نوسانات سطح ایستابی، شدت زهکشی و دینامیک نیتروژن در اراضی زیر کشت نیشکر با سیستم زهکشی کنترل شده

عدنان صادقی لاری

هادی معاضد-عبدعلی ناصری

آرش محجوبی- عبدالمجیدلیاقت

چکیده

در نواحی خشک و نیمه خشک، زهکشی کنترل شده یک گام منطقی جهت بهبود مدیریت آب در اراضی کشاورزی تحت آبیاری و کاهش اثرات زیست محیطی ایجاد شده با جریان زهکشی زیرزمینی می‌باشد. زهکشی کنترل شده مدت‌هاست که در نواحی مرطوب تجربه شده است. در این تحقیق یک سیستم زهکشی کنترل شده در جنوب غربی ایران، در طول فصل رشد نیشکر به عنوان یک استراتژی برای مدیریت مداوم سطح ایستابی با هدف بهینه‌سازی مصرف آب، کاهش زهکشی بیش از حد لزوم و کاهش تلفات نیتروژن از اراضی کشاورزی مورد آزمایش قرار گرفت. جهت مطالعه امکان‌پذیری و اجرای مدیریت سطح ایستابی آزمایشات مزرعه‌ای در سطح ۶۳/۴۱ هکتار در قالب ۳ تیمار در مزارع دارای زهکشی زیرزمینی کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) به اجرا در آمد. ۳ تیمار مقایسه شده شامل یک تیمار زهکشی آزاد (FD)، و دو تیمار زهکشی کنترل شده با کنترل سطح ایستابی در عمق ۹۰ سانتی‌متری (CD_{90}) و در عمق ۷۰ سانتی‌متری از سطح خاک (CD_{70}) بود. اطلاعات جمع آوری شده شامل عمق سطح ایستابی، حجم زهکشی، غلظت ازت نیتراتی و آمونیاکی در جریان خروجی زهکش و آب زیرزمینی بود. زهکشی کنترل شده اثر معنی‌دار هیدرولوژیکی و زیست محیطی را در طول دوره مطالعه از خود نشان داد. کل جریان خروجی زهکشی از سطوح تیمارهای CD_{70} و CD_{90} به ترتیب به میزان ۶۲/۴۸ و ۴۸/۹۸ درصد در مقایسه با تیمار زهکشی آزاد کمتر بود. میزان تلفات نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی در جریان خروجی زهکش به ترتیب به میزان حدود ۴۵ تا ۶۰ و ۵۰ تا ۶۵ درصد نسبت به زهکشی آزاد کاهش یافت. همچنین بین غلظت نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی موجود در زه‌آب و نیز آب زیرزمینی در تیمار-های مختلف تفاوت معنی‌داری آماری مشاهده نگردید. این دانسته‌ها به این نکته اشاره می‌نماید که زهکشی کنترل شده می‌تواند در مقیاس بزرگ در استان خوزستان، که بیشترین سهم زهکش‌های زیرزمینی اجرا شده را در ایران دارا می‌باشد، به دلیل مزیت‌هایی که برای حفاظت آب و محیط زیست دارد، به کار برده شود.

واژه های کلیدی: زهکشی کنترل شده، زهکشی آزاد، جریان خروجی زهکشی، تلفات نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی

مقدمه

مدیریت پایدار منابع آب به صورت فزاینده‌ای در نواحی که منابع آب در حال محدود شدن و در جاهایی که سوء مدیریت منجر به وضعیت کسری آب و یا بدتر کردن کیفیت آب می‌شود، الزامی است. زنجیره‌ای از رویدادهای غیر قطعی مرتبط با تغییر آب و هوا[1] ملاحظات اضافی را در تعداد زیادی از قسمت‌های جهان به خصوص در مکان‌هایی که کاهش حجم بارش و تعداد روزهای بارانی و افزایش در دما پیش‌بینی می‌شود و پیش از این نیز مشاهده گردیده، ضروری ساخته است (۳). یکی از روش‌های اجرایی جهت بهینه سازی مصرف آب در کشاورزی ترکیبی از زهکشی کنترل شده و آبیاری زیرزمینی برای کنترل مداوم سطح ایستابی، با هدف کنترل زهکشی اضافی، اجرای یک سیستم آبیاری اقتصادی، ذخیره و بهبود کیفیت آب می-باشد (۳، ۱۶، ۲۸). این روش‌ها از شروع قرن بیستم در نواحی ساحلی کارولینای شمالی آزمایش شده است و در ۴۰ سال گذشته به صورت

1- Climate Change

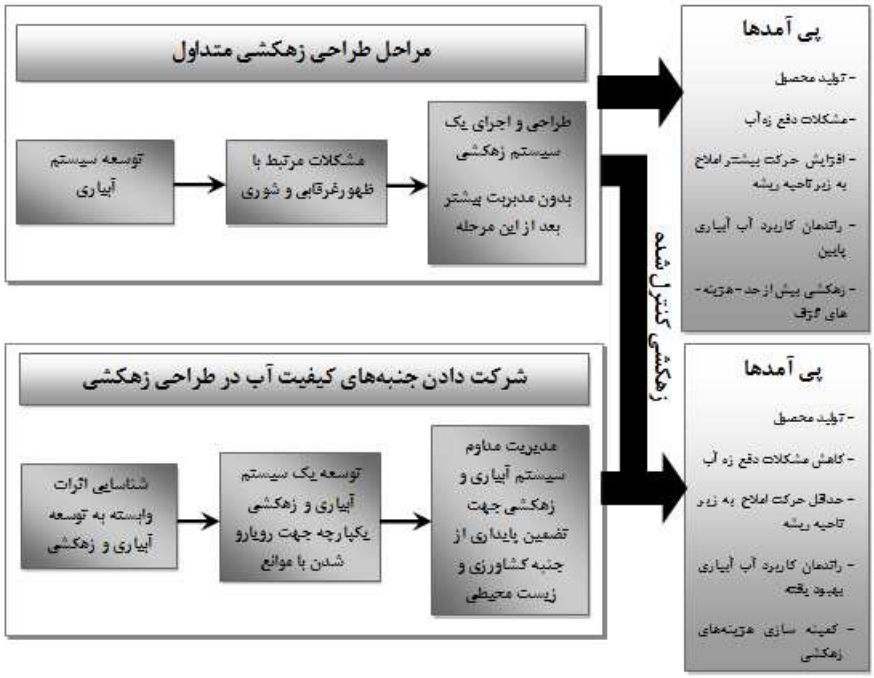
وسیعی به دلیل منافع زیست محیطی گسترش داده شده است (۵، ۷، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۵ و ۲۷). در کارولینای شمالی، زهکشی کنترل شده در زمره‌ی بهترین شیوه‌های مدیریتی[1] مصرف آب شمرده شده است، به نحوی که اکنون در بیش از ۲۷۰ هزار هکتار، با سهیم شدن کشاورزان، که به طور متوسط ۷۵ درصد هزینه اجرا را پس از اجرای این روش دریافت می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۷). اثرات سودمند مشاهده شده از زهکشی کنترل شده و آبیاری زیرزمینی شامل افزایش راندمان کود نیتروژن و کاربرد آب، افزایش عملکرد و کاهش نیتروژن در جریان خروجی بوده، که عمدتاً ناشی از کاهش در کل حجم زه آب خروجی از زهکش‌ها می‌باشد (۹، ۲۱ و ۳۱)، همچنین شبیه‌سازی این شیوه‌ها افزایش در میزان تبخیر و تعرق، افزایش رواناب و نشت عمقی و کاهش زهکشی زیرزمینی را پیش‌بینی نموده است (۲۵ و ۳۲). کاهش در تلفات نیترات توسط مکانیزم‌های پیچیده-ی معدنی شدن[2] و دنیتریفیکاسیون[3] انجام می‌شود و با حضور سطح ایستابی کم عمق، که شرایط بی‌هوازی و نمو سریع‌تر میکروارگانیسم-های دنیتریفیکاسیون کننده در حضور مواد آلی بالارا ایجاد می‌کند، تقویت می‌شوند (۶، ۱۲ و ۲۳). بنابراین شرایط بی هوازی ایجاد شده در خاک غوطه‌ور شده در آب فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در تعدادی از مطالعات، دنیتریفیکاسیون به عنوان عامل پایین آورنده‌ی غلظت نیترات در جریان خروجی زهکشی از کرت‌های زهکشی کنترل شده تشخیص داده شده است (۱۰، ۱۲ و ۲۶). در مطالعات دیگر کاهش در مقادیر آب زهکشی بیشتر از کاهش در غلظت نیترات موجب شده است که تلفات نیترات به صورت معنی-داری کاهش داده شود (۱۰، ۲۲ و ۳۰).

هارن باک[4] و همکاران (۱۱) به صورت الگووار در شکل ۱ مراحل مختلف طراحی سیستم‌های زهکشی و پی‌آمدهای وابسته به آن را مورد بحث قرار دادند. سیستم زهکشی زیرزمینی مرسوم و کنترل شده به همراه عواقب و ملاحظه‌ی کیفیت زه‌آب در این شکل ذکر شده‌اند. آن‌ها ابراز کردند با اجرای سیستم زهکشی مرسوم هیچ‌گونه مدیریتی بعد از نصب زهکش‌ها انجام نمی‌پذیرد و سیستم به سادگی به حال خود رها شده و به طور مداوم بهره‌برداری می‌شود. این امر علاوه بر کارایی بسیار پایین مصرف آب، منجر به مشکلات عدیده‌ای نظیر تولید حجم زیادی از زه‌آب‌ها و به تبع آن مشکلات دفع و انتقال آن‌ها را در پی خواهد داشت (۴).

در نواحی خشک و نیمه خشک ایران نظیر استان خوزستان سیستم‌های زهکشی زیرزمینی اجرا شده، بدون هیچ‌گونه مدیریتی به حال خود رها شده‌اند و به صورت مداوم بدون در نظر گرفتن اثرات بسیار شدید زیست‌محیطی در حال بهره‌برداری می‌باشند. از این‌رو تجربه‌ی کاربرد زهکشی کنترل شده ممکن است پتانسیل قابل توجهی برای کاهش حجم‌های هنگفت زهکشی و بارهای خطرناک نیترات تولید شده با این سیستم‌های موجود را دارا باشد.

اهداف ویژه‌ی این تحقیق بررسی اثرات زهکشی کنترل شده بر روی رفتار سطح ایستابی، حجم زهکشی زیرزمینی، بار نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی در جریان خروجی زهکشی و غلظت نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی آب زیرزمینی در اراضی تحت آبیاری و کشت نیشکر بود.

1- Best Management Practices (BMPs)
2- Mineralization
3- Denitrification
4 -Hornbuckle



شکل ۱-. مراحل طراحی زهکشی زیرزمینی از منظر گذشته و آینده هارن باک و همکاران (۲۰۰۵)

مواد و روش‌ها

جانمایی مکان آزمایشی

مطالعات صحرایی در سطح ۶۳/۴۱ هکتار با یک خاک سیلتی رسی لوم در اراضی کشت وصنعت امام خمینی (ره) واقع شده در دشت شعیبیه استان خوزستان و۳۰ کیلومتری جنوب شهر شوشتر و به مساحت ناخالص ۱۵۳۰۰ هکتار انجام شد. میانگین درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی و وزن مخصوص ظاهری خاک محل مورد آزمایش به ترتیب ۲۶/۸۴ و ۲۰/۴۳ درصد و ۱/۶۲ گرم بر سانتیمتر مکعب در عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری پروفیل خاک تعیین گردید. میانگین هدایت هیدرولیکی تا عمق نصب زهکش با استفاده از روش چاهک[1] حدود ۱/۶۱ متر بر روز برآورد گردید و مقادیر بین ۱/۱۵ و ۲/۰۷ متر بر روز در تغییر بودند. این ناحیه به وسیله یک سیستم زهکشی زیرزمینی نصب شده در بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۴ در حال بهره‌برداری می‌باشد. هر مزرعه از مزارع مورد مطالعه به وسیله یک گروه چهارتایی از لوله‌های زهکش زیرزمینی عمیق (لوله‌های خرطومی پوشیده شده با فیلتر شنی)، واقع در عمق متوسط ۲/۱ متری از سطح زمین (۱/۸ متر در ابتدا و ۲/۴ متر در انتها) زهکشی می‌گردد. این زهکش‌ها دارای طول ۸۴۵ متر و تقریباً به فاصله ۷۵ متری از یکدیگر قرار دارند. شیب زهکش‌های جانبی[2] به میزان ۰/۰۰۰۷ بوده، قطر آن‌ها در ابتدای مزرعه ۱۲۵ میلی‌متر و در انتها به ۱۶۰ میلی‌متر می‌رسد، که به طور مستقیم به جمع‌کننده‌های روباز و در نهایت به زهکش اصلی روباز تخلیه می‌شوند. آب آبیاری از طریق یک شبکه آبیاری سطحی، که شامل ۲ کانال اصلی و چندین کانال فرعی (مقطع ذوزنقه‌ای بتنی صاف) به کار برده می‌شود و سپس توسط لوله‌های دریچه‌دار پلاستیکی با باز کردن دریچه‌های آبگیر تعبیه شده در بدنه‌ی کانال‌های فرعی در جویچه‌های انتها بسته‌ی دارای شیب خیلی کم در سطح هر مزرعه توزیع می‌شود.

تجهیزات کنترل سطح ایستابی

با توجه به اینکه شیب جانبی جمع کننده‌های روباز و دبی زه‌آب خروجی از زهکش‌های جانبی[3] کشت و صنعت امام خمینی (ره) بسیار زیاد بود، لذا نصب سازه‌های کنترل جریان به طور مستقیم در محل خروجی زهکش‌های جانبی مزارع به جمع کننده روباز غیر ممکن بود. بر این اساس، جهت نصب سازه کنترل جریان اقدام به احداث منهول (لوله‌های پلی اتیلن خرطومی با قطر ۸۰۰ میلی‌متر) در انتهای مسیر لوله‌های جانبی گردید. بعد از نصب منهول سازه‌ی کنترل شامل یک

1- Auger Hole Method

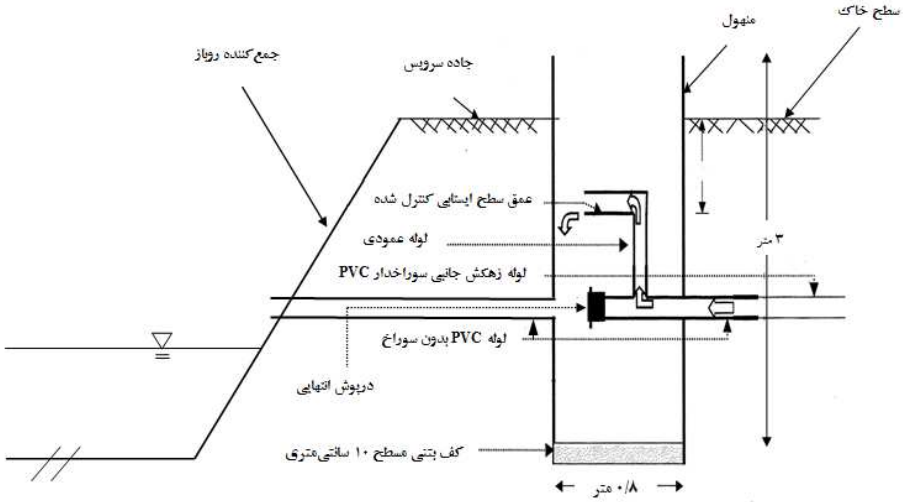
2- Lateral
3 -Lateral

سه راهی ۹۰ درجه همراه با درپوش انتهایی و لوله عمودی[1] با ارتفاع ثابت بر انتهای زهکش‌های جانبی متصل شده به منهول سوار گردید، این سازه‌ی کنترل به صورتی طراحی شده است که جریان زهکشی را با مسدود کردن مجرای خروجی زهکش جانبی محدود می‌کند (شکل ۲). تا زمانی که تراز سطح ایستابی از حداقل تراز سطح ایستابی دلخواه، که همان تراز بالای لوله عمودی می‌باشد، تجاوز نکند هیچ‌گونه جریان خروجی زهکشی اتفاق نخواهد افتاد.

مدیریت سطح ایستابی

دو روش مدیریت سطح ایستابی در قالب سه تیمار در اراضی کشت و صنعت امام خمینی به کار برده شد. تیمار اول: زهکشی مرسوم یا آزاد (FD)، تیمار دوم: زهکشی کنترل شده با کنترل سطح ایستابی در عمق ۷۰ سانتی‌متری از سطح خاک (CD_{70}) و تیمار سوم زهکشی کنترل شده با کنترل سطح ایستابی در عمق ۹۰ سانتی‌متری از سطح خاک (CD_{90}). از چهار زهکش جانبی موجود در هر قطعه ۲۱ هکتاری، دو زهکش واقع در نزدیکی مرز هر مزرعه به عنوان زهکش حائل[2] و هر کدام از دو تای میانی به عنوان یک تکرار جهت اندازه‌گیری دبی و برداشت نمونه زه‌آب در نظر گرفته شد.

1- Riser
2 -Buffer or Guard



شکل ۲- جزئیات نصب سازه کنترل سطح ایستابی و سازه کنترل سطح ایستابی آماده بهره‌برداری

جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌ها پس از اتمام فصل بارندگی، انجام عملیات تعویض جوی و پشته[1] و استقرار قلمه‌های نی، در تاریخ ۲۵ فروردین ۱۳۹۰ شروع و تا ۱۸ آبان ۱۳۹۰ به مدت ۲۱۰ روز کاری، به طول انجامید.

چاهک‌های مشاهده‌ای برای پایش موقعیت سطح ایستابی در سه گروه مطابق با استاندارد فائو ۲۸ (۸) در هر مزرعه (تیمار) نصب گردید. گروه اول و سوم شامل سه چاهک (واقع در ۱/۴ و ۳/۴ از طول زهکش جانبی) و گروه دوم شامل ۹ چاهک (واقع در ۱/۲ از طول زهکش جانبی) بودند. عمق سطح ایستابی روزانه از سطح خاک به صورت دستی با استفاده از دستگاه عمق‌یاب الکتریکی در اوایل صبح هر روز در هر سه گروه از چاهک‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری گردید. قرائت چاهک‌های مشاهده‌ای برای تخمین متوسط تراز سطح ایستابی روزانه در سطح هر مزرعه و رسم منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش استفاده گردید. جریان خروجی زهکش به صورت دستی در همه‌ی زهکش‌های جانبی با استفاده از یک سطل مدرج و زمان‌سنج در اوایل صبح هر روز اندازه‌گیری شد. دبی زهکش به عمق زهکشی برای هر سطح به کار گرفته شده توسط هر زهکش جانبی تبدیل گردید و متوسط عمق آب زهکشی برای هر تیمار محاسبه گردید. نمونه‌گیری ازجریان خروجی زهکشی به صورت دستی طی وقوع جریان زهکشی به صورت میانگین هر ۵ تا ۶ روز یکبار انجام گردید. همچنین از آب زیرزمینی به صورت میانگین هر ۶ روز یکبار با استفاده از یک گل‌کش (دلوچه)[2] از چاهک‌ها نمونه‌گیری شد. نمونه‌ها به صورت مناسب در جعبه‌های پر از یخ ذخیره و برای تجزیه و تحلیل

1 -Healing up

2- Bailer

ازت نیتراتی و آمونیاکی به آزمایشگاه انتقال داده شد.

تجزیه و تحلیل آماری

کاربرد آزمون‌های آماری مرسوم جهت بررسی معنی‌داری، به دلیل نداشتن آرایش کاملاً تصادفی تیمارها، امکان‌پذیر نبود، بنابراین از آزمون آماری تی استیودنت[1] در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ برای تعیین سطوح معنی‌داری بین میانگین متغیرهای اندازه‌گیری شده از هر تیمار استفاده گردید و تیمارها به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه شد (۱، ۱۳). وابستگی بین هر متغیر اندازه‌گیری شده در هر تیمار با همان متغیر اندازه‌گیری شده در تیمار دیگر با روش وابستگی خطی ساده (پیرسون r)[2] ارزیابی گردید (۳۱). مقادیر روزانه‌ی غلظت-های نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی با درون‌یابی خطی از مقادیر اندازه-گیری شده به دست آورده شد. آبشویی روزانه با ضرب کردن مقادیر عمق آب زهکشی روزانه در مقادیر غلظت روزانه محاسبه گردید (۳۰ و ۳۱).

زراعت

قلمه‌ی نی به صورت دستی در اوایل شهریور ۱۳۸۹ به صورت کشت جدید[3] و به صورت دو ردیفه با فاصله‌ی ردیف‌های ۱/۸۵ متر در مزارع آزمایشی کاشته شد. کود دی آمونیم فسفات (46% P2O5) قبل از کاشت نیشکر به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار به صورت یکجا با ماشین کودپاش و کود اوره (46% N) به میزان ۴۵۰ کیلوگرم در هکتار طی ۴ مرحله در طول فصل رشد نیشکر (هر چهار مرحله مصادف با طول دوره مطالعه) به صورت محلول در آب آبیاری برای هر تیمار به کار برده شد. میزان کودهای به کار برده شده مطابق با عرف معمول در کشت و صنعت امام خمینی بود.

نتایج و بحث

نوسانات سطح ایستابی

تجربه‌ی مدیریت سطح ابستابی به واسطه‌ی زهکشی کنترل شده و آبیاری سطحی در نگهداشتن تراز سطح ایستابی بالای زهکش‌ها در تیمارهای زهکشی کنترل شده به خوبی مؤثر واقع شد و اثر قابل توجهی بر روی حجم آب زهکشی و تلفات نیتروژن داشت که در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. نوسانات تراز سطح ایستابی در طول دوره آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. اگرچه سازه‌های کنترل سطح ایستابی در خروجی زهکش‌های جانبی در ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری زیر سطح خاک قرار داده شد، اما تلفات رطوبتی به خاطر تبخیر و تعرق، نشت افقی و عمقی مانع نگهداشتن سطح آب زیرزمینی[4] در این ترازها گردید (۱۸). متوسط سطح ایستابی در تیمارهای کنترل شده به صورت معنی‌داری (در سطح اطمینان ۹۹ درصد) در مقایسه با تیمار زهکشی آزاد در طول دوره مطالعه کاهش داده شد، که به ترتیب در تیمارهای FD ، CD_{90} و CD_{70} برابر۱۰۶/۰۶، ۸۰/۷۵ و ۷۱/۱۷ سانتی‌متر بود. تفاوت معنی‌داری و وابستگی مثبت معنی‌داری بین تیمارها به صورت دو به دو و در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد در جدول ۱ آورده شده است.

1- Student’s t-test
2 -Simple Linear Correlation Method (Pearson r)
3- Plant
4- Static Equilibrium

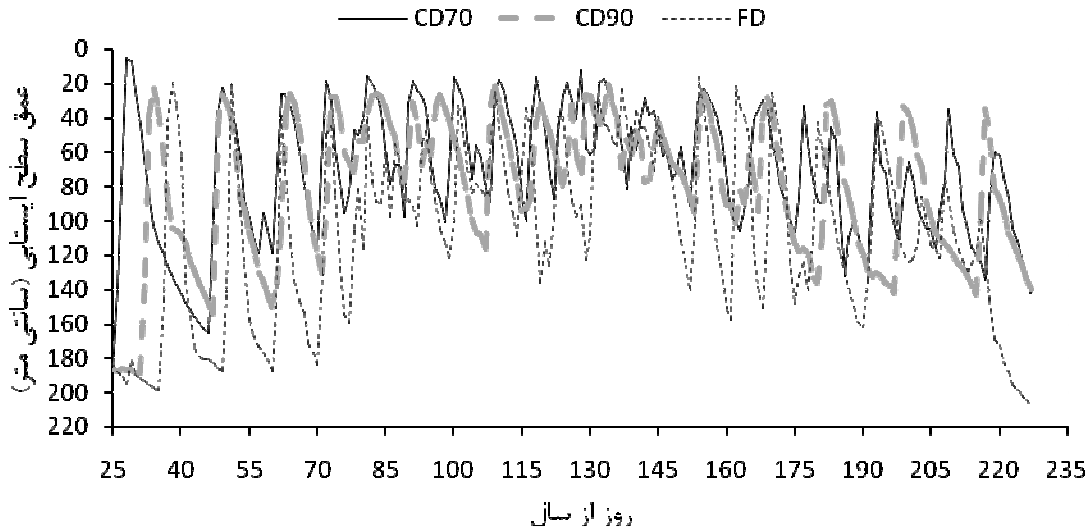
جدول ۱- نتایج تجزیه و تحلیل آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در زه‌آب خروجی و آب زیرزمینی در تیمارها ی زهکشی آزاد و کنترل شده

تیمار/متغیر	تعداد	مبانگین	وابستگی معنی‌داری	تفاوت معنی‌داری
عمق سطح ایستابی (سانتیمتر)				
FD	۲۰۳	۱۰۶/۰۶	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}
CD_{90}	۲۰۳	۸۰/۷۵	FD^{*} CD_{70}^{*}	FD^{*} CD_{70}^{**}
CD_{70}	۲۰۳	۷۱/۱۷	FD^{*} CD_{90}^{*}	FD^{*} CD_{90}^{**}
شدت زهکشی (میلیمتر بر روز)				
FD	۲۱۰	۸/۱۶	CD_{90}^{**} CD_{70}^{*}	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}
CD_{90}	۲۱۰	۴/۱۶	FD^{**} CD_{70}^{*}	FD^{*} CD_{70}^{*}
CD_{70}	۲۱۰	۳/۰۶	FD^{*} CD_{90}^{*}	FD^{*} CD_{90}^{*}
ازت نیتراتی آب زهکشی (میلی‌گرم بر لیتر)				
FD	۳۵	۱۰/۸۰	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}	ns[1]
CD_{90}	۳۸	۱۰/۵۸	FD^{*} CD_{70}^{*}	ns
CD_{70}	۳۸	۱۰/۷۴	FD^{*} CD_{90}^{*}	ns
ازت نیتراتی آب زهکشی (کیلوگرم بر هکتار)				
FD	۲۱۰	۰/۸۵	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}
CD_{90}	۲۱۰	۰/۴۵	FD^{*} CD_{70}^{*}	FD^{*} CD_{70}^{*}
CD_{70}	۲۱۰	۰/۳۶	FD^{*} CD_{90}^{*}	FD^{*} CD_{90}^{*}
ازت آمونیاکی آب زهکشی (میلی‌گرم بر لیتر)				
FD	۳۵	۳/۴۷	CD_{70}^{*}	ns[1]
CD_{90}	۳۸	۳/۱۶	CD_{70}^{*}	ns
CD_{70}	۳۸	۳/۱۶	FD^{*} CD_{90}^{*}	ns
ازت آمونیاکی آب زهکشی (کیلوگرم بر هکتار)				
FD	۲۱۰	۰/۲۷۵	CD_{90}^{*}	CD_{90}^{*} C`D_{70}^{*}
CD_{90}	۲۱۰	۰/۱۲۹	FD^{*} CD_{70}^{*}	FD^{*} CD_{70}^{**}
CD_{70}	۲۱۰	۰/۰۹۹	FD^{*}	FD^{*} CD_{90}^{**}
ازت نیتراتی آب زیرزمینی (میلی‌گرم بر لیتر)				
FD	۲۶	۱۳/۳۵	CD_{90}^{*} CD_{70}^{*}	CD_{70}^{**}
CD_{90}	۲۹	۱۲/۳۵	FD^{*} CD_{70}^{*}	ns
CD_{70}	۲۸	۱۰/۹۹	FD^{*} CD_{90}^{*}	FD^{**}
ازت آمونیاکی آب زیرزمینی (میلی‌گرم بر لیتر)				
FD	۲۶	۳/۹۶	ns	ns
CD_{90}	۲۹	۴/۴۵	CD_{70}^{**}	ns
CD_{70}	۲۸	۳/۷۹	CD_{90}^{**}	ns

۱- عدم تفاوت یا وابستگی معنی‌داری

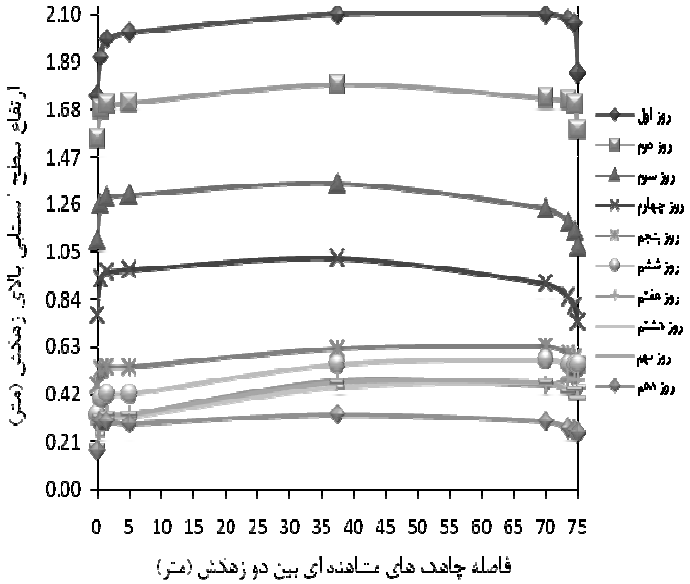
*- تفاوت یا وابستگی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد

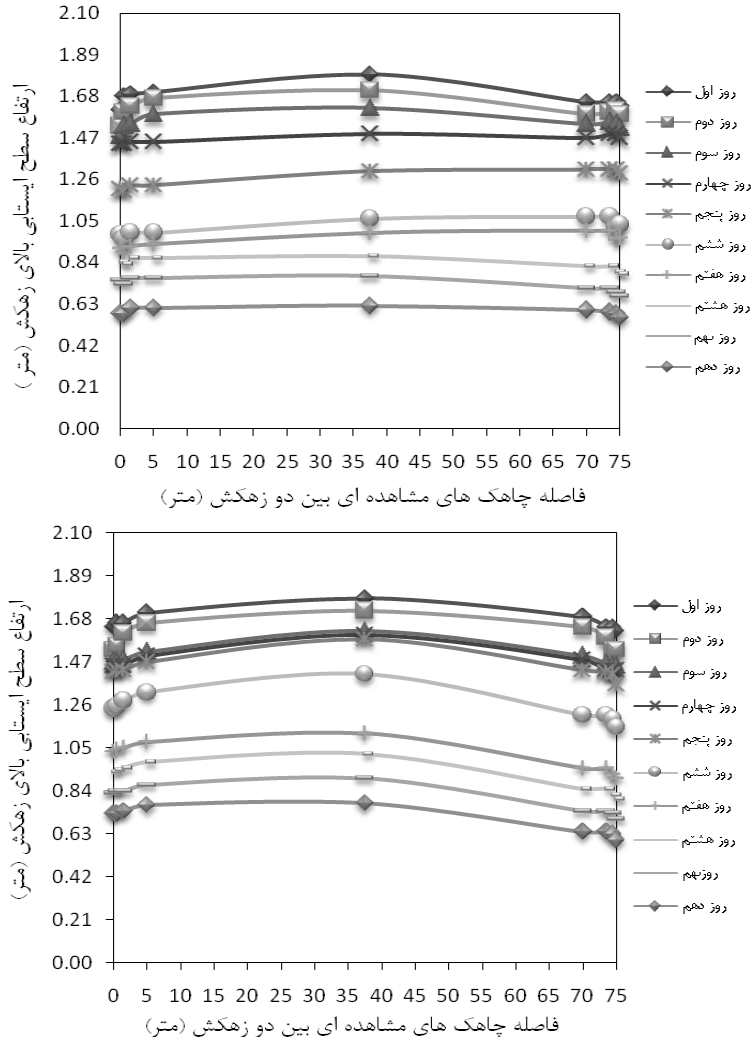
**- تفاوت یا وابستگی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد



شکل ۳- نوسانات سطح ایستابی در مزارع کنترل شده و آزاد (فروردین تا آبان ۱۳۹۰)

شکل ۴ منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش در گروه دوم از چاهک‌های مشاهده‌ای جهت یک دوره ۱۰ روزه به دنبال کاربرد دومین آبیاری در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. با نگاه کردن در این منحنی‌ها می‌توان پی برد که منحنی سطح ایستابی در تیمار زهکشی آزاد به سرعت پایین آمده و در تیمارهای زهکشی کنترل شده سطح ایستابی مدت زمان بیشتری در تراز بالاتری نسبت به تیمار زهکشی آزاد قرار می‌گیرد، که این خود به گیاه اجازه‌ی استفاده سودمند از آب زیرزمینی را می‌دهد (۱۱).





شکل ۴- منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش به دنبال کاربرد دومین آبیاری به ترتیب از بالا به پایین در تیمارهای FD، CD90 و CD70

دومین نکته‌ی جالب توجه این منحنی‌ها این است که در تیمار زهکشی آزاد شیب هیدرولیکی در اطراف لوله‌های زهکش بسیار بالاتر از تیمارهای زهکشی کنترل شده می‌باشد و در تیمارهای کنترل شده پس از قطع خروج آب از رایزرها سطح ایستابی تقریباً از حالت منحنی خارج شده و به صورت خط تراز در می‌آید، همه‌ی این رفتارها نشان‌دهنده‌ی این است که در تیمار غیرکنترل شده مسیرهای جریان درون پروفیل خاک عمیق بوده و در شرایط افزایش شوری با عمق در پروفیل خاک، بار نمک نیز در جریان خروجی زهکش افزایش می‌یابد. همچنین سطح ایستابی غیرکنترل شده‌ی عمیق‌تر باعث افزایش نفوذ عمقی آب آبیاری و به تبع آن افزایش در جریان خروجی زهکشی می‌شود (۲). اما در سیستم زهکشی کنترل شده سطح ایستابی در عمق کمتری از سطح زمین با استفاده از سازه کنترل نگه داشته می‌شود، که باعث کاهش نفوذ عمقی به زیر ناحیه ریشه با کاهش گرادیان هیدرولیکی و افزایش پتانسیل جریان رو به بالای موئینگی می‌گردد. ضمن اینکه تخلیه آب خاک از طریق تبخیر و تعرق را افزایش می‌یابد (۲).

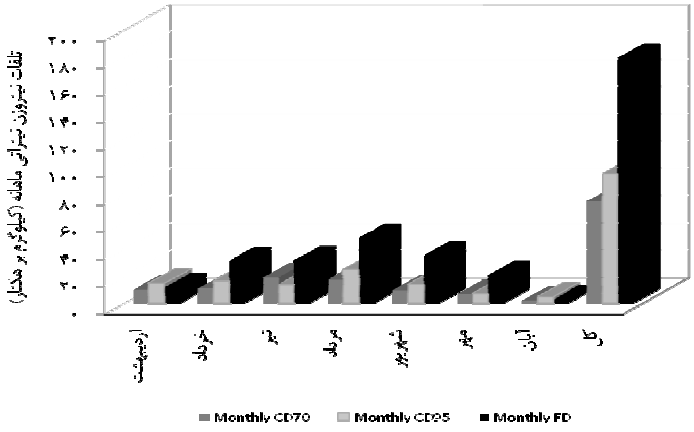
جریان خروجی زهکشی

یک تفاوت معنی‌داری در جریان خروجی زهکشی بین تیمارهای زهکشی کنترل شده و آزاد در سطح اطمینان ۹۹ درصد یافت شد (جدول ۱).تیمارهای CD_{70} و CD_{90} به صورت معنی‌داری کل جریان خروجی زهکش را در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب به میزان ۶۲/۴۸ (از ۱۷۱/۲۹ به ۶۴/۲۷ سانتیمتر) و ۴۸/۹۸ درصد (از ۱۷۱/۲۹ به ۸۷/۳۹ سانتیمتر) در مقایسه با FD کاهش داد. همچنین CD_{70} کل جریان خروجی زهکش را به صورت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد به میزان ۲۶/۴۶ درصد (از ۸۷/۳۹ به ۶۴/۲۷ سانتیمتر) نسبت به CD90 کاهش داد. با ملاحظه‌ی جدول (۱) وابستگی مثبت معنی‌داری بین FD و CD_{70} در سطح اطمینان ۹۹ درصد و بین FD

و CD_{90} درسطح اطمینان ۹۵ درصد را می‌توان مشاهده نمود. بیشترین شدت زهکشی ماهانه برای FD و CD_{90} در مرداد ماه به ترتیب به میزان ۳۷/۰۲ و ۱۶/۷۱ سانتی‌متر و برای CD_{70} در تیر ماه به میزان ۱۲/۴۷ سانتی‌متر اتفاق افتاد. بخشی ازکاهش در میزان جریان خروجی زهکش را می‌توان به افزایش ظرفیت ذخیره آب خاک و نشت افقی و عمقی ناشی از افزایش تراز سطح ایستابی و بخشی دیگر را می‌توان به اثر عوامل آب و هوایی نظیر تبخیر و غیره نسبت داد (۳۰ و ۳۱).

بار نیتروژن در جریان خروجی زهکش

تلفات نیتروژن نیتراتی از زهکش‌های زیرزمینی در ماه‌های مورد مطالعه در شکل (۵) ارائه شده است. تیمارهای CD_{70} و CD_{90} به صورت معنی‌داری کل تلفات نیترات را درجریان خروجی زهکش در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب به میزان ۵۸/۴۳ (از ۱۷۹/۳۵ به ۷۴/۵۶ کیلوگرم بر هکتار) و ۴۷/۲۵ درصد (از ۱۷۹/۳۵ به ۹۴/۶۰ کیلوگرم بر هکتار) در مقایسه با FD کاهش داد. همچنین CD_{70} کل تلفات نیترات را در جریان خروجی زهکش به صورت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد به میزان ۲۱/۱۸ درصد (از ۹۴/۶۰ به ۷۴/۵۶ کیلوگرم برهکتار) نسبت به CD_{90} کاهش داد. بالاترین بارهای نیتروژن نیتراتی ماهانه در همه‌ی تیمارها همزمان با حداکثر شدت جریان‌های خروجی از زهکش‌های زیرزمینی اتفاق افتاد.



شکل ۵- تلفات نیتروژن نیتراتی ماهانه از سطوح زهکشی آزاد و کنترل شده در طول دوره مطالعه

بر اساس نظر مجیا و مادراموتو (۱۷)، کاهش تلفات نیترات در سیستم زهکشی کنترل شده را به عواملی نظیر کاهش در کل جریان زه‌آب خروجی از زهکش‌ها، اثرات رقیق شدگی[1] ناشی از مدیریت سطح ایستابی و افزایش دنیتریفیکاسیون می‌توان نسبت داد. در تحقیق حاضر کاهش در تلفات نیترات توسط تیمارهای CD70 و CD90 تحت شرایط آب و هوایی گرم و خشک را می‌توان در درجه اول به کاهش معنی‌دار در کل جریان زه‌آب خروجی از زهکش‌ها و در درجه دوم به اثرات زهکشی کنترل شده بر افزایش دنیتریفیکاسیون مرتبط دانست،، که مطابق با جدول ۱ کاهش در میانگین غلظت نیترات در آب زهکشی از سطوح زهکشی کنترل شده واضح است (۲۹).

در استان خوزستان ۷ واحد ۱۲۰۰۰ هکتاری (۸۴۰۰۰ هکتار) زیر کشت گیاه نیشکر می‌باشد، که با احتساب ۲۰۰۰ هکتار آیش با زیر کشت غلات در هر واحد، هر ساله حدود ۷۰۰۰۰ هکتار آن زیر کشت گیاه نیشکر قرار می‌گیرد. در صورت اجرای سیستم زهکشی کنترل شده می‌توان تلفات نیتروژن در زه‌آب خروجی از زهکش‌های زیرزمینی را با کنترل سطح ایستابی در عمق ۷۰ یا ۹۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک به ترتیب به میزان ۱۰۴/۷۹ یا ۸۴/۷۵ کیلوگرم بر هکتار نسبت به مزارع با زهکشی آزاد و به مقدار۷۳۳۵/۳۰۰ و۵۹۳۲/۵۰۰ تن از کل مزارع نیشکر، کاهش خواهد داد.

غلظت نیتروژن آمونیاکی در آب زهکشی در طول دوره مطالعه بین تیمارهای کنترل شده و غیر کنترل شده به صورت متفاوت در تغییر بود، به طوری که میانگین غلظت نیتروژن آمونیاکی در تیمار زهکشی آزاد بیشتر از تیمارهای زهکشی کنترل شده بود، اما هیچ تفاوت معنی‌داری بین میانگین غلظت آنها در تیمارهای مختلف مشاهده نگردید (جدول ۱). عدم تفاوت معنی‌داری بین میانگین غلظت آنها را می‌توان به وجود مواد آلی (هوموس) کم در خاک مزارع

1- Dilution

مورد مطالعه نسبت داد. وستروم و مسینگ (۳۱)، تفاوت معنی‌دار در میانگین غلظت نیتروژن آمونیاکی در زه‌آب خروجی را بین کرت‌های زهکشی آزاد و کنترل شده، با میانگین بالاتر غلظت نیتروژن آمونیاکی در کرت‌های زهکشی کنترل شده مشاهده نمودند. مک (۱۵) گزارش داد دوره‌های خشک و مرطوب شدن، یخ زدگی و ذوب شدن خاک باعث تجزیه بیشتر هوموس خاک می‌گردد، که این عمل با افزایش ناگهانی نیتروژن آمونیاکی و سپس نیتروژن نیتراتی همراه است (به نقل از وستروم و مسینگ (۳۱)). لو و همکاران (۱۴) هیچ‌گونه روند مشخصی در افزایش یا کاهش غلظت آمونیم زه‌آب خروجی به عنوان یک نتیجه از کاربرد زهکشی کنترل شده طی دو سال تحقیقات خود مشاهده نکردند، آن‌ها علت این امر را به روش‌های کوددهی نامنظم توسط کشاورزان در ناحیه مورد مطالعه نسبت دادند. با توجه به جدول (۲) می‌توان مشاهده نمود در تمام ماه‌های مورد مطالعه و در همه تیمارها، غلظت آمونیم بسیار بالا و بیشتر از ۲ میلی‌گرم بر لیتر است. علت این امر را در وهله اول می‌توان به میزان بسیار بالای کوددهی اوره و در وهله دوم مربوط به بالا آمدن سطح ایستابی در هنگام آبیاری تا لایه کشت شده و غنی شده از نیتروژن معدنی، دانست (۱۹).

جدول ۲- میانگین غلظت ماهانه نیتروژن آمونیاکی در آب زهکشی در تیمارهای مختلف

تاریخ	نیتروزن آمونیاکی (میلی گرم بر لیتر)		
	CD_{70}	CD_{90}	FD
اردیبهشت ۱۳۹۰	۵/۱۸	۳/۸۱	۳/۷۸
خرداد ۱۳۹۰	۳/۰۰	۳/۷۷	۴/۳۹
تیر ۱۳۹۰	۳/۱۲	۳/۴۴	۲/۸۵
مرداد ۱۳۹۰	۳/۶۰	۳/۴۳	۳/۴۹
شهریور ۱۳۹۰	۲/۲۸	۲/۰۲	۳/۹۰
مهر ۱۳۹۰	۲/۴۷	۲/۵۷	۲/۴۸
آبان ۱۳۹۰	۱/۸۶	۲/۳۶	۲/۵۲
میانگین	۳/۱۶	۳/۱۶	۳/۴۷

تیمارهای CD70 و CD_{90} به صورت معنی‌داری کل تلفات آمونیم را در جریان خروجی زهکش در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب به میزان ۶۳/۹۲ (از ۵۷/۷۸ به ۲۰/۸۵ کیلوگرم بر هکتار) و ۵۳/۲۰ درصد (از ۵۷/۷۸ به ۲۷/۰۴ کیلوگرم بر هکتار) نسبت به FDکاهش داد.

غلظت نیتروژن آب زیرزمینی کم عمق

نیتروژن نیتراتی

با توجه به اینکه چاهک‌های مشاهده‌ای در عمق ۲/۱ متری از سطح زمین (عمق متوسط زهکش‌های جانبی مزارع) نصب گردید، بنابراین نمونه‌های گرفته شده جهت تجزیه و تحلیل ازت نیتراتی و آمونیاکی به عنوان نمونه‌های آب زیرزمینی کم عمق محسوب می‌گردد. میانگین غلظت ماهانه برآورد شده نیتروژن نیتراتی آب زیرزمینی در جدول ۳ نشان داده شده است. غلظت ماهانه نیتروژن نیتراتی بین ۸/۰۰ و ۱۲/۳۲ میلی گرم بر لیتر برای تیمار CD_{70}، بین ۷/۴۹ و ۱۶/۶۶ میلی گرم بر لیتر برای تیمار CD_{90} و بین ۷/۵۱ و ۱۵/۴۴ میلی گرم بر لیتر جهت تیمار FD در نوسان بود، که در همه‌ی تیمارها بیشترین غلظت ماهانه در مرداد ماه مشاهده گردید. میانگین غلظت ازت نیتراتی آب زیرزمینی در طول دوره مطالعه در تیمار CD_{70} و CD_{90} به ترتیب به میزان ۱۷/۶۸ و ۷/۴۹ درصد نسبت به تیمار زهکشی آزاد کاهش یافت. کاهش غلظت ازت نیتراتی آب زیرزمینی و زه آب خروجی در تیمارهای کنترل شده را می‌توان به اثر رقیق شدگی و افزایش دنیتریفیکاسیون ناشی از کاهش عمق سطح ایستابی نسبت داد. بنایتی و بورین (۳)، گزارش کردند که غلظت نیتروژن نیتراتی آب زیرزمینی در اعماق مختلف (کم عمق و عمیق) چه درسیستم کنترل شده و چه در غیر کنترل شده دارای تفاوت معنی‌داری نمی‌باشند و علت آن را وجود مواد آلی کم و متعاقباً فعالیت کمتر باکتری‌های بی‌هوازی بیان نمودند و مؤید آن است که دنیتریفیکاسیون نقش کمتری را در کاهش تلفات نیتروژن نیتراتی بازی می‌کند.

ماکزیمم میزان غلظت ازت نیتراتی جهت تیمارهای FD، CD_{90} و CD_{70} به ترتیب ۲۰/۶۹، ۲۸/۲۱ و ۱۹/۶۹ میلی گرم بر لیتر مشاهده گردید. تفاوت معنی‌داری و وابستگی معنی‌داری غلظت ازت نیتراتی آب زیرزمینی در تیمارهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

نیتروژن آمونیاکی

با توجه به جدول ۳ غلظت نیتروژن آمونیاکی در تیمار CD90 طی ماه اردیبهشت تا مرداد (ماه‌های مصرف کود نیتروژنه) دارای سیر صعودی بوده و از مرداد ماه تا مهر ماه روندی نزولی داشت، ولی در تیمارهای FD و CD70 روند معینی مشاهده نگردید. عدم وضوح سیر صعودی یا نزولی مشخص برای پارامتر غلظت نیتروژن آمونیاکی در تیمارهای FD و CD70 را می‌توان به تغییر و تحولات بیوژئوشیمیایی در خاک و تخصیص کود اوره مورد نیاز برای هر تیمار در چهار نوبت در طول فصل رشد نیشکر و نیز تفاوت در زمان هر نوبت کوددهی بین تیمارهای مختلف نسبت داد.

جدول ۳- میانگین غلظت ماهانه ازت نیتراتی و آمونیاکی در آب زیرزمینی در تیمارهای مختلف

تاریخ	ازت نیتراتی (میلی گرم بر لیتر)	ازت آمونیاکی (میلی گرم بر لیتر)

	CD70	CD90	FD	CD70	CD90	FD
اردیبهشت	۱۰/۴۲	۸/۹۷	۱۰/۴۱	۵/۹۸	۳/۷۵	۳/۵۹
خرداد	۱۱/۷۳	۱۰/۸۵	۱۴/۴۱	۳/۶۷	۴/۰۳	۴/۵۹
تیر	۱۰/۹۶	۱۵/۴۴	۱۳/۹۶	۳/۰۷	۵/۷۸	۴/۴۰
مرداد	۱۲/۳۲	۱۶/۶۶	۱۵/۴۴	۳/۶۹	۵/۳۸	۳/۵۴
شهریور	۱۲/۱۶	۱۲/۸۳	۱۱/۹۹	۳/۵۳	۳/۱۶	۴/۱۱
مهر	۸/۰۰	۷/۴۹	۷/۵۱	۲/۵۲	۳/۵۴	۲/۸۰
میانگین	۱۰/۹۹	۱۲/۳۵	۱۳/۳۵	۳/۷۹	۴/۴۵	۳/۹۶

بیشترین میانگین غلظت ماهانه نیتروژن آمونیاکی در تیمارهای FD، CD_{90} و CD_{70} به ترتیب در ماه‌های خرداد، تیر و اردیبهشت واقع گردید (جدول ۳). همچنین بیشترین مقادیر غلظت نیتروژن آمونیاکی در طول دوره تحقیق برابر ۱۰/۹۷، ۱۰/۲۶ و ۶/۸۴ میلی گرم بر لیتر به ترتیب برای تیمارهای CD70، CD90 و FD به دست آمد.

نتیجه‌گیری

تیمار زهکشی آزاد بالاترین میزان تخلیه آب خاک و نیز تلفات نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی را در کل دوره پایش ایجاد نمود، این موضوع به ناکارآمدی سیستم‌های زهکشی مرسوم و نگرانی‌های زیست‌محیطی در رابطه با حفاظت و کیفیت آب اشاره می‌نماید که بایستی در اجرا و طراحی سیستم‌های جدید و یا موجود زهکشی بازنگری صورت گیرد.

با اجرای تمهیدات ساده جهت کنترل زهکشی می‌توان علاوه بر نگهداشتن آب اضافی در خاک جهت استفاده مؤثرتر گیاه، کاهش چشمگیر در تخلیه آب از خاک و تلفات نیتروژن را فراهم نمود. البته در شرایط جدید به خاطر حفظ ازت در خاک بایستی از به‌کارگیری مجدد آن بدون اندازه‌گیری دقیق نیاز گیاه به آن خودداری نمود. عملاً تیمارهای زهکشی کنترل شده کل جریان خروجی زهکشی اندازه‌گیری شده را به میزان حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد و کل تلفات نیتروژن نیتراتی و آمونیاکی را به ترتیب به میزان حدود ۴۵ تا ۶۰ و ۵۰ تا ۶۵ درصد نسبت به زهکشی مرسوم کاهش داد، به طور کلی کاربرد سیستم‌های زهکشی کنترل شده در مقیاس بزرگ می‌تواند کاهش میزان مصرف آب آبیاری و به تبع آن افزایش راندمان آبیاری، کاهش حجم زه‌آب در جمع کننده‌ه روباز اصلی و در پی آن کاهش هزینه کل پمپاژ یا انتقال آن به رودخانه–ها، دریاها و تالاب‌ها و کاهش کاربرد کودهای نیتروژنه به دلیل آبشویی کمتر و به تبع آن کاهش هزینه تأمین کود را به همراه داشته باشد.

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده مدیریت مواد مغذی، مدل کردن آبشویی نیترات، خروج آفت کش‌ها و علف‌کش‌ها در سیستم زهکشی کنترل شده مورد بررسی و ملاحظه قرار گیرد. همچنین به منظور کاهش هزینه‌های ناشی از اجرای طرح زهکشی کنترل شده در سطح وسیع و بازگشت سریع سرمایه، پیشنهاد می‌گردد به جای احداث منهول و نصب سازه‌های کنترل جریان بر روی خروجی زهکش‌های جانبی لوله‌ای، اقدام به نصب سرریز در زهکش‌های جمع‌کننده روباز مزارع نمود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از سازمان آب و برق خوزستان به عنوان حمایت کننده مالی اصلی این طرح، مدیران، کارشناسان و کارکنان شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) به خاطر تدارک دیدن مکان آزمایشی و همکاریشان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

1- Agriculture Canada. 1989. Statistical Methods for Food Quality Management. Agriculture Canada Publication 5268. Ministry of Supply and Services Canada, Ottawa, Ont., Canada, 99 pp.

2- 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.

3- Bonaiti G. and Borin M. 2010. "Efficiency of controlled drainage and subirrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields." Agricultural Water Management 98(2): 343-352.

4- Christen E.W. and Skehan D. 2001. Design and Management of Subsurface Horizontal

Drainage to Reduce Salt Loads. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127(3).

5- Clinton F.M. 1948. Invisible Irrigation on Egin Sench. Reclamation 34, 182–184.

6- Evans R.O., Parsons J.E., Stone K., and Wells W.B. 1992. Water table management on a watershed scale. J. Soil Water Conserv. 47, 58–64.

7- Evans, R.O., and Skaggs R.W. 2004. Development of controlled drainage as a BMP in North Carolina. In: Cooke, R.A. (Ed.), Drainage VIII, Proceedings of the 8th Inter- national Drainage Symposium. Sacramento, CA, U.S.A., 21–24 March, 1–13.

8- FAO. 1984. Drainage Testing, Irrigation and Drainage paper. NO. 28, Food and Agriculture Organization of the United Nation Rome.

9- Fouss J.L., Skaggs R.W., Fausey N.R., and Pitts D.J. 2004. Implementing controlled- drainage technology to reduce nitrate loss in drainage water. In: Cooke, R.A. (Ed.), Drainage VIII, Proceedings of the 8th International Drainage Symposium. Sacramento, CA, U.S.A., 21–24 March, pp. 14–16.

10- Gilliam J.W., Skaggs R.W., and Weed S.B. 1979. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields. J. Environ. Qual. 8 (1), 137–142.

11- 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.

12- Kliewer B.A., and Gilliam J.W. 1995. Water table management effects on denitrification and nitrous oxide evolution. Soil Sci. Soc. Am. J. 59, 1694–1701.

13- Lalonde V. 1993. Some Hydrologic and Environmental Benefits of Water Table Management. M.Sc. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Macdonald Campus of McGill University, Sainte Anne-de-Bellevue, Que., Canada.

14- Luo W., Jia Z., Fang S., Wang N., Liu J., Wang L., Tian S. and Zhang Y. 2008. "Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the YinNan Irrigation District, China." Agricultural Water Management 95(7): 809-816.

15- Mack A.R. 1963. Biological activity and mineralization of nitrogen in three soils as induced by freezing and drying. Can. J. Soil Sci. 43, 316–324.

16- Madramootoo C.A., Dodds G.T. and Papadopoulos A. 1993. "Agronomic and Environmental Benefits of Water-Table Management." Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce 119(6): 1052-1065

17- Mejia M.N. and Madramootoo C.A. 1998. Improved water quality through water table management in eastern Canada. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124(2) March/April: 116–122.

18- 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.

19- Ramoska E., Bastiene N. and Saulys V. 2011. "Evaluation of Controlled Drainage Efficiency in Lithuania." Irrigation and Drainage 60(2): 196-206.

20- Renfro Jr., G. 1955. Applying water under the surface of the ground. In: Yearbook of Agriculture. USDA, pp. 273–278.

21- Sharma B.R., and Minhas P.S. 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. Agric. Water Manage. 78 (1-2), 136–151.

22- Skaggs R.W., and Gilliam J.W. 1981. Effects of drainage system design and operation on nitrate transport T. ASAE 24, 929–934.

23- Skaggs R.W., Evans R.O., Chescheir G.M., Parson J.E., Gilliam J.W., Sheets J.T., and Liedy R.B. 1993. Water table management effects on water quality and productivity, Tidewater Research Station,North Carolina State University,Plymouth,NC, U.S.A., (unpubl.)16pp.

24- Skaggs R.W., and Brevé M.A. 1995. Environmental impacts of water table control. In: Belcher, H.W., D'Itri, F.M. (Eds.), Subirrigation and Controlled Drainage. Lewis Publishers, Boca

Raton, U.S.A., pp. 247–268.

25- Skaggs R.W. 2007. Controlled drainage to reduce nitrogen losses from drained lands. In: ASA-CSSA-SSSA Annual Meeting, New Orleans, LA, U.S.A., 4–8 Novem- ber.

26- Tan C.S., Drury C.F., Soultani M., Van Wesenbeeck I.J., Ng H.Y.F., Gaynor J.D., and Welacky T.W. 1998. Controlled drainage and subirrigation effects on crop yield and water quality. In: Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment. Proceedings of the Seventh International Drainage Symposium, March 8–10, Orlando, Fl. ASAE, 2950 Niles Rd, St. Joe, MI, pp. 676–683.

27- Thomas D.L., Shirmohammadi A., Lowrance R.R., and Smith M.C. 1991. Drainage-subirrigation effect on water quality in Georgia Flatwoods. J. Irrig. Drain. Eng. 117, 123–137.

28- Thomas D.L., Hunt P.G., and Gilliam J.W. 1992. Water table management for water quality improvement. J. Soil Water Conserv. 47, 65–70.

29- Wahba M.A.S., El-Ganainy M., Abdel-Dayem M.S., Gobran A. and Kandil H. 2001. "Controlled drainage effects on water quality under semi-arid conditions in the Western Delta of Egypt." Irrigation and Drainage 50(4): 295-308.

30- Wesstro¨m I., Messing I., Linne´ r H., Lindstro¨m J. 2001. Controlled drainage—effects on drain outflow and water quality. Agr. Water Manage. 47, 85–100.

31- 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. Agric. Water Manage. 87 (3), 229–240.

32- Yang C.C., Prasher S.O., Wang S., Him H.S., Tan C.S., Drury C., and Patel R.M. 2007. Simulation of nitrate-N movement in southern Ontario, Canada with DRAINAMOD-N. Agric. Water Manage. 87 (3), 299–306.