاوت بوده و تابعی از بارش، آبیاری، تبخیر و تعرق، آبشویی، زهکشی و اثر متقابل بین این عوامل می‌باشد. عوامل ذکر شده و اثرات متقابل بین آنها که عملکرد گیاه، جذب آب بوسیله ریشه، شوری خاک و بار نمک زهکش‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند، از پیچیدگی بسیار زیادی برخوردار بوده و

۱- نویسنده مسئول، آدرس: فارس، زرقان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، بخش تحقیقات شوری

* دریافت: آذر، ۱۳۸۹و پذیرش: دی ۱۳۸۹

هنوز به درستی درک و کمی سازی نشده‌اند (کوروین و همکاران، ۲۰۰۶)[1].

قابلیت مدل‌های ریاضی در پیش‌بینی پاسخ سیستم های زراعی به شرایط پیچیده و امکان ادغام اثرات متغیرها، سبب بهره‌برداری صحیح از آبهای شور و ارزیابی تناسب آب و انتخاب گزینه‌های مدیریتی را امکان پذیر نموده است (فرر و استوکل،۱۹۹۹)[2]. در این ارتباط هر چند تاکنون مدل‌های متعددی در دسترس قرار گرفته و جهت تشریح اثرات متقابل ذکر شده توسعه یافته‌اند، ولی تعداد کمی از آنها آزمون شده و قابلیت کاربرد در دامنه وسیعی از شرایط را پیدا کرده‌اند. علاوه بر این برای بررسی قابلیت این مدل‌ها، در بیشتر موارد از یک سری داده استفاده شده است. هافمن (۱۹۸۵)[3] داده‌های جمع‌آوری شده از کرت‌های آزمایشی و مزرعه را با ۵ مدل ماندگار برازش نمود و نشان داد داده‌های بدست آمده از پیش‌بینی مدل "هافمن وونگنوختن(۱۹۸۳)" [4]همبستگی بالایی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته و مناسبترین مدل برای پیش بینی نیاز آبشویی بود. در تحقیق نامبرده، از روش آبیاری پرتواتر[5] استفاده گردید،که تنها با سیستم آبیاری میکرو تطابق دارد. کوروین و همکاران(۲۰۰۶)[6] از مدلهای ماندگار[7] و غیر ماندگار[8] که شامل مجموعه‌ای از مدل‌های تابعی و مکانیستیک بود، برای پیش‌بینی نیاز آبشویی در تناوب یونجه-گندم- کاهو استفاده نموده و به این نتیجه رسیدند اگرچه در مدل‌های گذرا فرایندهایی نظیر بارندگی، یکنواختی آبیاری، جریان های ترجیهی[9] و تغییرات مکانی و زمانی شوری خاک در نظر گرفته می‌شوند، ولی مدلهای ماندگار به ویژه مدل WATSUIT، در پیش بینی شوری از دقت بالایی برخوردار بود. در تحقیق فوق مدل WATSUIT (ماندگار) و UNSATCHEM (غیر ماندگار) به دلیل در نظر گرفتن فرایند ترسیب و انحلال نمکها در خاک بعنوان مناسبترین مدل‌ها معرفی شدند. چراغی و رسولی (۱۳۸۷) از مدلهای هافمن ونگنوختن برای پیش بینی شوری خاک در مزارع گندم استان فارس استفاده نموده و همبستگی معنی داری بین مقادیر شوری خاک اندازه گیری شده و پیش بینی شده با مدل در جزء آبشویی ۳۰ درصد گزارش نمودند.

1- Corwin et al (2006)
2- Ferrer and Stockle (1999)
3- Hoffman (1985)
4- Hoffman and Van Genuchten (1983)
5- high frequency
6- Corwin et al, (2006)
7- steady state
8- transient
9- bypass

هاشمی نژاد (۱۳۸۷) به منظور بررسی سرنوشت نمک‌های اضافه شده از طریق آب آبیاری به باغات پسته شمال اردکان از مدل WATSUIT استفاده نمود. نتایج بررسی فوق نشان داد نیمرخ توزیع نمک‌ها تا ۲ متری لایه سطحی خاک یکنواخت بوده و خاک به حالت ماندگار خود بسیار نزدیک شده بود، ولی در اعماق پایین‌تر غیر یکنواختی زیادی در منطقه مشاهده می شود و به همین دلیل برازش مدل WATSUIT در شرایط موجود پیش بینی‌هایی دور از واقعیت ارائه نمود. رسولی و کیانی پویا (۱۳۸۹) از مدل WATSUIT برای بررسی امکان پیش بینی ترکیب محلول خاک پس از اصلاح با گچ استفاده نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که داده‌های به دست آمده در شرایط واقعی آزمایش، اغلب با روند پیش‌بینی شده بوسیله مدل مطابقت دارد. شوری خاک کمتر از مقدار واقعی پیش بینی شده است در حالیکه نسبت جذب سدیم به ویژه در سطوح بالای گچ، با مقادیر مدل مطابقت داشت.

به منظور بهره‌برداری صحیح از آب‌های شور، ارزیابی تناسب آب و انتخاب گزینه‌های مدیریتی مناسب در مدیریت شوری در اراضی تحت کشت گندم و همچنین بررسی نقش عوامل محیطی نظیر بارش و واکنشهای رسوب و انحلال در خاک، پیش‌بینی شوری خاک به هنگام استفاده از آب شور ضروری است. از این رو این تحقیق به منظور بررسی امکان پیش‌بینی شوری خاک با استفاده از مدل‌های ماندگار صورت می‌گیرد.

مواد و روش ها

تشریح مدلهای مورد استفاده

۱- مدل WATSUIT

مدل ATSUIT یک مدل شیمیایی است که می‌تواند برای پیش‌بینی شوری خاک، نسبت جذب سدیم و یونهای اصلی محلول خاک، در شرایط ماندگار از لحاظ آب و نمکها مورد استفاده قرار گیرد (رودز و همکاران ۱۹۹۲)[10]. به این معنا که پیش‌بینی مدل، تحت شرایط استفاده مداوم از یک منبع آب با کیفیت مشخص و با جز آبشویی ثابت صورت می‌گیرد. مدل WATSUIT، غلظت آنیونها و کاتیونهای اصلی محلول خاک در منطقه ریشه را به عنوان تابعی از ترکیب آب آبیاری، جز آبشویی، وجود یا عدم وجود کربنات کلسیم پیش‌بینی نموده و انحلال و ترسیب کانیهای مهمی مثل $CaCO_3$ و $CaSO_4.2H_2O$ در منطقه ریشه را در نظر می‌گیرد.

اطلاعات خروجی از مدل با در نظر گرفتن چندین فرض بدست آمده که شامل موارد ذیل می‌باشد.

10- Rhoades et al, (1992)

۱) برقراری شرایط ماندگار، ۲) حرکت تـوده‌ای نمـک، ۳) جذب آب در منطقه ریشه بـر اسـاس الگـوی ۱۰: ۲۰: ۳۰: ۴۰، ۴) پاسخ گیاه به میانگین شوری در منطقـه ریـشه در آبیاری مرسوم و بر اساس جذب آب در آبیاری پرتـواتر و ۵) یکنواختی نفوذ آب به خاک.

مدلWATSUIT مدیریت آبیاری را نیز در نظر گرفته و در پیش بینی شوری خاک بین روش سنتی (غرقابی) و روش پرتواتر (قطره‌ای) تفاوت قائل می‌شود. برای استفاده از این مدل نیاز به در دست داشتن غلظت آنیونها (کربنات، بی کربنات، سولفات و کلر) و کاتیونها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) در آب آبیاری می باشد. مزیت مهم این مدل در مقایسه با سایر مدلها این است که تأثیر واکنشهای شیمیایی که بیشتر مربوط به انحلال و ترسیب کلسیت و گچ است را در محاسبه شوری و غلظت هر یک از یونها به حساب می آورد از اینرو انتظار می رود این مدل برای مناطق خشک و نیمه خشک ایران که این کانیها به فراوانی در خاک یافت می‌شود، از کارایی مناسبی برخوردار باشد. به‌علاوه این مدل قادر است علاوه بر شوری، میزان جذب سدیم، پ - هاش و سایر آنیونها و کاتیونها را برای ۵ عمق خاک در منطقه ریشه نیز محاسبه نماید.

۲- مدل هافمن و ونگنوختن

مقدار و توزیع نمک در منطقه ریشه علاوه بر مقدار و کیفیت آب مصرفی تابع الگوی استخراج آب از خاک نیز می‌باشد. الگوی مکانی جذب آب بوسیله ریشه، تأثیر مستقیمی در پیش بینی شوری خاک دارد. به استثنای مدل‌های تجربی در سایر مدل‌ها، نیاز آبشویی و تابع جذب آب به عنوان جزء لازم در محاسبات منظور می‌گردند. برخی مطالعات (هائو، ۲۰۰۵)[1] نشان داده‌اند که الگوی جذب آب تابع توزیع ریشه‌ها در خاک بوده و ازآنجائی‌که ریشه‌ها، بیشتر در بخش فوقانی خاک واقع شده‌اند، جذب آب از این منطقه نیز بیشتر بود. مطالعات دیگری نشان داد الگوی جذب آب به توزیع ریشه‌ها در خاک ارتباطی ندارد. ریشه‌ها ممکن است در سراسر حجم خاک گسترده بوده اما همه بخشهای آن همیشه فعال نباشند.

همچنین نتایج حاصل از تحقیقات نشان داد جذب آب بوسیله ریشه‌ها ابتدا از محل‌های نزدیک به سطح خاک، جایی که ریشه‌ها بیشترین پراکنش را دارند، انجام شده و با کم شدن آب در لایه فوقانی، فرایند جذب به سمت لایه‌های پایین‌تر پیشرفت کرد (گاردنر، ۱۹۸۳)[2].

در شرایط ماندگار، در یک غلظت مشخص از آب آبیاری، توزیع متفاوت در جذب آب سبب توزیع متفاوت شوری در خاک می‌شود. بر این اساس، پاره‌ای روابط برای بیان ارتباط بین شوری آب و نیاز آبشویی با میانگین شوری خاک برای توابع مختلف جذب آب توسعه یافته‌اند. هافمن و ونگنوختن (۱۹۸۳)[3] میانگین خطی متوسط شوری خاک منطقه ریشه را بوسیله حل معادله پیوستگی برای جریان یک بعدی و رو به پایین آب در خاک، برآورد نمودند. معادلات بر اساس ۳ تابع جذب آب، نمایی (رابطه ۱)، ذوزنقه‌ای (رابطه ۲) و الگوی ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ درصد(رابطه۳) ارائه شدند.

$$\frac{C_1}{C_I}=\frac{1}{L}+\frac{\delta}{ZL}Ln\left[L+(1-L)\exp(\frac{-Z}{\delta})\right] \qquad (۱)$$

$$\frac{C_2}{C_I}=\frac{1}{5L}-\frac{1}{2-2L}Ln(.06-0.4L)+\frac{\tan^{-1}\left[3(1-L)/5L\right]^{1/2}}{\left[5L(1-L)/3\right]^{1/2}} \qquad (۲)$$

$$\frac{C_3}{C_I}=\frac{1}{1-L}\left[\tan^{-1}(9\alpha)-\tan^{-1}(\alpha)\right],\ \alpha=\left(\frac{1-L}{81L-1}\right)^{1/2} \qquad (۳)$$

C_1: شوری خاک بر اساس مدل نمایی جذب آب، C_2: شوری خاک بر اساس مدل ذوزنقه‌ای جذب آب، C_3: شوری خاک بر اساس مدل ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ درصد جذب آب، C_I: شوری آب آبیاری، L: جزء آبشویی و δ: ضریب تجربی برابر با z ۰/۲.

رابطه‌ای که بین دو پارامتر Z و δ به طور تجربی یافت شده است، محاسبه رابطه بالا را ساده نموده است.(δ =0.2Z) زیرا هر دو پارامتر از رابطه حذف خواهند شد.

مدلهای هافمن و ونگنوختن مدلهایی هستند که برای محاسبه شوری خاک، نیاز به پارامترهای زیادی ندارند و بر اساس غلظت کل نمکها در آب آبیاری و میزان آبشویی قادر به پیش بینی شوری خاک می باشند. پیش بینی شوری خاک در این مدلها، برای کل منطقه ریشه انجام می‌شود. این مدلها اگرچه الگوهای مختلف جذب آب را در محاسبه شوری در نظر می‌گیرند اما واکنشهای شیمیایی منطقه ریشه در محاسبات در نظر گرفته نمی شود.

۳- مدل تابع تولید (CWPF)[4]

در شرایط ماندگار به منظور محاسبه حجم آب زهکشی و شوری خاک برای مقادیر معین آب آبیاری می‌توان از مدل ساده و کاربردی که بوسیله لتی و همکاران

1- Hao et al (2005)
2- Gardner (1983)
3- Hoffman and Van Genuchten (1983)
4- Water Production Function

(۱۹۸۵)[1] ارائه شده است، استفاده نمود. سالمان (۱۹۸۵)[2] و لتی و همکاران (۱۹۸۵) توابع تولید فصلی آب شور را بر اساس پاسخ گیاه به آب، تحمل به شوری گیاه و فرایند آبشویی نشان دادند. این محققان از ۳ رابطه مختلف جهت توسعه مدل تابع تولید فصلی استفاده نمودند. این روابط شامل: ۱) رابطه عملکرد و تبخیر و تعرق، ۲) عملکرد و میانگین شوری خاک و ۳) رابطه شوری خاک با شوری آب و نسبت آبشویی بود. رابطه بین عملکرد و تبخیر و تعرق، به صورت خطی فرض گردید و رابطه پیشنهاد شده بوسیله ماس و هافمن (ماس و هافمن، ۱۹۷۷)[3] برای بیان ارتباط بین عملکرد و متوسط شوری منطقه ریشه در نظر گرفته شد. تابع توانی جذب آب که توسط هافمن و ونگنوختن (هافمن و ونگنوختن، ۱۹۸۳) ارائه شد، برای بیان ارتباط بین متوسط شوری در منطقه ریشه و نسبت آبشویی بکار گرفته شد. با ترکیب این ۳ رابطه مدلی ارائه شد که می‌تواند عملکرد نسبی، حجم آبشویی یا شوری آب نفوذ یافته به زیر منطقه ریشه را با یک مقدار مشخص آب مصرفی در طول فصل و یک شوری مشخص محاسبه نماید. اطلاعات ورودی شامل: ۱) آستانه تحمل به شوری و درصد مقادیر کاهش شیب با استفاده از داده‌های ارائه شده توسط ماس و هافمن (ماس و هافمن، ۱۹۷۷) بدست آمد (آستانه تحمل به شوری برای گندم ۶ دسی زیمنس بر متر و شیب کاهش عملکرد، ۷/۱ درصد)، ۲) حداقل مقدارآب مصرفی (آستانه مصرف آب) برای تولید محصول با استفاده از روش‌های ارائه شده در نشریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی (دورنباس وکاسم، ۱۹۷۹)[4] پیش‌بینی گردید، ۳) شوری آب مورد استفاده و۴) مقدار آب مصرفی می باشد. در این مدل ته‌نشینی یا حلالیت نمک در محاسبات منظور نمی‌گردد. این مدل قادر است کاهش عملکرد نسبی محصول و شوری آب زهکش (شوری محلول خاک) در آبیاری با آب شور و با نسبتهای مختلف آبشویی را محاسبه نماید.

(۴)

$$C+\frac{100YD}{BY_{max}}-\frac{0.5EC_i}{1-(ET_{max}/AW)+[YD/(AW)S]}-\frac{0.1EC_i}{1-(ET_{max}/AW)+[YD/(AW)S]}$$
$$In\left\{1-\left[\frac{ET_{max}}{AW}-\frac{YD}{(AW)S}\right][1-\exp(-5)]\right\}=0$$

C′: شوری آستانه تحمل گیاه، BYmax: حداکثر عملکرد بیولوژیکی، EC: شوری آب آبیاری، ET_{max}: حداکثر تبخیر و تعرق گیاه، AW: میزان آب مصرفی، S: شیب منحنی کاهش عملکرد.

در مطالعه حاضر از نسخه اصلاح شده این مدل که میزان عملکرد، تبخیر و تعرق و میزان آب مصرفی را به صورت نسبی بیان می‌کند استفاده گردید. در این نسخه، YD: کاهش عملکرد به دلیل اثر توأم شوری و خشکی است که مدل، آن را با توجه به میزان آب مصرفی و شوری خاک پیش بینی می کند. از مزایای این مدل این است که قادر است شوری خاک و میزان عملکرد را در شرایط بهینه مصرف آب و شرایط کم آبیاری برای زمانی که از آب شور استفاده می شود محاسبه نماید.

آزمایش‌های مزرعه‌ای

داده‌های مورد نیاز جهت انجام این تحقیق از کرتهای آزمایشی طرحهای تحقیقاتی (چراغی و رسولی (۱۳۸۷) و رنجبر و همکاران (۱۳۸۶)) و مزارع کشاورزان در سال‌های مختلف (چهار سال) در استان فارس جمع آوری گردید. اراضی مورد بررسی بیشتر شامل کشت متوالی (بدون تناوب) گندم بوده و تعدادکل مزارع انتخابی ۱۹ مزرعه بود. از این رو فصل کشت را می‌توان به دو دوره مجزای فصل بارندگی و فصل آبیاری تقسیم بندی نمود. آبیاری‌ها اغلب به تعداد ۶ تا ۸ نوبت صورت گرفت. در بیشتر مزارع انتخابی برای آبیاری از آب چاه استفاده می‌شد، ولی در تعداد اندکی از مزارع آب مورد استفاده در آبیاری، آب زهکش‌های سطحی بود. آب زیرزمینی در مناطق مورد مطالعه از منابع آبرفتی تامین می‌شد و سیستم آبیاری مورد استفاده در بیشتر مزارع سیستم سطحی (نواری وکرتی) بود. راندمان آبیاری در مزارع به دلیل ناهمواری‌های نسبی سطح آنها که توزیع یکنواخت آب در مزرعه را در حد مطلوب تأمین نمی‌کند، پایین بود.

جمع‌آوری داده‌ها

جهت تعیین شدت و توزیع شوری در خاک، در طی فصل زراعی از مزارع نمونه‌برداری شد. در هر نمونه‌برداری ۳ نقطه از مزرعه که معیار وضعیت عمومی آن مزرعه بوده انتخاب شده و نمونه‌برداری تا عمق ۹۰ سانتیمتری به فواصل ۳۰ سانتیمتری انجام شد. نمونه‌برداری در فواصل بین آبیاری یا بارندگی‌ها صورت می‌گرفت. دبی آب ورودی به مزرعه با استفاده از فلوم WSC اندازه‌گیری شده و با ضرب دبی در مدت زمان آبیاری، حجم آب ورودی به مزرعه محاسبه گردید. نسبت یا جز آبشویی در مزارع ۳۰ درصد در نظر گرفته شد (چراغی و رسولی، ۱۳۸۷).

1- Letey et al (1985)
2- Soloman (1985)
3- Maas and Hoffman (1977)
4- Doorenbos and Kassem(1979)

تجزیه نمونه‌های آب و خاک شامل اندازه‌گیری EC آب و عصاره اشباع خاک و تعیین ترکیب کاتیونی و آنیونی آب و عصاره اشباع خاک بود.نتایج تجزیه شیمیایی آبهای مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. کلیه آزمایش های آب و خاک با استفاده از روش‌های ارائه شده بوسیله آزمایشگاه شوری آمریکا اندازه‌گیری شد (ریچاردز، ۱۹۵۴)[1]. جدول ۲ شوری آب آبیاری در مزارع مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مدل‌های ماندگار غلظت نمکهای خاک را در شرایط استفاده مداوم از یک منبع آب منفرد پیش‌بینی می‌نمایند. در حالیکه وقایع بارندگی و یا استفاده از چندین منبع آب با کیفیتهای مختلف، غلظت نمکهای خاک را تغییر می‌دهد. بارندگی حتی اگر خارج از فصل رشد نیز رخ دهد اثر آبیاری با آب شور را کاهش می‌دهد. بنابراین در صورت وقوع بارندگی در منطقه، بایستی از داده‌های تصحیح شده استفاده نمود. در مناطق مورد مطالعه میزان بارش ها از ۱۰۵ تا ۳۴۰ میلیمتر در سال در مناطق مختلف متغیر بود. از این رو و به منظور تخمین سهم بارندگی در کاهش اثر آبیاری با آب شور، از میانگین‌گیری وزنی از شوری آب آبیاری و بارندگی (رابطه ۵) استفاده گردید (ریچارد، ۱۹۵۴، شلوت، ۱۹۷۳[2]، هافمن، ۱۹۹۰[3]، لتی وفنگ، ۲۰۰۷[4]).

$$EC_a = \frac{(EC_{iw}.D_{iw}) + (EC_r.D_r)}{(D_{iw} + D_r)} \qquad (۵)$$

در این رابطه EC_a میانگین وزنی شوری آب آبیاری یا شوری تصحیح شده آب، EC_{iw} و EC_r به ترتیب شوری آب آبیاری و باران بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و D_{iw} و Dr به ترتیب عمق آبیاری و باران موثر(میلی‌متر در سال) است.

مدل‌های مورد مطالعه، شوری محلول خاک را محاسبه می‌نماید. جهت تبدیل شوری محلول خاک به شوری عصاره اشباع از نسبت رطوبت اشباع خاک به رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه (θ_{SP}/θ_{FC}) استفاده گردید. رطوبت اشباع خاک در آزمایشگاه تعیین گردید و رطوبت ظرفیت مزرعه به روش مزرعه‌ای اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که یک قسمت از مزرعه به ابعاد ۲×۲ مرزبندی و با حدود ۱۰ سانتیمتر آب آبیاری شد. پس از فروکش کردن آب، سطح خاک توسط پوشش پلاستیکی پوشانده شد. روزانه از خاک زیر پلاستیک نمونه‌برداری گردید و زمانیکه سرعت نفوذ عمقی آهسته گردید، رطوبت خاک به عنوان رطوبت ظرفیت مزرعه در نظر گرفته شد. از آنجایی‌که که شوری محلول خاک، شوری در رطوبت ظرفیت مزرعه در نظر گرفته می‌شود لذا می‌توان از رابطه ۶ شوری عصاره اشباع خاک بدست آورد.

$$ECsw = \frac{\theta_{sp}}{\theta_{fc}} \times ECe \qquad (۶)$$

EC_{sw}: شوری محلول خاک، EC_e: شوری محلول خاک، θ_{sp}: رطوبت اشباع خاک، θ_{fc}: رطوبت ظرفیت مزرعه.

به منظور ارزیابی داده‌های پیش بینی شده بوسیله مدل‌های مختلف و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای، از دو شاخص آماری خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) (کوبایاشی و سالام ، ۲۰۰۰)[5] و شاخص تطابق (d) (ویلموت، ۱۹۸۲)[6] استفاده شد. شاخص RMSE بزرگی میانگین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه گیری شده شوری (داده‌های مزرعه ای) را نشان می‌دهد. مقدار کمتر RMSE، نشاندهنده دقت خوب مدل در انجام پیش بینی بوده است. RMSE از طریق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$RMSE = [\frac{1}{n}\sum (Sim_i - obs_i)^2]^{0.5} \qquad (۷)$$

Sim_i = مقادیر پیش‌بینی شده شوری

obs_i = مقادیر اندازه‌گیری شده شوری

n = تعداد مشاهدات

شاخص دیگری که جهت ارزیابی داده ها استفاده شد شاخص تطابق بود. مقادیر بالای شاخص d نشاندهنده توانایی بالای مدل در پیش بینی است. این شاخص از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|P_i'| + |O_i'|)^2}\right]; O \le d \le 1 \qquad (۸)$$

P_i = مقادیر پیش‌بینی شده شوری

O_i = اندازه‌گیری شده شوری

$P_i' = P_i - \bar{O}$

$O_i' = O_i - \bar{O}$

1- Richards (1954)
2- Shalhevet (1973)
3- Hoffman (1990)
4- Letey and Feng (2007)
5- Kobayashi and Salam, (2000)
6- Willmot (1982)

نتایج و بحث

چون هر یک از مدلها با فرض‌ها و متغیرهای متفاوتی شوری خاک را پیش‌بینی می‌نمایند، بنابراین سطح شوری که بوسیله هر یک از مدل‌ها پیش بینی می‌شود، متفاوت بوده، بر این اساس ابتدا نتایج شوری پیش بینی شده بوسیله هر یک از مدلها مقایسه می‌گردد. برای این منظور از داده‌های مربوط به مزرعه شماره ۳ به عنوان نمونه استفاده شد. سپس نتایج مربوط به ارزیابی هر یک از مدلها با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ارائه می‌گردد.

مقایسه نتایج مدل‌های ماندگار

شوری خاک پیش‌بینی شده با ۳ مدل ماندگار مورد استفاده در این تحقیق به هنگام استفاده از آب مزرعه شماره ۳، با کیفیت ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر (شوری تصحیح شده آب ۶/۲ دسی‌زیمنس بر متر) در شکل ۱ ارائه شده است. نتایج شوری خاک به عنوان تابعی از نسبت آبشویی در مدلهای مختلف، مقادیر متفاوتی را نشان داد.

مدل CWPF[1]

مقایسه نتایج حاصل از این مدل با سایر مدل‌های مورد استفاده نشان داد مدل CWPF شوری خاک را بیش از مدل‌های دیگر پیش بینی کرد (شکل ۱). از این رو می توان نتیجه گرفت که زمانی که از این مدل برای پیش بینی شوری خاک برای مدیریت آبیاری استفاده می شود، مقدار آب بیشتری برای حصول به عملکردهای پتانسیل در نظر گرفته شود.کوروین و همکاران (۲۰۰۶) که از این مدل برای برآورد نیاز آبشویی گیاه استفاده نمودند گزارش کردند که این مدل نیاز آبشویی را بیش از نیاز واقعی گیاه پیش بینی می‌کند و علت آن پیش بینی بیشتر شوری خاک است. بنابراین هنگام استفاده از این مدل بایستی کارایی مصرف آب و بهره‌وری اقتصادی از آب ارزیابی شده تا مقدار آبی که سبب دستیابی به عملکرد اقتصادی و بهره‌وری مناسب آب می‌شود، برآورد گردد. علت برآورد بیشتر شوری بوسیله مدل CWPF این است که مدل بر اساس روابط اولیه توازن آب و نمک، شوری خاک را پیش بینی می‌نماید. بدین ترتیب که شوری منطقه‌ای از ریشه که بیشترین غلظت نمکها را دارا می باشد یعنی شوری خاک در پایین منطقه ریشه یا شوری آب زهکش را پیش بینی می‌کند.

مدل watsuit

کمترین مقدار شوری خاک پیش بینی شده بوسیله مدل watsuit بدست آمد. این مدل واکنشهای شیمیایی که سبب حذف نمکها در فرایند ترسیب می شوند را در توازن نمک در نظر می گیرد. در اغلب خاکهای تحت آبیاری همواره واکنشهای شیمیایی که منجر به انحلال و یا ترسیب نمک می شوند در حال انجام بوده و ممکن است در اثر این واکنشها مقداری نمک به محلول خاک اضافه شده و یا از آن خارج گردد. از این رو شوری که از طریق این مدل محاسبه می گردد ممکن است کمتر، مساوی و یا بیشتر از شوری مورد انتظار گردد. بسیاری از منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک از نظر کربنات کلسیم اشباع بوده و برخی دیگر از آبها نیز دارای مقادیر زیادی یون سولفات هستند. میزان این آنیون در برخی از منابع آبی به حدی است که سبب ترسیب آن به صورت گچ در خاک می شود. اثرات شوری، با آبهای دارای مقادیر زیاد آنیونهای رسوب دهنده و میزان کلسیم و منیزیم بالا، کاهش می یابد. بر این اساس، پیش بینی شوری خاک با استفاده از مدلهایی که واکنشهای شیمیایی شوری منطقه ریشه را در نظر می گیرند، دقیق‌تر است. ارزیابی های انجام شده بر روی آبهای استان فارس با استفاده از شاخص اشباع نشان داد در اغلب موارد، آب از لحاظ کانیهای کلسیت و آراگونیت اشباع بود (چراغی و رسولی، ۱۳۸۷). از این رو به هنگام تغلیظ محلول خاک، بخشی از یونها تشکیل رسوب داده و از فاز مایع خارج و به فاز جامد افزوده می گردد. بنابراین، تصحیحات لازم برای خروج این یونها بایستی صورت پذیرد. در کلیه آبهای مورد مطالعه واکنش تشکیل رسوب محتمل بود (نتایج، نشان داده نشده است) شکل های ۲ و ۳ که از داده های مزرعه شماره ۳ بدست آمده است، نشان می دهد فرایند ترسیب، یک عامل مهم در کاهش میانگین شوری خاک منطقه ریشه به ویژه در جزء آبشویی های پایین بوده است.

مدلهای هافمن و ونگنوختن

مدلهای هافمن و ونگنوختن شوری خاک را کمتر از مدل CWPF و بیشتر از مدل WATSUIT پیش بینی کردند. این مدلها شوری را بدون در نظر گرفتن واکنشهای شیمیایی خاک و تنها بر اساس الگوی جذب آب پیش بینی می‌نمایند. در مدل نمایی، جذب آب عمدتاً از یک چهارم بالایی منطقه ریشه صورت می گیرد. به طوری که ۷۱ درصد آب از این ناحیه جذب ریشه گیاه می‌گردد. جذب آب از یک چهارم دوم، سوم وچهارم منطقه ریشه به ترتیب ۲۱، ۷ و۱ درصد فرض شده است. در مدل ذوزنقه‌ای و ۴۰-۳۰-۲۰- ۱۰ نیز بیشترین جذب آب از ناحیه فوقانی منطقه ریشه صورت می‌گیرد. در مدل ذوزنقه از ربع اول تا ربع چهارم منطقه ریشه جذب آب به ترتیب ۵۰، ۳۵، ۱۴ و ۱ درصد فرض شده است (هافمن و

1- Crop water production function

ونگنوختن، ۱۹۸۳). در شرایط ماندگار و در یک غلظت مشخص از آب آبیاری، توزیع متفاوت در جذب آب سبب توزیع متفاوت شوری خاک می‌شود. با میانگین‌گیری خطی، متوسط شوری خاک با مدل نمایی، بیشتر برآورد گردید و مدل ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ نسبت به دو تابع دیگر غلظت نمکها را کمتر پیش‌بینی نمود. مدل watsuit نیز با فرض الگوی جذب ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ شوری خاک را برآورد می‌کند. با این تفاوت که در مدل فوق از احتمال وقوع واکنشهای شیمیایی در خاک، صرفنظر شده است. در مواردی که واکنشهای انحلال و ترسیب از اهمیت کمتری برخوردار باشند، انتظار می‌رود نتایج مشابهی از هر دو مدل بدست آید.

در تحقیق حاضر ضریب تبیین(R^2) مربوط به شوری اندازه گیری شده در منطقه ریشه و مقادیر پیش بینی شده بوسیله مدلها (بجز مدلCWPF) بین ۰/۹۹۴ تا ۰/۹۳۵ بود. ضریب تبیین در مدل CWPF ، ۰/۴۰۴ بدست آمد.

نتایج حاصل از خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) و شاخص تطابق (d) محاسبه شده برای هر یک از مدلها در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، خطای حاصله در مدل جذب آب ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ هافمن و ونگنوختن از کمترین مقدار برخوردار بود. بدین ترتیب توانایی این مدل در پیش بینی شوری خاک از سایر مدل ها بیشتر بود. خطای متوسط مدل نمایی هافمن و ونگنوختن و مدل watsuit نیز حاکی از مناسب بودن این مدلها برای پیش بینی شوری خاک است. شاخص d نیز نشان داد که مدلهای هافمن و ونگنوختن و مدل watsuit از قابلیت کافی برای پیش بینی شوری خاک برخوردار می باشند. مدل CWPF شوری خاک را با خطای زیادی پیش بینی نموده از این رو مدل مناسبی در پیش بینی شوری خاک بشمار نمی آید.

ارزیابی مدلهای ماندگار

مقایسه شوری پیش بینی شده خاک با مدلهای مختلف و شوری اندازه‌گیری شده در مزارع در شکل ۵ نشان داده شده است.

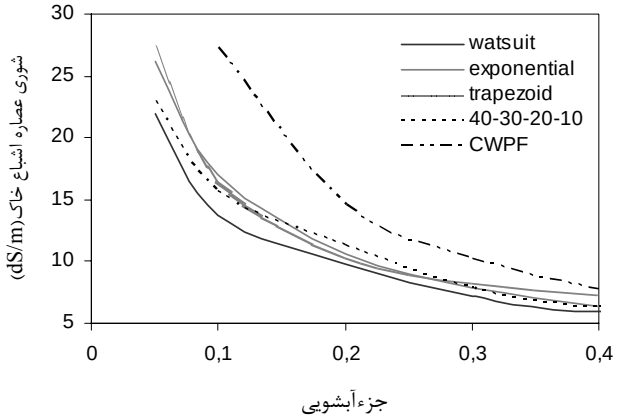
مدلهای مورد استفاده مدلهایی می‌باشند که با فرض ماندگاری شرایط خاک از لحاظ رطوبت و نمک توسعه یافته‌اند. در شرایط ماندگار وثابت، پارامترهای خاک (رطوبت و شوری) در هر نقطه از نیمرخ، با گذشت زمان تغییر نمی‌کنند. بنابراین عواملی نظیر بارندگی در پیش بینی این گونه مدلها در نظر گرفته نشده و تنها بر اساس استفاده مستمر از یک منبع آب، شوری خاک پیش بینی می‌گردد. از این رو انتظار می‌رود مقادیر پیش بینی شده بوسیله مدل، نامطلوب ترین شرایط شوری خاک را نشان دهد. این شرایط انتظار می‌رود با شرایط واقعی مزرعه مطابقت نداشته و شوری خاک با اختلاف زیادی نسبت به شوری مزرعه پیش بینی می‌گردد. با این حال تحقیقات اخیر لتی و همکاران (۲۰۰۷)[1] و کوروین و همکاران (۲۰۰۶) [2]نشان داد اگرچه مدلهای ماندگار غلظت نمکها را اندکی محافظه‌کارانه پیش بینی می نمایند، با این حال مقایسه نتایج بدست آمده از این مدلها با مدلهای غیر ماندگار تفاوت زیادی را در پیش بینی شوری خاک نشان ندادند. لازم به ذکر است که شرایط حاکم و غالب هر منطقه، استفاده از هر یک از مدلهای ماندگار را تعیین می نماید. به عنوان مثال در تحقیقات کوروین و همکاران (۲۰۰۶) هر دو مدل UNSATCHEM (مدل غیر ماندگار) و مدل watsuit (مدل ماندگار) به عنوان مدلهای مناسب در پیش بینی شوری خاک معرفی شدند. زیرا فرایند غالب در منطقه مورد مطالعه آنان واکنشهای شیمیایی در خاک بود و چون هر دو مدل قادر به شبیه سازی شوری خاک با احتساب این فرایند می باشند، لذا پیش بینی این مدلها با شرایط واقعی مطابقت داشت. لتی و همکاران (۲۰۰۷) تصحیح شوری آب آبیاری با آب باران (بر اساس میانگین وزنی) را مناسب ترین راهکار در جهت کاربرد مدلهای ماندگار در شرایطی وقوع بارندگی می دانند، از این رو در تحقیق حاضر نیز از این روش استفاده شد. تحقیقات چراغی و رسولی (۱۳۸۷) در اراضی شور استان فارس نشان داد در بسیاری از مزارع، در طول فصل رشد به ویژه در فصل آبیاری، تغییرات نمکها در قسمتهای مختلف منطقه ریشه از توزیع یکنواختی تبعیت کرد. در مطالعه فوق با مقایسه ۳ مدل هافمن و ونگنوختن نشان داده شد با در نظر گرفتن میانگین شوری در کل فصل رشد، در جز آبشویی ۳۰ درصد همبستگی مطلوبی بین پیش بینی شوری خاک بوسیله مدل نمایی هافمن و ونگنوختن و شوری خاک اندازه‌گیری شده در طول فصل رشد گندم بدست آمد. در مطالعه حاضر اگرچه مدلهای هافمن و ونگنوختن مدلهای مناسبی ارزیابی گردیدند با این حال مدل نمایی و ذوزنقه ای شوری خاک را نسبت به مدل ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ بیشتر پیش بینی کردند. علت این امر احتمالاً مربوط به متفاوت بودن الگوی جذب آب در مزارع مورد مطالعه با الگوی فرض شده در این دو مدل است. در اغلب مزارع، شوری خاک در منطقه ریشه دارای توزیع یکنواخت بود (چراغی و رسولی، ۱۳۸۷)، بدین مفهوم که ارجحیت زیاد جذب آب که به لایه سطحی داده

1- Letey et al, (2007)
2- Corwin et al (2006)

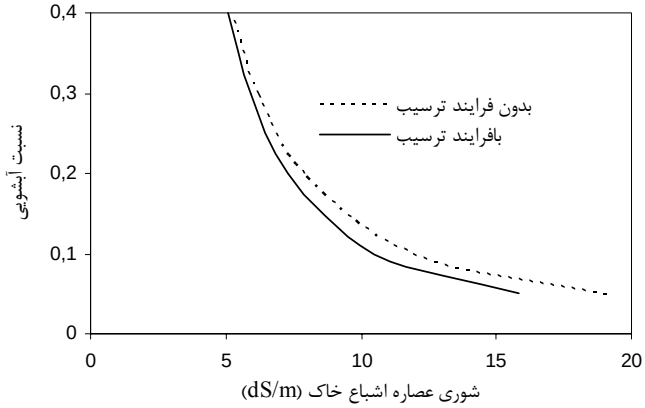
شده است در شرایط واقعی چندان حاکم نمی باشد. مدل CWPF تقریباً در کلیه نقاط، شوری را بیش از شوری اندازه گیری شده در مزارع پیش بینی کرد. علت آن این است که این مدل در حقیقت شوری زه آب خروجی از منطقه ریشه را پیش بینی می کند و این شوری بیش از شوری واقعی در منطقه ریشه می باشد. به طور کلی می توان نتیجه گیری کرد که مدل WATSUIT و مدلهای هافمن و ونگنوختن، مدلهایی هستند که در شرایط استان فارس می توان از آنها برای پیش بینی شوری خاک استفاده نمود. در حالیکه مدل CWPF مدل مناسبی نیست.

نتیجه‌گیری

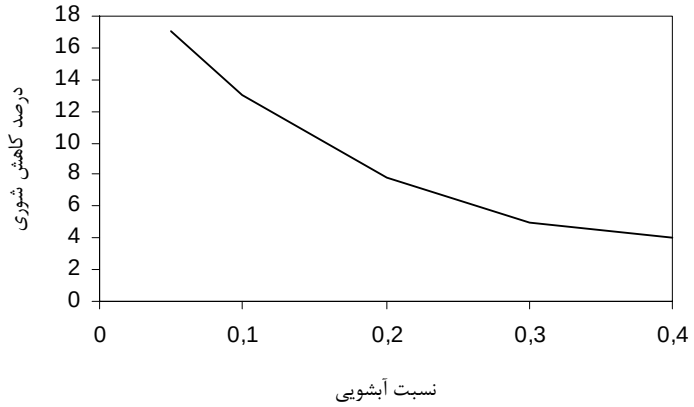
افزایش مقدار نمک آب آبیاری، افزایش نمک در محلول خاک را به دنبال دارد. این افزایش به عواملی از قبیل میزان بارش، ترکیب یونی آب آبیاری، میزان آبشویی، الگوی جذب آب بوسیله ریشه، عملکرد گیاه و خصوصیات فیزیکی خاک بستگی دارد. عوامل ذکر شده واثرات متقابل بین آنها از پیچیدگی بسیار زیادی برخوردار است. قابلیت مدلهای ریاضی در پیش بینی پاسخ سیستم های زراعی به شرایط پیچیده وامکان ادغام اثرات متغیرها را به دنبال داشته و بهره برداری صحیح از آبهای شور، ارزیابی تناسب آب و انتخاب گزینه‌های مدیریتی مناسب در شرایط شور را امکان پذیر می‌نماید. از بین ۵ مدل ماندگار مورد استفاده در این مطالعه مدل watsuit واکنشهایی شیمیایی که سبب حذف نمکها در فرایند ترسیب می شوند را در توازن نمک به حساب می‌آورد. مدل های هافمن و ونگنوختن بر اساس مدلهای مختلف جذب آب شوری خاک را پیش بینی می نمایند و در مدل CWPF تأثیر نمک بر تبخیر و تعرق گیاه و پیش بینی شوری خاک در نظر گرفته می شود. مقایسه بین داده های پیش‌بینی شده و اندازه گیری شده نشان داد مدلهای هافمن و ونگنوختن، مدلهایی هستند که در شرایط استان فارس می توان از آنها برای پیش بینی شوری خاک استفاده نمود. مدل CWPF شوری خاک را با خطای زیادی پیش بینی نموده از این رو مدل مناسبی در پیش بینی شوری خاک محسوب نمی شود.



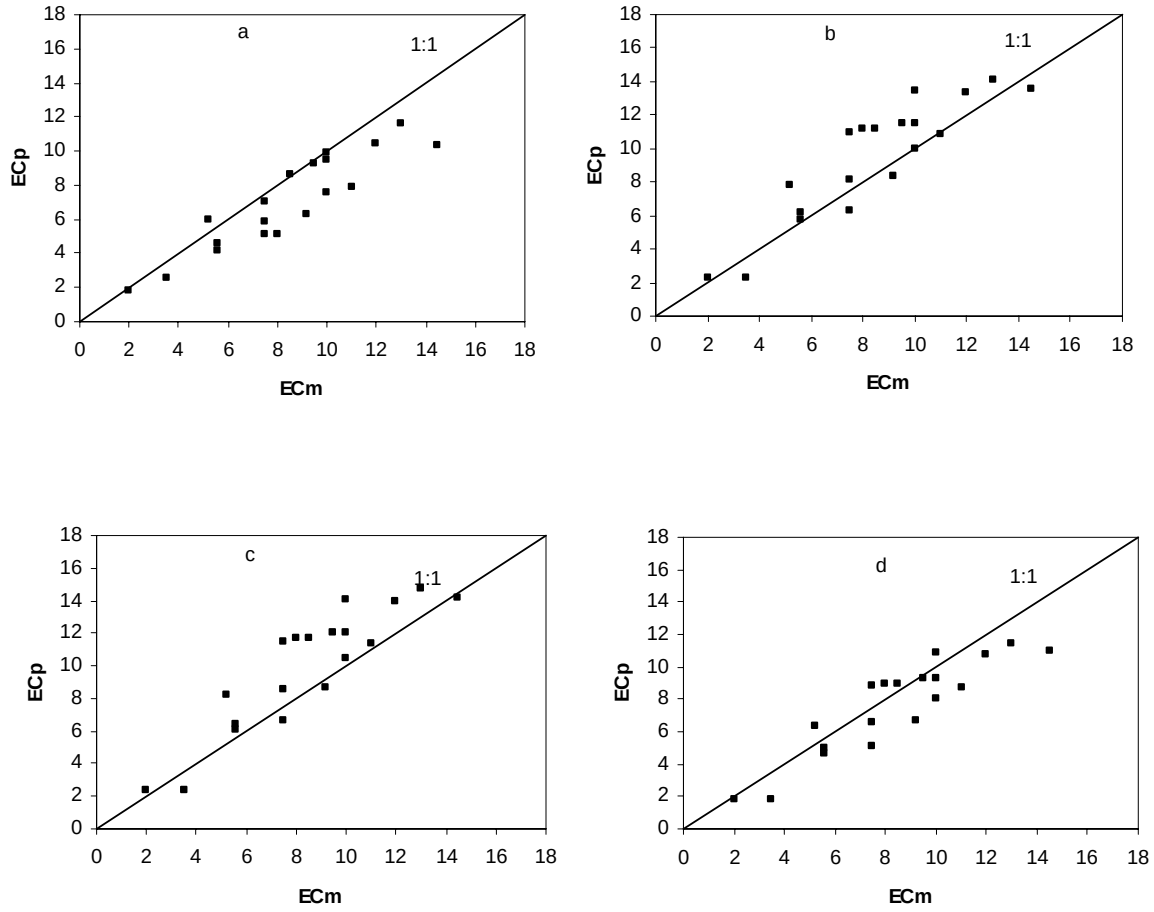
شکل ۱- پیش بینی شوری خاک بوسیله مدلهای مختلف به عنوان تابعی از جز آبشویی

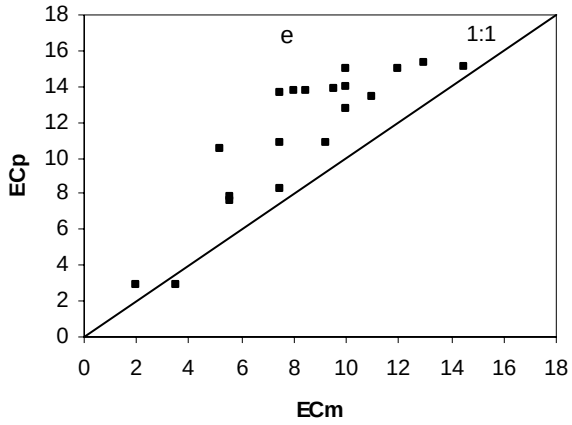


شکل ۲- شبیه سازی مدل watsuit– میانگین شوری خاک با و بدون برداشت نمک در فرایند تشکیل رسوب و رابطه آن با جزءآبشویی



شکل ۳- شبیه سازی مدل watsuit - درصد کاهش غلظت نمک در محلول خاک در اثر فرایند تشکیل رسوب و رابطه آن با جزء آبشویی





شکل ۴- برازش شوری خاک پیش‌بینی شده با مدل و اندازه‌گیری شده در مزرعه .a: مدل watsuit، b: مدل نمایی جذب آب هافمن و ونگنوختن، c: مدل ذوزنقه‌ای جذب آب هافمن و ونگنوختن، d: مدل ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰ درصد جذب آب هافمن و ونگنوختن، e: مدل تابع تولید آب- محصول (CWPF)

ECp: شوری عصاره اشباع خاک پیش‌بینی شده با مدل. ECm: شوری عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آب آبیاری در مزارع مورد مطالعه

شماره مزرعه	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	HCO_3^{-}
			Meq/l				
۱	۱۱/۳۰	۱۹/۱۰	۴۲/۵۰	۰/۰۵	۸/۱۰	۵۹	۵/۸
۲	۲/۲	۸/۴	۵۲/۵	۰/۰۴	۱	۴۵	۸/۵
۳	۹	۲۱	۶۷	۰/۰۶	۱۰	۷۹/۲۰	۷/۶
۴	۷/۱۰	۱۱/۶۰	۳۳/۴۰	۰/۰۱	۷/۵۰	۳۹	۵/۹
۵	۶/۹	۱۵/۹	۵۲	۰/۱	۱۴/۲۰	۵۴/۳	۵/۶
۶	۲/۲	۸/۴	۵۲/۵	۰/۰۵	۱/۵	۴۵	۸/۵
۷	۴۲	۱۸	۷۳	۰/۱	۲۰/۹۰	۱۰۹	۲/۵
۸	۳۰	۲۴	۵۸	۰/۱	۵۲	۵۹	۱
۹	۱۸/۶	۲۱	۲۸/۲	۰/۰۹	۳/۲	۴۷	۱۸
۱۰	۵۶	۱۰/۴۰	۵۰/۱۰	۰/۰۵	۱۳/۵	۱۲۸	۵/۲
۱۱	۴۲/۶	۴۸/۳	۵۱/۱۰	۰/۱	۶	۱۱۹/۵	۱۰/۲۰
۱۲	۴۶/۳۰	۵۶/۴۰	۳۹/۸۰	۰/۱	۱۵/۷۸	۱۲۳/۵	۴/۲
۱۳	۸/۵	۱۶/۳۰	۵۵/۳۰	۰/۶۵	۷/۱۰	۶۹/۳۰	۴/۳
۱۴	۶/۷۰	۲۱	۱۱۰	۰/۰۹	۸/۳۰	۱۲۲	۷/۱۰
۱۵	۶/۷۰	۲۱	۱۱۰	۰/۰۹	۸/۳۰	۱۲۲	۷/۱۰
۱۶	۶/۷۰	۲۱	۱۱۰	۰/۰۹	۸/۳۰	۱۲۲	۷/۱۰
۱۷	۴/۶	۹/۱۰	۵۱/۱۰	۰/۰۸	۱	۴۷/۲	۹/۵
۱۸	۱/۳	۳/۵	۲۷/۶	۰/۰۵	۱۰/۸	۱۵/۶	۶/۹
۱۹	۱۱/۷	۲۵/۷	۶۴/۶	۰/۰۵	۱۲/۶	۸۳/۳	۱۲/۶

جدول ۲ - شوری آب مزارع مورد مطالعه (دسی زیمنس بر متر)

شماره مزرعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
ECiw	۹/۴	۶	۷/۶	۵/۴	۷/۳	۳	۱۲/۵	۱۰/۴	۶/۵	۱۴	۱۴	۱۳/۴	۸/۲	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۰/۵	۲/۲	۱۰/۴
EC'iw	۷/۸	۵	۶/۴	۴/۵	۶/۲	۱/۸	۸/۸	۸/۶	۴/۸	۱۰/۷	۱۰/۶	۱۰/۵	۶/۵	۹	۹	۱۱/۱	۸/۸	۱/۸	۸/۵

ECiw: شوری آب آبیاری، EC'iw : شوری تصحیح شده آب آبیاری

جدول ۳- خطای متوسط مجذور مربعات (RMSE) و شاخص تطابق (d) برای مقادیر شوری خاک اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده

شاخص	مدلهای ماندگار				
	WATSUIT	نمایی جذب آب	ذوزنقه ای جذب آب	۱۰-۲۰-۳۰-۴۰	CWPF
RMSE	۱/۸۸	۱/۸۱	۲/۱۳	۱/۵۹	۳/۵۰
d	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۷۸

فهرست منابع:

۱. چراغی، س. ع. م. و ف. رسولی. ۱۳۸۷. ارزیابی مدیریتهای بهره برداری از منابع آب و خاک شور اراضی تحت کشت گندم مناطق مختلف کشور. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات شوری، شماره ثبت ۸۷/۷۹۲.

۲. رسولی ف. و ع. کیانی پویا. ۱۳۸۹. استفاده از مدل WATSUIT برای پیش بینی ترکیب شیمیایی محلول خاک اصلاح شده با گچ. پژوهشهای خاک. جلد ۲۴. شماره۲ (در دست انتشار).

۳. رنجبر. غ. ح. ، ع. نوری نیا، ح. امین، م. صالحی، ع. کیانی پویا و ه. حاجی آخوندی میبدی.۱۳۸۶. ارزیابی مقدماتی عملکرد و پایداری عملکرد ژنوتیپ های متحمل به شوری گندم. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات شوری.

۴. هاشمی نژاد. ی. ۱۳۸۷. بررسی چگونگی حرکت املاح زیر منطقه توسعه ریشه اراضی تحت آبیاری شمال دشت یزد – اردکان. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی مرکز ملی تحقیقات شوری.

5. Corwin, D. L., J. D. Rhoades, and J. Simunek. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady- state versus transient models. Agric. Water Manag. 90: 165-180.
6. Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper n. 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
7. Ferrer F. A. and C. O. Stockle. 1999. A model for assessing crop response to salinity. Irrig. Sci 19: 15–23
8. Gardener.W. R. 1983. Soil properties and efficient water use: An overview. In: Taylor, H. M., Jordan, W. R. Sinclair, T.R. (Eds.) Limitatioms to efficient water use in crop production. American Society of Agronomy, Madison, W.I. pp. 45-64
9. Hao, X., R. Zhang, and A, Kravchenko. 2005. Effect or root density distribution models on root water uptake and water flow under irrigation. Soil Sci. 170(3): 167-174.
10. Hoffman, G. J and M. T. Van Genuchten, (1983). Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. In: H.M. Taylor, Jordan, W. R., Sinclair, T. R. Limitation to efficient water use in crop production. USA: ASA,CSSA,SSSA.(pp,73-85)
11. Hoffman, G., 1985. Drainage required managing salinity. J. Irrig.Drain. Div. ASCE 111, 199–206.
12. Hoffman, G. J. (1990). Leaching fraction and root zone salinity control. In K. K. Tanji. Agricultural salinity assessment and management. (pp.237-261), New york, ASCE.
13. Kobayashi, K., Salam, M. U., 2000. Comparing simulated and measured values using mean aquared deviation and its components, Agron. J. 92, 345-352.
14. Letey, J., A. Dinar and K.C. Knapp.1985. Crop water production function model for saline irrigation waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 1005-1009.
15. Letey , J., Feng, G. L. M.(2007 b).Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters. Agricultural water management 91 : 1 – 10.
16. Mass, E. V. & G. Hoffman.1977. Crop salt tolerance: current assessment. Journal Irrigation Science, 10, 29-40.
17. Rhoades, J. D., A.. Kandiah, A. M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. Rome: Food Agriculture Organization of the United Nations (FAO).NO.48.

18. Richardes. L. A. Editor.1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils USDA Agri Handbook NO.60. Washington,DC:USDA.
19. Shalhevet, J. 1976. Irrigation with saline water. In: B. Yaron, E. Danfors and Y. Vaadia, (Eds.), Arid Zone Irrigation. Chapman and Hall .(pp.298-318).New York: Springer-Verlog Berlin Heidelberg.
20. Soloman, K. H. 1985. Water salinity production function. Trans ASAE 28, 1975-1980.
21. Willmott, C. S. 1982. Some Comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meterol. Soc. 63: 1309-1313.