

## کاربرد الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک اشباع

محسن گلشاد فصیح، عبدالرحیم هوشمند و بهروز مهدی نژادیانی<sup>1</sup>

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز؛

Mohsenfasih@yahoo.com

استادیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز؛ Hooshmand\_a@scu.ac.ir

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان؛ B.mehdinejad@uok.ac.ir

دریافت: 92/2/14 و پذیرش: 92/7/22

### چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و تخلخل قابل زهکشی ( $\mu$ ) دو پارامتر مهم برای طراحی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در شرایط غیرماندگار هستند. در این تحقیق به منظور تخمین مقادیر بهینه  $K_s$  و  $\mu$  یک روش معکوس توسعه داده شد. در روش معکوس پیشنهاد شده از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شد. معادله‌ی زهکشی مورد استفاده در این تحقیق معادله گلو-دام بود. برای اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی روش معکوس پیشنهاد شده، در آزمایشگاه یک مخزن شن طراحی و ساخته شد. همچنین مقادیر  $K_s$  و  $\mu$  به صورت مستقیم نیز اندازه‌گیری شدند. ارتفاع سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی با استفاده از مقادیر  $K_s$  و  $\mu$  به دست آمده از روش معکوس و روش مستقیم شبیه‌سازی شد. مقایسه‌ی نیمرخ‌های سطح ایستابی نشان داد که پیش‌بینی نیمرخ سطح ایستابی با استفاده از مقادیر  $K_s$  و  $\mu$  به دست آمده از روش معکوس بسیار دقیق‌تر است. همچنین با کاربرد روش معکوس، مقدار شاخص RMSE بسیار کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی دقت بیشتر این روش بود. بنابراین، به نظر می‌رسد که روش معکوس ارائه شده در این تحقیق یک روش بسیار کارآمد برای تخمین مقادیر  $K_s$  و  $\mu$  می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تخلخل قابل زهکشی، روش معکوس

### مقدمه

در روش‌های مستقیم، پارامترهای مذکور مستقیماً در آزمایشگاه یا مزرعه اندازه‌گیری می‌شوند (ون‌بیرز، 1983؛ کرکهام، 1945؛ تیلاور، 1960). در این روش‌ها به منظور دستیابی به یک تخمین مناسب از پارامترهای هیدرولیکی، لازم است که آزمایشات مربوط به اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی در آزمایشگاه یا مزرعه به تعداد زیادی صورت گیرد (اسکگر، 1976). انجام چنین آزمایشاتی بسیار زمان‌بر، هزینه‌بر و در بعضی موارد مشکل است (مصطفی،

طراحی هر پروژه زهکشی مستلزم شناخت پارامترهای هیدرولیکی خاک است. دو پارامترها بسیار مهم در طراحی زهکش‌ها هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی خاک می‌باشد. در مقیاس وسیع، هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی تأثیر زیادی بر طراحی صحیح، عملکرد فنی و هزینه‌ی اجرای پروژه‌های زهکشی دارد (سپاس‌خواه، 2004؛ اسکگر، 1976). این دو پارامتر را می‌توان با استفاده از روش‌های مستقیم یا روش‌های غیرمستقیم تعیین نمود.

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: سنندج، بلوار پاسداران، دانشگاه کردستان، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، کد پستی 15175 - 66177

تفاضل‌های محدود، مسأله معکوس، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO و داده‌های آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای معادله پخشیدگی پرداختند. آنها در این تحقیق نتیجه گرفتند که روش مذکور بسیار کارا و نتایج حاصل از آن بسیار دقیق است. اینس و دروگر (2002) الگوریتم ژنتیک را برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک غیراشباع به کار بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان با کاربرد الگوریتم ژنتیک به خوبی پارامترهای هیدرولیکی خاک غیراشباع را تخمین زد.

هدف از این تحقیق استفاده از روش معکوس برای تخمین مقدار بهینه‌ی پارامترهای هیدرولیکی خاک اشباع است. در روش معکوس از الگوریتم ژنتیک استفاده خواهد شد و نتایج با روش مستقیم مقایسه می‌گردد.

### مواد و روش‌ها

#### توسعه‌ی مدل معکوس

به منظور توسعه‌ی مدل معکوس، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. این الگوریتم که از اصل تکامل الهام گرفته است، در سال 1975 توسط هالند ارائه شد. الگوریتم ژنتیک جواب بهینه‌ی مسأله‌ی مورد نظر را در میان یک جمعیت جستجو می‌کند. دو مرحله‌ی اساسی در این الگوریتم - بعد از تولید جمعیت تصادفی اولیه - انتخاب و تولید جواب‌های جدید است. در واقع الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسأله، مجموعه‌ی بسیار بزرگی از جواب‌های ممکن را تولید می‌کند. هر یک از این جواب‌ها با استفاده از یک تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آنگاه تعدادی از بهترین جواب‌های نسل  $j$ ام برای تولید جواب‌های نسل  $(j+1)$ ام انتخاب می‌شوند. جواب‌های انتخاب‌شده را والدین و جواب‌های تولیدشده را فرزندان می‌نامند. فرایندهای مختلفی برای انتخاب وجود دارد. در الگوریتم ژنتیک به‌کار رفته در این تحقیق از فرایند انتخاب متناسب استفاده شد. بعد از انتخاب والدین، با انجام اعمال تقاطع و جهش بچه‌ها یا نسل جدید تولید می‌شود. به منظور انجام عمل تقاطع و جهش لازم است که جواب‌های انتخاب شده از نسل  $j$ ام به‌صورت رشته‌ای از بیت‌ها نمایش داده شوند. فلوچارت الگوریتم ژنتیک در شکل 1 نشان داده شده است (اینکلیپرچت، 2007). در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این تحقیق، به منظور تولید نسل جدید جواب‌ها از عمل‌گر تقاطع تک‌نقطه‌ای و برای به دست آوردن جواب بهینه‌ی واقعی و رهایی از جواب‌های بهینه‌ی موضعی از عمل‌گر جهش استفاده گردید.

متغیرهای طراحی در این تحقیق که باید مقدار بهینه‌ی آنها به دست آید، هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی بود. تابع هدف مورد استفاده در

(2000). علاوه بر مشکلات مذکور در بالا، تحقیقات نشان داده است که اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای هیدرولیکی خاک که اصطلاحاً اندازه‌گیری نقطه‌ای پارامترها نیز نامیده می‌شود، دارای تغییرات بسیار زیادی در سطح مزرعه می‌باشد (امیروس و همکاران، 2004). این تغییرات آنقدر زیاد است که عملاً دست‌یابی به مقداری که بتوان آن‌را با اطمینان برای محاسبه‌ی فاصله زهکش‌ها به‌کار بُرد بسیار مشکل است (موهانتی و همکاران، 1991؛ سپاس‌خواه و رضایی، 1998).

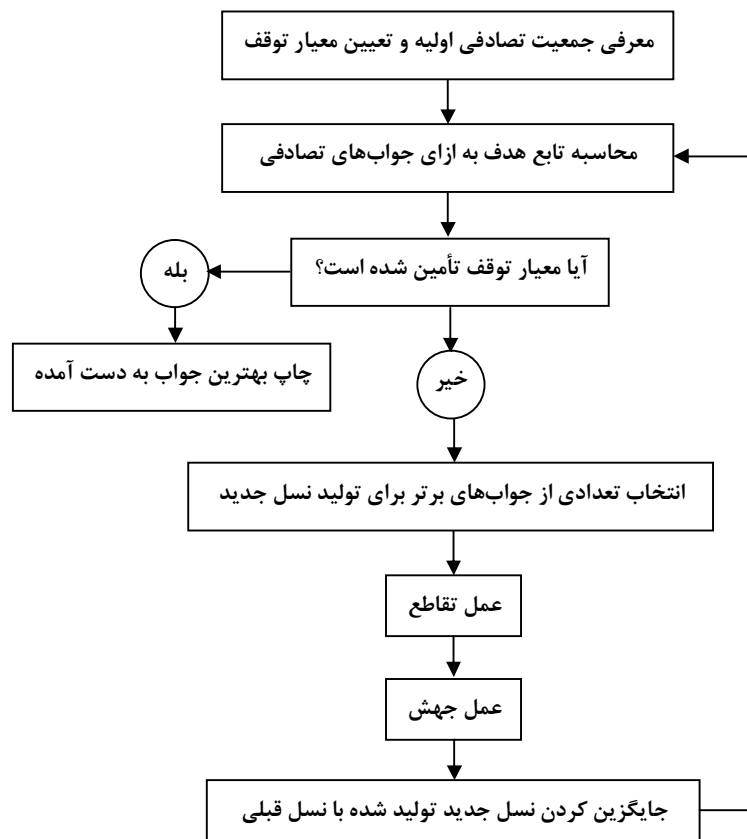
روش‌های غیرمستقیم شامل روش توابع انتقالی و روش معکوس می‌شود (کومار و همکاران، 1994). در روش توابع انتقالی به کمک بعضی از خصوصیات خاک، مانند بافت، جرم مخصوص ظاهری یا میزان مواد آلی خاک، خصوصیات هیدرولیکی خاک به دست می‌آید (اسکاپ، 2001). روش مسأله معکوس بر پایه معکوس کردن مدل ریاضی حاکم بر پدیده می‌باشد. در این روش، به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مربوط به خروجی مدل ریاضی، پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده می‌شود. اسکگر (1976) روابط و منحنی‌هایی ارائه نمود، که با داشتن ارتفاع سطح ایستابی در یک فاصله‌ی معین از زهکش بتوان نسبت هدایت هیدرولیکی اشباع به تخلخل قابل زهکشی را به دست آورد. کومار و همکاران (1994) با ارائه سه روش مختلف و استفاده از داده‌های ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده بین دو زهکش نسبت قابلیت انتقال به تخلخل قابل زهکشی در خاک اشباع را تخمین زدند. بهیسی (2008) با اندازه‌گیری داده‌های سطح ایستابی بین دو زهکش، دبی خروجی از زهکش و خصوصیات خاک، مقدار تخلخل قابل زهکشی را تعیین نمود.

روش‌های معکوس ارائه شده توسط اسکگر (1976)، کومار و همکاران (1994) و بهیسی (2008) بسیار ساده هستند. امروزه در هر روش معکوس از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود (ریتر و همکاران، 2003). هر الگوریتم بهینه‌سازی دارای یک یا چند متغیر و یک تابع هدف می‌باشد. در فرایند بهینه‌سازی مقدار تابع هدف، بر حسب نوع مسأله مورد بررسی، کمینه یا بیشینه می‌گردد (هیل و تایدمن، 2007). عباس‌پور و همکاران (1) به تعیین پارامترهای هیدرولیکی غیراشباع خاک با استفاده از بهینه‌سازی به کمک الگوریتم مورچگان پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی‌های رطوبت و فشار حاصل از روش بهینه‌سازی تقریب بسیار مناسبی از منحنی‌های واقعی می‌باشند. تادیکوندا و همکاران (2009) با استفاده از حل عددی به روش

در معادله (1)،  $S$  تابع هدف،  $N$  تعداد کل نقاط اندازه‌گیری شده یا تعداد کل نقاط محاسبه شده ارتفاع سطح ایستابی،  $h_i(x_i, t_i)$  ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده بالای زهکش در نقطه  $\lambda_m$  با بُعد  $L$  و  $h'_i(x_i, t_i)$  ارتفاع سطح ایستابی محاسبه شده بالای زهکش توسط مدل ریاضی در نقطه  $\lambda_m$  با بُعد  $L$  است.

الگوریتم بهینه‌سازی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که به ازای مقادیر بهینه پارامترهای مدل‌های ریاضی، اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ارتفاع سطح ایستابی در نقاط متناظر حداقل باشد. بنابراین تابع هدف به صورت زیر تعریف شد:

$$S = \sum_{i=1}^N (h_i(x_i, t_i) - h'_i(x_i, t_i))^2 \quad (1)$$



شکل 1- فلوجارت الگوریتم ژنتیک

$x$  متغیر مکان با بُعد  $L$  و  $t$  متغیر زمان با بُعد  $T$  است.

در این تحقیق، جمعیت تصادفی اولیه همان مقادیر تصادفی اختصاص یافته به پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی بود. با توجه به این که مقادیر این پارامترها در خاک‌های مختلف در یک محدوده‌ی خاصی تغییر می‌کند (فائو، 1980؛ ریتزما، 1994؛ USBR، 1984)، قیدهایی برای این پارامترها در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در تحقیق در نظر گرفته شد:

$$0.1m/day < K_s < 1m/day \quad (4)$$

در این تحقیق، مقدار  $h'_i(x_i, t_i)$  از مدل ریاضی گلور-دام (معادله 2) به دست آمد:

$$h'_i(x_i, t_i) = 1.16h_0 \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{L} x_i\right) \exp(-n^2 \alpha t_i) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 K_s d_e}{\mu L^2} \quad (3)$$

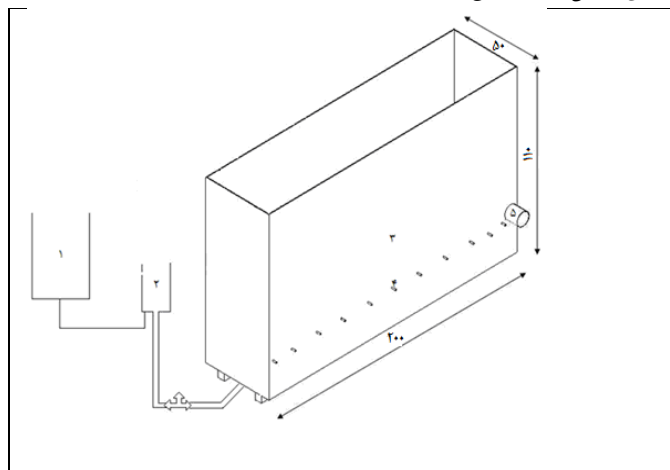
در معادلات بالا،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی خاک اشباع با بُعد  $L/T$ ،  $d_e$  عمق معادل با بُعد  $L$ ،  $\alpha$  ضریب عکس‌العمل با بُعد  $T^{-1}$ ،  $\mu$  تخلخل قابل زهکشی که بدون بُعد می‌باشد،  $L$  فاصله بین دو زهکش با بُعد  $L$

پذیرد. به منظور قرائت تغییرات سطح ایستابی در مراحل مختلف آزمایشات، 11 عدد مانومتر با قطر داخلی 20 میلیمتر به بدنه مدل نصب شد. همچنین به منظور اطمینان از عدم گرفتگی پوشش اطراف زهکش توسط رسوبات، یک عدد پیرومتر از جنس PVC و به قطر یک اینچ روی لوله زهکش نصب گردید. برای این که بتوان خاک را مطابق استاندارد (ولتمن، 2000) از پایین به بالا اشباع کرد، سه عدد شیر یک اینچ در کف مدل نصب گردید. در شکل 2 نمایی از سیستم طراحی شده برای انجام آزمایشات نشان داده شده است. خاک زراعی مورد نیاز بعد از خشک کردن و کوبیدن از الک شماره 10 بر اساس استاندارد ASTM عبور داده شد تا ناخالصی‌های آن گرفته شود. مشخصات فیزیکی این خاک در جدول 1 نشان داده شده است. بعد از پُر کردن مدل تا ارتفاع 100 سانتیمتری، خاک از پایین رو به بالا اشباع گردید. بعد از اشباع کامل خاک، با باز کردن شیر نصب شده روی لوله زهکش و قرائت ارتفاع سطح ایستابی در داخل مانومترها، نیمرخ سطح ایستابی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد.

$$0.03 < \mu < 0.12 \quad (5)$$

### جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل معکوس، ارتفاع سطح ایستابی بین دو زهکش بود. به منظور جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از یک مدل مخزن شن استفاده گردید. ابعاد مدل با توجه به این که جریان به طرف زهکش تحت تأثیر لبه‌ها و کف مدل قرار نگیرد و با توجه به ابعاد استفاده شده در تحقیقات قبلی (فتیحی، 1383؛ سینگ و اوکالافان، 1978) انتخاب شد. مدل مخزن شن مورد نظر از جنس فلز، به ضخامت 3 میلیمتر، به شکل مکعب مستطیل و به ابعاد داخلی طول 200 سانتیمتر، عرض 50 سانتیمتر و ارتفاع 110 سانتیمتر ساخته شد. در یک انتهای مدل یک لوله‌ی زهکش به قطر 100 میلیمتر که دور آن را پوشش مصنوعی PP450 احاطه کرده بود، طوری نصب شد که مرکز لوله تا کف مدل 30 سانتیمتر فاصله داشت. به منظور خروج آب از زهکش از یک لوله فلزی به قطر 100 میلیمتر استفاده شد که به بدنه‌ی مدل با جوش متصل گردید. سپس لوله‌ی دیگری با قطر کوچک‌تر به کمک یک تبدیل به لوله مذکور جوش داده شد. روی این لوله یک شیر قطع و وصل جریان آب تعبیه گردید، تا در مواردی که نیازی نیست آب از لوله زهکش خارج گردد، با بستن شیر این عمل به راحتی صورت



شکل 2- نمایی از مدل مخزن شن<sup>1</sup>

(1- منبع ذخیره آب، 2- منبع تنظیم سطح آب، 3- مدل مخزن شن، 4- مانومتر، 5- زهکش)

<sup>1</sup> ابعاد روی شکل 2 بر حسب سانتیمتر هستند.

جدول 1- مشخصات فیزیکی خاک زراعی مورد استفاده در مدل مخزن شن

بافت	جرم مخصوص ظاهری خشک ( $g/cm^3$ )	جرم مخصوص حقیقی ( $g/cm^3$ )	تخلخل کل (%)	$d_{10}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)	ضریب یکنواختی ( $C_u$ )	ضریب انحناء ( $C_c$ )
لومی	1/42	2/63	46/00	0/0012	0/12	98/25	1/16

سانتیمتر و ارتفاع 12 سانتیمتر بود. پس از انجام آزمایش بار اُفتان و تعیین پارامترهای مورد نیاز، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از معادله 6 محاسبه شد.

#### تخمین تخلخل قابل زهکشی

به منظور تعیین تخلخل قابل زهکشی، از روش حجمی (علیزاده، 1384) استفاده شد. در این روش تخلخل مؤثر از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{\nabla_g}{\nabla_t} \quad (7)$$

در معادله‌ی 7،  $\nabla_g$  حجم آب خروجی از نمونه‌ی دست-نخورده‌ی خاک بر اثر نیروی ثقل (حجم آب ثقلی) و  $\nabla_t$  حجم کل خاک دست‌نخورده است.

حجم آب ثقلی با اندازه‌گیری کل حجم آب خروجی از زهکش در مدت زمان آزمایش تعیین شد. بدین منظور حجم آب خروجی در فواصل زمانی مختلف با هم جمع شد. حجم کل مورد استفاده در معادله‌ی تعیین تخلخل مؤثر (معادله 7) برابر حجم خاک دست‌نخورده‌ای در نظر گرفته شد که آب ثقلی از آن خارج شده بود. در این تحقیق، این حجم برابر حجم خاک دست‌نخورده‌ی بالای لوله زهکش بود.

#### نتایج

مقادیر تخمین زده شده برای هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی به روش معکوس به ترتیب برابر 0/849 متر در روز و 9 درصد بود. این مقادیر با استفاده از روش مستقیم برابر 0/49 متر در روز و 2/8 درصد برآورد شد.

#### ارزیابی دقت پارامترهای تخمین زده شده

به منظور ارزیابی عملکرد مدل ریاضی گلور-دام با دو دسته پارامتری که به دو روش مختلف (روش معکوس و روش مستقیم) به دست آمده است، نیمرخ سطح ایستابی در زمان‌های 150، 210، 270، 360، 480 و 720 دقیقه بعد از شروع زهکشی با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده از دو روش مذکور توسط مدل ریاضی گلور-دام شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده به صورت

تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل معکوس توسعه یافته

بعد از توسعه‌ی مدل معکوس و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، مقدار بهینه‌ی هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی خاک مورد استفاده در داخل مدل مخزن شن به دست آمد. بدین منظور از داده‌های مربوط به زمان‌های 2، 10، 20، 30، 40، 50، 60، 90، 120، 180، 240، 300، 420 و 600 دقیقه بعد از شروع زهکشی استفاده گردید.

تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از روش-های مستقیم

#### تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع

در این تحقیق به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع از روش بار اُفتان که جزء روش‌های آزمایشگاهی می‌باشد، استفاده شد. دلیل استفاده از این روش بافت نسبتاً سنگین خاک مورد آزمایش داخل مدل مخزن شن بود. در روش بار اُفتان مقدار هدایت هدایت هیدرولیکی از معادله‌ی زیر به دست می‌آید (بای‌وردی، 1379):

$$K_s = \frac{al}{At} \ln\left(\frac{h_t}{h_0}\right) \quad (6)$$

در معادله‌ی بالا،  $a$  سطح مقطع لوله‌ی تغذیه-کننده‌ی نمونه‌ی خاک با بُعد  $L^2$ ،  $A$  سطح مقطع نمونه-ی خاک با بُعد  $L^2$ ،  $l$  طول نمونه‌ی خاک با بُعد  $L$ ،  $t$  زمان بعد از شروع آزمایش با بُعد  $T$ ،  $h_t$  ارتفاع آب روی سطح خاک در زمان  $t$  بعد از شروع آزمایش و  $h_0$  ارتفاع اولیه‌ی آب روی سطح خاک در زمان شروع آزمایش است.

به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی خاک داخل مدل مخزن شن به روش بار اُفتان، نمونه‌ی خاک دست-نخورده از خاک داخل مدل مخزن شن تهیه شد. نمونه‌ی خاک دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌ی مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار اُفتان تهیه گردید. این استوانه دارای قطر داخلی 10

بودن مقاومت ورودی در منافذ لوله‌ی زهکش را جبران می‌کند (اسکگرز، 1976).

ب- در روش معکوس شرح داده شده از داده‌های ارتفاع سطح ایستابی مربوط به زمان‌های مختلف برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی استفاده شد. این عامل سبب می‌شود که مقدار دقیق‌تری برای بعضی از این پارامترها، مانند تخلخل قابل زهکشی، که وابسته به ارتفاع سطح ایستابی است به دست آید.

پ- در روش معکوس به کار برده شده در این تحقیق از داده‌های ارتفاع سطح ایستابی مربوط به فواصل مختلف از لوله‌ی زهکش استفاده گردید. این موضوع باعث می‌شود مقادیر به دست آمده برای پارامترهای هیدرولیکی مورد استفاده در معادلات زهکشی به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر باشند. دلیل این موضوع این است که الگوی جریان به طرف لوله‌ی زهکش تابعی از فاصله از لوله‌ی زهکش می‌باشد (علیزاده، 1384) و با کاربرد روش معکوس تغییر الگوی جریان در فواصل مختلف لوله‌ی زهکش نیز در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که روش‌های مستقیم تخمین پارامترهای هیدرولیکی که در این تحقیق استفاده شده‌اند چنین قابلیت ندارند.

ت- خاک به‌عنوان یک محیط متخلخل، غیرهمگن و غیرهمروند است. کاربرد روش معکوس به‌گونه‌ای که در این تحقیق شرح داده‌شد، باعث می‌شود که تأثیرات غیرهمگنی خاک، غیرهمروندی آن و حتی وجود جریان-های ترجیحی بر روی پارامترهای هیدرولیکی خاک به خودی خود در نظر گرفته شود. زیرا در روش معکوس به‌کار رفته در این تحقیق از داده‌های مربوط به سطح ایستابی در کل مسیری که جریان آب در آن برقرار است، مورد استفاده شد. این در حالی است که در روش‌های مستقیم مورد استفاده داده‌های مربوط به یک نقطه و یک عمق معین به‌کار برده شد.

ث- در روش‌های مستقیم، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی به‌طور جداگانه و مستقل از هم به دست می‌آیند. این در حالی است که در روش معکوس این دو پارامتر همزمان و با هم تخمین زده می‌شوند. تخمین همزمان این دو پارامتر باعث می‌شود که نتایج حاصل از مدل ریاضی که از این دو پارامتر برای شبیه‌سازی ارتفاع سطح ایستابی استفاده می‌کند، دقیق‌تر باشد (اسکگرز، 1976).

کمی و کیفی بررسی شد. ارزیابی کمی دو روش مذکور با استفاده از آماره‌ی RMSE انجام شد.

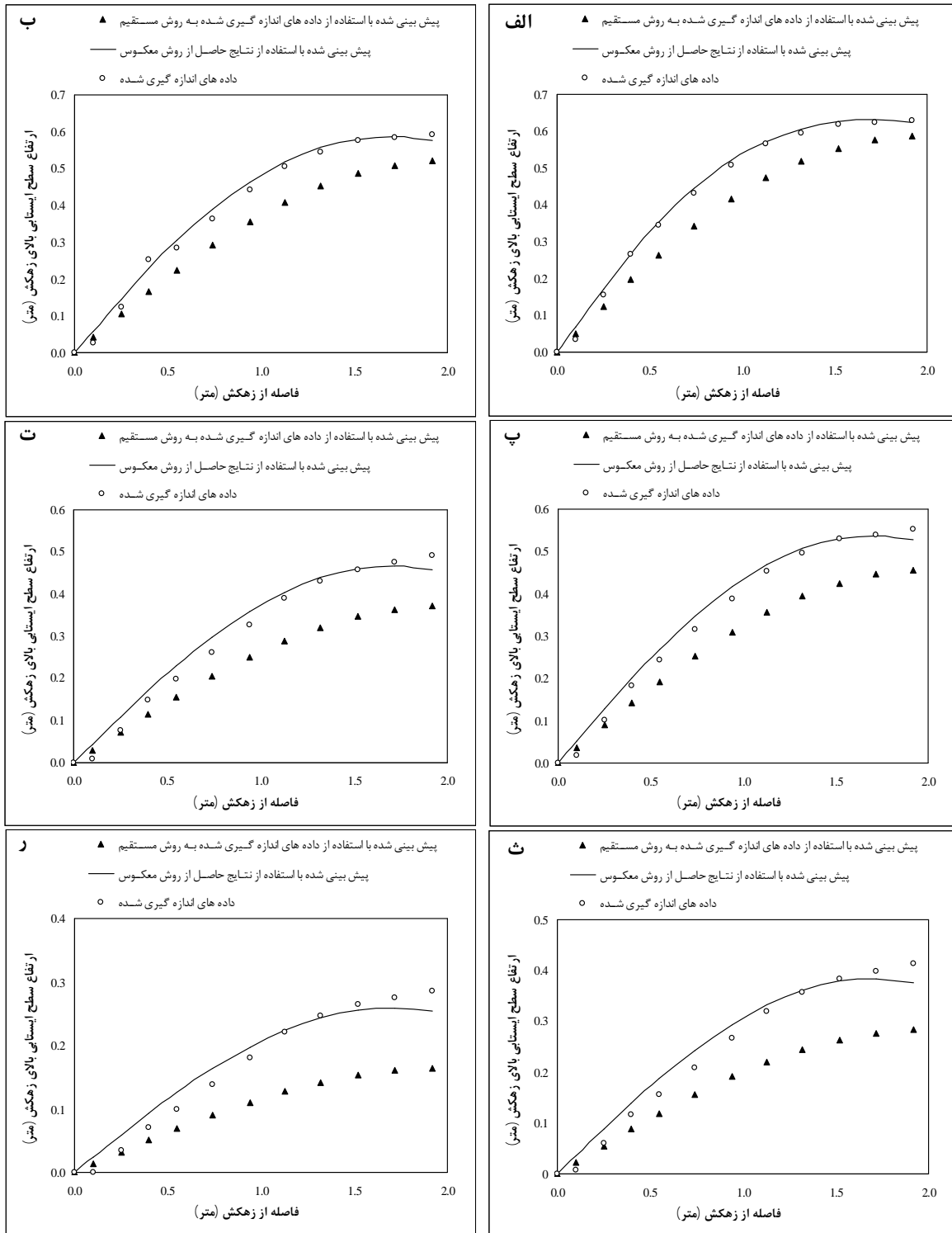
$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (h'_i(x_i, t_i) - h_i(x_i, t_i))^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

هرچه مقدار آماره‌ی RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر دقت بیشتر نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل ریاضی می‌باشد. مقدار این آماره برای روش معکوس و مستقیم به ترتیب برابر 0/0197 و 0/586 به دست آمد. ارزیابی کیفی با ترسیم منحنی‌های سطح ایستابی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (شکل 3) و نیز ترسیم مقادیر ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر ارتفاع سطح ایستابی پیش‌بینی شده و بررسی کیفی پراکندگی آنها نسبت به خط 1:1 یا خط 45 درجه (شکل 4) انجام گردید.

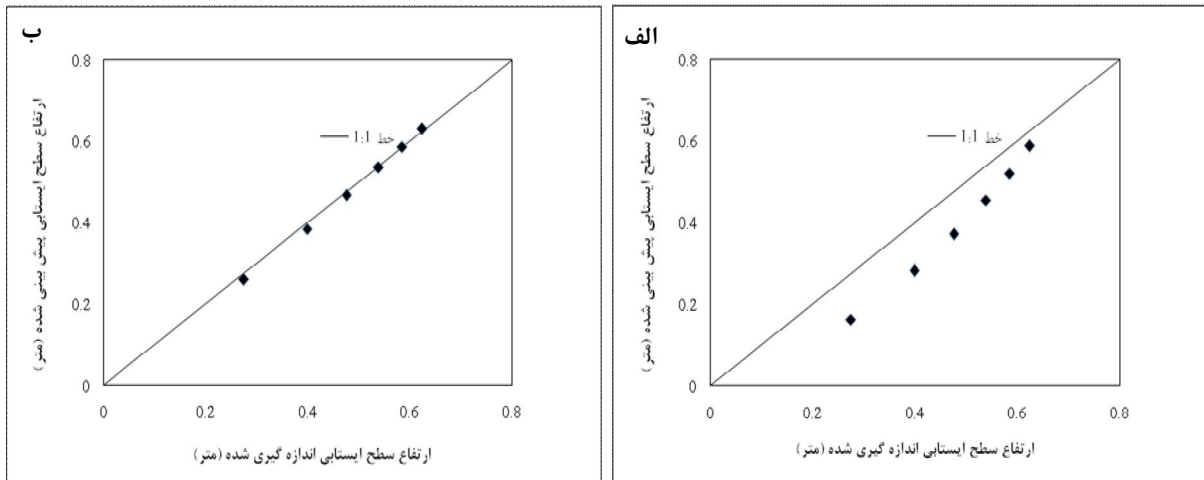
### بحث و نتیجه‌گیری

آماره‌ی کمی RMSE به‌دست آمده برای مقادیر ارتفاع سطح ایستابی پیش‌بینی شده که در محاسبه‌ی آن‌ها از مقادیر تخمین‌زده‌شده‌ی پارامترهای هیدرولیکی به روش معکوس استفاده شده بود، به مقدار مطلوب خود (صفر) نزدیک‌تر بود. این موضوع بیان‌گر دقت بیشتر روش معکوس در تخمین پارامترهای هیدرولیکی مورد بررسی در این تحقیق است. همچنین بررسی کیفی منحنی‌های سطح ایستابی در زمان‌های مختلف پس از شروع زهکشی نشان داد که دقت روش معکوس در تخمین پارامترهای هیدرولیکی بیشتر از روش مستقیم است. بر اساس بررسی کیفی انجام شده (شکل‌های 3 و 4) به‌طور کلی در تمام زمان‌های پس از شروع زهکشی، مقادیر ارتفاع سطح ایستابی که در آن‌ها از پارامترهای هیدرولیکی حاصل از روش مستقیم استفاده شده بود، کمتر از مقدار واقعی به دست آمده‌اند. دلیل این موضوع صرفنظر کردن از جریان غیراشباع بالای سطح ایستابی است (اسکگرز، 1976). دلایل برتری روش معکوس بر روش اندازه‌گیری مستقیم که اندازه‌گیری نقطه‌ای نیز نامیده می‌شود، عبارتند از:

الف- روش معکوس خطای ناشی از فرضیات به‌کار رفته در استخراج معادلات حاکم بر جریان به طرف زهکش، مانند صرفنظر کردن از جریان شعاعی در نزدیک لوله‌ی زهکش، صرفنظر کردن از جریان غیراشباع و فرض صفر



شکل 3- مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی ارتفاع سطح ایستابی در زمان‌های مختلف پس از شروع زهکشی (الف - 150 دقیقه، ب - 210 دقیقه، پ - 270 دقیقه، ت - 360 دقیقه، ث - 480 دقیقه، ز - 720 دقیقه)



شکل 4- مقایسه ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده  
(الف - با استفاده از نتایج حاصل از روش مستقیم، ب- با استفاده از نتایج حاصل از روش معکوس)

معادلات زهکشی، قادر به تخمین مقدار دقیق برای پارامترهای هیدرولیکی نیستند. با توجه به این که تخمین دقیق هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل قابل زهکشی برای تعیین فاصله‌ی زهکش‌های زیرزمینی در شرایط غیرماندگار ضروری است، پیشنهاد می‌شود که کارایی استفاده از روش معکوس در شرایط صحرائی نیز مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور می‌توان از مزارع آزمایشی استفاده نمود که قبل از طراحی و اجرای هر سیستم زهکشی احداث می‌شود.

در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک اشباع به دو روش معکوس و مستقیم تعیین شد. در روش معکوس از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. مقدار آماره RMSE برای روش معکوس و مستقیم به ترتیب برابر 0/0197 و 0/586 به دست آمد. نتایج ارزیابی‌های کمی و کیفی نشان داد که با کاربرد پارامترهای هیدرولیکی حاصل از روش معکوس در مدل ریاضی گلوور- دام بهتر و دقیق‌تر می‌توان منحنی سطح ایستابی بین دو زهکش را پیش‌بینی نمود. این در حالی است که روش‌های اندازه‌گیری مستقیم به دلیل نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری، عدم بهره‌گیری از شرایط غیرماندگار، تخمین جداگانه‌ی پارامترهای هیدرولیکی، افزایش تأثیر فرضیات ساده‌کننده در استخراج

#### فهرست منابع:

۱. بای‌بوردی، م. 1379. اصول مهندسی آبیاری، جلد اول: روابط آب و خاک. انتشارات دانشگاه تهران، 709 صفحه.
۲. علیزاده، ا. 1384. زهکشی جدید (برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی). انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، 495 صفحه.
۳. فتحی، پ. 1384. شبیه‌سازی یک و دو بُعدی جریان غیرماندگار به طرف زهکش‌ها و تعیین خصوصیات هیدرولیکی با روش مسأله معکوس. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، 220 صفحه.
4. Abbaspour, K.C., Scholin, R. and Van Genuchten, M.T.H. 2001. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Advances in Water Resources*. 24: 827- 841.



5. Aimrun, W., Amin, M.S.M., and Eltaib, S. M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*. 121:197–203.
6. Bahceci, İ. 2008. Determining the drainable pore space through field tests in Konya Plain, Turkey. *Irrigation and Drainage*. 57: 71-82.
7. Engelbrecht, A.P. 2007. *Computational intelligence: An introduction*. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 597 pp.
8. FAO. 1980. *Drainage design factors*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 38. Italy, Rome.
9. Hill, M.C. and Tiedeman, C.R. 2007. *Model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty*. John Wiley & Sons, INC. Publication, New Jersey, USA, 455 pp.
10. Ins, A.V.M. and Droogers, P. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6 (1): 49-65.
11. Kirkham, D. 1945. Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. *Processing of the Soil Science Society of America*, 11: 93-99.
12. Kumar, S., Gupta, S.K. and Ram, S. 1994. Inverse technique for estimating transmissivity and drainable pore space utilizing data from subsurface drainage experiments. *Agricultural Water Management*. 26: 41- 58.
13. Minasny, B., McBratney, A.B. 2002. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma*. 107: 55–70.
14. Mohanty, B.P., Kanvar, R.S., and Horton, R. 1991. A robust-resistant approach to interpret spatial behavior of saturated hydraulic conductivity of nine glacial-till soils under no-tillage system. *Water Resources Research*. 27(11): 2979–2992.
15. Moustafa, M.M. 2000. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt. *Agricultural Water Management*. 42: 291-312.
16. Ritter, A., Hupet, F., Muñoz-Carpena, R., Lambot, S. and Vanclooster, M. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agriculture Water Management*. 59: 77-96.
17. Ritzema, H.P. (Editor-in-chief). 1994. *Drainage Principles and Applications*. International Institute of Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 1125 pp.
18. Schaap, M.G., Leij, F.J., and van Genuchten, M.T. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrolog.*, 251: 163-176.
19. Sepaskhah, A.R. and Ataee, J. 2004. A Simple Model to determine Saturated Hydraulic Conductivity for Large-scale Subsurface Drainage. *Biosystems Engineering*. 89 (4), 505–513.
20. Sepasakhah, A.R. and Rezaee, A. 1998. Hydraulic conductivity measurement for subsurface drainage system. *Iran Agricultural Research*. 17: 139–150.
21. Singh, B. and O’Callaghan, J.R. 1978. Effect of interflow on soil drainage. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 23: 397-415.
22. Skaggs, R.W. 1976. Determination of hydraulic conductivity-drainable porosity ratio from water table measurements. *Transactions of ASAE*. 19: 73-80.
23. Tadikonda, V.B., Puvvadi, V.S. and Mehter, M.A. 2009. Swarm intelligence-based solver for parameter estimation of laboratory through-diffusion transport of contaminants. *Computers and Geotechnics*. 36: 984-992.
24. Taylor, G.S. 1960. Drainage porosity Evaluations from outflow measurements and its use in drawdown equation. *Soil Science*. 90(60): 338 – 343.

25. USBR. 1984. Drainage manual. A Water Resources Technology Publication, Denver, USA.
26. Van Beers, W.F.J. 1983. The auger hole method. International Institute of Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, Bulletin No. 1.
27. Vlotman, W.F., Willardson, L.S. and Dierickx, W. 2000. Envelope design for subsurface drains. International Institute of Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 358 pp.