

## شبیه‌سازی حل تحلیلی مسئله یانگز در مقایسه با حل عددی و نتایج آزمایشگاهی نشت جریان ترانشه‌ای

حمید زارع ایبانه<sup>1\*</sup>، زهرا مشارع<sup>2</sup> و علی افروزی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 1395/8/25 تاریخ پذیرش: 1395/11/30

### چکیده

در این پژوهش حل تحلیلی و عددی جریان ماندگار زهکشی در سه ترانشه مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و مثلثی ارائه شد. حل تحلیلی به کمک نگاشت همدیس و تئوری پتانسیل مختلط و حل عددی در برنامه SEEP/W به روش اجزا محدود صورت گرفت. همچنین با طراحی یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه مقدار جریان خروجی از لوله زهکش در پنج عمق 10، 20، 30، 40 و 50 سانتی‌متر هر سه ترانشه اندازه‌گیری شد. به طوری که بیشینه تخلیه در شرایط آزمایش در ترانشه‌های مستطیلی، نیم‌دایره‌ای 40 سانتی‌متر و در ترانشه مثلثی 30 سانتی‌متر به دست آمد. دقت نتایج از اختلاف بین دو دبی بعد نشت از ترانشه  $(q_s/k_s)$  برای حل تحلیلی و عددی با مقادیر آزمایشگاهی در قالب دو آماره جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) سنجیده شد. مقدار RMSE حل تحلیلی در ترانشه مثلثی 0/048، نیم‌دایره 0/061، مستطیلی 0/071 با ضریب تعیین 0/99، 0/98 و 0/98 و در حل عددی به ترتیب 0/045، 0/056، 0/041 با ضریب تعیین 0/87، 0/97 و 0/97 به دست آمد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی تحلیلی و عددی با آزمایشگاهی نشان داد که هر دو روش توانستند با دقت بالایی جریان ترانشه‌ای را شبیه‌سازی کنند. با این حال دقت حل عددی در آزمایش حاضر به دلیل در نظر گرفتن عمق ماندابی و شکل واقعی لوله زهکش می‌تواند بیش از حل تحلیلی باشد. در حل تحلیلی لحاظ برخی ساده‌سازی‌ها و فرضیات مانند ناچیز بودن اثر عمق ماندابی روی خاک و به صورت خط در نظر گرفتن محیط دایره‌ای لوله می‌تواند عامل کم‌تر بودن دقت کار باشد. ضمن آن که هیدرولیک جریان ورودی از منافذ به لوله زهکش در حل تحلیلی و حل عددی نسبت به روش آزمایشگاهی لحاظ نشده است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان ترانشه‌ای، زهکشی، شکل ترانشه، شبکه جریان، عمق نصب لوله، SEEP/W

### مقدمه

میدانی باعث برقراری جریانی موسوم به جریان ترانشه‌ای می‌شود. غالب بودن جریان ترانشه‌ای در هنگام آبیاری و بارندگی‌های شدید، جریان زهکشی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Tod and Grismer., 1991). حرکت ذرات معلق به موازات جریان ترانشه‌ای سبب ایجاد حفره‌های زیرزمینی و نشست زمین، انباشت رسوبات درون لوله و کاهش آبدهی زهکش‌ها می‌گردد (ضیا تبار احمدی، 1390). به اعتقاد یانگز در صورتی که خاک ترانشه دارای هدایت هیدرولیکی بیش از خاک اصلی باشد، زهکش‌های زیرزمینی در هدایت جریان ترانشه‌ای نقش زهکشی سطحی را دارند (Youngs, 1982). بنابراین چنین عملکردی می‌تواند مشابه با عملکرد زهکش فرانسوی<sup>4</sup> باشد که حجم زیادی از آب سطحی را در مدت زمان کوتاهی تخلیه می‌نماید (Peuker et al., 2016, Smith et al., 2008). تاد و گریزمر با استفاده از یک مدل عناصر محدود، جریان زهکشی در یک خاک رسی واقع بر یک سفره آرتزین را نتیجه جریان آب زیرزمینی، نفوذ عمقی و جریان ترانشه‌ای گزارش نمودند (Tod and Grismer., 1991).

بهره‌برداری پایدار از زمین‌های کشاورزی با زهکشی ضعیف در برخی موارد نیازمند احداث سیستم‌های زهکشی، آگاهی از شرایط جریان، خصوصیات فیزیکی خاک و مصالح به کار رفته برای پوشش‌های زهکشی می‌باشد (Stuyt and Dierickx., 2006). حفر ترانشه برای نصب و جایگذاری لوله‌های زهکشی موجب دست‌خوردگی خاک و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک به واسطه جایگزینی با پوشش‌های زهکشی می‌گردد (Schwab and Kirkham., 1951; Tod and Grismer., 1991). بزرگ‌تر بودن هدایت هیدرولیکی خاک ترانشه نسبت به خاک مجاور در شرایط

- 1- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- 2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- 3- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

\* - نویسنده مسئول: (Email: zareabyaneh@gmail.com)

0/85 متر به مقدار 26 و 30 درصد نسبت به عمق 0/25 متر بود. رضی و همکاران (1391) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی نشان دادند کاهش عمق کارگذاری لوله‌های زهکشی از 0/85 به 0/25 متر موجب کاهش 20 درصدی عمق جریان زهکشی گردید. آرنولد مقدار جریان زهکشی از لوله زهکشی نصب شده در دو عمق 0/86 متر و 1/2 متر و فاصله 23 متر در یک مزرعه با خاک شن‌لومی طی دو سال مورد بررسی قرار داد (Arnold, 2004). نتایج ایشان نشان داد مقدار جریان در زهکش نزدیک به سطح در سال اول 37 درصد و در سال دوم 26 درصد کم‌تر از مقدار جریان در عمق پایین‌تر بود. مازندرانی‌زاده (1395) نیز با مطالعه شبکه زهکشی سلمان فارسی در خوزستان نشان داد در نظر گرفتن اهداف متعدد در یک سیستم زهکش می‌تواند عمق نصب لوله‌ها را عمق‌های زیاد به عمق‌های کم محدود نماید. در مطالعه‌ای دیگر یانگز به‌منظور بررسی اثر شکل ترانشه (با مقاطع مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و مثلثی) و عمق نصب لوله زهکش بر میزان جریان ورودی به لوله در شرایط ماندابی، حل تحلیلی ارائه نمود. نتایج نشان داد، ترانشه‌های مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و مثلثی به ترتیب بیش‌ترین شدت جریان خروجی از لوله زهکشی را دارند. به‌طوری که با افزایش عمق لوله میزان خروجی افزایش و با نزدیک شدن لوله به کف ترانشه از شدت تخلیه کاسته شد (Youngs., 1982). راه‌حل‌های تقریبی برای یافتن مقدار جریان از لوله‌های زهکشی توسط روش‌های عددی به‌دلیل دسترسی آسان به رایانه‌های سرعت بالا و با کمک نرم‌افزارهای تخصصی ارائه شده است. اصلانی و همکاران (1389) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و عددی، تغییرات کمی و کیفی زه‌آب را تحت تأثیر تغییرات عمق و فاصله زهکش‌ها بررسی کرده و رابطه‌ای جهت تعیین عمق و فاصله زهکش‌ها در خاک‌های همگن ارائه نمودند. رضی (1390) به‌منظور یافتن عمق بهینه نصب زهکش‌ها و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی با رویکرد کاهش حجم زه‌آب از مدل فیزیکی تانک شن و برنامه SEEP/W استفاده نمود. نتایج حاکی از تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی براساس تفاوت میزان خطا بود. به‌طوری که ضریب تعیین ( $R^2$ ) نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بین 0/92 تا 0/98 به‌دست آمد. به‌همین ترتیب ستوده‌نیا و جعفری (1395) نیز از برنامه فوق در بررسی زهکش حائل بر سطح ایستابی شوره‌زار قزوین استفاده نمودند. مقدار ضریب تعیین مدل‌سازی بیش‌تر از 0/91 به‌دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی بود.

بررسی منابع نشان داد در زمینه روش‌های عددی و تحلیلی محاسبه جریان ترانشه‌ای به لوله‌های زهکش مطالعات محدودی انجام شده است. در تحقیق حاضر از روش‌های حل تحلیلی و عددی برای بررسی تأثیر عمق نصب لوله زهکش در سه شکل ترانشه مستطیل، نیم‌دایره و مثلثی بر شدت جریان ترانشه‌ای پرداخته شد.

می‌دهد تفاوت هدایت هیدرولیکی خاک ترانشه و خاک مجاور در زمین‌های سنگین رسی و زمین‌های با زهکشی ضعیف بیش‌تر است (Jacobsen and Kjaer., 2007). چنان‌چه محدودیت خاصی از لحاظ نوع خاک و فشردگی لایه‌های پروفیل خاک وجود نداشته باشد، هدایت هیدرولیکی خاک ترانشه نسبت به خاک مجاور بیش‌تر باشد، جریان عمودی می‌تواند به‌راحتی و با شدت بیش‌تری وارد لوله زهکشی شود (Jacobsen and Kjaer., 2007). به‌طوری که تغییرات زمانی شدت جریان ترانشه، به‌طور تقریبی با شدت جریان از یک ستون عمودی خاک اشباع قابل تخمین است. شاه‌نظری و همکاران (1392) نشان دادند حذف جریان ورودی به لوله‌های زهکش از نیمه بالایی لوله از طریق قرار دادن یک لایه پلاستیک بر سطح رویی پوشش زهکشی سبب کاهش 12 درصدی جریان زهکشی و 74 درصدی رسوبات به داخل لوله زهکشی گشت که بدین ترتیب می‌توان بیان داشت در هیدرولیک جریان ترانشه‌ای مؤثر بوده است. کوری نیز با ارائه چندین حل تحلیلی برای شرایط جریان ترانشه‌ای در محیط خاک اشباع از مواد نفتی نشان داد تحرک مواد نفتی می‌تواند در اثر افزایش فشار منفذی خاک و یا غیراشباع شدن خاک از مواد نفتی اتفاق افتد (Corey., 1986). دنیس و ترافورد با استفاده از مدل فیزیکی آزمایشگاهی و تکنیک هودوگراف<sup>1</sup>، حالت‌های مختلف کارگذاری لوله زهکشی در خاک رسی با پوشش معدنی را در شرایط ماندابی و اعماق متفاوت نصب بررسی نمودند. نتایج نشان داد فاصله لوله‌های دارای پوشش، 100 تا 120 درصد نسبت به حالت فاقد پوشش افزایش داشت (Dennis and Trafford., 1975). دیریکس عملکرد سیستم زهکشی زیرزمینی را با کاربرد سه پوشش معدنی، آلی و مصنوعی (Synthetic) در محیط ترانشه مورد بررسی قرار داد (Dierickx, 1993). ایشان ضمن تأکید بر مزایا و معایب دو پوشش معدنی و آلی اذعان کرد که کاربرد پوشش مصنوعی می‌تواند وضعیت نامناسب نصب و هزینه بالای پوشش‌های معدنی و فساد و تجزیه‌پذیری پوشش‌های آلی را جبران نماید. تائو و همکاران با در نظر گرفتن لوله زهکش پوشش‌دار مستقر در ترانشه پر شده با مواد نفوذپذیر در مقایسه با لوله زهکش پوشش‌دار و بدون پوشش نشان دادند شدت جریان زهکشی 2 تا 3 برابر افزایش می‌یابد (Tao et al., 2016). از سوی دیگر عمق لوله‌های زهکش نصب شده در ترانشه‌ها و مزارع می‌تواند بر مقدار تخلیه زهکشی تأثیر داشته باشد. در این راستا ستوده‌نیا و همکاران (1393) حجم آب خروجی از یک لوله زهکش نصب شده در سه عمق 0/25، 0/5 و 0/85 متری مخزنی به ابعاد  $1 \times 0/5 \times 1$  متر حاوی خاکی با بافت شن‌لومی را اندازه‌گیری نمودند. نتایج بیان‌کننده افزایش حجم آب زهکشی در عمق 0/5 و

1 - هودوگراف (Hodograph) سرعت جریان در جهت‌های افقی (u) و عمودی (v) را به‌صورت مختلط (u-iv) ترسیم می‌نماید.

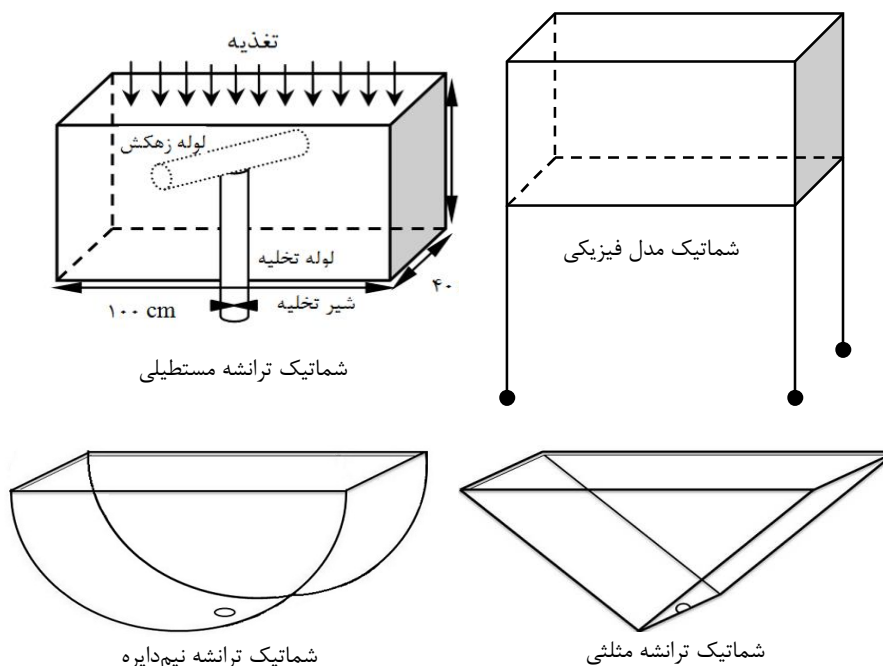
ضخامت 0/5 سانتی متر و نسبت 90 درصد اندازه منافذ پوشش به 90 درصد اندازه ذرات خاک کم تر از 5 استفاده شد. سطح منافذ زهکشی مطابق نشریه شماره 368 سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور برای هدایت بیش تر و بهتر جریان حداقل 800 میلی متر مربع در هر متر لوله است. از طرفی با عنایت به مسدود بودن یک سر لوله در این آزمایش نسبت به شرایط واقعی سطح منافذ زهکش بیش تر در نظر گرفته شد. ضمن آن که برای کاهش مقاومت جریان و عملکرد بهتر هیدرولیکی لوله در هدایت جریان، سطح منافذ با عنایت به برخورداری لوله از مقاومت مکانیکی، بیش تر در نظر گرفته شد. ترانشه ها با خاک شن ساختمانی پر شدند که منحنی دانه بندی آن با استفاده از الک های دانه بندی و بافت آن با توجه به وجود ذرات با قطر کم تر از 0/074 میلی متر (رس و سیلت) به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه فلزی و تخلخل خاک به روش حجمی به دست آمد. میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ )، به روش آزمایشگاهی بار ثابت در 3 تکرار تعیین گردید (Klute and Dirksen., 1986). علاوه بر خصوصیات فوق مقادیر ضرایب یکنواختی ( $C_u$ ) و انحنا ( $C_c$ ) خاک حاصل از منحنی دانه بندی نیز در جدول 1 آمده است.

به منظور بررسی دقت نتایج و دست یابی به عمق بهینه با حداکثر تخلیه از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شد.

## مواد و روش ها

در این پژوهش از سه ترانشه مستطیل، نیم دایره و مثلثی فلزی به طول 100 سانتی متر، عرض 40 سانتی متر و ارتفاع 55 سانتی متر در آزمایشگاه مدل های زهکشی دانشگاه بوعلی سینا استفاده شد. انتخاب اندازه و شکل ترانشه ها مطابق ابعاد حل نظری مسئله یانگز (1982) برای انجام آزمایشات بود (شکل 1). مقدار 5 سانتی متر از ارتفاع ترانشه در قالب ارتفاع آزاد در نظر گرفته شد که 5 میلی متر آن به عنوان بار آبی بود. هر ترانشه قابلیت جای گذاری در محفظه مکعب مستطیل طراحی شده برای آزمایشات را داشت. محفظه مکعب مستطیل از جنس ورق آهن به ضخامت 2 میلی متر بود که بر روی پایه ای به ارتفاع 70 سانتی متر نصب گردید.

کف و دیواره های جانبی ترانشه ها نفوذناپذیر و تنها معبر خروج جریان، لوله زهکش گالوانیزه T شکل دو سر مسدود، به قطر 5 و طول 39 سانتی متر بود. بر روی لوله زهکش، 28 روزنه به قطر 1 سانتی متر در چهار ردیف طولی ایجاد و برای جلوگیری از ورود ذرات خاک، از پوشش منسوجات پلیمرهای نفتی تحت عنوان ژئوتکستایل با



شکل 1- شمای مدل فیزیکی با ترانشه های مستطیلی، نیم دایره و مثلثی

جدول 1- خصوصیات فیزیکی خاک

بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم مخصوص ظاهری خاک خشک ( $\rho_b$ ) ( $gr/cm^3$ )	تخلخل (%) ( $n$ )	هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) ( $m/day$ )	ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) (-)	ضریب انحنا ( $C_c$ ) (-)
شنی	91/34	4/52	4/14	1/8	30	2/884	7/35	0/51

ناحیه‌ای از صفحه مختلط  $z$  با حفظ جهت و زوایای تابع و تعریف تابع پتانسیل مختلط به صفحه مختلط دیگر بهره گرفت. برای این منظور مرز  $AC$  در شکل 2 الف، با مرزهای تقریبی  $CC_1, C_1C_2, C_2C_3, C_3C_n$ ، در شکل 2 ب، جایگزین شد. تبدیل شوارتز-کریستوفل بیانگر رابطه نگاشت همدیس بین نیم‌ترانشه متقارن  $ABC$ ، در صفحه  $z=x+iy$  از شکل 2 ب، با نیمه بالایی صفحه کمکی  $t=r+is$  در شکل 3، است. به‌گونه‌ای که رأس‌های نیم‌ترانشه، بر روی قطر یک نیم‌دایره با شعاع بی‌نهایت در نیمه بالایی صفحه کمکی  $t$ ، در امتداد دو محور افقی  $x$  و  $y$  قایم  $\pi$  خواهد بود (Harr., 1962). شکل 3 حاصل ایجاد یک برش اشعاب در چند ضلعی  $ABC_1C_2...C_n$  از نقطه  $C$ ، در صفحه  $z$  و تغییر شکل اضلاع آن به خط مستقیم در امتداد محور حقیقی از  $t=-\infty$  تا  $t=+\infty$  در صفحه  $t$  است.

مطابق شکل‌های 2 ب و 3، نقطه  $A$  با زاویه داخلی  $\alpha\pi$  و  $D=z$  دارای  $t=0$  نقطه  $B$  با زاویه داخلی  $\pi/2$  و  $z=0$  دارای  $t=1$ ، نقطه  $P$  با زاویه داخلی  $\pi$  و  $z=-i(s-r)$ ، دارای  $t=t_p$  نقطه  $O$  با زاویه داخلی  $\pi$  و  $z=-is$  دارای  $t=t_o$  است. به‌همین ترتیب نقطه  $C$  با زاویه داخلی  $\gamma\pi$  و  $z=-id$  دارای  $t=\pm\infty$ ، نقطه  $C_1$  با  $z=x_1+iy_1$  دارای  $t=t_1$ ، نقطه  $C_2$  با  $z=x_2+iy_2$  دارای  $t=t_2$ ، نقطه  $C_3$  با  $z=x_3+iy_3$  دارای  $t=t_3$  و نقطه  $C_n$  با  $z=x_n+iy_n$  دارای  $t=t_n$  می‌باشد. شکل مرسوم تبدیل شوارتز کریستوفل برای نگاشت به‌صورت رابطه 2 است.

$$z = \int \frac{Mdt}{t^{\alpha-1}(t-1)^{\frac{1}{2}}(t-t_1)^{\gamma_1-1}(t-t_2)^{\gamma_2-1} \dots (t-t_n)^{\gamma_n-1}} \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $M$  مقدار ثابت انتگرال،  $n$  تعداد ضلع‌های (رئوس) چند ضلعی،  $z_n$  مقادیر رئوس چند ضلعی در صفحه  $Z$  و مقادیر  $\alpha, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  و ... زوایای مربوط به رئوس چند ضلعی است. با انتگرال‌گیری از معادله 2، ارتباط بین پلان‌های فیزیکی ( $z$ ) و پتانسیل مختلط ( $w$ ) حاصل می‌گردد. با استفاده از این نگاشت در نهایت مقدار دبی نشست ( $q_s$ )، از معادله 3، به‌دست آمد که توضیحات بیش‌تر در یانگز (1982) ارائه شده است (Youngs., 1982).

$$\begin{cases} q_s = \frac{\pi k_s (s-r)}{\cos^{-1} \left[ \frac{t_p(1-t_o)}{t_p-t_o} \right]^{\frac{1}{2}}} & s \neq d \\ q_s = \frac{\pi k_s (d-r)}{\cos^{-1} [t_p]^{\frac{1}{2}}} & s = d \end{cases} \quad (3)$$

در ترانشه مستطیل شکل لوله زهکش براساس عمق ترانشه ( $d$ ) و فاصله لوله نسبت به سطح ترانشه ( $s$ ) در پنج عمق مساوی  $s=0/2d, s=0/4d, s=0/6d, s=0/8d$  و  $s=d$  (کف ترانشه) نصب گردید. انتخاب ابعاد مدل فیزیکی، اعماق نصب و قطر لوله زهکشی بر اساس حل نظری مسئله یانگز (1982) بود. به منظور اطمینان از اشباع بودن خاک قبل از هر اندازه‌گیری، طی دو مرحله پروفیل خاک به مدت 24 ساعت با برقراری جریان تدریجی از کف اشباع شد. منبع تغذیه به آب شهر متصل و در ارتفاع 250 سانتی‌متر سطح زمین قرار داشت. ضمن آن که منبع مجهز به دو شیر کنترل برای ثابت نگه‌داشتن سطح آب مخزن و شدت جریان خروجی برای تثبیت عمق ماندابی 5 میلی‌متر بر روی سطح خاک بود. سنجش شدت آب خروجی در هر بار کارگذاری لوله زهکش در گام‌های زمانی 15 دقیقه تا ثابت شدن مقدار دبی زه‌آب خروجی ادامه یافت. برای ترانشه‌های نیم‌دایره و مثلثی نیز تمامی مراحل فوق تکرار شد.

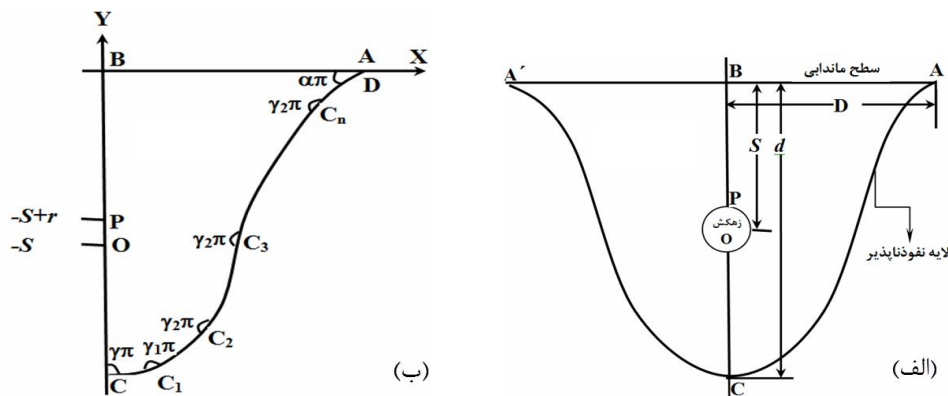
برای بررسی جریان ترانشه‌ای، پارامترهای فیزیک جریان مطابق شکل 2 الف، بود و دبی خروجی از یک لوله زهکش به عمق  $s$ ، در ترانشه‌ای به ارتفاع  $d$ ، با فرض برقراری جریان ماندابی از سطح 'ABA'، اندازه‌گیری شد (Youngs., 1982). رژیم جریان دو بعدی ماندگار، مرزهای جانبی و تحتانی نفوذ ناپذیر و سرعت جریان آب در نیم‌رخ خاک در حدی بود که قانون دارسی اعتبار لازم را دارد. جریان دو بعدی در صفحه فیزیکی  $z(x+iy)$  به‌صورت تابع مختلط  $f(z)=f(x+iy)=u(x,y)+iv(x,y)$  در دو جهت  $x$  و  $y$  است که با توجه به قانون دارسی می‌توان مؤلفه‌های  $u$  و  $v$  را به‌صورت رابطه 1 بازنویسی نمود.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \phi}{\partial x} = -k_s \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ v &= \frac{\partial \psi}{\partial y} = -k_s \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

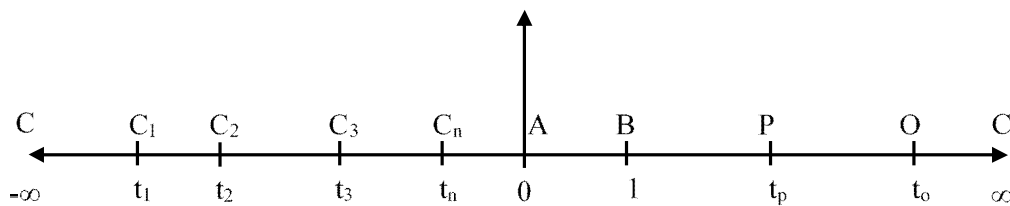
که در آن  $h$  بار آبی بر حسب  $m$  و  $k_s$  هدایت هیدرولیکی بر حسب  $ms^{-1}$  پتانسیل سرعت و نماینده محور اعداد حقیقی،  $\psi$  تابع جریان بر حسب  $m^2s^{-1}$  و نماینده محور اعداد مختلط است.

حل تحلیلی مسئله ارائه شده فوق به روش اعداد مختلط علاوه بر ترانشه‌های چند ضلعی منظم در حل مسایل نشست به نهرهای زهکشی و نشست از کانال‌های خاکی انتقال آب با لحاظ جریان جانبی نیز کاربرد دارد (Youngs., 1982؛ Afruzi et al., 2014؛ مجتهدی و فغفور مغربی، 1389). برای شکل‌های غیر چند ضلعی و چند ضلعی‌های نامنظم می‌بایست از نگاشت همدیس<sup>1</sup> برای مربوط ساختن

1 - Conformal mapping



شکل 2- مقطع ترانشه حل تحلیلی یانگز (1982 الف) شرایط مرزی و فیزیک مسئله (ب) صفحه فیزیکی z



شکل 3- صفحه کمی t

$$\begin{cases} \phi = \phi_p & y = 0 \\ k_s \frac{\partial \phi}{\partial n} = -q_s & y = s \end{cases} \quad (5)$$

در معادله 5، مقدار پتانسیل در مرز بالا،  $n$  بردار خارجی عمود بر مرز و  $q_s$  دبی نشت از لوله زهکش است.

با تقسیم ناحیه جریان به المان‌های مثلثی شکل، مقدار  $\phi$  در گره‌های هر المان با اجرای برنامه SEEP/W براساس تعداد المان بهینه به شرط عدم تغییر در دقت نتایج به موازات افزایش المان‌ها محاسبه شد.

وضعیت جریان نشت در ترانشه‌ها براساس ترسیم شبکه جریان برای هر یک از اعماق نصب لوله در محیط برنامه SEEP/W بررسی شد. همچنین نمودارهای بی‌بعد مقادیر دبی نشت ( $q_s/k_s$ ) متناظر با عمق نصب ( $s/d$ ) ترسیم گردید. در این پژوهش برای بی‌بعدسازی متغیر عمق، مؤلفه ارتفاع ترانشه که در هر سه مقطع پارامتر ثابتی است به کار گرفته شد. برای یافتن معادله مناسب توصیف کننده  $q_s/k_s$  اقدام به ایجاد ماتریسی از نتایج حل تحلیلی، حل عددی و حل آزمایشگاهی شد. درایه‌های ستون اول ماتریس نسبت عمق نصب بی‌بعد و درایه‌های ستون دوم تا دهم آن دبی بی‌بعد نشت از ترانشه بود. از بین مدل‌های رگرسیونی برازش یافته، بهترین مدل براساس بالاترین دقت و بیش‌ترین ضریب تعیین در مقایسه با نتایج

علاوه بر حل تحلیلی جریان آب به لوله زهکش، از برنامه SEEP/W برای حل عددی و مدل‌سازی جریان ترانشه‌ای نیز استفاده شد. برنامه SEEP/W یکی از برنامه‌های توانمند در حل عددی مسایل ساده و پیچیده مربوط به نشت جریان آب در محیط متخلخل خاک به روش اجزا محدود است. شبیه‌سازی حرکت آب در محیط متخلخل براساس معادله لاپلاس است که فرم دو بعدی آن به صورت رابطه 4 است (Geo-Slope., 2009).

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

که در آن،  $h$  پتانسیل ماتریک آب در خاک (متر)،  $k_x$  و  $k_y$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در جهت افقی  $x$  و جهت عمودی  $y$  (متر بر ثانیه) می‌باشد.

شرایط مرزی بالادست، با عنایت به اشباع بودن جریان و اطمینان از وجود بار ثابت آبی 5 میلی‌متر روی سطح خاک (پس از حدود 4 ساعت از شروع آزمایش و برابری جریان ورودی و خروجی از مدل)، هر سه ترانشه از نوع دریکله بود. به همین ترتیب شرط مرزی پایین دست از نوع نیومن یا جریان ثابت با پتانسیل فشاری صفر بود. بیان ریاضی شرایط مرزی فوق در معادله 5 آمده است.

(1982) و حل عددی برنامه SEEP/W نیز با فرض دوعبده بودن جریان می‌باشد.

شکل 5 نشان می‌دهد در همه ترانشه‌ها کم‌ترین مقدار زه‌آب تخلیه شده به عمق نصب اول ( $s/d=0/2$ ) تعلق دارد و با افزایش عمق نصب، آب بیش‌تری از لوله زهکش تخلیه گردیده است. به‌گونه‌ای که روند افزایشی آن برای ترانشه مثلثی از حداقل مقدار ( $q_s/k_s=0/551$ ) در  $s/d=0/2$  تا حداکثر مقدار ( $q_s/k_s=0/858$ ) در  $s/d=0/6$  ادامه یافته است. به‌همین ترتیب در ترانشه نیم‌دایره این افزایش از  $q_s/k_s=0/576$  تا  $q_s/k_s=1/114$  و در ترانشه مستطیلی هم از  $q_s/k_s=0/627$  تا  $q_s/k_s=1/191$  به‌ازای  $s/d=0/2$  تا  $s/d=0/8$  برقرار است. حرکت آب در خاک براساس اختلاف پتانسیل کل (هیدرولیکی) روی لوله زهکش و سطح ترانشه و شیب هیدرولیکی است. شکل 5 نشان می‌دهد در عمق نصب‌های کم یک ترانشه مشخص، کم‌تر بودن اختلاف پتانسیل کل به‌موازات بزرگی خطوط جریان سبب کم‌تر بودن گرادیان هیدرولیکی نسبت به مقدار متناظر آن در عمق‌های نصب بیش‌تر و به‌تبع بزرگ‌تر از واحد بودن  $q_s/k_s$  است. از طرفی بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد افزایش عمق لوله‌های زهکش زیرزمینی سبب افزایش بار هیدرولیکی، مشارکت بیش‌تر جریان از زیر لوله زهکش، تراکم خطوط جریان شعاعی و کاهش مقاومت جریان می‌شود (نوذی و همکاران، 1395 و ستوده‌نیا و همکاران، 1392). پس از حداکثر شدن جریان ترانشه‌ای، علی‌رغم گسترش جریانات عمودی به عمق، به‌دلیل نقش محدود کننده لایه غیر قابل نفوذ در ورود جریان زه‌آب از زیر خط تراز زهکش، روند افزایشی زه‌آب رو به کاهش می‌گذارد (شکل 5). مطابق شکل 5 تغییرات زه‌آب خروجی غیرخطی است و مدل برازش یافته به داده‌ها نیز غیرخطی بودن آن را در همه اعماق هر سه ترانشه تأیید می‌کند که هم‌راستا با مقادیر اندازه‌گیری شده از مدل آزمایشگاهی است. براساس نتایج حاصل از برخی تحقیقات نظیر شیری و همکاران (1389) در خصوص اثر مقاومت ورودی بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان به لوله‌های زهکشی و ریمیدیس و دیریکس در خصوص بررسی‌های میدانی کارایی پوشش‌های زهکشی غیرخطی بودن مقدار زه‌آب تخلیه شده در اعماق مختلف لوله‌های زهکش را تأیید می‌کنند. در عین حال برازش معادلات غیرچند جمله‌ای موجب افزایش ضریب تعیین نشد و معادلات چند جمله‌ای با درجات بالاتر نیز سبب افزایش جزئی ضرایب تعیین گردد (Rimidis and Dierickx, 2004). لیکن در این پژوهش افزایش ضریب تعیین به‌واسطه معادلات چند جمله‌ای با درجات بالاتر مزیت خاصی ایجاد نکرد. با توجه به کم بودن تعداد ضرایب معادلات چند جمله‌ای درجه دو نسبت به درجات بالاتر بهتر است جهت برآورد دبی نشت معادله چند جمله‌ای درجه دو مورد استفاده قرار گیرند. بهترین مدل برازشی یک مدل چند جمله‌ای درجه دو بود که از برازش به جفت داده‌های ستون اول با داده‌های ستون دوم تا دهم در قالب  $Y=ax^2+bx+c$

آزمایشگاهی انتخاب شد. معیار سنجش خطا تعیین اختلاف بین مقادیر  $q_s/k_s$  در مقابل  $s/d$  به‌ازای تمام نقاط استقرار لوله زهکش، در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر سه ترانشه بود. بنابراین دقت نتایج حل عددی و حل تحلیلی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی از دو آماره ضریب تعیین ( $R^2$ ) و مقدار میانگین جذر مربعات خطای ( $RMSE$ )<sup>1</sup> مطابق رابطه‌های 6 و 7 استفاده شد.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_s}{k_s} - \bar{q}_s \right)_{i,o} \left( \frac{q_s}{k_s} - \bar{q}_s \right)_{i,p} \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{q_s}{k_s} - \bar{q}_s \right)_{i,o}^2 \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_s}{k_s} - \bar{q}_s \right)_{i,p}^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{q_s}{k_s} \right)_{i,p} - \left( \frac{q_s}{k_s} \right)_{i,o} \right]^2} \quad (7)$$

که در آن‌ها مقادیر با اندیس  $o$  مقادیر مشاهده شده بی‌بعد در استقرار نام، مقادیر با اندیس  $p$  مقادیر شبیه‌سازی شده بی‌بعد در استقرار نام، مقادیر دارای نشانک - مقادیر متوسط و  $n$  تعداد استقرار لوله زهکشی می‌باشد.

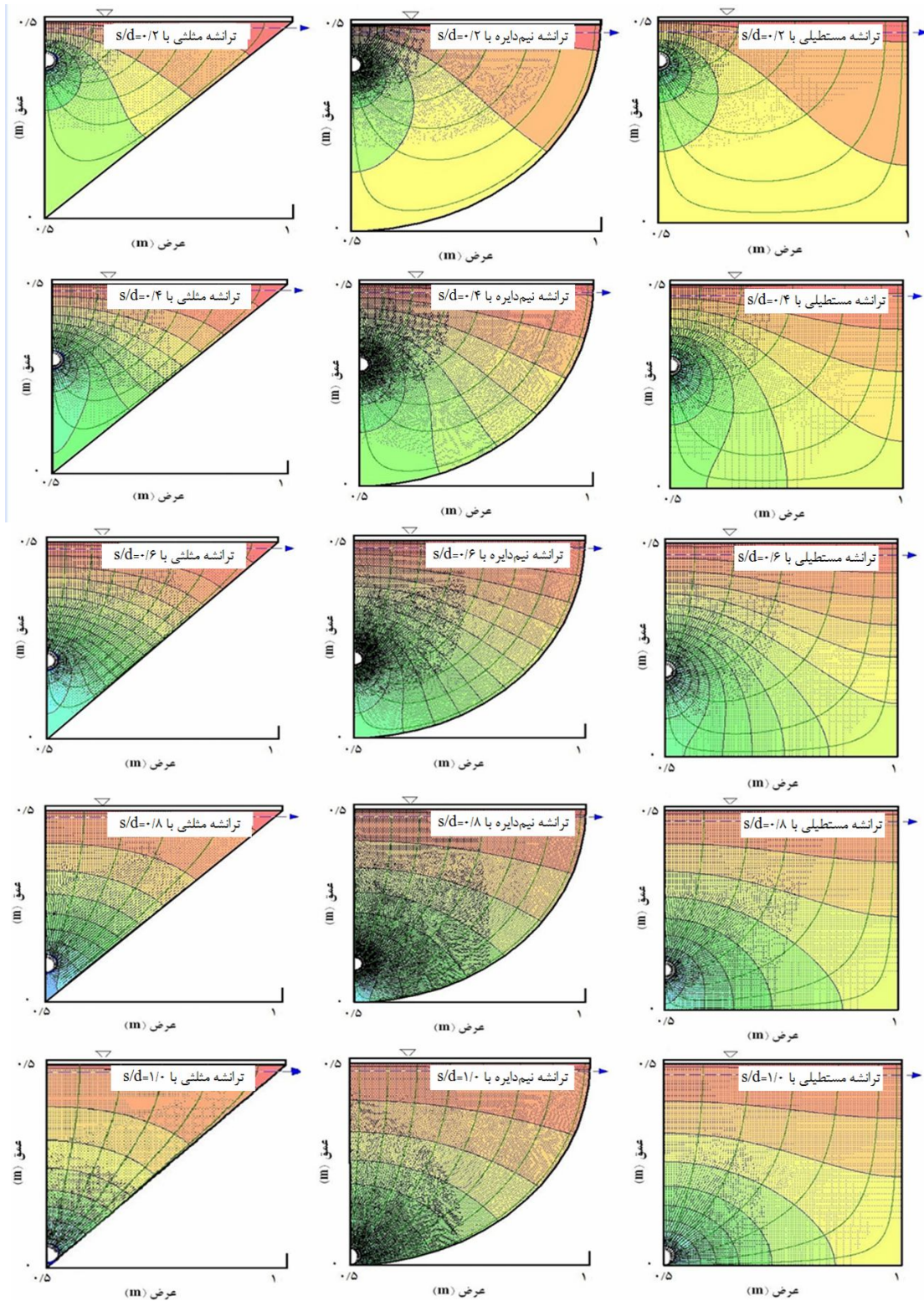
## نتایج و بحث

در شکل 5 تغییرات شدت جریان زهکشی بی‌بعد ( $q_s/k_s$ ) در محور عمودی متناظر با مقادیر عمق نصب بی‌بعد ( $s/d$ ) در محور افقی آمده است. این شکل برای هر سه ترانشه به دو روش حل تحلیلی یانگز و حل عددی در برنامه SEEP/W به همراه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌باشد (Youngs, 1982). به همین ترتیب معادلات تبیین کننده تغییرات در قالب معادلات چند جمله‌ای درجه 2، به همراه دو آماره میانگین جذر مربعات خطای ( $RMSE$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آمده است. علاوه بر معادله چند جمله‌ای درجه دو و آماره‌های خطاسنجی، وضعیت خطوط جریان در اعماق مورد مطالعه نیز در شکل 4 آورده شد. همان‌گونه که شکل 4 نشان می‌دهد وضعیت شبکه جریان در مقاطع مختلف و در عمق‌های متفاوت از یک مقطع مشابه متفاوت است. به‌گونه‌ای که طول خطوط جریان در  $s/d=0/2$  مقطع مثلثی متفاوت از سایر عمق‌های همین ترانشه و به‌همین ترتیب در  $s/d=0/2$  ترانشه مثلثی نیز متفاوت از خطوط جریان ترانشه‌های نیم‌دایره و مستطیلی است. وجود چنین شرایطی موبد دوعبده بودن وضعیت جریان در همه اعماق و مقاطع جریان و تفاوت در مقادیر دبی خروجی از لوله است. حل تحلیلی یانگز

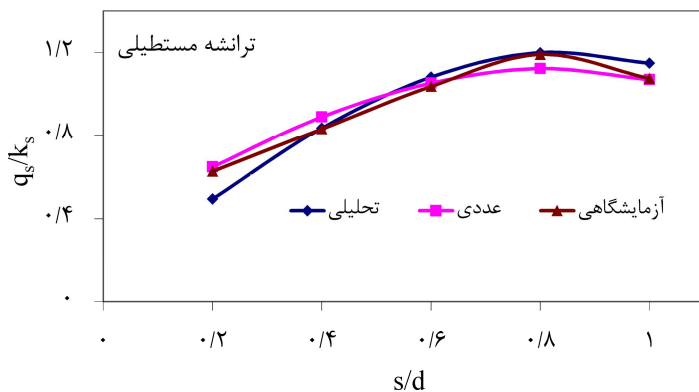
1 - Root Mean Square Error

درصد و مقدار RMSE معادلات برآورد نسبت جریان زه آب در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی کم‌تر از 0/071 است.

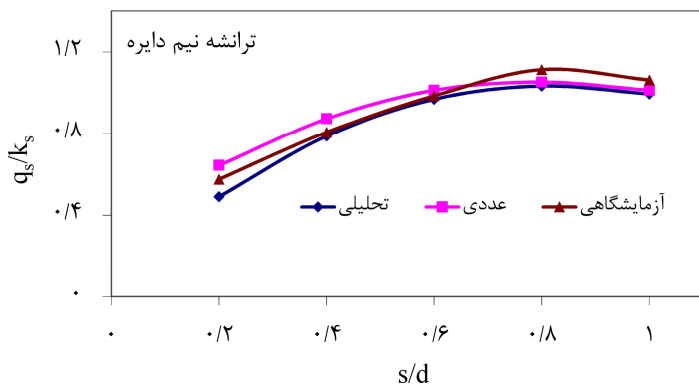
به‌دست آمد. ضریب تعیین معادلات پیشنهادی در همه ترانشه‌ها برای حل تحلیلی و حل عددی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی بالای 86



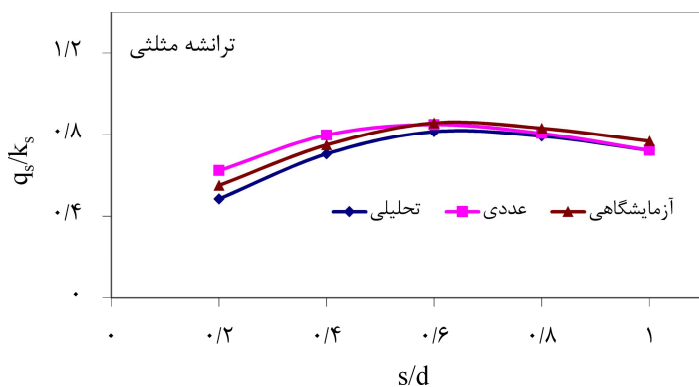
شکل 4- شبکه دو بعدی جریان حل عددی برنامه SEEP/W در اعماق و مقاطع مختلف ترانشه



روش	معادله	R <sup>2</sup>	RMSE
تحلیلی	$Y = -1.63x^2 + 2.79x - 0.005$	0/97	0/071
عددی	$Y = -1.22x^2 + 2.002x + 0.29$	0/97	0/041
آزمایشگاهی	$Y = -1.24x^2 + 2.11x + 0.23$	--	--



روش	معادله	R <sup>2</sup>	RMSE
تحلیلی	$Y = -1.41x^2 + 2.32x + 0.09$	0/97	0/061
عددی	$Y = -1.14x^2 + 1.83x + 0.33$	0/97	0/056
آزمایشگاهی	$Y = -1.98x^2 + 1.96x + 0.22$	--	--



روش	معادله	R <sup>2</sup>	RMSE
تحلیلی	$Y = -1.27x^2 + 1.81x + 0.18$	0/99	0/048
عددی	$Y = -1.09x^2 + 1.42x + 0.39$	0/86	0/045
آزمایشگاهی	$Y = -1.18x^2 + 1.67x + 0.27$	--	--

شکل 5- مقایسه شدت جریان بی‌بعد به‌ازای عمق نصب بی‌بعد لوله در مقاطع مختلف ترایشه‌ای

مقطع کم‌تری برخوردار است. تفاوت بین میانگین زه‌آب خارج شده در حل تحلیلی با مقادیر آزمایشگاهی ترایشه‌های مثلثی، مستطیلی، نیم‌دایره برابر  $-0/05$ ،  $+0/001$ ،  $-0/05$  و در حل عددی  $+0/008$ ،  $+0/004$  و  $+0/01$  است. مقایسه تفاوت‌های محاسبه شده حاکی از کم برآورد میانگین زه‌آب خارج شده از روش تحلیلی و بیش برآورد آن در روش عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارد. بررسی‌های جزئی‌تر نشان داد روش تحلیلی برای هر سه ترایشه در 73/33 موارد کم برآورد (در ترایشه‌های مثلثی و نیم‌دایره در 100 درصد موارد) و در

میانگین بی‌بعد شده مقادیر  $q_s/k_s$  خروجی از همه اعماق لوله زهکش در نتایج آزمایشگاهی برای ترایشه مثلثی، مستطیلی و نیم‌دایره به‌ترتیب  $0/75$ ،  $0/95$ ،  $0/91$ ، در حل عددی  $0/76$ ،  $0/96$ ،  $0/92$  و در حل تحلیلی  $0/70$ ،  $0/95$ ،  $0/86$  است. بر این اساس می‌توان گفت ترایشه مستطیلی موفق به خارج‌سازی حجم بیش‌تری از زه‌آب شده و ترایشه مثلثی نسبت به دو ترایشه دیگر در رتبه سوم قرار دارد. دلیل خارج‌سازی بیش‌تر زه‌آب در ترایشه مستطیل را می‌توان به سطح مقطع بیش‌تر آن نسبت داد در حالی که ترایشه مثلثی از سطح



مختلف در اعماق نصب کم لوله زهکشی نسبت به اعماق بیش‌تر داشت. محاسبات نشان داد مقدار اختلاف دبی بی‌بعد محاسباتی تحلیلی و عددی در عمق نصب اول ترانشه مثلی در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب 0/066 و 0/072 و در عمق پنجم (کف ترانشه) 0/045 است. به همین ترتیب در ترانشه مستطیلی اختلاف دبی در عمق اول در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب 0/132 و 0/021 و در ترانشه نیم‌دایره 0/085 و 0/065 است. در حالی که در عمق پنجم مقدار اختلاف دبی در ترانشه مستطیلی به 0/074 و 0/005 و در ترانشه نیم‌دایره به 0/068 و 0/05 کاهش یافته است.

به دلیل اثرات پیچیده عمق نصب لوله خروجی بر مقدار آب خروجی و عملکرد ترانشه، هزینه‌های اجرایی و مسایل زیست محیطی ضرورت انتخاب عمق بهینه نصب لوله زهکشی در ترانشه‌ها وجود دارد. با توجه به تعریف زهکشی، لازم است عمق بهینه‌ای توصیه گردد که معیارهای طراحی سیستم‌های زهکشی را به‌طور توانمند برآورده نماید. در بیش‌تر پژوهش‌های صورت گرفته، عمق بهینه نصب لوله زهکشی با مفهوم بهره‌وری آب زیست محیطی و حداقل هزینه‌های اجرایی تعریف شده است. نظری و همکاران (1387)، برای عملکرد نیشکر در کشت و صنعت امیرکبیر خوزستان و نانجیا و همکاران، در حوضه آبریز مینسوتا (ایالات متحده) عمق بهینه نصب زهکش را با مفهوم بهره‌وری آب زیست محیطی 1/5 متر، اقبال و همکاران (2007) در مردان (پاکستان) با هدف کاهش هزینه‌های احداث شبکه لوله‌های زهکشی عمق 1/6 متر و کم‌تر از آن، سلیمانی و همکاران (1392) در بهشهر (استان مازندران) با اعمال هر دو مفهوم فاصله 1/6 تا 1/8 متر، را معرفی نموده‌اند (Nangia et al., 2010)؛ Iqbal et al., 2007). با توجه به شکل 5، عمق بهینه نصب لوله زهکشی با رویکرد حداکثری تخلیه در هر سه روش در مقاطع مستطیلی و نیم‌دایره‌ای برابر 0/8d و برای مقطع مثلی در روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی به ترتیب 0/65d و 0/6d به‌دست آمد. لیکن همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد در شرایط میدانی عوامل اقتصادی، ماشین‌آلات اجرایی و محدودیت‌های زیست محیطی می‌تواند مانع از تحقق تخلیه حداکثری گردد. اگر لوله‌های زهکشی در اعماق کم‌تری نصب شوند، سهم مشارکت جریان زیرزمینی در جریان زهکشی کم‌تر بوده و شوری زه‌آب خروجی بهبود چشم‌گیری خواهد داشت (Christen and Skehan., 1991)؛ Deverel and Fio., 2001). مازندرانی‌زاده (1395) نیز با مطالعه شبکه زهکشی سلمان فارسی در کشت و صنعت نیشکر خوزستان، عمق نصب لوله‌ها از 2/6 متر با لایه غیرقابل نفوذ 4 متر با هدف تخلیه حداکثری به بازه 1/8 تا 1/3 متر در قالب الگوریتم چند هدفه محدود کرد. بدین ترتیب در مطالعه حاضر نیز هدف، تخلیه حداکثری از محیط ترانشه بوده است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های یاد شده عمق می‌تواند تغییر یابد.

روش عددی در 60 درصد موارد بیش‌تر برآورد (بیش‌ترین تعداد بیش‌تر برآورد در دو ترانشه مستطیلی و نیم‌دایره) داشته است. دقت نتایج روش‌های تحلیلی و عددی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد میانگین مقدار RMSE حل تحلیلی در ترانشه مستطیلی 0/071 بود در حالی که برای روش عددی 0/041 به‌دست آمد. به همین ترتیب در ترانشه نیم‌دایره و مثلی RMSE به ترتیب برای حل تحلیلی 0/061 و 0/048 و در حل عددی 0/056 و 0/045 به‌دست آمد. نکته دیگر آن که مطابق نتایج شکل 5 تفاوت بین مقدار زه‌آب‌های خروجی در حل تحلیلی و حل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در اعماق کم لوله زهکش هر سه ترانشه کم و با افزایش عمق، مقدار این تفاوت افزایش می‌یابد. این امر تأیید کننده نقش بار هیدرولیکی در دقت حل تحلیلی نسبت به حل عددی است که با افزایش آن از میزان دقت برآوردها کاسته شده است. به عبارت دیگر در حل تحلیلی یانگز (1982) تأثیر عمق ماندابی در روابط حل تحلیلی لحاظ نشده و لوله زهکش علی‌رغم شکل واقعی آن یک خط فرض شده است ولی در حل عددی برنامه SEEP/W عمق ماندابی لحاظ و لوله زهکشی به شکل واقعی در نظر گرفته شده است (Youngs., 1982). با این حال یکی از فرض‌های این پژوهش همگنی محیط خاک و به تبع یکسانی هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی در اعماق مختلف است. لیکن فشردگی خاک در اعماق زیرین باعث اختلاف بیش‌تر هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی نسبت به سطح و عدم لحاظ آن در مدل عددی سبب خطای بیش‌تر در اعماق می‌شود. ستوده‌نیا و جعفری (1395) نیز در بیان خطای حاصل از به‌کارگیری برنامه SEEP/W در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی علت را در نظر نگرفتن اختلاف بین هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی در پروفیل خاک دانستند.

در مجموع می‌توان این‌طور بیان داشت که مقادیر پارامترهای ارزیابی مدل در مقاطع مختلف نشان می‌دهد که هر دو روش حل تحلیلی و عددی توانستند با دقت خوبی جریان ترانشه‌ای را شبیه‌سازی کنند. مطابق نتایج شکل 5، مقادیر RMSE برای حل تحلیلی و حل عددی به ترتیب 0/048 و 0/045 در مقطع مثلی، 0/061 و 0/056 در مقطع نیم‌دایره و 0/071 و 0/041 در مقطع مستطیلی به‌دست آمد. در این پژوهش نتایج حل تحلیلی و عددی برای ترانشه مثلی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از خطای کم‌تری برخوردار بود. از طرفی کم‌ترین خطا با توجه به مقادیر RMSE در هر سه مقطع به نتایج حل عددی تعلق دارد. این امر می‌تواند ناشی از فرضیات ساده‌سازی برای انجام حل تحلیلی باشد. بنابراین برای تصمیم‌گیری بهتر لازم است ضمن تکرار بیش‌تر آزمایشات در شرایط مختلف آزمایشگاهی، مطالعات در شرایط میدانی نیز انجام شود. تغییرات جریان زهکشی به‌ازای استقرارهای مختلف لوله زهکشی پس از برقراری شرایط ماندگار، نشان از اختلاف کم‌تر دبی بین مقاطع

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق زهکشی جریان ترانشه‌ای به دو روش حل تحلیلی و حل عددی انجام و نتایج هر دو روش با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. مقایسه نتایج حل تحلیلی و حل عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد نتایج حل عددی معادله لاپلاس در برنامه SEEP/W به صورت جزئی نسبت به حل تحلیلی یانگز برتری داشت (Youngs., 1982). لیکن در مجموع نتایج هر دو روش بر اساس آماره‌های خطاسنجی مناسب بود. از دیگر نتایج این تحقیق افزایش غیرخطی جریان ترانشه‌ای از لوله، به‌زای افزایش 60 تا 80 درصدی عمق نصب در ترانشه و کاهش مقدار جریان در کف ترانشه بود. عمق بهینه نصب لوله در هر سه مقطع ترانشه‌ای بالاتر از کف ترانشه بود و به‌همین دلیل توصیه می‌شود جهت حداکثر عملکرد لوله‌های زهکش در تخلیه جریان‌ات زهکشی سطحی به عمق بهینه نصب در ترانشه توجه شود. عملکرد ترانشه مستطیلی نسبت به دو ترانشه نیم‌دایره و مثلی در تخلیه بیش تر نشت ترانشه‌ای مناسب‌تر بود. بدین ترتیب بهتر است در زهکشی سطحی با جریان ترانشه‌ای از مقطع ترانشه مستطیلی استفاده و لوله زهکشی به اندازه 0/2 عمق ترانشه، بالاتر از کف قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در روش تحلیلی با لحاظ عمق بار هیدرولیکی بالای لوله‌های زهکشی و افت بار ناشی از آن در جریان ورودی به لوله زهکشی روش یانگز توسعه یافته و با نتایج روش آزمایشگاهی مقایسه گردد (Youngs., 1982).

## منابع

- شست‌وشوی نترات از خاک شن‌لومی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی 3. 28. ب: 634-625.
- سلیمانی ننادگانی، م، پارسى نژاد، م و نورى، ح. 1392. برآورد هزینه‌های نصب زهکش‌های زیرزمینی لوله‌ای. پژوهش‌های آبخیزداری. 34:98 تا 41.
- شاه‌نظری، ع، ضیا تبار احمدی، ع، ضیاء تبار احمدی، م، خ و آقاجانی مازندرانی، ق. 1392. بررسی کارایی زهکش‌های زیرزمینی در شرایط جلوگیری از ورود آب از سطح فوقانی. نشریه آب و خاک. علوم و صنایع کشاورزی. 27. 2: 440-432.
- شیری، ج، ناظمی، ا، ح، صدرالدینی، ع، ا و فاخری‌فرده، ا. 1389. تأثیر مقاومت ورودی بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در زهکشی زیرزمینی. دانش آب و خاک. 20. 4: 67-47.
- ضیاء تبار احمدی، ع. 1390. بررسی کارایی زهکش‌های زیرزمینی در شرایط جلوگیری از ورود جریان عمودی. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. دانشکده مهندسی زراعی. گروه مهندسی آب.
- مازندرانی‌زاده، ح. 1395. طراحی سیستم زهکشی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II با رویکرد اقتصادی - زیست محیطی. تحقیقات منابع آب ایران. 12. 3: 152-142.
- مجتهدی، س، ح و فغفور مغربی، م. 1389. روش تحلیلی محاسبه نشت از کانال نیمه بیضی به روش نگاشت کانفرمال. آبیاری و زهکشی ایران. 1. 4: 30-22.
- نظری، ب، لیاقت، ع، پارسى نژاد، م و ناصرى، ع. 1387. بهینه‌سازی عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی با ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی. پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست، 16 آبان ماه، تهران، صفحه‌های 108 تا 122.
- نوذری، ح، زالی، ع و آزادی، س. 1395. بررسی آزمایشگاهی تغییرات شوری زه‌آب در فواصل و اعماق مختلف زهکش در حضور آب زیرزمینی شور. دانش آب و خاک. 29. 2/2: 150-139.
- Afuzi, A., Nazemi, A.H and Sadraddini, A.A. 2014. Steady-state subsurface drainage of ponded fields by rectangular ditch drains. Irrigation and Drainage. 63.5: 668-681.
- Arnold, L.A. 2004. Effects of drain depth on nitrogen losses in drainage in shallow water table soils. MSc. Thesis. North Carolina State University. North Carolina.
- Christen, E and Skehan, D. 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 127.3: 148-155.

- اصلائی، ف، ناظمی، ا، ح، صدرالدینی، ع، ا، فاخری‌فرده، ا و قربانی، م. ع. 1389. برآورد عمق و فاصله مناسب زهکش‌های زیرزمینی بر اساس کیفیت زه‌آب. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. 2. 41: 139 - 146.
- رضی، ف. 1390. بررسی اثر عمق‌های مختلف نصب زهکش‌ها بر کیفیت آب خروجی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین.
- رضی، ف، ستوده‌نیا، ا، دانش کارآراسته، پ، اکرم، م. 1391. بررسی آزمایشگاهی اثر عمق نصب زهکش‌ها بر شوری زه‌آب. مجله تحقیقات آب و خاک. 3. 43: 288-281.
- ستوده‌نیا، ع و جعفری، م. 1395. بررسی اثر زهکش حائل شوره‌زار قزوین بر سطح ایستابی منطقه با استفاده از مدل Seep/w. تحقیقات آب و خاک ایران. 2. 47: 245-237.
- ستوده‌نیا، ع. نوروزپور اصل، ا و دانش کار آراسته، پ. 1393. بررسی آزمایشگاهی اثر عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی در

- Peukert,S., Griffith,B.A., Murray,P.J., Macleod,C.J.A., Brazier,R.E. 2016. Spatial variation in soil properties and diffuse losses between and within grassland fields with similar shortterm management. *European Journal of Soil Science*. 67.4: 386-396.
- Rimidis,A., Dierickx,W. 2004. Field research on the performance of various drainage materials in Lithuania. *Agricultural water management*. 68.2: 151-175.
- Schwab,G.O., Kirkham,D. 1951. The effect of circular perforations on flow into subsurface drain tubes. Part II. Experiments and results, *Agricultural Engineering*. 32.5:270-4.
- Smith,D.R., Livingston,S.J., Zuercher,B.W., Larose,M., Heathman,G.C., Huang,C. 2008. Nutrient losses from row crop agriculture in Indiana. *Journal of Soil and Water Conservation*. 63.6: 396-409.
- Stuyt,L.C., Dierickx,W. 2006. Design and performance of materials for subsurface drainage systems in agriculture. *Agricultural Water Management*. 86.1:50-9.
- Tao,Y., Wang,S., Xu,D., Qu,X. 2016. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water. *Agricultural Water Management*. 177:1-9.
- Tod,I.C., Grismer,M.E. 1991. Drainage of Clay Overlying Artesian Aquifer. II: Technical Analysis. *Irrigation and Drainage Engineering*. 117.2:271-84.
- Youngs,E.G. 1982. Calculations of ponded water drainage for flow regions of various geometries to demonstrate effect of disturbed soil-zone shape on drain performance. *Agricultural Engineering Research*. 27.541-54.
- Corey,AT. 1986. Mechanics of immiscible fluids in porous media. Water Resources Publications. Littleton, Colorado. Pp. 255.
- Dennis,C.W and Trafford,B.D., 1975. The effect of permeable surrounds on the performance of clay field drainage pipes. *Journal of Hydrology*. 24.3:239-249.
- Deverel,S.J., Fio,J.L. 1991. Groundwater flow and solute movement to drain laterals, western San Joaquin Valley, California: 1. Geochemical assessment. *Water resources research*. 27.9: 2233-2246.
- Dierickx,W. 1993. Research and developments in selecting subsurface drainage materials. *Irrigation and Drainage Systems*. 6:291-310.
- Geo-Slope, 2009. Seepage modeling with SEEP/W 2007. 4th edi, Geo-Slope International ltd, Calgary, Canada, 319 pp.
- Harr,ME. 1962. Groundwater and Seepage. McGraw-Hill: New York.
- Iqbal,M and Ahmad,M. 2007. Optimal design of a subsurface pipe drainage system. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences (Pakistan)* 44.1:159-163.
- Jacobsen,O.H and Kjaer,J. 2007. Is tile drainage water representative for root zone leaching of pesticides—a review. *Pest Management Science*. 63:417-428.
- Klute,A and Dirksen,Ch. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph no.9*, pp 687-734.
- Nangia,V., Gowda,P.H., Mulla,D.J and Sands GR. 2010. Modeling impacts of tile drain spacing and depth on nitrate-nitrogen losses. *Vadose Zone*. 9.1: 61-72.

## The Analytical Simulation of Youngs's Problem in Comparison to Numerical Solution and Experimental Results of the Trench Flow

H. Zare Abyaneh<sup>1</sup>, Z. Moshare<sup>2\*</sup> and A. Afrazi<sup>3</sup>

Received: Nov.15, 2016

Accepted: Feb.18, 2017

### Abstract

In this study the analytical and numerical solutions are used in the steady-state drainage problem in the three rectangular, semicircular, and triangular cross-section trenches. Equations that are derived by conformal mappings and complex potential theory were used for the analytical solution and SEEP/W software was used for the numerical simulation. Furthermore, physical sandbox models are designed for all the three sections in laboratory conditions and the outflows from the drainpipe are measured at 10, 20, 30, 40 and 50 cm depths. According to the three methods, in this study optimum installation depth of drainpipe that has maximum drainage outflow in the both rectangular and semicircular cross-sections is obtained at 40 cm and for the triangular cross-section is 32.5 cm using the analytical solution and 30 cm using the numerical solution and the experimental results. The results are assessed by the differences between the dimensionless discharges obtained from the analytical and numerical solutions and from the experimental conditions using relative root mean square error (RMSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ). RMSE in the analytical solution for the triangular section 0.048, the semicircular section 0.061, and the rectangular section 0.071 and the  $R^2$  are 0.99, 0.98, and 0.98 and in the numerical solution 0.045, 0.056, and 0.041 for RMSE and 0.87, 0.97, and 0.97 for  $R^2$  are obtained, respectively. Comparison of the analytical and numerical solutions results with the experimental results showed that the both methods can simulate seepage flow in the trench with high accuracy. However, the accuracy of numerical solution was more than analytical solution, that it comes from some simplifications and assumptions considered in the analytical solution. In the analytical solution the ponded depth of water is considered small and negligible and the circular perimeter of the drainpipe is taken into account as a line that these are the reasons for the less accurate results of analytical solution. Additionally, the hydraulic of the flow in entrance to the drain pipe is not considered in the analytical solution.

**Key words:** Drainage, Flow net, Installation depth of pipe, SEEP/W, Trench flow, Trench shape

1- Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

2- Former Graduate Student, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

3- PhD Student, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

(\* - Corresponding Author; Email: zareabyaneh@gmail.com)