

اثر تنش شوری و رژیم آبیاری بر عملکرد برنج و کارایی مصرف آب در خاک‌های ترک‌دار شالیزاری

علی‌اشرف صدرالدینی^۱ و فاطمه سلحشور دلیوند^{۲*}

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز، ۲- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۱۴ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲)

چکیده

روش غالب آبیاری در شالیزارهای ایران روش غرقابی با جریان مداوم در طول فصل رشد است که در هنگام کمبود آب به روش‌های تناوبی تغییر می‌یابد. از سوی دیگر خشکسالی‌های متعدد سال‌های اخیر و نیز اجرا و بهره‌برداری از سدهای متعدد در حوضه آبریز رودخانه سپیدرود، کیفیت آب این رودخانه را به طور محسوسی کاهش داده است. در این مطالعه اثر تنش‌های شوری و خشکی بر جریان افقی و عمودی آب در خاک‌های ترک‌دار شالیزاری در حضور گیاه برنج رقم هاشمی (رقم غالب استان گیلان) مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای مورد مطالعه شامل دو استراتژی آبیاری (غرقاب مستمر و دور آبیاری ۶ روز با ارتفاع استغراق ۵ سانتی‌متر برای هر کدام) و تیمارهای تنش شوری با کاربرد آب آبیاری در سه سطح ۲، ۳ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر بود که در دو حالت ترک موئین (۳ میلی‌متر) و ترک متوسط (۲ سانتی‌متر) اعمال شدند. نتایج نشان داد چنانچه ترک‌هایی با اندازه متوسط در سطح مزرعه تشکیل شود، آبیاری مداوم گیاهان حتی با آبی با کیفیت پایین منجر به عملکرد بالاتری نسبت به استفاده از دور آبیاری شش روز خواهد شد. علی‌رغم مصرف کمتر آب در تیمارهای با دور آبیاری ۶ روز، بیشترین بهره‌وری آب مربوط به تیمارهای آبیاری غرقاب در شرایط ترک موئین بود. ترک‌های متوسط ایجاد شده در سطح شالیزار نیز به طور قابل توجهی نشت جانبی را افزایش دادند، اما اثر شوری آب آبیاری بر شدت نشت جانبی معنی‌دار نبود و ترک‌ها بعد از مرطوب کردن خاک بسته نشدند.

واژه‌های کلیدی: برنج، ترک، تنش خشکی، تنش شوری، نشت جانبی، نفوذ عمودی

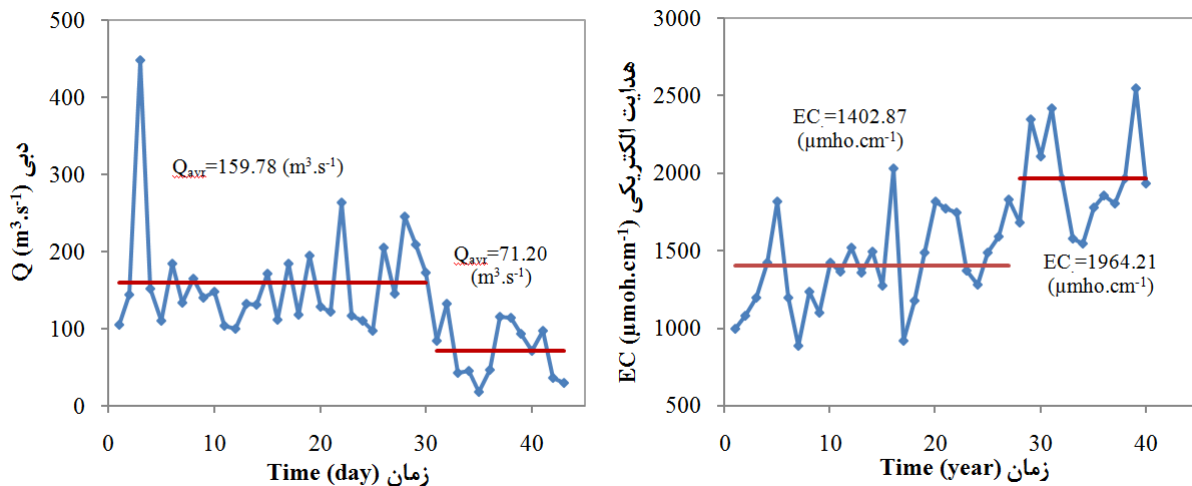
مقدمه

برنج از یک سو به سبب قرار گرفتن در گروه محصولات راهبردی (Shakeri and Garshasbi, 2009) و از سوی دیگر وابسته بودن اقتصاد بخش قابل توجهی از جمعیت ساکن در مناطق شمالی کشور به آن، نیازمند تعاریفی جدید در زمینه چگونگی آبیاری است، زیرا آب مهم‌ترین عامل محدود کننده تولید گیاه برنج در این زمین‌ها و از طرفی آبیاری مهم‌ترین عملیاتی است که لازم است در زراعت برنج برای گل‌خرابی و نگهداری بهتر آب در خاک، سهولت نشاکاری، کنترل علف هرز، بهبود تغذیه و تأمین آب مورد نیاز گیاه برنج انجام شود. کشاورزان آسیایی، آبیاری برنج بصورت غرقاب را به سبب پیش‌گیری از بروز ترک در سطح مزرعه و نیز کنترل علف‌های هرز ترجیح می‌دهند (Islam et al., 2004) اما محدودیت منابع آبی تغییر این شیوه آبیاری را اجتناب‌ناپذیر ساخته است.

منبع اصلی تأمین آب در استان گیلان رودخانه سپیدرود است که در سال‌های اخیر به سبب خشک سالی‌های پی در پی و برنامه احداث سدهای متعدد در قسمت‌های بالادست حوضه، آورد آن به داخل استان کاهش یافته (JICA, 2012) و پیش‌بینی می‌شود علاوه بر کاهش قابل توجه حجم آب ورودی به مخزن سد سپیدرود، کیفیت آن نیز کاهش یابد (شکل ۱). در شرایط کنونی کمبود آب از طریق اعمال تناوب آبیاری در سطوح کانال‌های درجه ۱ و ۲ شبکه آبیاری و زهکشی سپیدرود جبران می‌شود اما این مسئله به ویژه در شرایط محدودیت آب و افزایش فاصله تناوب موجب ایجاد ترک در سطح شالیزارها شده و چنانچه اندازه‌این ترک‌ها گسترش یابد، راندمان کاربرد آب به شدت کاهش می‌یابد (Rezaei and Nahvi, 2003; Azarmsa and Rashtchi, 2005). از سوی دیگر خصوصیات انبساط و انقباض خاک به عوامل متعددی وابسته است که مهم‌ترین آن‌ها نوع و میزان رس موجود در خاک است (Dinka and Lascano, 2012). مقدار رس موجود در بیشتر خاک‌های شالیزاری استان گیلان بالا و کانی غالب در این خاک‌ها از نوع متورم شونده (اسمکتیت) است (Kavoosi, 1999; Davatgar et al., 2006)، بنابراین خاک‌های این استان از پتانسیل بالایی

برای انقباض و بروز ترک برخوردارند. به طور کلی در شالیزارها حرکت عمده آب عمودی و لایه سخت شخم عامل اصلی کنترل کننده سرعت نفوذ آب است. اصولاً حرکت افقی آب (نشت جانبی) به وسیله بار فشار آب متفاوت بین کرت‌ها ایجاد می‌شود و چون برنج در محدوده وسیع و به صورت یکپارچه کشت می‌شود، نشت جانبی ناچیز است (Chen et al., 2002). تحقیقاتی نیز وجود دارد که نشت جانبی را عامل اصلی راندمان پایین مصرف آب در مزرعه‌های برنج نشان می‌دهد (Walker and Rushton, 1984, Tuong et al., 1994) که البته علت آن آسیب‌دیدگی مرزها به سبب منافذ ایجاد شده توسط حیوانات، حفره‌های باقیمانده ناشی از پوسیدگی ریشه‌های گیاهان و تخلخل‌های درشت خاک بیان شده است.

جریان آب در خاک‌های ترک خورده شامل دو قسمت جریان سریع در ترک‌ها و جریان بسیار آهسته در خاک‌های آماس‌پذیر است (Yong and Warkentin, 1966; Mori et al., 1999; Bethune and Turrall, 2001). اسلام و همکاران (Islam et al., 2004) نشان دادند که مدیریت آب در خاک‌های ترک‌دار، بزرگ‌ترین مشکل برای مصرف آب در این‌گونه خاک‌ها است. ترک‌ها ممکن است بعد از مرطوب کردن خاک بسته نشوند و جریان جانبی تا گل‌خرابی مجدد خاک ادامه داشته باشد (Ishiguro, 1992; Toung et al., 1996) بنابراین کاهش در این تلفات منجر به بهبود راندمان مصرف آب در برنج می‌شود. لیو و همکاران (Liu et al., 2003) نشان دادند که در خاک‌های شالیزاری درز و ترک‌دار، سرعت نفوذ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بتون و تورال (Bethune and Turrall, 2001) نشان دادند حجم جریان ترجیحی از ترک‌ها در مقایسه با حرکت مؤئینه‌ای دارای تفاوت معنی‌داری است. جانسن و لنارتز (Janssen and Lennartz 2007) نشان دادند جریان ترجیحی افقی در حرکت آب و املاح در سطح خاک‌های ترک‌دار مزارع غالب است که بیانگر هدر رفت بالای آب در طول آماده‌سازی زمین حتی با وجود سخت لایه شخم است. علاوه بر این، انتقال ترجیحی جریان جانبی آب و املاح از راه ترک‌های دائم و منفذهای درشت ریشه‌ها به سوی نقاط گل‌خراش نشده تهدیدی برای کیفیت آب زیرزمینی



شکل ۱- سری زمانی داده‌های دبی و هدایت الکتریکی متوسط سالانه رودخانه سپیدرود طی ۴۳ سال گذشته در ایستگاه رودبار.

Figure 1. Time series of mean annually discharge and electrical conductivity of Sepidroud river during 43 recent years in Roudbur station.

اعلام شد. همچنین آنان وابستگی سرعت نفوذ به سن مزرعه را اثبات نمودند به طوری که متوسط سرعت نفوذ در مزرعه‌هایی با قدمت ۳، ۲۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب ۲۸، ۰/۷۹ و ۰/۱۶ سانتی‌متر در روز بود که علت این امر نیز انجام عملیات گلخیزی یا پادینگ و ضخیم‌تر شدن سخت لایه شخم در مزارع شالیزایی بیان شد. بومن و همکاران (Bouman *et al.*, 2007) هدر رفت آب مصرفی توسط رواناب، نشت جانبی و نفوذ عمقی را در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد آب ورودی به خاک‌های سنگین با سطح ایستابی کم عمق (۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) و ۵۰ تا ۸۵ درصد در خاک‌های با بافت درشت و سطح ایستابی عمیق (۱/۵ متر) گزارش نمودند. حافظ و همکاران (Hafeez *et al.*, 2007) نشان دادند بین ۲۵ تا ۸۵ درصد از آب مصرفی در مزرعه‌های برنج (بدون ترک) از طریق نشت و نفوذ از دسترس خارج می‌شود. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (Mostafazadeh-Fard *et al.*, 2010) با بررسی مقدار آبیاری بر اساس میزان توسعه ترک در کرت‌های شالیزایی نشان دادند که کاهش عمق آبیاری در خاک‌های شالیزایی ترک‌دار منجر به افزایش ۳۶/۵ درصدی بهره‌وری آب می‌شود.

گیاه برنج در طبقه‌بندی ارائه شده توسط سازمان خوار و بار جهانی در گروه گیاهان حساس به شوری قرار دارد (Allen *et al.*, 1998). اچ و ووپیز (Asch and Wopereis, 2001) نشان دادند آبیاری غرقابی برنج با آب‌هایی با شوری تا 2 dsm^{-1} کاهش نمی‌دهد اما در شوری‌های بیش از این مقدار و چنانچه شوری در مرحله خوشه‌دهی اعمال شود عملکرد می‌تواند تا یک تن در هکتار به ازای هر واحد افزایش شوری آب، کاهش یابد. زینگ و شانون (Zeng and Shannon, 2000) نشان دادند که عملکرد و اجزای عملکرد برنج به طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با افزایش سطح شوری آب آبیاری به بیش از ۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش می‌یابند، اما این گیاه قادر به تحمل طولانی مدت شوری‌هایی کمتر از حد بحرانی است. کاوسی و مجللی (Kavoosi and Mojalali, 1996) نرخ کاهش عملکرد را برای ارقام سپیدرود و خزر (از ارقام پر محصول) و حسن‌سرای (از ارقام بومی) به ترتیب برابر ۱۸، ۱۴/۲ و ۱۱/۶ درصد به ازای هر واحد افزایش شوری خاک گزارش کردند و شوری آستانه کاهش عملکرد در این سه رقم را به ترتیب برابر با ۲/۰، ۲/۲۷ و ۲/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر اعلام نمودند. شبیه‌سازی اثر توأم تنش‌های شوری و خشکی بر گیاه برنج رقم هاشمی نشان داد که حد آستانه تحمل این گیاه نسبت به شوری محلول خاک برابر با ۲/۸۳ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار رطوبت حجمی آستانه کاهش جذب آب برابر با ۰/۵۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب (معادل مکش ۲۵۱ سانتی‌متر) است (نتایج منتشر نشده است).

گیاه برنج در طبقه‌بندی ارائه شده توسط سازمان خوار و بار جهانی در گروه گیاهان حساس به شوری قرار دارد (Allen *et al.*, 1998). اچ و ووپیز (Asch and Wopereis, 2001) نشان دادند آبیاری غرقابی برنج با آب‌هایی با شوری تا 2 dsm^{-1} کاهش نمی‌دهد اما در شوری‌های بیش از این مقدار و چنانچه شوری در مرحله خوشه‌دهی اعمال شود عملکرد می‌تواند تا یک تن در هکتار به ازای هر واحد افزایش شوری آب، کاهش یابد. زینگ و شانون (Zeng and Shannon, 2000) نشان دادند که عملکرد و اجزای عملکرد برنج به طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) با افزایش سطح شوری آب آبیاری به بیش از ۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش می‌یابند، اما این گیاه قادر به تحمل طولانی مدت شوری‌هایی کمتر از حد بحرانی است. کاوسی و مجللی (Kavoosi and Mojalali, 1996) نرخ کاهش عملکرد را برای ارقام سپیدرود و خزر (از ارقام پر محصول) و حسن‌سرای (از ارقام بومی) به ترتیب برابر ۱۸، ۱۴/۲ و ۱۱/۶ درصد به ازای هر واحد افزایش شوری خاک گزارش کردند و شوری آستانه کاهش عملکرد در این سه رقم را به ترتیب برابر با ۲/۰، ۲/۲۷ و ۲/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر اعلام نمودند. شبیه‌سازی اثر توأم تنش‌های شوری و خشکی بر گیاه برنج رقم هاشمی نشان داد که حد آستانه تحمل این گیاه نسبت به شوری محلول خاک برابر با ۲/۸۳ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار رطوبت حجمی آستانه کاهش جذب آب برابر با ۰/۵۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب (معادل مکش ۲۵۱ سانتی‌متر) است (نتایج منتشر نشده است).

ارزیابی چگونگی توسعه ترک و جریان افقی و عمودی آب در خاک‌های ترک‌دار شالیزاری و (۲) بررسی اثر توأم وقوع تنش‌های شوری و خشکی در مرحله‌های پنجه‌زنی و گل‌دهی بر عملکرد و بهره‌وری آب گیاه برنج (رقم هاشمی)، انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در موسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) واقع در واحد فیزیوگرافی دشت‌های آبرفتی استان گیلان، اجرا شد. ارتفاع محل آزمایش ۲۴/۹ از سطح دریای آزاد و میانگین دمای سالانه ۱۵/۸ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی سالانه ۸۰ درصد و میانگین بارندگی ده ساله ۱۱۳۲ میلی‌متر است. خاک محل آزمایش دارای بافت رسی سیلتی بوده و کانی غالب آن از نوع اسمکتیت است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. از ویژگی‌های این منطقه وجود آب زیرزمینی در عمق کمتر از ۱۰ متر و وجود حالت غرقابی در لایه‌های سطحی خاک (تا عمق ۲ متر) در اثر بارندگی و آبیاری است (Mohammadi, 1970; Baghdadi, 1998). برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک مورد مطالعه در مکش‌های صفر، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر از مجموعه ستون آویزان و در هر یک از مکش‌های ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰، ۹۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر سه نمونه خاک اشباع در سلول فشاری قرار داده شد و پس از اعمال فشار و مدت زمان لازم برای رسیدن به تعادل، نمونه‌های خاک از سلول فشاری خارج و رطوبت آن‌ها تعیین شدند. از میانگین رطوبت این سه نمونه به عنوان رطوبت معادل مکش مربوطه استفاده شد. از داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل فن‌گنوختن در نرم‌افزار RETC (Van Genuchten *et al.*, 1991) برای به دست آوردن پارامترهای معادله منحنی مشخصه رطوبتی خاک بهره‌گیری شد. مدل فن‌گنوختن (Van Genuchten, 1980) با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$h = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (1)$$

سپاسخواه و یوسفی فلکدهی (Sepaskhah and Yousofi-Falakdehi, 2010) نشان دادند کاربرد آب آبیاری شور هنگامی که همراه با اعمال تنش خشکی است، عملکرد و اجزای عملکرد برنج را نسبت به حالتی که تنش شوری به تنهایی اعمال شود، به مقدار کمتری کاهش می‌دهد. وویپرز و همکاران (Wopereis *et al.*, 1996) نشان دادند گیاه برنج نسبت به وقوع تنش خشکی در فاز رویشی چنانچه تنش پیش از پنجه‌زنی اتفاق افتد مقاوم بوده و مرحله تشکیل خوشه حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی است. پیرمردیان و همکاران (Pirmoradian *et al.*, 2004) اعلام نمودند برای گیاه برنج آبیاری متناوب (دوره‌های ۱ و ۲ روز) تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد با غرقابی پیوسته ندارد اما بازده کاربرد آب در آبیاری متناوب به میزان ۲۰ تا ۶۰ درصد نسبت به آبیاری غرقابی پیوسته افزایش می‌یابد. اسلام و همکاران (Islam *et al.*, 2003) حد بحرانی ترک و یا آستانه کاهش عملکرد را برای گیاه برنج ۳ میلی‌متر گزارش نمودند. بررسی‌های میدانی نشان داد بروز ترک با عرض متوسط ۲ سانتی‌متر (معادل مکش ۵۴۷ سانتی‌متر)، منجر به کاهش ۲۰ درصدی محصول برنج رقم هاشمی می‌شود (نتایج منتشر نشده است).

کشاورزان گیلانی در سال‌های خشک معمولاً فصل بهار را به هر شکل ممکن با استفاده از ذخیره محدود پشت سد سپیدرود، منابع آب داخلی استان و باران‌های بهاره سپری می‌کنند که این دوره تقریباً مصادف با پایان مرحله پنجه‌زنی است. از این زمان به بعد به سبب کمبود آب در مزارع، احتمال وقوع تنش خشکی و بروز ترک زیاد و چنانچه آبی در اختیار کشاورز قرار گیرد فاقد کیفیت مطلوب و کشاورز ناگزیر به استفاده از آب‌های با کیفیت پایین خواهد بود. بنابراین شبیه‌سازی شرایط پیش‌رو در استان بسیار با اهمیت است. همچنین بر اساس بررسی منابع انجام شده، بیشتر تحقیقات صورت گرفته بر روی گیاه برنج عمدتاً بر مقایسه چگونگی پاسخ ارقام مختلف و یا مقاومت گیاه در مراحل مختلف رشد به تنش‌های شوری و یا خشکی تمرکز داشته‌اند. این مطالعه با هدف: (۱)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physical and chemical properties of experimental field soil

| عمق Depth cm | هدایت الکتریکی EC ds.m ⁻¹ | اسیدیته گل اشباع pH | کربن آلی O.C.% | گنجایش تبادل کاتیونی CEC meq.(100g) ⁻¹ | نیترژن کل N% | پتاسیم قابل جذب K ppm | فسفر قابل جذب P ppm | هدایت هیدرولیکی اشباع Ks mm.d ⁻¹ | جرم مخصوص ظاهری B _d g.cm ⁻³ |
|--------------------|---|------------------------------|----------------------|--|--------------------|--------------------------------|------------------------------|--|--|
| 0-15 | 0.62 | 7 | 1.22 | 35 | 0.137 | 252 | 10.6 | 1.90 | 1.1 |

یکدیگر نساکاری شد. با توجه به این نکته که در فصل بهار و تابستان بیشتر زمین‌های کشاورزی دشت گیلان به کشت گیاه برنج اختصاص یافته و سطح سفره معلق در منطقه بالا می‌رود، دور تا دور منطقه آزمایش زهکش‌های حائل ذوزنقه‌ای با عمق ۱/۵ متر، عرض کف ۰/۵ متر و شیب جانبی یک به دو حفر شد تا از ورود احتمالی جریان‌های زیرسطحی به محل آزمایشی پیشگیری شود. از رقم هاشمی به عنوان رایج‌ترین رقم مورد کشت در استان گیلان استفاده شد. عملیات مربوط به تهیه خزانه با استفاده از بذرهای جوانه‌دار شده، صورت پذیرفت. نیترژن، پتاسیم و فسفر به میزان ۱۵۰، ۶۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار یک روز پیش از نشا در هر کرت بکار رفت. همچنین ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیترژن و ۲۵ کیلوگرم در هکتار پتاسیم در اواسط مرحله پنجه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت. برای مبارزه با کرم ساقه‌خوار و بیماری بلاست از سم‌های دیازینون ۱۰ درصد گرانول و هینوزان به میزان ۱۵ و یک کیلوگرم در هکتار استفاده شد.

به منظور تعیین روند تغییرات شوری و آورد رودخانه سپیدرود، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و دبی متوسط ماهانه و سالانه ۴۳ سال اخیر این رودخانه در ایستگاه شاخص رودبار از بانک اطلاعاتی شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان دریافت شد. همچنین برای شبیه‌سازی کیفیت آب آبیاری و به منظور تعیین املاح غالب رودخانه سپیدرود به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب استان گیلان، داده‌های اندازه‌گیری شده کیفیت آب این رودخانه (شامل کاتیون‌های Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و K^+ و آنیون‌های Cl^- ، CO_3^{2-} ، HCO_3^- و SO_4^{2-}) به همراه pH نیز از بانک اطلاعاتی موجود دریافت شد. با محاسبه نسبت

در این معادله h مکش خاک (cm)، α عکس پتانسیل ماتریک ورود هوا، m و n پارامترهای شکل و θ_s و θ_r رطوبت‌های اشباع و باقیمانده ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) است. مقدار پارامترهای برآورد شده از مدل $\theta_s=0.65$ ، $\theta_r=0.001$ ، $\alpha=0.009\text{ cm}^{-1}$ ، $m=0.177$ و $n=1.215$ می‌باشند. همچنین رطوبت ظرفیت مزرعه (معادل مکش ۳۳۰ سانتی‌متر) و نقطه پژمردگی (معادل مکش ۱۵۰۰ سانتی‌متر) به ترتیب $\theta_{FC}=0.49$ و $\theta_{PWP}=0.22$ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) برآورد شد.

آزمایش مزرعه‌ای به صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل آبیاری در دو سطح: غرقاب مستمر با ارتفاع ۵ سانتی‌متر (I_0) و دور آبیاری ۶ روز (از زمان محو آب از سطح خاک) (I_1) و شوری آب آبیاری در سه سطح: هدایت الکتریکی ۲ (S_0)، ۳ (S_1) و ۴ (S_2) دسی‌زیمنس بر متر بود که این تیمارها در دو سطح ترک مویین (۳ میلی‌متر) (C_0) و ترک متوسط (۲ سانتی‌متر) (C_1) اعمال شدند.

ابعاد کرت‌های مزرعه 150×120 سانتی‌متر بوده و به منظور اجتناب از تداخل حرکت آب در کرت‌ها از یک ورق پلی‌اتیلن ضخیم به عنوان حائل بین کرت‌ها استفاده شد که تا عمق ۳۰ سانتی‌متری در داخل خاک قرار گرفت. در اواسط اردیبهشت ماه کرت‌ها به روش رایج در منطقه شخم زده و گل‌خراش شدند. سپس به منظور اندازه‌گیری نفوذ عمودی استوانه‌هایی با قطر ۶۰ و ارتفاع ۴۲ سانتی‌متر تا عمق ۳۰ سانتی‌متر در خاک مرکز هر کرت قرار داده شد. در ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۰، داخل هر کرت و استوانه گیاهان به صورت خطی و با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از

مربوطه در طی دوره رشد گیاه (بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات مدیری (Modaberi, 2010)) محاسبه شد. با مشخص بودن میزان آب آبیاری، تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی، نشت جانبی با استفاده از معادله بیلان آب برآورد شد (بومن و همکاران، ۲۰۰۱):

$$dsw = I + R + C - E - T - S - RO - D \quad (2)$$

در رابطه ۲ واحد کلیه پارامترها میلی‌متر بر روز و dsw تغییر در ذخیره آب خاک، I مقدار آب آبیاری، R بارش، C صعود مویینه، E تبخیر، T تعرق، S نشت جانبی، RO زهکشی سطحی یا رواناب خروجی از انتهای کرت و D نفوذ عمقی است. متغیرهای بارندگی، صعود مویینه، رواناب خروجی از انتهای کرت به دلیل سر پوشیده بودن محل آزمایش در هنگام بارندگی، پایین بودن سطح آب زیرزمینی منطقه و بسته بودن کرت‌ها برابر صفر قرار داده شد.

متغیرهای عملکرد دانه، درصد پوکی، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک و کارایی مصرف آب (از طریق تقسیم عملکرد بر مقدار آب مصرفی) در انتهای فصل کشت مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. تجزیه‌های آماری واریانس و مقایسه میانگین با استفاده از نرم‌افزار *MSTATC* و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار *Excel* 2007 انجام شد.

نتایج و بحث

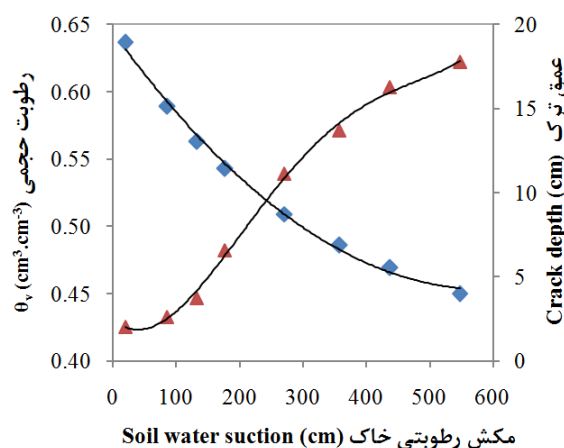
توسعه ترک و انتقال آب و املاح

از ابتدای فصل کشت تا پیش از اعمال تیمارها، به علت ایزوله کردن کرت‌ها با ورق پلی‌اتیلن نشت جانبی ناچیز و تنها نفوذ عمودی به میزان ۱/۹ میلی‌متر در روز وجود داشت که این مقدار با یافته‌های رضوی‌پور (Razavipour, 1999) در توافق است. بومن و تانگ (Bouman and Toung, 2000) نشان دادند که عملیات گلخراپی با از بین بردن خاکدانه‌ها و تبدیل منافذ درشت خاک به فضاهای منفذی کوچک منجر به کاهش حرکت عمودی آب می‌شود. همچنین وجود لایه سخت شخم نیز منجر به کاهش نفوذ عمودی می‌شود. در پایان مرحله پنجه‌زنی و در سه روز پس از قطع آب ترک‌های مویین، با عرض متوسط ۳ میلی‌متر در سطح مزرعه ظاهر شدند که در این زمان میزان رطوبت خاک حدود $3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

کاتیون‌ها به هم و نیز نسبت آنیون‌ها به یکدیگر و مقایسه آن‌ها، املاح غالب کلرید سدیم (NaCl) و سولفات کلسیم (CaSO_4) به نسبت دو به یک شناسایی و از آن‌ها برای تهیه آب آبیاری با هدایت‌های الکتریکی یاد شده استفاده شد. از ابتدای مرحله تهیه خزانه تا انتقال نشاها به کرت‌ها و همچنین از مرحله نشا تا پایان مرحله پنجه‌زنی آبیاری به روش غرقابی انجام شد. در مرحله تشکیل خوشه (کد مرحله رشدی ۴) (بر اساس سیستم ارائه شده توسط *IRRI*) پس از قطع آبیاری اجازه داده شد تا با کاهش رطوبت خاک ترک‌های با میانگین پهنای ۳ میلی‌متر و ۲ سانتی‌متر در سطح خاک ایجاد و سپس تیمارهای آزمایشی اعمال شدند. از زمان قطع آبیاری تغییرات رطوبتی خاک با استفاده از روش وزنی ثبت شد. از نحوه ترک‌برداری خاک و توسعه ترک‌ها (عمق و پهنای) نیز تا زمان رسیدن به حدود تعیین شده (۳ میلی‌متر و ۲ سانتی‌متر) به صورت روزانه تصویربرداری شد. عمق ترک با استفاده از یک سیم فلزی با قطر ۲ میلی‌متر (مطابق با داسوگ و شاشیدهارا (Dasog and Shashidhara, 1993)) بدین ترتیب اندازه‌گیری شد که وقتی قسمت ابتدایی (نوک) سیم به سطحی از خاک با مقاومت زیاد برخورد می‌نمود، طول سیم به عنوان عمق ترک لحاظ می‌شد. اندازه‌گیری پهنای ترک (حد فاصل بین دو کلوخه) نیز با استفاده از تصاویر دیجیتالی و به کمک نرم‌افزار *AutoCad2009* انجام شد. مقدار نهایی عمق و پهنای ترک در هر زمان از میانگین هفت اندازه‌گیری حاصل شد. به منظور اجتناب از ایجاد اختلال توسط باران احتمالی در طی دوره اعمال تیمارها، از سایه‌بان به منظور سرپوشیده کردن مکان آزمایش در هنگام بارش استفاده شد.

از زمان نشاکاری تا انتهای فصل کشت میزان آب داده شده به هر کرت با استفاده از ظرف‌های مدرج اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین از زمان نشاکاری تا انتهای مرحله پنجه‌زنی نفوذ عمودی در کرت‌های آزمایشی با استفاده از استوانه‌های نصب شده در مرکز هر کرت اندازه‌گیری شد. پس از رسیدن خاک به ترک‌های با پهنای ۳ میلی‌متر (مویین) و با پهنای ۲ سانتی‌متر تا پایان فصل کشت متغیرهای نفوذ عمقی و نشت جانبی در هر آبیاری اندازه‌گیری شدند. میزان تبخیر و تعرق در طی فصل رشد با استفاده از داده‌های تشت تبخیر و اعمال ضریب گیاهی

ترک‌ها تا مکش ۱۷۶ سانتی‌متر (ششمین روز از زمان قطع آبیاری) تقریباً کند بوده و از آن پس این روند سرعت بیشتری داشته است که می‌توان این موضوع را به افزایش سطح تماس خاک با هوا، در نتیجه‌ی گسترش پهنای ترک و بازشدگی بیشتر دهانه شکاف و کاهش رطوبت در نیمه پایینی خاک سطحی گلخراپ نسبت داد. در نهمین روز از زمان قطع آبیاری رطوبت خاک تقریباً به حد ظرفیت مزرعه رسید که در این زمان پهنای ترک ۱/۹۰ و عمق آن ۱۳/۶۷ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. به بیان دیگر تقریباً پس از رسیدن خاک به حد ظرفیت مزرعه، ترک‌ها تا نزدیک لایه شخم نفوذ نموده‌اند که این مسئله نشانگر سرعت انقباض خاک است که خود تابعی از ویژگی‌های خاک به ویژه نوع و درصد رس است. بیشترین عمق ترک حدود ۱۸ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که در واقع تحت این شرایط ترک به انتهای سخت لایه شخمی که از عمق ۱۵ سانتی‌متری سطح خاک آغاز و دارای ضخامت ۲۵ سانتی‌متر بود، نرسید. بومن و تانگ (Bouman and Tuong, 2001) با بررسی تعداد زیادی از آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام شده در موسسه تحقیقات بین‌المللی برنج نشان دادند که چنانچه مکش خاک از ۱۰۰ کیلوپاسکال تجاوز نماید ترک‌ها به لایه فشرده زیر لایه گلخراپ نفوذ خواهند نمود.

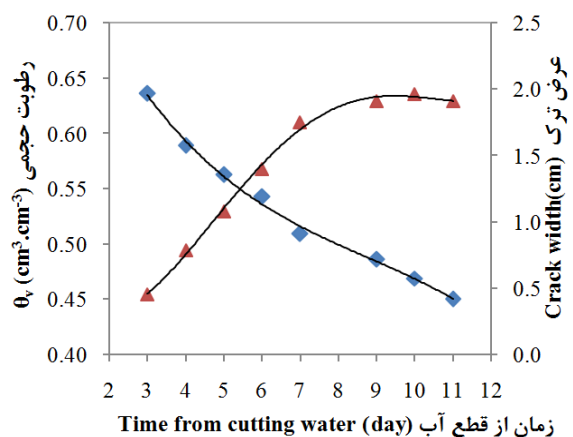


شکل ۳- تغییرات رطوبت و عمق ترک در لایه پادل شده نسبت به مکش خاک از زمان محو آب تا رسیدن به ترک ۲ سانتی‌متر.

Figure 3. Variation of moisture and crack depth in paddling layer versus soil water suction from disappearing water to reach crack with 2 cm width.

۰/۶۳ (معادل مکش ۱۹/۰۲ سانتی‌متر) بود. تانگ و همکاران (Toung *et al.*, 2011) نشان دادند در خاک رسی با کانی غالب ایلیت و اسمکتیت تقریباً ۹۰ درصد ترک‌خوردگی هنگامی که خاک هنوز اشباع است، اتفاق می‌افتد. اسلام و همکاران (Islam *et al.*, 2004) در خاک لوم رسی بروز ترک‌ها را ۶۶ ساعت پس از قطع آب در سطح رطوبتی نزدیک به اشباع گزارش نمودند.

شکل ۲ میانگین روند تغییرات رطوبت و متوسط عرض ترک را در لایه گلخراپ شده از زمان محو آب در کرت‌های آزمایشی تا زمان رسیدن به حد ترک مورد انتظار در سناریوی دوم (ترک ۲ سانتی‌متر) نشان می‌دهد. یاسوگلو و همکاران (Yassoglou *et al.*, 1994) نشان دادند که پهنای ترک در ابتدا با کاهش مقدار رطوبت خاک به سرعت (تا قبل از یک حد بحرانی) افزایش یافته و در مرحله‌های بعد از حد بحرانی افزایش پهنای ترک با سرعت کمتری تا رسیدن به حداکثر اندازه آن ادامه می‌یابد. همان طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود روند تغییرات پهنای ترک با کاهش رطوبت خاک در روزهای اول پس از قطع آب سریع بوده و در روزهای پایانی دوره خشک که ترک به حد مورد انتظار نزدیک می‌شود، این تغییرات ناچیز است. شکل ۳ تغییرات رطوبت خاک و عمق ترک را در برابر مکش رطوبتی خاک نشان می‌دهد. علی‌رغم کاهش رطوبت و افزایش مکش خاک، روند توسعه عمق



شکل ۲- تغییرات رطوبت و عرض ترک در لایه پادل شده از زمان محو آب تا رسیدن به ترک ۲ سانتی‌متر.

Figure 2. Variation of moisture and crack width in paddling layer from disappearing water to reach crack with 2 cm width.

بدین ترتیب حجم بزرگی از آب آبیاری در خاک‌های ترک‌دار تلف می‌شود.

در تیمارهای دور شش روز و ترک موئین به استثنای اولین آبیاری که به دلیل رطوبت بالای خاک و درز و شکاف‌های جزئی ایجاد شده، نشت جانبی ناچیز بود، در آبیاری‌های بعدی شرایط با تیمارهای دور آبیاری شش روز در سناریوی ترک ۲ سانتی‌متر مشابه بود. در واقع با ایجاد یک فاصله شش روزه، رطوبت خاک به سرعت کاهش یافته و پیش از آبیاری دوم این مقدار به حدود ۴۴ درصد رسید که در این زمان درز و شکاف‌های خاک و به تبع نشت جانبی افزایش یافت به گونه‌ای که مقادیر حاصل مشابه با دومین آبیاری در کرت‌هایی با ترک‌های ۲ سانتی‌متر بود.

اثر شوری آب آبیاری بر هدایت الکتریکی، عملکرد و بهره‌وری آب در خاک‌های ترک‌دار

نتایج تجزیه واریانس اثر شوری آب آبیاری بر ویژگی‌های مطالعه شده در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. اثر شوری آب آبیاری بر شوری خاک (هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک) در لایه سطحی گلخراب در پایان فصل کشت نشان داد که اثر ترک و آبیاری بر این متغیر در سطح یک درصد معنی‌دار است. هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در تیمارهای آبیاری غرقاب بیشتر از تیمارهای آبیاری با دور ۶ روز بوده و نیز این پارامتر در شرایط ترک موئین بیش از شرایط ترک ۲ سانتی‌متر بود (شکل ۵). اگرچه با افزایش شوری آب آبیاری، شوری خاک به میزان جزئی افزایش یافته است اما این افزایش نسبت به شوری اولیه عصاره اشباع خاک (0.62 ds.m^{-1}) حتی در تیماری که دارای بدترین کیفیت آب آبیاری است کمتر از یک واحد است. این موضوع نشان‌گر نقش جریان ترجیحی جانبی و اثر شکاف‌ها در خروج سریع آب آبیاری و املاح از کرت‌ها است که مانع از عبور بخش اعظم آب از ماتریکس خاک شده است. فوگات و همکاران (Phogat *et al.*, 2010) در یک آزمایش میکرولاسیمتری با استفاده از خاک لوم شنی در شرایط کشت برنج تحت آبیاری با تیمارهای مختلف شوری نشان دادند هنگامی که هیچ ترکی در سطح خاک موجود نباشد شوری ناحیه ریشه با شوری آب آبیاری برابر خواهد بود. در پژوهش حاضر حتی در تیمارهای غرقاب دارای ترک موئین نیز این موضوع مشاهده نشد که شاید بتوان علت آن را به آبیاری با آب

در تیمارهای تنش خشکی با ترک ۳ میلی‌متر و غرقاب و برای همه سطوح شوری بکار رفته، سرعت نفوذ عمودی آب از مقدار متوسط $1/9$ میلی‌متر در روز در شرایط پیش از اعمال تیمارها به مقدار متوسط ۲ میلی‌متر در روز پس از اعمال تیمارها افزایش نشان داد اما این اختلاف معنی‌دار نبود. در تیمارهای تنش خشکی با ترک ۲ سانتی‌متر غرقاب به علت سرعت بالای نشت از ترک‌ها و عدم امکان پیشگیری از خروج آب، غرقاب نگه داشتن کرت‌ها میسر نشد که ناگزیر تیمارهای غرقاب به صورت روزانه با عمق متوسط پنج سانتی‌متر آبیاری شدند.

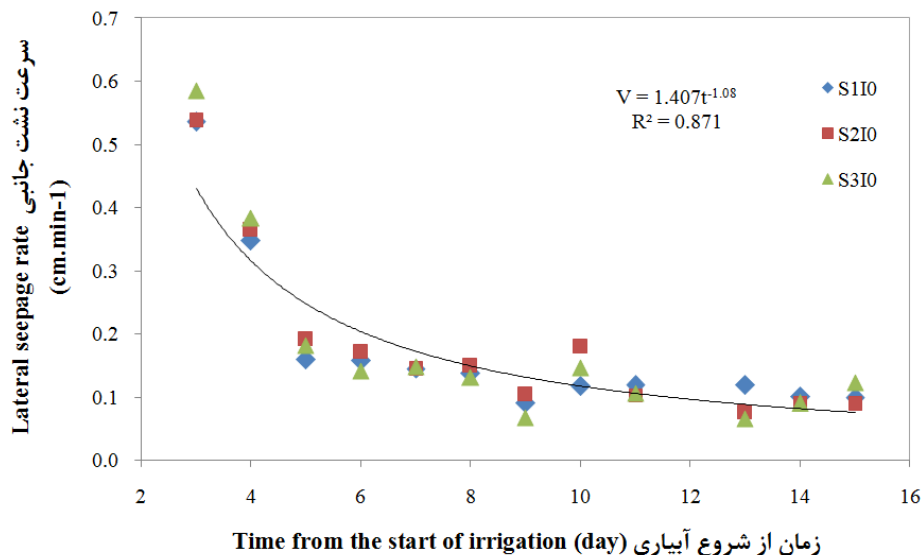
در این تیمارهای برای همه سطوح شوری بکار رفته سرعت نفوذ عمودی بسیار ناچیز (نزدیک به صفر) و تنها عامل خروج آب از کرت‌ها نشت جانبی بود. در شرایطی که ترک‌ها سخت لایه شخمی را قطع ننمایند (شرایط آزمایش حاضر)، این لایه با ایجاد بستری با مقاومت هیدرولیکی زیاد مانع حرکت عمودی آب می‌شود و در این شرایط تنها عامل خروج آب از کرت‌ها نشت جانبی است که در آن آب و املاح کوتاه‌ترین مسیر را از ترک‌ها برای خروج از مزرعه انتخاب می‌نمایند. ووپیرز (Wopereis, 1993) نیز نشان داد که در یک خاک ترک‌دار چنانچه سخت لایه زیر لایه گلخراب به ورود آب مقاوم است، انتقال عمودی آب بسیار کم خواهد بود. میانگین سرعت نشت جانبی آب با شوری‌های مختلف در خاک‌های با ترک ۲ سانتی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار افزایش شوری آب اثر معنی‌داری در تغییر سرعت نفوذ آب در خاک‌های شالیزاری ترک‌دار نداشته است. در خاک‌های بدون ترک با افزایش شوری سرعت جریان آب در خاک افزایش می‌یابد (Phogat *et al.*, 2010)، اما در شرایط وجود ترک، به نظر می‌رسد هندسه و حجم ترک در مقایسه با ماتریکس خاک و تغییرات ناشی از استفاده از آب شور اثر بیشتری بر جریان آب در خاک دارد. علی‌رغم کاهش سرعت نشت جانبی در پنجمین روز آبیاری و تقریباً ثابت ماندن آن تا پایان فصل کشت، میزان نشت از نظر مقدار همچنان قابل توجه است. کاهش رطوبت خاک که منجر به پدیده انقباض و تشکیل ترک می‌شود، غیرقابل برگشت است و در اثر جذب رطوبت ناشی از آبیاری یا بارش و علی‌رغم انبساط صورت گرفته، ترک‌ها بسته نمی‌شود. این پدیده منجر به جریان جانبی به صورت رواناب شده (Dinka and Lascano, 2012) و

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات شوری آب آبیاری بر عملکرد گیاه و بهره‌وری آب در خاک با ابعاد ترک متفاوت
Table 2. Analysis of variance of the effect of irrigation water salinity on yield and water productivity in soil with different crack dimensions

| منابع تغییر Source of variation | درجه آزادی df | میانگین مربعات (Mean square) | | | | |
|--|---------------------|------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------|----------------------|
| | | نشت جانبی Lateral seepage | بهره‌وری آب WP | هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک EC _e | درصد پوکی Black grain percentage | عملکرد Yield |
| شوری Salinity | 2 | 0.08* | 0.001** | 0.029 ^{ns} | 40.29** | 7678.60** |
| ترک Crack | 1 | 0.03 ^{ns} | 0.009** | 0.303* | 17.15** | 4863.67** |
| ترک×شوری Crack×Salinity | 2 | 0.25** | 1×10 ⁻⁴ ^{ns} | 0.002 ^{ns} | 4.89** | 307.70 ^{ns} |
| آبیاری Irrigation | 1 | 3.79** | 0.001** | 0.533** | 5.01* | 28452.94** |
| ترک×آبیاری Crack×Irrigation | 1 | 1.80** | 0.003** | 0.002 ^{ns} | 0.16 ^{ns} | 11.02 ^{ns} |
| شوری×آبیاری Salinity×Irrigation | 2 | 0.18** | 1×10 ⁻⁴ * | 0.002 ^{ns} | 3.08* | 2724.25** |
| ترک×شوری×آبیاری Crack×Salinity×Irrigation | 2 | 0.49** | 0.001* | 1×10 ⁻⁴ ^{ns} | 0.13 ^{ns} | 1.25 ^{ns} |
| خطای آزمایش Error | 22 | 0.02 | 1×10 ⁻⁴ | 0.045 | 0.66 | 406.85 |
| ضریب تغییرات CV | - | 26.01 | 4.60 | 17.79 | 9.24 | 3.84 |

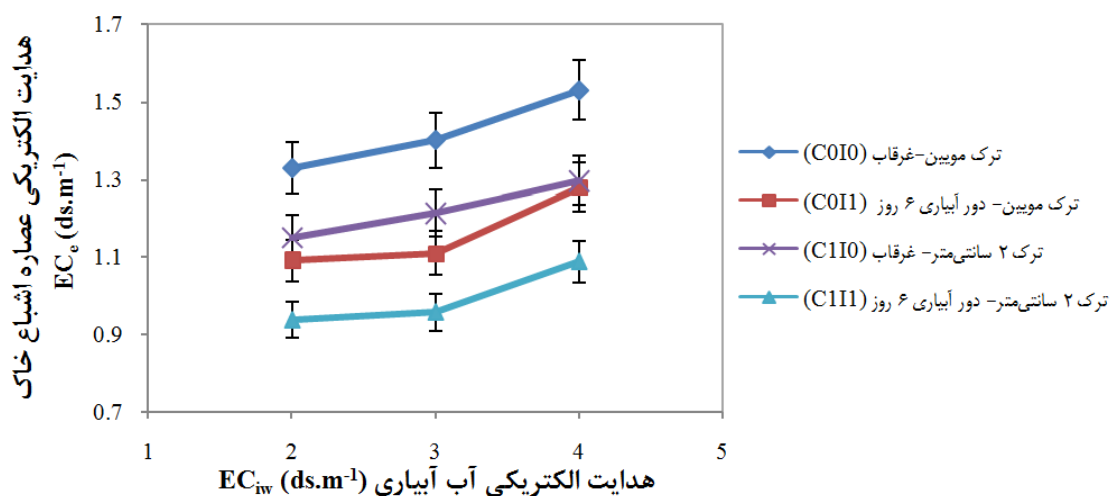
^{ns} غیرمعنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

^{ns} Non-significant, * and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۴- میانگین سرعت نشت جانبی آب با شوری‌های مختلف برای تیمارهای غرقاب در شرایط وجود ترک ۲ سانتی‌متر.

Figure 4. Mean of lateral seepage rate with different irrigation water salinities for flooding treatments in cracking with 2 cm width.



شکل ۵- اثر متقابل ترک × شوری آب آبیاری بر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در پایان فصل کشت.

Figure 5. Interaction effects of crack × irrigation water salinity on electrical conductivity of soil extraction at the end of cultivation season.

بومن و تانگ (Bouman and Toung, 2001) نشان دادند که در دامنه مکش خاک ۱۰۰ سانتی متر کاهش عملکرد گیاه برنج آغاز می شود. شارما (Sharma, 1989) در مکش های خاک ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی متر کاهش معنی دار عملکرد گیاه برنج را به میزان ۸ و ۱۳ درصد گزارش نموده است. همان طور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است، مکش خاک اعمال شده در سناریوی دوم (ترک ۲ سانتی متر) بیش از ۳۳۰ سانتی متر بود که حتی در تیمارهای غرقاب منجر به کاهش ۵ درصدی عملکرد شد. اگرچه آبیاری با فاصله زمانی ۵ تا ۸ روز برای رقم هاشمی مناسب اعلام شده است (Rezaei and Nahvi, 2003)، اما نتایج این تحقیق نشان داد که آبیاری ۶ روزه به ویژه در شرایط تنش شوری خسارت شدیدی بر گیاه وارد می نماید.

در آبیاری غرقاب و در هر دو شرایط ترک مویین ۳ میلی متر و ترک با عرض ۲ سانتی متر با افزایش شوری تا ۳ دسی زیمنس بر متر کاهش عملکرد تدریجی و بعد از آن تشدید می شود. شانی و دادلی (Shani and Dudley, 2001) نشان دادند که در سطوح آبیاری زیاد، با افزایش شوری عملکرد کاهش معنی داری می یابد. نسبت عملکرد گیاه برنج در حالت ترک مویین و دور آبیاری ۶ روز به

شور از پایان دوره پنجه زنی و سنگین بودن خاک مورد آزمایش نسبت داد.

اثر فاکتورهای ترک، شوری، آبیاری و همچنین اثر متقابل فاکتورهای شوری در آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه معنی دار بودند. برش دهی اثرات متقابل فاکتورهای شوری در آبیاری در جدول ۳ نشان داده شده است. در هر دو سطح ترک با افزایش شوری آب آبیاری عملکرد کاهش می یابد که این موضوع برای تیمارهای غرقاب و در شوری های بالا محسوس تر است. در هر دو سطح ترک تفاوت معنی داری بین تیمارهای غرقاب و دور آبیاری ۶ روز مشاهده می شود (شکل ۶). واکنش عملکرد گیاه در روش آبیاری غرقاب (در هر دو سطح ترک) نسبت به افزایش شوری غیرخطی بود. با افزایش شوری تا ۳ دسی زیمنس بر متر در هر دو سناریوی ترک عملکرد در شرایط آبیاری غرقاب بیش از دور ۶ روز است. اما در آب آبیاری با شوری ۴ دسی زیمنس بر متر اگر گیاهان به صورت روزانه آبیاری شوند عملکرد کاهش می یابد، ولی مقدار آن نسبت به حالتی که مزرعه با فاصله زمانی هر ۶ روز یک بار آبیاری شود، کمی بیشتر خواهد بود که این موضوع با یافته های سپاسخواه و یوسفی فلکدهی (Sepaskhah and Yousofi-Falakdehi, 2010) در توافق است.

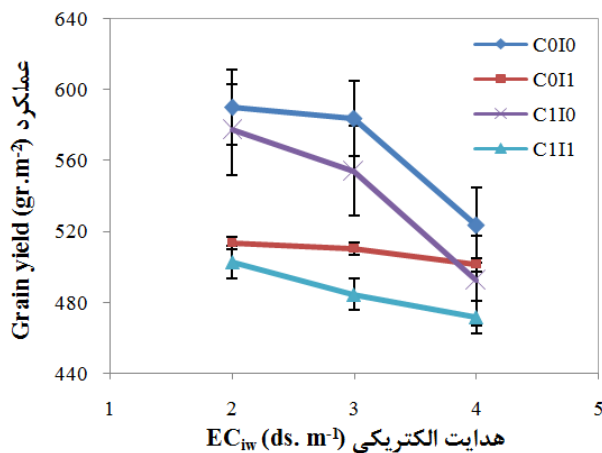
جدول ۳- برش‌دهی اثر متقابل فاکتورهای شوری و آبیاری بر عملکرد دانه و درصد پوکی

Table 3. Interaction slicing between salinity and irrigation on grain yield and black grain

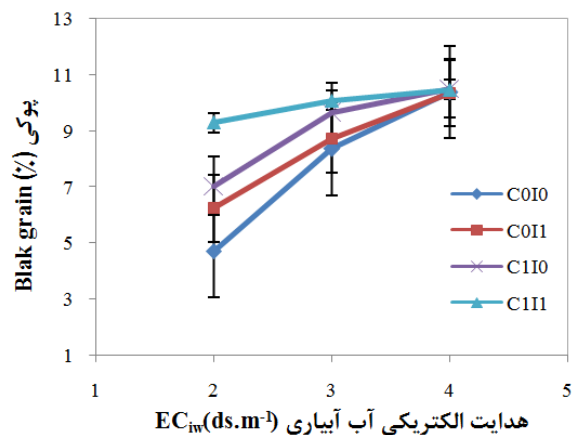
| صفت | سطوح شوری آب آبیاری Levels of irrigation water ($ds.m^{-1}$) salinity | سطوح آبیاری Levels of irrigation | | میانگین |
|--|---|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | دور ۶ روز 6 day interval | غرقاب Flooding | |
| عملکرد دانه grain yield ($gr.m^2$) | 2 | 507.9 ^c | 583.6 ^a | 545.8 ^A |
| | 3 | 497.3 ^{cd} | 568.8 ^b | 533.8 ^A |
| | 4 | 486.3 ^d | 507.8 ^c | 497.0 ^B |
| میانگین | | 497.2 ^B | 553.4 ^A | |
| پوکی Black grain (%) | 2 | 7.8 ^c | 5.9 ^d | 6.8 ^C |
| | 3 | 9.4 ^b | 9.0 ^b | 9.2 ^B |
| | 4 | 10.4 ^a | 10.4 ^a | 10.4 ^A |
| میانگین | | 8.4 ^B | 9.2 ^A | |

حرف‌های مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها است.

The same letters shows non-significant differences between means.



شکل ۶- اثر متقابل سه جانبه ترک × شوری × آبیاری بر عملکرد دانه.
Figure 6. Interaction of crack × salinity × irrigation on grain yield.



شکل ۷- اثر متقابل سه جانبه ترک × شوری × آبیاری بر درصد پوکی.
Figure 7. Interaction of crack × salinity × irrigation on unfilled grains percentage.

فاصله‌های آبیاری زیاد نقش خاصی در تغییر رطوبت خاک نخواهد داشت، زیرا آب آبیاری به سرعت از راه ترک‌ها و به صورت جریان ترجیحی جانبی از مزرعه خارج خواهد شد. اما در سناریوی ترک مویین چون تنش خشکی اعمال شده جزئی است، رطوبت خاک کمی پایین‌تر از اشباع است و بنابراین فواصل آبیاری زیاد (تنش خشکی متوسط)

عملکرد گیاه برنج در شرایط تنش خشکی (با ترک دو سانتی‌متر) و دور آبیاری ۶ روز، با افزایش شوری آب آبیاری به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش تنش خشکی و کاهش رطوبت خاک، هنگامی که خاک به حد مشخصی از ترک می‌رسد تغییرات رطوبت در آن کندتر شده و

باعث کاهش سریع رطوبت از ماتریکس خاک شده و تنش زیادی را به گیاه وارد می‌نماید که نتیجه آن کاهش عملکرد محصول است.

اثر فاکتورهای ترک، شوری و نیز اثر متقابل ترک در شوری در سطح احتمال یک درصد بر درصد پوکی موثر بوده است. برش‌دهی اثرات متقابل فاکتورهای شوری در آبیاری در جدول ۳ نشان داده شده است. معنی‌دار بودن اثر متقابل نشان می‌دهد که درصد پوکی در رقم هاشمی به شکل متفاوتی نسبت به شوری، ترک و آبیاری واکنش نشان داده، این تفاوت ممکن است به علت تابع واکنش متفاوت و یا مشابه باشد، اما نرخ تغییرات متفاوت است. واکنش پوکی گیاه برنج نسبت به شوری در ترک‌های متفاوت به شکل غیرخطی بود (شکل ۷). با افزایش شوری آب آبیاری درصد پوکی به طور معنی‌داری به ویژه در شرایط ترک موئین غرقاب افزایش می‌یابد. اعمال تنش خشکی نیز سبب افزایش درصد پوکی شد، به گونه‌ای که تیمار ترک ۲ سانتی‌متر با دور آبیاری ۶ روز بیشترین درصد پوکی را دارا بود. دوات‌گر و همکاران (Davatgar *et al.*, 2009) نشان دادند که در رقم هاشمی با وقوع تنش خشکی در مرحله گلدهی و با افزایش شدت آن درصد پوکی افزایش خواهد یافت.

اثر فاکتورهای ترک، شوری، آبیاری و نیز اثر متقابل ترک در آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر بهره‌وری آب معنی‌دار بود (جدول ۲). همچنین اثرات متقابل شوری

در آبیاری و ترک، شوری و آبیاری در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد. نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. در حالی که انتظار می‌رفت تیمارهای آبیاری با فاصله زمانی ۶ روز بهره‌وری آب بالاتری داشته باشند، اما همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، به علت اثر جبران ناپذیری که فاصله زیاد آبیاری بر عملکرد وارد نمود، علی‌رغم مصرف کمتر آب، بهره‌وری نیز کمتر از تیمارهای آبیاری غرقاب در شرایط ترک موئین حتی با افزایش شوری آب آبیاری بود. در شرایط ترک ۲ سانتی‌متر نیز به دلیل هدر رفت بالای آب، بهره‌وری آب کاهش یافت. عباسی و سپاسخواه (Abbasi and Sepaskhah, 2011) بهره‌وری آب را در تیمارهای آبیاری تناوبی به طور معنی‌داری پایین‌تر از تیمارهای غرقاب برای ارقام مختلف برنج در استان فارس گزارش نمودند. بومن و تانگ (Bouman and Toung, 2000) افزایش بهره‌وری آب را با کم آبیاری گزارش نمودند و بیشترین بهره‌وری آب را مربوط به خاک اشباع در مقایسه با آبیاری با عمق ۵ یا ۱۰ سانتی‌متر اعلام نمودند. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (Mostafazadeh *et al.*, 2010) بهره‌وری آب را بین ۰/۱۷ تا ۰/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط خاکی با ترک‌های ۲/۵ سانتی‌متر و عمق آب ۵ سانتی‌متر تا سطح بدون ترک و آبیاری در حد اشباع خاک برای رقم هاشمی گزارش نمودند.

جدول ۴- اثر متقابل ترک × شوری آب آبیاری بر بهره‌وری آب

Table 4. Interaction effect of crack × irrigation water salinity on water productivity

| ترک Crack | بهره‌وری آب (kg m ⁻³) | | میانگین Mean |
|---|---|-------------------|-------------------|
| | شوری (دسی‌زیمنس بر متر) Salinity (ds.m ⁻¹) | غرقاب Flooding | |
| ترک موئین Initial crack | 2 | 0.25 | 0.24 ^A |
| | 3 | 0.25 | 0.24 ^A |
| | 4 | 0.22 | 0.22 ^B |
| ترک ۲ سانتی‌متر Crack with 2 cm width | 2 | 0.22 | 0.22 ^B |
| | 3 | 0.18 | 0.20 ^C |
| | 4 | 0.18 | 0.20 ^C |
| میانگین (Mean) | | 0.24 ^A | 0.20 ^B |

حرف‌های مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها است.

The same letter shows non-significant differences between means.

افزایش شوری آب آبیاری اثری بر شدت نفوذ جانبی ندارد. همچنین در صورتی که ترک‌هایی با عرض دو سانتی‌متر در سطح مزرعه توسعه یابند، اعمال آبیاری تناوبی با دور شش روز کاهش عملکرد قابل توجهی را به دنبال دارد. در این شرایط استفاده از آب‌های با کیفیت پایین در آبیاری‌ها اثر معنی‌داری بر تغییر روند کاهشی عملکرد نخواهد داشت.

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که به سبب اثر جبران ناپذیر تنش خشکی بر عملکرد، علی‌رغم مصرف کمتر آب در تیمارهای با دور آبیاری ۶ روز، تیمارهای آبیاری غرقاب در شرایط ترک مویین، بیشترین بهره‌وری آب را دارا می‌باشند. در خاک مورد مطالعه با توسعه ترک تا عرض دو سانتی‌متر (معادل مکش ۵۴۷ سانتی‌متر)، عمق ترک لایه سخت شخم را قطع نکرده و بنابراین بیشتر تلفات آب از طریق نشت جانبی بوده است. در این شرایط،

References

- Abbasi, M. R. and Sepaskhah, A. R. 2011.** Effects of water-saving irrigation on different cultivars (*Oryza sativa* L.) in field conditions. **International Journal of Plant Production** 5 (2): 153-166.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998.** Crop evapotranspiration Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.
- Asch, F. and Wopereis, M. C. S. 2001.** Responses of field-grown irrigated rice cultivars to varying levels of floodwater salinity in a semi-arid environment. **Field Crops Research** 70: 127-137.
- Azarmsa, S. M. and Rashtchi, L. 2003.** The pack experiences of Guilan Operation of Irrigation Systems Company at crisis management. Proceeding of Water Management in Paddy Rice Field Workshop. August, Rasht, Iran. (In Persian).
- Baghdadi, M. 1998.** The north of Iran's soils investigation (Guilan Province). A comprehensive mapping project of Iran's soils. Ministry of Jihad-e-Agriculture. Organization of Research, Education and Agricultural Extension. Soil and Water Research Institute. Technical Bulletin 1045. (In Persian).
- Bethune, M. and Turrall, H. 2001.** Modeling water movement in cracking soils. In: Bethune, M. and Kirby, M. (Eds.), Modeling Water Movement in Cracking Soils Workshop. A Review. Proc., 16-17 May, Melbourne, Victoria, pp. 29-42.
- Bouman, B. A. M. and Tuong, T. P. 2000.** Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. **Agriculture Water Management** 1615: 1-20.
- Bouman, B. A. M. and Tuong, T. P. 2001.** Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. **Agriculture Water Management** 49: 11-30.
- Bouman, B. A. M., Barker, R., Humphreys, E. and Tuong, T. P. 2007.** Rice feeding the billions. In: Molden, D. (Ed.), Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. Earthscan, London and International Water Management Institute, Colombo.
- Chen, S. K., Liu C. W. and Huang H. C. 2002.** Analysis of water movement in paddy rice fields (II) simulation studies. **Journal of Hydrology** 268: 259-271.
- Dasog, G. S. and Shashidhara, G. B. 1993.** Dimension and volume of crack in a Vertisol under different crop covers. **Soil Science** 156: 424-428.
- Davatgar, N., Neishabori, M. R., Sepaskhah A. R. and Soltani, A. 2009.** Physiological and morphological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to varying water stress management strategies. **International Journal of Plant Production** 3 (4): 1735-8043.
- Davatgar, N., Kavooosi, M., Alinia, M. H. and Peykan, M. 2006.** Study of Potassium Status and Effect of Physical and Chemical Properties of Soil on it in Paddy Soils of Guilan Province. **JWSS, Isfahan University of Technology** 9 (4): 71-89. (In Persian).
- Dinka, T. M. and Lascano, R. J. 2012.** Review Paper: Challenges and limitation in studying the shrink-swell and crack dynamics of Vertisol soils. **Open Journal of Soil Science** 2: 82-90.
- Hafeez, M. M., Bouman, B. A. M., Van de Giesen, N. and Vlek, P. 2007.** Scale effects on water use and water productivity in a rice-based irrigation system (UPRIIS) in the Philippines. **Agriculture Water Management** 92: 81-89.
- Ishiguro, M. 1992.** Effects of shrinkage and swelling of soils on water management in paddy fields. In: Murty, V. V. N. and Koga, K. (Eds.), Soil and water engineering for paddy field management.

- Irrigation Engineering and Management Program, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 258-267.
- Islam, M. J., Mowla, G., Islam, M. S. and Leeds-Harrison P.B. 2003.** Model for efficient use of limited water for rice production. **Pakistan Journal of Biological Science** 6 (18): 1600-1607.
- Islam, M. J., Mowla, G., Parul, S. S., Alam M. Z. and Islam, M. S. 2004.** Management of cracking puddle soils and its impact on infiltration. **Journal of Biological Science** 4 (1): 21-26.
- Janssen, M. and Lennartz, B. 2007.** Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice field. **Journal of Soil and Tillage Research** 94: 133-141.
- Japan International Cooperation Agency. 2012.** The study on integrated water resources management for Sefidroud river basin in the Islamic Republic of Iran. Final report. CTI Engineering International Co., Ltd. Water Resources Management Company. The Ministry of Energy, Islamic Republic of Iran.
- Kavoosi, M. 1999.** Study of effective factors at Potassium sorption from soil by rice plant and determine suitable extractor for Potassium in some Guilan paddy fields. Ph.D. Dissertation, Isfahan University of Technology, Iran. (In Persian).
- Kavoosi, M. and Mojalali, H. 1996.** Salinity effect of soil extraction on rice yield (Sepidroud, Hasansaraei and Khazar cultivars). Proceeding of 5th Congress of Iran's Soil Science. 29 January, Karaj, Iran. pp.131. (In Persian).
- Liu, C. W., Cheng, S. W., Yu, W. S. and Chen, S. K. 2003.** Water infiltration rate in cracked paddy soil. **Geoderma** 117: 169-181.
- Modaberi, H. 2010.** Determining evaporation - transpiration and crop coefficient of two rice varieties in lowland swamps (Guilan). MS.c. Dissertation, University of Tarbiat Modares, Iran. (In Persian).
- Mohammadi, M. 1970.** Pilot farm soil detailed report of improve rice farming Project. Institute of Soil and Fertility, Guilan Province. Bulletin 269. (In Persian).
- Mori, Y., Maruyama, T. and Mitsuno, T. 1999.** Soft X-ray radiography of drainage Patterns of structured soils. **Soil Science Society American Journal** 63: 733-740.
- Mostafazadeh-Fard, B., Jafari, F., Mousavi, S. F. and Yazdani, M. R. 2010.** Effects of irrigation water management on yield and water use efficiency of rice in cracked paddy soils. **Australian Journal of Crop Science** 4 (3): 136-141.
- Phogat, V., Yadav A. K. and Malik, R. S. 2010.** Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water. **Paddy and Water Environment** 8: 333-346.
- Pirmoradian, N., Sepaskhah, A. R. and Maftoun, M. 2004.** Effects of water-saving irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components of rice (*Oriza sativa* L.). **Plant Production Science** 7: 337-346.
- Razavipour, T. 1999.** Measurement of water deep percolation in different paddy soil's texture at two growth stage of rice. M.Sc. Dissertation, Islamic Azad University, Science and Research, Iran. (In Persian).
- Rezaei, M. and Nahvi, M. 2003.** Effect of different irrigation intervals on water use efficiency and yield of rice in Guilan. Proceeding of 11th Conference of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. December 25, Tehran, Iran. pp:674. (In Persian).
- Sepaskhah, A. R., Yousofi-Falakdehi, A. 2010.** Rice yeild modeling under salinity and water stress condition using an appropriate macroscopic root water uptake equation. **Pakistan Journal of Biological Science** 13 (22): 1099-1105.
- Shakeri, A. and Garshasbi, A. 2009.** Estimating technical efficiency of rice in selected provinces of Iran. **Journal of Humanities and Social Sciences** 8 (3): 81-96.
- Shani, U. and Dudley, L. M. 2001.** Field studies of crop response to water and salt stress. **Soil Science Society American Journal** 65: 1522-1528.
- Sharma, P. K. 1989.** Effect of period moisture stress on water-use efficiency in wetland rice. **Oryza**, 26: 252-257.
- Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., Marquez, J. A. and Kropff, M. J. 1994.** Mechanisms and control of percolation losses in irrigated puddled rice fields. **Soil Science Society of America Journal** 58: 1794-1803.
- Toung, T. P., Cabangon, R. J. and Wopereis, M. C. S. 1996.** Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils. **Soil Science American Journal** 60: 872-879.

- Tang, C. S., Shi, B., Liu, C., Suo W. B. and Gao, L. 2011.** Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. **Applied Clay Science** 59: 69-77.
- Van Genuchten, M. Th. 1980.** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science American Journal** 44: 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S. R. 1991.** The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065. USEPA, Ada. Oklahoma, USA.
- Walker, S. H. and Rushton, K. R. 1984.** Verification of lateral percolation losses from irrigated rice fields by a numerical model. **Journal of Hydrology** 71:335-351.
- Wopereis, M. C. S. 1993.** Quantifying the impact of soil and climate variability on rainfed rice production. Ph.D. Dissertation, Wageningen University, The Netherlands.
- Wopereis, M. C. S., Kropff M. J., Maligaya A. R. and Toung, T. P. 1996.** Drought-Stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status. **Field Crops Research** 46: 21-39.
- www.knowledgebank.irri.org/extension/growth-stages-0-9.html
- Yassoglou, N., Kosmas, C. S., Mustakasa, N., Tzianis, E. and Danalatos, N. G. 1994.** Cracking in recent alluvial soils as related to easily determined soil properties. **Geoderma** 63: 289-298.
- Yong, R. N. and Warkentin, P. B. 1966.** Introduction of soil behavior. McMillan, New York.
- Zeng, L., and Shannon, M. C. 2000.** Salinity effects on seedling growth and yield components of rice. **Crop Science** 40: 996-1003.

The effect of salinity stress and irrigation regimes on yield and water productivity in cracked paddy rice field

Ali Ashraf Sadradini¹ and Fatemeh Salahshour Dalivand^{2*}

1. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, 2. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Dept. of Water Engineering, Tabriz University

(Received: September 4, 2012- Accepted: January 21, 2013)

Abstract

The most common irrigation method for Iran's paddy rice fields is continuous flooding that it changes to intermittent irrigation in water shortage. On the other hand, several droughts and also construction and operation of different dams in Sepidroud River watershed cause to decrease the water quality of this river in the recent years. In this study the combined effects of salinity and drought stresses were investigated on horizontal and vertical water flow in cracked soil of a Hashemi cultivar paddy field (most common cultivar in Guilan Province). Treatments were consist of two irrigation strategies, namely continuous and intermittent (6 days intervals) flooding methods by applying 5cm water height and three salinity stress by using irrigation water at three electric conductivity levels of 2, 3 and 4 dsm^{-1} . These treatments applied in two conditions consist of crack width 3 mm and 2 cm. The results indicate that when cracks by average width of 2 cm form in paddy field, daily irrigation of the crop even with inferior quality water can cause to higher yield than intermittent irrigation. In spite of less irrigation water for 6 days interval treatments, continuous irrigation treatments with 3 mm width cracks had the highest water productivity. Also, cracks by average width of 2 cm, increase lateral flow significantly. The effect of irrigation water salinity on lateral flow rate was not significant and cracks became irreversible even after rewetting.

Keywords: Crack, Drought Stress, Infiltration, Lateral flow, Rice, Salinity Stress

*Corresponding author: ph_salahshoor@yahoo.com