نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۴ / شماره ۴/ ۱۳۹۹

بررسی اختلاط قائم آب شور و شیرین در زهکشی و تاثیر آن بر شوری زه‌آب در مزارع کشت نیشکر دعبل خزاعی و سلمان فارسی

علی مختاران[1]، عبدعلی ناصری و حیدرعلی کشکولی

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

alimokhtaran@gmail.com

استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز. ایران

abdalinaseri@yahoo.com

استاد بازنشسته گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز. ایران.

kashkulihda@gmail.com

دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۹ و پذیرش: مهر ۱۳۹۹

چکیده

در شرایط جدید زهکشی در مرکز و جنوب غرب استان خوزستان، با کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها و زهکشی کنترل شده، مطالعه دینامیک منطقه اختلاط آب شور و شیرین در بالای سفره آب زیرزمینی، شناخت مشخصات این منطقه و تاثیر آن بر دبی و شوری زه‌آب اهمیت دارد. در این پژوهش هفت گروه پیزومتر در فواصل مختلف از جمع کننده زه‌آب نصب شد. هرگروه شامل هشت پیزومتر کارگذاری شده در اعماق مختلف سطح خاک (۰/۸ تا ۵ متری) بود. این تحقیق در دو مزرعه R9-11 شرکت کشت و صنعت دعبل خزاعی با عمق متوسط زهکشی دو متر و فواصل لاترال‌های ۶۵ متری و مزرعه R8-7 شرکت کشت و صنعت سلمان فارسی با عمق متوسط زهکشی ۱/۴متر و فواصل لاترال‌های ۴۲ متری انجام شد. تراز سطح آب در پیزومترها، شوری آب در لایه‌های مختلف خاک و دبی و شوری زه‌آب در سه دوره آبیاری سنگین کشت نیشکر(فروردین تا مهرماه سال‌های ۱۳۹۲،۱۳۹۳و۱۳۹۶) به‌صورت روزانه پایش شد. نتایج نشان داد که با شروع آبیاری سنگین، بار هیدرولیکی افزایش یافته و اختلاف بارهیدرولیکی بین لایه‌های پایین(چهار وپنج متری) نسبت به لایه‌های سطحی، جریان عمودی و هجوم آب شور به‌سمت بالا را برقرار می‌سازد. کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها تا ۶۰ سانتی‌متر از مزرعه R9-11نسبت به مزرعه R8-7 و فاصله گرفتن ازجمع‌کننده تا ۴۰۰ متر در هر مزرعه که کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها تا ۴۰ سانتی‌متر را به‌همراه داشت، باعث افزایش بار هیدرولیکی به میزان متوسط۱۲-۸ سانتی‌متر، افزایش ضخامت منطقه اختلاط تا یک متر و کاهش خط میانگین شوری در ناحیه اختلاط به میزان هشت درصد بود. در این تحقیق مشخص شد که شوری زه‌آب تحت تاثیر شوری آب آبیاری و شوری آب زیرزمینی بوده و تفاوت درعمق زهکشی، موقعیت لایه محدودکننده و وجود عدسی‌های ماسه‌ای بر این شوری موثر است. با کاهش عمق زهکشی، دبی زه‌آب به‌شدت کاهش یافت. به‌طوری‌که میانگین زه‌آب از هر لاترال در مزرعه R9-11 ، ۱۰ میلی‌متر در روز و در مزرعه R8-7 به ۳/۳ میلی‌متر در روز بود. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت منطقه اختلاط آب شور و شیرین ناشی از کاهش بهینه عمق زهکشی، به‌دلیل استفاده گیاه از این منطقه، حجم آب مصرفی در هر دور آبیاری کاهش می‌یابد و می‌تواند عاملی موثر در جهت حفاظت منابع خاک و آب باشد.

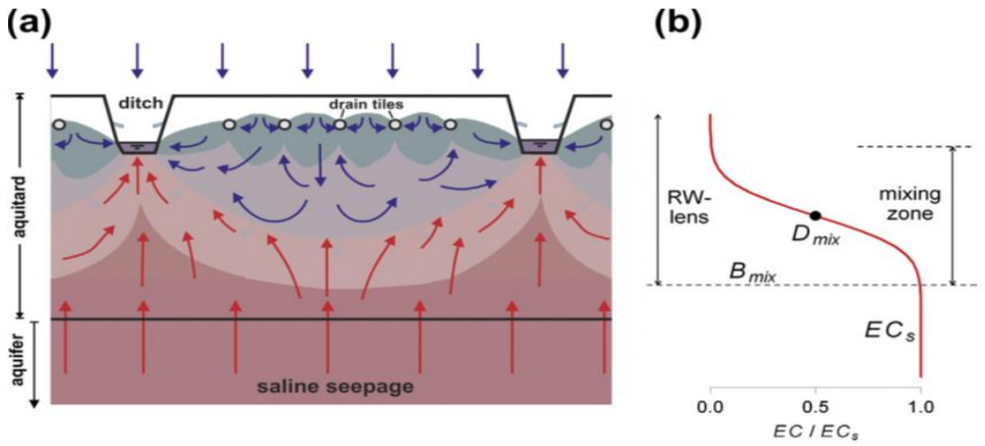
واژهای کلیدی: زهکشی‌نوین، منطقه بینابین، لایه محدودکننده، غلظت املاح، پیزومتر

---

[1] – آدرس نویسنده مسئول: اهواز، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

مقدمه

سیستم‌های زهکشی درمناطق خشک و نیمه خشک با آب زیرزمینی شور و کم عمق، با پایین نگه داشتن سطح ایستابی، از ورود آب و املاح زیرزمینی شور به عمق توسعه ریشه‌ها جلوگیری می‌کنند؛ اما امروزه در زمینه زهکشی نگرش‌های جدیدی مطرح گردیده است (علی‌نژاد و کاوه،۱۳۹۱؛ پذیرا،۱۳۹۱؛ اسدی کوپرچال و همکاران، ۱۳۹۲). ازجمله اینکه یکی از اهداف، کاهش دادن میزان زه‌آب خروجی از طریق کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها می‌باشد. از طرف دیگر در این نوع سیستم با بالا آوردن عمق زهکش‌ها و بالا نگه‌داشتن سطح سفره آب زیرزمینی در مجاورت عمق ریشه، صعود آب زیرزمینی به عمق ریشه و در نتیجه استفاده گیاه از آب زیرزمینی را ممکن می‌سازد. کیفیت این آب زیرزمینی در مناطق مرطوب مناسب و قابل استفاده گیاه می‌باشد (هاشمی‌نژاد و همکاران،۱۳۹۱) ولی در مناطق خشک به‌دلیل شور بودن آب زیرزمینی، اعمال این شیوه به‌منظور استفاده گیاه بدون اشکال نمی‌باشد. اراضی جنوبی جلگه خوزستان، زمین‌های شور و لم یزرع بودند که بعد از احداث سد بر روی رودخانه کارون و اجرای شبکه‌های آبیاری و زهکشی قابلیت احیاء شدن را پیدا کردند (نوذری، ۱۳۸۸). در این‌گونه اراضی، نفوذ عمقی پیوسته از تلفات آب در طول دوره آبیاری سنگین کشت‌های تابستانه مانند نیشکر و برنج، باعث شده که آب نسبتاً شیرین آبیاری در اعماق یک تا دو متری سطح زمین به‌علت اختلاف چگالی به‌صورت شناور بر روی سفره آب زیرزمینی شور قرار گیرد و منطقه‌ای بینابین[1] که در آن غلظت نمک بین حالت شور و شیرین قرار دارد به‌وجود آید (مختاران و همکاران،۱۳۹۲). نفوذ منطقه بینابین به ناحیه ریشه تا اندازه‌ای می‌تواند نیاز آبی گیاه را تأمین نماید. توزیع شوری در این منطقه به‌علت پراکندگی[2] املاح ناشی از آب آبیاری و تراوش روبه بالای آب شور زیرزمینی می‌باشد (دی لئو و همکاران، ۲۰۱۳) (شکل ۱).



شکل ۱- مقطع (a) شمایی ازتشکیل عدسی[3] در منطقه با نفوذ آب آبیاری و یا باران و تراوش روبه بالای آب شور[4]. مقطع (b) شکل عدسی، ضخامت عدسی[5]، منطقه اختلاط[6]، کف منطقه اختلاط (B_{mix}) و موقعیت میانگین منطقه اختلاط (D_{mix}). (برگرفته از دی‌لئو وهمکاران، ۲۰۱۳)

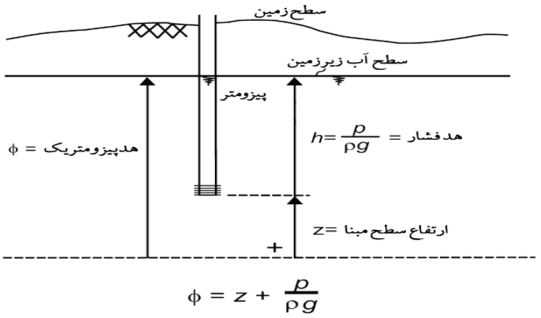
تئوری جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر[7]، اولین بار توسط (گای‌بن،۱۸۸۹ و هرزبرگ،۱۹۰۱) ارائه شد. در ادامه (هابرت،۱۹۴۰)، معادله ساده‌ای که رابطه عمق فصل مشترک آب شور و شیرین را با بار هیدرولیکی آب زیرزمینی در محیط اختلاط افقی نشان می‌دهد، بیان کرد. رابطه بین فشار و بار پیزومتری[8] (بار هیدرولیکی) در عمق ثابتی از سطح زمین با چگالی ثابت با توجه به شکل (۲) در شرایطی که فشار اتمسفر برابر صفر باشد با استفاده از اصل

[1] Transition zone
[2] Dispersion
[3] Lens
[4] Saline seepage
[5] RW lens
[6] Mixing zone
[7] Variable density ground water flow
[8] Pizometric head

دوم نیوتن یا اصل بقای انرژی (رابطه برنولی) هنگامی که سرعت جریان ناچیز باشد به‌صورت معادله (۱) آورده شده است (اوود اسینک، ۲۰۰۱a).

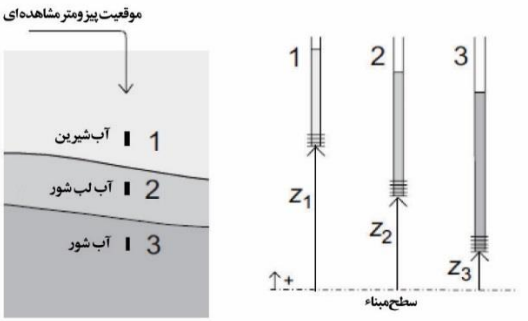
$$\phi = \frac{P}{\rho g} + Z \qquad (۱)$$

که؛ ϕ: بارپیزومتریک (متر)، ($\frac{P}{\rho g}$): بارفشار (متر) و Z: ارتفاع با درنظرگرفتن سطح مبنا (متر) می‌باشد.



شکل ۲ - نمایش بار پیزومتریک

اما در اراضی پست و جایی که اختلاف چگالی در آب زیرزمینی نسبت به عمق وجود دارد، در صورتی‌که هیچ جریان عمودی در خاک وجود نداشته باشد، سطح آب درون پیزومترها می‌توانند در یک تراز قرار نگیرند (شکل ۳). با در نظر گرفتن سطح مرجع به‌عنوان لایه محدود کننده و یا زهکش و برقراری جریان عمودی رو به بالا ممکن است بار هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی شور و لب شور به بار هیدرولیکی آب شیرین تبدیل شود. یعنی اگر بر طبق شکل (۳)، فرض شود که آب شیرین، لب شور و شور در زیرزمین در یک تعادل هیدرواستاتیکی باشند و کف پیزومتر مشاهداتی در منطقه آب شیرین قرار گیرد به‌نظر می‌رسد که بار هیدرولیکی در این پیزومتر با بار هیدرولیکی در پیزومتر مشاهداتی منطقه شور متفاوت است. درحالی‌که بار هیدرولیکی شامل مجموع ارتفاع کف پیزومتر نسبت به سطح مرجع و ارتفاع فشاری آب درون پیزومتر می‌باشد که ممکن است با در نظرگرفتن نسبت چگالی آب شیرین و آب شور ناشی از اختلاط قائم، هر دو پیزومتر برطبق معادله (۲) در یک تعادل هیدرواستاتیکی باشند (اوود اسینک، ۲۰۰۱a).



شکل ۳- بار هیدرولیکی درموقعیت یکسان، با اعماق متفاوت و چگالی‌های متفاوت

$$\phi_f = Z + h_f \Leftrightarrow \phi_f = Z + \frac{\rho}{\rho_f} h \qquad (۲)$$

که درمعادله (۲)، ϕ_f: بارهیدرولیکی آب شیرین (متر)، h_f: ارتفاع فشاری آب شیرین (متر)، h: ارتفاع فشاری آب شور (متر)، ρ_f: چگالی آب شیرین (کیلوگرم برمترمکعب)، ρ: چگالی آب شور (کیلوگرم برمترمکعب) و Z: ارتفاع با درنظرگرفتن سطح مبنا (متر) می‌باشد. همچنین با توجه به اختلاف چگالی آب درلایه‌های مختلف خاک می توان چگالی را به صورت تابعی از فشار، درجه‌حرارت مایع و غلظت املاح به شکل رابطه (۳) توصیف کرد (اوود اسینک، ۲۰۰۱b).

$$\rho = F(P,T,S) \qquad (۳)$$

در رابطه(۳): ρ چگالی (کیلوگرم برمترمکعب)، T: درجه حرارت (^{0}C)، P: فشار (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و S: شوری یا غلظت املاح (میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد. تأثیر فشار و درجه حرارت در اکثرسیستم‌های هیدرولوژی بر روی چگالی نسبت به تأثیر شوری ناچیز فرض می‌شود (حسنی زاده، ۱۹۹۷). به‌عبارتی چگالی آب های زیرزمینی اغلب با غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در ارتباط می‌باشد و در اکثر مواقع درجه حرارت و فشار ثابت فرض شده است (حسنی زاده، ۱۹۹۷). معادله‌های (۴) و (۵)، ارتباط چگالی، درجه حرارت، غلظت‌املاح،

شوری و فشار را بیان می‌کنند (سوری، ۱۹۹۸، حسنی زاده، ۱۹۹۷ و اوود اسینک، ۲۰۰۱b).

$$\rho_s(T) = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_\circ) \quad (۴)$$

$$\rho_s(c) = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial c}(c - c_\circ) \quad (۵)$$

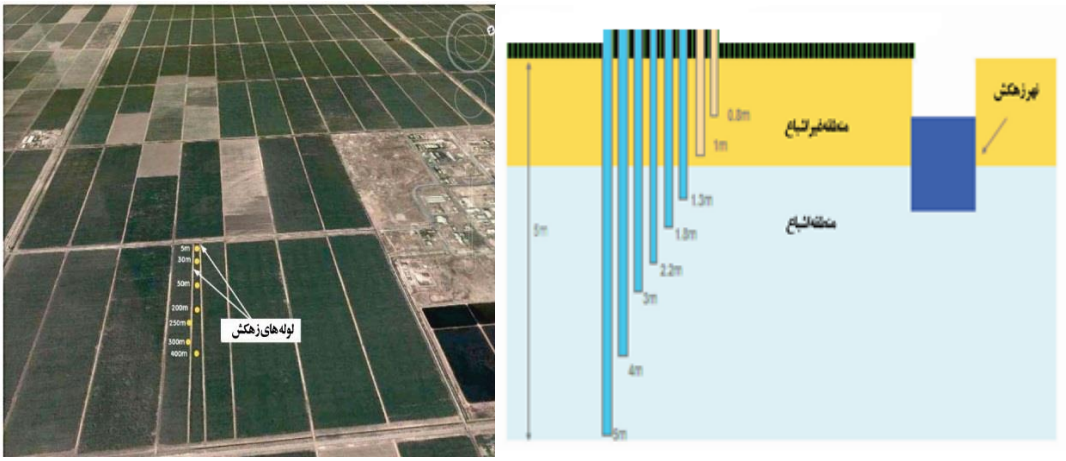
در روابط (۴) و (۵)، ρ_f: چگالی آب شیرین، $\frac{\partial \rho}{\partial T}$: مقدار ثابت که تغییرات چگالی به تغییرات درجه حرارت درمحدوده دمایی ۶۰-۲۰ درجه سانتی‌گراد را بیان می‌کند (کیلوگرم برمترمکعب دردرجه سانتی‌گراد)، T_0: درجه حرارت پایه مایع (۲۵ درجه سانتی‌گراد)، c: غلظت املاح (میلی‌گرم برلیتر)، c_0: غلظت پایه املاح (میلی‌گرم برلیتر) و $\frac{\partial \rho}{\partial c}$: مقدارثابتی از تغییرات چگالی به تغییرات غلظت املاح می‌باشد. باتوجه به معادله‌های (۴) و (۵) می‌توان بیان کرد که چگالی با غلظت املاح رابطه خطی داشته و تغییرات غلظت را مبنای تغییرات چگالی دانست. درسال‌های اخیر در زمینه اختلاط قائم آب شور و شیرین و تشکیل منطقه بینابین تحقیقات بسیاری انجام شده است. ماس (۲۰۰۷)، راه‌حل تحلیلی برای شکل منطقه بینابین حاصل ازعدسی آب شیرین ناشی از باران بر روی آب شور درمناطق غربی هلند که در اثرتغییر آب وهوا وحرکت رو به جلوی دریا به‌وجود آمده است، ارائه داد. ورمو و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی، دینامیک عدسی آب شیرین ناشی از باران در دو منطقه مختلف کشاورزی از کشور هلند را بررسی‌کردند. در این مطالعه با احداث دسته‌های پیزومتری بین دو آبگذر، تغییرات شوری نسبت به عمق را اندازه‌گیری کردند. آنها نشان دادند که این تغییرات درهرمحل نسبت به عمق، S شکل می‌باشد. دی‌لئو و همکاران (۲۰۱۱) در تعیین مشخصات و تغییرات مکانی عدسی‌های کم‌عمق آب باران در مناطق ساحلی هلند با اندازه‌گیری میدانی نشان دادند که این عدسی‌ها در عمق ۱/۷ متری از سطح زمین تشکیل شده‌اند. همچنین تغییرات شوری نسبت به عمق به‌صورت S شکل می‌باشد. آنها اختلاف بارهیدرولیکی و چگالی را عامل شکل‌گیری عدسی‌های آب باران دانستند و ضمن مشخص‌کردن ضخامت، خط میانگین و موقعیت کف منطقه بینابین نشان دادند که شار تراوش، عمق زهکشی و میزان تغذیه بر منطقه بینابین وعدسی تشکیل شده تأثیر دارد. همچنین دی‌لئو و همکاران (۲۰۱۳) با پژوهشی در قسمت جنوب غربی هلند نشان دادند که عدسی‌های آب باران و منطقه اختلاط در اثر تبخیر وتعرق و نفوذ آب باران به‌صورت روزانه در حال تغییر است و از حالت اشباع به غیراشباع و برعکس تبدیل می‌شوند. در دوره خشکی (تابستان)، ضخامت منطقه اختلاط کاسته شده وآب شور از پایین‌ترین لایه این منطقه در اثر خاصیت مویینگی وارد منطقه اختلاط شده و شوری افزایش یافته که باعث نفوذ به ناحیه ریشه می‌شود. آنها بیان کردند تخلیه سریع آب توسط زهکش‌ها در اثر جریان ترجیحی و تبخیر و تعرق بالا در دوره‌های خشکی باعث کوچک شدن عدسی‌های آب باران شده که با زهکشی کنترل شده می‌توان این عدسی‌ها را برای بهره‌برداری حفظ کرد. سارا ایمان و همکاران (۲۰۱۱) در تجزیه و تحلیل ضخامت منطقه اختلاط آب شور و شیرین در اراضی پست هلند مدل عددی سوترا و راه‌حل تحلیلی ماس (۲۰۰۷) را در دو حالت، اختلاف چگالی و عدم اختلاف چگالی در لایه‌های مختلف با هم مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که این دو راه‌حل وقتی به‌هم نزدیک‌اند که نسبت شار جرمی (نسبت تراوش آب شور بر تراوش آب باران) کوچک باشد. همچنین سارا ایمان و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تبادل کاتیونی منطقه اختلاط آب شور و شیرین نشان دادند که جریان افقی به‌سمت زهکش‌ها تاثیر بسیار ناچیزی بر روی تغییرات یون‌ها در مقایسه با جریان عمودی دارد. اوود اسینک و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی تغییرات عدسی‌های آب باران تشکیل شده بر روی آب شور زیرزمینی در جنوب غرب هلند با استفاده از اندازه‌گیری غلظت وتغییرات سطح آب در اعماق ۱، ۱/۳، ۱/۶، ۲، ۳ و ۴ متری نشان دادند که عمق

زهکش نقش مهمی در کنترل عدسی‌های آب شیرین داشته و نیمرخ تغییرات کلر نسبت به عمق توسط مدل ارائه شده با نتایج صحرایی تطابق خوبی داشته و عمق ناحیه اختلاط در دو متری از سطح زمین اتفاق افتاد. پاوو و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی بالا آمدن عدسی‌های آب باران با استفاده از تغذیه مصنوعی همراه با زهکشی کنترل شده در اراضی کشاورزی هلند با اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌مدت یک‌سال و شبیه‌سازی عددی نشان دادند که عدسی‌های آب شیرین در اعماق ۱۵-۱۳ متر در عرض ۱۰ سال به ۸-۶ متر افزایش یافت. آنها بیان کردند که افزایش حجم عدسی‌های آب شیرین پس از ۱۰ سال حدود ۱۹۰،۰۰۰ مترمکعب درمنطقه‌ای به طول ۱۰۰۰ متر با ضخامت ۴۰ متر می‌باشد. این مقدار ۴۰٪ از کل تغذیه (تغذیه طبیعی و مصنوعی) خواهد بود. پناهی (۱۳۸۹) به‌منظور بررسی عوامل مختلف بر روی شوری زه‌آب در مناطق تحت آبیاری با آب زیرزمینی کم عمق و شور، در دو مزرعه از اراضی تحقیقاتی نیشکر واحد امیرکبیر در جنوب استان خوزستان، نشان داد که شوری آب زیرزمینی با افزایش عمق خاک روند صعودی داشته و نزدیکی شوری زه‌آب به‌شوری آب زیرزمینی درعمق‌های ۳/۵ تا ۴/۵ متری تأثیرگذاری جریان آب زیرزمینی را در این عمق بر روی جریان آب به طرف لاترال‌های زهکشی نشان می‌دهد. محجوبی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی امکان استفاده از زهکشی کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی در استان خوزستان، سه تیمار شامل دو تیمار زهکشی کنترل شده با اعماق کنترل سطح ایستابی ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری و تیمار زهکشی آزاد با عمق کارگذاری متوسط دو متر را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که حجم و شوری زه‌آب خروجی در تیمارهای کنترل شده نسبت به تیمار آزاد کاهش یافته و سبب کاهش نمک خروجی در این تیمارها خواهد شد. شکیبا و همکاران (۱۳۹۲)، در تحقیقی به‌منظور تعیین عمق اختلاط و بررسی عوامل مؤثر بر آن به‌عنوان پارامتر موثر بر شوری زه‌آب خروجی، از مدل فیزیکی استفاده کردند. آنها با تزریق آب زیرزمینی با شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر به درون مدل و تغییر در دبی ورودی آب آبیاری از بالا و سطح ایستابی با عمق‌های مختلف، تأثیرعمق اختلاط برشوری زهاب خروجی اززهکش را نشان دادند. آنها بیان کردند که عمق اختلاط قائم به‌صورت نوعی تابع خطی از بار هیدرولیکی است و در هنگام آبیاری افزایش بار هیدرولیکی سبب افزایش عمق اختلاط قائم می‌شود. در تحقیق حاضر به مطالعه دینامیک سطح آب زیرزمینی و نوسانات منطقه اختلاط قائم آب شور زیرزمینی و نسبتا شیرین آبیاری به‌عنوان عواملی موثر بر شوری زه‌آب خروجی با هدف بهبود کیفی زه‌آب در اراضی مرکز و جنوب غرب خوزستان پرداخته شده است. در این پژوهش تنها به اختلاط قائم آب شور و شیرین در یک سفره آزاد کم عمق می‌پردازد و موضوعاتی همانند اختلاط افقی و اختلاط در اثر نیروی اسمزی را نادیده می‌گیرد. همچنین عواملی همچون فواصل آبیاری، عمق کارگذاری زهکش‌ها (به‌عنوان عامل موثر بر دبی خروجی زه‌آب)، نزدیک و دور بودن از لوله‌های فرعی زهکشی (لاترال‌ها)، بافت خاک، عمق لایه محدودکننده و عدسی‌های ماسه‌ای بر موقعیت، ضخامت و عمق منطقه اختلاط مورد تحلیل قرار گرفت و تاثیر آن بر دبی و شوری زه‌آب خروجی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو مزرعه R9-11 و *R8-7* که به‌ترتیب در واحدهای کشت وصنعت نیشکر دعبل خزاعی و سلمان فارسی می‌باشند، انجام گردید. این دو واحد کشت و صنعت در شرق رودخانه کارون و به‌ترتیب در فواصل ۳۰ و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان اهواز مرکز استان خوزستان قرار دارند. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک تا نیمه‌خشک با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل است. منبع

تامین آب آبیاری، رودخانه کارون است. اراضی هر دو این واحدها، قطعات ۲۵ هکتاری است به‌طوری‌که طول مزارع ۱۰۰۰ متر و عرض آن‌ها ۲۵۰ متر است. در هر دو مزرعه تحقیقاتی، زهکش‌جمع‌کننده زه‌آب در دو طرف مزارع قرار داشته و لوله‌های (لاترال‌های) زهکشی به‌طول ۵۰۰ متری به‌صورت قرینه نسبت به‌هم قرار می‌گیرند. در مزرعه *R9-11* زهکش‌های جمع‌کننده زه‌آب به‌صورت لوله بوده و عمق نصب لوله‌های زهکش از ۱/۸ متری سطح زمین در ابتدا تا ۲/۲ متری در انتها متغیر است. این در حالی است که فاصله زهکش‌ها در این مزرعه ۶۵ متر بود. امّا در مزرعه *R8-7*، زهکش‌های جمع‌کننده زه‌آب در دو طرف مزرعه به‌صورت نهر روباز بوده و عمق نصب لوله‌های زهکش از ۱/۲ متری سطح زمین تا ۱/۶ متری در انتهای مزرعه متغیر بود و فاصله زهکش‌ها در این مزرعه ۴۲ متر است. در این تحقیق، ابتدا مطالعات لایه‌بندی خاک در پنج نقطه از هر دو مزرعه (دو نقطه درمزرعه *R9-11* و سه نقطه در مزرعه *R8-7*) برای تشریح لایه‌های خاک از نظر بافت خاک، موقعیت لایه محدودکننده و تخلخل خاک انجام شد (بی‌نام، ۱۳۷۵). سپس برای هر مزرعه هفت دسته پیزومتر احداث گردید. جهت نصب پیزومترها از لوله غیرمشبک فلزی به قطر ۳/۴ اینچ استفاده شد. برای سهولت رانش لوله به‌داخل زمین و جلوگیری از ورود خاک به داخل آن، ابتدای لوله مخروطک ویا ساچمه‌ای قرار داده و عمل ضربه زنی به وسیله چکش تا رسیدن لوله به عمق مورد نظر انجام شد (بی‌نام، ۱۳۷۵). هر دسته شامل هشت لوله پیزومتری بود که دراعماق ۰/۸، ۱، ۱/۳، ۱/۸، ۲/۲، ۳، ۴ و ۵ متری نسبت به سطح زمین بین دو لوله زهکش درطول نصف مزرعه (۵۰۰ متری) در فاصله‌های مشخص از جمع‌کننده زه‌آب، نصب شدند. دسته اول در فاصله ۵ متری، دسته‌های دوم تا هفتم به‌ترتیب درفاصله‌های ۳۰، ۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ متری، از جمع‌کننده زه‌آب قرارگرفتند (شکل۴). لازم به‌ذکر است که در مزرعه *R9-11* دعبل خزاعی پیزومترهای دسته‌های پنجم و ششم و در مزرعه *R8-7* سلمان فارسی دسته‌های چهارم و ششم کنار لوله‌های زهکش در فاصله ۱/۵ تا ۲ متری از آنها نصب شدند. این مساله برای بررسی پایش غلظت املاح و بارهیدرولیکی در نزدیکی لاترال‌های زهکشی به دلیل ایجاد جریان شعاعی دراطراف زهکش‌ها بود.



شکل ۴- نمایی شماتیک از کارگذاری لوله‌های پیزومتری (سمت راست) نسبت به سطح خاک (هاشور سبز رنگ) و عکس هوایی کارگذاری لوله‌های پیزومتری بین دو لوله زهکش (سمت چپ)

این تحقیق برای کشت پلنت و در سه دوره آبیاری سنگین کشت نیشکر از فروردین تا مهرماه سال‌های ۱۳۹۳،۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ انجام شد. در خوزستان مدت زمان آبیاری نیشکر برای اولین سال کشت (پلنت) ۱۴-۱۳ ماه و

برای بازروئی (راتون) ۹-۸ ماه است. در هر دور آبیاری بسته به کیفیت آب کارون در آن سال و نیاز آبشویی، میزان حجم آب مصرفی متغیر است. این میزان بین ۱۵۰۰-۱۱۰۰ مترمکعب آب به ازای هر هکتار بود و در نتیجه حجم آب مصرفی در طول سال به طور متوسط تا ۳۲۵۰۰ مترمکعب در هر هکتار خواهد رسید. ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور دوره زمانی حداکثر مصرف آب می‌باشد. گیاه نیشکر از اوایل آبان همزمان با پایان عملیات آبیاری، برداشت خواهد شد. در طول دوره پژوهش برای هر دو مزرعه به‌صورت روزانه دبی و شوری زه‌آب خروجی از لوله‌های (لاترال‌های) فرعی اندازه‌گیری شد. همچنین تراز سطح آب درون لوله‌های پیزومتری در لایه‌های مختلف خاک برای تعیین بار هیدرولیکی، برداشت شد. در این پژوهش برای تعیین غلظت املاح، نمونه‌های آب آبیاری و آب زیرزمینی از لوله های پیزومتری بعد از دو بار تخلیه آب درون پیزومترها در زمان‌های پس از آبیاری، حد واسط دو آبیاری و یک روز قبل از آبیاری بعدی برای لایه‌های مختلف خاک تهیه شد. در آزمایشگاه، هدایت الکتریکی[10] نمونه‌های آب اندازه‌گیری شد. همچنین ۴۰ نمونه از نمونه‌های اندازه گیری شده در هر دو مزرعه انتخاب شد و با اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون‌ها، غلظت املاح برای این نمونه‌ها به‌دست آمد. سپس ضریب تبدیل هدایت الکتریکی به غلظت املاح در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد (R_2= ۰/۹۹) معادل ۰/۴۹ برآورد شد و طبق رابطه (۶) از این ضریب برای بیان غلظت املاح برحسب میلی‌گرم بر لیتر استفاده شد:

$$TDS_{(mg/lit)} = 0.49 \times EC(\mu s/m) \qquad (۶)$$

نتایج و بحث

مطالعات لایه‌بندی خاک درمزرعه R9-11 (دعبل‌خزاعی) درحد واسط دسته‌های دوم وسوم و کنار دسته هفتم انجام شد (جدول ۱). در هر دو نقطه مذکور، نتایج نیمرخ خاک یکسان بود. به این ترتیب تا عمق ۱/۵ متری از سطح خاک، متوسط جرم مخصوص ظاهری خاک و درصد تخلخل خاک به‌ترتیب ۱/۴۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب و ۴۷/۱ درصد بود. لایه‌بندی خاک تا عمق پنج متری انجام شد که خاک درهردو نقطه به‌جز لایه ۵-۴/۵ متر که بافت متو سطی دا شت، نیمه‌سنگین تا سنگین تشخیص داده شد. عمق برخورد به لایه محدود کننده (بافت خاک بسیار سنگین با ضریب آبگذری ۰/۴ متر بر روز) برای هر دو نقطه در ۴/۲ متری نسبت به سطح زمین بود که ضخامت آن ۳۰ سانتی‌متر تشخیص داده شد (۴/۵- ۴/۲). نتایج لایه‌بندی خاک در مزرعه *R8-7* در سه نقطه شامل حد واسط دسته دوم و سوم، کنار دسته پنجم و حد واسط د سته ش شم و هفتم انجام شد. نتایج در دو نقطه اول یکسان بود. جرم مخصوص ظاهری خاک در این دو نقطه به‌طور متوسط ۱/۴۵ گرم برسانتی‌متر مکعب و درصد تخلخل خاک ۴۷ درصد برآورد شد. بافت خاک تا لایه ۵/۵ متری از سطح زمین نیمه سنگین و عمق برخورد به لایه محدود کننده در سه متری از سطح زمین و به ضخامت ۱/۵ متر ت شخیص داده شد. فقط در نقطه دوم یعنی کنار د سته پنجم از عمق ۴/۹ متری به بعد (تا لایه ۵/۵ متری‌که حفاری شد) بافت خاک شنی و سبک بود این در حالی ا ست که در نقطه اول این لایه، بافت خاک لومی سیلتی ت شخیص داده شد. لایه بندی سوم در مزرعه R8-7 به‌طور کامل متفاوت بود. برطبق این لایه‌بندی، بافت خاک ازعمق ۰/۸ تا ۲ متری و همچنین از عمق سه متری به بعد، سبک (شنی) ت شخیص داده شد. همچنین در اکثر لایه‌های این محدوده (نقطه سوم مزرعه R8-7 سلمان فارسی)، عدسی‌های ماسه‌ای وجود داشت.

[10] Electrical Conductivity

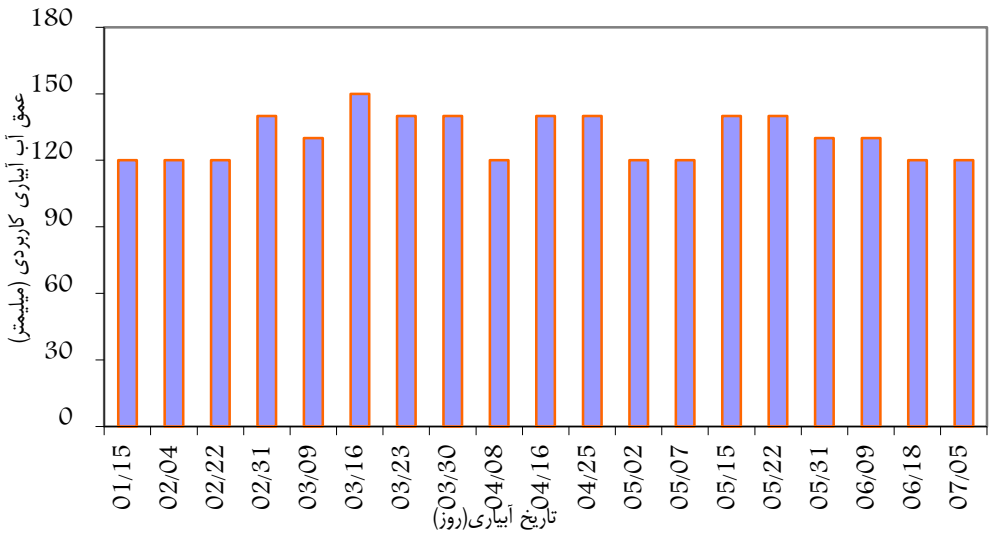
جدول ۱- لایه بندی خاک در مزارع تحقیقاتی

نقاط اول و دوم (مزرعه دعبل)			*نقطه اول (مزرعه سلمان)*			*نقطه دوم (مزرعه سلمان)*			*نقطه سوم (مزرعه سلمان)*		
ضخامت لایه (cm)	بافت		ضخامت لایه (cm)	بافت		ضخامت لایه (cm)	بافت		ضخامت لایه (cm)	بافت	
	علامت	نام		علامت	نام		علامت	نام		علامت	نام
۰-۴۰		لومی رسی سیلتی	۰-۴۰		لومی رسی سیلتی	۰-۴۰		لومی رسی سیلتی	۰-۴۰		لومی رسی سیلتی
۸۰-۴۰		لوم رسی	۴۰-۱۰۰		لوم رسی	۴۰-۱۰۰		لوم رسی	۴۰-۸۰		لومی رسی سیلتی
۸۰-۱۰۰		رسی سیلتی	۱۰۰-۱۵۰		لومی رسی سیلتی	۱۰۰-۱۵۰		لومی رسی سیلتی	۸۰-۱۰۰		لومی شنی
۱۰۰-۱۴۰		لوم رسی	۱۵۰-۲۴۰		لومی رسی سیلتی	۱۵۰-۲۴۰		لومی رسی سیلتی	۱۰۰-۲۰۰		شن
۱۴۰- ۲۵۰		رسی سیلتی	۲۴۰-۳۰۰		لومی رسی سیلتی	۲۴۰-۳۰۰		لومی رسی سیلتی	۲۰۰-۲۴۰		لومی رسی سیلتی
۲۵۰-۳۲۰		رس	۳۰۰-۴۵۰		رس	۳۰۰-۴۵۰		رس	۲۴۰-۳۰۰		رسی سیلتی
۳۲۰-۴۲۰		لومی رسی سیلتی	۴۵۰-۴۹۰		لومی رسی سیلتی	۴۵۰-۴۹۰		لومی رسی سیلتی	۳۰۰-۴۰۰		شن
۴۲۰-۴۵۰		رس	۴۹۰-۵۱۰		لومی سیلتی	۴۹۰-۵۱۰		شن	-	-	-
۴۵۰-۵۰۰		لوم	-	-	-	-	-	-	-	-	-

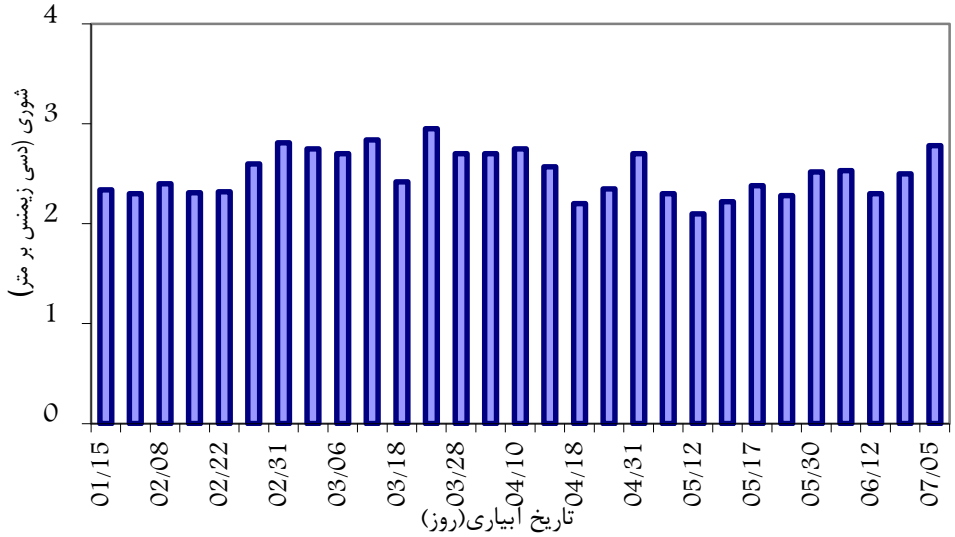
در پیش از شروع تحقیق (زمستان ۱۳۹۱ و قبل از شروع عملیات آبیاری سنگین در بهار ۱۳۹۲) برای هر دو مزرعه کنار دسته دوم، شوری عصاره‌اشباع خاک تا عمق دو متری از سطح زمین اندازه‌گیری شد (جدول ۲). متوسط میزان آب آبیاری در سال‌های ۱۳۹۳،۱۳۹۲ و ۱۳۹۶ و همچنین میانگین شوری آب آبیاری در این سال‌ها برای هر دور آبیاری در شکل‌های (۵) و (۶) آورده شده است. حداکثر میزان آب آبیاری ۱۵۰۰ مترمکعب در هرهکتار (۱۵۰ میلی‌متر) و در خرداد ماه بود. حداقل آن در فروردین و مهر ماه به میزان ۱۲۰۰ مترمکعب در هر هکتار اندازه‌گیری شد. متوسط شوری آب آبیاری رودخانه کارون به‌عنوان منبع تامین آب ۲/۵ دسی‌زیمنس برمتر بود به‌طوری که حداکثر شوری در خردادماه به‌میزان متوسط ۲/۹۵ دسی‌زیمنس بر متر و حداقل آن در مردادماه با ۲/۱ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- میزان شوری عصاره اشباع خاک (dS/m) در لایه‌های مختلف از سطح زمین

ضخامت لایه (cm)	شوری عصاره اشباع خاک مزرعه (R9-11)	شوری عصاره اشباع خاک (مزرعه R8-7)
۰-۵۰	۵/۱۹	۵/۹۴
۵۰-۱۰۰	۴/۸۳	۴/۹۶
۱۰۰-۱۵۰	۴/۰۵	۳/۳
۱۵۰-۲۰۰	۳/۸۱	۳/۱

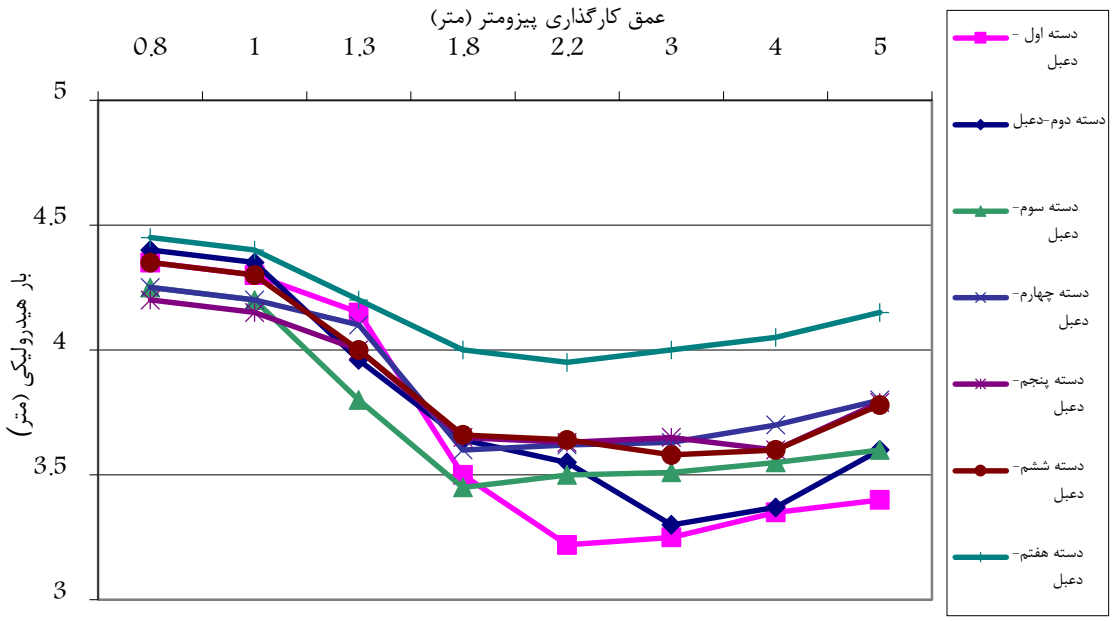


شکل ۵- عمق آب آبیاری کاربردی در آبیاری‌های انجام شده در طول اجرای تحقیق

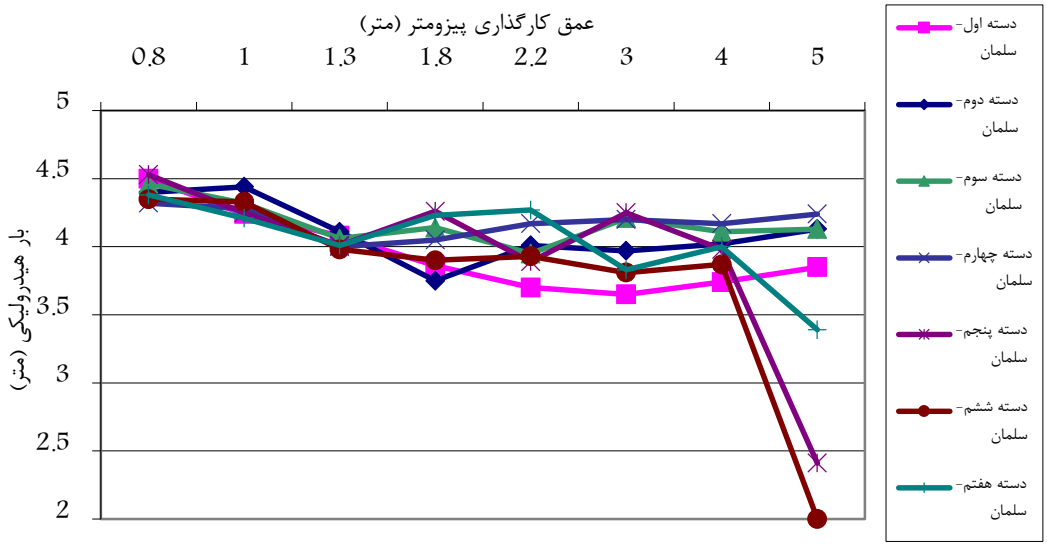


شکل ۶- شوری آب آبیاری در آبیاری‌های انجام شده در طول اجرای تحقیق

در این تحقیق نوسانات تراز سطح آب در لایه‌های مختلف از سطح زمین در طول مزارع با توجه به شیب کارگذاری لوله‌های زهکش، تفاوت در عمق کارگذاری، نزدیک بودن به زهکش ها و فاصله از جمع‌کننده زه‌آب مورد بررسی قرارگرفت. برای هر دو مزرعه با کاهش فواصل آبیاری و شروع آبیاری سنگین، صعود آب در تمامی پیزومترها (به‌جز پیزومتر کارگذاری شده در عمق ۸۰ سانتی‌متر در مزرعه *R9*-11 دعبل خزاعی که در طول دوره اجرایی، قابلیت اندازه‌گیری وجود نداشت) مشاهده شد. در هر دو مزرعه برای تمامی د سته‌ها هنگام آبیاری، افزایش تراز سطح آب و در فا صله بین آبیاری‌ها روند کاهش تراز آب برقرار بود. در شکل‌های (۷ و ۸)، با در نظرگرفتن کف لایه محدود کننده به‌عنوان سطح مبنا، میانگین تغییرات بار هیدرولیکی در پیزومترهای هر دسته با توجه به عمق کارگذاری نشان داده شده است.



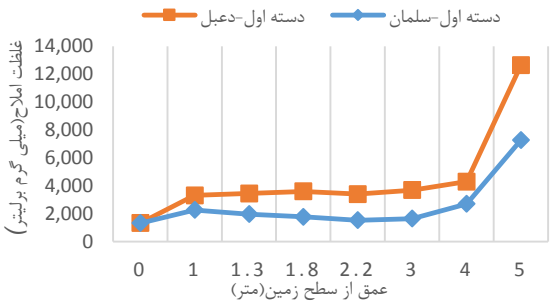
شکل ۷- میانگین بار هیدرولیکی دسته‌های پیزومتری در اعماق مختلف از سطح خاک در طول تحقیق- مزرعه R9-11



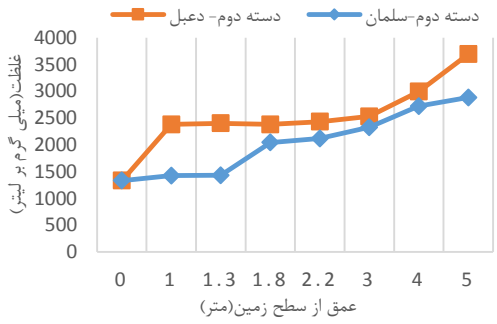
شکل ۸- میانگین بارهیدرولیکی دسته‌های پیزومتری دراعماق مختلف از سطح خاک در طول تحقیق-مزرعه R8-7

در مزرعه R9-11 دعبل خزاعی (شکل ۷)، اختلاف بارهیدرولیکی به میزان ۷۳ سانتی‌متر بین لایه‌های دسته هفتم (فاصله ۴۰۰ متری از جمع‌کننده با عمق زهکشی ۱/۸ متر) نسبت به دسته اول (کنار جمع‌کننده با عمق زهکشی ۲/۲ متر)، باعث حرکت جریان طولی به‌سمت جمع کننده زه‌آب شد. مهم اینکه در د سته های اول و دوم (با فا صله‌های ۵ و ۳۰ متری از جمع کننده) اختلاف بار هیدرولیکی به‌میزان ۲۰ سانتی‌متر بین پیزومترهای کارگذاری شده در عمق ۲/۲ متری به پایین نسبت به پیزومترهای بالایی برقرار بود. همچنین در دسته‌های سوم، چهارم، پنجم و ششم که از ۵۰ تا ۳۰۰ متر نسبت به جمع کننده فاصله داشتند، اختلاف بار هیدرولیکی به میزان ۲۰ سانتی‌متر تا عمق ۱/۸ متری و برای د سته هفتم که در بالاد ست مزرعه قرار داشت به میزان ۱۰ سانتی‌متر و تا عمق ۱/۳ متری از سطح زمین بود. اختلاف بار هیدرولیکی باعث جریان عمودی و هجوم آب شور از لایه‌های پایین (حتی تا زیر لایه محدود کننده) به‌سمت لایه‌های

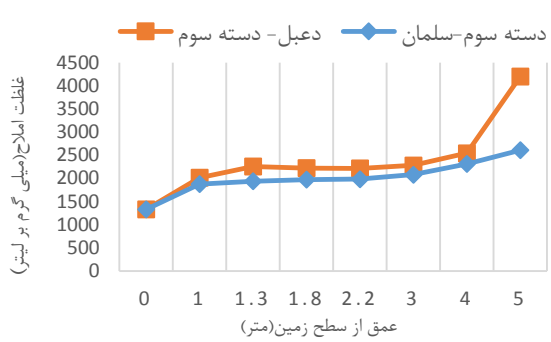
بالا شد. این مساله باعث ایجاد عمق اختلاط در طی عملیات آبیاری سنگین شده و منطقه‌ای بینابین آب شور و شیرین را به‌وجود آورد. لایه محدود کننده به معنی لایه نفوذ ناپذیر نیست که جریان آب نتواند ازآن لایه به سمت بالا و یا پایین حرکت کند بلکه لایه‌ای است که هدایت هیدرولیکی آن نسبت به لایه‌های بالایی کم بوده و این موضوع نسبی است. دی‌لئو و همکاران (۲۰۱۱) در مناطق ساحلی هلند نشان دادند که عامل تشکیل عدسی‌های آب باران و منطقه بینابین این عدسی‌ها و آب شور زیرزمینی، اختلاف بار هیدرولیکی می باشد. همچنین نوذری(۱۳۸۸) نشان داد که با افزایش بارهیدرولیکی ناشی از افزایش عملیات آبیاری، عمق اختلاط افزایش یافته در نتیجه آب به سمت لایه‌های زیرین زهکش که دارای شوری بیشتری نسبت به لایه‌های رویی هستند، جریان پیدا کرده و باعث افزایش شوری زه‌آب خروجی از زهکش می شود. در مزرعه *R8-7* سلمان فارسی به دلیل کم عمق بودن لوله‌های زهکش (متوسط عمق زهکشی ۱/۴ متردر طول ۵۰۰ متر)، بالا آمدگی تراز سطح آب درتمامی دسته‌ها نسبت به مزرعه *R9-11* نامحسوس بود (شکل ۸). دراین مزرعه اختلاف بارهیدرولیکی بین پیزومترها کمتر بود به‌طوری‌که در دسته های اول، دوم و سوم (با فاصله‌های ۵،۳۰ و ۵۰ متری از جمع کننده) اختلاف بار هیدرولیکی به‌میزان ۱۰ سانتی‌متر بین پیزومترهای کارگذاری شده در عمق ۲/۲ متری به پایین نسبت به پیزومترهای بالایی بود و درد سته های پیزومتری چهارم تا هفتم اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه های پایین نسبت به لایه‌های بالایی بسیار کم بود. درنتیجه جریان روبه بالای آب شور نا شی از اختلاف بار هیدرولیکی کمتر اتفاق افتاد. به همین دلیل می‌توان گفت یکی از راه‌های کاهش شوری زه‌آب‌ها، کم کردن عمق زهکش‌ها است. قابل توجه این‌که در مزرعه-R8 7، دردسته‌های پنجم، ششم وهفتم از عمق چهار متری به پایین اختلاف بار هیدرولیکی نتوانست جریان عمودی رو به بالا را برقرار سازد. این مهم به‌دلیل قرارگیری عدسی‌های ماسه‌ای در زیر لایه محدودکننده بود. با اندازه‌گیری شوری آب زیرزمینی در لایه های مختلف از سطح زمین تا عمق پنج متری، تغییرات غلظت املاح نسبت به عمق برای هر دسته در هر دو مزرعه تحقیقاتی در شکل (۹) آورده شده است. نقطه اول در هر شکل (عمق صفر) متوسط شوری آب آبیاری در طول دوره تحقیق بوده که بر طبق رابطه (۶) معادل ۱۳۳۲/۸ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.



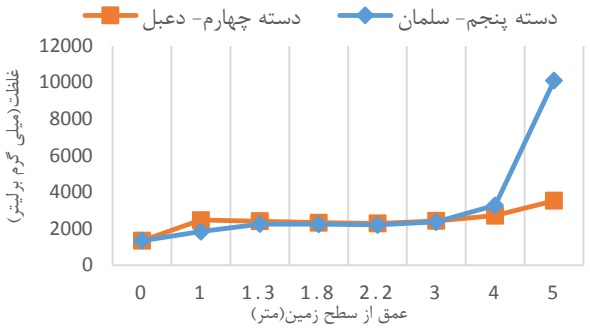
(a)



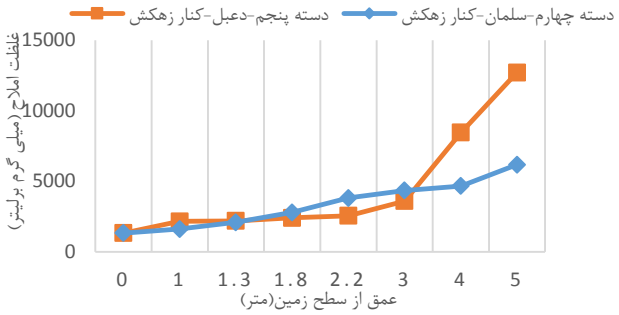
(b)



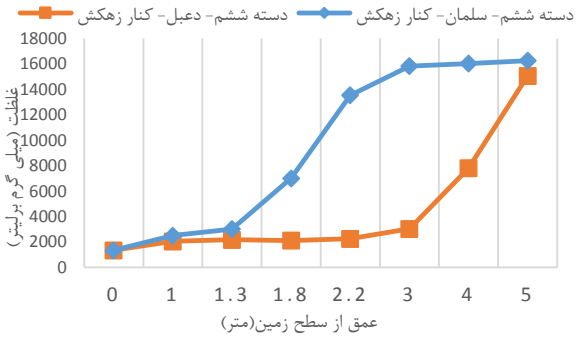
(d)



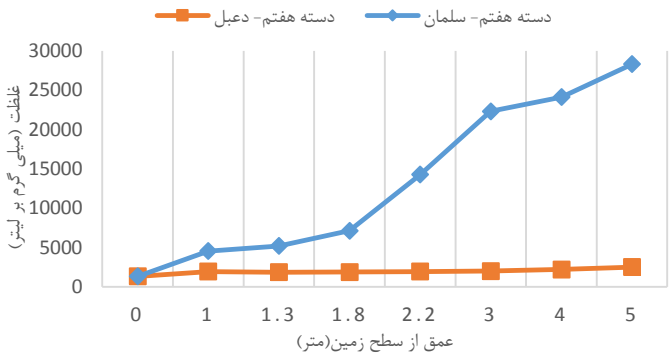
(c)



(f)



(e)



(g)

شکل ۹- میانگین غلظت دسته‌های پیزومتری در عمق‌های مختلف از سطح خاک در دو مزرعه تحقیقاتی

با توجه به شکل (۹) میزان شوری در هر دو مزرعه برای تمامی دسته‌های پیزومتری با افزایش عمق از سطح زمین، افزایش داشت. این مهم به‌دلیل تجمع املاح ناشی از آب آبیاری تا نزدیکی لاترال‌های زهکشی و هجوم عمودی آب شور زیرزمینی از لایه‌های پایینی در زیر عمق کارگذاری زهکش‌ها بود. میزان شوری با کاهش عمق نصب زهکش‌ها در مزرعه *R8-7* سلمان فارسی نسبت به مزرعه R9-11 دعبل خزاعی کاهش می‌یافت. کاهش شوری بین ۱۰ تا ۴۰ درصد با توجه به موقعیت دسته‌های پیزومتری و فاصله آنها از جمع‌کننده زه‌آب متغیر بود. همچنین در لایه های پایین (عمق های چهار و پنج متری)، اطراف و زیر لایه محدودکننده، میزان کاهش شوری مشهودتر بود. این کاهش شوری در تمامی دسته‌ها بجز دسته‌های ششم و هفتم مزرعه سلمان فارسی نسبت به مزرعه دعبل خزاعی رخ داد. علت افزایش بسیار زیاد شوری در دسته‌های هفتم و ششم از مزرعه *R8-7* با توجه

به کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها، وضعیت لایه‌بندی خاک و وجود عدسی‌های ماسه‌ای بود (بخش‌های g&f از شکل ۹). عدسی‌های ماسه‌ای در این دو دسته از مزرعه R8-7 باعث شد تا اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه‌های پایین نسبت به لایه‌های سطحی برقرار نشده و منطقه اختلاط آب شور و شیرین در ضخامتی بسیار کم به‌وجود آید (جدول ۴) و در نتیجه آبیاری با آب نسبتا شیرین نتواند برکاهش شوری اثری داشته باشد. این درحالی است که وجود لایه محدودکننده در بقیه دسته های مزرعه *R8-7* درعمق ۴-۳ متری و برای تمامی دسته‌های پیزومتری مزرعه *R9-11* در عمق ۴/۲ متری باعث شد با برقراری اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه های پایین نسبت به لایه‌های فوقانی و اختلاف چگالی ناشی از اختلاف غلظت بین آب شور زیر زمینی و آب شیرین آبیاری، توزیع شوری بین لایه‌های سطحی (عمق ۱ تا ۱/۳ متری از سطح زمین) تا لایه محدودکننده (عمق ۴-۳ متری از سطح زمین) ناشی از پراکندگی املاح ایجاد شود و منطقه بینابین آب شور و شیرین را ایجاد کرد (جدول‌های ۳ و ۴). در هر دو مزرعه تحقیقاتی میزان شوری در عمق‌های مساوی برای دسته هایی که کنار زهکش جمع کننده زه‌آب و لوله‌های زهکش نصب شده بودند، نسبت به دسته‌های دیگر بیشتر بود. این افزایش شوری در نزدیکی عمق کارگذاری زهکش‌ها و زیرعمق کارگذاری بسیار محسوس بود به‌طوری‌که برای مزرعه R9-11 دعبل خزاعی درعمق دو متری این افزایش شوری ۵۰ درصد نسبت به دسته های دیگر و در عمق های سه متری و بخصوص چهار و پنج متری بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصد افزایش داشت. این مسئله به‌دلیل اثر جریان شعاعی و نزدیک شدن خطوط جریان به‌طرف لوله های زهکش و در نتیجه کم‌شدن ضخامت منطقه اختلاط بود. همچنین بخش‌های (a) تا (e) از شکل (۹) که پنج دسته اول هر دو مزرعه را با هم مقایسه می‌کند، نشان می‌دهند که تفاوت شوری در دسته اول از هر دو مزرعه مشهودتر است. شاید بتوان این مهم را علاوه بر تاثیر عمق نصب زهکش ها در این مقطع (مزرعه R9-11 دعبل خزاعی با عمق زهکشی ۲/۲ متر و مزرعه *R8-7* سلمان فارسی با عمق زهکشی ۱/۶ متر)، به‌دلیل تفاوت در جمع‌کننده زه‌آب بین مزارع دانست. در مزرعه R9-11 جمع کننده به‌صورت لوله بوده و بالا آمدگی وگرفتگی در بعضی زمان‌ها، شوری را به‌شدت افزایش داد. این مسأله در مزرعه R8-7 که جمع‌کننده به‌صورت نهر روباز بود، مشاهده نشد. همچنین با دقت در شکل (۹) مشخص شد تغییرات شوری نسبت به عمق در هر دو مزرعه به‌دلیل ایجاد منطقه اختلاط آب شور و شیرین، شکلی *S* مانند به‌خود گرفت. در تحقیقاتی که توسط ورمو و همکاران (۲۰۱۰)، دی لئو و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۱) و ایمان و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، تغییرات غلظت املاح نسبت به عمق را بصورت *S* شکل بیان کردند. با توجه به شکل (۹) می‌توان مشخصات منطقه اختلاط شامل موقعیت و شوری نقطه فوقانی، شوری خط میانگین، موقعیت و شوری کف و در نهایت ضخامت منطقه اختلاط را در دسته های مختلف مزرعه های تحقیقاتی به‌صورت جدول‌های (۳) و (۴) نشان داد.

جدول ۳- موقعیت و شوری نقطه فوقانی، خط میانگین، نقطه کف و ضخامت منطقه بینابین در مزرعه R9-11

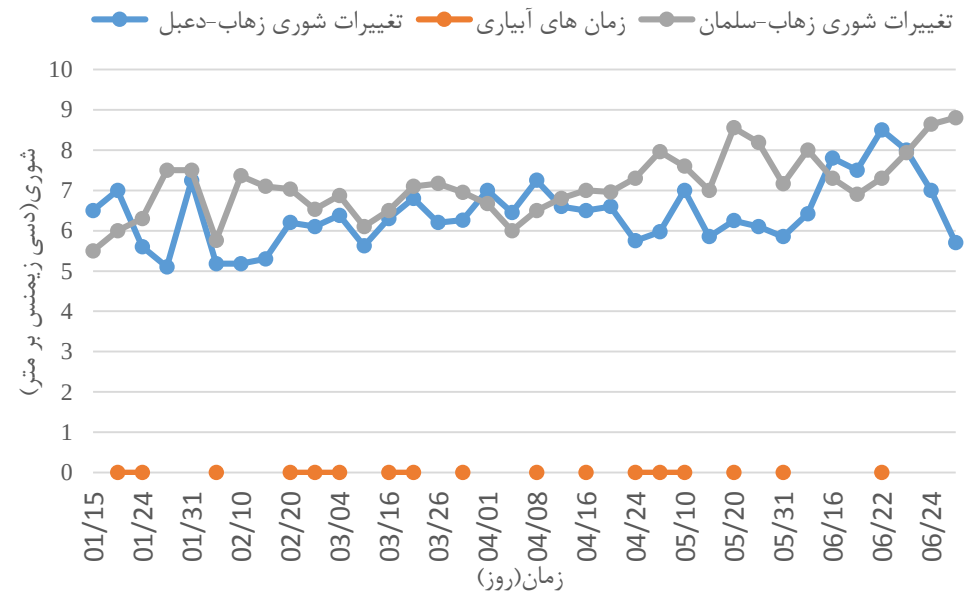
نام دسته	موقعیت نقطه فوقانی بر حسب عمق از سطح زمین (متر)	شوری نقطه فوقانی (میلی‌گرم بر لیتر)	شوری خط میانگین (میلی‌گرم بر لیتر)	موقعیت کف منطقه بر حسب عمق از سطح زمین (متر)	شوری کف منطقه (میلی‌گرم بر لیتر)	ضخامت منطقه (متر)
اول	۱	۳۳۰۷/۵	۳۶۲۶	۴	۴۳۰۲/۲	۳
دوم	۱	۲۳۸۱/۴	۲۵۱۹/۴۲	۴	۲۹۹۳/۹	۳
سوم	۱	۲۰۱۳/۹	۲۲۵۶/۴۵	۴	۲۵۴۳/۱	۳
چهارم	۱	۲۴۶۴/۷	۲۴۳۵/۳۰	۴	۲۷۱۴/۶	۳
پنجم (کنار زهکش)	۱	۲۱۶۰/۹	۲۵۸۷/۲	۳	۳۶۰۱/۵	۲
ششم (کنار زهکش)	۱	۲۰۳۳/۵	۲۳۱۲/۸	۳	۳۰۱۸/۴	۲
هفتم	۱	۱۹۴۵/۳	۲۰۴۹/۶	۵	۲۵۰۸/۸	۴

جدول ۴- موقعیت و شوری نقطه فوقانی، خط میانگین، نقطه کف و ضخامت منطقه بینابین در مزرعه *R8-7*

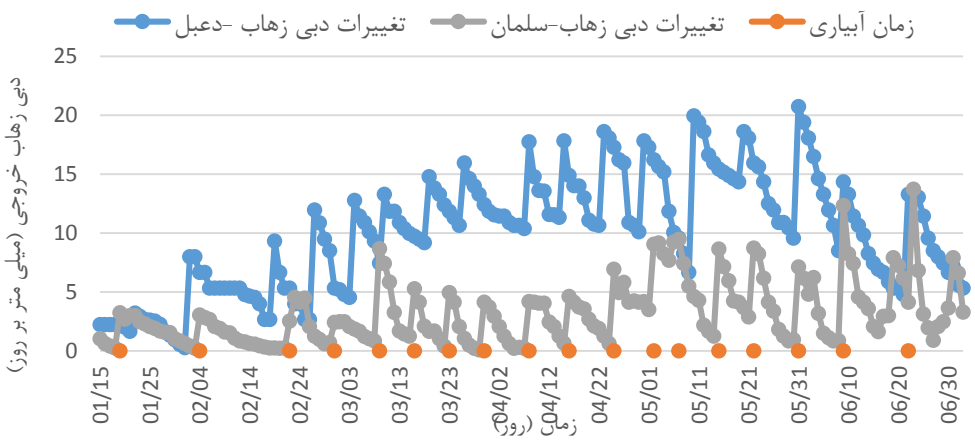
نام دسته	موقعیت نقطه فوقانی بر حسب عمق از سطح زمین (متر)	شوری نقطه فوقانی (میلی‌گرم بر لیتر)	شوری خط میانگین (میلی‌گرم بر لیتر)	موقعیت کف منطقه بر حسب عمق از سطح زمین (متر)	شوری کف منطقه (میلی‌گرم بر لیتر)	ضخامت منطقه (متر)
اول	۱	۲۲۶۸/۷	۱۹۸۴/۵	۴	۲۷۰۹/۷	۳
دوم	۱	۱۴۲۵	۲۱۳۴/۷۶	۵	۲۸۸۱/۲	۴
سوم	۱	۱۸۷۶/۷	۲۱۱۱/۹	۵	۲۶۱۱/۷	۴
چهارم (کنار زهکش)	۱	۱۶۲۱/۹	۲۹۳۸/۰۴	۳	۴۳۵۶/۱	۲
پنجم	۱	۱۸۳۷/۵	۲۳۵۷/۷۲	۴	۳۲۶۸/۳	۳
ششم (کنار زهکش)	۱	۲۴۹۴/۱	۴۱۶۶/۶۳	۱/۸	۶۹۹۲/۳	۰/۸
هفتم	۱	۴۵۵۷	۵۶۲۶/۸۳	۱/۸	۷۱۲۹/۵	۰/۸

نقطه فوقانی منطقه بینابین آب شور زیرزمینی و آب شیرین آبیاری، نقطه ای است که شوری آن از شوری آب آبیاری کمی بیشتر بوده و دقیقا نقطه شروع افزایش شوری درخاک است. نقطه کف این منطقه که به‌طور معمول در زیرعمق زهکش‌ها قرار داشته، نقطه‌ای است که شوری آن به شوری آب زیرزمینی بسیار نزدیک است و پایین‌تر از این نقطه، میزان شوری به شدت افزایش می یابد. آنچه با توجه به شکل (۹) و جدول‌های مستخرج شده آن (۳ و ۴) می‌توان بیان کرد این است که منطقه اختلاط به‌صورت یک خط نازک نبوده بلکه دارای ضخامت است. همچنین با کاهش عمق کارگذاری زهکش ها، ضخامت منطقه اختلاط به اندازه یک متر افزایش و میانگین شوری در این منطقه تا هشت درصد کاهش یافت. کم شدن ضخامت منطقه اختلاط تا یک متر همراه با افزایش میانگین شوری بین ۱۰۰-۴۰ درصد در دسته‌هایی که کنار لولهٔ زهکش یا جمع کننده لوله ای (مزرعه *R9-11*) نصب شده‌اند در مقایسه با بقیه دسته‌های پیزومتری (بجز دسته هفتم از مزرعه *R8-7* به‌علت وجود عدسی‌های ماسه‌ای) را نیز می‌توان مشاهده کرد. تأثیر لایه‌بندی خاک، عمق لایه محدودکننده و وجود عدسی‌های ماسه‌ای در مشخصات این منطقه باید در نظرگرفت. به‌طوری‌که در مزرعه R9-11 دعبل خزاعی که وضعیت لایه بندی خاک یکسان است با فاصله گرفتن از جمع کننده زه‌آب و کاهش عمق کارگذاری، ضخامت منطقه اختلاط افزایش یافت (البته بجز دسته‌های پنجم و ششم به‌دلیل همجوار بودن با لوله‌های زهکشی). این مهم در دسته هفتم این مزرعه که در فاصله ۴۰۰ متری از جمع کننده لوله‌ای با عمق نصب ۱/۸ متر از سطح زمین قرار دارد با ضخامت منطقه بینابین چهار متر و شوری میانگین ۲۰۴۹/۴ میلی‌گرم برلیتر می‌توان مشاهده کرد. امّا در مزرعه R8-7 این وضعیت تا فاصله ۲۵۰ متری (دسته پنجم) برقرار است زیرا در دسته‌های ششم و هفتم این مزرعه به‌دلیل عدم لایه محدودکننده و وجود عدسی‌های ماسه‌ای ضخامت منطقه اختلاط کاهش و میانگین شوری افزایش می یابد. با اندازه‌گیری شوری زه‌آب خروجی درهر دو مزرعه تحقیقاتی، تأثیر مستقیم آبیاری بر فرآیند شوری زه‌آب مشاهده شد (شکل ۱۰). با افزایش آبیاری میزان شوری زه‌آب افزایش یافت و این مساله به‌دلیل افزایش عمق اختلاط بود. شکیبا و همکاران (۱۳۹۲) و نوذری (۱۳۸۸) نشان دادند که با افزایش بار هیدرولیکی ناشی از افزایش آبیاری، عمق اختلاط افزایش و درنتیجه آب به‌سمت لایه‌های زیرین زهکش که دارای شوری بیشتری نسبت به لایه‌های رویین هستند جریان یافته و باعث افزایش شوری زه‌آب خروجی از زهکش می‌شود. همچنین دقت در نوسانات شوری زه‌آب خروجی از مزرعه R9-11 نشان داد که این تغییرات روند افزایشی نداشته و مشخص است که شوری آب زیرزمینی با شوری آب آبیاری به یک حالت تعادل رسیده است. این مساله به‌دلیل سال‌ها کشت نیشکر و عملیات آبیاری در این مزرعه بود (بیش از ۱۰ سال). نوذری (۱۳۸۸) در تحقیقی که بر روی شوری زه‌آب

خروجی از واحد کشت و صنعت امیرکبیر انجام داد زمان رسیدن به این تعادل را ۱۵ سال گزارش کرد؛ اما در مزرعه R8-7 هرچند که لوله‌های زهکشی نسبت به مزرعه R9-11 در عمق کمتری کارگذاری شده بود اما به‌دلیل اولین سال کشت متوسط شوری زه‌آب خروجی از لاترال‌ها در مزرعه R8-7 (۶/۸۰ دسی‌زیمنس برمتر) نسبت به مزرعه R9-11 (۶/۴۲ دسی‌زیمنس برمتر) کمی بیشتر بود. انتظار می‌رود با افزایش آبیاری در سال‌های آینده و پایین آمدن شوری در بالاد ست مزرعه، میزان شوری زه‌آب خروجی در این مزرعه کاهش یابد. با اندازه‌گیری روزانه دبی زه‌آب از لوله‌های زهکشی، مشاهده شد که تغییرات دبی زه‌آب تحت تأثیر آبیاری است شکل (۱۱). دبی زه‌آب خروجی در مزرعه R8-7 بسیار کمتر از مزرعه R9-11 بود به‌طوری‌که میزان متوسط زه‌آب خروجی از لوله زهکشی در مزرعه R8-7، ۳/۳ میلی‌متر بر روز و این میزان برای مزرعه R9-11، ۱۰ میلی‌متر بر روز بود. این مساله تاثیر بسیار زیاد آب زیرزمینی، عمق کارگذاری لاترال‌های زهکشی و موقعیت لایه محدودکننده بر زه‌آب خروجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- شوری زه‌آب خروجی از لاترال‌های زهکشی مزارع درطول اجرای تحقیق



شکل ۱۱- دبی زه‌آب خروجی از لاترال‌های زهکشی مزارع درطول اجرای تحقیق

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه دینامیک سطح آب زیرزمینی و نوسانات منطقه اختلاط آب شور زیرزمینی و نسبتا شیرین آبیاری به‌عنوان عواملی موثر بر دبی و شوری زه‌آب خروجی در اراضی مرکز و جنوب غرب خوزستان پرداخته شد. این پژوهش‌در دو مزرعه-R9 11 و R8-7 که به‌ترتیب در واحدهای کشت وصنعت نیشکر دعبل خزاعی و سلمان فارسی می‌باشند، انجام شد. در مزرعه *R9-11* زهکش‌های جمع‌کننده زه‌آب به‌صورت لوله بوده و عمق نصب لوله‌های زهکش از ۱/۸ متری سطح زمین در ابتدا تا ۲/۲ متری در انتها متغیر بود. این در حالی است که فاصله زهکش‌ها در این مزرعه ۶۰ متر بود. امّا در مزرعه *R8-7*، زهکش‌های جمع‌کننده زه‌آب در دو طرف مزرعه به‌صورت نهر روباز بوده و عمق نصب لوله‌های زهکش از ۱/۲ متری سطح زمین تا ۱/۶ متری در انتهای مزرعه متغیر بود و فاصله زهکش‌ها در این مزرعه ۴۲ متر بود. در طول دوره تحقیق برای هر دو مزرعه به‌صورت روزانه دبی و شوری زه‌آب خروجی از لوله‌های فرعی اندازه‌گیری شد. همچنین تراز سطح آب درون لوله‌های پیزومتری در لایه‌های مختلف خاک برای تعیین بار هیدرولیکی، برداشت شد. در هر دو مزرعه برای تمامی دسته‌ها هنگام آبیاری، افزایش تراز سطح آب و در فاصله بین آبیاری‌ها روند کاهش تراز آب برقرار بود. در مزرعه R9-11 دعبل خزاعی، در دسته های اول و دوم (با فاصله‌های ۵ و ۳۰ متری از جمع کننده) اختلاف بار هیدرولیکی به‌میزان ۲۰ سانتی‌متر بین پیزومترهای کارگذاری شده در عمق ۲/۲ متری به پایین نسبت به پیزومترهای بالایی برقرار بود. همچنین در دسته‌های سوم، چهارم، پنجم و ششم که از ۵۰ تا ۳۰۰ متر نسبت به جمع کننده فاصله داشتند، اختلاف بار هیدرولیکی به میزان ۲۰ سانتی‌متر تا عمق ۱/۸ متری و برای دسته هفتم که در بالادست مزرعه قرار داشت به میزان ۱۰ سانتی‌متر و تا عمق ۱/۳ متری از سطح زمین بود. این اختلاف بار هیدرولیکی باعث جریان عمودی و هجوم آب شور از لایه‌های پایین به‌سمت بالا و در نتیجه افزایش عمق اختلاط در طی عملیات آبیاری سنگین شده و منطقه‌ای بینابین آب شور و شیرین را به‌وجود آورد. در مزرعه *R8-7* سلمان فارسی به دلیل کم عمق بودن لوله‌های زهکش (متوسط عمق زهکشی ۱/۴ متر درطول ۵۰۰ متر)، بالا آمدگی تراز سطح آب در تمامی دسته‌ها نسبت به مزرعه *R9-11* نامحسوس بود. در این مزرعه برای دسته های اول، دوم و سوم (با فاصله‌های ۵،۳۰ و ۵۰ متری از جمع کننده) اختلاف بار هیدرولیکی به‌میزان ۱۰ سانتی‌متر بین پیزومترهای کارگذاری شده در عمق ۲/۲ متری به پایین نسبت به پیزومترهای بالایی بود و دردسته های پیزومتری چهارم تا هفتم اختلاف بارهیدرولیکی بین لایه های پایین نسبت به لایه های بالایی بسیار کم بود. درنتیجه جریان روبه بالای آب شور ناشی از اختلاف بار هیدرولیکی کمتر اتفاق افتاد. این کاهش شوری در تمامی دسته‌ها بجز دسته‌های ششم و هفتم به‌دلیل وجود عدسی‌های ماسه‌ای نسبت به مزرعه دعبل خزاعی رخ داد. در این تحقیق میزان شوری با کاهش عمق نصب زهکش‌ها در مزرعه R8-7 سلمان فارسی نسبت به مزرعه R9-11 دعبل خزاعی کاهشی بود. کاهش شوری بین ۱۰ تا ۴۰ درصد با توجه به موقعیت دسته‌های پیزومتری و فاصله آنها از جمع‌کننده زه‌آب متغیر بود. همچنین در لایه‌های پایین (عمق‌های چهار و پنج متری)، اطراف و زیر لایه محدودکننده، میزان کاهش شوری مشهودتر بود. این کاهش شوری در تمامی دسته‌ها بجز دسته‌های ششم و هفتم مزرعه سلمان فارسی نسبت به مزرعه دعبل‌خزاعی رخ داد. افزایش بسیار زیاد شوری در دسته‌های هفتم و ششم از مزرعه *R8-7* با توجه به کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها، به‌علت وضعیت لایه‌بندی خاک و وجود عدسی‌های ماسه‌ای بود. در هر دو مزرعه میزان شوری در عمق‌های مساوی برای دسته‌هایی که کنار زهکش جمع کننده زه‌آب و لوله‌های زهکش نصب شده بودند، نسبت به دسته‌های دیگر بیشتر بود. به‌طوری‌که برای مزرعه

R9-11 دعبل خزاعی درعمق دو متری این افزایش شوری ۵۰ درصد نسبت به دسته های دیگر و در عمق های سه متری و بخصوص چهار و پنج متری بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصد افزایش داشت. این مسئله به‌دلیل اثر جریان شعاعی در نزدیک لوله‌های زهکش و درنتیجه کم‌شدن ضخامت منطقه اختلاط بود. همچنین با کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها، ضخامت منطقه اختلاط به اندازه یک متر افزایش و میانگین شوری در این منطقه تا هشت درصد کاهش یافت. کم شدن ضخامت منطقه اختلاط تا یک متر همراه با افزایش میانگین شوری بین ۱۰۰-۴۰ درصد در دسته‌هایی که کنار لولهٔ زهکش یا جمع کننده لوله ای (مزرعه R9-11) نصب شده-اند در مقایسه با بقیه دسته‌های پیزومتری (بجز دسته هفتم از مزرعه R8-7 به‌علت وجود عدسی‌های ماسه‌ای) نیز مشاهده شد. با اندازه‌گیری شوری زه‌آب خروجی در هر دو مزرعه تحقیقاتی، تأثیر مستقیم آبیاری بر فرآیند شوری زه‌آب مشاهده شد. با افزایش آبیاری میزان شوری زه‌آب افزایش یافت و این مساله به‌دلیل افزایش عمق اختلاط بود. در مزرعه R8-7 هر چند که لوله‌های زهکشی نسبت به مزرعهR9-11 در عمق کمتری کارگذاری شده بود اما به‌دلیل اولین سال کشت متوسط شوری زه‌آب خروجی از لاترال‌ها در مزرعه R8-7 (۶/۸۰ دسی‌زیمنس برمتر) نسبت به مزرعه R9-11 (۶/۴۲ دسی‌زیمنس برمتر) کمی بیشتر بود. انتظار می‌رود با افزایش آبیاری در سال‌های آینده و پایین آمدن شوری در بالادست مزرعه، میزان شوری زه‌آب خروجی در این مزرعه کاهش یابد. دبی زه‌آب خروجی در مزرعه R8-7 بسیار کمتر از مزرعه R9-11 بود به‌طوری‌که میزان متوسط زه‌آب خروجی از لوله زهکشی در مزرعه R8-7، ۳/۳ میلی‌متر بر روز و این میزان برای مزرعه R9-11، ۱۰ میلی‌متر بر روز بود. این مساله تاثیر بسیار زیاد آب زیرزمینی، عمق کارگذاری لاترال‌های زهکشی و موقعیت لایه محدودکننده بر زه‌آب خروجی را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت منطقه اختلاط آب شیرین آبیاری و آب شور زیرزمینی ناشی از کاهش بهینه عمق زهکشی، حجم آب مصرفی در هر دور آبیاری به‌دلیل استفاده گیاه از این منطقه، کاهش می‌یابد. همچنین کاهش حجم و شوری زهاب خروجی ناشی از بهینه کردن عمق زهکشی عاملی موثر برای حفاظت منابع آب و خاک پایین دست خواهد بود.

فهرست منابع

۱. اسدی کپورچال، ص.، پذیرا، ا .و همایی، م . ۱۳۹۱. مدلسازی آب آبشویی مورد نیاز برای بهسازی خاک های شور. مجله

۲. حفاظت منابع آب و خاک،۲(۲):۸۴-۶۵.

۳. بی نام، ۱۳۷۵.دستورالعمل لایه‌بندی خاک در مطالعات زهکشی اراضی، نشریه شماره۱۵۳، سازمان برنامه و بودجه، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، ۵۵ صفحه.

۴. پذیرا، ا. ۱۳۹۱. امکان بهسازی خاک های شور و سدیمی با استفاده از بهسازهای شیمیایی. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۴):۴۴-۲۷.

۵. پناهی، م. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر شوری آب زیرزمینی و آب آبیاری بر روی شوری آب خروجی از زهکش‌های زیرزمینی. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ،۱۱۶ صفحه.

۶. شکیبا، م.، لیاقت، ع. و میرزایی، ف. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر عمق اختلاط بر کیفیت زه‌آب خروجی از زهکش در اراضی با آب زیرزمینی کم عمق و شور. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۷ (۲): ۲۷۹- ۲۶۷.

۷. علی نژاد، ش. و کاوه، ف.۱۳۹۲. شبیه سازی توازن رطوبت و نمک های محلول در روش کم آبیاری برای برخی گیاهان زراعی. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۳):۲۸-۱۳.

۸. محجوبی، آ. ۱۳۹۱. بررسی اثرات زهکشی کنترل شده بر روی شوری خاک، مدیریت آبیاری و عملکرد نیشکر در کشت و صنعت امام خمینی. پایان نامه دکترا رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۹. مختاران، ع.، ناصری، ع.ع. و کشکولی، ح.ع. ۱۳۹۲. تعیین ضخامت فصل مشترک آب شور- شیرین در اراضی تحت آبیاری و آب زیرزمینی شور و کم عمق. دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران: دانشگاه تهران. ۸-۷ آبان.

۱۰. نوذری، ح. ۱۳۸۸. مدیریت شوری و بهره‌برداری از زه‌آب کشاورزی با استفاده از تحلیل پویایی سیستم. پایان نامه دکتری، رشته هیدرولوژی و مدیریت منابع آب، دانشکده آب و خاک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران،۱۳۶ صفحه.

۱۱. هاشمی نژاد، ی.، غلامی، م. و سلطانی، و. ۱۳۹۱. بهینه سازی مصرف آب از طریق کنترل دقیق شوری خاک در شرایط ماندگار. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۱(۳):۶۸-۵۹.

12. De Louw, P.G.B., Eeman, S. and Oude Essink, G.H.P. 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrologe and Earth System Sciences Discussions, 8: 7657- 7707.
13. De Louw, P.G.B., Eeman, S., Oude Essink, G.H.P., Vermue, E. and Post, V.E.A. 2013. Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. Hydrogeology Journal: 501(2013)133-145.
14. Eeman, S., De Louw, P.G.B. and Van Der Zee, S. E. A. T. M. 2017. Cation exchange in a temporally fluctuating thin freshwater lens on top of saline groundwater. Hydrogeol J (2017) 25:223–241.
15. Eeman, S., Leijnse, A., Raats, P.A.C. and Van Der Zee, S. E. A.T. M. 2011. Analysis of the thickness of a fresh water lens and of the transition zone between this lens and upwelling saline water. Advances in Water Resources, 34(2): 191-202.
16. Ghjben, W.B. 1889. Nta in vebend met de woorgenomen putboring nabij Ames terdam-Tijdschrift van let konink lijk inst. Vagnig.
17. Hassanizadeh, S.M. 1997. Mathematical modeling of hydro- geologic processes. Lecture notes. Utrecht University, Institute of Earth Sciences.
18. Herzberg, A. 1901. Die wasser versorgune einiger nordseebader. Journal Gasbeleucht Wasserversorgung. 44: 815-9.
19. Hubbert, M. K. 1940. The theory of groundwater motion: Journal of Geology. 48(8): 785-944.
20. Maas, K. 2007. Influence of climate change and sea level rise on a Ghijben Herzberg Lens. Hydrogeology Journal: 347: 223-8.
21. Oude Essink, G. H. P. 2001a. Salt water intrusion in a three- dimensional groundwater system in the Netherlands: A numerical study, Transport in Porous Media, 43(1): 137-158.
22. Oude Essink, G. H. P. 2001b. Salt water intrusion in 3-d large- scale aquifers: A Dutch case, phys. Chem. earth, 24(4): 337.

23. Oude Essink, G.H.P., Baaren, E.S. and De louw. P. G. B. 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. Water Resource research, 46:
24. Sorey, M. L. 1998. Numerical modeling of liquid geothermal systems, U.S. Geological survey prof. pap. 16044-D, 1978.
25. Pauw, P.S., van Baaren, E.S., Visser, M., Delouw, P.G.B. and Oude Essink, G.H.P. 2015. Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands. Hydrogeology Journal: DOI 10.1007/s10040-015-1264-z.
26. Vermue, E., Delouw, P.G.B., Eeman, S., Oude Essink, G.H.P. and Vanderzee. S.E.T. 2010. Experimental evidence of rainwater lens dynamics in natural and agro-ecosystems in the Scheldt river region. Salt water Intrusion Meeting Azores, Portugal.

Evaluation of Vertical Mixing of Saline and Fresh Water in Drainage and Its Effect on Drainage Water Salinity in Dabal Khazaei and Salman Farsi Sugarcane Farms

A. Mokhtaran[1], A.A. Naseri, and H.A. Kashkoli

Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Ahwaz, Iran.

alimokhtaran@gmail.com

Professor of Irrigation and Drainage Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.

abdalinaseri@yahoo.com

Retired Professor of irrigation and drainage Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.

kashkulihda@gmail.com

Received: April 2020, and Accepted: September 2020

Abstract

In the new drainage conditions in the center and southwest of Khuzestan Province, by reducing the depth of drainage installation and controlled drainage, studying the dynamics of the mixing zone, understanding the specifications of this region, and its effect on the flow rate of drainage water and salinity is important. In this study, seven groups of piezometers, each consisting of 8 piezometers placed at different soil depths (0.8 to 5m) and at different distances from the drainage water collector were studied in two research farms, namely, field R9-11 Dabal Khazaei agro-industry (with an average drainage depth of 2 m and distances of 65 m) and field R8-7 in Salman Farsi agro-industry (with an average depth of 1.4 meters and 42 meters distances).Water level in piezometers, water salinity in different soil layers, and drainage water flow rate and salinity were monitored daily in three periods of heavy irrigation of sugarcane (March to October of 2013, 2014 and 2017). Results indicated that by starting a heavy irrigation, hydraulic head increased and hydraulic head variance between bottom layer (4 and 5 m) relative to the surface layers, established vertical flow and saline inflow upwards. Reducing the installation depth of drains up to 60 cm from in R9-11 compared to farm R8-7 and moving away from the collector up to 400 m in each farm, reduced the installation depth of drains up to 40 cm, and increased the hydraulic load by an average of 8-12 cm. The thickness of the mixing area was up to one meter and the reduction of the average salinity line in the mixing area was 8%. It was found that in addition to irrigation water salinity, drainage water salinity was affected by groundwater salinity and the difference in drainage depth, position of the impermeable layer, and the presence of sand lenses. By decreasing drainage depth, the drainage water discharge decreased sharply, such that the averag drainage water from each lateral in farm R9-11 was 10 mm/day, and in farm R8-7 it was 3.3 mm/day. The results showed that with increasing the thickness of the salt and fresh water mixing zone due to the optimal reduction of drainage depth, the volume of water consumed in each irrigation cycle decreased due to plant use of this zone, which can be an effective factor in conserving soil and water resources.

Keywords: New drainage methods, Transition zone, Impermeable layer, Salts concentration, Piezometer

[1] - Corresponding author: Ahwaz. Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center Agricultural Engineering Research Department.