

تأثیر زهکشی کنترل شده بر دبی زهاب، سطح ایستابی و بهره‌وری آب در دشت مغان

حمیدرضا جوانی جونی^۱، عبدالمجید لیاقت^{۲*}، علیرضا حسن اقلی^۳، بیژن نظری^۴

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. استاد، آبیاری و زهکشی گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، موسسه تحقیقاتی فنی و مهندسی کشاورزی

۴. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۲۶)

چکیده

امروزه، کارکرد اصلی زهکشی، تنها خروج آب اضافی از نیمرخ خاک نیست، بلکه مدیریت سطح ایستابی نیز به اهداف آن اضافه شده است. زهکشی کنترل شده یکی از روش‌هایی است که می‌تواند چنین هدفی را تحقق بخشد. در این پژوهش، سامانه زهکشی کنترل شده در اراضی دشت مغان با هدف کاهش حجم زهاب خروجی، مدیریت بهتر سطح ایستابی و افزایش بهره‌وری آب آبیاری در محصولات ذرت و گندم به اجرا در آمد. این بررسی در زمینی به مساحت ۴۰ هکتار در قالب سه تیمار شامل زهکشی آزاد (FD)، زهکشی کنترل شده با عمق کنترل ثابت ۷۰ سانتی‌متر (CD70) و زهکشی کنترل شده با عمق متغیر در دوره رشد گیاه (CDch) و در سه تکرار صورت گرفت. اطلاعات جمع‌آوری شده شامل میزان دبی خروجی از زهکش‌ها، تغییرات زمانی و مکانی سطح ایستابی و عملکرد محصولات ذرت و گندم بود. نتایج این پژوهش نشان داد که در تیمارهای CDch و CD70، حجم زهاب خروجی از زهکش‌ها در محصول ذرت ۵۱/۲ و ۴۳/۸ درصد و در محصول گندم ۴۶/۶ و ۳۳/۱ درصد و به‌صورت معنی‌داری نسبت به زهکشی آزاد (FD) کاهش یافت. نتایج همچنین نشان داد که سطح ایستابی در زهکشی آزاد نوسانات بیشتری نسبت به تیمارهای زهکشی کنترل شده دارد. میزان عملکرد علوفه‌تر در محصول ذرت در تیمارهای CDch و CD70 به میزان ۲۴/۹ و ۱۹/۱ درصد و عملکرد دانه گندم ۴۱/۳ و ۲۶/۶ درصد نسبت به تیمار FD افزایش یافت. در نهایت، نتایج نشان داد که بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای زهکشی کنترل شده و به‌خصوص تیمار CDch بیش از تیمار زهکشی آزاد بود. با اجرای سامانه زهکشی کنترل شده، علاوه بر کاهش زهاب خروجی، از میزان خسارات زیست محیطی ناشی از زهاب در پایین دست مزارع نیز کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: راندمان آبیاری، عملکرد، تبخیر و تعرق، شوری خاک.

مقدمه

هدف این عملیات را تنها افزایش عملکرد گیاه و بهبود شرایط محیط رشد دانسته و اثرات زیست محیطی طرح‌های زهکشی را مدنظر قرار نمی‌داد. امروزه این نگرش، جایگاه خود را از دست داده است. در نگرش نوین لازم است علاوه بر اهداف کشاورزی، اهداف زیست‌محیطی و به‌ویژه، مخاطرات ناشی از تخلیه زهاب-های با کیفیت نامطلوب به محیط زیست را نیز مورد توجه جدی قرار داد (Hassanoghli et al., 2015).

زهکشی کنترل شده یکی از روش‌های مدیریت سطح ایستابی است که دارای مزایای زیادی از جمله کاهش حجم زهاب تخلیه شده، کاهش تلفات کودهای شیمیایی از اراضی کشاورزی و به تبع آن، کاهش آلودگی محیط زیست، افزایش تعرق گیاهی، افزایش عملکرد نسبی محصول و ارتقاء کارایی مصرف آب است. با مدیریت سطح ایستابی و کنترل خروجی

زهکشی زیرزمینی از جمله فعالیت‌هایی است که از دیرباز و در راستای حفظ پایداری تولید محصول و کنترل بیلان نمک‌ها در خاک، بر ضرورت اجرای آن در اراضی کشاورزی ایران تأکید شده است. از گذشته و بر اساس نظر متخصصان بین‌المللی نیز اجرای سامانه زهکشی در اراضی تحت آبیاری ضروری محسوب می‌شده، اما اکنون با تغییر نگرش در این خصوص، توصیه‌های متعادل‌تری ارائه می‌شود. به‌عنوان مثال، بر طبق نظر ولاتمن، زهکشی را نباید انجام داد، مگر اینکه ضروری باشد (Akram et al., 2013). نگرش سنتی حاکم بر طراحی سامانه‌های زهکشی،

* نویسنده مسئول: Aliaghat@ut.ac.ir

زهکش می‌توان تراز سطح آب را در داخل خاک در حد مطلوبی حفظ کرد تا علاوه بر امکان استفاده گیاه از آب زیرزمینی، حجم زهاب خروجی نیز کاهش یابد. به عبارتی، اساس زهکشی کنترل‌شده بر این است که مادامی که عملکرد محصول با شرایط اشباع خاک کاهش نیابد، از شدت زهکشی کاسته شود. در سامانه زهکشی کنترل‌شده، سطح ایستابی در عمق کمی از سطح زمین و با استفاده از سازه کنترل، نگاه داشته می‌شود. سطح ایستابی کم عمق با کاهش گرادیان هیدرولیکی و افزایش پتانسیل جریان رو به بالای موئینگی، موجب کاهش نفوذ عمقی به زیر ناحیه ریشه می‌شود. خطوط جریان در این سامانه، کم عمق تر از زهکشی آزاد بوده و عمدتاً در نزدیکی سطح خاک متمرکز است (Ayars et al., 2006). مشکل اصلی سامانه‌های زهکشی زیرزمینی مرسوم این است که این سامانه‌ها در اغلب موارد، زمین را بیش از اندازه زهکشی کرده، مقدار زیادی نمک همراه با زهاب از اراضی خارج شده، سطح ایستابی بسیار پایین نگه‌داشته شده و لذا راندمان آبیاری کاهش می‌یابد. در واقع، زهکشی کنترل‌شده با کنترل دبی خروجی از لوله‌های زهکش موجب می‌شود که ذخیره رطوبت در خاک محفوظ مانده و بدین ترتیب گیاه می‌تواند در فصل کم آبی، از آب ذخیره شده در زمین استفاده کند. از عواملی که بر استفاده گیاه از آب زیرزمینی کم عمق مؤثر است می‌توان به ظرفیت نگهداری آب خاک، ضریب انتقال آب خاک، نیاز تبخیر و تعرق گیاه، نحوه توزیع ریشه گیاه و میزان شوری تأثیرگذار بر رشد گیاه اشاره نمود. بنابراین، گیاهان مختلف ممکن است پاسخ‌های متفاوتی را نسبت به شرایط اقلیمی، خاک و سطح ایستابی از خود نشان دهند (Sepaskhah et al., 2003). در حضور آب زیرزمینی کم عمق می‌توان حتی از آب‌های شور زیرزمینی نیز برای تأمین بخشی از نیاز آبی گیاه استفاده کرد. البته در چنین شرایطی باید به مسئله امکان شور شدن اراضی در نتیجه تجمع نمک در خاک دقت نمود که می‌توان با اعمال مدیریت دقیق تر در شرایط زهکشی کنترل‌شده، این مشکل را برطرف کرده یا تعدیل نمود (Gowing et al., 2009). تحقیقات زیادی در زمینه اثرات زهکشی کنترل‌شده بر حجم زهاب، نوسانات سطح ایستابی و تغییرات عملکرد محصول، در نقاط مختلف جهان انجام شده است. در مصر تحقیقی در خصوص اثرات زهکش کنترل‌شده بر کمیت و کیفیت آب خروجی زهکش‌ها در محصول نیشکر انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان خروجی کل زهکش‌های کنترل‌شده، در فصل تابستان به میزان ۶۸ درصد و در فصل زمستان ۲۸ درصد نسبت به زهکشی آزاد

کاهش یافت (Wahba et al., 2005).

برخی از مطالعات انجام شده، میزان کاهش دبی خروجی زهکش‌ها با اجرای سامانه زهکشی کنترل‌شده را بین ۱۶ تا ۸۶ درصد گزارش کرده‌اند (Helmets et al., 2012; Jaynes, 2012). نتایج پژوهش دیگر نیز نشان داد که زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی معمول، باعث افزایش راندمان مصرف آب به میزان ۱۱ درصد، عملکرد ذرت به میزان ۶۴ درصد، کاهش تلفات نیتروژن به میزان ۳۶ و کاهش بار نیتروژن تخلیه شده به میزان ۴۱ درصد شد (Skaggs et al., 2005). محققین در کرج در یک مطالعه دو ساله لایسیمتری بر روی گیاه یونجه، کاهش حجم زهاب را با کنترل سطح ایستابی و آبیاری زیرزمینی گزارش نمودند. آن‌ها مشاهده کردند که حجم زهاب، بار تخلیه نترات و هدایت الکتریکی زهاب در تیمارهای کنترل سطح ایستابی (۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر) به‌طور قابل توجهی نسبت به زهکشی آزاد کاهش می‌یابد (Noory and Liaghat, 2009). Rozemeijer et al. (2016) به بررسی تغییرات هیدرولیکی و شیمیایی زهاب در زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی مرسوم، در مقیاس کوچک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد زهکشی کنترل‌شده علاوه بر این که دبی زهکش را کاهش و ذخیره آب زیرزمینی را افزایش داد، بلکه باعث کاهش میزان فسفر در زهاب خروجی نیز شد. El-Ghannam و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر زهکشی کنترل‌شده بر تجمع شوری در نیم‌رخ خاک، دبی زهکش و عملکرد گیاه نیشکر پرداختند. در این مطالعه که در مصر انجام شد، در پنج قطعه به مساحت ۲/۵ هکتار گیاه نیشکر کشت شده و سطح ایستابی در اعماق ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ متر کنترل شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زهکشی کنترل‌شده روشی مؤثر در کاهش دبی زهکش‌ها است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که شوری خاک هنگامی که سطح آب زیرزمینی نزدیک تر به سطح زمین باشد، در لایه‌های بالایی تقریباً دو برابر لایه‌های عمیق تر است.

در ایران، نظیر برخی از مناطق استان خوزستان و بخش‌هایی از اراضی دشت مغان (استان اردبیل)، به دلیل وجود لایه غیرقابل نفوذ در عمق نسبتاً کم و منابع آب دائمی و کافی، شرایط برای اجرای روش زهکشی کنترل‌شده فراهم است. از سوی دیگر، یکی از مشکلات اصلی در مناطقی که دارای شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشند، زهاب خروجی از مزارع است. از این منظر، پژوهش‌هایی در زمینه اثرات زهکشی کنترل‌شده بر میزان و دبی زهاب تخلیه شده از زهکش‌ها و نیز نوسانات سطح ایستابی در نقاطی از کشور انجام شده است. Sadeghilari et al.

مکانی و زمانی سطح ایستابی و در نهایت، اثر این سامانه بر عملکرد، راندمان و بهره‌وری استفاده از آب آبیاری در اراضی دشت مغان، در محصولات غالب منطقه شامل ذرت و گندم است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محدوده مورد مطالعه

عملیات اجرایی تحقیق در مزرعه‌ای به وسعت ۴۰ هکتار واقع در دشت مغان، در شمال استان اردبیل در ۳۰ کیلومتری شهرستان پارس آباد به طول و عرض جغرافیایی " ۱۴' ۳۶" N ۳۹° ۴۴" ۴۶' ۴۷° انجام شد. در این دشت، طرح توسعه بهره‌برداری از منابع آب رودخانه ارس و شبکه آبیاری و زهکشی در ۹۰ هزار هکتار (۷۲ هزار هکتار خالص) اجرا شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر شرایط نیم‌رخ خاک مزارع آزمایشی، مشخصات لایه‌های خاک از سطح زمین تا عمق نصب زهکش‌های جانبی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات فیزیکی و شیمیایی لایه‌های خاک در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. در این منطقه، عمق نصب زهکش‌ها ۱/۸ متر از سطح زمین، لوله‌های زهکش از نوع خرطومی پلاستیکی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر، فاصله و طول آن‌ها به ترتیب ۸۰ و ۱۶۵ متر است. زهکش‌های جانبی به‌طور مستقیم به زهکش جمع‌کننده از نوع لوله سیمانی وارد شده و سپس این زهکش به نهر جمع‌کننده اصلی روباز تخلیه می‌شود. کانال‌های زهکش روباز اصلی دارای مقطع دوزنقه‌ای است.

تیمارهای مورد بررسی

در این پژوهش، به منظور بررسی اثرات زهکشی کنترل‌شده بر روی دبی زهاب خروجی، نوسانات سطح ایستابی، میزان کارایی مصرف آب، راندمان آبیاری و بهره‌وری مصرف آب، سه تیمار در نظر گرفته شد. هر قسمت از مزرعه (تیمار) از سه زهکش جانبی تشکیل شده و به وسیله دو زهکش جانبی دیگر در طرفین به‌عنوان حائل، از تیمارهای دیگر متمایز شد.

(2014) به بررسی نوسانات سطح ایستابی، شدت زهکشی و تغییرات نیترات در اراضی زیر کشت نیشکر، با سامانه زهکشی کنترل‌شده پرداختند. این تحقیق در دو تیمار زهکشی کنترل‌شده با اعماق ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک و یک تیمار زهکشی آزاد، در استان خوزستان انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زهکشی کنترل‌شده، اثرات معنادار هیدرولوژیکی و زیست محیطی را در طول دوره مطالعه موجب شده است. در این بررسی، کل جریان خروجی در زهکش‌های کنترل‌شده در اعماق ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری به ترتیب ۶۲/۴۸ و ۴۸/۹۸ درصد، در مقایسه با تیمار زهکشی آزاد کمتر بود. Mahjoubi et al. (2014) به بررسی اثر زهکشی کنترل‌شده بر کاهش میزان ضریب زهکشی و حجم زهاب خروجی در سه مزرعه از مزارع کشت و صنعت امام خمینی پرداختند. در این مطالعه نیز، دو مزرعه با زهکش کنترل‌شده در اعماق کنترل سطح ایستابی ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری از سطح خاک و یک مزرعه با زهکشی آزاد انتخاب شد. نتایج نشان داد که با کنترل سطح ایستابی، علاوه بر کاهش حجم زهاب خروجی، مصرف آب آبیاری نیز در تیمارهای کنترل‌شده به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد کاهش یافت. همچنین، با اجرای سامانه زهکشی کنترل‌شده، محدودیت و کاهش در عملکرد محصول نیشکر مشاهده نشد و زهکشی کنترل‌شده علاوه بر منافع اقتصادی، کمک شایانی را به حفظ محیط زیست نمود.

نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در مجموع، استفاده از سامانه زهکشی کنترل‌شده در کشور ایران امکان‌پذیر بوده و اجرای آن فوائد زیادی در بر خواهد داشت. از آن‌جا که بسته به شرایط آب و هوایی، خاک و نوع گیاه، تأثیر زهکشی کنترل‌شده بر روی میزان کاهش مصرف آب، تغییرات شوری خاک و عملکرد محصول متفاوت است، لذا انجام تحقیقات لازم قبل از اجرائی کردن این سامانه، با توجه شرایط هر منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی میدانی و دقیق تأثیر اجرای سامانه زهکشی کنترل‌شده بر میزان دبی زهاب، نوسانات

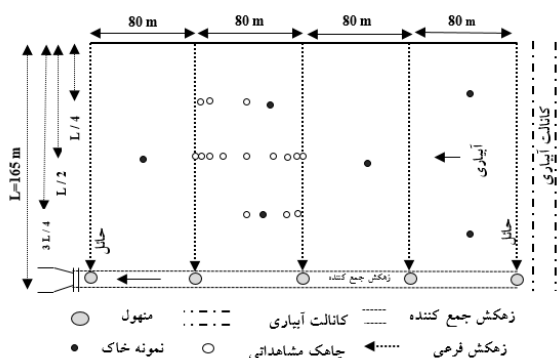
جدول ۱. مشخصات فیزیکی لایه‌های خاک مزارع آزمایشی

| عمق خاک (cm) | نوع بافت خاک | درصد ذرات خاک (%) | | | جرم مخصوص ظاهری (gr/cm ³) | ظرفیت زراعی (%) | پژمردگی دائم (%) |
|--------------|---------------|-------------------|------|----|---------------------------------------|-----------------|------------------|
| | | رس | سیلت | شن | | | |
| ۰-۳۰ | لوم رسی سیلتی | ۳۹ | ۴۳ | ۱۸ | ۱/۶۹ | ۲۷/۰۴ | ۱۵/۳۲ |
| ۳۰-۶۰ | لوم رسی سیلتی | ۳۵ | ۴۵ | ۲۰ | ۱/۶۴ | ۲۶/۱۴ | ۱۶/۷۸ |
| ۶۰-۹۰ | رس سیلتی | ۴۲ | ۴۴ | ۱۴ | ۱/۶۵ | ۲۸/۲۶ | ۱۵/۵۱ |
| ۹۰-۱۲۰ | رس سیلتی | ۴۱ | ۴۲ | ۱۷ | ۱/۷۰ | ۲۴/۷۸ | ۱۷/۰۹ |
| ۱۲۰-۱۸۰ | رس سیلتی | ۴۳ | ۴۲ | ۱۵ | ۱/۶۳ | ۲۶/۵۳ | ۱۷/۲۳ |

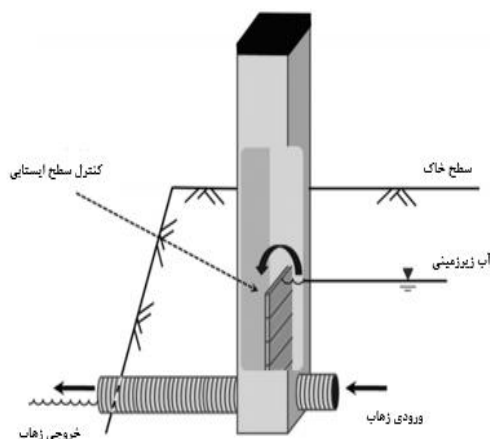
جدول ۲. مشخصات شیمیایی لایه‌های خاک مزرعه مورد مطالعه

| عمق خاک (cm) | ECe (dS/m) | مواد آلی (%) | pH | کاتیون‌ها (meq/l) | | | | آنیون‌ها (meq/l) | | | |
|--------------|------------|--------------|------|-------------------|--------|-------|--------|------------------|-----------|--------|------|
| | | | | سدیم | پتاسیم | کلسیم | منیزیم | نسبت جذب سدیم | بی‌کربنات | سولفات | کلر |
| ۰-۳۰ | ۰/۶۵ | ۲/۲۱ | ۷/۳۵ | ۵/۰۲ | ۱/۳۲ | ۵/۱۱ | ۴/۳۳ | ۲/۳۱ | ۳/۵۰ | ۶/۳۲ | ۶/۰۸ |
| ۳۰-۶۰ | ۰/۸۲ | ۱/۹۵ | ۷/۴۶ | ۵/۱۰ | ۱/۴۱ | ۵/۳۰ | ۴/۶۲ | ۲/۲۹ | ۳/۷۸ | ۶/۳۱ | ۶/۳۵ |
| ۶۰-۹۰ | ۰/۷۷ | ۱/۸۴ | ۷/۴۵ | ۵/۳۲ | ۱/۲۵ | ۵/۱۷ | ۴/۲۲ | ۲/۴۶ | ۳/۶۲ | ۵/۹۴ | ۶/۴۴ |
| ۹۰-۱۲۰ | ۰/۹۵ | ۱/۳۱ | ۷/۵۹ | ۵/۸۰ | ۱/۳۵ | ۵/۵۴ | ۴/۷۵ | ۲/۵۶ | ۴/۳۰ | ۶/۵۵ | ۶/۶۴ |
| ۱۲۰-۱۸۰ | ۱/۳۰ | ۰/۹۵ | ۸/۱۰ | ۶/۱۰ | ۱/۵۲ | ۵/۵۷ | ۵/۰۱ | ۲/۶۵ | ۴/۵۰ | ۶/۷۶ | ۶/۸۰ |

سازه کنترل سطح ایستابی به صورت مجزا در انتهای هر زهکش جانبی استفاده شد. به همین منظور نسبت به ساخت تجهیزات کنترل سطح ایستابی با قابلیت تغییر ارتفاع در طول فصل کشت اقدام شد. این سازه به شکل مکعب مستطیل و با طول و عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ سانتی‌متر، با استفاده از ورقه فلزی و با قابلیت کنترل سطح آب در ترازهای مختلف ساخته شد. در شکل (۳) تصویر شماتیک سازه ساخته شده در این پژوهش نشان داده شده است.

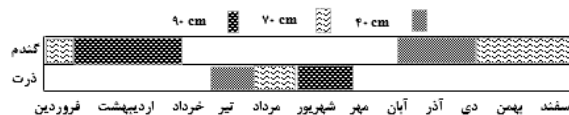


شکل ۲. شمای کلی هر یک از تیمارهای مورد استفاده در تحقیق



شکل ۳. سازه مورد استفاده برای کنترل سطح ایستابی

زهکشی آزاد (FD) به عنوان تیمار اول بود به صورتی که زهکش‌ها در عمق کارگذاری شده (۱/۸ متر) کار می‌کنند و تیمار دوم، زهکشی کنترل شده با کنترل سطح ایستابی در تمام مدت فصل کشت در عمق ۷۰ سانتی‌متری از سطح خاک (CD^{۷۰}) بود. تیمار سوم نیز زهکشی کنترل شده با سطح کنترل متغیر (CDch) در نظر گرفته شد. در این تیمار، سطح ایستابی در ابتدای فصل کشت در عمق ۴۰ سانتی‌متری سطح زمین قرار داشت. با افزایش طول ریشه گیاه، این سطح به ۷۰ سانتی‌متری از سطح خاک رسید و در نهایت با افزایش بیشتر عمق نفوذ ریشه گیاه، عمق کنترل سطح ایستابی در ۹۰ سانتی‌متری سطح خاک تثبیت شده و تا انتهای فصل رشد در این عمق ثابت ماند. با توجه به متفاوت بودن سرعت رشد ریشه محصولات مختلف زمان تغییر سطح ایستابی در هر محصول متفاوت است. در شکل (۱) تغییرات سطح ایستابی در تیمار CDch در طول فصل کشت نشان داده شده است. به منظور بررسی اثرات زهکشی کنترل شده بر میزان عملکرد محصول، دو گیاه زراعی ذرت و گندم مورد بررسی قرار گرفت. تمامی سه تیمار مطرح شده، در کشت هر دو محصول به اجرا درآمد. در شکل (۲) شمای کلی یکی از تیمارها نشان داده شده است.



شکل ۱. تغییرات سطح ایستابی در تیمار CDch در طول فصل کشت

مدیریت سطح ایستابی

با توجه به متغیر بودن سطح ایستابی در هر تیمار و این که زهاب دو تیمار در داخل یک جمع کننده تخلیه می‌شد، امکان کنترل سطح ایستابی از طریق کنترل جمع کننده میسر نبود. به همین دلیل و با توجه به شیب بسیار کم زمین و زهکش‌های جانبی، از

از رابطه (۱) قابل محاسبه است (Gerardo *et al.*, 2012):

$$WP_{ET} = 100 \left(\frac{Y}{V_w} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن: Y مقدار محصول خشک و یا جزئی از محصول که به مصرف می‌رسد (کیلوگرم در هکتار)، V_w میزان آب مصرف شده یا آب تبخیر و تعرق شده واقعی گیاه (مترمکعب در هکتار) و WP_{ET} بهره‌وری تبخیر و تعرق (برحسب کیلوگرم بر مترمکعب) است.

بهره‌وری آب آبیاری (WP_I):

از شاخص‌های مطرح دیگر در زمینه تعیین میزان بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، کارایی مصرف آب است. این شاخص در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده درازای مقدار آب مصرفی گیاه است (Gerardo *et al.*, 2012):

$$WP_I = 100 \left(\frac{Y}{W} \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن: Y مقدار محصول خشک (کیلوگرم در هکتار)، W آب مصرف شده در مزرعه (مترمکعب در هکتار) و WP_I بهره‌وری آب آبیاری (برحسب کیلوگرم بر مترمکعب) است.

راندمان آبیاری (IE):

حجم آب مورد استفاده گیاه بر مقدار آب آبیاری به کار برده شده در مزرعه را راندمان آبیاری اطلاق می‌شود که در رابطه (۳) نشان داده شده است (Burt, 1997):

$$IE = 100 \left(\frac{W_g}{W_f} \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن: W_g حجم آب موردنیاز گیاه یا میزان آب تبخیر و تعرق شده واقعی گیاه (مترمکعب)، W_f حجم آب به کار رفته در مزرعه برای آبیاری (مترمکعب) و IE راندمان آبیاری (برحسب درصد) است.

عملیات کشاورزی

کشت گندم در آبان ماه ۱۳۹۴ پس از انجام عملیات شخم مناسب، با استفاده از دستگاه خطی کار صورت گرفت و از ۲۰۰ کیلوگرم در هر هکتار بذر رقم مغان در کشت این محصول استفاده شد. پس از برداشت گندم در خردادماه سال ۱۳۹۵، در تیرماه نسبت به کشت ذرت اقدام شد. برای کشت ذرت علوفه‌ای از ۳۰ کیلوگرم بذر رقم هیبرید دهقان در هر هکتار استفاده و به‌وسیله ردیف‌کار خطی، عملیات کشت انجام شد. در کشت هر دو محصول، آبیاری به‌صورت سطحی انجام شد. عملیات آبیاری در چهار نوبت مجموعاً به میزان ۷۳۵ میلی‌متر برای گندم و نه

نصب چاهک‌های مشاهداتی

به‌منظور بررسی نوسانات سطح ایستابی و پایش آن در طول مدت انجام پژوهش، نسبت به احداث چاهک‌های مشاهداتی اقدام شد. به همین منظور، با توجه به دستورالعمل (1984) FAO 28 چاهک‌های مشاهداتی در هر تیمار احداث و تجهیز شد، به این ترتیب که تعداد ۱۵ حلقه چاهک مشاهداتی (سه ردیف واقع در یک‌چهارم ابتدایی، انتهایی و نصف طول لوله زهکش جانبی، یعنی به فواصل ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ متری از زهکش جمع‌کننده سیمانی) در طول مزرعه و هم به‌صورت عرضی بین دو زهکش میانی، به ترتیب بر روی زهکش و در فواصل ۰/۵، ۱/۵ و ۴۰ متری بین زهکش‌های زیرزمینی در هر مزرعه نصب شد که آرایش آن‌ها در شکل (۲) قابل مشاهده است.

جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌های موردنظر در این تحقیق از ابتدای فصل کشت در آبان ماه ۱۳۹۴ آغاز شد و تا پایان فصل کشت ذرت در مهرماه ۱۳۹۵ به اتمام رسید. سطح ایستابی به‌صورت روزانه قرائت و میزان دبی خروجی از زهکش‌ها نیز به‌طور روزانه، با استفاده از زمان‌سنج و ظرف مدرج اندازه‌گیری و با توجه به میزان مساحت تحت پوشش هر زهکش جانبی، به‌صورت عمق آب زهکشی محاسبه شد. به‌منظور تعیین میزان محصول در هر یک از تیمارها، به‌صورت تصادفی در پنج محل از هر تیمار نمونه‌برداری انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن علوفه تر و خشک ذرت در هر یک از نقاط انتخابی به ابعاد ۲×۲، کلیه بوته‌ها به‌صورت دستی برداشت شده و پس از اندازه‌گیری وزن تر، بوته‌ها داخل گرم‌خانه (آون) به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت و سپس وزن خشک علوفه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه گندم کل سنبله‌های برداشت شده از سطح چهار مترمربع در هر کرت با دست خرمن‌کوبی، سپس دانه‌های به‌دست آمده توزین و عملکرد در مترمربع محاسبه و در نهایت بر مبنای هکتار محاسبه شد.

شاخص‌های بهره‌وری

بهره‌وری تبخیر و تعرق (WP_{ET}):

این شاخص بیان‌گر محصول تولیدی به ازای واحد حجم آب یا عملکرد به ازای واحد حجم آب بوده و یکی از شاخص‌های مهم در زمینه تعیین میزان بهره‌وری آب در بخش کشاورزی است. این شاخص در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده به میزان تبخیر و تعرق واقعی را ارائه می‌کند. میزان بهره‌وری با استفاده

معنی‌داری بین تیمارهای CD70 و CDch در سطح پنج درصد بود.

با توجه به جداول فوق، زهاب خروجی در تیمار زهکشی آزاد، همواره و در تمام مدت فصل کشت وجود داشته و هیچ‌گاه به صفر نرسیده است، درحالی‌که در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده و در هر دو محصول، مدتی پس از آبیاری، جریان زهاب قطع می‌شد. به‌طور کلی، میانگین زهاب خروجی روزانه در هر دو تیمار زهکشی کنترل‌شده نزدیک به یکدیگر بوده است. در شکل (۴) میزان زهاب خروجی به‌صورت ماهانه در طول فصل کشت گندم و ذرت، در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. میزان زهاب خروجی در ماه‌های آبان تا خرداد مربوط به گندم و از ماه‌های تیر تا مهر متعلق به ذرت است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در فصل کشت گندم، بیشترین میزان زهاب خروجی در تمامی ماه‌ها مربوط به تیمار FD بوده و بیشترین میزان زهاب خروجی ماهیانه کشت گندم نیز در اردیبهشت‌ماه و برای کلیه تیمارها رخ داده است.

در این ماه با توجه به بارندگی کم‌تر و افزایش نیاز آبی گیاه، تعداد و مقدار آبیاری بیشتری انجام شده است. از سوی دیگر، در طول مدت فصل کشت از آبان تا دی‌ماه، سطح آب زیرزمینی در تیمار CDch در عمق ۴۰ سانتی‌متر قرار داشته است. به همین دلیل میزان زهاب خروجی نسبت به سایر تیمارها کمتر بوده است. با افزایش عمق کنترل آب زیرزمینی در انتهای دی‌ماه به ۷۰ سانتی‌متر، میزان زهاب خروجی نیز افزایش یافت. در انتهای اسفندماه نیز با افزایش مجدد عمق سطح کنترل در این تیمار (۹۰ سانتی‌متر)، میزان زهاب خروجی افزایش بیشتری داشته است. در مرداد و شهریورماه (در فصل کشت ذرت)، میزان زهاب خروجی افزایش چشمگیری یافت. در تمامی مدت فصل کشت ذرت، زهاب خروجی ماهانه در تیمار FD بیشترین مقدار را نسبت به سایر تیمارها داشته است. زهاب خروجی تیمار CDch در تیرماه کمتر از سایر تیمارها بوده و پس از افزایش عمق سطح آب زیرزمینی در مردادماه (۷۰ سانتی‌متر) و شهریورماه (۹۰ سانتی‌متر)، زهاب خروجی در این تیمار افزایش یافت، به‌گونه‌ای که بیش از تیمار CD70 بود. به‌طور کلی در همه ماه‌های سال و در هر دو کشت، با کاهش عمق سطح کنترل (از سطح خاک) در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده، میزان زهاب خروجی کاهش چشمگیری داشت. بنابراین، زهکشی کنترل‌شده از خروج آب اضافه از ناحیه ریشه گیاه جلوگیری کرده، زیرا با افزایش تراز آب زیرزمینی، گنجایش خاک در حفظ رطوبت افزایش می‌یابد. با اصلاح برنامه‌ریزی آبیاری نیز می‌توان علاوه بر کاهش میزان تنش به گیاه، امکان

نوبت مجموعاً ۱۰۷۰ میلی‌متر برای ذرت انجام شد. برای کشت گندم، ۲۲۵ کیلوگرم کود اوره و ۱۰۰ کیلوگرم پتاسیم سولفات در هکتار و همچنین برای ذرت ۳۵۰ کیلوگرم کود اوره و ۲۵۰ کیلوگرم پتاسیم سولفات در هکتار استفاده شد. عملیات کاشت، داشت و برداشت از جمله زمان آبیاری، میزان آبیاری و میزان کود مصرفی مطابق با عرف کشاورزان منطقه و در مواردی با تغییرات جزئی و با هماهنگی کشاورزان، در راستای اهداف تحقیق انجام شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بررسی سطوح معنی‌داری آن‌ها، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در بخش میزان عملکرد محصولات گندم و ذرت در هر تیمار و به دلیل آرایش تصادفی داده‌ها، آنالیز داده‌ها در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی انجام و از آزمون حداقل تفاوت‌های معنی‌دار در سطح پنج درصد بهره گرفته شد. در مورد سطح ایستابی و ذبی زهاب و با توجه به عدم آرایش تصادفی داده‌ها از روش تی استیودنت استفاده و میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده به روش دو به دو مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

ذبی زهاب خروجی

با اجرای زهکشی کنترل‌شده، میانگین زهاب خروجی روزانه از زهکش‌های جانبی در تیمارهای کنترل‌شده، در هر دو محصول ذرت و گندم کاهش چشم‌گیری نسبت به زهکشی آزاد داشت. در جداول (۳) و (۴) میزان زهاب خروجی روزانه و آنالیز آماری مربوط به آن در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، میانگین زهاب خروجی روزانه در محصول ذرت در تیمارهای FD، CD70 و CDch به ترتیب به میزان ۵/۰۹، ۲/۴۸ و ۲/۸۶ میلی‌متر بر روز اندازه‌گیری شد که این مقادیر در تیمارهای CD70 و CDch نسبت به زهکشی آزاد به ترتیب ۵۱/۲ و ۴۳/۸ درصد کاهش داشت. این کاهش در سطح یک درصد در هر دو تیمار معنی‌دار ارزیابی شد. در این محصول بین تیمارهای CD70 و CDch اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد مشاهده شد. در محصول گندم، مقدار زهاب خروجی روزانه در تیمارهای CD70 و CDch در مقایسه با زهکشی آزاد (FD) به ترتیب به میزان ۴۶/۶ درصد (از ۲/۰۸ به ۱/۱۱) و ۳۳/۱ درصد (از ۲/۰۸ به ۱/۳۹) کاهش داشت که این کاهش نیز در سطح یک درصد در هر دو تیمار معنی‌دار ارزیابی شد. این در حالی است که مانند محصول ذرت، تفاوت

Weestrom and Messing (2007), El-Ghannam *et al.* (2016) گزارش شده است.

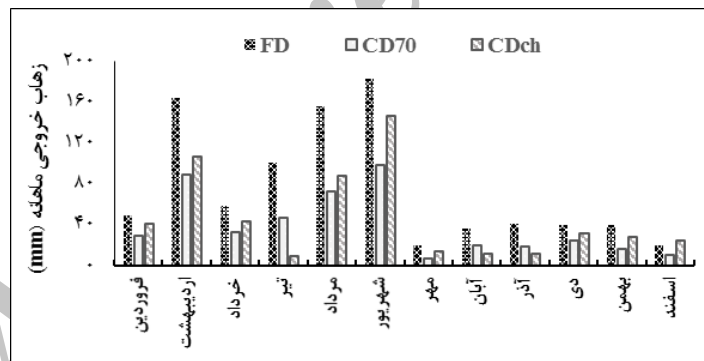
افزایش راندمان و همچنین کاهش دبی زهاب خروجی را فراهم نمود. کاهش زهاب خروجی با اجرای زهکشی کنترل شده در تحقیقات Hornbuckle *et al.*, (2005), Nangia (2005),

جدول ۳. نتایج تجزیه و تحلیل مقادیر زهاب خروجی روزانه در تیمارهای مختلف در محصول ذرت

| تیمار | میانگین | حداقل | حداکثر | تفاوت | |
|-------|---------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------|
| | | | | انحراف معیار | معنی دار |
| FD | ۵/۰۹ | ۰/۵۷ | ۱۳/۲۰ | ۳/۷۹ | CD70** CDch** |
| CD70 | ۲/۴۸ | ۰/۰۰ | ۹/۳۰ | ۲/۴۱ | *FD** CDch |
| CDch | ۲/۸۶ | ۰/۰۰ | ۹/۱۰ | ۲/۱۵ | *FD** CD70 |
| | | ** تفاوت معنی دار در سطح یک درصد | * تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد | ns تفاوت غیر معنی دار | |

جدول ۴. نتایج تجزیه و تحلیل مقادیر زهاب خروجی روزانه در تیمارهای مختلف در محصول گندم

| تیمار | میانگین | حداقل | حداکثر | تفاوت معنی داری | |
|-------|---------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------|
| | | | | انحراف معیار | |
| FD | ۲/۰۸ | ۰/۱۰ | ۸/۱۰ | ۲/۲۲ | CD70** CDch** |
| CD70 | ۱/۱۵ | ۰/۰۰ | ۵/۳۰ | ۱/۳۴ | FD** CDch* |
| CDch | ۱/۳۹ | ۰/۰۰ | ۶/۳۰ | ۱/۵۲ | FD** CD70* |
| | | ** تفاوت معنی دار در سطح یک درصد | * تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد | ns تفاوت غیر معنی دار | |



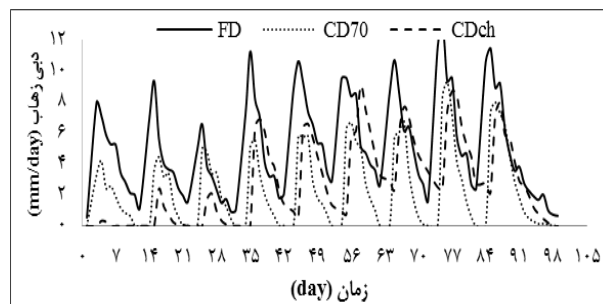
شکل ۴. زهاب خروجی ماهانه از مزرعه مورد مطالعه در فصل کشت گندم و ذرت در تیمارهای مختلف

کاهش دبی خروجی در زهکشی آزاد بیش از تیمارهای زهکشی کنترل شده است. بالا بودن دبی زهاب خروجی در تیمار زهکشی آزاد به دلیل بالا بودن میزان آب مصرفی و عمیق تر بودن لوله-های زهکش است. همین امر باعث می شود آب سریع تر از محدوده عمق توسعه ریشه گیاه خارج شده و علاوه بر خروج مقادیر بیشتر زهاب، تا حدودی به گیاه تنش وارد شود. نکته دیگر در مورد هیدروگراف زهکشی در هر دو محصول این است که دبی خروجی در تیمار CDch در ابتدا بسیار پایین تر از تیمار CD70 بود، اما با تغییر سطح کنترل، دبی این تیمار افزایش یافته و به تیمار CD70 نزدیک شد. با افزایش عمق کنترل سطح ایستابی، میزان دبی تیمار CDch افزایش بیشتری پیدا کرده است.

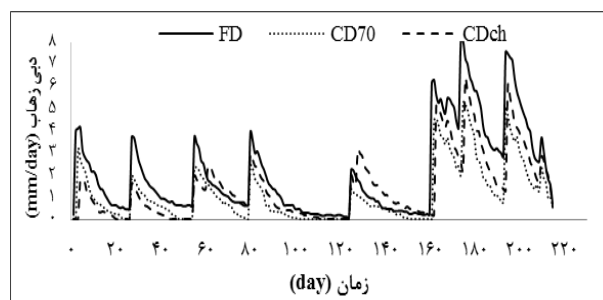
در شکل های (۵) و (۶) هیدروگراف زهکشی در طول مدت تحقیق، برای دو محصول ذرت و گندم نشان داده شده است. همان طور که در شکل ها مشاهده می شود، همواره میزان دبی خروجی از زهکش ها در تیمار FD بیش از سایر تیمارها بوده است. بیشترین میزان زهاب خروجی در تیمار FD برای ذرت برابر با ۱۳/۲ و در گندم ۸/۱ میلی متر در روز بوده است. این در حالی است که بیشترین میزان دبی زهاب در تیمارهای CD70 و CDch برای ذرت به ترتیب ۹/۳ و ۹/۱ میلی متر در روز و برای گندم ۵/۳ و ۶/۳ میلی متر در روز بوده است. با انجام آبیاری، دبی زهاب خروجی افزایش یافته و با فاصله گرفتن از زمان آبیاری، دبی زهکشی خروجی کاهش یافته است. شیب

عمق سطح ایستابی در کشت محصول ذرت و در تیمار FD تفاوت معنی داری در سطح یک درصد با تیمارهای دیگر داشت، در حالی که تیمارهای CD70 و CDch با یکدیگر اختلاف معنی-داری در سطح پنج درصد داشته است. در محصول گندم نیز میانگین سطح ایستابی در تیمار FD اختلاف معنی داری در سطح یک درصد با سایر تیمارها داشته است، در صورتی که اختلاف معنی داری بین تیمارهای CD70 و CDch مشاهده نشد.

شکل (۷) نوسانات سطح ایستابی در طول مدت فصل کشت ذرت را در تیمارهای مختلف نشان می دهد. با توجه به این شکل، پس از هر آبیاری سطح آب زیرزمینی در همه تیمارها افزایش یافته و با گذشت زمان، سطح آب کاهش می یابد، به گونه ای که این تغییرات در تیمار FD به دلیل بالاتر بودن عمق نصب زهکشها بیشتر از سایر تیمارها است. در شکل (۸) نوسانات سطح ایستابی در طول فصل کشت گندم در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. در این شکل با وقوع بارش در ابتدای فصل کشت و تا فروردین ماه و سپس، انجام آبیاری در فروردین و اردیبهشت ماه، میزان سطح ایستابی افزایش و با گذشت زمان کاهش یافته است. در این محصول نیز سطح ایستابی در تیمار FD نوسانات بیشتری را نسبت به سایر تیمارها از خود نشان داد. علیرغم این که انتظار می رفت سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی کنترل شده (برای مثال در تیمار CD70) همواره در عمق کنترل قرار داشته باشد، ولی نتایج نشان داد که این تصور صحیح نبوده و سطح ایستابی دقیقاً برابر سطح کنترل نیست. از دلایل این امر می توان به تبخیر، تفرق و اثرات نشست جانبی اشاره نمود (Sadeghilari *et al.*, 2014; Mejia *et al.*, 2000).



شکل ۵. هیدروگراف زهکشی در طول مدت کشت ذرت



شکل ۶. هیدروگراف زهکشی در طول مدت کشت گندم

تغییرات سطح ایستابی

تغییرات زمانی سطح ایستابی

در جداول (۵) و (۶) میانگین سطح ایستابی در تیمارهای مختلف، برای دو محصول ذرت و گندم در طول مدت کشت نشان داده شده است. مدیریت سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی کنترل شده موجب شد که تراز آب زیرزمینی در این تیمارها، بالاتر از سطح آب در تیمار زهکشی آزاد قرار گیرد. میانگین عمق سطح ایستابی در تیمارهای FD، CD70 و CDch برای ذرت به ترتیب ۸۶/۲، ۵۸/۵ و ۵۳/۱ سانتی متر و برای گندم به ترتیب ۱۰۳/۵، ۶۷/۴ و ۶۵/۶ سانتی متر بود. میانگین

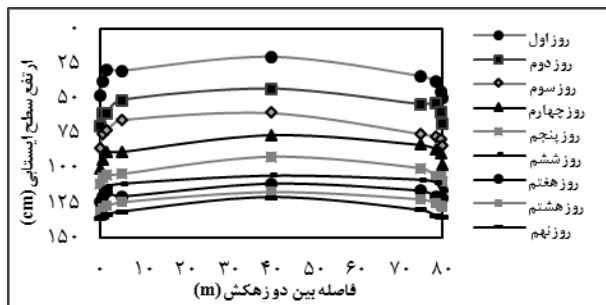
جدول ۵. نتایج تجزیه و تحلیل آماری مقادیر سطح ایستابی در تیمارهای مختلف در محصول ذرت

| تیمار | میانگین (cm) | حداقل | حداکثر | انحراف معیار | | تفاوت معنی داری |
|-------|--------------|-------|--------|--------------|--------|---|
| | | | | CDch** | CD70** | |
| FD | ۸۶/۲ | ۱۸/۴ | ۱۵۲/۶ | ۳۵/۵ | CDch** | ** تفاوت معنی دار در سطح یک درصد * تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد ns تفاوت غیر معنی دار |
| CD70 | ۵۸/۵ | ۱۸/۱ | ۸۰/۷ | ۱۴/۶ | FD** | |
| CDch | ۵۳/۱ | ۱۴/۷ | ۹۴/۳ | ۱۸/۱ | FD** | |

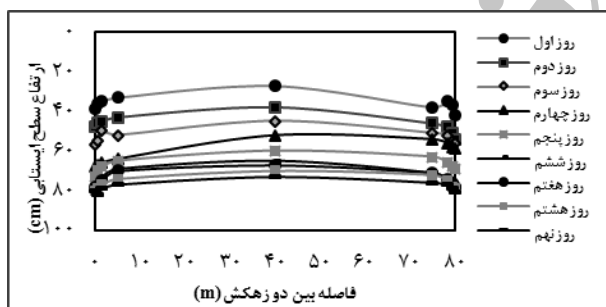
جدول ۶. نتایج تجزیه و تحلیل مقادیر سطح ایستابی در تیمارهای مختلف در محصول گندم

| تیمار | میانگین (cm) | حداقل | حداکثر | انحراف معیار | | تفاوت معنی داری |
|-------|--------------|-------|--------|--------------|--------|---|
| | | | | CDch** | CD70** | |
| FD | ۱۰۳/۵ | ۲۶/۴ | ۱۷۲/۸ | ۴۰/۷ | CDch** | ** تفاوت معنی دار در سطح یک درصد * تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد ns تفاوت غیر معنی دار |
| CD70 | ۶۷/۴ | ۱۷/۵ | ۹۳/۲ | ۱۷/۲ | FD** | |
| CDch | ۶۵/۶ | ۱۶/۸ | ۱۰۵/۹ | ۲۳/۸ | FD** | |

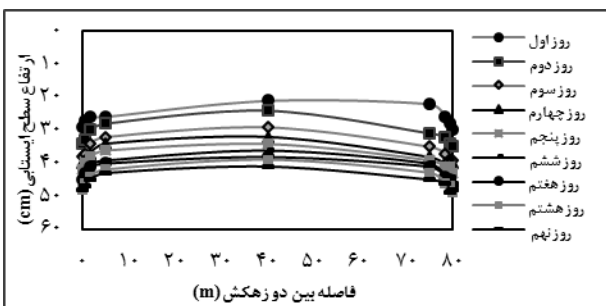
به صورت سهمی بود، در صورتی که در تیمارهای زهکشی کنترل شده این الگو بیشتر به حالت افقی گرایش داشت. از دلایل آن می توان به اختلاف زیاد سطح ایستابی تا عمق نصب زهکش و همچنین طولانی تر بودن مسیر جریان در زهکشی آزاد اشاره کرد که باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی در اطراف زهکش شده و در صورت شور بودن لایه های عمقی خاک، احتمال شست و شوی مقادیر بیشتر نمک از لایه های عمیق تر را در پی دارد. از سوی دیگر، این امر باعث افزایش عمق آب آبیاری کاربردی شده که به تبع آن، حجم زهاب خروجی نیز افزایش می یابد (Ayars et al., 2006).



شکل ۹. منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش در تیمار FD در فاصله دو آبیاری دوم تا سوم در محصول ذرت



شکل ۱۰. منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش در تیمار CD70 در فاصله دو آبیاری دوم تا سوم در محصول ذرت

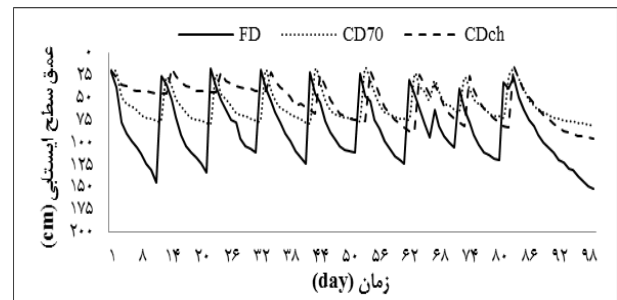


شکل ۱۱. منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش در تیمار CDch در فاصله دو آبیاری دوم تا سوم در محصول ذرت

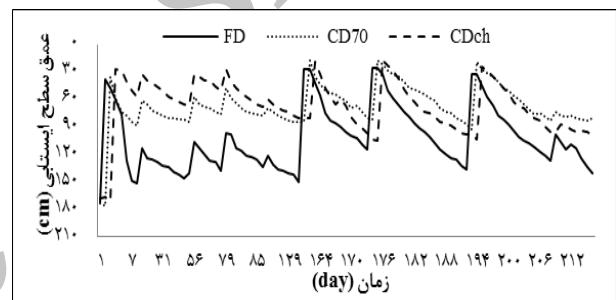
تغییرات سطح ایستابی در امتداد زهکش

به منظور بررسی وضعیت نوسانات سطح ایستابی در طول

به طور کلی دامنه نوسانات سطح آب زیرزمینی در تیمارهای زهکشی کنترل شده، بسیار کمتر از زهکشی آزاد بوده و همین امر می تواند از اعمال تنش آبی به گیاه در فاصله بین آبیاری ها جلوگیری کند.



شکل ۷. نوسانات عمق سطح ایستابی در طول فصل کشت ذرت در تیمارهای مختلف



شکل ۸. نوسانات عمق سطح ایستابی در طول فصل کشت گندم در تیمارهای مختلف

تراز سطح ایستابی بین دو زهکش

به منظور بررسی روند تغییرات منحنی سطح ایستابی در فاصله بین دو آبیاری، نسبت به ترسیم منحنی تراز سطح ایستابی برای تیمارهای مختلف اقدام شد. در شکل های (۹) تا (۱۱)، منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش در فاصله بین دو آبیاری در زمان قطع آبیاری دوم تا آبیاری سوم (به دلیل زمان لازم پس از آبیاری اول برای افزایش سطح ایستابی به سطح کنترل مورد نظر)، در محصول ذرت (به عنوان نمونه، به دلیل روند مشابه با تیمارهای محصول گندم) نشان داده شده است. در فاصله بین دو آبیاری و در تیمار FD، میزان افت سطح ایستابی در روزهای ابتدایی پس از آبیاری با سرعت بیشتری اتفاق افتاد، اما با گذشت زمان در این تیمار، سرعت افت سطح آب زیرزمینی کاهش یافت. در تیمارهای CD70 و CDch میزان سرعت افت سطح ایستابی نسبت به تیمار FD کمتر بود و تقریباً در نزدیکی تراز کنترل ایستابی ثابت می شد. از سوی دیگر، همان طور که در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود، الگوی جریان در نزدیکی زهکش ها پس از آبیاری و خصوصاً در تیمار FD

در ابتدا و انتهای زمین و در سطح پنج درصد، اختلاف مشاهده می‌شود. در محصول گندم نیز در تیمار FD تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد، بین چاهک‌های ابتدایی و انتهایی و در سطح پنج درصد، بین چاهک‌های وسط و انتهایی مشاهده می‌شود. در تیمار CD70 اختلاف بین چاهک‌های ابتدا و انتهای زهکش تنها در سطح پنج درصد و در تیمار CDch هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری در عمق آب زیرزمینی در ابتدا، وسط و انتهای طول زهکش مشاهده نشد. به عبارت دیگر، در زهکشی آزاد نوسانات عمق آب زیرزمینی در طول مزرعه بسیار زیاد بوده و همین امر باعث می‌شود گیاهان در ابتدا و انتهای مزرعه، دسترسی یکنواختی به آب زیرزمینی نداشته باشند، در صورتی که در زهکشی کنترل‌شده، یکنواختی عمق آب زیرزمینی در نقاط مختلف زمین بالاتر بوده و امکان استفاده از آب برای گیاهان به نسبت تقریباً یکسانی وجود دارد.

زهکش‌ها، تغییرات عمق سطح ایستابی در سه گروه از چاهک‌های مشاهداتی حفر شده در طول زهکش‌ها مشتمل بر یک‌چهارم ابتدا (Ini)، وسط (Mid) و یک‌چهارم انتهای (End) طول زهکش فرعی، در مدت فصل کشت هر دو محصول ذرت و گندم اندازه‌گیری شد. در جداول (۷) و (۸) به ترتیب، تجزیه و تحلیل مقادیر عمق سطح ایستابی در هر سه گروه از چاهک‌های مشاهداتی در محصولات ذرت و گندم نشان داده شده است. با توجه به جدول (۷)، میانگین سطح ایستابی در تیمار FD در کشت محصول ذرت و عمق آب زیرزمینی در چاهک‌های انتهایی (نزدیک به زهکش جمع‌کننده) بیش از چاهک‌های وسط و ابتدای مزرعه بوده است، به گونه‌ای که بین هر سه گروه از چاهک‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت. در صورتی که در تیمار CD70، اختلاف معنی‌داری بین عمق سطح ایستابی در ابتدا، وسط و انتهای مسیر زهکش مشاهده نشد. در تیمار CDch نیز تنها بین چاهک‌های مشاهده‌ای واقع

جدول ۷. تجزیه و تحلیل مقادیر عمق سطح ایستابی ذرت در موقعیت‌های مختلف مزرعه (End·Mid·Ini) به ترتیب یک‌چهارم ابتدا، وسط و یک‌چهارم انتهای طول زهکش فرعی

| تفاوت معنی‌داری | میانگین | | | تیمار |
|-------------------|--------------|--------|-------|----------|
| | انحراف معیار | حداکثر | حداقل | |
| FD-Mid** FD-End** | ۳۷/۳ | ۱۴۱/۶ | ۱۷/۳ | FD-Ini |
| FD-Ini** FD-End** | ۴۰/۶ | ۱۵۲/۵ | ۱۸/۵ | FD-Mid |
| FD-Ini** FD-Mid** | ۴۲/۹ | ۱۶۳/۲ | ۲۱/۶ | FD-End |
| Ns | ۲۹/۷ | ۷۶/۸ | ۱۵/۴ | CD70-Ini |
| Ns | ۳۳/۵ | ۸۰/۱ | ۱۶/۷ | CD70-Mid |
| Ns | ۳۶/۱ | ۸۰/۷ | ۲۰/۳ | CD70-End |
| CDch-End* | ۱۳/۳ | ۹۴/۳ | ۱۵/۳ | CDch-Ini |
| Ns | ۱۸/۴ | ۹۴/۹ | ۱۴/۲ | CDch-Mid |
| CDch-Ini* | ۱۷/۵ | ۹۵/۶ | ۱۶/۸ | CDch-End |

** تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد * تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد ns تفاوت غیرمعنی‌دار

جدول ۸. تجزیه و تحلیل مقادیر عمق سطح ایستابی گندم در موقعیت‌های مختلف مزرعه (End·Mid·Ini) به ترتیب یک‌چهارم ابتدا، وسط و یک‌چهارم انتهای طول زهکش فرعی

| تفاوت معنی‌داری | میانگین | | | تیمار |
|---------------------|--------------|--------|-------|----------|
| | انحراف معیار | حداکثر | حداقل | |
| FD- Mid** FD- End** | ۵۷/۲ | ۱۳۹/۶ | ۲۲/۳ | FD-Ini |
| FD- Ini** FD- End* | ۵۸/۱ | ۱۵۱/۲ | ۲۶/۱ | FD-Mid |
| FD- Ini** FD- Mid* | ۵۵/۶ | ۱۶۱/۵ | ۳۵/۴ | FD-End |
| CD70- End* | ۳۲/۷ | ۷۸/۸ | ۱۷/۲ | CD70-Ini |
| ns | ۳۶/۶ | ۸۲/۸ | ۱۷/۳ | CD70-Mid |
| CD70- Ini* | ۳۴/۹ | ۸۳/۵ | ۱۹/۵ | CD70-End |
| ns | ۲۸/۲ | ۹۲/۱ | ۱۴/۴ | CDch-Ini |
| ns | ۳۱/۷ | ۹۶/۴ | ۱۷/۷ | CDch-Mid |
| ns | ۳۷/۷ | ۹۷/۶ | ۲۱/۸ | CDch-End |

** تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد * تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد ns تفاوت غیرمعنی‌دار

رابطه بهره‌وری به نسبت نزدیکی افزایش یافته و باعث نزدیک شدن بهره‌وری تبخیر و تعرق در هر سه تیمار شده است. راندمان آبیاری در تیمارهای CD70 و CDch به ترتیب ۲۷/۷ و ۳۹/۶ درصد نسبت به تیمار FD افزایش یافت. که این افزایش در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. با اجرای زهکشی کنترل‌شده، از میزان زهاب خروجی کاسته شده و تبخیر و تعرق واقعی گیاه افزایش یافت و در نتیجه راندمان آبیاری نسبت به تیمار زهکشی آزاد بیش‌تر شده است. افزایش راندمان در تیمار CDch نسبت به تیمار CD70 نیز به دلیل بالاتر بودن میزان افزایش تبخیر و تعرق واقعی گیاه در تیمار CDch است.

میزان عملکرد محصول گندم در تیمارهای CDch و CD70 مطابق با جدول (۱۰)، به ترتیب ۴۱/۳ درصد (از ۵/۰۶ به ۷/۱۵ تن بر هکتار) و ۲۶/۶ درصد (از ۵/۰۶ به ۶/۴۱ تن بر هکتار) نسبت به تیمار FD افزایش یافت که این اختلاف به لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. عملکرد گندم در تیمار CDch نیز نسبت به تیمار CD70 به میزان ۱۱/۵ درصد (از ۶/۴۱ به ۷/۱۵ تن بر هکتار) افزایش داشت که در این دو تیمار نیز در سطح پنج درصد، اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری تبخیر و تعرق در تیمارهای CDch، CD70 و FD به ترتیب ۰/۵۴، ۰/۶۸ و ۰/۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱/۰۹، ۱/۲۸ و ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. اختلاف معنی‌داری در بهره‌وری آب آبیاری در همه تیمارها و در بهره‌وری تبخیر و تعرق تنها بین تیمارهای زهکشی کنترل‌شده و زهکشی آزاد و در سطح پنج درصد مشاهده شد. اثر اجرای زهکشی کنترل‌شده را در مدت شش سال گزارش کردند. راندمان آبیاری نیز در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی آزاد افزایش معنی‌داری یافت که در بخش ذرت قبل بررسی شد.

شاخص‌های عملکرد، بهره‌وری و راندمان آبیاری

جدول (۹) و (۱۰) نتایج تجزیه و تحلیل میانگین شاخص‌های عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری، بهره‌وری تبخیر و تعرق و راندمان آبیاری را در دو محصول ذرت و گندم، نشان می‌دهد. در محصول ذرت، عملکرد علوفه تر در تیمار CDch با ۶۱/۴ تن بر هکتار و تیمار CD70 با ۵۸/۵ تن بر هکتار نسبت به تیمار FD، با افزایش ۲۴/۹ و ۱۹/۱ درصد، اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد داشته است. تیمار CDch نیز نسبت به تیمار CD70 افزایش ۴/۸ درصدی از خود نشان داد که این تفاوت به لحاظ آماری معنی‌دار نیست. (Mejia et al., 2000) و (Ng et al., 2002) نیز افزایش عملکرد ذرت در اثر اجرای زهکشی کنترل‌شده را گزارش کردند. افزایش عملکرد محصول را می‌توان به بالاتر بودن میزان تبخیر و تعرق در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی آزاد مرتبط دانست. با افزایش عملکرد علوفه تر در تیمارهای CD70 و CDch، بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب با ۴۴ و ۲۹/۶ درصد افزایش نسبت به تیمار FD و در تیمار CDch نیز با ۱۱/۱ درصد افزایش نسبت به تیمار CD70، در سطح پنج درصد معنی‌دار ارزیابی شد. میزان آب مصرفی در تیمارها نزدیک به یکدیگر بوده است. بنابراین با افزایش عملکرد محصول در ازای واحد آب مصرفی تقریباً یکسان، افزایش بهره‌وری در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده دور از انتظار نیست. بهره‌وری تبخیر و تعرق در تیمارهای CDch و CD70 نسبت به تیمار FD اندکی افزایش یافت، به‌گونه‌ای که این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نیست. عدم تفاوت معنی‌دار در میزان بهره‌وری تبخیر و تعرق (با توجه به افزایش میزان عملکرد) را می‌توان به بالاتر بودن میزان تبخیر و تعرق واقعی در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده نسبت داد، زیرا در این تیمارها میزان تبخیر و تعرق واقعی بیشتر از تیمار FD بوده و با توجه به بالاتر بودن عملکرد در این تیمارها، صورت و مخرج کسر در

جدول ۹. میانگین شاخص‌های عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری، بهره‌وری تبخیر و تعرق و راندمان آبیاری ذرت در تیمارهای مختلف

| تیمار | عملکرد علوفه تر (kg/ha) | عملکرد خشک (kg/ha) | بهره‌وری آب آبیاری (WP _i) (kg/m ³) | بهره‌وری تبخیر (WP _{ET}) (kg/m ³) | راندمان آبیاری (IE) (%) |
|-------|----------------------------|-----------------------|---|---|----------------------------|
| FD | a*۴۹۱۳۵ | a۱۵۵۲۴ | a۱/۱۸ | b۳/۰۶ | a۳۸/۶ |
| CD70 | b۵۸۵۵۳ | b۱۷۰۳۸ | b۱/۵۳ | b۳/۱۰ | b۴۹/۳ |
| CDch | c۶۱۴۱۸ | c۱۸۲۵۹ | c۱/۷۰ | b۳/۱۵ | c۵۳/۹ |

* تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد (آزمون دانکن)

جدول ۱۰. تجزیه و تحلیل میانگین شاخص‌های عملکرد، بهره‌وری آب آبیاری، بهره‌وری تبخیر و تعرق و راندمان آبیاری گندم در تیمارهای مختلف

| تیمار | عملکرد محصول (kg/ha) | عملکرد بیولوژیک (kg/ha) | بهره‌وری آب آبیاری (WPI) (kg/m ³) | بهره‌وری تبخیر و تعرق (WPE _T) (kg/m ³) | راندمان آبیاری (IE) (%) |
|-------|----------------------|-------------------------|---|--|-------------------------|
| FD | a*۵۰۶۴/۰ | a۱۴۲۲۸ | a۰/۵۴ | a۱/۰۹ | a۴۹/۱ |
| CD70 | b۶۴۱۱/۲ | b۱۵۰۱۵ | b۰/۶۸ | b۱/۲۸ | b۵۳/۱ |
| CDch | c۷۱۵۵/۲ | b۱۵۶۱۵ | c۰/۷۶ | b۱/۳۵ | b۵۶/۴ |

تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد (آزمون دانکن)*

نتیجه‌گیری

در سامانه‌های زهکشی آزاد در اغلب موارد، زمین بیش از اندازه زهکشی می‌شود و حجم زیادی آب از اراضی خارج شده و باعث می‌شود سطح ایستابی بسیار پایین نگه‌داشته شود. به همین دلیل راندمان آبیاری کاهش پیدا می‌کند. با کنترل دبی خروجی در زهکشی کنترل‌شده، ذخیره رطوبت در خاک محفوظ می‌ماند و بدین ترتیب گیاه می‌تواند در فصل کم‌آبی از آب ذخیره شده در زمین استفاده کند. با اجرای زهکشی کنترل‌شده در دو حالت سطح کنترل متغیر (CDch) و سطح کنترل ثابت با عمق ۷۰ سانتی‌متر (CD70)، حجم زهاب خروجی از زهکش‌ها به‌صورت معنی‌داری در محصول ذرت (به میزان ۵۱/۲ و ۴۳/۸ درصد) و در محصول گندم (به میزان ۴۶/۶ و ۳۳/۱ درصد) نسبت به زهکشی آزاد (FD) کاهش یافت. در صورت اجرای سیستم زهکشی کنترل‌شده در مقیاس بزرگ، حجم زهاب خروجی به‌صورت چشمگیری کاهش خواهد یافت. میزان نوسانات سطح ایستابی در زهکشی آزاد بیش از زهکشی کنترل‌شده بود. تغییرات مکانی سطح ایستابی در طول زهکش نیز در زهکشی آزاد به‌صورت معنی‌داری بیش‌تر از زهکشی کنترل‌شده مشاهده شد. به‌عبارت دیگر، زهکشی کنترل‌شده با یکنواختی بیش‌تر در تراز آب زیرزمینی، امکان دسترسی بهتر گیاه به آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. میزان عملکرد علوفه تر حاصل از کشت ذرت در

تیمارهای CD70 و CDch به میزان ۲۴/۹ و ۱۹/۱ درصد و عملکرد دانه گندم به مقدار ۴۱/۳ و ۲۶/۶ درصد نسبت به تیمار FD افزایش یافت. بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده و به‌خصوص در تیمار CDch بیش از تیمار زهکشی آزاد بود. از مشکلات این سامانه می‌توان به شور شدن خاک اشاره نمود که برای رفع آن، باز کردن زهکش‌ها در بین فصل کشت و انجام عملیات آبشویی توصیه می‌شود. با اجرای سامانه زهکشی کنترل‌شده با مدیریت تراز آب زیرزمینی در فصل کشت می‌توان با کاهش حجم زهاب، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع زهاب را تا حد زیادی کاهش داد. از سوی دیگر، با افزایش یکنواختی در وضعیت سطح ایستابی و تراز آب زیرزمینی، میزان تنش وارده به گیاه کمتر شده، عملکرد محصولات افزایش یافته و به‌تبع آن، بهره‌وری مصرف آب نیز افزایش می‌یابد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دفتر بهبود بهره‌وری آب و اقتصاد، معاونت آب و آبفا وزارت نیرو به دلیل حمایت مالی در قالب "طرح ساماندهی بهره‌وری آب" و آقای دکتر Ritzema Henk عضو هیئت علمی دانشگاه واخنینگن هلند و مسئولین محترم دفتر فنی و مهندسی شرکت کشت و صنعت مغان به دلیل همکاری در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

REFERENCES

- Akram, M., Azari, A., Nahvi, A., Bakhtiari, Z. and Safaei, H.D. (2013). Subsurface drainage in Khuzestan, Iran: environmentally revisited criteria. *Irrigation and Drainage*, 62(3), 306-314.
- Ayars, J.E., Christen, E.W. and Hornbuckle, J.W. (2006). Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 128-139.
- Bonati, G. and Borin, M. (2010). Efficiency of controlled drainage and sub-irrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields. *Agricultural Water Management* 98, 343-352.
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A., Howell, T.A. and Eisenhauer, E. (1997). Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423-442.
- El-Ghannam, M.K., Abo Waly, M.E., Gaheen, S.A., Karajeh, F.F. and Gendy A.A. (2016). Controlled drainage effects on nitrate leaching, salinity buildup and sugar beet production (Egypt). *Merit Research Journal of Agricultural Science and Soil Sciences*, 4(2), 023-032.
- FAO. (1984). Drainage Testing, *Irrigation and Drainage paper*. NO. 28, Food and Agriculture Organization of the United Nation Rome.
- Gerardo, E. V.H. and Linden, V. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A

- matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*, 108, 9–15.
- Gowing, J.W., Rose, D.A. and Ghamarnia, H. (2009). The effect of salinity on water productivity of wheat under deficit irrigation above shallow groundwater. *Agricultural Water Management*, 96, 517-524.
- Hassanoghli, A.R., Esmaeili Aminlooi, A. and Sakhaei Rad, H. (2015). Assessment in of Quality and Quantity Drain in Subsurface Drainage drains without envelope in comparison with Mineral envelope in Shadegan Plain. Investigation of subsurface drainage water quality and quantity of bare tiles in comparison with mineral envelope in Shadegan plain. *Water Research in Agriculture*, 22(2), 263-275. (In Farsi)
- Helmerts, M., Christianson, R., Breneman, G., Lockett, D. and Pederson, C. (2012). Water table, drainage, and yield response to drainage water management in southeast Iowa. *Journal of Soil Water Conservation*, 67, 495–501.
- Hornbuckle, J.W., Christen, E.W., Ayars, J.E. and Faulkner, R.D. (2005). Controlled water table management as a strategy for reducing salt loads from subsurface drainage under perennial agriculture in semi-arid Australia. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(2), 145-159.
- Jaynes, D.B. (2012). Changes in yield and nitrate losses from using drainage water management in central Iowa, United States. *Journal of Soil, Water Conservation*, 67, 485–494.
- Mahjoubi, A., Hooshmand, A., Naseri, A.A. and Jafari S. (2014). Effect of controlled drainage on reducing drainage coefficient and drainage volume in sugarcane fields of Imam Khomeini Agro-industry. *Journal of Water and Soil*, 27(6), 1133-1144. (In Farsi)
- Mejia, M.N., Madramootoo, C.A. and Broughton, R.S. (2000). Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agricultural Water Management*, 46(1), 73-89.
- Nangia, V. (2005). Field- and watershed-scale evaluation of water quality trends due to changes in landscape and management practices. University of Minnesota. Mexico.
- Ng, H.Y.F., Tan, C.S., Drury, C.F. and Gaynor, J.D. (2002). Controlled drainage and sub-irrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 90, 81-88.
- Noory, H. and Liaghat, A. (2009). Water Table Management to improve drainage water quality in semiarid climatic conditions of Iran. *Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 665-670.
- Rozemeijer, J.C., Visser, A., Borren W., Winegram, M., Van der Velde, Y., Klein, J. and Broers, H. P. (2016). High-frequency monitoring of water fluxes and nutrient loads to assess the effects of controlled drainage on water storage and nutrient transport. *Hydrology Earth System Science*, 20, 347–358.
- Sadeghilari, A., Moazed, H., Naseri, A.A., Mahjobi, A. and Liaghat, A.M. (2014). Water Table Fluctuation, drainage rate and nitrogen dynamic in the farms of sugarcane cropping with controlled drainage system. *Journal of Water and Soil*, 27(6), 1077-1089. (In Farsi)
- Sepaskhah, A.R., Kanooni, A. and Ghasemi, M.M. (2003). Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. *Agricultural Water Management*, 58(1), 67-79.
- Skaggs, R.W., Mohamed, A.Y. and Evans, R.O. (2005). Agricultural drainage management: Effects on water conservation, N loss and crop yields. 2nd Agricultural Drainage and Water Quality Field Day, University of Minnesota – Southwest Research & Outreach Center, Lumberton Minnesota.
- Wahba, M.A.S., Christen, E.W. and Amer, M.H. (2005). Irrigation water saving by management of existing subsurface drainage in Egypt. *Irrigation and Drainage Drain*, 54, 1–11.
- Weestrom, I., and Messing, I. (2007). Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops. *Agriculture. Water Management*, 87(3), 229–240.