برآورد عمق و فاصلة مناسب زهكش‌هاي زيرزميني بر اساس كيفيت زه‌آب

فرهاد اصلاني[۱]، امير حسين ناظمي[۲*]، سيد علي اشرف صدرالديني[۳]، احمد فاخري فرد[۴] و محمد علي قرباني[۵]
[۱] دانشجوي سابق كارشناسي ارشد، [۲،۳،۴] دانشياران و [۵] استاديار دانشكده كشاورزي دانشگاه تبريز
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۸/۹/۱- تاريخ تصويب: ۱۳۸۹/۳/۲۲)

چكيده

نگرش سنتي حاكم بر طراحي سيستم‌هاي زهكشي، اهداف زهكشي را منحصراً افزايش عملكرد محصول و بهبود شرايط محيط توسعة ريشه مي‌داند و اثرات زيست‌محيطي طرح‌هاي زهكشي را مورد بررسي قرار نمي‌دهد. امروزه در نگرش جديد، اهداف كشاورزي و زيست‌محيطي توأماً در طرح‌هاي زهكشي مورد بررسي قرار مي‌گيرند. عمق و فاصلة زهكش‌هاي زيرزميني از پارامترهاي مهم در طراحي سيستم‌هاي زهكشي مي‌باشند كه تعيين مناسب آنها در عملكرد مطلوب سيستم زهكشي نقش مهمي را ايفا مي‌كند. در اين تحقيق از مدل آزمايشگاهي و مدل عددي Visual MODFLOW جهت شبيه-سازي جريان آب و انتقال نمک به سمت لوله‌هاي زهكشي استفاده گرديده و تأثير عمق و فاصلة زهكش‌ها بر مقدار و كيفيت زه‌آبها در هر دو مدل مورد بررسي قرار گرفته است. بر اساس داده‌هاي حاصل از مدل آزمايشگاهي و شبيه‌سازي عددي جريان براي عمق‌ها و فواصل مختلف زهكش‌ها، رابطه‌اي ارائه و واسنجي گرديده است كه بر مبناي آن شاخص-هاي كيفيت شيميايي زه آب (EC و TDS) مي‌توانند با توجه به عمق و فاصله زهكش‌ها، بار هيدروليكي، ميزان تغذيه و مقادير شاخص‌هاي شيميايي جريان ورودي تغذيه كننده و آب زيرزميني تعيين شوند. صحت سنجي اين رابطه با مقايسه بار هيدروليكي حاصله با مقادير مشاهداتي به ازاي استقرارهاي مختلف زهكش‌ها بر اساس دو شاخص آماري جذر ميانگين مربعات خطا (RSME) و ضريب تعيين (R^2) انجام پذيرفت كه مقادير ميانگين به دست آمده براي اين شاخص‌ها به ترتيب برابر ۰/۱۵۴ سانتي متر و ۰/۹۹۴ دقت قابل قبول آن را نشان داد.

واژه‌هاي كليدي: زهكشي، كيفيت زه‌آب، مدل، شبيه‌سازي، زيست‌محيطي.

مقدمه

در بسياري از مناطق جهان براي توليد محصولات كشاورزي، زهكشي جهت دفع آب اضافي از سطح خاک و ناحية ريشه و به طور كلي بهسازي خاک و افزايش راندمان عملكرد، ضرورت دارد. زهكشي بخش مهمي از مديريت آب و از عوامل مؤثر در فرايند توليد محصولات كشاورزي مي‌باشد. از ملزومات كارآمدي سيستم‌هاي كشاورزي زهكشي اراضي است. تداوم بهره‌وري اراضي كشاورزي و در نتيجه تأمين غذاي مردم جهان، تنها در صورتي مي‌تواند حفظ و تقويت گردد كه وضعيت زهكشي پاسخگوي آب مازاد و سطح ايستابي بالا در اراضي تحت كشت باشد (Mehrdadi et al., 2001). اگرچه زهكشي اراضي امكان توليد زراعي در خاكهاي شور و مرطوب را فراهم مي‌نمايد، اما زه‌آبهاي حاصل از زهكشي آلاينده‌هايي مانند سموم دفع آفات، نمک‌ها و ساير مواد آلوده‌كننده را به آبهاي سطحي و زيرزميني منتقل مي‌سازند. با توجه به كمبود منابع آب، براي مديريت بهينة اين منابع بايد سيستم‌هاي آبياري و شبكه‌هاي زهكشي به طور صحيح طراحي و مديريت شوند، در غير اينصورت عملكرد گياه به دليل ماندابي شدن منطقة توسعة ريشه و يا تجمع نمک كاهش مي‌يابد. از سوي ديگر مديريت و طراحي ناكارآمد، منجر به خروج بيش از حد كود و نمک خاک به همراه رواناب و زه‌آب شده و مشكلات زيست‌محيطي را ايجاد مي‌نمايند (Jebelli, 2001).

عمق و فاصلة زهكش‌هاي زيرزميني دو پارامتر مهم در طراحي سيستم‌هاي زهكشي مي‌باشند كه نقش تعيين كننده‌اي در مقدار و كيفيت زه‌آب‌هاي خارج شده از لوله هاي زهكشي دارند.

بررسي‌هاي Ayars et al. (1987) نشان مي‌دهد كه شوري زه‌آب خارج شده از زهكش‌هاي نصب شده در عمق ۲ متري بيش از شوري زه‌آب خارج شده از زهكش‌هايي است كه در عمق ۱/۷ متري نصب شده‌اند. زهكش‌هايي كه در عمق بيشتري نصب شده‌اند، داراي زه‌آب خروجي بيشتري نيز خواهند بود و زماني كه خروج زه‌آب از زهكش‌هاي كم عمق متوقف مي‌شود، خروج زه‌آب از زهكش‌هاي عميق‌تر ادامه دارد. زهكش‌هاي عميق‌تر نسبت به زهكش‌هايي كه در عمق كمتري نصب شده‌اند آب با كيفيت پايين تري خارج مي‌نمايند.

نتايج مطالعات نشان مي‌دهد كه با نصب زهكش‌ها در عمق ۱/۸ متري، حدود ۳۰ درصد از جريان ورودي به داخل زهكش‌ها از آب زيرزميني خواهد بود و اگر عمق نصب به ۲/۷ متري

* پست الكترونيك مكاتبه كننده: ahnazemi@yahoo.com

برسد، این مقدار به حدود ٦٠ درصد خواهد رسید (Deverel and Fio, 1990). همچنین مشاهده شد که شوري زه‌آبهاي خارج شده از زهکش‌هایي که در عمق ۲/۷ متري نصب شده‌اند بیشتر از شوري زه‌آبهاي خارج شده از زهکش‌هایي است که در عمق ۱/۸ متري نصب شده‌اند. تأثیر عمق و فاصلهٔ زهکش‌هاي زیرزمیني بر کیفیت زه‌آب خروجي، در درهٔ سن جواکین کالیفرنیا که داراي آب زیرزمیني شور و کم عمق بود مطالعه شد (Grismer, 1993). در این تحقیق اثرات نصب لوله‌هاي زهکشي در عمق هاي ۲/۵، ۳ و٤ متري، و فواصل ۲۰، ٤٠، ٦٠ و ۸۰ متري بر کیفیت زه‌آب در شرایط تغذیهٔ ماندگار و غیرماندگار بررسي گردید. وي به این نتیجه رسید که با افزایش عمق و فاصلهٔ زهکش‌ها کیفیت زه‌آب خروجي از طریق زهکش‌ها کاهش مي‌یابد.

همچنین مطالعات وسیعي بر روي کیفیت زه‌آبها انجام داده شد (Guitjens et al., 1997). نتایج نشان داد که معادلات مرسوم در طراحي سیستم‌هاي زهکشي که جهت مصون نگه‌داشتن خاک در برابر ماندابي و شور شدن مورد استفاده قرار مي‌گیرد، براي مدیریت کیفیت زه‌آبها کافي نمي‌باشد، بلکه باید این معادلات به مدل‌هاي مکانیستیک (Mechanistic) که جابجایي و تغییرات شیمیایي در محلول خاک نواحي اشباع را در نظر مي‌گیرند، ارتباط داده شوند. در واقع بایستي در طراحي زهکش‌ها از مدل‌هاي شبیه‌ساز جریان آب یا مدل‌هاي هیدرولیکي در ترکیب با مدل‌هاي شبیه‌ساز پخشیدگي و واکنش‌هاي شیمیایي استفاده نمود تا بتوان کمیت و کیفیت زه‌آبها را کنترل نمود.

با بررسي‌هاي مزرعه‌اي در نواحي تحت آبیاري جنوب شرق استرالیا، تأثیر اصلاح پارامترهاي طراحي و مدیریت سیستم‌هاي زهکشي زیرزمیني بر کمیت و کیفیت زه‌آبها مورد ارزیابي قرار داده شد (Christen and Skehan, 2001). در این تحقیق دو سیستم زهکشي با هم مقایسه گردید: ۱- زهکش عمیق (در عمق ۱/۸ متري و به فاصلهٔ ۲۰ متر از هم) ۲- زهکش کم عمق (در عمق ۰/۷ متري و به فاصلهٔ ۳/۶ متر از هم). مشاهده گردید که با تغییر زهکش‌هاي عمیق با فاصلهٔ زیاد، به زهکش‌هاي کم عمق با فاصلهٔ کم، فواید زیر عاید مزرعه و محیط‌زیست مي‌گردد: ۱- آب آبیاري کمتري زهکشي مي‌گردد، لذا تلفات آبیاري کاهش مي‌یابد ۲- کاهش حجم زه‌آبها سبب کاهش بار نمک خارج شده از طریق زهکش‌ها مي‌گردد ۳- سطح ایستابي بهتر کنترل مي شود و بدین طریق بخشي از آب مورد نیاز گیاه تامین مي شود.

جهت بررسي اثرات عمق نصب زهکش‌ها بر مقدار نیتروژن خارج شده از طریق زه‌آبها، مطالعاتي در یک خاک لومي‌شني بر روي زهکش‌هاي واقع در عمق‌هاي ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ متري انجام گردید (Skaggs and Chescheir, 2003). نتایج آزمایشات نشان داد که با قرار دادن زهکش‌ها در عمق‌هاي کم مي‌توان مقدار نیتروژن خارج شده از طریق زهکش‌هاي زیرزمیني را کاهش داد. هر چند منافع کشاورزي زهکش‌هاي کم عمق تا حدي کمتر از زهکش‌هاي عمیق است اما در کل منافع زهکش‌هاي کم عمق به دلیل هزینه‌هاي بالاي جداسازي نیتروژن از زه‌آب زهکش‌هاي عمیق به منظور کاهش غلظت آن، بیشتر است.

سیستم زهکشي چند عمقي جهت بهسازي کیفیت آب زهکشي شده مورد ارزیابي قرار گرفت (Hornbuckle, 2007). در این مطالعه سیستم زهکشي تک عمقي با سیستم زهکشي چند عمقي مورد مقایسه قرار گرفته است. سیستم تک عمقي در این مطالعه در عمق ۱/۸ متري و با فواصل ۲۰ متري نصب شده و سیستم زهکشي چند عمقي شامل زهکش‌هاي کم عمق (با عمق ۰/۷۵ متري و با فواصل ۳/۳ متري) و زهکش‌هاي عمیق (با عمق ۱/۸ متري و فواصل ۲۰ متري) مي‌باشد. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که سیستم زهکشي چند عمقي سطح ایستابي را بهتر کنترل نموده و بدون اینکه افزایشي در بار نمک ایجاد نماید آبشویي بهتري نسبت به سیستم تک عمقي دارد. از طرف دیگر شوري زه‌آب در زهکش‌هاي کم عمق نسبت به زهکش‌هاي عمیق بسیار کمتر بوده است.

جهت بررسي اثرات مدیریت سطح ایستابي بر کیفیت زه‌آب خروجي از زهکش‌هاي زیرزمیني، مطالعاتي بر روي ۱۲ لایسیمتر انجام شد که ۹ لایسیمتر به آبیاري زیرسطحي SI (SubIrrigation) و ۳ لایسیمتر به زهکشي آزاد FD (Free Drainage) مجهز گردیده بود (Noory and Liaghat, 2009). نتایج مطالعات دو سالهٔ ایشان نشان مي‌دهد که مدیریت سطح ایستابي با استفاده از سیستم‌هاي SI روشي مؤثر در کاهش میزان نیترات و EC زه‌آب خروجي از زهکش هاي زیرزمیني در ایران مي‌باشد که از نظر اقتصادي و زیست‌محیطي روشي عملي و توجیه‌پذیر مي‌باشد.

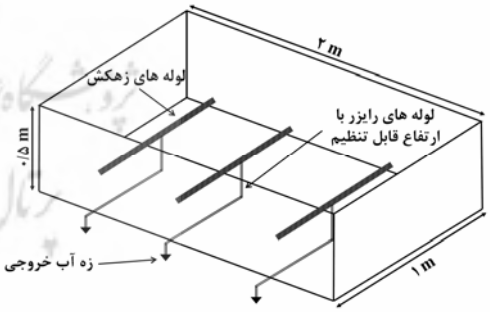
در طراحي عمق و فاصلهٔ زهکش‌ها، باید شبکهٔ جریان تجزیه و تحلیل شده و مسیرهاي واقعي خطوط جریان آب به سمت زهکش‌ها، انتقال نمک و سهم هر کدام از لایه‌هاي زیرین خاک در جریان تعیین گردد. امروزه با پیشرفت چشمگیري که در زمینهٔ برنامه‌هاي کامپیوتري به وجود آمده است، مي‌توان با بهره‌گیري از مدل‌هاي متعددي که به منظور شبیه‌سازي جریان آب و نمک در محیط‌هاي اشباع و غیراشباع خاک ارائه شده‌اند به این اهداف دست یافت.

با توجه به اينكه انجام آزمايش‌ها با در نظر گرفتن حالت‌هاي مختلف استقرار لوله‌هاي زهكش در شرايط واقعي در مزارع آزمايشي چند هكتاري مستلزم صرف هزينه و زمان زيادي است لذا استفاده از مدل‌هاي فيزيكي جهت سهولت مطالعات توجيه-پذير مي‌باشد. شبيه‌سازي عددي جريان به طرف زهكش‌ها نيز مي‌تواند به عنوان ابزاري نيرومند براي مطالعه حالت‌هاي مختلف با حداقل هزينه به كار برده شود. بدين منظور در اين تحقيق تغييرات كيفيت زه‌آب تحت تأثير تغييرات عمق و فاصلة زهكش‌ها با استفاده از مدل آزمايشگاهي و عددي با به كارگيري نرم‌افزار MODFLOW مورد بررسي قرار گرفته و بر اساس نتايج حاصل، رابطه‌اي ارائه گرديده است كه به كمك آن مي‌توان كيفيت زه‌آب خروجي از زهكش‌ها را به هنگام تعيين عمق و فاصلة زهكش‌ها لحاظ نمود.

مواد و روش‌ها

شرح مدل آزمايشگاهي

كار آزمايشگاهي در اين تحقيق با استفاده از دستگاه نشان داده شده در شكل ۱ به انجام رسيد. ابعاد محفظة مدل مذكور كه خاك و لوله‌هاي زهكشي در آن قرار مي‌گيرد داراي طول ۲ متر ، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۵ متر مي‌باشد. كف مدل به عنوان لاية غير قابل نفوذ در نظر گرفته شده است. جهت تعيين موقعيت سطح ايستابي در خاك پيزومترهايي در مدل تعبيه گرديد.



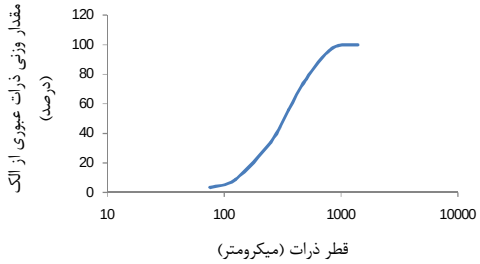
شكل۱- نمايي كلي از مدل آزمايشگاهي

در قسمت فوقاني مدل نيز از يک سيستم باران‌ساز شامل هشت آبپاش جهت توليد بارش و تغذية سطحي آب زيرزميني استفاده شد، به طوري كه متوسط شدت پخش كل براي مجموعه آبپاش‌ها در تمام آزمايشات برابر $۳۰ \frac{mm}{hr}$ بود. در يک طرف مدل در امتداد عرضي آن، سه سطح جهت تغذية جانبي آب زيرزميني تعبيه گرديد. اين سطوح تغذيه به وسيلة توري-هاي فلزي جهت جلوگيري از عبور خاك پوشانده شده بودند. آب پس از عبور از اين سطوح وارد خاك شده و جريان آب زيرزميني را تشكيل مي‌داد. در طرف مقابل سطوح تغذيه سطوح مشابهي براي تخليه در نظر گرفته شده بودند. سطح آب زيرزميني تحت تاثير مقادير بار هيدروليكي در سطوح تخليه و تغذيه و مقدار تغذيه از سطح خاك كه توسط دستگاه باران ساز در حين انجام آزمايشات تامين مي‌شد قرار داشت. پس از مدتي سطح آب زيرزميني تثبيت مي‌شد (حالت ماندگار) و اندازه-گيري‌هاي مربوطه انجام مي‌پذيرفت. جهت ذخيرهٔ آب با كيفيت‌هاي مورد نظر براي انجام آزمايشات، دو مخزن نسبتاً بزرگ براي آب زيرزميني و سيستم باران‌ساز در نظر گرفته شد. به هر يك از اين دو مخزن، يك پمپ و يك دبي‌سنج جهت پمپاژ آب به داخل سيستم اختصاص داده شد.

براي انجام آزمايشات از لوله‌هاي استيل استوانه‌اي شكل، به قطر ۲ سانتيمتر و طول ۸۰ سانتيمتر و به تعداد ۲ الي ۳ عدد با توجه به فاصله زهكش‌ها و طول مخزن، به عنوان لوله‌هاي زهكش زيرزميني در مدل استفاده گرديد. لوله‌هاي زهكشي به رايزرهايي به ارتفاع ۵۰ سانتيمتر متصل شده و طوري طراحي گرديدند كه ارتفاع آنها قابل تنظيم باشد تا از اين طريق عمق لوله هاي زهكشي درون خاك تغيير داده شود (شكل ۲).

شكل۲- مدل لوله‌هاي زهكشي

با توجه به اينكه در اين تحقيق، جريان آب و انتقال نمک به سمت زهكش‌ها حائز اهميت بود، از خاكي با بافت شني‌ريز و هدايت هيدروليكي نسبتاً بالا براي انجام آزمايشات استفاده گرديد. منحني دانه‌بندي خاك استفاده شده در آزمايشات در شكل ۳ آورده شده است.



شكل۳- منحني دانه بندي خاك استفاده شده در آزمايشات.

براي انجام آزمايشات ابتدا به آب داخل مخزن سيستم باران‌ساز به اندازه‌اي NaCl و H_2SO_4 اضافه گرديد تا EC آن به $۰/۵ \frac{ds}{m}$ و pH آن به ۵/۵ برسد. به همين ترتيب به مخزن آب

زیرزميني آنقدر NaCl و NaOH اضافه گرديد تا EC آن به $\frac{ds}{m}$ ۱/۵ و pH آن به ۸/۵ افزايش يابد. هدف از اين كار ايجاد اختلاف قابل توجه بين مقادير غلظت آب زيرزميني و آب بارندگي بود تا بتوان نقش عمق و فاصلة زهكش‌ها را بر ميزان اختلاط آب اين دو منبع و كيفيت زه‌آب حاصل بررسي نمود. براي انجام آزمايشات از ۱۸ موقعيت استقرار زهكش‌ها استفاده گرديد كه تركيبي از شش عمق ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ٤٠ سانتيمتري و سه فاصلة ٦٠، ۱۰۰ و ۱٤٠ سانتيمتري بودند. سپس پمپاژ آب به داخل سيستم تا زمان برقراري شرايط ماندگار انجام مي‌گرفت. در پايان هر آزمايش پارامتر هاي زير اندازه‌گيري مي‌شد:۱- هدايت الكتريكي زه‌آب (EC) ۲- كل مواد جامد حل شدة زه‌آب (TDS) ۳- PH زه‌آب ٤- موقعيت سطح ايستابي ۵- جريان زهكشي.

شبيه‌سازي عددي

جهت شبيه‌سازي عددي مدل آزمايشگاهي از نرم‌افزار Visual MODFLOWاستفاده گرديد. اين نرم‌افزار يک مدل كامپيوتري است كه به زبان فرترن ۷۷ در سال ۱۹۹٤ توسط سازمان زمين شناسي ايالات متحده (USGS) تهيه گرديده است. نرم افزاري با توانايي گرافيكي بسيار بالا، كه استفاده از آن جهت مدل‌سازي براي كاربردهاي ويژه در شبيه‌سازي‌هاي جريان آب زيرزميني و انتقال آلاينده‌ها بسيار آسان مي‌باشد.

اين مدل در حالت يک بعدي براي بررسي حركت آب در خاک معادلة (۱) و براي بررسي حركت نمک‌ها و ساير آلاينده‌ها در خاک براساس پديده‌هاي انتقال-انتشار(Advection-Dispersion) معادلة (۲) را با روش تفاضلات محدود (Finite Difference) حل مي‌كند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) - W = S_S \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۱)$$

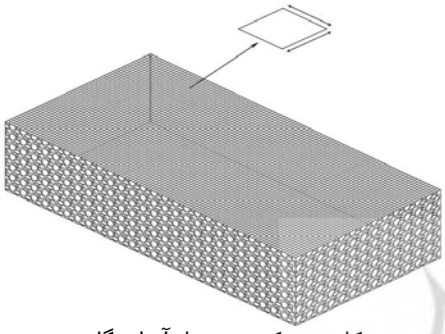
كه در آن h(m) بار آبي، $W(day^{-1})$ تغذيه يا تخليه آب، $S_S(m^{-1})$ ضريب ذخيرة ويژه، و K_x $(\frac{m}{day})$ هدايت هيدروليكي در جهت x مي‌باشد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} + (\frac{\partial C}{\partial t})_{r_{xn}} \qquad (۲)$$

كه در آن $C(\frac{gr}{cm^3})$ غلظت مادة حل شده، t(hr) زمان، $D_x(\frac{cm^2}{hr})$ ضريب انتشار طولي و $V_x(\frac{cm}{hr})$ سرعت حركت آب مي‌باشد.

انديس r_{xn} نشان دهندة واكنش بيولوژيكي يا شيميايي مادة حل شده مي‌باشد.

جهت شبيه‌سازي عددي مدل آزمايشگاهي، ابتدا ابعاد مدل تعريف شده و سپس اقدام به شبكه‌بندي گرديد. براي اين منظور از ۵۰۰ عنصر مربعي شكل به ضلع دو سانتيمتر استفاده شد (شكل۴). سطوح تغذية جانبي به صورت چاه‌هاي تغذيه، و پيزومترها به صورت چاه‌هاي مشاهده‌اي براي مدل تعريف - گرديد. مقادير مربوط به نرخ بارش، كيفيت آب زيرزميني و آب بارندگي، مشخصات هيدروليكي خاک، موقعيت لوله‌هاي زهكشي و مشخصات آنها و ساير شرايط اوليه و مرزي ديگر از طريق راهنمايي كه براي هر مورد در نظر گرفته شده بود به مدل داده شد.



شكل۴- شبكه‌بندي مدل آزمايشگاهي.

در اين تحقيق ابتدا با استفاده از داده‌هاي آزمايشگاهي موجود، مدل كاليبره شده و سپس مدل براي شرايط مختلفي از مقادير كمي و كيفي بارش و آب زيرزميني اجرا گرديد.

نتايج و بحث

نتايج مدل آزمايشگاهي

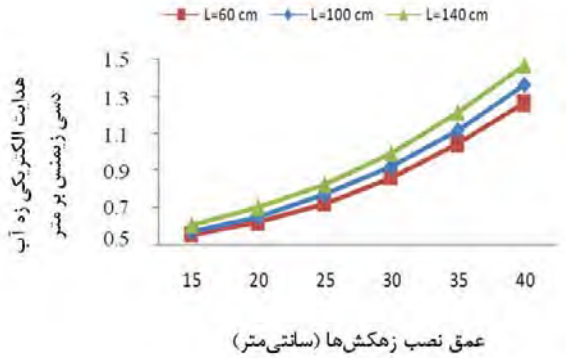
۱- **EC** زه‌آب

شكل ۵ تغييرات EC زه‌آب خروجي را به‌ازاي استقرارهاي مختلف لوله‌هاي زهكشي در خاک نشان مي‌دهد. ملاحظه مي- شود كه در يک عمق ثابت با افزايش فاصلة زهكش‌ها، و در يک فاصلة ثابت با افزايش عمق نصب زهكش‌ها، مقدار EC زه‌آب خروجي افزايش مي‌يابد. تأثير تغيير فاصلة زهكش‌ها بر مقدار EC زه‌آب، با افزايش عمق نصب زهكش‌ها افزايش مي‌يابد. بعنوان مثال در عمق ۲۰ سانتيمتري، با افزايش فاصلة زهكش‌ها از ۱۰۰ به ۱۴۰ سانتيمتر، EC زه‌آب به مقدار ۶/۶۲ درصد افزايش يافته است در حاليكه همين افزايش فاصله در عمق ۳۵ سانتيمتري، EC زه‌آب را به مقدار ۸/۱ درصد افزايش داده است. همچنين مشاهده مي‌شود كه تأثير تغيير عمق نصب لوله‌هاي زهكشي بر مقدار EC زه‌آب، بيشتر از تأثير تغيير فاصلة زهكش- ها مي‌باشد.

۲- **TDS** و **PH** زه‌آب

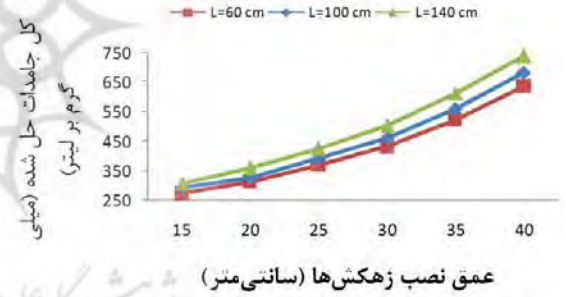
شكل ۶ تغييرات TDS و شكل ۷ تغييرات PH زه‌آب خروجي را به‌ازاي استقرارهاي مختلف لوله‌هاي زهكشي نشان

مي‌دهد. مشاهده مي‌شود كـه رونـد تغييـرات TDS و PH زه‌آب تقريباً مشابه روند تغييرات EC مي‌باشد به طوري كه بـا افـزايش عمق و فاصلة زهكش‌ها مقدار TDS و PH زه‌آب نيز افزايش مي‌يابد. از اينرو در ادامة مقاله تنها به تحليل ارتباط EC با تغييرات عمق و فاصلة زهكش‌ها پرداخته مي‌شود. مـسلماً نتـايج حاصـله براي TDS و PH نيز قابل بسط خواهد بود.



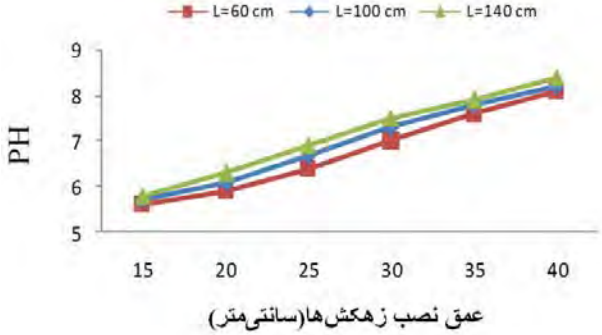
شكل۵- منحني تغييرات **EC** زه‌آب در موقعيت‌هاي مختلف استقرار لوله‌هاي زهكشي (**L** فاصلة زهكش‌ها از هم مي‌باشد).

در واقع مي‌توان گفت كه با افزايش عمق و فاصلة زهكـش‌هـا كيفيت زه‌آب به كيفيت آب زيرزميني نزديـك مـي‌گـردد. دليـل اين امر را مي‌توان اينگونه بيان



شكل۶- منحني تغييرات **TDS** زه‌آب در موقعيت‌هاي مختلف استقرار لوله‌هاي زهكشي.

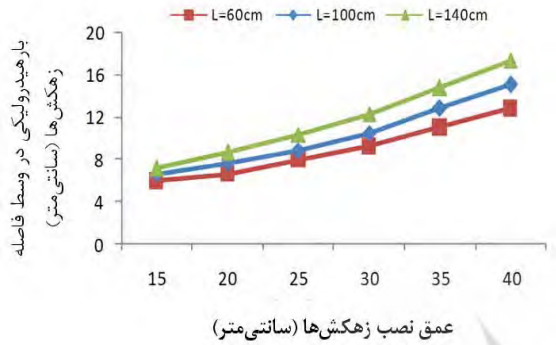
كرد كـه بـا افـزايش عمـق و فاصـلة زهكـش‌هـا، طـول و عمـق مسيرهاي خطوط جريان آب به سمت زهكش‌ها نيز افزايش مي‌يابد كه نتيجة آن افزايش سهم آب زيرزميني در زه‌آب ورودي به لولة زهكش مي‌باشد.



شكل۷- منحني تغييرات **PH** زه‌آب در موقعيت‌هاي مختلف استقرار لوله‌هاي زهكشي.

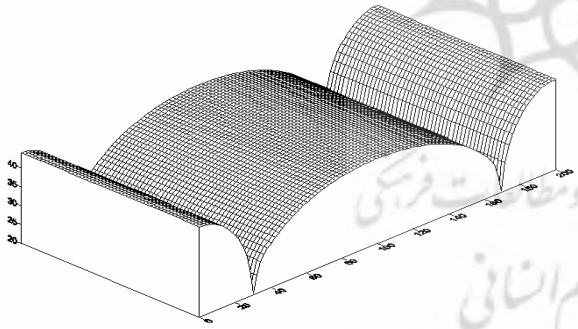
موقعيت سطح ايستابي

شكل ۸ تغييرات بار هيدروليكي را در وسط فاصلة زهكش‌هـا هنگـام برقـراري شـرايط مانـدگار و بـراي اسـتقرارهاي مختلـف زهكش‌ها نشان مي‌دهد. ملاحظه مي‌شود كه با افزايش عمق و فاصلة زهكش‌هـا، بـار هيـدروليكي در وسـط فاصـلة زهكـش‌هـا افزايش مي‌يابد. بار هيـدروليكي يـا موقعيـت سـطح ايـستابي در مدل آزمايشگاهي از طريـق انـدازه‌گيـري مقـادير سـطح آب در پيزومترها مشخص مي‌گرديد.



شكل۸- منحني تغييرات بار هيدروليكي در نقطة مياني بين زهكش‌ها.

در شكل ۹ (بعنوان نمونه)، شـمايي سـه بعـدي از موقعيـت سطح ايستابي در شرايط استقرار لوله‌هاي زهكـشي در عمـق ۳۰ سانتيمتري و فاصلة ۱۴۰ سانتيمتري نشان داده شده است.



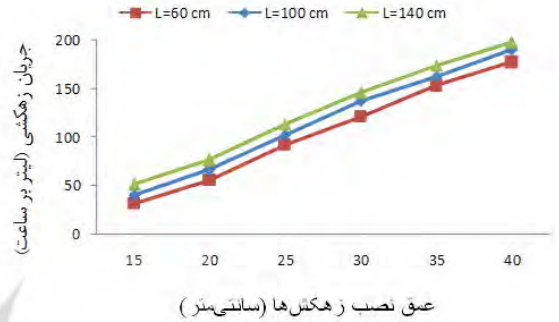
شكل۹- موقعيت سطح ايستابي ايجاد شده در خاك در شرايط **L=140cm** و **W=30cm**.

جريان زهكشي

شكل ۱۰ تغييرات جريان زهكشي را بـه ازاي اسـتقرار هـاي مختلف لوله‌هاي زهكشي پس از برقراري شرايط مانـدگار، نـشان مي‌دهد. با توجه به اين شكل ملاحظه مـي‌شـود كـه بـا افـزايش عمق و فاصله زهكش‌ها، دبي زه‌آب خروجي از طريق لولـه‌هـاي زهكشي افزايش مي‌يابـد كـه علـت آن مـي‌توانـد افـزايش بـار هيدروليكي در وسط فاصلة زهكش‌ها و يا افـزايش سـطح تحـت زهكشي در نظر گرفته شود. به عبارت ديگر زهكش‌ها بايد حجم بيشتري از آب را كه بين دو لولة زهكشي قرار مـي‌گيـرد خـارج نمايند.

نتايج بررسي‌هاي Grismer (1993) بر روي كيفيت زه‌آب نيز نشان مي‌دهد كه روند تغييرات TDS زه‌آب تقريباً مشابه نتايج حاصل از اين تحقيق (شكل ۶) مي‌باشد.

همچنين نتايج بررسي‌هاي Skaggs and Chescheir (2003) بر روي كيفيت زه‌آب نشان مي‌دهد كه تغييرات نيتروژن موجود در زه‌آب به ازاي استقرار زهكش‌ها در عمق‌ها و فواصل مختلف از روندي مشابه با نتايج فوق برخوردار است، يعني با افزايش عمق و فاصلة زهكش‌ها مقدار نيتروژن خارج شده از طريق زهكش‌ها نيز افزايش مي‌يابد.



شكل۱۰- تغييرات دبي زه‌آب خروجي به‌ازاي استقرارهاي مختلف لوله‌هاي زهكشي.

شبيه‌سازي عددي با استفاده از مدل **MODFLOW Visual**

در اين تحقيق با توجه به امكانات مدل آزمايشگاهي از داده‌هاي مربوط به شش موقعيت استقرار زهكش‌ها جهت واسنجي مدل استفاده گرديد: عمق‌هاي نصب ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و۴۰ سانتيمتري به ترتيب با فواصل متناظر ۶۰، ۱۰۰، ۶۰، ۱۴۰، ۶۰ و ۱۴۰ سانتيمتري لوله‌هاي زهكشي.

جهت ارزيابي نتايج واسنجي و تشخيص ميزان همبستگي مقادير بار هيدروليكي محاسباتي و مشاهداتي از دو شاخص آماري جذر ميانگين مربعات خطا (RMSE) و ضريب تعيين (R^2) استفاده گرديد كه نتايج آن در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۲ مقادير خطاي مطلق ($EC_{obs}- EC_{cal}$) و نسبي (RE) EC زه‌آب خروجي از زهكش‌ها را پس از واسنجي نشان مي‌دهد. در اين جداول W و L به ترتيب معرف عمق و فاصلة زهكش‌ها مي‌باشند.

جدول۱- ارزيابي نتايج حاصل از واسنجي مدل بر مبناي بار هيدروليكي به‌ازاي استقرارهاي مختلف زهكش‌ها.

عمق نصب زهكش W(cm)	فاصله زهكش‌ها L(cm)	R^2	RMSE(cm)
۱۵	۶۰	۰/۹۹۴	۰/۲۰۷
۲۰	۱۰۰	۰/۹۹۸	۰/۱۷۳
۲۵	۶۰	۰/۹۹۷	۰/۱۸۱
۳۰	۱۴۰	۰/۹۹۸	۰/۱۴۴
۳۵	۶۰	۰/۹۹۶	۰/۱۶۷
۴۰	۱۴۰	۰/۹۹۵	۰/۱۸۵

جدول۲- مقادير خطاي مطلق و نسبي **EC** زه‌آب خروجي از زهكش‌ها پس از واسنجي.

عمق نصب زهكش W(cm)	فاصله زهكش‌ها L(cm)	$\lvert EC_{obs} - EC_{cal}\rvert(\frac{ds}{m})$	RE(%)
۱۵	۶۰	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۵۸
۲۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۲۶
۲۵	۶۰	۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۴۲
۳۰	۱۴۰	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۳۴
۳۵	۶۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۲
۴۰	۱۴۰	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۲۴

جهت صحت‌سنجي مدل نيز از داده‌هاي مربوط به ۱۲ موقعيت ديگر استقرار زهكش‌ها استفاده گرديد. جدول ۳ مقادير R^2 و RMSE مربوط به مقادير بار هيدروليكي را به ازاي استقرارهاي مختلف زهكش‌ها و جدول ۴ مقادير خطاي مطلق و نسبي EC زه‌آب خروجي از زهكش‌ها را در مرحلة صحت‌سنجي نشان مي‌دهد. نتايج اين جداول حاكي از اين است كه همبستگي مطلوبي بين داده‌هاي مشاهداتي و محاسباتي وجود دارد و مدل از دقت و مقبوليت خوبي برخوردار مي‌باشد.

جدول۳- ارزيابي نتايج حاصل از صحت سنجي مدل بر مبناي بار هيدروليكي به‌ازاي استقرارهاي مختلف زهكش‌ها.

عمق نصب زهكش W(cm)	فاصله زهكش‌ها L(cm)	R^2	RMSE(cm)
۱۵	۱۰۰	۰/۹۹۶	۰/۱۷۸
۱۵	۱۴۰	۰/۹۹۵	۰/۱۴۸
۲۰	۶۰	۰/۹۹۱	۰/۱۷۵
۲۰	۱۴۰	۰/۹۹۳	۰/۱۵۸
۲۵	۱۰۰	۰/۹۹۳	۰/۱۵۱
۲۵	۱۴۰	۰/۹۹۵	۰/۱۶۴
۳۰	۶۰	۰/۹۹۲	۰/۱۳۲
۳۰	۱۰۰	۰/۹۹۶	۰/۱۴۲
۳۵	۱۰۰	۰/۹۹۳	۰/۱۶۸
۳۵	۱۴۰	۰/۹۹۷	۰/۱۳۶
۴۰	۶۰	۰/۹۹۲	۰/۱۵۴
۴۰	۱۰۰	۰/۹۹۵	۰/۱۴۵

جدول۴- مقادير خطاي مطلق و نسبي **EC** زه‌آب خروجي از زهكش‌ها در مرحلة صحت‌سنجي.

عمق نصب زهكش W(cm)	فاصله زهكش‌ها L(cm)	$\lvert EC_{obs} - EC_{cal}\rvert(\frac{ds}{m})$	RE(%)
۱۵	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۷	۰/۰۴۷
۱۵	۱۴۰	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۲۶
۲۰	۶۰	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۴۲
۲۰	۱۴۰	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۳۳
۲۵	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۴۴
۲۵	۱۴۰	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۲۵
۳۰	۶۰	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۲۷
۳۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۱۸	/۰۱۹۷
۳۵	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۲	/۰۱۹۸
۳۵	۱۴۰	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۲۱
۴۰	۶۰	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۱۲
۴۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۲۴

پس از واسنجي و صحت‌سنجي، مدل براي شرايط مختلفي از مقادير كمي و كيفي بارش و تغذية جانبي آب زيرزميني اجرا گرديد كه با استفاده از اين داده‌ها و داده‌هاي آزمايشگاهي، رابطه‌اي بين EC زه‌آب با عمق و فاصلة زهكش‌ها و ساير پارامترهاي مؤثر در تعيين عمق و فاصلة زهكش‌ها حاصل گرديد كه به شرح زير مي‌باشد:

$$\frac{EC_{dw}}{EC_g} = a(\frac{W}{d_e})^{\alpha} + b(\frac{L}{d_e})^{\beta} + c(\frac{EC_p}{Ec_g})^{\gamma} + e(\frac{q_p}{q})^{\lambda} \qquad (۳)$$

كه در آن EC_p هدايت الكتريكي آب آبياري يا بارندگي ، EC_{dw} هدايت الكتريكي زه‌آب، EC_g هدايت الكتريكي آب زيرزميني، q نرخ جريان زهكشي، q_p شدت بارش، d_e عمق معادل، W عمق نصب زهكش‌ها و L فاصلة زهكش‌ها مي‌باشد.

در اين رابطه جهت از بين بردن عامل مقياس، از عمق معادل جهت بي بعد نمودن عمق و فاصلة زهكش‌ها استفاده گرديده است.

جهت بررسي دقت و قابليت رابطة فوق، نتايج حاصل از مدل آزمايشگاهي با اين رابطه برازش داده شده و ضرايب مربوطه تعيين گرديدند كه به شرح زير مي‌باشد:

$a = 0.13, \quad b = 0.07, \quad c = 0.8, \quad e = -0.65$

$\alpha = 0.861, \quad \beta = 0.823, \quad \gamma = 0.655, \quad \lambda = 0.067$

مقدار ضريب تعيين بين نتايج حاصل از مدل آزمايشگاهي و نتايج حاصل از رابطة (۳) با ضرايب ثابت مذكور ۰/۹۷۱ مي‌باشد كه مقبوليت اين رابطه را نشان مي‌دهد.

مقايسة نتايج بار هيدروليكي در آزمايشات صورت گرفته با نتايج حاصل از معادلة هوگهات همبستگي نسبتاً بالايي با ضريب تعيين ۰/۸۱۵ را بدست مي‌دهد، از اين‌رو مي‌توان از معادلة (۴) در رابطة (۳) استفاده نمود:

$$q = \frac{4Kh^2 + 8Khd_e}{L^2} \qquad (۴)$$

$$q_p = q - q_g \qquad (۵)$$

كه در آن K($\frac{cm}{day}$) هدايت هيدروليكي اشباع خاك، h(cm) بار هيدروليكي در وسط زهكش‌ها و q_g($\frac{cm}{day}$) نرخ جريان آب زيرزميني مي‌باشد.

با جايگذاري رابطة (۵) در رابطة (۳) رابطة زير حاصل مي‌گردد:

$$\frac{EC_{dw}}{EC_g} = a(\frac{W}{d_e})^{\alpha} + b(\frac{L}{d_e})^{\beta} + c(\frac{EC_p}{Ec_g})^{\gamma} + e(\frac{4Kh^2 + 8Khd_e - q_g L^2}{qL^2})^{\lambda} \qquad (۶)$$

براي محاسبة عمق معادل مي‌توان از روابطي كه هوگهات ارائه كرده است استفاده نمود (۲):

$$d_e = \frac{d}{(\frac{8d}{\pi L}\ln\frac{d}{\pi r}) + 1} \qquad d \prec \frac{L}{4} \qquad (۷)$$

$$d_e = \frac{\pi L}{(8\ln\frac{L}{\pi r})} \qquad d \succ \frac{L}{4}$$

كه در آن r(cm) شعاع لولة زهكش و d(cm) فاصلة زهكش تا لاية غيرقابل نفوذ مي‌باشد

با توجه به اينكه آزمايشات به ازاي يک نوع خاک صورت گرفته است نمي‌توان با اطمينان كامل صحت رابطة (۶) را براي تمام موارد صادق دانست و بررسي صحت اين امر نيازمند آزمايشات و داده‌هاي بيشتري مي‌باشد. البته با توجه به رابطة بين پارامترها در معادلة (۳) كه براي يک خاک همگن ارائه گرديده است، به نظر مي‌رسد كه رابطة (۶) نيز براي خاک‌هاي همگن صادق باشد.

با استفاده از رابطة (۶) مي‌توان عمق و فاصلة لوله‌هاي زهكشي را با روش سعي و خطا و با توجه به مقدار EC مورد نظر براي زه‌آب خروجي از زهكش‌ها، با معلوم بودن مقادير q، K، EC_p، EC_g و q_p كه جزء پارامترهاي معلوم در طراحي سيستم‌هاي زهكشي مي‌باشند، تعيين نمود. البته بايد توجه داشت كه عمق و فاصلة لوله‌ها طوري انتخاب شود كه از لحاظ فني نيز توجيه پذير باشد يعني $h \le W - Z$ كه در آن Z عمق توسعة ريشه مي‌باشد.

نتيجه‌گيري كلي

با توجه به اهميت كيفيت زه‌آبها و اثرات مخرب آنها بر محيط زيست و اراضي پايين‌دست، و اينكه معادلات متداولي كه براي طراحي سيستم‌هاي زهكشي مورد استفاده قرار مي‌گيرند جهت مديريت كيفيت زه‌آبها كافي نمي‌باشند، در اين تحقيق با استفاده از مدل آزمايشگاهي و عددي به بررسي تأثير عمق و فاصلة زهكش‌ها بر مقدار و كيفيت زه‌آبها پرداخته شد و با استفاده از نتايج حاصل از بررسي‌هاي صورت گرفته رابطه‌اي جهت تعيين عمق و فاصلة زهكش‌ها در خاكهاي همگن ارائه گرديد كه در آن تقريباً كلية عوامل مؤثر در انتخاب عمق و فاصلة زهكش‌ها لحاظ گرديده است.

REFERENCES

Ayars, J.E., Patton, S.H, and Schoneman, R.A. 1987. Drain water quality from arid irrigated lands. In: Proceedings of *5th National drainage Symposium*. Chicago, USA. pp. 220-230.

Alizade, A. 2005. *New Drainage*. Astan Ghods Razavi Publications. (In Farsi)

Christen, E and Skehan, D. 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(3), 148-155.

Deverel, S.J, and Fio, J.L. 1990. Ground-water flow and solute movement to drain laterals, Western

San Joaquin Valley, California. *Water Resources Research*, 27, 233-246.

Grismer, M.E. 1993. Subsurface drainage system design and drain water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3), 537-543.

Guitjens, J.C., Ayars, J.E, and Grismer, M.E. 1997. Drainage design for water quality management: Overview. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 148-153.

Hornbuckle, J.W., Christen, E.W, and Faulkner, R.D. 2007. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. *Agricultural Water Management*, 89, 208-216.

Jebelli, J. 2001. Environmental effects of drainage of fields. In: Proceedings of *2nd Technical Workshop of Drainage*, Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID), Tehran University, Tehran, pp. 239-245. (In Farsi)

Mehrdadi, N., Adl, M, and Zarnekabi, M. 2001. *Management of agricultural drainage water quality*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID) Publications. (In Farsi)

Noory, H, and Liaghat, A.M. 2009. Water table management to improve drainage water quality in semiarid climatic conditions of Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 665-670.

Skaggs, R.W, and Chescheir, G.M. 2003. Effects of subsurface drain depth on nitrogen losses from drained lands. *Transactions of ASAE*, 46(2), 237-244.