

بررسی عوامل مؤثر بر مشخصات منطقه اختلاط آب شور و شیرین در اراضی تحت آبیاری با سطح ایستابی شور و کم عمق

روح الله مختاران^{۱*}، عبدعلی ناصری^۲، حیدرعلی کشکولی^۳ و سعید برومند نسب^۴

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز alimokhtaran@gmail.com

۲- استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد بازنشسته گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۱۵

چکیده

اراضی آبیاری جنوب خوزستان، زمین هایی با سطح ایستابی شور و کم عمق می باشند که تلفات نفوذ عمقی آب در طول دوره آبیاری باعث شده آب آبیاری به علت اختلاف چگالی به صورت شناور بر روی سفره آب زیرزمینی شور قرار گیرد و منطقه اختلاط آب شور و شیرین را به وجود آورد. در مسائل نوین زهکشی مانند کاهش عمق کارگذاری زهکش ها با هدف کنترل کمی و کیفی زه آب، مطالعه دینامیک این ناحیه و بررسی عوامل مؤثر بر مشخصات آن مورد اهمیت قرار می گیرد. در این تحقیق، دو مزرعه از اراضی کشت نیشکر جنوب خوزستان با دو عمق کارگذاری متفاوت زهکشی انتخاب شد. در طول دوره تحقیق، برای هر مزرعه با احداث پیزومترهایی در اعماق مختلف سطح زمین و در فواصل مختلف از جمع کننده زهاب، سطح آب درون پیزومترها و شوری آب زیرزمینی اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با شروع آبیاری سنگین بار هیدرولیکی افزایش یافته و اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه های پایین (۴ و ۵ متری) نسبت به لایه های سطحی (۱ و ۱/۳ متری)، جریان عمودی آب شور را بر قرار می سازد. همچنین با کاهش عمق کارگذاری زهکش ها و فاصله گرفتن از جمع کننده زهاب ضمن افزایش بار هیدرولیکی به میزان ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر، ضخامت منطقه اختلاط تا ۱ متر افزایش یافته و خط میانگین شوری در این ناحیه به میزان ۵ تا ۱۰ درصد کاهش می یابد. همچنین خصوصیات این منطقه به عمق لایه نفوذ ناپذیر و وجود عدسی های ماسه ای نیز وابسته است به طوری که با کم عمق بودن لایه نفوذ ناپذیر و وجود لایه های شنی، ضخامت منطقه اختلاط به علت عدم افزایش بار هیدرولیکی کاهش یافته و میزان شوری به شدت افزایش می یابد.

کلید واژه ها: شوری، غلظت، اختلاف چگالی، منطقه اختلاط، پیزومتر.

Evaluation of Factors Affecting the Fresh and Saline Water Mixing Zone Features in The Irrigated Lands With Shallow and Saline Ground Water

R. Mokhtaran^{1*}, A. A. Naseri², H.A. Kashkoli³ and S. Bromand Nasab⁴

1* - PhD. Student of Irrigation and Drainage Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2- Professor of Irrigation and Drainage Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3- Retired Professor of Irrigation and Drainage Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

4- Professor of irrigation and Drainage Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 7 October 2013

Accepted: 26 January 2014

Abstract

Irrigated lands of Khuzestan are lands with shallow and saline groundwater, in which water losses of deep percolation during irrigation cause that irrigation water, because of the density difference, floats to the top of saline aquifer creating a fresh and saline water mixing zone. In new drainage issues such as reducing the depth of drain insertion aimed to an optimum use of water, dynamic studies on this region and evaluation of factors affecting its features are necessary. In the present study, two farms of sugarcane in south Khuzestan with two different drainage depths were selected. During the study, for each farm,

installing pisometers at various depths and different distances from drain collector, the water level inside the pisometers and groundwater salinity were measured. Results indicated that by starting a heavy irrigation, hydraulic load is increased and hydraulic load variance between bottom layer (4 and 5 m) to the surface one (1 and 1.3 m) creates a vertical flow of saline water. As well, by reducing the drain insertion depth and increasing the distance from drain collector, in addition of the increase of hydraulic load to 10-15 cm, mixing zone's thickness increases to 1 m and the mean salinity line in this region reduces to 5-10 percent. But, as well, this region's features depend on the depth of impermeable layer and existence of sand lenses, as with low depth of impermeable layer and existence of sand lenses, because of the hydraulic load's lack of increase, mixing zone's thickness, is reduced and the salinity is highly increased.

Keywords: Salinity, Concentration, Density difference, Mixing zone, Pisometer

رابطه بین فشار و بار پیزومتر^۶ (بار هیدرولیکی) با توجه به شکل (۲) در شرایطی که فشار اتمسفر برابر صفر باشد به صورت معادله (۱) آورده شده است.

$$\phi = \frac{P}{\rho g} + Z \quad (1)$$

که؛ ϕ : بار پیزومتریک (متر)، $\left(\frac{P}{\rho g}\right)$: بار فشار (متر) و Z : ارتفاع با در نظر گرفتن سطح مینا (متر) می‌باشد.

در سیستم جریان آب‌های زیرزمینی، بار هیدرولیکی عامل مهم در تعیین جهت جریان و سرعت می‌باشد. کاربرد قانون داری نشان می‌دهد که بار هیدرولیکی معرف خوبی برای فشار می‌باشد. در اراضی پست جایی که اختلاف چگالی در آب زیرزمینی نسبت به عمق وجود دارد ممکن است بار هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی شور، شیرین و لب‌شور به بار هیدرولیکی آب شیرین تبدیل شود. یعنی اگر بر طبق شکل (۳)، فرض شود که آب شیرین، لب‌شور و شور در زیر زمین در یک تعادل هیدرواستاتیکی باشند و اگر کف پیزومتر مشاهداتی در منطقه آب شیرین قرار گیرد به نظر می‌رسد که بار هیدرولیکی در این پیزومتر با بار هیدرولیکی در پیزومتر مشاهداتی منطقه شور متفاوت است. در حالی که بار هیدرولیکی شامل مجموع ارتفاع کف پیزومتر نسبت به سطح مرجع و اختلاف چگالی می‌باشد که ممکن است با در نظر گرفتن مجموع عوامل هر دو پیزومتر در یک تعادل هیدرواستاتیکی باشند (اودی اسسینک^۷، ۲۰۰۱).

$$\phi_f = Z + h_f \Leftrightarrow \phi_f = Z + \frac{\rho}{\rho_f} h \quad (2)$$

که در معادله (۲)، ϕ_f : بار هیدرولیکی آب شیرین (متر)، h_f : ارتفاع فشاری آب شیرین (متر)، h : ارتفاع فشاری آب شور (متر)، ρ_f : چگالی آب شیرین (کیلو گرم بر متر مکعب)، ρ : چگالی آب شور (کیلو گرم بر متر مکعب) و Z : ارتفاع با در نظر گرفتن سطح مینا (متر) می‌باشد.

مقدمه

سیستم‌های زهکشی در مناطق خشک و نیمه خشک با آب زیرزمینی شور و کم عمق به منظور پایین نگه داشتن سطح ایستابی، از ورود آب و املاح زیرزمینی شور به عمق ریشه جلوگیری می‌کنند. اما امروزه در زمینه زهکشی نگرش‌های جدیدی مطرح گردیده است. در نگرش جدید، هدف از زهکشی کاهش دادن میزان زه آب 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 می‌گردد. کیفیت این آب زیرزمینی در مناطق مرطوب مناسب و قابل استفاده گیاه می‌باشد ولی در مناطق خشک به دلیل شور بودن آب زیرزمینی، اعمال این شیوه به منظور 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 شبکه آبیاری و زهکشی قابلیت احیاء شدن را پیدا کردند. در این گونه اراضی نفوذ عمقی پیوسته از تلفات آب در طول دوره آبیاری سنگین باعث شده که آب نسبتاً شیرین آبیاری به علت اختلاف چگالی به صورت شناور بر روی سفره آب زیرزمینی شور قرار گیرد و منطقه‌ای بینابین^۱ که در آن غلظت نمک بین حالت شور و شیرین قرار دارد به وجود آید. توزیع شوری در این ناحیه به علت پراکندگی^۲ املاح ناشی از آب آبیاری و تراوش روبه بالای آب شور زیرزمینی می‌باشد (شکل ۱).

تئوری جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر^۳، اولین بار توسط هرزبرگ (۱۹۰۱)^۴ شروع شد. در ادامه هابرت^۵ (۱۹۴۰)، معادله ساده‌ای که رابطه عمق فصل مشترک آب شور و شیرین را با بار هیدرولیکی آب زیرزمینی در محیط اختلاط نشان می‌دهد، بیان کرد.

- 1 - Transition zone
- 2 - Dispersion
- 3 - Variable density ground water flow
- 4 - Herzberg
- 5 - Hubbert

6 - Head pisometric
7 - Oud Essink

راه حل تحلیلی برای شکل منطقه بینابین حاصل از عدسی آب شیرین ناشی از باران بر روی هجوم آب شور در مناطق غربی هلند که در اثر تغییر آب و هوا و حرکت رو به جلوی دریا به وجود آمد، ارائه دادند. ورمو و همکاران^۵ (۲۰۱۰) در تحقیقی، دینامیک عدسی آب شیرین ناشی از باران را در دو منطقه مختلف کشاورزی از کشور هلند برای بررسی تغییرات شوری نسبت به عمق با احداث دسته‌های پیژومتری بین دو آبگذر و اندازه‌گیری شوری آب زیرزمینی، تراز آب، دبی و شوری زه‌آب خروجی نشان دادند که این تغییرات در هر محل نسبت به عمق S شکل می‌باشد. دی لئو و همکاران^۶ (۲۰۱۱) در بررسی عدسی های کم عمق آب باران در مناطق ساحلی هلند با تراوش آب شور از لایه‌های پایین برای تعیین مشخصات و تغییرات مکانی این عدسی‌ها با اندازه‌گیری میدانی تغییرات شوری را نسبت به عمق به صورت S شکل نشان دادند. آنها اختلاف بار هیدرولیکی و چگالی را عامل شکل‌گیری عدسی‌های آب باران دانستند و ضمن مشخص کردن ضخامت، خط میانگین و موقعیت کف منطقه بینابین نشان دادند که شار تراوش و عمق زهکشی و میزان تغذیه بر منطقه بینابین و عدسی تشکیل شده تأثیر دارد. امان و همکاران^۷ (۲۰۱۱) در تجزیه و تحلیل ضخامت منطقه اختلاط آب شور و شیرین در اراضی پست هلند مدل عددی سوترا و راه حل تحلیلی کیس 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 راه حل وقتی به هم نزدیکند که نسبت شار جرمی (نسبت تراوش آب شور بر تراوش آب باران) کوچک باشد. اودی اسسینک و همکاران^۸ (۲۰۱۰) در بررسی تغییرات عدسی‌های آب باران تشکیل شده بر روی آب شور زیرزمینی در جنوب غرب هلند با استفاده از اندازه‌گیری غلظت و تغییرات سطح آب در اعماق ۱، ۱/۳، ۱/۶، ۲، ۳ و ۴ متری نشان دادند که مشخصات زهکش نقش مهمی در کنترل عدسی‌های آب شیرین داشته و پروفیل تغییرات کلر نسبت به عمق توسط مدل ارائه شده با نتایج صحرایی تطابق خوبی داشته و عمق ناحیه اختلاط در ۲ متری از سطح زمین اتفاق می‌افتاد. پناهی (۱۳۸۹) به منظور 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 با نصب ۲۵ پیژومتر در هر دو مزرعه در اعماق ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ متری در طی دو سال دوره آبیاری نیشکر (اسفند تا

همچنین با توجه به اختلاف چگالی آب در لایه های مختلف خاک می توان چگالی را به صورت تابعی از فشار، درجه حرارت مایع و غلظت املاح توصیف کرد (اودی اسسینک، ۲۰۰۱b).

$$\rho = F(P, T, S) \quad (۳)$$

در معادله (۳): ρ چگالی (کیلو گرم بر متر مکعب)، T : درجه حرارت ($^{\circ}C$)، P : فشار (گیلوگرم بر متر در مجذور ثانیه) و S : شوری یا غلظت کل املاح (میلی گرم بر لیتر) می‌باشد. تأثیر فشار و درجه حرارت در اکثر سیستم‌های هیدرولوژی بر روی چگالی نسبت به تأثیر شوری ناچیز فرض شود. به عبارتی چگالی آب‌های زیرزمینی اغلب با غلظت مواد جامد محلول در ارتباط می‌باشد و در اکثر مواقع درجه حرارت و فشار ثابت فرض شده است. معادله‌های متعددی وجود دارد که ارتباط چگالی، درجه حرارت، غلظت املاح، شوری و فشار را بیان می‌کند (سوری^۱، ۱۹۹۸؛ حسنی‌زاده، ۱۹۹۷؛ اودی اسسینک، ۲۰۰۱b).

مدل عددی سوترا^۲ که توسط ووس و سوزا^۳ (۱۹۸۷) بیان شد در دو معادله جداگانه ارتباط چگالی، درجه حرارت، غلظت املاح و شوری را بیان می‌کند:

$$\rho_s(T) = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_0) \quad (۴)$$

$$\rho_s(c) = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial c}(c - c_0) \quad (۵)$$

که در روابط (۴) و (۵)، ρ_f : چگالی آب شیرین، $\frac{\partial \rho}{\partial T}$: مقدار ثابت که تغییرات چگالی به تغییرات درجه حرارت در محدوده دمایی ۲۰-۶۰ درجه سلسیوس را بیان می‌کند (کیلو گرم بر متر مکعب در درجه سانتی گراد)، T_0 : درجه حرارت پایه مایع (درجه سانتی گراد)، C : غلظت املاح (میلی گرم بر لیتر)، C_0 : غلظت پایه املاح (میلی گرم بر لیتر) و $\frac{\partial \rho}{\partial c}$: مقدار ثابتی از تغییرات چگالی به تغییرات غلظت املاح. با توجه به روابط فوق می‌توان مشاهده کرد که چگالی با غلظت املاح رابطه خطی داشته و می‌توان تغییرات غلظت را مبنای تغییرات چگالی دانست. در سال‌های اخیر در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام شده است از جمله، ماس^۴ (۲۰۰۷)، یک

5 - Vermu *et al.*
6 - De Louw *et al.*
7 - Eeman *et al.*
8 - Oude Essink *et al.*

1 - Sorey
2 - Sutra
3 - Voss and Souza
4 - Kess Mass *et al.*

مهر)، نشان داد که شوری آب زیرزمینی با افزایش عمق روند صعودی داشته و نزدیکی شوری زه آب به شوری آب زیرزمینی در عمق ۳/۵ تا ۴/۵ متری و کاهش در شوری آب زیرزمینی، تأثیرگذاری جریان آب زیرزمینی را در این عمق بر روی جریان آب به لترال زهکشی را نشان می دهد. جوری و همکاران^۱ (۲۰۰۳) در بحث استفاده مجدد از زه آب جهت آبیاری اراضی کشاورزی نشان دادند که غلظت نمک زه آب خروجی تحت تأثیر شوری آب زیرزمینی می باشد و عمق لایه غیرقابل نفوذ در زمان به تعادل رسیدن شوری زه آب اثر زیادی داشته و هرچه لایه غیرقابل نفوذ عمیق تر باشد زمان بیشتری در رسیدن به حالت تعادل لازم است. آیارز و همکاران^۲ (۱۹۸۷) دریافتند که شوری و حجم زه آب خارج شده از زهکش های نصب شده در عمق ۲ متری بیشتر از زهکش های نصب شده در عمق ۱/۷ متری می باشد. همچنین قائمی و ویلاردسون^۳ (۱۹۹۲) و کرسین و اسکان^۴ (۲۰۰۱) نشان دادند که استفاده از یک سیستم زهکشی کم عمق (۰/۷ متر) می تواند شرایط ماندابی را کنترل کند ولی در کنترل شوری کمتر مؤثر است و بازگشت شوری توسط صعود کاپیلاری ممکن است.

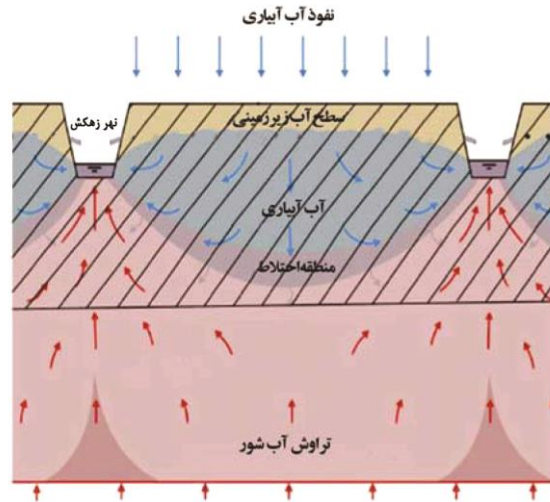
با توجه به وضعیت اراضی مناطق خشک و نیمه خشک و حضور سطح ایستابی شور و کم عمق، این تحقیق با هدف مطالعه دینامیک سطح آب زیرزمینی و نوسانات منطقه اختلاط آب شور و شیرین و بررسی عوامل مؤثر همچون فواصل آبیاری، عمق کارگذاری زهکش ها و نزدیک و دور بودن از لوله های زهکش بر موقعیت، ضخامت و عمق این منطقه اختلاط^۵ در اراضی کشت نیشکر جنوب خوزستان خوزستان انجام می گیرد.

مواد و روش ها

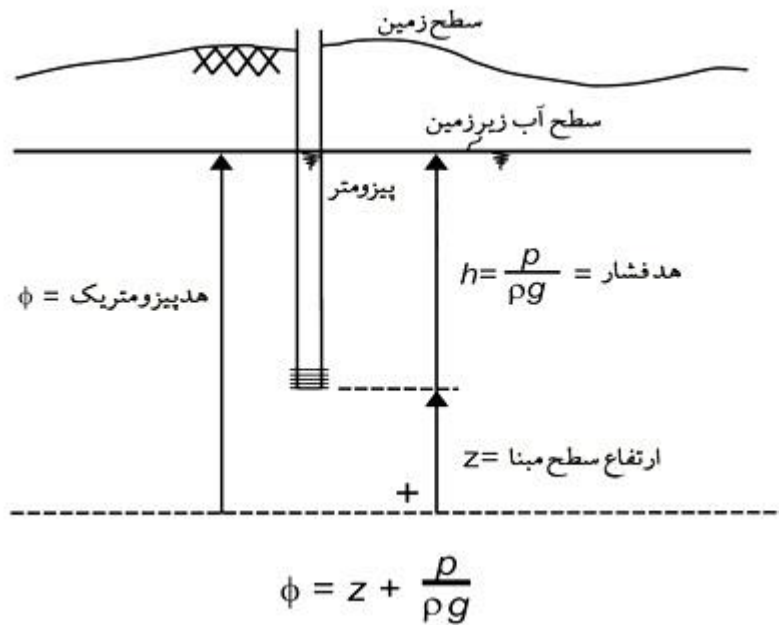
این تحقیق در دو مزرعه R_{9-11} و R_{8-7} که به ترتیب از واحدهای کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی و سلمان فارسی می باشند، انجام گردید. این دو واحد کشت و صنعت در شرق رودخانه کارون و به ترتیب در فواصل ۳۰ و ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان اهواز مرکز استان خوزستان قرار دارند. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک و نیمه خشک با تابستان های بسیار گرم و زمستان های معتدل می باشد. منبع تامین آب آبیاری، رودخانه کارون است. حداکثر شوری آب رودخانه کارون در طول دوره تحقیق (فروردین تا نیمه شهریور سال های

۱۳۹۱ و ۱۳۹۲)، $2/95$ دسی زیمنس بر متر در ماه خرداد و حداقل شوری در شهریور با $2/3$ دسی زیمنس بر متر اندازه گیری شد. اراضی هر دو این واحدها ۲۵ هکتار می باشد به طوری که طول مزارع ۱۰۰۰ متر و عرض آنها ۲۵۰ متر است. در هر دو مزرعه تحقیقاتی زهکش جمع کننده زهاب در دو طرف مزارع قرار داشته و لوله های زهکش به طول ۵۰۰ متری به صورت قرینه نسبت به هم قرار می گیرند. در مزرعه R_{9-11} زهکش های جمع کننده زهاب به صورت لوله بوده و عمق نصب لوله های زهکش از $1/8$ متری سطح زمین در ابتدا تا $2/2$ متری در انتها متغیر است. این در حالی است که فاصله زهکش ها در این مزرعه ۶۰ متر می باشد. اما در مزرعه R_{8-7} ، زهکش های جمع کننده زهاب در دو طرف مزرعه به صورت نهر روباز بوده و عمق نصب لوله های زهکش از $1/2$ متری سطح زمین تا $1/6$ متری تا انتهای مزرعه متغیر است و فاصله زهکش ها در این مزرعه ۴۲ متر می باشد. در این تحقیق، ابتدا مطالعات لایه بندی خاک در پنج نقطه از مزارع تحقیقاتی (دو نقطه در مزرعه R_{9-11} و سه نقطه در مزرعه R_{8-7}) برای تشریح لایه های خاک از نظر بافت خاک، موقعیت لایه نفوذ ناپذیر و تخلخل خاک با توجه به نشریه ۱۵۳ دستورالعمل سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور انجام شد (بی نام، ۱۳۷۵). سپس برای هر مزرعه هفت دسته پیژومتر احداث گردید. هر دسته شامل هشت لوله پیژومتری بود که در اعماق $0/8$ ، 1 ، $1/3$ ، $1/8$ ، $2/2$ ، 3 ، 4 و 5 متری نسبت به سطح زمین بین دولوله زهکش در طول نصف مزرعه (۵۰۰ متری) در فاصله های مشخص از جمع کننده زهاب، نصب شدند. دسته اول در فاصله ۵ متری، دسته دوم در فاصله ۳۰ متری، دسته سوم در فاصله ۵۰ متری، دسته چهارم در فاصله ۲۰۰ متری، دسته پنجم در فاصله ۲۵۰ متری، دسته ششم در فاصله ۳۰۰ متری و دسته هفتم در فاصله ۴۰۰ متری از جمع کننده زه آب قرار گرفتند (شکل های ۴ و ۵). لازم به ذکر است که در مزرعه R_{9-11} دعبل خزاعی پیژومترهای دسته های پنجم و ششم و در مزرعه R_{8-7} سلمان فارسی دسته های چهارم و ششم کنار لوله های زهکش در فاصله $1/5$ تا ۲ متری از آنها نصب شدند.

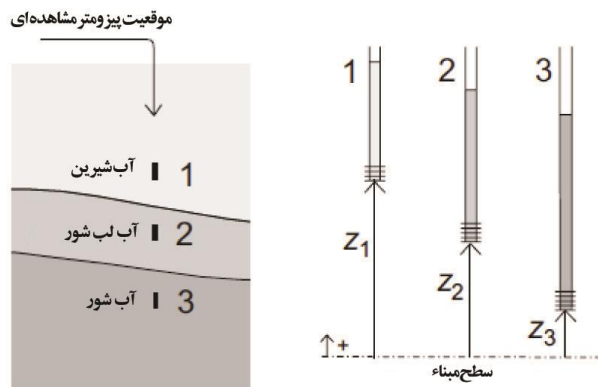
۱ - Jury et al.
 2 - Ayars et al.
 3 - Willardson
 4 - Christen and Skehan
 5 - Mixing Zone



شکل (۱) - شمایی از آب آبیاری نفوذی روی سطح آب زیرزمینی شور

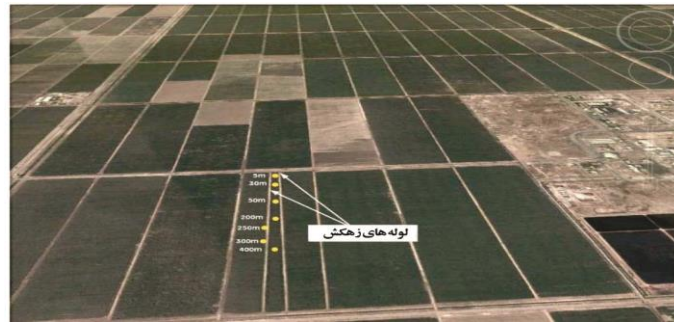


شکل ۲ - نمایش بار پیزومتریک

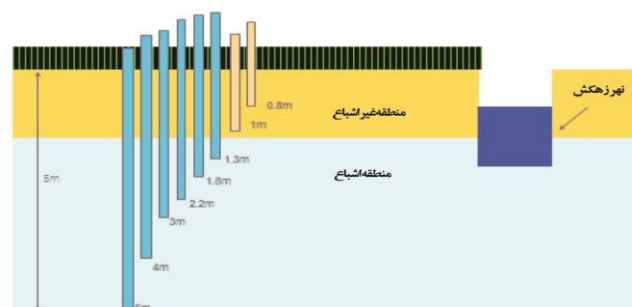


شکل ۳ - بار هیدرولیکی در موقعیت یکسان، با اعماق متفاوت و چگالی های متفاوت

مختاران و همکاران: بررسی عوامل مؤثر بر مشخصات منطقه اختلاط آب شور و شیرین در ...



شکل ۴- عکس هوایی کارگذاری لوله‌های پیژومتریک بین دو لوله زهکش



شکل ۵- نمایی شماتیک از کارگذاری لوله‌های پیژومتری در یک نقطه از زمین

ترتیب $1/40$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و $47/1$ درصد بود. همچنین لایه‌بندی خاک تا عمق پنج متری انجام گردید که خاک در هر دو نقطه به جز لایه $5-4/5$ متر که بافت متوسطی داشت، نیمه سنگین تا سنگین تشخیص داده شد. عمق بر خورد به لایه نفوذ ناپذیر در هر دو نقطه در $4/2$ متری نسبت به سطح زمین بود که ضخامت آن 30 سانتی‌متر تشخیص داده شد ($4/5 - 4/2$). نتایج لایه‌بندی خاک در مزرعه R_{A-V} (سلمان فارسی) در سه نقطه شامل حد واسط دسته دوم و سوم، کنار دسته پنجم و حد واسط دسته ششم و هفتم انجام شد. نتایج در دو نقطه اول یکسان بود. جرم مخصوص ظاهری خاک در این دو نقطه به طور متوسط $1/45$ گرم بر سانتی‌متر مکعب و تخلخل مؤثر خاک 47 درصد برآورد گردید. بافت خاک تا لایه $5/5$ متری از سطح زمین نیمه سنگین و عمق برخورد به لایه نفوذ ناپذیر (بافت کاملاً سنگین) در 3 متری از سطح زمین و به ضخامت $1/5$ متر تشخیص داده شد. فقط در نقطه دوم یعنی کنار دسته پنجم از عمق $4/9$ متری به بعد (تا لایه $5/5$ متری که حفاری شد) بافت خاک شنی و سبک مشخص شد در حالی که در نقطه اول در این لایه بافت خاک لومی سیلتی تشخیص داده شد. لایه‌بندی سوم در مزرعه R_{A-V} کاملاً متفاوت بود. بر طبق این لایه بندی، بافت خاک از سطح زمین تا لایه $0/8$ متری نسبتاً سنگین (لوم رسی سیلتی)، از عمق $0/8$ تا 2 متری نسبت به سطح زمین، سبک (لومی شنی تا شنی) و از عمق 2 تا 3 متری، نیمه سنگین تا سنگین (لوم رسی سیلتی تا رسی سیلتی) و از عمق 3 متری به بعد، سبک (شنی) تشخیص داده شد. آنچه مشخص است، این است که در اکثر لایه‌های این نقطه عدسی‌های ماسه‌ای و لایه‌های شنی وجود دارد.

در طول دوره تحقیق در هر دو مزرعه به صورت روزانه تراز سطح آب در تمامی لوله‌های پیژومتری در لایه‌های مختلف از سطح زمین برای تعیین بار هیدرولیکی، برداشت شد. همچنین برای تعیین غلظت املاح، نمونه‌های آبیاری و آب زیرزمینی از لوله‌های پیژومتری در لایه‌های مختلف خاک بلافاصله پس از آبیاری، حد واسط دو آبیاری و یک روز قبل از آبیاری بعدی تهیه گردید. سپس در آزمایشگاه، هدایت الکتریکی^۱ نمونه‌های آب اندازه‌گیری شد. همچنین 40 نمونه از نمونه‌های اندازه‌گیری شده در هر دو مزرعه انتخاب گردید و با اندازه‌گیری آنیون‌ها و کاتیون‌ها، غلظت املاح برای 40 نمونه به دست آمد. سپس ضریب تبدیل هدایت الکتریکی به غلظت املاح در سطح معنی‌داری 99 درصد ($R^2 = 0/99$) معادل $0/49$ برآورد شد و از آن برای بیان غلظت املاح برحسب میلی‌گرم برلیتر استفاده گردید:

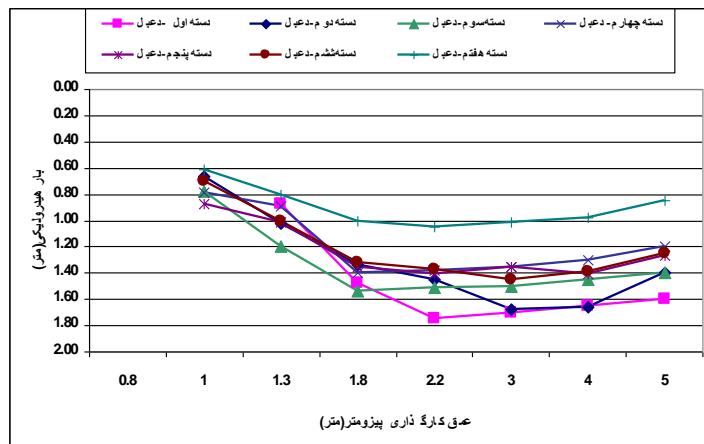
$$TDS_{(mg/lit)} = 0/49 \times EC (\mu s / m) \quad (5)$$

نتایج و بحث

مطالعات لایه‌بندی خاک در مزرعه R_{A-V} (دعبل خزاعی) در حد واسط دسته‌های دوم و سوم و کنار دسته هفتم انجام شد (جدول ۱). در هر دو نقطه مذکور، نتایج پروفیل خاک یکسان بود. بدین ترتیب، تا عمق $1/5$ متری از سطح خاک جرم مخصوص ظاهری خاک و تخلخل مؤثر خاک در چهار لایه تعیین شد که مقدار متوسط آنها به

جدول ۱- مشخصات لایه های خاک در هر دو مزرعه تحقیقاتی

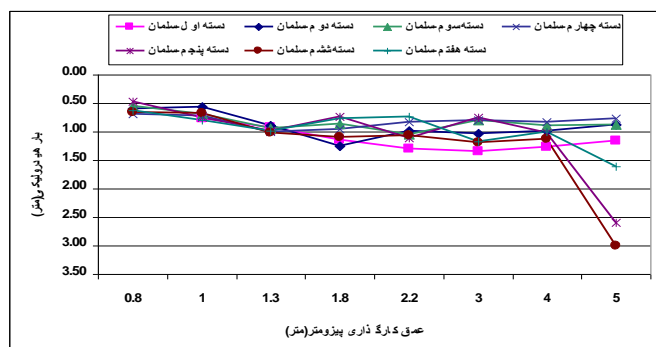
نقاط اول و دوم (مزرعه دعبل)		نقطه اول (مزرعه سلمان)		نقطه دوم (مزرعه سلمان)		نقطه سوم (مزرعه سلمان)	
ضخامت لایه (cm)	بافت	ضخامت لایه (cm)	بافت	ضخامت لایه (cm)	بافت	ضخامت لایه (cm)	بافت
نام علامت	نام علامت	نام علامت	نام علامت	نام علامت	نام علامت	نام علامت	نام علامت
۰-۴۰	لومی رسی سیلتی	۰-۴۰	لومی رسی سیلتی	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 رسی سیلتی	۴۹۰-۵۱۰	لومی رسی سیلتی	-	-
۴۵۰-۵۰۰	لوم	-	-	-	-	-	-



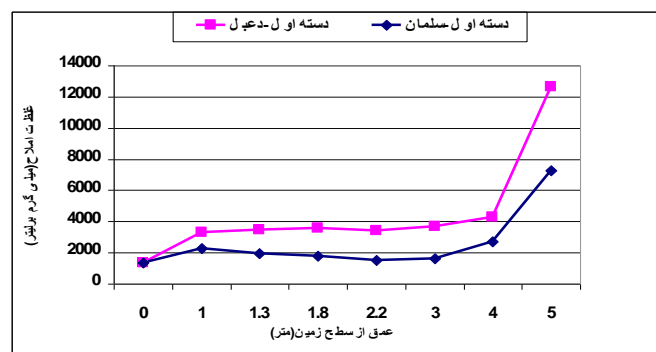
شکل ۶- تغییرات میانگین بار هیدرولیکی در دسته‌های مختلف مزرعه R_{۱۱}

که باعث جریان عمودی و هجوم آب شور از لایه‌های پایین به سمت بالا و در نتیجه باعث افزایش عمق اختلاط شده و منطقه بینابین آب شور و شیرین را به وجود می‌آورد. این مسئله در روزهای اول بعد از هر آبیاری تا لایه ۱/۳ و حتی ۱ متری در اکثر دسته‌ها می‌رسید. دی لئو و همکاران (۲۰۱۱) در مناطق ساحلی هلند نشان دادند که عامل تشکیل عدسی‌های آب باران و منطقه بینابین این عدسی‌ها و آب شور زیر زمینی اختلاف بار هیدرولیکی می‌باشد. همچنین نوذری (۱۳۸۸) نشان داد که با افزایش بار هیدرولیکی ناشی از افزایش آبیاری عمق اختلاط افزایش می‌یابد. در نتیجه آب به سمت لایه‌های زیرین زهکش که دارای شوری بیشتری نسبت به لایه‌های رویی زهکش هستند جریان یافته و باعث افزایش شوری زه آب خروجی از زهکش می‌شود. اما در مزرعه R_{8-7} (سلمان فارسی) به دلیل کم عمق بودن لوله‌های زهکش، بالا آمدگی تراز آب در تمامی دسته‌ها نسبت به مزرعه ۱۱- R_9 محسوس است (شکل ۷). این شکل نشان می‌دهد که اختلاف بار هیدرولیکی بین پیژومترها کمتر و در نتیجه جریان رو به بالای آب شور ناشی از اختلاف بار هیدرولیکی کمتر باشد. به همین دلیل یکی از راه‌های کاهش شوری زه آب‌ها، کم کردن عمق زهکش‌ها می‌باشد. فقط در دسته پنجم در عمق ۵ متر و دسته‌های ششم و هفتم به علت قرار گیری در لایه خاک شنی که زیر لایه نفوذناپذیر قرار گرفته است باعث شده که اختلاف بار هیدرولیکی نتواند جریان عمودی رو به بالا را از این عمق برقرار کند.

نوسانات تراز سطح آب در لایه‌های مختلف از سطح زمین در طول مزارع با توجه به شیب کارگذاری لوله‌های زهکش و تفاوت در عمق کارگذاری، نزدیک بودن به زهکش‌ها و فاصله از جمع‌کننده زه‌آب خروجی با هدف بررسی وضعیت جریان آب زیرزمینی از لحاظ جریان‌های عمودی، جریان‌های طولی و هجوم آب شور مورد بررسی قرار گرفت. در طول دوره تحقیق برای هر دو مزرعه با کاهش فواصل آبیاری و شروع آبیاری سنگین، صعود آب در تمامی پیژومترها (به جز پیژومتر کارگذاری شده در عمق ۸۰ سانتی‌متر در مزرعه R_{9-11} دعبل که در طول دوره قابلیت اندازه‌گیری وجود نداشت) مشاهده شد. در هر دو مزرعه در تمامی دسته‌ها هنگام آبیاری افزایش تراز سطح آب و در فاصله بین آبیاری‌ها روند کاهش تراز آب برقرار بود. در شکل (۶)، با در نظر گرفتن زمین به عنوان سطح مبنا، میانگین تغییرات بار هیدرولیکی در پیژومترهای هر دسته با توجه به عمق کارگذاری شده در طول دوره تحقیق مربوط به مزرعه R_{9-11} (دعبل خزاعی) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود، اختلاف بار هیدرولیکی در تمامی لایه‌ها بین دسته هفتم نسبت به دسته اول باعث حرکت جریان طولی به سمت زه‌آب خروجی می‌شود. اما مهمترین نکته اختلاف بار هیدرولیکی بین پیژومترهای کارگذاری شده در عمق ۲/۲ متری به پایین نسبت به پیژومترهای بالایی در تمامی دسته‌ها و بالاخص دسته‌های چهارم، پنجم و ششم تا عمق ۱/۸ متری و دسته هفتم تا عمق ۱/۳ متری از سطح زمین است



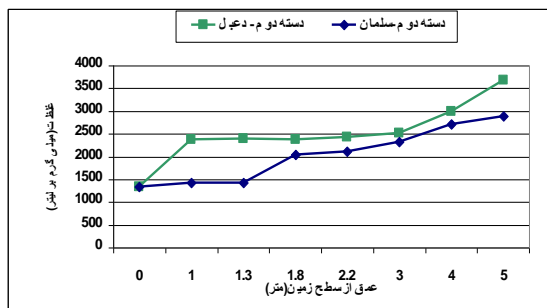
شکل ۷- تغییرات میانگین بار هیدرولیکی در دسته‌های مختلف مزرعه R_{8-7}



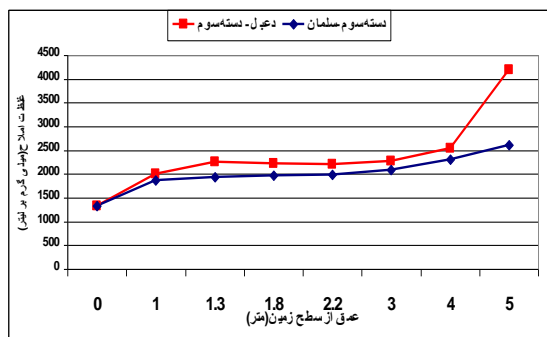
شکل ۸- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته اول

آورده شده است. نقطه اول در هر شکل (عمق صفر) متوسط شوری آب آبیاری در طول دوره تحقیق بوده که معادل ۱۳۳۲/۸ میلی گرم بر لیتر می‌باشد.

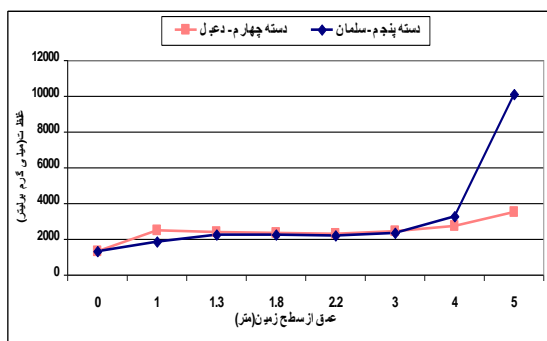
با توجه به اندازه گیری شوری آب زیرزمینی در لایه های مختلف از سطح زمین، تغییرات غلظت املاح نسبت به عمق برای هر دسته در هر دو مزرعه تحقیقاتی در شکل های (۸) الی (۱۴)



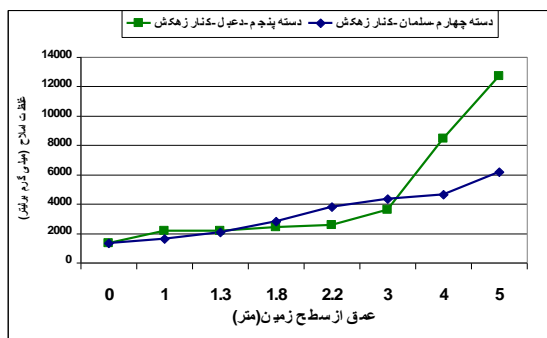
شکل ۹- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته دوم



شکل ۱۰- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته سوم

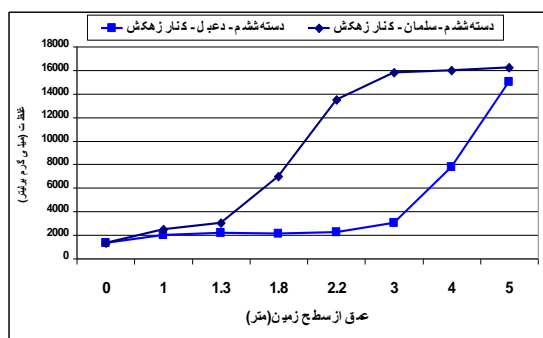


شکل ۱۱- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته های چهارم و پنجم سلمان

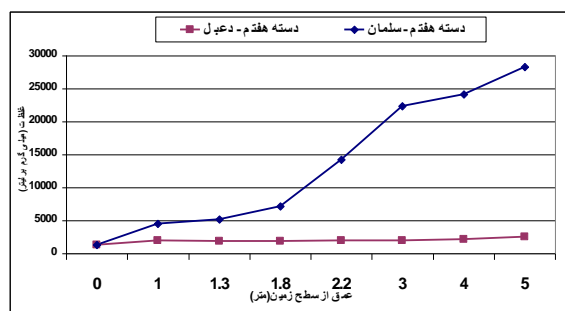


شکل ۱۲- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته های پنجم و چهارم سلمان

مختاران و همکاران: بررسی عوامل مؤثر بر مشخصات منطقه اختلاط آب شور و شیرین در ...



شکل ۱۳- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته ششم



شکل ۱۴- تغییرات غلظت نسبت به عمق - دسته هفتم

شوری بین هر دو مزرعه مشهودتر است شاید بتوان این مسئله را به دلیل تفاوت در جمع کننده زهاب دانست. زیرا در مزرعه R_{9-11} جمع کننده زهاب به صورت لوله بوده و بالا آمدگی و گرفتگی در بعضی موارد شوری را به شدت افزایش می دهد در حالی که این مسئله در مزرعه R_{8-7} که جمع کننده به صورت نهر زهکش می باشد مشاهده نمی شود. همچنین با دقت در شکل های (۸) الی (۱۴) مشخص می گردد که تغییرات میزان شوری نسبت به عمق در هر دو مزرعه با هر وضعیت لایه بندی خاک به دلیل ایجاد منطقه اختلاط شکلی S مانند به خود می گیرند. این مسئله در تحقیقاتی که توسط ورمو و همکاران (۲۰۱۰)، دی لئو و همکاران (۲۰۱۱) و امان و همکاران (۲۰۱۱) انجام شده است نیز بیان گردیده است. در نهایت با توجه به شکل های مذکور، می توان مشخصات منطقه اختلاط شامل موقعیت و شوری نقطه فوقانی، شوری خط میانگین، موقعیت و شوری کف و ضخامت منطقه را در دسته های مختلف مزارع تحقیقاتی به صورت جدول های (۲) و (۳) نشان داد. به عنوان مثال در دسته سوم از مزرعه R_{9-11} دعبل، منطقه بینابین آب شیرین آبیاری و شور زیر زمینی حد واسط لایه ۱ متری و ۴ از سطح زمین قرار دارد. به همین علت لایه ۱ متری بالای منطقه بینابین با شوری $2013/9$ میلی گرم بر لیتر و لایه ۴ متری کف این منطقه با شوری $2543/1$ میلی گرم بر لیتر را تشکیل می دهند. این در حالی است که خط میانگین شوری حد واسط شوری در لایه های مختلف این ناحیه را تشکیل می دهد که از نقطه عطف S شکل منحنی در این ناحیه عبور می کند.

با توجه به شکل های فوق شوری نسبت به عمق در تمامی دستورها برای هر دو مزرعه افزایش اما میزان شوری با کاهش عمق کارگذاری در مزرعه R_{8-7} (سلمان) نسبت به مزرعه R_{9-11} (دعبل خزاعی) به جز در دسته های ششم و هفتم کاهش می یابد. علت افزایش بسیار زیاد شوری در دسته های هفتم و ششم از مزرعه R_{8-7} وضعیت لایه بندی خاک و وجود عدسی های ماسه ای می باشد. این مسئله باعث شده تا اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه های پایین نسبت به لایه های سطحی برقرار نشده و اختلاط آب شور و شیرین در ضخامتی بسیار کم به وجود آید و در نتیجه آبیاری با آب شیرین نتواند بر کاهش شوری اثر داشته باشد. در حالی که وجود لایه نفوذناپذیر در عمق $4/2$ متری در تمامی دسته های مزرعه R_{9-11} باعث شده با برقراری اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه های پایین نسبت به لایه های فوقانی و اختلاف چگالی ناشی از اختلاف غلظت، توزیع شوری بین لایه های سطحی تا لایه نفوذناپذیر ناشی از پراکنندگی املاح ایجاد شود که منطقه بینابین آب شور و شیرین را ایجاد می کند. در هر دو مزرعه میزان شوری در دسته هایی که کنار زهکش جمع کننده زه آب و لوله های زهکش نصب شده بودند، نسبت به دسته های دیگر بیشتر بود. این افزایش شوری را در اعماق ۴ و ۵ متری می توان مشاهده کرد. این مسئله به دلیل اثر جریان شعاعی در نزدیک لوله های زهکش و در نتیجه کم شدن ضخامت منطقه اختلاط می باشد. شکل های (۸) الی (۱۲) که پنج دسته اول هر دو مزرعه را با هم مقایسه می کند، نشان می دهند که در دسته اول تفاوت

جدول ۲- موقعیت و شوری نقطه فوقانی، شوری خط میانگین، موقعیت و شوری کف و ضخامت منطقه بینابین در مزرعه R_{۹-۱۱} دعبل

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

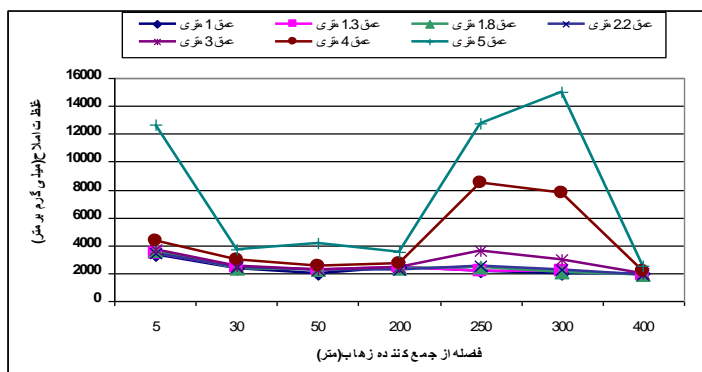
جدول ۳- موقعیت و شوری نقطه فوقانی، شوری خط میانگین، موقعیت و شوری کف و ضخامت منطقه بینابین در مزرعه R_{۸-۷} سلمان

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

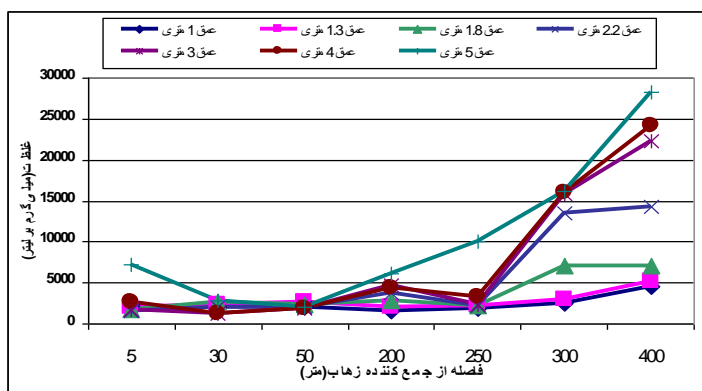
همچنین می‌توان روند تغییرات شوری را با فاصله گرفتن از جمع کننده زهاب با توجه به شکل‌های (۱۵) الی (۱۶) مشاهده کرد. آنچه از شکل (۱۵) مشاهده می‌شود این است که میزان شوری در هر عمق با فاصله گرفتن از جمع‌کننده زهاب کاهش می‌یابد. علت افزایش ناگهانی شوری در اعماق ۵ و ۴ متری در فواصل ۲۵۰ و ۳۰۰ متری از جمع‌کننده زهاب، به دلیل مجاور بودن پیژومترهای کارگذاری شده در دسته‌های پنجم و ششم در کنار لوله‌های زهکش و در نتیجه کوچک شدن جریان شعاعی آب به طرف زهکش‌ها در این اعماق می‌باشد. هر چند که این کاهش در مزرعه R_{۹-۱۱} (شکل ۱۵) که وضعیت لایه‌بندی خاک یکسانی دارد قابل مشهود است اما در مزرعه R_{۸-۷} (شکل ۱۶)، تفاوت در وضعیت لایه‌بندی خاک ناشی از وجود عدسی‌های ماسه‌ای در فواصل ۲۵۰ تا ۴۰۰ متری این روند را تغییر داده است.

با دقت در جدول‌های (۲) و (۳) مشخص می‌گردد که با کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها ضخامت منطقه اختلاط افزایش و میانگین شوری در این منطقه کاهش می‌یابد. کم‌شدن ضخامت منطقه و افزایش میانگین شوری در دسته‌هایی که کنار لوله زهکش نصب شده‌اند را می‌توان مشاهده کرد. همچنین تأثیر لایه بندی خاک و عمق لایه نفوذناپذیر و وجود عدسی‌های ماسه‌ای و لایه‌های شنی را در مشخصات این منطقه باید در نظر گرفت. به طوری که در مزرعه R_{۹-۱۱} دعبل خراعی که وضعیت لایه‌بندی خاک یکسان است با فاصله گرفتن از جمع‌کننده زهاب و کاهش عمق کارگذاری ضخامت منطقه اختلاط افزایش یافته (البته به جز دسته‌های پنجم و ششم به دلیل همجواری بودن با لوله‌های زهکشی) اما در مزرعه R_{۸-۷} این وضعیت تا فاصله ۲۵۰ متری (دسته پنجم) برقرار است زیرا در دسته‌های ششم و هفتم این مزرعه به دلیل عدم لایه نفوذناپذیر و وجود لایه‌های شنی ضخامت منطقه اختلاط کاهش و میانگین شوری افزایش می‌یابد.

مختاران و همکاران: بررسی عوامل مؤثر بر مشخصات منطقه اختلاط آب شور و شیرین در ...



شکل ۱۵- تغییرات غلظت املاح در هر عمق نسبت به فاصله از جمع کننده زهاب- مزرعه R_{9-11} (دعبل خزاعی)



شکل ۱۶- تغییرات غلظت املاح در هر عمق نسبت به فاصله از جمع کننده زهاب- مزرعه R_{8-7} (سلمان)

برقراری اختلاف بار هیدرولیکی نسبت به لایه‌های فوقانی میسر نبود. در بررسی میزان شوری آب زیرزمینی در لایه‌های مختلف خاک مشخص گردید که با افزایش عمق، میزان شوری افزایش یافته که این اختلاف شوری خود عامل دیگری در ایجاد منطقه اختلاط آب شور و شیرین است و مشخص شد که خصوصیات منطقه اختلاط (شوری نقطه فوقانی، شوری کف و شوری خط میانگین) به عمق کارگذاری زهکش‌ها، وضعیت لایه‌بندی خاک از نظر عمق لایه نفوذناپذیر و وجود عدسی‌های ماسه‌ای، فاصله از جمع کننده زهاب و نزدیک بودن به لوله‌های زهکشی وابسته است. به طوری که با فاصله گرفتن از جمع کننده زهاب، میزان شوری در هر عمق کاهش یافته و ضخامت منطقه اختلاط افزایش می‌یابد. این مسأله با کاهش عمق کارگذاری زهکش‌ها بسیار محسوس‌تر است. اما در شرایطی که لایه نفوذناپذیر در عمق کم از سطح زمین قرار داشته باشد و عدسی‌های ماسه‌ای در لایه‌های مختلف وجود داشته باشند (مانند دسته ششم و هفتم از مزرعه ۷- R_8) بر مشخصات منطقه اختلاط و میزان شوری تأثیر بسیاری خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق هفت گروه پیژومتر که هر گروه شامل ۸ پیژومتر کارگذاری شده در اعماق مختلف سطح خاک (۰/۸ الی ۵ متری) و در فواصل مختلف از جمع کننده زهاب در دو مزرعه تحقیقاتی با دو عمق زهکش متفاوت از اراضی کشت نیشکر جنوب خوزستان نصب گردید. ضمن مطالعات دقیق لایه‌بندی خاک تا عمق ۵ متری، تراز سطح آب در پیژومترها و شوری آب در لایه‌های مختلف زمین در یک دوره آبیاری سنگین (فروردین تا شهریورماه ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) برداشت شد. تراز سطح آب در پیژومترها با شروع آبیاری سنگین روند صعودی داشت. البته در مزرعه R_{8-7} (سلمان) صعود تراز آب نسبت به مزرعه R_{9-11} (دعبل) به دلیل کم عمق بودن لوله‌های زهکش بیشتر مشخص بود. اختلاف بار هیدرولیکی بین لایه‌های پایین نسبت به لایه‌های فوقانی در هر دو مزرعه جریان عمودی و هجوم آب شور را به سمت بالا برقرار کرد. این مسأله باعث ایجاد منطقه بینابین آب شور و شیرین در مزارع گردید. البته در دسته پنجم در عمق ۵ متری و دسته‌های، ششم و هفتم در اکثر لایه‌های خاک از مزرعه R_{8-7} (سلمان) به دلیل قرارگیری در لایه‌های شنی و وجود عدسی‌های ماسه‌ای

منابع

- ۱- بی نام، ۱۳۷۵. دستور لایه بندی خاک در مطالعات زهکشی اراضی، نشریه شماره ۱۵۳، سازمان برنامه و بودجه، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، ۵۵ صفحه.
- ۲- 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.
- ۳- 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، ۱۳۱، صفحه.
- 4- 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. J. Chicago, USA., 220-230.
- 5- Christen, E.W. and D. Skehan. 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads. Journal Irrigation and Drainage Engineering, 127 (3): 148- 155.
- 6- De Louw, P. G. B., Eeman, S., Oude Essink, G. H. P. 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrology and Earth System Sciences Discussions., 8: 7657- 7707.
- 7- 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.
- 8- Ghaemi, A. A. and L. S. Willardson. 1992. Salt movement in a shallow drained soil with an artesian pressure. In: Land reclamation: Advance in research and technology. Proceedings of The International Symposium, 14-15 december, Nashville, Tennessee, ASCE.
- 9- Hassanizadeh, S. M., 1997. Mathematical modeling of hydro- geologic processes. Lecture notes. Utrecht University, Institute of Earth Sciences.
- 10- Herzberg, A. 1901. Die wasser versorgung einiger nordseebader. Journal Gasbeleucht Wasserversorgung, 44: 815-9.
- 11- Hubbert, M. K. 1940. The theory of groundwater motion: Journal of Geology, 48(8): 785-944.
- 12- Jury, W.A., A. Tuli, and J. Letey. 2003. Effect of travel time on management of a sequential reuse drainage operation. Soil Science Society of America Journal. 67(4): 1122- 1126.
- 13- Maas K. 2007. Influence of climate change and sea level rise on a Ghijben Herzberg Lens. Journal of hydrology , 347: 223-8.
- 14- 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.
- 15- Oude Essink, G. H. P. 2001b. Salt water intrusion in 3-d large- scale aquifers: A Dutch case, physics and Chemistry of the earth, 24(4): 337-344
- 16- Oude Essink, G. H. P. Baaren, E.S. and P. G. B. De louw. 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. Water Resource research, 46: 1-16
- 17- Sorey, M . L. 1998. Numerical modeling of liquid geothermal systems, U.S. Geological survey prof. pap. 16044-D.
- 18- Vermue, E. D., Delouw, P. G. B., Eeman, S., Oude Essink, G. H. P. and S. E. T. Vanderzee. 2010. Experimental evience of rainwater lens dynamics in natural and aro- ecosystems in the Scheldt river region. Salt water Intrusion Meeting Azores, Portugal.

- 19- Voss, C. L. and Souza. W. R. 1987. Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater- saltwater transition zone: Water Resources Research, 23(10):1851-1866.