

ارزیابی صحرایی معادلات زهکشی در منطقه رودشت اصفهان

منوچهر ترابی^{۱*}

عضو هیات علمی (دکتر) مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان.

mctorabi@yahoo.com

چکیده

در طرح های زهکشی مناطق خشک و نیمه خشک، برای سهولت کار معمولاً از معادلات جریان همگام برای تخمین فاصله زهکش ها استفاده می شود لیکن، در این قبیل مناطق مسائل در واقع از نوع جریان ناهمگام است. به منظور ارزیابی عملکرد معادلات تخمین فاصله زهکش های زیرزمینی در شرایط جریان ناهمگام، یک آزمایش صحرایی روی شبکه زهکشی موجود در ایستگاه تحقیقات کشاورزی رودشت اصفهان انجام شد. بررسی نیمرخ های سطح ایستابی نشان داد که شکل سطح آب زیرزمینی در حین زهکشی، مسطح می باشد. مقدار ضریب آبگذری مؤثر و درجه غیرهمروندی خاک، که به روش تخلیه آب از گودال اندازه گیری شده بودند، به ترتیب $19/2$ و $1/47$ سانتی متر بر ساعت به دست آمد. تخلخل قابل زهکشی به عنوان یک متغیر و به صورت تابعی از سطح ایستابی با استفاده از مفهوم متوسط سطح ایستابی محاسبه شد. به کمک داده های به دست آمده از اندازه گیری های صحرایی، بیست و سه فاصله خط زهکش به وسیله هشت معادله شامل گلوور، لوتین، وان شیلفگارد، حماد، گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد، دام، باور و وان شیلفگارد، و یانگز تخمین زده شد. نتایج حاکی از آن بود که معادلات یانگز و لوتین (میانگین فواصل زهکش به ترتیب $34/5$ و $30/2$ متر) بهترین، و معادلات گلوور و حماد (میانگین فواصل زهکش به ترتیب $13/2$ و $78/1$ متر) نامطلوب ترین عملکرد را داشتند. سایر معادلات نیز عملکرد ضعیفی را نشان دادند. بدین ترتیب، می توان معادله یانگز یا لوتین را برای تخمین فاصله زهکش ها در مناطقی از اراضی وسیع رودشت که دارای لایه نفوذناپذیر سطحی باشند، پیشنهاد نمود.

واژه های کلیدی: جریان ناهمگام، تخلخل قابل زهکشی، درجه غیرهمروندی، سطح ایستابی، بده زه آب.

۱- آدرس نویسنده مسئول: مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان

* دریافت: خرداد ۱۳۹۲ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۳

مقدمه

در محاسبات بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۷۱ گزارش شد. با توجه به خصوصیات یاد شده برای محل آزمایش، فاصله خطوط زهکش محاسبه شده با استفاده از معادلات باور و وان شیلفگارد و گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد بالاترین دقت را داشتند.

در پژوهشی که اسکگر و همکارانش (۱۹۷۳) انجام دادند چهار معادله زهکشی شامل معادله گلوور (با در نظر گرفتن همگرایی خطوط جریان)، حماد، وان شیلفگارد، و باور و وان شیلفگارد در مزرعه‌ای که فاصله لایه غیرقابل نفوذ و لوله‌های زهکش تا سطح خاک به ترتیب ۱/۴ و ۱ متر بود، مورد بررسی قرار گرفتند. آن‌ها معادلات مذکور را برای دو حالت به کار بردند. در حالت نخست، با محاسبه تخلخل قابل زهکشی به عنوان تابعی از افت سطح ایستابی، ضریب آگذری به دست آمده از طریق نمونه‌های دست‌نخورده ($K=4/2 \text{ cm h}^{-1}$) را در معادلات زهکشی قرار دادند و فاصله زهکش‌ها را تخمین زدند.

در حالت دوم، ابتدا اطلاعات به دست آمده از اندازه‌گیری‌های صحرائی را در هر یک از معادلات قرار دادند و به ازای فاصله معین ۱۵ متر، ضریب آگذری مؤثر را برای هر معادله محاسبه کردند. آن‌گاه، از این ضریب آگذری، مجدداً در معادلات مذکور استفاده کردند و فاصله زهکش‌ها را یک بار به ازای مقدار ثابتی از پارامتر تخلخل قابل زهکشی ($f=0/079 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، و بار دیگر به ازای مقدار متغیری از تخلخل قابل زهکشی (یعنی تابعی از افت سطح ایستابی) محاسبه کردند.

نتایج حاکی از آن بود که در حالت نخست، معادله حماد ضعیف‌ترین عملکرد را داشت، حال آن‌که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین سه معادله دیگر دیده نمی‌شد. در سایر موارد که از ضریب آگذری مؤثر استفاده شده بود، دقت معادلات به ترتیب حماد، وان شیلفگارد، باور و وان شیلفگارد ($C=1$)، و گلوور بود.

با توجه به هزینه سنگین طرح‌های زهکشی، برآورد قابل قبولی از عوامل مؤثر در زهکشی به‌ویژه

در طراحی سامانه‌های زهکشی، چنانچه شدت تغذیه آب زیرزمینی با سرعت تخلیه زه‌آب برابر باشد، به نحوی که ارتفاع سطح ایستابی بین زهکش‌ها نسبت به زمان ثابت بماند، از معادلات موسوم به جریان همگام مانند معادله هوخهات یا توکسوز و کرکهام می‌توان استفاده کرد. در شرایط جریان ناهمگام، ارتفاع سطح ایستابی و نیز بده زه‌آب تابعی از زمان است و در حین زهکشی کاهش می‌یابند. در مناطق خشک که آبیاری مزارع مهم‌ترین عامل صعود سطح ایستابی محسوب می‌شود، بهتر است از معادلات جریان ناهمگام در طراحی فاصله زهکش‌های زیر زمینی استفاده کرد (اسمیدما و همکاران، ۲۰۰۴).

در چند دهه اخیر، کارایی برخی از معادلات زهکشی در شرایط جریان ناهمگام مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. فرنچ و اکالاگان (۱۹۶۶) شش معادله زهکشی شامل معادله گلوور، دام، وان شیلفگارد، باور و وان شیلفگارد، حماد، و لوتین را مورد بررسی قرار دادند. فاصله لایه نفوذ ناپذیر و لوله‌های زهکش تا سطح خاک به ترتیب ۴/۸ و ۰/۹ متر، و فاصله خطوط زهکش ۱۲ متر گزارش شده بود. همچنین، مقادیر تخلخل قابل زهکشی به صورت تابعی از افت سطح ایستابی محاسبه شده بود. نتایج این تحقیق نشان داد که سه معادله وان شیلفگارد، حماد (برای لایه نفوذناپذیر عمیق)، و باور و وان شیلفگارد ($C=1$) بهتر از سایر معادلات، فاصله زهکش‌ها را برآورد کرده بودند.

نوا و توکاک (۱۹۶۹) عملکرد شش معادله زهکشی جریان ناهمگام شامل معادله باور و وان شیلفگارد، گلوور، حماد، لوتین، وان شیلفگارد، و گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد را روی یک سامانه زهکش زیرزمینی بررسی کردند. در آن تحقیق، فاصله لایه غیرقابل نفوذ و خطوط زهکش تا سطح خاک به ترتیب ۹ و ۱/۲ متر، فاصله لوله‌های زهکش از یکدیگر ۴۰ متر و دامنه تغییرات مقادیر تخلخل قابل زهکشی مورد استفاده

منطقه عموماً از سه لایه به شرح زیر تشکیل شده است: از سطح زمین تا عمق تقریباً ۳۵ سانتی‌متری، لوم رسی؛ از عمق ۳۵ سانتی‌متری تا حدود ۱۶۰ سانتی‌متری، رسی؛ از ۱۶۰ سانتی‌متری تا لایه غیرقابل نفوذ، رسی سیلتی.

در زمان آزمایش، زمین فاقد پوشش گیاهی بود. اندازه‌گیری سطح ایستابی و بده زه‌آب در سه نوبت انجام شد. در نوبت اول هفت بار، و در نوبت دوم و سوم به ترتیب نه و ۱۰ بار سطح ایستابی و بده زه‌آب در فواصل زمانی یک ساعته اندازه‌گیری شدند. یک روز قبل از هر اندازه‌گیری، اقدام به آبیاری زمین در محدوده آزمایش می‌شد تا آب زیرزمینی به نزدیکی سطح زمین برسد. یک روز بعد از آبیاری، و پس از حصول اطمینان از شروع مرحله افت سطح ایستابی، اقدام به اندازه‌گیری سطح آب در چاهک‌های مشاهده‌ای و بده زه‌آب خروجی از زهکش‌های T2 و T3 می‌شد.

از روش تخلیه آب از گودال^۲ برای تعیین درجه غیرهمروندی و ضریب آبگذری مؤثر خاک (میانگین هندسی ضرائب آبگذری افقی و عمودی) استفاده شد. شرح کامل این روش در مقاله باور و رایس آمده است (۱۹۸۳). تخلخل قابل زهکشی یکی از پارامترهای مورد نیاز برای تخمین افت سطح ایستابی در شرایط جریان ناهمگام می‌باشد. غالباً در معادلات زهکشی جریان ناهمگام برای سهولت محاسبات، یک مقدار ثابت برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود، در حالی که مقدار این پارامتر ثابت نیست بلکه بستگی به فاصله سطح ایستابی تا زمین دارد. محققین بسیاری به اهمیت این نکته اشاره نموده و راه حل‌هایی ارائه کرده‌اند (اسکگر و همکاران، ۱۹۷۸؛ پاندی و همکاران، ۱۹۹۲؛ گوپتا و همکاران، ۱۹۹۴). در این پژوهش، از یک روش صحرایی استفاده شد که تخلخل قابل زهکشی را مستقل از نوع معادله زهکشی و به صورت تابعی از سطح ایستابی و بده زه‌آب محاسبه می‌کند. شرح این روش به تفصیل در مقاله اسکگر و همکاران (۱۹۷۸) آمده است.

فاصله زهکش‌ها، نقش به‌سزایی در موفقیت طرح خواهد داشت. از سوی دیگر، معادلات متعددی که تاکنون بر اساس پیش‌فرض‌های متفاوت برای تعیین فاصله زهکش‌های زیرزمینی در شرایط جریان ناهمگام ارائه شده‌اند، هر کدام برای وضعیت خاصی کارآیی دارند. بنابراین، لازم است قبل از انتخاب هر معادله‌ای برای طراحی فاصله زهکش‌ها، نسبت به دقت معادله مورد نظر در شرایط موجود اطمینان حاصل کرد. هدف از این تحقیق، بررسی تعدادی از معادلات رایج در طراحی فاصله زهکش‌های زیرزمینی در شرایط جریان ناهمگام و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها برای اراضی منطقه رودشت اصفهان بود.

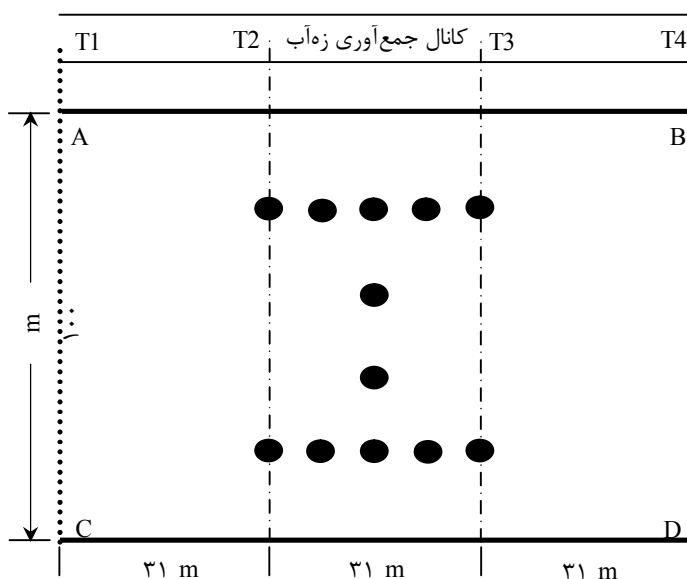
مواد و روش‌ها

الف) منطقه آزمایش

محل آزمایش زمینی به وسعت تقریبی یک هکتار واقع در اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی منطقه رودشت در ۶۵ کیلومتری شرق اصفهان بود. موقعیت زهکش‌های زیرزمینی و چاهک‌های مشاهده سطح ایستابی در شکل (۱) نشان داده شده است. یک دیواره نفوذناپذیر نسبت به جریان آب، در مجاورت ضلع CD از سطح زمین تا عمق حدود ۳/۵ متر احداث شده بود به نحوی که از نفوذ آب‌های زیرزمینی بالادست به‌داخل محدوده زهکشی (سطح محصور بین ABCD) جلوگیری می‌کرد. فاصله خطوط زهکش از یکدیگر ۳۱ متر و عمق نصب آن‌ها نسبت به سطح زمین ۱/۴ متر بود. طول لوله‌های زهکش ۱۰۰ متر و جنس آن‌ها از نوع پلی اتیلن موج‌دار به قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر بود. دور تا دور لوله‌ها پوششی از سنگ‌ریزه به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر قرار داشت که در ترانشه‌هایی به عرض ۷۰ سانتی‌متر کار گذاشته شده بودند.

شناسایی لایه‌بندی خاک با حفر شش پروفیل تا عمق چهار متری از سطح خاک انجام شد. فاصله لایه غیرقابل نفوذ تا سطح زمین بین ۲/۸ تا ۳/۷ متر در نوسان بود که به‌طور متوسط ۳/۴ متر در نظر گرفته شد. خاک

² Pit Bailing



شکل ۱- مشخصات محل آزمایش: T1 تا T4 زهکش‌های زیرزمینی، و دایره‌های توپر، چاهک‌های مشاهده‌ای هستند

هم‌چنین، اندازه‌گیری عمق سطح ایستابی به‌وسیله یک دستگاه گالونومتر مجهز به کابل مدرج انجام گرفت.

حسب درصدی از تعداد کل (بیست و سه اندازه‌گیری) ثبث گردید. مقایسه عملکرد معادلات زهکشی بر مبنای ۳۰ درصد تغییرات (یعنی تعداد یا درصد دفعاتی که مابه‌التفاوت یادشده کمتر یا مساوی ۹/۳ متر بود) انجام گرفت.

(ب) معادلات زهکشی

هشت معادله زهکشی جریان ناهمگام شامل معادله گلوور (گزارش شده توسط پراکاش، ۲۰۰۴)، معادلات لوتین برای سطح ایستابی مسطح و بیضوی (۱۹۵۹)، حماد (۱۹۶۲ و ۱۹۶۴)، وان شیلفگارد (۱۹۶۳)، گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد (وان شیلفگارد، ۱۹۶۳)، باور و وان شیلفگارد (۱۹۶۳)، دام (گزارش شده توسط وان بیرز، ۱۹۷۹) و یانگز (۱۹۸۵) مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه‌ای از فرضیات و ویژگی‌های معادلات یاد شده در جدول (۱) آورده شده است.

همچنین، برای محاسبه عمق معادل لوله‌های زهکشی از روش ارائه شده توسط وان در مولن و وسلینگ (۱۹۹۱) استفاده شد. برای تحلیل عملکرد معادلات زهکشی، مابه‌التفاوت فاصله محاسبه شده و فاصله واقعی زهکش‌ها، نسبت به ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درصد فاصله حقیقی لوله‌های زهکش (به ترتیب معادل ۳/۱ متر،

نتایج و بحث

درجه غیر همروندی و ضریب آبگذری اشباع خاک، که به روش تخلیه آب از گودال اندازه‌گیری شدند، به ترتیب ۱/۴۷ و ۱۹/۲ سانتی‌متر بر ساعت بدست آمد. علت بالا بودن ضریب آبگذری خاک این است که در منطقه آزمایش به مدت چندین سال کشاورزی انجام نشده بود و شوری نیمرخ خاک در زمان انجام این آزمایش‌ها در حدود ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده است (فیضی، ۱۳۷۲). همچنین، بر مبنای روش ارائه شده توسط وان درمولن و وسلینگ (۱۹۹۱)، عمق معادل برای فاصله حقیقی زهکش‌ها ۲/۵ متر محاسبه شد.

قرار گرفتند با فرض ناچیز بودن تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند. بنابراین، اندازه‌گیری بده زه‌آب و سطح ایستابی در فاصله زمانی کوتاه باعث می‌شود خطای ناشی از تاثیر تبخیر از سطح خاک به حداقل برسد و دقت نتایج حاصله به طور نسبی بهبود یابد.

نکته دیگری که باید در اینجا به آن اشاره کرد این است که روش به‌کار گرفته شده برای محاسبه تخلخل قابل زهکشی اولاً، مستقل از معادلاتی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ثانیاً، برخلاف روش‌های آزمایشگاهی که در حجم بسیار کوچکی از خاک انجام می‌شوند، در این روش از تمام سطح منطقه آزمایش (یک هکتار) استفاده شده‌است. بنابراین، انتظار می‌رود نتایج نشان داده شده در شکل (۲) از دقت نسبی مطلوبی برخوردار باشند.

در شکل (۲)، مقادیر محاسبه شده‌ی تخلخل قابل زهکشی در مقابل افت سطح سطح ایستابی ترسیم شده‌اند. نکته مهمی که در ارتباط با محاسبه تخلخل قابل زهکشی باید به آن اشاره نمود، فاصله زمانی اندازه‌گیری‌های زه‌آب خروجی و سطح ایستابی است. در این پژوهش، زه‌آب خروجی و عمق سطح ایستابی به فاصله هر یک ساعت اندازه‌گیری می‌شد.

این بازه زمانی کوتاه به دو دلیل انتخاب شد. نخست آن‌که، در معادلات گلوور و دام هر اندازه تفاوت بین ارتفاع سطح ایستابی در آغاز و پایان یک بازه زمانی بزرگ‌تر باشد، فرض ثابت بودن عمقی که در آن جریان افقی به‌طرف زهکش‌ها صورت می‌گیرد، اعتبار خود را بیش‌تر از دست می‌دهد و موجب افزایش خطا در تخمین فاصله زهکش‌ها خواهد شد (وان شیلفگارد، ۱۹۷۴). ثانیاً، کلیه معادلاتی که در این تحقیق مورد مطالعه



شکل ۲- رابطه تخلخل قابل زهکشی با عمق سطح ایستابی نسبت به زمین

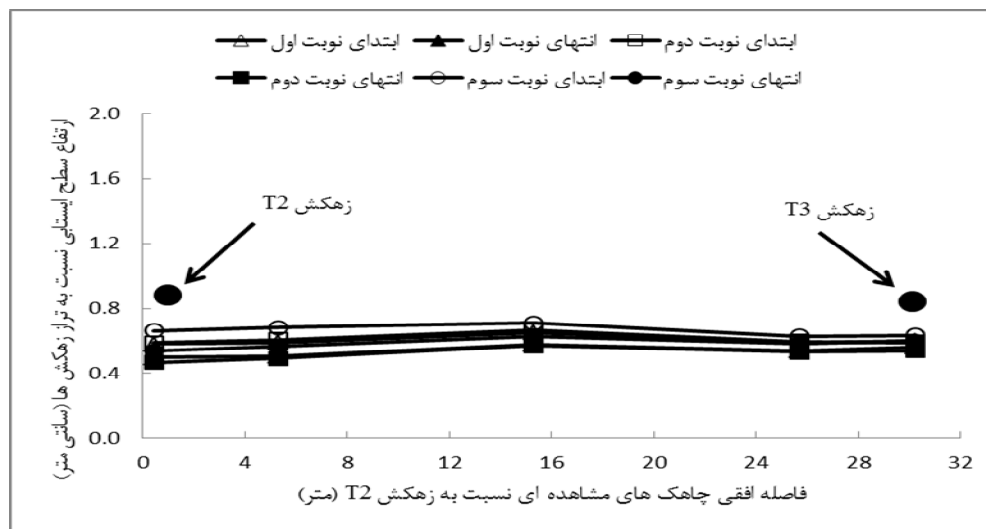
جدول ۱- خلاصه ای از فرضیات و ویژگی های معادلات زهکشی جریان ناهمگام

نام معادله	فرضیات و ویژگی ها
گلوور	سطح ایستابی اولیه مسطح است. میانگین وزنی ضریب آبگذری خاک یا خاک های واقع بر روی لایه غیرقابل نفوذ، به عنوان ضریب آبگذری نیمرخ خاک محسوب می شود.
لوتین	حرکت آب در خاک، متناسب با گرادیان آب زیرزمینی و عمق خاک اشباع واقع بین سطح ایستابی و لایه غیرقابل نفوذ است. همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها در نظر گرفته نشده است. در هر زمان، میزان جریان ورودی در واحد طول زهکش، تناسب مستقیمی با ارتفاع سطح ایستابی بین دو زهکش و ضریب آبگذری اشباع خاک دارد.
حماد	میزان جریان ورودی به درون زهکش، مستقل از قطر لوله زهکش است. در دو شبکه زهکشی با فواصل مختلف، مشروط بر آن که ارتفاع سطح ایستابی بین زهکش ها در هر دو شبکه مساوی باشد، میزان جریان ورودی به داخل زهکش ها مستقل از فاصله زهکش ها خواهد بود. موقعیت لایه غیرقابل نفوذ در نظر گرفته نشده است. در نزدیکی وسط دو زهکش، گرادیان قائم پتانسیل سرعت در امتداد خطوط عمودی مار بر محور زهکش، به تدریج به سمت صفر میل می کند.
وان شیلفگارد	فشار در سطح ایستابی، معادل فشار جو است. در نزدیکی زهکش جریان به صورت شعاعی است. در یک فاصله ای بالای زهکش ها، خطوط جریان تقریباً موازی بوده و حرکت آب به صورت عمودی صورت می گیرد. در حین افت، شکل سطح ایستابی مسطح است. همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها، لحاظ شده است. برخلاف معادلات دام و گلوور، ضخامت لایه آبدار متغیر فرض شده است. سطح ایستابی اولیه مسطح است.
گلوور اصلاح شده	شکل اولیه سطح ایستابی به صورت سهمی فرض شده است. همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها، لحاظ شده است.
توسط وان شیلفگارد	زهکش نمی تواند روی لایه غیرقابل نفوذ قرار بگیرد.
باور و وان شیلفگارد	بده زه آب تخلیه شونده مابین دو زهکش در واحد سطح، ثابت فرض شده است. همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها، لحاظ شده است.
دام	در حین افت، شکل سطح ایستابی بین زهکش ها تغییری نمی کند. همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها، لحاظ شده است. ضخامت لایه اشباع ثابت در نظر گرفته شده است.
یانگز	سطح ایستابی به شکل سهمی درجه چهارم است. خاک همگن فرض شده است.
	همگرایی خطوط جریان در نزدیکی زهکش ها، لحاظ شده است. فرض شده است جریان ناهمگام از مجموعه ای متوالی از جریان های همگام تشکیل شده است. در هر زمان، افت سطح ایستابی در تمام منطقه زهکشی با شدت یکسانی صورت می گیرد.

نیمرخ های سطح ایستابی

سطح ایستابی بین زهکش های زیرزمینی را در خاک های رسی مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که غیرهمروند بودن خاک باعث می شود که سطح ایستابی در فاصله بین دو زهکش، شکل نسبتاً مسطحی به خود بگیرد. مشابه همین نتیجه، در پژوهش فرنچ و اکالاگان (۱۹۶۶) هم گزارش شده است.

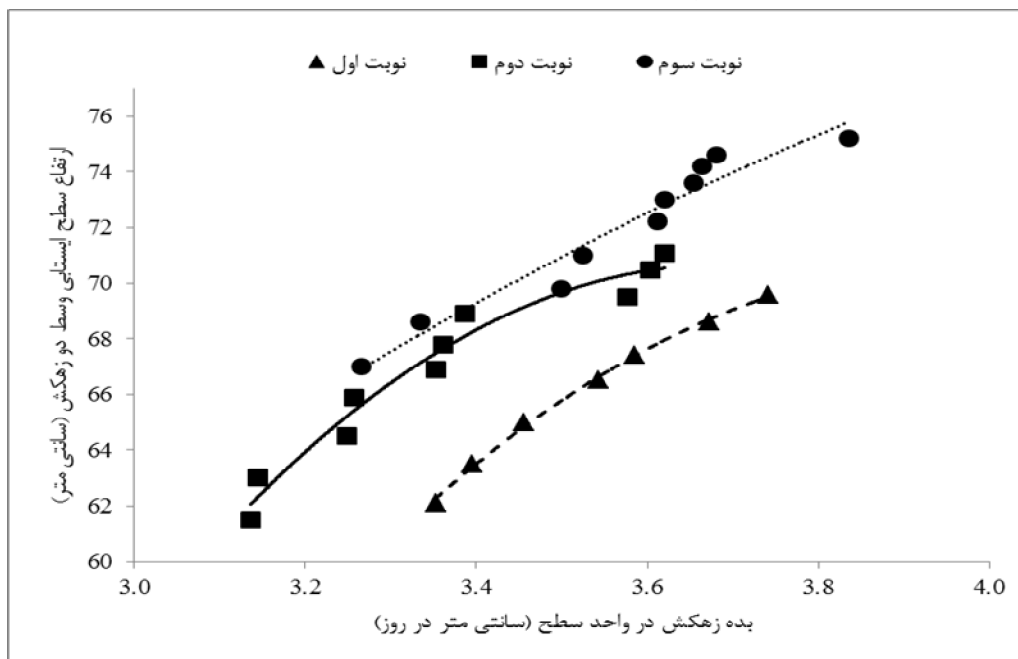
شکل (۳) نیمرخ سطح ایستابی را در ابتدا و انتهای اندازه گیری ها برای نوبت اول، دوم، و سوم آبیاری نشان می دهد. اگرچه در ترسیم این نیمرخ ها از مقیاس ۱۰ : ۱ استفاده شده است، با این حال شکل آن ها بیان گر این واقعیت است که در هر سه نوبت، سطح ایستابی بین دو زهکش مسطح بوده است. گریسر و تاد (۱۹۹۱) شکل



شکل ۳- نیمرخ سطح ایستابی در ابتدا و انتهای اندازه گیری سه نوبت آبیاری

رسم شده‌اند. با انجام رگرسیون غیرخطی از نوع چند جمله ای درجه دوم بین مقادیر بده زه آب و ارتفاع سطح ایستابی، ضریب تعیین برای نوبت اول تا سوم به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۶ و ۰/۹۵ بدست آمد. ضمناً، نموداری متشکل از مقادیر "حاصل ضرب ضریب آبگذری در ارتفاع سطح ایستابی بین زهکش‌ها" در مقابل "بده زهکش در واحد طول" رسم شد. شیب خط مذکور که در حقیقت ضریب ثابت در معادله لوتین محسوب می‌شود، ۰/۳۴ به دست آمد.

رابطه بین ارتفاع سطح ایستابی با بده زهکش های زیرزمینی به وسیله محققین بسیاری هم در آزمایشگاه و هم در شرایط صحرائی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده از این مطالعات حاکی از آن است که در خاک های غیر همروند، یک رابطه غیر خطی از نوع چند جمله ای درجه دوم بین دو عامل یاد شده وجود دارد (هوفمن، ۱۹۶۳؛ هوفمن و شواب، ۱۹۶۴). مقادیر بده زهکش در مقابل ارتفاع سطح ایستابی وسط زهکش‌ها برای نوبت‌های اول تا سوم در شکل (۴)



شکل ۴- تغییرات بده زهکش‌ها در ارتباط با کاهش ارتفاع سطح ایستابی

جدول ۲- فواصل زهکش محاسبه شده با استفاده از معادلات زهکشی جریان ناهمگام و تغییرات آن‌ها نسبت به فاصله واقعی زهکش‌ها

نام معادله	میانگین فاصله زهکش‌ها (متر)	ضریب تغییرات (%)	%۱۰				%۲۰		%۳۰		>%۳۰
			تعداد ^۱	%	تعداد	%	تعداد	%	تعداد	%	
گلوور	۱۳/۲	۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳	۱۰۰
لوتین (سطح ایستابی مسطح)	۳۰/۲	۲۳	۹	۳۹	۱۵	۶۵	۱۸	۷۸	۵	۲۲	۲۲
لوتین (سطح ایستابی بیضوی)	۳۸/۵	۲۳	۶	۲۶	۱۲	۵۲	۱۶	۷۰	۷	۳۰	۳۰
حماد (سطح ایستابی کم عمق)	۷۸/۱	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳	۱۰۰
وان شیلفگارد	۴۸/۹	۱۲	۰	۰	۰	۰	۱	۴	۲۲	۹۶	۹۶
گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد	۴۸/۸	۱۲	۰	۰	۰	۰	۱	۴	۲۲	۹۶	۹۶
باور و وان شیلفگارد (C=۱)	۴۵/۸	۱۱	۰	۰	۱	۴	۳	۱۳	۲۰	۸۷	۸۷
دام	۲۰/۰	۱۰	۰	۰	۰	۰	۵	۲۲	۱۸	۷۸	۷۸
یانگز	۳۴/۵	۱۲	۱۰	۴۳	۱۸	۷۸	۲۱	۹۱	۲	۹	۹

^۱ نسبت به فاصله حقیقی زهکش‌ها (۳۱ متر)؛ ^۲ و ^۳ به ترتیب، تعداد و درصد مواردی که تفاوت فاصله محاسبه شده از فاصله حقیقی مساوی یا کمتر از ۱۰٪ فاصله حقیقی زهکش‌ها بوده است.

عملکرد معادلات زهکشی

الف - معادلات یانگز و لوتین

این دو معادله، نسبت به سایر معادلات عملکرد بهتری داشته‌اند. بررسی جدول (۲) نشان می‌دهد که هر چند میانگین فواصل تخمین زده شده با استفاده از معادله لوتین (سطح ایستابی مسطح) قدری بهتر از میانگین بدست آمده از معادله یانگز است معذک، ضریب تغییرات فاصله زهکش‌ها در معادله لوتین تقریباً دو برابر ضریب تغییرات فاصله زهکش‌ها در معادله یانگز است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که روند تخمین فاصله زهکش با استفاده از معادله یانگز در مقایسه با معادله لوتین از نوسانات کمتری برخوردار است. علاوه بر این، بررسی جدول (۲) نشان می‌دهد که از نظر دقت در تخمین فاصله زهکش‌ها، معادله یانگز در ۹۱ درصد موارد فاصله زهکش‌ها را با اختلافی مساوی یا کمتر از ۳۰ درصد نسبت به فاصله حقیقی برآورد کرده، در حالی که دقت معادله لوتین در حد ۷۸ درصد بوده است. در مورد معادله لوتین برای سطح ایستابی بیضوی، همان‌گونه که قبلاً هم انتظار می‌رفت، تفاوت آن با معادله‌ای که برای سطح ایستابی مسطح ارائه شده بود، تنها در ضریب $\frac{4}{\pi}$ است. بدون شک، مسطح بودن سطح

ایستابی شکل (۳)، دلیل قاطعی بر عملکرد بهتر معادله لوتین برای سطح ایستابی مسطح می‌باشد.

ب- معادلات دام، باور و وان شیلفگارد (C=۱)، گلوور اصلاح شده توسط وان شیلفگارد، وان شیلفگارد

معادله دام فاصله زهکش‌ها را ۳۵ درصد کمتر، و سه معادله دیگر فاصله زهکش‌ها را بطور متوسط ۵۵ درصد بیشتر از مقدار واقعی برآورد کردند. علاوه بر این، میزان دقت سه معادله اخیر تقریباً به یک میزان بوده است جدول (۲). انتخاب ضریب C=۱ برای معادله باور و وان شیلفگارد به این دلیل بود که سطح ایستابی بین زهکش‌ها در تمام اندازه‌گیری‌ها مسطح بوده است شکل (۳).

ج- معادلات گلوور و حماد

این دو معادله، ضعیف‌ترین عملکرد را بین سایر معادلات داشته‌اند. معادله گلوور همواره فاصله زهکش‌ها را کمتر، و معادله حماد بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است جدول (۲). همچنین با توجه به میانگین‌های محاسبه شده برای فاصله‌های زهکش، کوچک‌ترین فاصله زهکش توسط معادله گلوور (۱۳/۲ متر، کمتر از نصف فاصله واقعی) و بزرگ‌ترین فاصله توسط معادله حماد (۷۸/۱ متر، بیشتر از دو برابر فاصله واقعی) به دست آمده

را برای سامانه‌های زهکشی که روی لایه غیر قابل نفوذ سطحی بنا می‌شوند، توصیه نمی‌کنند. از نتایج به‌دست آمده استنباط می‌شود از میان هشت معادله زهکشی که در منطقه‌ای با وسعت محدود و ویژگی‌های معین خاکشناسی آزموده شدند، معادلات یانگز و لوتین (سطح ایستابی سطح) قادرند فاصله زهکش‌ها را به‌نحو مطلوبی تخمین بزنند. با این حال، به خاطر تغییرات گسترده‌ای که ممکن است در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (بافت و ساختمان خاک، میزان شوری، درجه غیرهمروندی، ضریب آب‌گذری، فاصله لایه غیرقابل نفوذ تا سطح زمین) یک منطقه وجود داشته باشد، پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های مشابهی در نقاط دیگری از منطقه وسیع رودشت انجام شود تا بتوان با جمع‌بندی نتایج حاصله، یک یا چند معادله مناسب را برای طراحی شبکه زهکشی کل منطقه انتخاب کرد.

است جدول (۲). نکته‌ای که در مورد معادله حماد باید به آن اشاره کرد، حساسیت این معادله نسبت به فاصله لایه نفوذناپذیر تا سطح زمین است. فرنچ و اکالاگان (۱۹۶۶) عملکرد معادله حماد برای لایه نفوذناپذیر عمیق را به‌کمک اندازه‌گیری‌های صحرایی آزمودند و نتایج به‌دست آمده از این معادله را رضایت‌بخش ارزیابی کردند. این در حالی است که بر اساس گزارش نوا و توکاک (۱۹۶۹)، هر دو معادله حماد (برای لایه نفوذناپذیر سطحی و عمیق) فاصله زهکش‌ها را در خاکی با لایه نفوذناپذیر سطحی، بسیار بزرگ‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده بودند. در مطالعات جامعی که اسکگز و همکاران (۱۹۷۳) انجام دادند به این نتیجه رسیدند که معادله حماد برای لایه نفوذناپذیر عمیق، صرفاً برای سامانه‌های زهکشی که لایه غیرقابل نفوذ در عمق نسبتاً زیادی قرار داشته باشد، می‌تواند نتایج قابل قبولی ارائه دهد. همین پژوهشگران، استفاده از معادله حماد مربوط به لایه نفوذناپذیر سطحی

فهرست منابع

۱. فیضی، م. ۱۳۷۲. بررسی تاثیر کیفیت و کمیت آب در شوری زدایی خاکهای منطقه رودشت اصفهان. مجله خاک و آب. جلد ۸. شماره ۱. صفحات ۱۶ تا ۳۴
2. Smedema, L. K., Voltman, W. F. and Rycroft, D. W. 2004. Modern Land Drainage: Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems. A. A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands.
3. French, B. E. and O'Callaghan, J. R. 1966. A field test of drain spacing equations for agricultural land, Journal of Agricultural Engineering Research. 11 (4): 282-295.
4. Nwa, E. U. and Twocock, J. G. 1969. Drainage design theory and practice. Journal of Hydrology, 9: 259-276.
5. Skaggs, R. W., Kriz, G. J. and Bernal, R. 1973. Field evaluation of transient drain spacing equations. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 16: 590-595.
6. Bouwer, H. and Rice, R. C. 1983. The pit bailing method for hydraulic conductivity measurement of isotropic or anisotropic soil. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 26 (5): 1435-1439.
7. Skaggs, R. W., Wells L. G. and Ghate S. R. 1978. Field evaluation of transient drain spacing equations. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 21: 522-528.
8. Pandey, R. S., Bhattacharya, A. K., Singh, O. P. and Gupta S. K. 1992. Drawdown solutions with variable drainable porosity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 118 (3): 382-396.

9. Gupta, R. K., Bhattacharya, A. K. and Chandra, P. 1994. Unsteady drainage with variable drainage porosity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 120 (4): 703-715.
10. Prakash, A. 2004. *Water resources engineering: Handbook of essential methods and design*. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
11. Luthin, J. N. 1959. The falling water table in tile drainage. II: Proposed criteria for spacing tile drains. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 2 (1): 44-45.
12. Hammad, H. Y. 1962. Depth and spacing of tile drain systems. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, 89 (IR1): 15-21.
13. Hammad, H. Y. 1964. Design of tile drainage for arid regions. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, 90 (IR3): 1-15.
14. van Schilfgaard, J. 1963. Design of tile drainage for falling water table. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, 89 (IR2): 1-11.
15. Bouwer, H. and van Schilfgaard, J. 1963. Simplified method of predicting fall of water table in drained land. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 6 (4): 288-291, 296.
16. van Beers, W. F. J. 1979. *Some nomographs for the calculation of drain spacings*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
17. Youngs, E. G. 1985. A simple drainage equation for predicting water table drawdowns. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31: 321-328.
18. van der Molen, W. H. and Wesseling, J. 1991. A solution in closed form and a series solution to replace the tables for the thickness of the equivalent layer in Hooghoudt's drain spacing formula. *Agricultural Water Management*, 19: 1-16.
19. van Schilfgaard, J. 1974. Non-steady flow to drains. p. 245-270. In J. van Schilfgaard (ed.) *Drainage for Agriculture*. American Society of Agronomy, Monograph No. 17, Wisconsin.
20. Grismer, M. E. and Tod, I. C. 1991. Drainage of clay overlaying artesian aquifer. I: Hydrologic assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 117 (2): 255-270.
21. Luthin, J. N. and Worstell, R. V. 1959. The falling water table in tile drainage. III: Factors affecting the rate of fall. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 2 (1): 45-47, 51.
22. Hoffman, G. J. 1963. *Tile flow from a stratified anisotropic soil with a falling water table*. MSc. Thesis, Ohio State University.
23. Hoffman, G. J. and Schwab, G. O. 1964. Tile spacing prediction based on drain outflow. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 7 (4): 444-447.