

بررسی تغییرات سطح ایستابی و تخلیه زهکش‌ها با سیستم زهکشی پلکانی در خاک مطبق

سید محمد علی مداح زاده، کاظم اسماعیلی* و بیژن قهرمان^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۱۳)

چکیده

سیستم زهکشی پلکانی، نوعی سیستم زهکشی زیرزمینی است که در آن خطوط زهکش مجاور هم، در دو عمق متفاوت نصب می‌شوند. در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد یک مدل به شکل یک مخزن مکعب مستطیل به طول ۲ متر، عرض و ارتفاع ۱ متر از جنس آهن گالوانیزه ساخته شد. برای دقت در اندازه‌گیری تغییرات پروفیل سطح آب، دو ردیف زهکش با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر در کف مخزن نصب گردید. زهکش‌ها از یک لوله سه جداره به قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر و از جنس PVC تهیه شدند. خاک داخل مدل به صورت سه لایه ریخته شد به طوری که یک لایه خاک کم نفوذپذیر به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و با هدایت هیدرولیکی ۱/۱۵ سانتی‌متر بر ساعت در بین دو لایه خاک با نفوذپذیر به ضخامت‌های ۳۰ سانتی‌متر برای لایه زیرین و ۲۰ سانتی‌متر برای لایه بالایی با هدایت هیدرولیکی ۱/۵۵ سانتی‌متر بر ساعت قرار گرفت. تعدادی پیزومتر با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر در کف مدل نصب گردید. پس از تجهیز مدل به شیرهای قطع و وصل جریان زهکش‌ها، آزمایش‌ها با یک آبیاری سنگین برای فواصل مختلف بین زهکش‌ها در اعماق ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر صورت پذیرفت و مقادیر ارتفاع سطح ایستابی به‌عنوان مقادیر مشاهده شده از مدل آزمایشگاهی استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد در حالی فاصله زهکش‌ها ۲۵ سانتی‌متر است حداکثر ارتفاع سطح ایستابی با گذشت زمان به زهکش کم عمق نزدیک می‌شود و در مدت زمان حدود ۲۴ ساعت به زهکش کم عمق می‌رسد و از آن زمان به بعد دبی زهکش کم عمق به صفر می‌رسیده و عملاً این زهکش از کار افتاده و تنها زهکش عمیق به کار خود ادامه می‌دهد. این مدت زمان برای حالتی که زهکش‌ها در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از یکدیگر قرار داشته باشند به ۴۰ ساعت و برای فاصله‌های ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ۴۸ ساعت افزایش می‌یابد. یافته‌ها با یک حل تحلیلی (آپادهایا و چوهان، ۲۰۰۰) مقایسه و تنها در محدوده کمی از پروفیل سطح ایستابی، که بیشتر منطقه بین دو زهکش را شامل می‌شود، همخوانی داشته و با بیشتر شدن فاصله بین زهکش‌ها، زمان افت سطح ایستابی افزایش می‌یابد. بیشترین ناهماهنگی مربوط به شرایط مرزی در محل زهکش عمیق‌تر بود. چند معادله تجربی برای شرایط مرزی و برای زمان‌های مختلف پیشنهاد شد به طوری که همخوانی قابل قبول گردید. درستی چنین معادلاتی باید برای شرایط متفاوت دیگر بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: پروفیل سطح ایستابی، خاک لایه‌ای، جریان زه آب، زهکش ناهمسطح

۱. گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: esmaili@um.ac.ir

مقدمه

در دو عمق نصب شوند همواره بیشتر از هزینه نصب زهکش‌ها در یک عمق ثابت می‌باشد (۱۷). اگر چه آنها متذکر شدند که وقتی زهکش‌ها در یک عمق ثابت نصب شده باشند، ممکن است به علت تغییر شرایط (مثلاً زیاد شدن ضریب زهکشی یا لزوم پایین تر بودن سطح آب زیرزمینی)، لازم باشد تا زهکش‌هایی در بین خطوط زهکش‌های قبلی نصب گردند. عمق نصب این زهکش‌ها ممکن است از عمق نصب زهکش‌های قبلی کمتر یا بیشتر باشد. ورما و همکاران با استفاده از معادله خطی بوسینسک، یک معادله تحلیلی برای سیستم زهکشی در دو عمق مختلف به دست آوردند (۱۶). آنها نشان دادند که حداکثر ارتفاع سطح آب پس از یک آبیاری با گذشت زمان به طرف زهکش کم عمق تر پیش می‌رود (۸). آپادهیا و چوهان با در نظر گرفتن میزان تبخیر و تعرق، معادله خطی بوسینسک را برای سیستم زهکشی در دو عمق به صورت تحلیلی حل نمودند (۱۵). در این معادلات فرض شده است که بین تغییرات سطح ایستابی و تبخیر و تعرق (ET) یک رابطه خطی وجود دارد. معادله کلی به دست آمده به صورت زیر است:

$$h(X, t) = -\frac{\gamma}{\pi} e^{-\left(\frac{bt}{f}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \beta_n X \left[(-h_0) e^{-\alpha \beta_n^2 t} + \frac{1}{f} (E_0 - bh_0) \left(\frac{e^{\frac{bt}{f}} - e^{-\alpha \beta_n^2 t}}{\left(\frac{b}{f}\right) + \alpha \beta_n^2} \right) \right] \left[1 - (-1)^n \right] + \frac{\gamma}{\pi} e^{-\left(\frac{bt}{f}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (-1)^n \sin \beta_n X \left[h_1 e^{-\alpha \beta_n^2 t} + \frac{bh_1}{f} \left(\frac{e^{\frac{bt}{f}} - e^{-\alpha \beta_n^2 t}}{\left(\frac{b}{f}\right) + \alpha \beta_n^2} \right) \right] + \frac{X}{L} h_1 \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{KD}{f} \quad (2)$$

$$\beta_n = \frac{n\pi}{L} \quad (3)$$

که در آنها $h(X, t)$ ارتفاع سطح ایستابی در هر زمان و مکان، K هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، b ضریب کاهش تبخیر نسبت به عمق، E_0 تبخیر از سطح خاک، f نسبت تخلخل قابل زهکشی، X فاصله افقی از مبدأ، t زمان، D عمق متوسط

ماندابی شدن اراضی، به همراه شوری، بسیاری از طرح‌های آبیاری را تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش تولید شده است. برخی شرایط، از قبیل افزایش ضریب زهکشی به علت تغییر الگوی کشت، اشتباه در تعیین فواصل زهکش‌ها در زمان طراحی و یا تغییر مشخصات هیدرولیکی خاک پس از اجرای طرح، باعث می‌شوند سیستم زهکشی موجود به خوبی کار نکند و نیاز به اصلاح داشته باشد. یکی از راه‌های اصلاح چنین سیستمی استفاده از سیستم زهکشی پلکانی است. در این سیستم زهکشی، خطوط زهکش مجاور هم در دو عمق متفاوت نصب می‌شوند. در این خصوص، فرمول‌ها و روش‌های مختلفی برای طراحی و نصب زهکش‌های پلکانی و تعیین نوسانات سطح ایستابی و دبی خروجی از زهکش‌ها ارائه شده است، که می‌توان با بهره جستن از این روش‌ها و ارزیابی عملکرد زهکش‌های اجرا شده و بررسی نقاط ضعف و قوت آنها، نگاهی جامع‌تر برای طرح‌های آینده در اختیار برنامه‌ریزان و طراحان قرار داد.

سیستم زهکشی در دو عمق مختلف، برخلاف سیستم متداول، از پیشینه تحقیقاتی کمی برخوردار است (۴). چو و دوبور (۷)، دو معادله تحلیلی، یکی برای جریان پایدار و براساس فرضیات دوپویی و فورشهایمر و دیگری با استفاده از روش باور و ون شیلفگارد برای جریان ناپایدار برای طراحی سیستم زهکش‌های نصب شده در دو عمق مختلف ارائه دادند. ثبتي با فرض اینکه سطح اولیه ایستابی به شکل سهمی است، یک روش تحلیلی و یک روش عددی برای پیش بینی جریان ناپایدار سطح ایستابی برای سیستم زهکشی در دو عمق مختلف ارائه نمود و نشان داد که دو روش فوق برای خاک‌های یکنواخت نتایج مشابهی ارائه می‌دهند (۱۲). زند پارسا و سپاس‌خواه نیز با در نظر گرفتن همان فرض‌ها، فرمول ساده‌تری برای محاسبه فاصله زهکش‌هایی که متناوباً در دو عمق نصب می‌شوند، برای شرایط جریان پایدار ارائه نمودند و نشان دادند که هزینه نصب زهکش‌ها در صورتی که متناوباً

جدول ۱. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش

نوع خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت	هدایت هیدرولیکی (cm/h)	تخلخل قابل زهکشی (%)
سبک	۷۰	۱۶	۱۴	لوم شنی	۱/۵۵	۲۱
نیمه سنگین	۵۰	۳۰	۲۰	لومی	۱/۱۵	۸

فواصل مختلف و با گذشت زمان بوده و نتایج به دست آمده با نتایجی که از معادلات تحلیلی به دست می‌آید مقایسه شده تا کارایی این معادلات مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

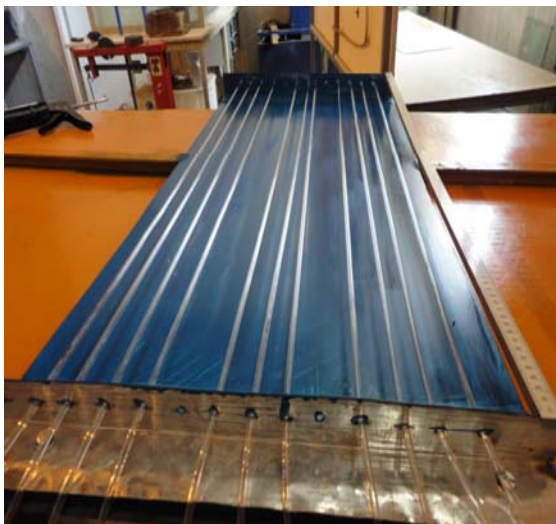
در این تحقیق، از یک مدل آزمایشگاهی برای شبیه سازی شرایط مزرعه استفاده گردید. در داخل این مدل، از خاک مطبق استفاده شد؛ به طوری که یک لایه خاک کم نفوذپذیر به ضخامت ۲۰ سانتی متر و با هدایت هیدرولیکی ۱/۱۵ سانتی متر بر ساعت در بین دو لایه خاک با نفوذپذیری بیشتر به ضخامت های ۳۰ سانتی متر برای لایه زیرین و ۲۰ سانتی متر برای لایه بالایی با هدایت هیدرولیکی ۱/۵۵ سانتی متر بر ساعت ریخته شد و در آن از دو ردیف لوله زهکش استفاده خواهد شد. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در جدول (۱) درج شده است.

مدل ساخته شده از یک مخزن مکعب مستطیل به عرض ۱ متر، طول ۲ متر، ارتفاع ۱ متر و از جنس فولاد و ورق‌های گالوانیزه تشکیل شده است. جریان آب ورودی، از سیستم لوله‌کشی آزمایشگاه تأمین می‌گردد. لوله تخلیه جریان زهکشی شده شامل شیر کنترل در قسمت میانی عرض مخزن قرار داده شد و شیب یک درصد برای مخزن انتخاب گردید. در این تحقیق از لوله‌های سه لایه با قطر خارجی ۱۶ و قطر داخلی ۱۰ میلی متر و از جنس PVC استفاده شده که با توجه به استاندارد لوله‌های زهکش ارائه شده توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO # ۲۸) مبنی بر نحوه توزیع سوراخ‌ها روی لوله، سوراخ‌ها در چهار ردیف ایجاد گردید، که مجموع کل مساحت سوراخ‌ها (مساحت بازشدگی) ۱ تا ۳ درصد کل سطح لوله را شامل می‌شود. همچنین، براساس استانداردهای اروپا (۴، ۱۴)،

جریان آب به طرف زهکش‌ها و h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع سطح ایستابی از زهکش‌های عمیق و کم عمق می‌باشند.

رحیمی خوب یک مدل ریاضی به روش عددی تفاضل‌های محدود برای پیش بینی وضعیت سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی که در دو عمق مختلف نصب شده‌اند، ارائه دادند (۳). آنها نتایج مدل خود را با نتایج مزرعه‌ای ورما و همکاران مورد ارزیابی قرار دادند (۱۶). نتایج به دست آمده توسط آنها نشان می‌دهد که مدل ریاضی دو بعدی نسبت به روش‌های تحلیلی از دقت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این، آنها در مدل خود تأثیر جریان‌های عمودی در افت سطح ایستابی را مورد بررسی قرار دادند و مشخص گردید که در خاک‌هایی که هدایت هیدرولیکی عمودی خاک قابل توجه است، استفاده از مدل‌هایی که در آنها فقط مؤلفه افقی جریان آب را در نظر می‌گیرند، سطح ایستابی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند.

در اراضی کشت و صنعت امام خمینی (ره) در اراضی شعبیه بین رودخانه‌های شطیط و دز در ۳۰ کیلومتری جنوب شهر شوشتر واقع شده است، حمزه برای حل مشکل زهکشی مزارع، به علت اینکه زهکش‌های معمولی به خوبی عمل نمودند، اجرای زهکش‌های پلکانی را پیشنهاد دادند (۲). این کار نشان داد که سیستم زهکشی پلکانی در مقایسه با سیستم معمولی به صورت یک سیستم زهکشی کنترل شده عمل می‌کند و مشکل دفع زه‌آب‌های اضافی به محیط زیست کاهش می‌یابد. بررسی منابع نشان می‌دهد که مقایسه‌های اندکی انجام شده است تا کارایی حل‌های تحلیلی در شرایط واقعی مورد ارزیابی انجام شود. همچنین امکان دارد که کارایی با زمان تغییر کند که منابع موجود به آن نپرداخته‌اند. بنابراین هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی تغییرات سطح ایستابی در یک مدل آزمایشگاهی در



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱. تجهیزات آزمایشگاهی، الف) پیزومترها روی دیواره مخزن، ب) لوله‌های زهکشی، ج) روزنه‌های روی لوله زهکش، د) شیرهای خروج جریان از زهکش

مرز بین دو ردیف زهکش کمتر از عرض مدل آزمایشگاهی انتخاب شد (تقریباً ۹۳ سانتی‌متر). تعداد لوله زهکش در ردیف بالایی ۱۵ و در ردیف پایینی ۱۳ در نظر گرفته شد که با توجه به بستن شیر هر کدام از لوله‌ها ترکیب‌های مختلفی از فاصله در یک ردیف و یا به صورت زیگزاگی ایجاد می‌گردید. از آنجا که فیلترها در تسهیل جریان و تأمین نفوذپذیری لازم نقش مهمی را در محیط متخلخل برای هدایت جریان آب

مجموع این مساحت‌ها نباید از ۱۲۰۰ میلی‌متر مربع بیشتر باشد و قطر سوراخ‌ها باید بین ۰/۶ تا ۲ میلی‌متر باشد. در نتیجه، روی لوله‌های فوق در چهار ردیف و در هر ردیف ۹۶ سوراخ به فواصل تقریباً ۱ سانتی‌متر به صورت زیگزاگی با مت‌به قطر خارجی ۲ میلی‌متر ایجاد گردید. در مجموع، در طول ۱ متر از لوله، سطح بازشدگی معادل ۲/۴ درصد از سطح لوله می‌باشد (۱۴). طول لوله‌های زهکش با توجه به فاصله ابتدای زهکش از

عمیق با مقادیر محاسبه شده مقایسه گردید. همچنین جهت سنجش دقیق‌تر رفتار معادله در طول پروفیل سطح ایستابی، منحنی تغییرات خطا در طول پروفیل نیز به صورت بی‌بعد (برحسب x/L) ترسیم شده و مورد بررسی قرار گرفت. خطا در موارد ذکر شده از رابطه زیر به دست آمد:

$$\%Error = \frac{X_0 - X_c}{X_0} \times 100 \quad (4)$$

که در آن X_0 مقدار مشاهده شده در مدل آزمایشگاهی و X_c مقدار برآورد شده توسط معادله تحلیلی می‌باشد.

برای ارزیابی نحوه تغییرات پروفیل سطح ایستابی در این تحقیق از چهار حالت قرارگیری زهکش‌ها (با فاصله‌های ۲۵، ۳۵، ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر) استفاده گردید. در هر حالت ابتدا شیر کلیه لوله‌های زهکش بسته شد و سپس یک آبیاری سنگین صورت گرفت. سپس شیر لوله زهکش‌های مورد نظر باز شده و مقادیر ارتفاع سطح ایستابی با استفاده از پیزومترهای موجود اندازه‌گیری گردید. در نهایت مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در زمان‌های ۱، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری اندازه‌گیری و ثبت گردید. سرانجام دبی خروجی زهکش‌های کم‌عمق و عمیق به صورت حجمی و به‌عنوان تابعی از زمان اندازه‌گیری شد و با فرمول دوزو و هلین‌گا مقایسه گردید (۱۰). این فرمول نوسانات دبی زهکش را در شرایط غیر ماندگار بررسی می‌کند:

$$q = \frac{\alpha}{L} \text{ affh} \quad (5)$$

که در آن

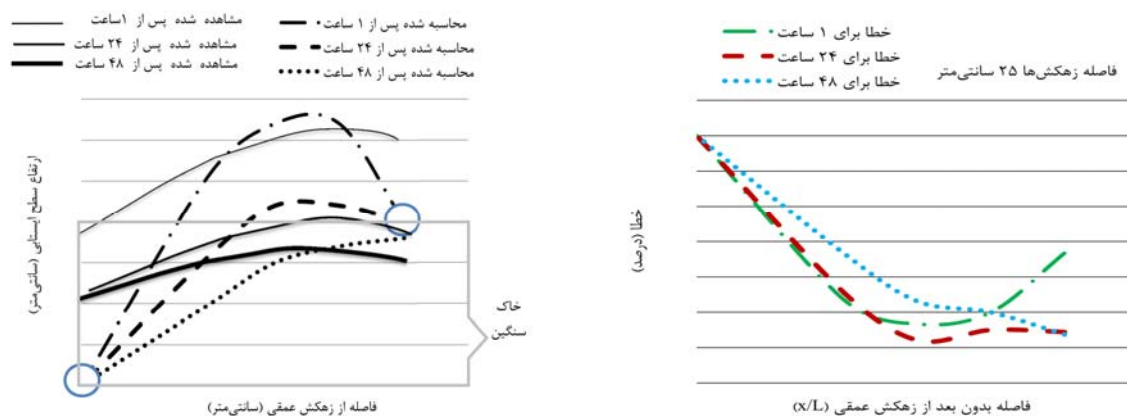
$$\alpha = \frac{\pi^2 Kd}{tL^2} \quad (6)$$

نتایج و بحث

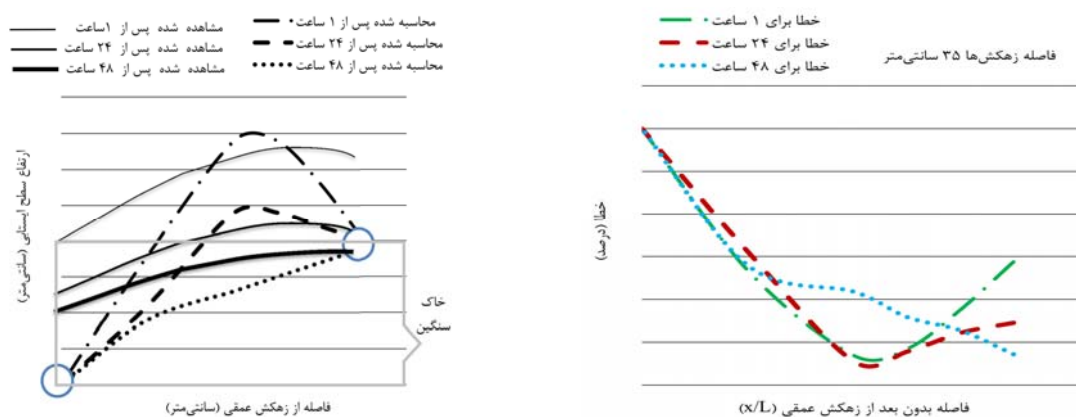
در حالتی که زهکش‌ها در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از یکدیگر قرار داشته باشند، حداکثر ارتفاع سطح ایستابی با گذشت زمان به زهکش کم‌عمق نزدیک می‌شود و در مدت زمان حدود ۲۴ ساعت به زهکش کم‌عمق می‌رسد و از آن زمان به بعد دبی زهکش کم‌عمق به صفر رسیده و عملاً این زهکش از کار افتاده و تنها زهکش عمیق به کار خود ادامه می‌دهد.

به لوله زهکش ایفا می‌نمایند، در انتخاب نوع و طراحی آنها باید دقت کافی به کار رود. ویژگی فیلتر باید طوری انتخاب گردد که جریان به راحتی از آن عبور کند، ولی ذرات ریز خاک از آن عبور نکنند. در نمونه‌های اصلی در سازه‌های مختلف از فیلتر استفاده می‌شود. در این کار پژوهشی، به جای فیلتر شن و ماسه، مواد مختلف و در دسترس که می‌توان به‌عنوان فیلتر استفاده نمود ابتدا مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. از این مواد، می‌توان پشم شیشه و گونی نخی با تراکم‌های مختلف را نام برد. در نهایت، با توجه به اینکه در مصالح ریز و درشت، پشم شیشه کمترین افت را در میزان دبی ورودی به لوله جانبی داشت از فیلتر پشم شیشه به عرض ۱۸ سانتی‌متر که دو لایه اطراف لوله ایجاد می‌کرد، به‌عنوان پوشش برای لوله‌ها استفاده گردید.

پس از کنترل مدل و رسیدن به شرایط پایدار، آزمایش‌ها با حالت زهکشی در دو عمق شروع گردید. در ضمن آزمایش، مقادیر هدایت هیدرولیکی خاک‌ها با آزمایش بار ثابت، اندازه‌گیری شده و مقدار معادل برای هر سه لایه ۱/۳۶ سانتی‌متر بر روز به دست آمد. سپس مقدار تخلخل مؤثر خاک‌ها با استفاده از گرافی که ارتباط بین ضریب آب‌گذری (معادل) و تخلخل مؤثر را نشان می‌دهد (۹)، ۷/۲ درصد به دست آمد. با انجام آزمایش، داده‌های مربوط به ارتفاع سطح ایستابی با استفاده از پیزومترها و دبی خروجی از زهکش‌ها با استفاده از ظرف مدرج برداشت گردید. این داده برداری برای هر حالت فاصله زهکش‌ها تا ۲ روز ادامه داشت. جهت تعیین روند تغییرات پروفیل سطح ایستابی، با استفاده از داده‌های برداشت شده از قرائت سطح آب در پیزومترها، تغییرات پروفیل سطح ایستابی در فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق نسبت به زمان و مکان در حالات مختلف ترسیم شد و این مقادیر با مقادیر به دست آمده از معادلات تحلیلی آپادهیا و چوهان (۱۵) مقایسه گردید. جهت انجام محاسبات و تعیین پروفیل سطح ایستابی، معادله آپادهیا و چوهان به صورت یک برنامه کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شد. در انتها، دبی اندازه‌گیری شده از خروجی زهکش‌های کم‌عمق و



شکل ۲. پروفیل سطح ایستابی و منحنی تغییرات خطا، فاصله زهکش‌ها ۲۵ سانتی‌متر

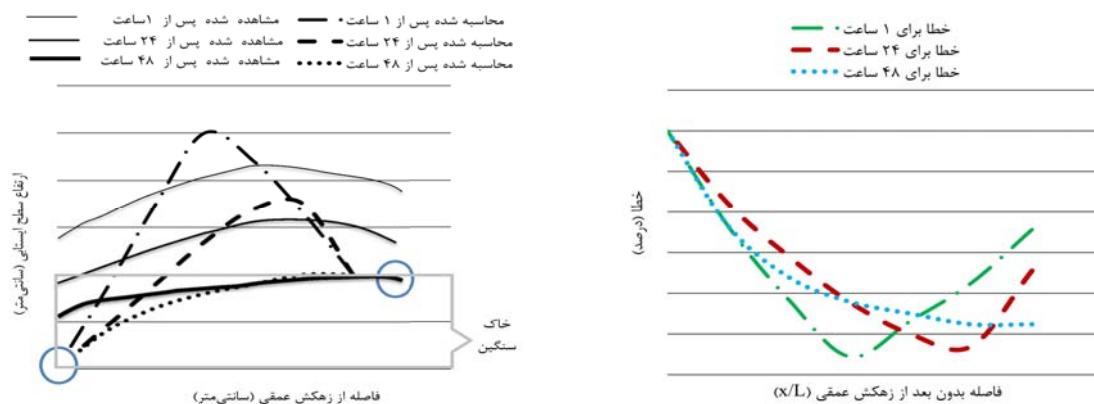


شکل ۳. پروفیل سطح ایستابی و منحنی تغییرات خطا، فاصله زهکش‌ها ۳۵ سانتی‌متر

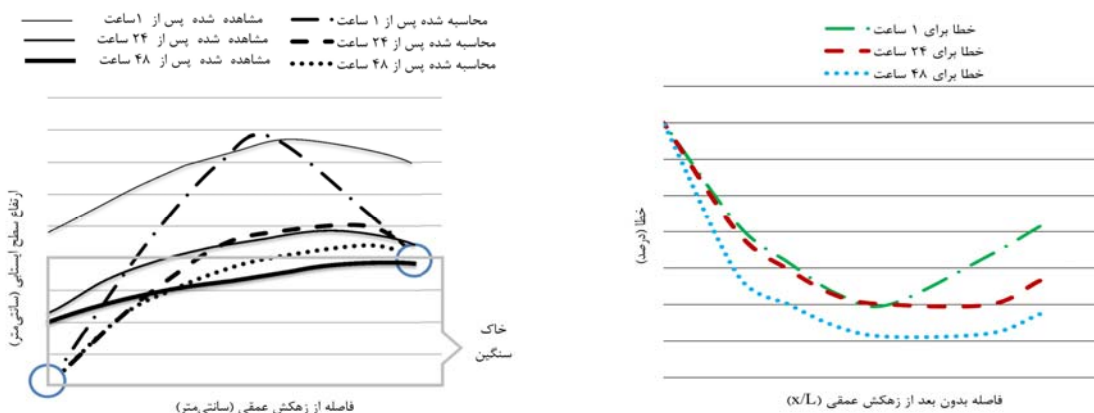
زهکش‌ها، افت پروفیل سطح ایستابی در مدت زمان بیشتری صورت می‌پذیرد. این در صورتی است که ارتفاع اولیه سطح ایستابی در همه حالت‌ها یکسان باشد. در این تحقیق برای فاصله‌های ۲۵، ۳۵، و ۷۵ سانتی‌متر بین زهکش‌ها، ارتفاع اولیه سطح ایستابی از کف مخزن ۷۰ سانتی‌متر بوده است. در صورتی که برای فاصله ۶۰ سانتی‌متری بین زهکش‌ها، ارتفاع اولیه سطح ایستابی از کف مخزن ۸۰ سانتی‌متر ایجاد گردید. با توجه به این موضوع در صورت فاصله ۷۵ سانتی‌متری بین زهکش‌ها، حدود ۴۸ ساعت طول می‌کشد تا ارتفاع سطح ایستابی به ۵۰ سانتی‌متر برسد. در صورتی که در صورت فاصله ۳۵ سانتی‌متری بین زهکش‌ها، حدود ۴۰ ساعت زمان برای رسیدن به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری لازم است. این زمان برای

این مدت زمان برای حالتی که زهکش‌ها در فاصله ۳۵ سانتی‌متری از یکدیگر قرار داشته باشند به ۴۰ ساعت رسیده و برای فاصله‌های ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ۴۸ ساعت افزایش می‌یابد. با توجه به محدودیت‌هایی که در بیشتر معادلات موجود دیده می‌شود و همچنین خطاهای هنگام آزمایشات، بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده اختلافاتی بوجود می‌آید. شکل‌های ۲ تا ۵ این تغییرات را به ترتیب برای فاصله‌های ۲۵، ۳۵، ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر زهکش‌ها نشان می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ارائه شده و تغییرات پروفیل سطح ایستابی و مقایسه بین حالت‌های مختلف فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق، استنباط می‌شود با زیاد شدن فاصله بین



شکل ۴. پروفیل سطح ایستابی و منحنی تغییرات خطا، فاصله زهکش‌ها ۶۰ سانتی‌متر



شکل ۵. پروفیل سطح ایستابی و منحنی تغییرات خطا، فاصله زهکش‌ها ۷۵ سانتی‌متر

طبیعی کاملاً سازگار نمی‌باشد. این امر دلیل اصلی ایجاد خطا بین نتایج به‌دست آمده و مشاهده شده می‌باشد، که از جمله مهم‌ترین این فرض‌ها و خطای ایجاد شده توسط آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) در نظر گرفتن هم‌روند و هم‌گن بودن سفره آزاد موجود در بالای لایه غیر قابل نفوذ

یکی از محدودیت‌ها و فرض‌های اصلی جهت به‌دست آوردن معادلات مناسب برای زهکش‌های موازی از طریق حل تحلیلی معادله بوسینسک، هم‌گن و هم‌روند بودن سفره آبخوان آزاد موجود در بالای لایه غیر قابل نفوذ می‌باشد. لذا در جاهایی که خاک مزرعه مورد نظر مطبق می‌باشد، به ناچار جهت انجام محاسبات از طریق این معادلات اجبار به استفاده از هدایت

فاصله ۲۵ سانتی‌متری بین زهکش‌ها به حدود ۲۴ ساعت تقلیل پیدا می‌کند. با مقایسه حالت فاصله ۶۰ سانتی‌متری بین زهکش‌ها با حالت‌های دیگر استنباط می‌شود زیاد بودن ارتفاع اولیه سطح ایستابی در این حالت باعث شده تا مدت زمانی حدود ۴۸ ساعت طول بکشد تا ارتفاع سطح ایستابی به ۵۰ سانتی‌متری از کف مخزن برسد. چنانچه مشاهده می‌شود تنها در محدوده کمی از پروفیل سطح ایستابی، منحنی‌های به‌دست آمده از طریق معادله تحلیلی با مقادیر واقعی مشاهده شده در مدل همخوانی دارد. دلایل ممکن این تفاوت را می‌توان این گونه بیان نمود که مدل‌های تحلیلی معمولاً برای مسائل ساده و تک بعدی کاربرد دارند و به‌دلیل استفاده از فرض‌های ساده کننده در حل این معادلات، نتایج به‌دست آمده از آنها با شرایط

به صورت نیمه‌پر و بدون مقاومت ورودی در برابر جریان عمل می‌کند (در شرایط ایده‌آل $h_e=0$ است). به‌طور کلی فرض می‌شود که مواد همجوار زهکش (مواد پوششی و خاک‌های ریخته شده به درون ترانشه) در مقایسه با خاک دست نخورده دارای آنچنان هدایت هیدرولیکی بالایی است که می‌توان از مقاومت ورودی به درون زهکش چشم‌پوشی نمود. اما تجربیات عملی نشان داده است (۱۱) که این موضوع همواره صادق نیست و عملاً عمق آب در لوله از کاملاً پر تا خالی کامل متغیر است و این مسأله هنوز نیاز به تحلیل‌های نظری و تجربی بیشتری دارد. در شرایطی ممکن است مقادیر قابل توجهی مقاومت ورودی وجود داشته باشد. این معادلات همچنین مقاومت شعاعی جریان ورودی به زهکش‌ها در لایه‌های بین عمق نصب زهکش تا لایه غیر قابل نفوذ (تقارب خطوط جریان) را به حساب نمی‌آورند و جهت لحاظ نمودن افت بار و همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش‌ها، عمق معادل از معادلات جریان ماندگار (d)، به‌جای عمق واقعی لایه غیر قابل نفوذ به‌کار گرفته می‌شود. طبق نظرات وان شیلفگارد، کاربرد عمق معادل هوشمات به‌جای عمق واقعی تا لایه غیر قابل نفوذ، می‌تواند تا حدی ضعف معادلات دیفرانسیل اولیه را در مورد همگرایی خطوط جریان جبران کند (۱۴). اما به‌طور کامل ضعف معادلات مورد نظر را جبران نکرده و همچنان مقادیری خطا در انجام محاسبات مورد نظر وجود خواهد داشت. از طرفی به‌علت طبیعت بافت خاک مورد نظر و وجود لایه کم‌نفوذ بین دو ردیف زهکش، مقاومت‌های عمودی، افقی، شعاعی و ورودی به سمت لوله‌های زهکش افزایش می‌یابد، که این امر باعث افزایش خطاها بالاخص در نزدیکی لوله‌های زهکش می‌گردد.

ج) در نظر گرفتن فرض‌های دوپوئی و فورشه‌ایمر جهت حل معادلات

بیشتر معادلات زهکشی مبتنی بر فرض‌های دوپوئی و فورشه‌ایمر هستند (۱۳، ۱۸). این فرض‌ها ما را قادر می‌سازند تا با در نظر گرفتن خطوط جریان به‌صورت افقی و موازی،

هیدرولیکی معادل لایه‌های مختلف وجود دارد. البته این موضوع باعث ایجاد خطا و اختلاف در مقادیر واقعی و محاسبه شده می‌گردد. که یکی از ضعف‌های بزرگ این قبیل معادلات تحلیلی می‌باشد. همانطور که اشاره شد در این تحقیق برای شبیه‌سازی حالت واقعی بیش تر خاک‌ها که به‌صورت مطبق می‌باشند، از یک لایه خاک کم نفوذ بین دو لایه خاک نفوذپذیرتر استفاده گردید. این مسئله باعث تغییر الگوی مسیر خطوط جریان به سمت زهکش‌ها می‌گردد. این لایه مخصوصاً مانع نفوذ عمودی آب می‌گردد و به‌دلیل افزایش مقاومت خاک در برابر مسیر جریان آب، باعث می‌شود وضعیت خطوط جریان از حالت شعاعی خارج شده و به‌صورت افقی نزدیک شوند که این وضعیت در نزدیکی لوله‌های زهکش افزایش می‌یابد. اما به‌دلیل عدم وجود معادله و برنامه مناسبی برای این حالت خاص که بتوان در آن وضعیت لایه‌ای بودن خاک را منظور نمود جهت انجام محاسبات و بررسی نحوه تغییرات پروفیل سطح ایستابی از طریق معادلات تحلیلی موجود از هدایت هیدرولیکی معادل لایه‌های مختلف استفاده شد. در حالی که با تغییر پروفیل سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی نیز در حال تغییر است. به‌طوری که با گذشت زمان و افت سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین با افت سطح ایستابی، آب از لایه بالایی خاک خارج شده و بایستی هدایت هیدرولیکی معادل برای لایه‌های باقی مانده محاسبه گردد. حال آنکه در معادلات تنها از یک عدد برای هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود. این موضوع یکی از دلایل مهم اختلاف موجود بین مقادیر مشاهده شده در مدل و محاسبه شده توسط راه حل تحلیلی مورد نظر می‌باشد.

ب) عدم در نظر گرفتن مقاومت‌های شعاعی و ورودی جریان به درون زهکش‌ها

همانطور که قبلاً اشاره شد جهت تعیین معادلات در سیستم‌های زهکشی جهت ساده‌سازی انجام محاسبات یک سری فرض‌های خاص در نظر گرفته می‌شود که از جمله فرض‌های مربوط به زهکش آرمانی این است که زهکش

ارتفاع سطح ایستابی در هر زمانی روی زهکش عمیق صفر خواهد بود. با توجه به نتایج در صورتی که بتوان شرط مرزی مذکور را با شرایط مرزی زیر که برای زمان‌های مختلف به دست آمده‌اند جایگزین کرد، مقادیر محاسبه شده سطح ایستابی روی زهکش عمیق به حالت واقعی نزدیک‌تر خواهد گردید.

$$h(0,t) = \frac{h_0}{4}, \quad t=1 \quad (7)$$

$$h(0,t) = \frac{h_0}{3}, \quad t=24 \quad (8)$$

$$h(0,t) = \frac{h_0}{4}, \quad t=48 \quad (9)$$

مقادیر محاسبه شده توسط معادله تحلیلی آپادهیا یا و چوهان با شرایط مرزی جدید، برای دو فاصله ۲۵ و ۷۵ سانتی‌متری بین زهکش‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد (۱۵). همانطور که ملاحظه می‌گردد خطای محاسباتی به کمترین مقدار خود رسیده است. البته اعمال شرایط مرزی جدید باعث تغییراتی در معادلات خواهد شد. در آینده می‌توان با انجام آزمایشات بیشتر برای حالات مختلف و تعیین شرایط مرزی جدید، معادلات موجود را برای خاک‌های مطبق به گونه‌ای اصلاح نمود تا بتوان با استفاده از آنها بهترین تخمین را از موقعیت سطح ایستابی به دست آورد.

تغییرات دبی خروجی زهکش‌ها

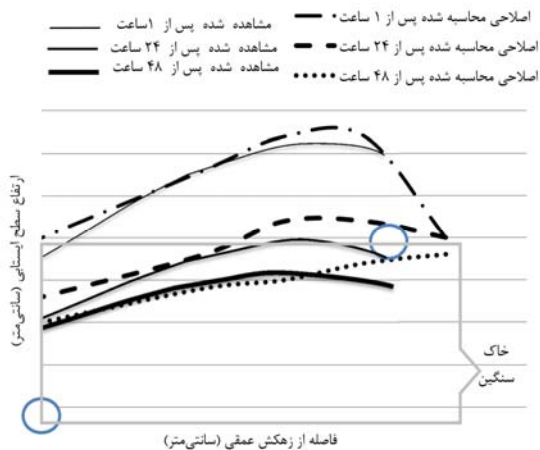
تغییرات زمانی دبی زهکش‌های عمیق و کم‌عمق برای یک دور آبیاری، در حالتی که فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق ۲۵، ۳۵، ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر باشد به‌عنوان مقادیر مشاهده شده در آزمایش، و دبی به‌دست آمده از فرمول دوزو و هلین‌گا به‌عنوان مقادیر محاسبه شده، به‌ترتیب در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده شده است. قابل ذکر است که قطر زهکش‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید تا دبی زهکش‌ها در بیشترین مقدار خود، بدون اینکه تحت فشار باشند، از زهکش‌ها خارج گردد. همانطور که از شکل‌های (۸) تا (۱۱) پیداست، دبی زهکش‌های کم‌عمق با گذشت زمان کاهش زیادی داشته و زمانی که ارتفاع سطح ایستابی کمتر از زهکش کم‌عمق می‌شود، این زهکش از

جریان دو بعدی را جریانی یک بعدی فرض نماییم. البته هنگامی که زهکش‌ها به فاصله بسیار کمی از لایه غیر قابل نفوذ و یا روی آن قرار گرفته باشند، چنین جریانی رخ خواهد داد و با دور شدن فاصله زهکش‌ها از لایه غیر قابل نفوذ اختلاف از این حالت نیز افزایش می‌یابد. این قبیل فرض‌ها باعث می‌شود که معادلات تحلیلی موجود مقادیر ارتفاع سطح ایستابی را کمتر از حالت واقعی محاسبه کنند و باعث ایجاد خطا در مقادیر واقعی و محاسبه شده می‌شوند (۵، ۶). به همین علت در صورتی که فاصله زهکش‌ها ۲۵ سانتی‌متر باشد، پس از گذشت یک ساعت از زهکشی، در نزدیکی زهکش عمیق اختلاف بین مقدار مشاهده شده در مدل و مقدار محاسبه شده در معادله تحلیلی حدود ۲۰ سانتی‌متر است که با توجه به فاصله ۲۰ سانتی‌متری بین زهکش عمیق و کم‌عمق، خطای محاسبه شده ۱۰۰ درصد می‌باشد. در این حالت با دور شدن از زهکش عمیق این اختلاف کمتر شده و در نزدیکی بین دو زهکش به صفر رسیده و در محدوده‌ای مقدار محاسبه شده بیشتر نیز می‌گردد. سپس دوباره با نزدیک شدن به زهکش سطحی مقدار مشاهده شده بیشتر شده و در نزدیکی زهکش کم‌عمق خطای محاسبه شده به حدود ۳۵ درصد می‌رسد.

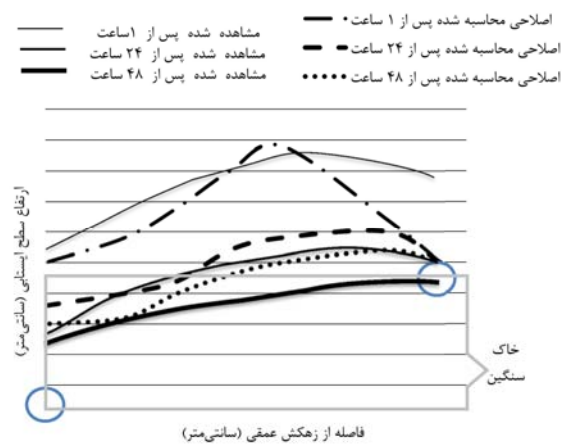
(د) در معادله (۱) تخلخل قابل زهکشی ثابت در نظر گرفته شده است. در حالی که در واقعیت مقدار آن تابعی از ارتفاع بار آبی بوده و نمی‌توان مقدار ثابتی را برای آن در نظر گرفت (۱، ۹). در نظر گرفتن این پویایی برای شرایطی که عمق کارگذاری زهکش‌ها یکسان نباشد دشوار بوده و روابط نظری برای این منظور وجود ندارد.

اصلاح معادله

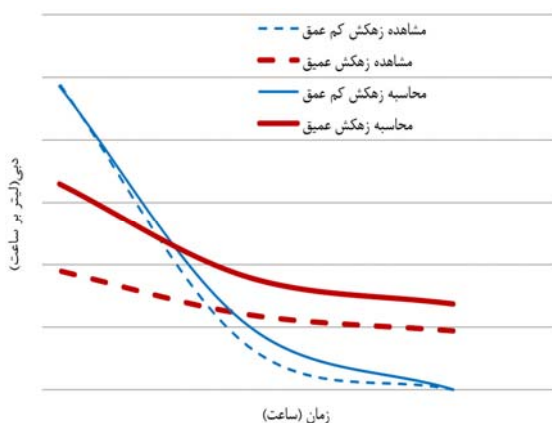
همانطور که در تمامی شکل‌ها مشاهده می‌گردد، بیشترین اختلاف سطح ایستابی بین مقادیر مشاهده شده در آزمایش و مقادیر محاسبه شده از معادله تحلیلی، روی زهکش عمیق است. علت این امر، شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای به‌دست آوردن این معادله می‌باشد. به طوری که با این شرط مرزی،



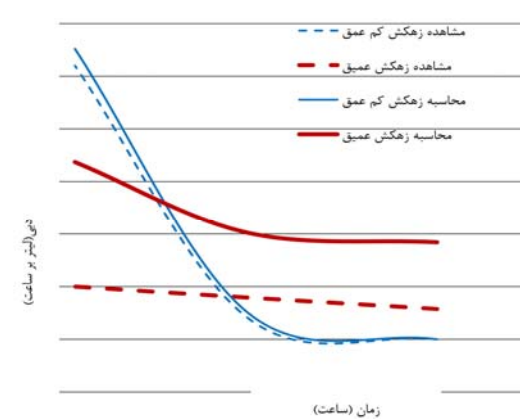
شکل ۷. تغییر سطح ایستابی با زمان ($L=75$ cm)



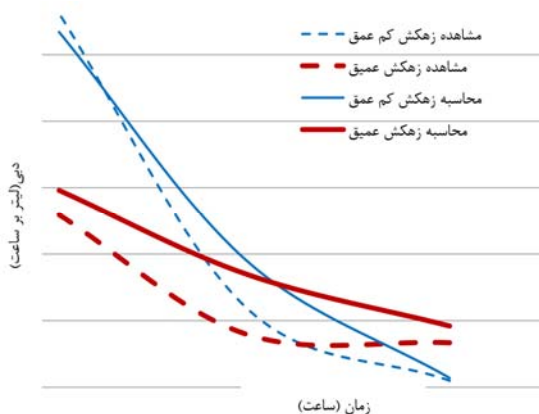
شکل ۸. تغییر سطح ایستابی با زمان ($L=25$ cm)



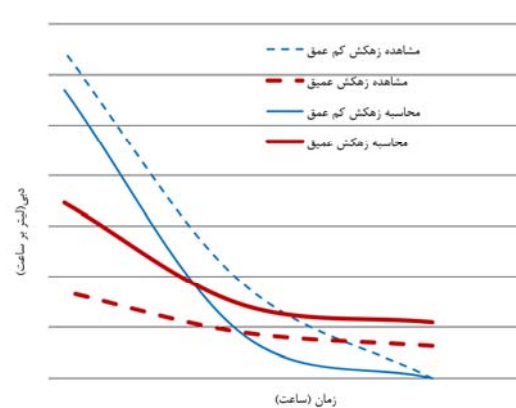
شکل ۹. تغییر دبی زهکش‌های ناهم سطح با زمان ($L=35$ cm)



شکل ۱۰. تغییر دبی زهکش‌های ناهم سطح با زمان ($L=25$ cm)



شکل ۱۱. تغییر دبی زهکش‌ها با زمان ($L=75$ cm)



شکل ۱۲. تغییر دبی زهکش‌ها با زمان ($L=60$ cm)

زهکش‌های پلکانی صورت می‌گیرد. تفاوتی که در بین حالت‌های مختلف آزمایش شده در این تحقیق دیده می‌شود این است که با بیشتر شدن فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق، و همچنین با بیشتر شدن ارتفاع اولیه سطح ایستابی، مدت زمان افت سطح ایستابی افزایش می‌یابد. در واقع فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق بایستی براساس مدت زمان طراحی برای افت سطح ایستابی محاسبه و انتخاب گردد. همانطور که ملاحظه گردید دبی زهکش کم‌عمق از دبی زهکش عمیق بیشتر است. در صورتی که می‌بایست دبی خروجی زهکش عمیق به دلیل بار آبی بیشتری که روی آن قرار دارد، بیشتر باشد. دلیل این امر می‌تواند لایه خاک کم نفوذی باشد که در بین دو ردیف زهکش قرار گرفته است. این لایه خاک باعث کم شدن سرعت حرکت آب در خاک شده و دبی خروجی زهکش عمیق را کاهش داده است. همچنین با افزایش فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق تفاوت چندانی در دبی خروجی از زهکش‌ها مشاهده نگردید و تنها در حالتی که فاصله بین زهکش‌ها ۶۰ سانتی‌متر بود، دبی خروجی هر دو زهکش از حالت‌های دیگر کمی بیشتر بود که این می‌تواند به خاطر ارتفاع اولیه سطح ایستابی در این حالت آزمایش باشد که از حالت‌های دیگر بیشتر در نظر گرفته شده بود. با این حال، در صورتی که در شرایط واقعی چنین حالتی از لایه‌بندی خاک وجود داشته باشد، برای طراحی سیستم زهکشی در دو عمق می‌توان از لوله زهکش با قطر کمتر در ردیف زهکش‌های عمیق استفاده نمود. این کار باعث کمتر شدن هزینه اجرای پروژه‌های زهکشی خواهد شد. به‌طور کلی می‌توان گفت سیستم زهکش پلکانی در مقایسه با سیستم معمولی به‌صورت یک زهکشی کنترل شده عمل می‌کند و مشکل دفع زه‌آب‌های اضافی به محیط زیست کاهش می‌یابد.

کار افتاده و دبی آن به صفر می‌رسد. همچنین، با زیاد شدن فاصله بین زهکش‌های عمیق و کم‌عمق، دبی خروجی از زهکش‌ها تفاوت چندانی نداشته و تنها مقدار کمی افزایش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند ابعاد کوچک مدل و کم بودن اختلاف بین فواصل آزمایش شده باشد. نکته قابل تأمل دیگر که در کلیه حالت‌ها دیده می‌شود، بیشتر بودن دبی زهکش کم‌عمق نسبت به دبی زهکش عمیق است. دلیل این امر می‌تواند لایه خاک کم نفوذی باشد که در بین دو ردیف زهکش قرار گرفته است. این لایه خاک کم نفوذ باعث کم شدن سرعت حرکت آب در خاک شده و روند تخلیه آب را با مشکل مواجه کرده و به تأخیر می‌اندازد. اما زهکش کم‌عمق با دبی خروجی مناسب، باعث تسریع در زهکشی خاک می‌شود. این مسأله نشان می‌دهد که اگر زهکش‌ها در یک عمق قرار می‌گرفتند، تخلیه آب به کندی صورت می‌گرفت. با این حال در صورتی که در مزرعه چنین حالتی وجود داشته باشد، برای طراحی سیستم زهکشی در دو عمق، می‌توان از لوله زهکش با قطر کمتر در ردیف زهکش‌های عمیق استفاده نمود، که کمتر شدن هزینه در اجرای پروژه‌های زهکشی را به همراه دارد.

نتیجه‌گیری

همانطور که در همه حالت‌های آزمایش شده در این تحقیق ملاحظه می‌گردد، نقطه حداکثر ارتفاع سطح آب پس از یک آبیاری با گذشت زمان از نقطه میانی بین دو زهکش به‌طرف زهکش کم‌عمق پیش می‌رود و زمانی که به ارتفاع نصب زهکش کم‌عمق می‌رسد، دبی جریان آب در زهکش کم‌عمق صفر شده و عملاً این زهکش از کار می‌افتد و زهکشی خاک توسط زهکش‌های واقع در عمق یکسان اما با فاصله دو برابر فاصله

منابع مورد استفاده

۱. افلاطونی، م. ۱۳۷۴. اثر عمق سطح ایستابی روی آبدهی ویژه در جریان یک بعدی و دو بعدی هنگام زهکشی. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۶(۱): ۶۳-۷۲.
۲. حمزه، س. ۱۳۸۷. نحوه تغییرات پروفیل سطح ایستابی و دبی خروجی از زهکش‌های پلکانی در یک خاک مطبق. دومین همایش

- ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، ۸ الی ۱۰ بهمن، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. رحیمی خوب، ع. ۱۳۸۵. مدل ریاضی جریان آب در زهکش های نصب شده در دو عمق مختلف. مجموعه مقالات اولین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، ۱۲ الی ۱۴ اردیبهشت، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. عسکری، ت. ۱۳۸۸. رهنمودها و برنامه های کامپیوتری برای برنامه ریزی و طراحی سیستم های زهکشی اراضی. چاپ اول، انتشارات مهرالبنی. شماره ۶۲۷، ۳۶۴ صفحه.
5. Bonsal, R. K. 2014. Analytical solution of linearized Boussinesq equation for unsteady seepage flow in ditch-drain sloping aquifer. *Journal of Hydrogeology and Hydraulic Engineering*. 3:2, <http://dx.doi.org/10.4172/2325-9647.100015>.
 6. Chavez, C., C. Fuentes, F. Brambila and A. Castaneda. 2014. Numerical solution of the advection-dispersion equation: Application to the agricultural drainage. *J. of Agric. Sci. and Technol.* 16: 1375-1388.
 7. Chu, S. T. and D. W. DeBoer. 1976. Field and laboratory evaluation of bi-level drainage theory. *Trans. ASAE* 19(3): 478-481.
 8. Dieleman, P. J. and B. D. Trafford. 1984. *Drainage Testing*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Number 28.
 9. Duke, H. R. 1972. Capillary properties of soils-Influence upon specific yield. *Transactions of the ASAE*, 15(4): 688-691.
 10. Ritzema, H. P. 1994. *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, the Netherlands.
 11. Rupp, D. E. and J. S. Selker. 2005. Drainage of a horizontal aquifer with a power law hydraulic conductivity profile. *Water Resources Research*, Vol. 41, W11422, doi:10.1029/2005WR004241, 2005.
 12. Sabti, N. A. 1989. Linear and nonlinear solution of the Boussinesq equation for the bi-level drainage problem. *Agric. Water Manage.* 16: 269-278.
 13. Singh, R. K., S.O. Prasher, H. S. Chauhan, S. K. Gupta, R. B. Bonnell and C. A. Madramootoo. 1996. An analytical solution of the Boussinesq equation for subsurface drainage in the presence of evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 39(3): 953-960.
 14. Stuyt, L. P. C. M., W. Dierickx and J. M. Beltran. 2005. *Materials for subsurface land drainage systems*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, N. 60.
 15. Upadhyaya, A. and H. S. Chauhan. 2000. An analytical solution for bi-level drainage design in the presence of evapotranspiration. *Agric. Water Manage.* 45: 169-184.
 16. Verma, A. K., S. K. Gupta, K. K. Singh and H. S. Chauhan. 1998. An analytical solution for design of bi-level drainage systems. *Agric. Water Manage.* 37: 75-92.
 17. Zand Parsa, Sh. and A. R. Sepaskhah. 1991. Theoretical evaluation of bi-level drains installation under steady state and radial flow conditions. *Iranian J. of Sci. and Technol.* 15(2): 97-108.
 18. Zavala, M., C. Fuentes and H. Saucedo. 2007. Non-linear radiation in the Boussinesq equation of the agricultural drainage. *J. of Hydrology* 332(3-4): 374-380.

Evaluation of Water Table Fluctuations and Drainage Discharge of Bi-Level Drainage System in a Layered Soil

S. M. A. Maddahzadeh, K. Esmaili* and B. Ghahraman¹

(Received: Aug. 31-2015 ; Accepted: June 11-2016)

Abstract

Bi-level drainage system is a type of underground drainage system in which adjacent drainage lines are installed at different depths. In the Hydraulics Laboratory, Ferdowsi University of Mashhad, a model was built that include a galvanized cube tank, 2 meters in length, width and height of 1 meter. In this model, two rows 20 cm apart from each other drains were installed. As drainage, a pipe of three layers to the outer diameter of 16 mm was made of PVC. In this model, stratified soil was used as a soil layer of low permeability with a hydraulic conductivity of 1.15 cm per hour, thickness of 20 cm soil layer between two light soil layers with 30-cm thickness for bottom layer and 20 cm for the top layer with a hydraulic conductivity of 1.55 cm per hour. For accurate measurement of the water table behavior in the soil at each point of the model, some piezometers, 10 cm far from each other, were installed on the model's floor. After Outfit of model with blow-off valve, experiments with a heavy irrigation for different intervals between 30 and 50 cm in depth were used in drainage and water table elevation values as observed values were extracted from the model. The results show that the values obtained from Upadhyaya and Chauhan (2000) Equation only in small area of water table profiles, which include the area between the two drainage, are consistent with the observed one and time of drop in water table increased with a wider distance between deep and shallow drainage.

Keywords: Bi-level Drainage, Discharge drainage, laminated soil, Water table profiles.

1. Dept. of Water Sci. and Eng., faculty of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

*: Corresponding Author, Email: Esmaili@um.ac.ir