DOI: 10.22059/ijswr.2020.283502.668235 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۴، تیر ۱۳۹۹ (ص ۱۰۰۱-۹۸۷)

Lysimeter Study of Water Table Management Impact on Nitrates and Phosphates Leaching and Drainage Water Salinity in Dezful

PARIA SEDIGH[1], ALI AFROUS[1*]
1. Department of Water Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
(Received: June. 28, 2019- Revised: Jan. 14, 2020- Accepted: Jan. 15, 2020)

ABSTRACT

Todays water table management (WTM) plays an important role in saving water and nutrients such as nitrate and phosphorous and also in improving downstream water quality. However, the use of WTM in hot and dry areas such as Khuzestan may be restricted due to high evapotranspiration and capillary flow. In this study, using plastic lysimeters, the feasibility of using water table control methods (controlled drainage and subsurface irrigation) accom`plished with leaching management was investigated in Dezful climate under Tomato cultivar of Kingstone cultivar. For this purpose, three treatments including free drainage, controlled drainage and subirrigation, each in three replications were considered in lysimeters with 90 cm in heghit and 40 cm in diameter. In this study, the shallow groundwater with salinity of 2.3 dS/m was kept at a depth of 50 cm from the soil surface in the controlled drainage and subirrigation treatments. The results showed that the percentage of salts mass in drainage water of free drainage and controlled dariange treatments were 65 and 45%, respectively. The percentage of NO_3-N and phosphate mass loss in free drainage treatment were 20.9 and 8.1%, respectively that were higher than those in controlled drainage treatment with values of 13.7% and 5.7%. Since, the electrical conductivity in the root zone in subirrigation treatment did not reach to 3 dS/m, additional leaching did not performed in this treatment. Therefore, the results of this study promise the effectiveness of WTM at 50 cm from the soil surface at laboratory scale and in warm and semi-arid areas.

Key words: Controlled drainage, Lysimeter, Salinity, Subirrigation, Tomato,

*Corresponding Author's Email: ali.afrous@gmail.com

مطالعه لایسیمتری تأثیر مدیریت سطح ایستابی بر آبشویی نیترات، فسفات و شوری در زه‌آب در دزفول

پریا صدیق[۱] و علی افروس[*۱]

۱. گروه مهندسی آب، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۷- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵)

چکیده

امروزه مدیریت سطح ایستابی نقش مهمی در صرفه‌جویی آب و اقتصاد کودهای مغذی مانند نیتروژن و فسفر و همچنین بهبود کیفیت آب در پایین‌دست ایفا می‌کند، ولی استفاده از این روش‌ها در مناطق گرم و خشکی مانند خوزستان ممکن است به دلیل تبخیرتعرق زیاد و جریان موبینه‌ای ایجاد محدودیت نماید. در این تحقیق به‌وسیله لایسیمترهای پلاستیکی امکان استفاده از روش‌های کنترل سطح ایستابی (زهکشی‌کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی) با اعمال مدیریت آبشویی در اقلیم گرم و خشک دزفول تحت کشت گیاه گوجه‌فرنگی رقم کینگ‌استون بررسی گردید. به این منظور سه تیمار با شرایط مختلف کنترل سطح ایستابی شامل زهکشی‌آزاد، زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی در سه تکرار در ۹ عدد لایسیمتر (ارتفاع ۹۰ و قطر ۴۰ سانتی‌متری) در نظر گرفته شد. در این مطالعه، سطح ایستابی با شوری آب برابر ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر در عمق ۵۰ سانتی‌متر از سطح خاک در دو تیمار کنترل سطح ایستابی و آبیاری زیرزمینی ایجاد گردید. نتایج نشان داد که درصد جرم نمک خروجی در زه‌آب زهکشی آزاد و زهکشی‌کنترل‌شده به ترتیب ۶۵ و ۴۵ درصد بود. درصد هدررفت جرمی نیتروژن نیتراتی و فسفات در زه‌آب تیمار زهکشی آزاد به ترتیب با مقدار ۲۰/۹ و ۸/۱ درصد بزرگ‌تر از مقادیر مشابه در تیمار زهکشی‌کنترل‌شده با مقادیر ۱۳/۷ و ۵/۷ درصد بود. با توجه به اینکه هدایت‌الکتریکی (EC) در تیمار آبیاری زیرزمینی در منطقه ریشه فراتر از ۳ دسی‌زیمنس بر متر نرفت، هیچ‌گونه شست‌وشویی در این بخش صورت نگرفت. لذا نتایج این تحقیق امکان کارایی مدیریت سطح ایستابی را در عمق ۵۰ سانتی‌متری در مقیاس آزمایشگاهی در مناطق گرم و خشک بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرزمینی، زهکشی کنترل‌شده، شوری، گوجه‌فرنگی، لایسیمتر.

مقدمه

یکی از روش‌های مدیریتی که به‌صورت معمول در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب مورد استفاده قرار می‌گیرد، کنترل سطح ایستابی در زیر عمق توسعه‌ی ریشه‌ها است که به دو صورت زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی در زمین‌های کشاورزی اعمال می‌شود. در زهکشی کنترل‌شده خروجی زهکش‌ها بسته و یا در ارتفاعی بالاتر از لوله‌های زهکش تنظیم می‌شود تا آب آبیاری مدت زمان بیشتری در خاک باقی‌مانده و بتواند مورد استفاده گیاه قرار گیرد. در آبیاری زیرزمینی آب از طریق لوله‌های زهکش به داخل پروفیل خاک منتقل شده و باعث ایجاد سطح ایستابی کم‌عمق برای استفاده گیاه می‌شود (Ismailnia *et al.*, 2005). مزایای حاصل از این روش‌ها متعدد بوده که می‌توان به مواردی از قبیل کاهش زه‌آب‌های خروجی، کاهش شستشوی کودها و مواد مغذی از خاک، تأمین رطوبت بیشتر در محیط ریشه‌ها، کاهش تنش رطوبتی، افزایش تعرق گیاه و در نتیجه افزایش محصول اشاره کرد. تنها راه بهره‌برداری مفید و مطلوب از زمین‌ها که اغلب فاقد زهکشی مناسب نیز می‌باشند، تقویت و احداث سیستم‌های زهکشی زیرزمینی است. از این نظر طراحی و اجرای صحیح زهکش‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد و هرگونه نقصی می‌تواند موجب تجمع نمک در خاک، از دست دادن تدریجی حاصلخیزی خاک و پایین آمدن بازدهی محصول شود (Nozari and Azadi, 2017). زهکشی کنترل‌شده یکی از روش‌های مدیریت سطح ایستابی است که در آن، با کنترل خروجی زهکش‌ها، ذخیرهٔ رطوبت در خاک محفوظ می‌ماند و تلفات نیتروژن و کودهای شیمیایی از طریق زهکش‌ها به حداقل می‌رسد و به این ترتیب، گیاه می‌تواند در فصل کم‌آبی از آب و کود ذخیره شده در زمین استفاده نماید. از مزایای این روش می‌توان به کاهش حجم زه‌آب تخلیه شده، کاهش تلفات کودهای شیمیایی و در نتیجه آن، کاهش آلودگی محیط زیست، همچنین افزایش تعرق، عملکرد نسبی و کارآیی مصرف آب اشاره نمود (Fisher *et al.*, 1999; Skaggs, 2007). Javani Jooni *et al.*, (2018) در تحقیقی به تأثیر زهکشی‌کنترل‌شده بر دبی زه‌آب، سطح ایستابی و بهره‌وری آب

* نویسنده مسئول: ali.afrous@gmail.com

در دشت مغان پرداختند که در این پژوهش سامانه زهکشی‌کنترل شده در اراضی دشت مغان با هدف کاهش حجم زه‌آب خروجی، مدیریت بهتر سطح ایستابی و افزایش بهره‌وری آب آبیاری در محصولات ذرت و گندم به اجرا درآمد. این بررسی در زمینی به مساحت ۴۴ هکتار در قالب سه تیمار شامل زهکشی‌آزاد و زهکشی‌کنترل‌شده با عمق کنترل ثابت ۴۰ سانتی‌متر و زهکشی کنترل‌شده با عمق متغیر در دوره رشد گیاه در سه تکرار صورت گرفت. نتایج نشان داد با اجرای سامانه زهکشی‌کنترل‌شده، علاوه بر کاهش زه‌آب خروجی، از میزان خسارات زیست‌محیطی ناشی از زه‌آب در مزارع پایین‌دست نیز کاسته می‌شود. Madramootoo *et al.*, (2007) در تحقیقی نشان دادند که تولید محصول از سیستم‌های زهکشی‌کنترل‌شده می‌تواند تا ۱۰ درصد و بالاتر از سیستم‌های زهکشی آزاد بیشتر گردد. Mahjoubi *et al.*, (2012) در تحقیقی به بررسی آثار زهکشی‌کنترل‌شده بر شوری خاک، مدیریت آبیاری و عملکرد نیشکر پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سیستم زهکشی‌کنترل‌شده سبب صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش حجم زه‌آب خروجی، کاهش میزان شوری زه‌آب و مقدار نمک خروجی خواهد شد. Ismailnia *et al.*, (2005) در تحقیقی به بررسی مطالعه لایسیمتری روش‌های مدیریت سطح ایستابی در آبیاری گوجه‌فرنگی پرداخت، نتایج نشان داد که امکان استفاده از این روش‌ها در شرایط خشک و نیمه‌گرم کرج امکان‌پذیر است. Ramezanimoghadam *et al.*, (2014) در تحقیقی ارزیابی لایسمتری تأثیر تنش آبی و کود نیتروژن بر گیاه ذرت در شرایط سطح ایستابی کم‌عمق پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از آبیاری زیرزمینی علاوه بر کاهش حجم زه‌آب خروجی از لایسیمترها، عملکرد محصول نیز افزایش یافته است. بنابراین مدیریت سطح ایستابی ضمن افزایش سودآوری منجر به کاهش بار آلودگی منابع آب خواهد شد. Elmi *et al.*, (2005) در Quebec کانادا تحقیقی را بر روی تأثیر مدیریت سطح ایستابی در کاهش نیترات خروجی از پروفیل خاک انجام دادند. نتیجه این تحقیق نشان داد که میزان تلفات نیترات خروجی از پروفیل خاک در عمق ۷۵ سانتی‌متر در تیمار زهکشی‌کنترل‌شده به‌طور متوسط ۵۰ درصد از مقدار مشابه در زهکشی‌آزاد کمتر بود. نتایج تحقیقات مختلف نشان داد که زهکشی میان‌فصل به‌عنوان یکی از روش‌های مدیریت آب در اراضی شالیزاری، نقش مهمی در افزایش عملکرد برنج و افزایش کارایی مصرف نیتروژن دارد (Darzi-Naftchali and Shahnazari,2014). Jia and Evans., (2006) زهکشی‌زیستی و زهکشی کنترل‌شده را به‌عنوان بهترین راهکار مدیریتی برای کاهش ریسک انتقال مواد غذایی به آب‌های سطحی دانستند. مدیریت سطح ایستابی، افزایش کارایی مصرف آب، کاهش حجم زه‌آب، استفاده مجدد از زه‌آب و اجرای روش‌های نوین زهکشی از اقدامات لازم در زهکشی است (Anon, 2010). Liu *et al.* (2009) با انجام زهکشی کنترل‌شده در مزارع برنج در چین تجزیه و تحلیلی را در خصوص توازن نمک و آب در این ناحیه انجام دادند. این محققین اظهار کردند که زهکشی کنترل‌شده تحت شرایط تخصیص آبیاری ثابت و معین، ضمن اینکه توازن املاح و شوری را در ناحیه ریشه گیاه در حالت قابل قبولی حفظ می‌نماید، می‌تواند از آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌طور گسترده‌ای بکاهد. همچنین این سیستم قادر است میزان زه‌آب، زمان آبیاری یا عمق آبیاری و مقدار کود به‌کار برده شده را نیز کاهش داده و پتانسیل ذخیره آب آبیاری را افزایش دهد. Shao *et al.* (2014) در تحقیقی که در دو سال متوالی به انجام رسید، به این نتیجه دست یافتند که مدیریت تلفیقی زهکشی‌کنترل‌شده و آبیاری‌زیرزمینی توانسته است عملکرد بهتری در مقایسه با زهکشی‌آزاد معمولی داشته باشد. Rozemeijer *et al.*, (2016) به بررسی تغییرات هیدرولیکی و شیمیایی زه‌آب در زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی مرسوم، در مقیاس کوچک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان دهنده این بود که زهکشی کنترل‌شده علاوه بر این‌که دبی زهکش را کاهش و ذخیره آب زیرزمینی را افزایش داد، باعث کاهش میزان فسفر در زه‌آب خروجی نیز شد. نتایج پژوهش Helmers *et al.*, (2012) نیز نشان داد که زهکشی‌کنترل‌شده نسبت به زهکشی معمول، باعث افزایش راندمان مصرف آب به میزان ۱۱ درصد، افزایش عملکرد ذرت به میزان ۱۴ درصد، کاهش تلفات نیتروژن به میزان ۳۱ درصد شد. Gowing *et al.*, (2009) در مصر تحقیقی در خصوص اثرات زهکشی‌کنترل‌شده 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 ۱۸ درصد و در فصل زمستان ۲۸ درصد نسبت به زهکشی آزاد کاهش یافت. نتایج تحقیق Shouse *et al.*, (2010) نشان داد که شوری و نسبت جذبی سدیم در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده تغییر قابل ملاحظه‌ای بین ابتدا و انتهای دوره وجود نداشت. Akram *et al.*, (2013) در پژوهشی بیان کردند که نگرش سنتی حاکم بر طراحی سامانه‌های زهکشی هدف این عملیات را تنها افزایش عملکرد گیاه و بهبود شرایط محیط رشد دانسته و اثرات زیست‌محیطی طرح‌های زهکشی را کمتر مورد توجه قرار می‌دهد که امروزه این نگرش، جایگاه خود را از دست‌داده است. Hassanoghli *et al.*, (2015) زهکشی کنترل‌شده یکی از روش‌های مدیریت سطح ایستابی است که دارای مزایای زیادی از جمله کاهش حجم زه‌آب تخلیه‌شده، کاهش تلفات کودهای شیمیایی از

اراضی کشاورزی و به‌تبع آن کاهش آلودگی محیط زیست، افزایش تعرق گیاهی، افزایش عملکرد نسبی محصول و ارتقاء کارایی مصرف آب است. نتیجه این نیز تحقیق که در یک منطقه با اقلیم گرم انجام شده است، این نتایج را تأیید نموده است. Molavi *et al.*, (2011) به بررسی کنترل شوری و تلفات نیترات در زه‌آب تحت مدیریت سطح ایستابی پرداختند که در تیمار زهکشی کنترل شده در مقایسه با تیمار آزاد جذب نیتروژن گیاه افزایش داشته و عملکرد بالاتر محصول را منتج شده است. همچنین در انتهای فصل رشد اگرچه تجمع نمک بیشتری در پروفیل خاک در تیمارهای زهکشی‌کنترل‌شده به سبب فقدان آبشویی مشاهده شد ولی این امر می‌تواند با آبشویی املاح در خارج از فصل رشد مدیریت شود.(Creze and Madramootoo, (2019 در بررسی روش‌های مدیریت سطح ایستابی شامل زهکشی‌کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی و در شرایط مزرعه‌ای تحت کشت ذرت، دریافتند که این روش‌ها، ضمن افزایش کارایی مصرف آب و کود، منجر به کاهش تصعید گازهای خطرناکی مانند دی‌اکسید کربن، اکسید ازت و متان می‌گردد. بنابراین این روش‌ها در بهبود شرایط محیطی در راستای توجه به محیط زیست مؤثر هستند. در نگرش نوین لازم است علاوه بر اهداف کشاورزی، اهداف زیست‌محیطی و به‌ویژه، مخاطرات ناشی از تخلیه زه‌آب‌هایی با کیفیت نامطلوب به محیط زیست را نیز مورد توجه جدی قرارداد. با توجه به این‌که در بیشتر نقاط خوزستان و بخش‌هایی از شمال غرب خوزستان سطح آب زیرزمینی شور و لب‌شور بالا می‌باشد که بخش‌هایی از طرح شبکه‌بندی و احیای ۵۵۰ هکتاری اخیراً در کشور نیز دارای این خصوصیت می‌باشد، انجام چنین تحقیقی می‌تواند با استفاده از روش‌های مدیریت کنترل سطح ایستابی را مورد بررسی قرار دهد. مرور نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سامانه زهکشی‌کنترل‌شده در مناطق گرم و خشک امکان‌پذیر است و اجرای آن فوائد زیادی در بر خواهد داشت. البته بسته به شرایط آب و هوا، خاک و نوع گیاه، تأثیر مدیریت سطح ایستابی روی میزان کاهش مصرف آب، تغییرات شوری خاک و عملکرد محصول متفاوت است و اجرایی کردن این سیستم مستلزم تحقیق در مورد آن منطقه هست.

هدف از این تحقیق بررسی امکان استفاده از زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی برای محصول گوجه‌فرنگی در اقلیم گرم و خشک دزفول و تأثیر آن بر میزان صرفه‌جویی در مصرف آب، تغییرات شوری خاک و میزان جذب و تخلیه فسفات و نیترات و عملکرد گوجه است.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

آزمایشات مربوط به این تحقیق در لایسیمترهایی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، در شهرستان دزفول با عرض جغرافیایی "۱۶ ´۳۲ و طول جغرافیایی "۲۵ ´۴۸ و ارتفاع ۱۴۰ متر از سطح تراز دریا انجام گردید. از نظر اقلیمی این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک می‌باشد. این آزمایش از تاریخ ۱۳۹۷/۵/۱۴ تا ۱۳۹۷/۹/۱۵ روی گیاه گوجه‌فرنگی رقم کینگ‌استون انجام شد. خاک مورد استفاده در این مطالعه دارای بافت لومی‌سیلتی بود.

تیمارهای آزمایشی

در این تحقیق از ۹ لایسیمتر از جنس PVC به قطر ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر برای کاشت محصول و اعمال تیمارها استفاده شد. سه تیمار آبیاری زیرزمینی (SI)[1]، زهکشی کنترل-شده (CD)[2] و زهکشی آزاد (FD)[3] در سه تکرار در نظر گرفته شد که بر روی یک سکوی به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفتند (شکل ۱). با توجه به محدودیت عمق لایسیمترها (۹۰ سانتی‌متر) و با در نظر گرفتن عمق توسعه ریشه گیاه گوجه، سطح ایستابی در ۵۰ سانتی‌متر از سطح خاک تنظیم گردید. در تیمار زهکشی آزاد آبیاری از سطح خاک انجام شد و خروجی زهکش آزاد بود. در تیمار زهکشی کنترل‌شده آبیاری از سطح انجام گرفت اما خروجی زهکش به کمک اتصال زانو در عمق ۵۰ سانتی‌متری تنظیم شد (شکل ۲). در نتیجه آب آبیاری در خاک ذخیره و مازاد آن از رایزر خارج می‌شد. در تیمار آبیاری زیرزمینی آبیاری از سطح انجام نمی‌شد، بلکه آب از طریق یک منبع به مخزن تنظیم ارتفاع منتقل می‌شد و از طریق آن به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری زهکش‌ها می-رسید، به‌طوری که عمق سطح ایستابی ثابت شد و در ۵۰ سانتی-متری از سطح خاک برقرار گردید (شکل ۳). برای ثابت نگه داشتن سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی از لوله PVC به قطر ۵ سانتی‌متر به عنوان رایزر استفده شد. یک لوله شفاف عمودی به قطر ۲ میلی‌متر نیز در کنار لایسیمتر نصب شده بود و نقش پیزومتر را داشت. همچنین به-منظور جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون لوله‌های زهکش از صافی یا فیلتر مناسب در اطراف لوله زهکش استفاده شد.

1. Underground irrigation
2. Controlled drainage
3. Free drainage

شکل ۱- محل قرارگیری لایسیمترها

شکل ۲- تصویری از محل قرارگیری شیلنگ‌های زهکش

شکل ۳- نمای سیستم آبیاری زیرزمینی

اعمال شوری

گیاه کاشته شده گوجه‌فرنگی بود که از نظر مقاومت به شوری در گروه گیاهان نیمه‌مقاوم محسوب می‌شود. شوری آستانه کاهش محصول ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیب خط کاهش عملکرد ۹/۹ درصد به ازاء هر واحد شوری است (Alizadeh, 2002). از طرفی، عمق ریشه‌های آن نسبتاً زیاد است و در شرایط مناسب به ۱ تا ۱/۲ متر نیز می‌رسد (Esmaeelnia *et al.*, 2005). در نتیجه، بودن یا نبودن سطح ایستابی در تیمارهای مختلف می‌تواند بر رشد ریشهٔ گیاه تأثیرگذار باشد.

شوری آب آبیاری و آب زیرزمینی در تیمارهای آبیاری برابر ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر با توجه به رابطه (۱) در نظر گرفته شد (Alizadeh, 2010). در این مطالعه دور آبیاری نیز سه روز بود. آبیاری در تیمارهای زهکشی آزاد و زهکشی‌کنترل شده از سطح انجام و آب مورد نیاز از رابطه پنمن مانتیث محاسبه شد. تیمارهای آبیاری زیرزمینی نیز همواره به منبع آب متصل بودند. در ابتدای فصل کشت به دلیل عمق کم ریشه‌ها آبیاری در تمام تیمارها به یک اندازه و به‌صورت سطحی انجام شد. پس از استقرار گیاه و افزایش عمق ریشه‌ها، تیمارهای آبیاری (روز ۳۷ پس از کاشت) اعمال گردید.

$$ECe = 1.5\ ECi \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه فوق ECe: حد شوری آستانه برای کاهش نیافتن محصول و ECi: شوری آب آبیاری هستند.

مقدار آب آبیاری و سنجش پارامترها

نیاز آبی گوجه‌فرنگی بر اساس روش پنمن مانتیث اصلاح‌شده محاسبه گردید. مقدار آب آبیاری برای هر لایسیمتر با توجه به رابطه (۲) محاسبه و معادل ۶/۵ لیتر برای شروع آزمایش به دست آمد.

$$In = (FC - PWP) \times MAD \times Drz \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

In: حجم آب موردنیاز، FC: حد ظرفیت زراعی، PWP: رطوبت نقطه پژمردگی دائم، MAD: حداکثر تخلیه مجاز گوجه‌فرنگی با مقدار تقریبی ۰/۵ و Drz: عمق توسعه ریشه گیاه معادل ارتفاع لایسیمتر ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Dehghan *et al.*, 2015).

میزان کود نیترات (کود سفید اوره) و فسفات (کود سیاه) با توجه به اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی اولیه خاک و مشاوره با کارشناس تغذیه خاک و گیاه به صورت سطحی در اختیار گیاه قرار داده شد. در جدول (۲) مقدار و زمان کود دهی ذکر شده است. مرحله اول کوددهی به صورت پایه ۱۳ گرم فسفر و مرحله دوم روز پنجاه‌ام رشد ۶ گرم فسفر به خاک اضافه شد. پارامترهای مورد اندازه‌گیری شوری، نیترات و فسفات زه‌آب خروجی و همچنین حجم زه‌آب در تیمار زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی بود که درکنار هر یک از لایسیمترها و در زیر خروجی زهکش آن‌ها، یک ظرف پلاستیکی قرار داده شده بود. از طریق انتهای لوله زهکش به ظرف نمونه‌برداری زه‌آب تخلیه می‌گردید. به‌منظور جلوگیری از تبخیر نمونه‌های زه‌آب سریعاً در مدت زمان کمتر از ده ساعت بعد از آبیاری جمع‌آوری و حجم و کیفیت آن اندازه‌گیری می‌گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک	بافت خاک	هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربن آلی (درصد)	نیتروژن (میلی‌گرم در لیتر)	فسفر (میلی‌گرم در لیتر)	پتاسیم (میلی‌گرم در لیتر)	FC (درصد)	PWP (درصد)
۳۰-۰	لومی رسی	۱/۲۵	۷/۶	۰/۷۴	۷۸۰	۱۰/۳	۱۲۷	۳۱	۱۶/۳
۳۰-۶	لومی رسی سیلتی	۰/۳۷	۷/۸۵	۰/۴۲	۵۷۰	۱/۲	۸۶	۳۳/۴	۱۸/۱

جدول ۲- مقدار کود مصرفی در تیمارهای مورد آزمایش

دوره رشد	به‌صورت پایه	روز اول	روز پنجاه‌ام	روز شصت و دوم
نیتروژن نیتراتی (گرم)	۰	۱	۴	۶
فسفات (گرم)	۱۳	۰	۶	۰

شوری با دستگاه ECسنج رومیزی مدل WTW، پارامترهای نیترات و فسفات نیز با دستگاه قابل حمل اسپکتروفتومتر مدل DR-1900 ساخت کمپانی Hach اندازه‌گیری گردید. با توجه به حساسیت گیاه در مراحل اولیه (مرحله جوانه‌زنی) آبیاری با آب آشامیدنی لوله‌کشی شهری با هدایت-الکتریکی ۰/۶ دسی‌زیمنس بر متر صورت گرفت. از روز ۳۷ کشت بذر گوجه شروع شد. در یازده مرحله‌ی آخر، آبیاری با آب‌نمک به هدایت‌الکتریکی ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر صورت گرفت و پارامترها اندازه‌گیری شدند. همچنین میزان جرم نیترات، فسفات و نمک نیز از حاصل‌ضرب حجم زه‌آب بعد از هر آبیاری در میانگین غلظت نیترات، فسفات و نمک در هر آبیاری محاسبه گردید. میزان هدررفت جرمی نیز از تقسیم جرم خروجی به جرم ورودی به لایسیمترها محاسبه شد.

کاشت گوجه‌فرنگی و اعمال تیمار

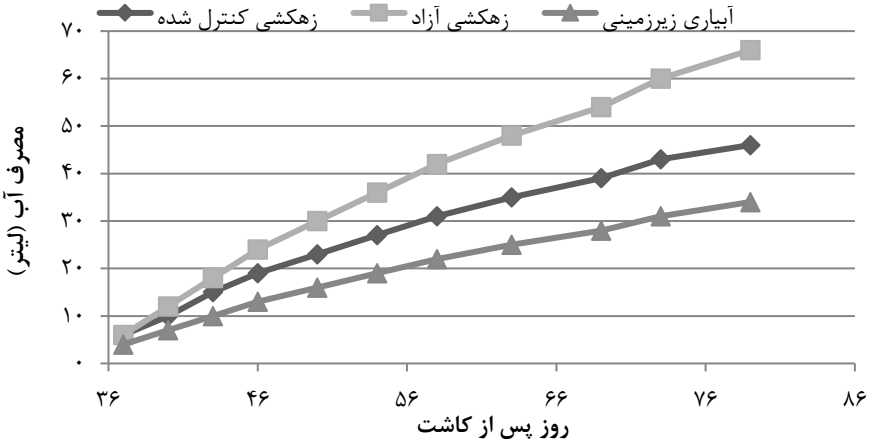
قبل از شروع آزمایش‌ها اصلی و تنظیم سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی‌کنترل‌شده، زهکشی‌آزاد و آبیاری زیرزمینی در همه لایسیمترها آبیاری از سطح خاک به یک میزان انجام شد. از ۱۴ مرداد بذرها در گلخانه کشت گردید و برای تبدیل شدن به نشا تا ۴ شهریور (۲۰ روز) نگهداری گردید. سپس نشاها به لایسیمترها منتقل شده و تا دو هفته بعد از کشت نشاها، همه لایسیمترها از سطح خاک و به اندازه نیاز آبی گیاه و بدون اضافه کردن شوری آبیاری گردید تا بوته‌ها در محیط کشت جدید تثبیت شوند. تاریخ شروع آزمایش‌ها از ۲۱ شهریور (روز ۳۷ از شروع کشت) بود و در هر سه تیمار، نمونه‌برداری‌ها بعد از هر آبیاری صورت می‌گرفت و در مجموع بعد از اعمال تیمارها ۱۱ مرحله نمونه‌برداری انجام شد. زه‌آب در ظرف‌های پلاستیکی که در کنار هر لایسیمتر قرار داشت جمع‌آوری می‌گردید، با این تفاوت که در تیمار آبیاری زیرزمینی به دلیل حجم خیلی کم و ناچیز زه‌آب، صرفاً از طریق شیلنگ‌های مخصوص که به‌صورت پیزومتر به بدنه لایسیمتر نصب گردیده بود، نمونه‌برداری انجام شد، ولی حجم زه‌آب ثبت نشد. در مراحل اولیه هر سه روز یک بار آبیاری انجام می‌شد، ولی کم‌کم با نزدیک شدن به گل‌دهی دور آبیاری به ۴ و ۵ روز یک‌بار بر اساس ظرفیت ذخیره آب خاک و نیاز آبی گیاه، تغییر داده شد چون در آبیاری-های اول با کاهش راندمان آبیاری سعی شد تا سطح ایستابی در خاک بالا بیاید (به‌وسیله پیزومتر)، ولی در آبیاری‌های آخر با توجه

به بالا بودن دور آبیاری با کاهش تبخیر تعرق و نیاز آبی و مشاهده افزایش خروجی زهکش‌ها، مقدار آب آبیاری با در نظر گرفتن راندمان کاربرد ۹۰ درصد برای تمام تیمارها یکسان در نظر گرفته شد. اما در تیمار آبیاری زیرزمینی، آبیاری از سطح خاک صورت نگرفت. تنها منبع تأمین نیاز آبی در این تیمار، منابع آبی بود که به زهکش‌ها متصل بود و از طریق ایجاد سطح ایستابی و از طریق یک شیلنگ آب در اختیار ریشه‌های گیاه قرار می‌گرفت که برای ثابت نگه‌داشتن سطح آب از شناورها استفاده می‌گردید.

نتایج و بحث

مقدار آب مصرفی

در شکل (۴) میزان تجمعی آب مصرفی در تیمارهای مورد بررسی نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل (۴) میزان تجمعی آب مصرفی از روز ۳۷ام پس از کاشت تا پایان آزمایش روند صعودی داشته است. نتایج نشان می‌دهد که میزان آب مصرفی در تیمار زهکشی آزاد بیشتر از زهکشی کنترل‌شده است. ولی مقدار مصرف آب در تیمار آبیاری زیرزمینی بسیار کمتر از مقدار آب مصرفی در تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل‌شده می‌باشد. مقدار آب مصرفی در تیمار آبیاری زیرزمینی در دوره آزمایشی، به‌طور متوسط ۶۵ درصد مقدار مصرف‌شده در تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل‌شده بوده است و این به معنای ۳۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب با این روش می‌باشد. بیشترین میزان صرفه‌جویی مصرف آب در تیمارهای آبیاری زیرزمینی و سپس زهکشی کنترل‌شده نسبت به تیمار زهکشی آزاد طی ماه‌های مهر تا آذر اتفاق افتاد؛ یعنی زمانی‌که ریشه‌های گوجه‌فرنگی به خوبی رشد و توسعه یافته و امکان استفاده از آب زیرزمینی کم‌عمق برای گیاه بهتر فراهم گردیده بود. در خصوص میزان صرفه‌جویی آب در تیمارهای آبیاری زیرزمینی باید به این نکته اشاره نمود که بخشی از صرفه‌جویی در مصرف آب، مربوط به اعمال مدیریت آبیاری در مزارع کنترل شده و جلوگیری از بیش‌آبیاری و بخش دیگری از آن نیز مربوط به نگهداشت و کنترل سطح ایستابی و کاهش میزان خروجی زهاب بود که سبب نگهداری بهتر رطوبت خاک در تیمارهای آبیاری زیرزمینی و کنترل‌شده نسبت به تیمار زهکشی آزاد بود و امکان استفاده از صعود موئینگی توسط گیاه فراهم شده و گیاه قسمتی از نیاز تبخیر و تعرق خود را مستقیماً از آب زیرزمینی تامین کرد (Mahjoubi *et al.*, 2012). در تیمارهای زهکشی‌کنترل‌شده، با توجه به امکان تأمین کمبود رطوبت خاک از طریق صعود مویینگی و جذب آب به‌وسیله گیاه در حد پتانسیل یا بالقوه، مصرف آب را می‌توان معادل تبخیرتعرق پتانسیل در نظر گرفت. برخلاف آن در شرایط زهکشی آزاد، آبیاری از سطح خاک تنها در حد گنجایش و ظرفیت خاک است و گیاه برای جذب آب به مرور زمان و قبل از آبیاری بعدی با کمبود رطوبت در خاک مواجه می‌شد. در نتیجه میزان جذب را در این شرایط نمی‌توان در حد پتانسیل دانست، در حالی‌که در شرایط زهکشی‌کنترل‌شده چنین محدودیت‌هایی وجود ندارد و به مجرد اینکه رطوبت خاک در بالای سطح ایستابی در اثر جذب گیاه کاهش می‌یافت، در اثر اختلاف پتانسیل ایجاد شده کمبود رطوبت از طریق صعود مویینگی آب از سطح ایستابی جبران می‌شد؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد که گیاه توانسته است در حد بالقوه آب جذب کند که با نتایج تحقیقات Mahjoubi *et al.* (2012) و SharifiMood *et al.* (2010) مطابقت دارد.



شکل ۴- مصرف آب تجمعی در تیمارهای زهکشی‌آزاد و کنترل‌شده در مقایسه با آبیاری زیرزمینی در طی یازده مرحله آخر آبیاری

عملکرد گیاه و کارآیی مصرف آب

کارآیی مصرف آب با استفاده از آزمون دانکن ($P \leq 0.05$) نشان می‌دهد که بین آب مصرفی زهکشی آزاد با ^{a}۱۳۵ لیتر و زهکشی کنترل شده با ^{a}۱۲۲ لیتر تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود ندارد

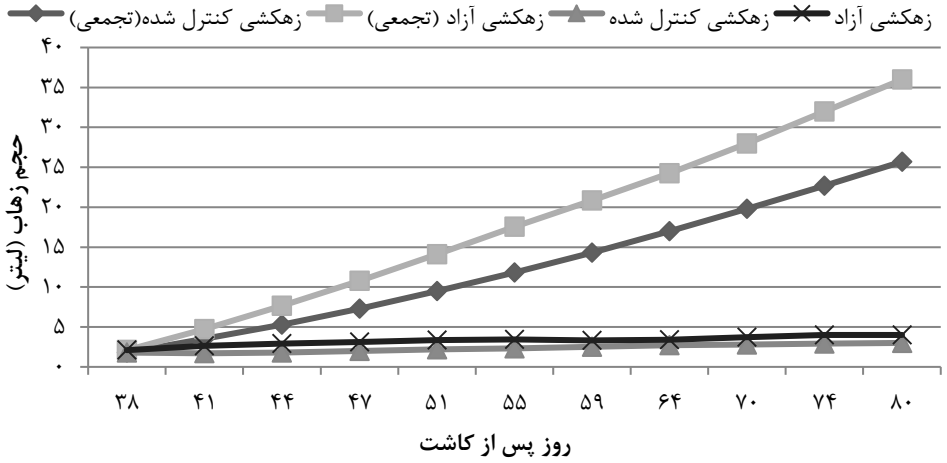
(شکل ۳) ولی آب مصرفی آبیاری زیرزمینی با ۷۸^{b} لیتر با دو تیمار دیگر تفاوت معنی‌داری دارد. بنابراین با توجه به کارایی مصرف آب زهکشی آزاد ($۱۱/۲۶^{c}$)، زهکشی کنترل‌شده ($۱۷/۷^{b}$) و آبیاری زیرزمینی ($۲۴/۸^{a}$ کیلوگرم به متر مکعب)، تفاوت معنی-داری بین هر سه تیمار وجود دارد و کارایی مصرف آب در آبیاری زیرزمینی بیشتر است. باتوجه به جدول (۳) و با استفاده از آزمون دانکن ($P \leq 0.01$) بین سه تیمار تفاوت معنی‌داری مشاهده گردید. به طوری که عملکرد محصول در زهکشی کنترل‌شده با میزان $۲/۱۷^{a}$ کیلوگرم در مترمربع بیشتر از دو تیمار دیگر است و بعد از آن تیمار آبیاری زیرزمینی با $۱/۹۴^{b}$ و زهکشی آزاد با $۱/۵۲^{c}$ کیلوگرم در مترمربع در رده‌های بعدی قرار دارند.

حجم زه‌آب‌ها

در شکل (۵) مشاهده می‌شود که در تیمار زهکشی کنترل‌شده بعد از آبیاری اول زه‌آب از زهکش‌ها خارج نشده است. این امر به دلیل ذخیره آب آبیاری در آبیاری اول در لایسیمترهای تیمار زهکشی‌کنترل‌شده بوده و به‌علت تنظیم سطح ایستابی، آب اضافه در خاک ذخیره می‌گردید. در آبیاری‌های بعدی زیر عمق ۵۰ سانتی‌متر رطوبت بیشتری در فواصل بین دو آبیاری ذخیره شده و بنابراین مقداری از آب آبیاری که اضافه است از زهکش‌ها خارج شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تقریباً از آبیاری سوم مقدار زه‌آب در تیمار زهکشی کنترل‌شده نسبت به تیمار زهکشی‌آزاد کمتر می‌شود. میزان دبی خروجی از زهکش‌ها در تیمار زهکشی آزاد همواره بیش از سایر تیمارها بوده است. بیشترین زه‌آب خروجی در تیمار زهکشی آزاد برای گوجه‌فرنگی ۴ لیتر بوده است. این در حالی است که بیشترین میزان دبی زه‌آب در تیمار زهکشی کنترل‌شده ۳ لیتر بوده است. بالا بودن دبی زه‌آب خروجی در تیمار زهکشی آزاد می‌تواند به دو دلیل باشد. زهکشی عمق بیشتری از نیمرخ خاک نسبت به دو تیمار آبیاری زیرزمینی و زهکشی کنترل‌شده و نیز وجود درز و ترک و جریانات ترجیحی در برخی از نواحی محیط کشت که باعث می‌شود مقدار قابل توجه‌ی از آب آبیاری بلافاصله و بدون اثر بخشی در تیمار زهکشی آزاد از دسترس گیاه خارج شود. همین امر باعث می‌شود آب از محدوده عمق توسعه ریشه گیاه خارج شده و علاوه بر خروج مقادیر بیشتر زه‌آب، تا حدودی به گیاه تنش وارد شود. نگهداشت آب در بالای لوله زهکش در تیمارهای کنترل سطح ایستابی از بروز دو مسئله فوق جلوگیری می‌کند. بنابراین نوسانات میزان زه‌آب تولیدی در هر نوبت آبیاری نیز به میزان آب آبیاری مصرفی برمی‌گردد. نتایج به‌دست آمده با نتایج تحقیق Javani *et al.* (2018) و Hornbuckle *et al.* (2005) مطابقت دارد.

جدول ۳- تاثیر مدیریت سطح ایستابی بر آب مصرفی، عملکرد و کارایی مصرف آب (آزمون دانکن)

مدیریت سطح آب	میزان آب مصرفی (لیتر)	عملکرد (کیلوگرم در مترمربع)	کارایی مصرف آب (کیلوگرم به مترمکعب)
زهکشی آزاد	۱۳۵^{a}	$۱/۵۲^{c}$	$۱۱/۲۶^{c}$
زهکشی کنترل شده	۱۲۲^{a}	$۲/۱۷^{a}$	$۱۷/۷^{b}$
آبیاری زیرزمینی	۷۸^{b}	$۱/۹۴^{b}$	$۲۴/۸^{a}$
آزمون دانکن	$P \leq 0.05$	$P \leq 0.01$	$P \leq 0.01$



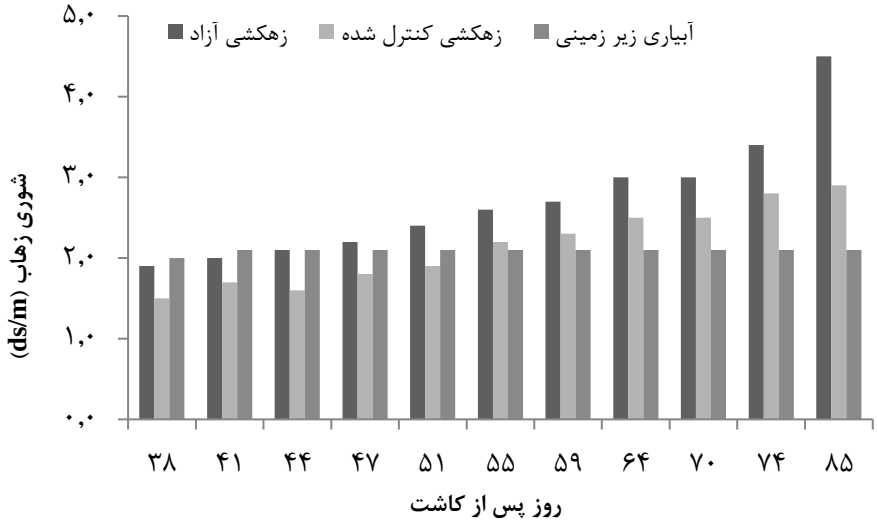
شکل ۵- متوسط میزان زه‌آب و زه‌آب تجمعی خروجی در طی یازده آبیاری آخر در تیمارهای زهکشی‌کنترل‌شده وآبیاری زیرزمینی

شوری زه‌آب

۳۳ نمونه طی ۱۱ مرحله نمونه‌برداری از هر سه تیمار آبیاری زیرزمینی اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل (۶) متوسط EC آبیاری زیرزمینی ۲ دسی‌زیمنس بر متر (متوسط ۳ تکرار) بود که نشان می‌دهد در عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک شوری کاهش یافته

است و شوری در تیمارها از ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر، که حد آستانهٔ تحمل به شوری گیاه گوجه فرنگی است، تجاوز نمی‌کند. به این دلیل آبشویی املاح در فصل زراعی انجام نشد. مقایسه‌ی تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل‌شده نشان می‌دهد که EC زه-آب‌ها در تیمار زهکشی کنترل‌شده کمتر از تیمار زهکشی‌آزاد بوده که در شکل (۶) نمایان شده است. شوری زه‌آب در زهکشی آزاد حداکثر تا ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر صعود کرد ولی در زهکشی کنترل‌شده از ۳ دسی‌زیمنس بر متر بیشتر نشد. با توجه به جبهه-ی رطوبتی و به دنبال آن جبهه‌ی نمک، چون پروفایل خاک در ابتدا یکنواخت است با شروع اعمال تیمارها ابتدا رطوبت و نمک به عمق ۵۰ سانتی‌متری می‌رسد و پس از آن در سراسر دوره، با حرکت آب و نمک به سمت بالا و تأثیر تبخیر از سطح خاک، املاح به سمت بالا و سطح خاک حرکت می‌کند (Esmaeelnia *et al.*, 2005). با توجه به رطوبت خاک که در تیمار آبیاری زیرزمینی همواره بیشتر از دو تیمار دیگر بود، غلظت نمک در آن کمتر از تیمار زهکشی کنترل شده و در تیمار زهکشی کنترل‌شده کمتر از زهکشی آزاد است. در نتیجه، با افزایش پتانسیل ماتریک خاک در اثر رطوبت بیشتر، تأثیر نمک در کاهش پتانسیل اسمزی از بین می‌رود. ضمن اینکه علاوه بر کاهش تنش شوری، تنش خشکی (رطوبتی) نیز کاهش می‌یابد. آب‌شویی در تیمار آبیاری زیرزمینی از سطح خاک اجرا نشد زیرا در طول فصل کشت در وضع ظاهری گیاه (رشد هوایی، گلدهی و غیره) تفاوت عمده‌ای در بین تیمارها مشاهده نشد (El-Ghannam *et al.*, 2016). Mansouri *et al.* (2006) در تحقیقاتی به بررسی شوری زه‌آب پرداختند. نتایج آنان حاکی از آن بود که با کنترل سطح ایستابی و مدیریت‌های مختلف آب و آبشویی می‌توان میزان کاهش عملکرد محصول بر اثر شوری را کاهش داد.

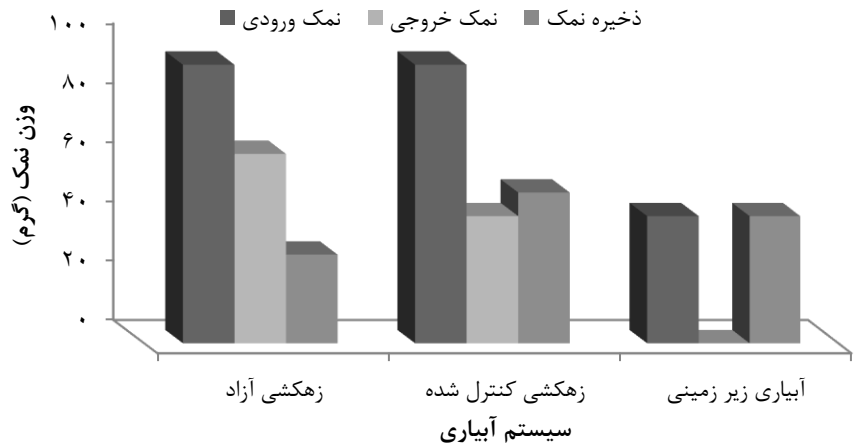
یکی از مسائلی که ممکن است ایجاد مشکل کند بارندگی-های پایان فصل و درنتیجه انتقال املاح به محیط ریشه است که تنش شدیدی به گیاه وارد می‌کند. اما در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک بارندگی‌های کمتر رخ می‌دهد ضمن آنکه مقدار آن نیز بسیار کم است. به‌علاوه در آبیاری قطره‌ای نیز این مشکل در هر زمان از فصل، خطر تنش را برای گیاه خواهد داشت. اما در آبیاری زیرزمینی این مشکل تنها در هفته‌های پایانی وجود دارد که امکان دارد شوری خاک افزایش یابد.



شکل ۶- متوسط شوری زهاب در تیمارهای زهکشی آزاد، کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی

ذخیره نمک: با استفاده از مقدار حجم آب ورودی و خروجی از هر تیمار، بیلان آب و املاح در خاک هر تیمار مشخص شد. به خاطر اینکه از روز ۳۷ام آبیاری زیرزمینی با آب‌شور انجام شد، بیلان املاح از همین زمان نیز محاسبه گردید. نمودار شکل (۷) بیلان املاح در تیمارهای آزمایشی را در زمان شروع آبیاری با آب شور نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین جرم نمک تخلیه‌شده از خاک مربوط به زهکشی آزاد با میزان ۶۴ گرم و بعد از آن در تیمار زهکشی کنترل‌شده به میزان ۴۳ گرم بوده است. اختلاف بین نمک ورودی و خروجی میزان نمکی است که در طول تاریخ اعمال آب‌شور در محیط کشت باقی‌مانده است. در آبیاری زیرزمینی چون آبشویی صورت نگرفت همان مقدار نمک داده‌شده ذخیره گردید. با توجه به مقدار شوری زه‌آب و شوری آب آبیاری، در کل ذخیره نمک در لایسیمترهای مدیریت سطح ایستابی بیشتر از لایسیمترهای زهکش آزاد بوده است. با توجه به

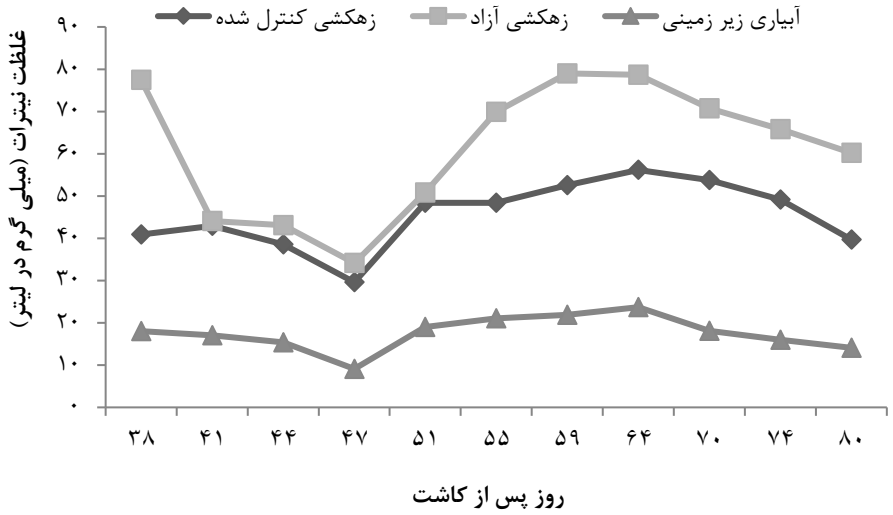
اینکه مقدار آب مصرفی در تیمار آبیاری‌زیرزمینی حدود ۵۰ درصد مقدار مصرف‌شده در دو تیمار دیگر بوده و تنها منبع ورودی نمک در خاک، آب آبیاری با هدایت الکتریکی ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر بوده است و با استناد به تحقیق Davoodi *et al.* (2018) که نتیجه گرفتند سامانه زهکشی کنترل‌شده به نحو بهتری میزان زه‌آب خروجی را کنترل و از خروج نمک جلوگیری کرده است، در این پژوهش نیز حجم نمک شسته شده کمتر از حجم نمک ورودی بوده است.



شکل ۷- بیلان املاح در تیمارهای زهکشی آزاد، کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی از زمان شروع آبیاری با آب شور

غلظت نیترات در زه‌آب: شکل (۸) تغییرات غلظت نیترات در زه‌آب را در تیمارهای آزمایشی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸) غلظت نیترات در تیمار زهکشی‌آزاد به نسبت مقادیر مشابه در تیمار زهکشی‌کنترل‌شده بالاتر می‌باشد. زمانی‌که کنترل سطح آب صورت می‌گیرد، امکان ایجاد شرایط غیرهوازی رخ می‌دهد و همین عامل باعث انجام عملیات دنیتریفیکاسیون می‌شود. زمانی‌که مواد آلی خاک بالا باشد، دنیتریفیکاسیون شدت می‌گیرد و موجب کاهش انتقال نیترات می‌گردد. کاهش غلظت نیترات زهاب خروجی در اثر انجام دنیتریفیکاسیون در تحقیقات زیادی گزارش شده است (Javani *et al.*, 2018; Dalzell *et al.*, 2007 ; Elmi *et al.*, 2005; Lalonde *et al.*, 1996; Mejia *et al.*, 2000; Ng *et al.*, 2002). از دلایل دیگری که باعث کاهش میزان غلظت نیترات خروجی در تیمارهای زهکشی کنترل شده و آبیاری زیرزمینی شده است، می‌توان به زمان تأخیر بالاتر نیترات در خاک اشاره کرد که باعث افزایش جذب توسط ریشه گیاه می‌گردد (Smith and Kellman. 2011; Bohlen and Villapando. 2011; Javani *et al.*, 2018). برخی از محققین، کاهش غلظت نیترات را به‌دلیل امکان افزایش N_2O که اثرات مخربی بر محیط زیست دارد، فرآیندی خطرناک توصیف کرده‌اند (Dalzell *et al.*, 2007)، در صورتی‌که انتشار گاز N_2O از طریق دنیتریفیکاسیون بسیار اندک می‌باشد. در تحقیقی، میزان N_2O تولید شده تنها ۲ درصد دنیتریفیکاسیون برآورد شد و نتایج نشان داد که سطح آب خاک اثری بر درصد N_2O که وارد اتمسفر می‌شود ندارد (Kliewer and Gilliam. 1995). در تحقیقات Elmi *et al.* (2005)، Sadegh lari *et al.* (2013) نتایج نشان داد که تقریباً غلظت نیترات در زهکشی‌کنترل‌شده حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد نسبت به زهکشی آزاد کاهش داشت. دلیل این امر باقی ماندن رطوبت بیشتر در خاک در تیمار زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی آزاد است. Skaggs *et al.* (2005) در یک مطالعه دو ساله لایسیمتری بر روی گیاه یونجه انجام دادند که کاهش حجم زه‌آب را با کنترل سطح ایستابی و آبیاری زیرزمینی گزارش نمودند و آن‌ها مشاهده کردند که حجم زه‌آب، بار تخلیه نیترات و هدایت‌الکتریکی زه‌آب در تیمارهای کنترل سطح ایستابی به مقدار قابل توجهی نسبت به زهکشی آزاد کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر هرچه جریان خروجی از زهکش‌ها بیشتر باشد (زهکشی آزاد) به دلیل آبشویی بیشتر نیترات بیشتری نیز در زه‌آب تلف می‌گردد، که این امر را نیز می‌توان به حلالیت بالای نیترات نسبت داد. نتایج تحقیقات مشابه نشان داد که میزان غلظت نیترات در زه‌آب آبیاری زیرزمینی تقریباً نصف دو تیمار دیگر است (Sadegh lari *et al*,. 2013 ; Skaggs *et al*,. 2005 ; Elmi *et al.*, 2005)؛ زیرا آبیاری از عمق انجام می‌گرفت و جریان املاح به‌صورت رو به بالا بوده و تلفات نیترات کمتر و بیشتر نیترات در لایه‌های میانی لایسیمتر ذخیره می‌شد. با توجه به آزمون خاک میزان کود مورد نیاز برای رشد گیاه گوجه‌فرنگی، طبق نظر کارشناس خاک و گیاه در سه قسط کود داده شد؛ مرحله اول کوددهی ۱۰ روز بعد از انتقال نشاها بود که ۱ گرم نیتروژن داده شد که غلظت نیترات خروجی ابتدا روندی

افزایشی داشته و سپس به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس روند کاهشی داشته است. با توجه به اینکه میزان کوددهی دوم نیتروژن ۴ گرم بعد از مرحله چهارم انجام شد (روز ۵۰ دوره رشد)، در نمونه‌برداری زه‌آب مربوط به همین آبیاری غلظت نیترات افزایش زیادی نداشته است و این امر به دلیل فرصت زمان محدود برای انتقال نیترات به اعماق پایین‌تر بوده است. با این حال در آبیاری بعدی میزان غلظت نیترات در هر دو تیمار به حداکثر مقدار خود رسیده است و سپس دوباره روند کاهشی داشته است. در کوددهی سوم نیز که بعد از مرحله هفتم آبیاری انجام شد ۶ گرم نیتروژن داده شد که همین روند تکرار گردیده است.

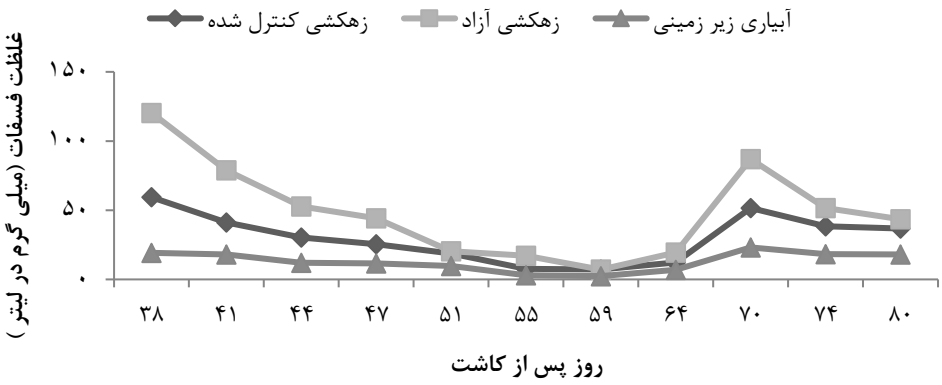


شکل ۸- تغییرات غلظت نیترات در زه‌آب در تیمارهای مختلف در طول دوره رشد

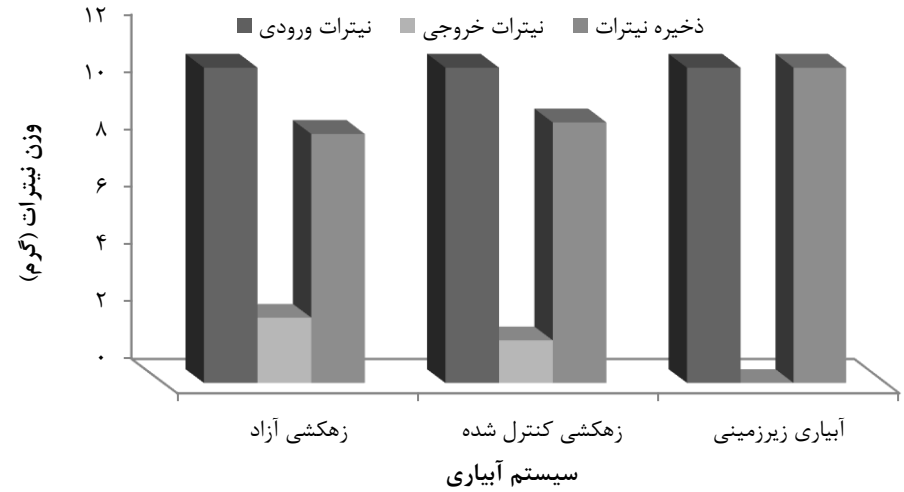
غلظت فسفات در زه‌آب: با توجه به شکل (۹) غلظت فسفات خروجی زه‌آب در آبیاری زیرزمینی کمتر از زهکشی کنترل‌شده و غلظت فسفات زه‌آب زهکشی کنترل‌شده کمتر از زهکشی آزاد است. حداکثر غلظت فسفات اندازه‌گیری شده ۳۷ روز پس از کاشت در هر سه سیستم آبیاری زیرزمینی، زهکشی-کنترل‌شده و زهکشی آزاد به‌ترتیب ۱۹/۲۱، ۵۹/۳۷ و ۱۲۰/۴ میلی‌گرم در لیتر و به مرور غلظت فسفات زه‌آب کاهش یافته تا ۵۹ پس از کاشت که به کمترین میزان خود به‌ترتیب ۲/۴، ۷/۹ و ۷/۹ میلی‌گرم و بعد از مرحله دوم کوددهی مجددا نمودار روند صعودی داشته است. با توجه به شکل (۵) و شکل (۹)، نسبت مستقیم بین میزان دبی زه‌آب و میزان هدر رفت فسفات وجود دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش میزان زه‌آب خروجی، بر هدررفت فسفات نیز افزوده می‌شود. روند انتقال فسفر در خاک غالباً بیوشیمیایی است و جذب فسفر به ذرات ریز خاک و رسوبات، یکی از اصلی‌ترین مکانیزم‌های انتقال آن به زه‌آب می‌باشد. فسفر در صورت حضور اکسید آهن و آلومینیوم کافی، می‌تواند جذب ذرات خاک شده و ترسیب گردد (Dunne *et al.*, 2007a; Dunne *et al.*, 2007b; Oil and Destouni. 2009; Zhuan-xi *et al.*, (2009). با افزایش میزان حجم زه‌آب خروجی، ممکن است میزان بار رسوبات و ذرات خارج شده از خاک در تیمار زهکشی آزاد نسبت به زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی افزایش یابد و همین امر باعث افزایش تلفات و هدررفت فسفر گردد. از طرف دیگر کاربرد بیش از حد کودهای فسفره منجر به افزایش سطح اشباع خاک از فسفر شده و خطر هدررفت فسفر از سیستم زهکشی را افزایش می‌دهد (Smith and Kellman, 2011; Javani *et al.*, 2018). زهکشی کنترل‌شده علاوه بر این‌که دبی زهکش را کاهش و ذخیره آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد، باعث کاهش میزان فسفر در زه‌آب خروجی نیز شد (Rozemeijer *et al.*, 2016).

بیلان نیتروژن و فسفات در خاک: میزان بیلان نیترات نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) کل نیترات و فسفات ورودی از طریق آبیاری کوددهی نمایش داده‌شده است، که در آبیاری زیرزمینی در کل دوره رشد ۱۱ گرم نیترات و ۱۹ گرم فسفات به خاک داده‌شده و همان مقدار را ذخیره کرده و در زهکشی کنترل‌شده از ۱۱ گرم نیترات داده شده ۹ گرم و از ۱۹ گرم فسفات داده شده، ۱۸ گرم آن ذخیره‌شده ولی در تیمار زهکشی‌آزاد از ۱۱ گرم نیترات داده شده به خاک ۸ و ۱۹ گرم فسفات، ۱۷ گرم ذخیره شده است. طبق نتایج تیمار زهکشی کنترل‌شده میزان جذب و نگهداری نیترات و فسفات بالاتری نسبت به زهکشی آزاد داشته است و تیمار آبیاری زیرزمینی به

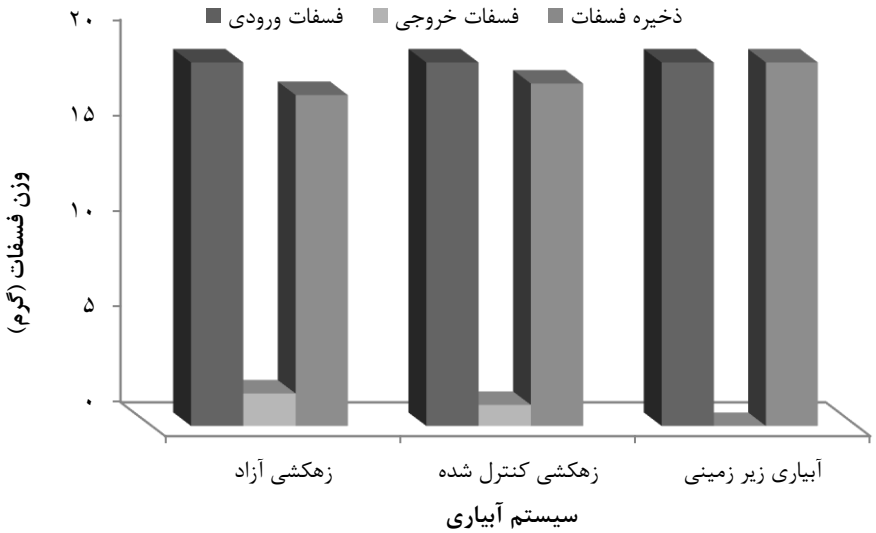
دلیل اینکه زه‌آبی از آن خارج نشده است تمام نیترات و فسفات ورودی را جذب و یا ذخیره کرده و چون نیاز به آبشویی نبوده تخلیه زه‌آب صورت نگرفته است. هدر رفت فسفات نسبت به نیترات کمتر بوده زیرا فسفر به کلوئیدها می‌چسبد و غیرمتحرک می‌شود. بنابراین حرکت زیادی ندارد در حالی‌که نیتروژن به طور قائم حرکت آسانی دارد و حلالیت بیشتری دارد به‌طورکلی میزان تخلیه نیترات نسبت به فسفات بیشتر بوده است. درصد جرمی املاح خروجی زه‌آب نیز محاسبه گردید که نیترات خروجی زهکشی آزاد ۲۰/۹ درصد و نیترات خروجی زهکشی کنترل‌شده ۱۳/۷ درصد و فسفات خروجی زهکشی آزاد ۸/۱ درصد و فسفات خروجی زهکشی کنترل‌شده ۵/۷ درصد بوده است. جدول (۴) با آزمون t، تأثیر مدیریت سطح ایستابی بر هدر رفت نیترات، فسفات، شوری و حجم زه‌آب را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از این است که جرم نمک در تیمار زهکشی آزاد با مقدار ۶۴/۰۷ گرم نسبت به تیمار زهکشی‌کنترل‌شده با مقدار ۴۸/۱۲ گرم بیشتر بوده و از نظر هدررفت جرمی نیترات و فسفات روش زهکشی آزاد مقادیر بالاتری نسبت به زهکشی کنترل‌شده ثبت کرد. جرم نیتروژن نیتراتی (NO_3-N) به‌ترتیب با ۲/۲۱ و ۱/۵۷گرم و جرم فسفات (PO_4) به‌ترتیب با ۱/۵۴ و ۱/۱۶ گرم در زه‌آب تلفات بیشتری را نشان داد و همچنین حجم زه‌آب خروجی در زهکشی آزاد با ۳۵/۸ لیتر از زهکشی کنترل‌شده با مقدار ۳۱/۸ لیتر بیشتر بود. طبق مشاهدات در مجموع تیمار زهکشی‌کنترل‌شده نسبت به زهکشی‌آزاد جذب املاح بیشتری داشته است. بار نمک، تلفات نیترات و فسفر در روش آبیاری زیرزمینی و زهکشی کنترل‌شده به مراتب از روش زهکشی‌آزاد کمتر بوده است که با نتایج تحقیق Darzi-Naftchali and Ritzema et *al*. (2018) مطابقت دارد.



شکل ۹- تغییرات غلظت فسفات در زه‌آب در تیمارهای مختلف در طول دوره رشد



شکل ۱۰ - بیلان نیتروژن در تیمارهای زهکشی آزاد، کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی در طول یازده مرحله آبیاری



شکل ۱۱- بیلان فسفات در تیمارهای زهکشی آزاد، کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی در طول یازده مرحله آبیاری

جدول ۴- تأثیر مدیریت سطح ایستابی بر هدررفت فسفر، تلفات نیترات، حجم زه‌آب و خروج نمک

پارامتر	زهکشی آزاد	زهکشی کنترل‌شده	آزمون t
وزن فسفات (گرم)	۱/۵۷	۱/۱۶	NS
وزن نیترات (گرم)	۲/۲۱	۱/۵۴	$p \leq ۰/۰۵$
وزن نمک (گرم)	۶۴/۰۷	۴۸/۱۲	$P \leq ۰/۰۱$
حجم زه‌آب (لیتر)	۳۵/۸	۳۱/۸	$P \leq ۰/۰۵$

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات مدیریت سطح ایستابی (زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی) و زهکشی آزاد، تغییرات حجم زه‌آب، شوری و غلظت عناصر کودی زه‌آب، در کشت گوجه-فرنگی در سه تیمار با سه تکرار در ۹ لایسیمتر به اجرا در آمد. بیشترین میزان صرفه‌جویی مصرف آب در تیمارهای آبیاری زیرزمینی و سپس زهکشی کنترل‌شده نسبت به تیمار زهکشی آزاد طی ماه‌های مهر تا آذر اتفاق افتاد یعنی زمانی که ریشه‌های گوجه‌فرنگی به‌خوبی رشد و توسعه یافته و امکان استفاده از آب زیرزمینی کم عمق برای گیاه بهتر فراهم گردیده بود. در خصوص میزان صرفه‌جویی انجام شده در تیمارهای آبیاری زیرزمینی باید به این نکته اشاره نمود که بخشی از صرفه‌جویی در مصرف آب، مربوط به اعمال مدیریت آبیاری در مزارع کنترل شده و جلوگیری از بیش‌آبیاری و بخش دیگری از آن نیز مربوط به نگهداشت و کنترل سطح ایستابی و کاهش میزان خروجی زه‌آب بود که سبب نگهداری بهتر رطوبت خاک در تیمارهای آبیاری زیرزمینی و کنترل‌شده نسبت به تیمار زهکشی آزاد و امکان استفاده از صعود موئینگی توسط گیاه فراهم شده و گیاه قسمتی از نیاز تبخیر تعرق خود را مستقیماً از آب زیرزمینی تامین کرد. غلظت نیترات و فسفات زه‌آب خروجی نیز در روش‌های زهکشی کنترل‌شده و آبیاری زیرزمینی، به‌شدت کاهش یافت که از عمده‌ترین دلایل آن می‌توان به کاهش زه‌آب خروجی در این تیمارها نسبت به زهکشی آزاد اشاره نمود. به‌طور کلی تیمارهای آبیاری زیرزمینی و زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی آزاد عملکرد بسیار بهتری در کاهش تولید و ورود زه‌آب و آلاینده‌های موجود در آن از نظر نیترات و فسفات به محیط‌زیست داشته و همچنین باعث کاهش شوری زه‌آب خروجی نیز شده است. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که امکان اجرای آبیاری زیرزمینی و سپس زهکشی کنترل-شده در دزفول وجود دارد و به دلیل کیفیت زه‌آب خروجی زهکشی کنترل شده، برنامه‌ریزی برای استفاده مجدد و مدیریت-شده از زه‌آب نیز در این منطقه، امکان‌پذیر است. این را هم باید در نظر گرفت تحقیق در شرایط خاص خود انجام‌شده است و برای تعیین دقیق‌تر مشخصات اجرای روش‌های کنترل سطح ایستابی در مناطق گرم و خشک باید تحقیقات وسیع‌تری صورت گیرد تا بتوان به طور قطع در مورد امکان اجرای این روش‌ها در مناطق گرم و خشک نظر داد.

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.

Anon. (2010). *Disposal Problems of Drainage Water in Southern Iran. Drainage & Environment Working* Group of IRNCID. Proceeding of the 6th Drainage & Environment Workshop. Jan. 6. Tehran.Iran. 1-22.

Alizadeh, A. (2002). *Soil, Water, Plant relationship.* Astan Gods Razavi Pub., Mashad. Iran. (In Farsi)

Alizadeh, A. (2010). *Design of surface irrigation systems.* Imam Reza Universitiy.4/5.171 (In Farsi)

Bohlen, P.J. and Villapando, O.R. (2011). Controlling runoff from subtropical pastures has differential effects on nitrogen and phosphorus loads. Environmental Quality. 40: 989-998.

Creze, C. M., Madramootoo, C. A. (2019). *Water table management and fertilizer application impacts on CO2, N2O and CH4 fluxes in a corn agro-ecosystem*. Scientific Reports 9 (in press)

Davoodi, K. Darzi NaftChahi, A. and Aghajani Mazandarani, gh. (2018) .Effect of free and controlled drainage on water balance and soil and drainage water salinity under rainfed canola in paddy fields. The period 3. Number 3. 367-382.

Darzi-Naftchali, A. and Ritzema, H. (2018). Integrating Irrigation and Drainage Management to Sustain Agriculture in Northern Iran. Sustainability, 10: 1-17.

Darzi, A. and A. Shahnazari. (2014). Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields. European Journal of Agronomy, (56): 1-8.

Dalzell, B. J., Filley, T. R. and Harbor, J. M. (2007). The role of hydrology in annual organic carbon loads and terrestrial organic matter export from a mid-western agricultural watershed. Geochemical and Cosmochimical. 71: 1448-1462.

Dunne, E.J., McKee, K.A., Clark, M.W., Grunwald, S. and Reddy, K.R. (2007a). *Phosphorus in agricultural ditch soil and potential implications for water quality.* Soil and Water Conservation. 62: 244-252.

Dunne, E. J., Smith, J., Perkins, D. B., Clark, M. W., Jawitz, J. W. and Reddy, K. R. (2007b). *Phosphorus storages in historically isolated wetland ecosystems and surrounding pasture uplands.* Ecological Engineering. 31:16-28.

El-Ghannam, M . AboWaly, M. Gaheen.A. Karajeh, F.F. and Gendy 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.

Elmi, A. Gordon, R.. Madramootoo, C. and Madani, A. (2005) .*Watertable management for reducing nitrate accumulation in a soil profile under corn production*. CANADIAN BiosystemsENGengineering J., 47: 123-128.

Gowing, J. Rose, D. 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.

Fisher, M.J., Fausey, N.R., Subler, S.E., Brown, L.C. and Bierman, P.M. (1999). *Water table management, nitrogen dynamics and yields of corn and soybean.* Soil Science Society American. 63: 1786-1795.

Hassanoghli, A. 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)

Hornbuckle, J., Christen, E., Ayars, J. and Faulkner, R. (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.

Helmers, M., Christianson, R., Brenneman, 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.

Ismailnia, S. Liaghat, A. Heidari, N. and Akram, M. (2005) .Lysimetry Study of Water Table ManagementMethods in Tomato Irrigation. Journal of Agricuitural Engineering Research, 6 (23): 113-124.

Jia Z. and Evans R.O. (2006). Effect of controlled drainage and vegetative buffers on drainage water quality from wastewater irrigation fields.Journal of Irrig and Drain Eng .ASCE. 132(2):159-170.

Javani, H.R., Liaghat, A., Hassanoghli, A. Nazari, B. (2018). *Quantitative and qualitative changes of drain water by installation of controlled drainage in Moghan plain lands.* Water and Irrigation Management (Scientific Journal of Agriculture). Vol. 8(1): 85-100. (In Farsi)

Javani jooni, H. Liaghat, A. Hassanoghli, A. Nazari, B. (2018). The effect of controlled drainage on the discharge drainage water level water productivity in the moghan plain. Iran water Research.49. 1. 207-219.

Kliewer, B. A. and Gilliam, J. W. (1995). *Water table management effects on denitrification and nitrous oxide evolution.* Soil Science Society of America. 59:1694-1701.

Lalonde, V., Madramootoo, C.A., Trenholm, L. and Broughton, R.S. (1996). *Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge.* Agricultural Water Management. 29: 187-199.

Liu, J. G., Luo, W. Pei, Y.S. and Xu, F.R. (2009). Salt and Water Balance Analysis after Adopting Controlled Drainage in Yinnan Irrigation District,

Ningxia, China. Irrig Drain 58, 357-365.

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.

Mahjoubi, A. Hooshmand, A. Naseri, A. and Jafari, S. (2013). Effect ofcontrolleddischarge on reduction of discharge capacity and outlet drainage volume in sugarcane farms and lmam Khomeini lndustry. Iran journal of water and soil.1122-1144.

Mahjoubi, A. Naseri, A. Hooshmand, A. and Borromeandnasab, S. (2012). Lnvestigating the effects of controlled discharge on irrigation management and sugarcane yild (case study of imam Khomeini cultivation and industry). Journal of Agricuitural Engineering Research. page 24/40.1144-1133.

Mansouri, H., Mostafazadehfard, B., Mousavi، F., Agha khani, A. and Feyzi, M. (2006). *The lmpact of different management of saline water on wheat crop performance.* the 2nd international conference on new findings of science.

Madramootoo, C. A., Johnston, W. R. , Ayars, J. E., Evans, R.O. and N.R. Fausey. (2007). *Agricultural drain-age management, quality and disposal issues in North America*. Irrigation and Drainage 56: S35-S45.

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.

Molavi, H .Parsi njad, M.. Liaghat, A. (2011). Control of salinity and nitrate losses in drains under water level management.jornal of water and irrigation management.1/1.15-28

Ng, H. Y., Tan, C. S., Drury, C. F. and Gaynor, J. (2002). Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in sandy loam soil in southwestern Ontario. Agriculture Ecosystems Environment. 90: 81-88.

Nozari, H. and Azadi, S. (2017). Experimental evaluation of artificial neural network for predicting drainage water and groundwater salinity at various drain depths and spacing. Neural Computing and Applications. 10.1007/s00521-017-3155-9.

Ramezanimoghadam, J. Naseri, A. Hooshmand, A. and Mescarbashi, M. (2014). Lysimeter study to Evaluate the effects of water stress and Nitrogen fertilizer on Maize in the shallowGround water. 33 3. Page 1-11.

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 Scienc, 2, 347–358.

Sadegh lari, A. Maazed, H. Naseri, A. Mahjoubi, A . and Liaghat, L. (2013) .Stream level flucyuations of drainage and nitrogen dynamics in cultivated sugarcane hands with controlled drainage system.water and soil. 27. 6.page 1077 -1089.

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.

Skaggs, R. W. (2007). *Controlled drainage to reduce nitrogen losses from drained lands.* Annual Meeting, New Orleans, United States.

Shao, G. C., Deng, S., Liu, N., Yu, S., Wang, M. H. and She, D. L. (2014*). Effects of controlled irrigation and drainage on growth, grain yield and water use in paddy rice.* Europ. J. Agronomy, 53: 1–9.

Sharifi mood , N., Mirzaii , F., Parsi njad, M., (2010). Effect of controlled drainage and irrigation water salinity on sorghum yield reduction and water useefficiency. Iranian journal of Research.4/6.59-66.

Shouse, P.J. Goldberg, S. Skaggs, T.H. Soppe, R.W.O. Ayars, J.E.(2010). Changes in spatial andtemporal variability of SAR affected by shallow groundwater management of an irrigated field,California. Agr Water Manage 97, 673-680.

Smith, E. L. and Kellman, L. M. (2011). Nitrate loading and isotopic signatures in subsurface agricultural drainage systems. Environmental Quality. 40: 1257-1265.

Zhuan-xi, L., Bo, Z., Jia-Liang, T. and Tao, W. (2009). Phosphorus retention capacity of agricultural headwater ditch sediments under alkaline condition in purple soils area, China. Ecological Engineering. 35: 57-64.