

## تخمین هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر خاک با روش مسئله معکوس

پرویز فتحی، جمال محمد ولی سامانی و مهدی کوچک زاده \*

### چکیده

هدایت آبی اشباع و تخلخل مؤثر مهمترین پارامترها در تعیین فاصله زهکش‌ها هستند. این خصوصیات دارای تغییرات زمانی و مکانی بوده و تعیین مقدار میانگین آنها مشکل و هزینه‌بر می‌باشد. در تحقیق حاضر با حل عددی معادله دیفرانسیلی یک بعدی حاکم بر جریان اشباع و غیر ماندگار بطرف زهکش‌ها و انتخاب الگوریتم مناسب بهینه سازی، مدل معکوس عددی مناسب بسط و از آن جهت پیش بینی مقادیر میانگین هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر استفاده گردید. در این تحقیق از روش حجم کنترل برای حل عددی معادله دیفرانسیلی حاکم استفاده شد. علاوه بر مدل عددی، از مدل تحلیلی گلور - دام نیز به عنوان مدل شبیه سازی در روش مسئله معکوس استفاده گردید. با واسنجی و ارزیابی دو مدل معکوس عددی و تحلیلی، در نهایت دقت آنها در برآورد مقادیر هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد، مقادیر هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر برآوردی از روش مسئله معکوس باعث افزایش دقت مدل عددی در پیش‌بینی نیمرخ سطح ایستابی در اطراف زهکش‌ها می‌گردد. نتایج همچنین نشان داد که کارایی مدل عددی (۰/۹۳) در پیش بینی نیمرخ سطح ایستابی بهتر از مدل تحلیلی گلور-دام (۰/۷۵) است.

**واژه های کلیدی:** زهکشی زیرزمینی، روش مسئله معکوس، هدایت آبی اشباع، تخلخل موثر.

### مقدمه

Biggar و Nielsen ۱۹۷۶، van de Pol و

همکاران ۱۹۷۷، Simmons ۱۹۷۷، Malik ۱۹۸۳ علاوه بر آن تخلخل مؤثر خاک همچنین تابعی از ارتفاع سطح ایستابی است Pandey و همکاران ۱۹۹۲، Nikam ۱۹۸۹. بنابراین با نظری اجمالی به نتایج تحقیقات صورت گرفته، می توان به این نکته پی برد که عمل به ظاهر ساده تعیین مقادیر میانگین پارامترهای طراحی زهکشی یک مسئله پیچیده مهندسی بشمار می آید.

اخیراً از روش های مسئله معکوس Inverse Problem Technique بطور گسترده ای در تحقیقات هیدرولیک و انتقال املاح در خاک استفاده می‌شود.

Kumar و همکاران ۱۹۹۴، Hopmans و Simunek ۱۹۹۹، Zou و همکاران ۲۰۰۱، Ritter و همکاران ۲۰۰۳. در زمینه کاربرد این روش‌ها در مسائل مرتبط با زهکش های زیرزمینی تحقیقات بسیار اندکی صورت گرفته است. روش مسئله معکوس عموماً از دو قسمت تشکیل شده است:

۱- مدل شبیه‌سازی

امروزه از تئوری‌های ماندگار و غیرماندگار زهکشی بطور گسترده‌ای برای تعیین فاصله زهکش‌ها استفاده می‌شود. این مدل‌ها در بعضی شرایط نتایج خوبی بدست می‌دهند اما در برخی شرایط دیگر کاربرد این مدل‌ها نتایج امیدوار کننده‌ای بدست نمی‌دهند. وجود فرضیات ساده کننده در استخراج این معادلات و عدم تخمین یا اندازه‌گیری نسبتاً دقیق پارامترهای طراحی، از جمله دلایل مهمی است که در این زمینه مطرح می‌گردد.

Kumar و همکاران ۱۹۹۴. به علت تغییرات زمانی و مکانی زیاد این پارامترها، تعیین مقادیر واقعی آنها کاری مشکل و طاقت فرساست. تحقیقات اخیر نشان داده است که ضریب تغییرات این پارامترها بسیار زیاد بوده و در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ درصد می‌باشد Warrick و Nielsen ۱۹۸۰، Rao ۱۹۸۵، Jury ۱۹۸۶. تحقیقات همچنین نشان داده است که خصوصیات مرتبط با جریان در خاک نظیر هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر دارای توزیع لوگ - نرمال می باشند.

۱- به ترتیب دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، دانشیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، استادیار گروه

مهندسی آبیاری و زهکشی و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی

\*- وصول: ۸۳/۶/۱۰ و تصویب: ۸۳/۱۰/۲۴

آب بطرف زهکش‌ها از محل نصب زهکش تا حد واسط دو زهکش می‌باشد (شکل ۱).

#### - معادله حاکم بر جریان

معادله بوسینسک<sup>۱</sup> از جمله معادلات دیفرانسیلی هستند که در شبیه سازی جریان اشباع آب بطرف زهکشها کاربرد وسیعی پیدا نموده است Chauhan و همکاران ۱۹۶۸, Van Schilfgaard ۱۹۷۴. این معادله بر مبنای فرضیات دویوئی - فورشهایمر<sup>۲</sup> و اصل پیوستگی جریان استوار بوده و معادله دیفرانسیلی درجه ۲، پارابولیک و غیرخطی است. شکل عمومی این معادله بصورت زیر است.

$$k \frac{\delta}{\delta x} \left[ H \frac{\delta H}{\delta x} \right] = f \frac{\delta H}{\delta t} \quad (2)$$

که در آن H: ارتفاع سطح ایستابی نسبت به لایه نفوذناپذیر،  $f, k$ : هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر خاک،  $x$ : فاصله افقی از زهکش و  $t$ : زمان از شروع زهکشی می‌باشد.

#### شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه و مرزی مورد استفاده در این تحقیق بصورت زیر می‌باشد:

$$H(x, t) = H_0 \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad t = 0$$

$$x = 0, \quad t > 0 \quad H(x, t) = d_e$$

$$\frac{\delta H}{\delta x} = 0 \quad x = \frac{L}{2}, \quad t > 0$$

#### روش حل

در این تحقیق از روش حجم کنترل برای حل عددی معادله حاکم بر جریان استفاده گردید. این روش ابتدا به عنوان یک فرمول‌بندی در روش تفاضل محدود مطرح گردید اما بعدها به عنوان روشی جداگانه توسعه و در نرم افزارهای تجارتي سیالات مورد استفاده قرار گرفت. انتگرال گیری از حجم کنترل، روش حجم محدود را از سایر روش‌ها نظیر اجزا محدود و تفاضل محدود متمایز می‌کند. ایده اصلی منفصل سازی با استفاده از حجم کنترل از نظر درک ساده و از نظر فیزیک قابل تفسیر است. دیدگاه حجم کنترل بقای محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می‌کند. این روش با کارایی و پایداری مناسب در علوم مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش از معادله حاکم بر جریان معادله بوسینسک روی حجم کنترل (شکل ۲) انتگرال گیری می‌شود:

#### ۲- الگوریتم بهینه‌سازی

در این روش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای ورودی به مدل شبیه‌سازی طوری تعیین می‌گردد که خطای پیش‌بینی مدل حداقل گردد.

Dyne و Hruska (۱۹۸۳) برای اولین بار از این روش برای تخمین پارامترهای ثابت معادله وانگختاین با استفاده از داده‌های مربوط به نیمرخ رطوبتی اندازه‌گیری شده بعد از آبیاری، بهره‌گرفتند.

Ritter و همکاران (۲۰۰۳) در قالب یک طرح تحقیقاتی مقادیر پارامترهای ثابت معادله وانگختاین را با استفاده از اندازه‌گیری زمانی نیمرخ‌های رطوبتی و روش‌های معکوس پیش‌بینی و با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند.

Selker و Lorraine (۲۰۰۳) هدایت آبی اشباع خاک را تابعی از تخلخل موثر در نظر گرفته و رابطه‌ای در این زمینه ارائه نموده‌اند. هدف از این تحقیق بسط، واسنجی و آزمون مدل معکوس عددی یک بعدی و غیرماندگار در جهت برآورد مقادیر میانگین هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر خاک اطراف زهکش‌ها می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

##### تهیه مدل عددی

در این تحقیق از مدل عددی یک بعدی جریان اشباع بطرف زهکش‌ها به عنوان مدل شبیه‌سازی در روش مسئله معکوس استفاده گردید. در مدل عددی، محدودیت‌های عمده مدل‌های تحلیلی زهکشی از جمله هندسه و شرایط مرزی میدان محاسباتی از بین رفته و آنالیز دقیق‌تری میسر می‌شود.

##### میدان حل

سطح ایستابی و علائم مربوطه در اطراف یک زهکش زیرزمینی به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این شکل L فاصله بین دو زهکش، H ارتفاع سطح ایستابی در بالای لایه نفوذناپذیر، h ارتفاع سطح ایستابی در بالای سطح زهکش‌ها، de فاصله عمودی زهکش تا لایه نفوذناپذیر می‌باشد. در این تحقیق بمنظور لحاظ نمودن انحنای جریان در اطراف زهکش و وجود جریان شعاعی از عمق معادل استفاده گردیده است.  $H_0$  و  $h_0$  بترتیب ارتفاع سطح ایستابی اولیه در بالای لایه نفوذناپذیر و سطح زهکش می‌باشد.

در این تحقیق با توجه به قرینه بودن جریان آب در حد فاصل دو زهکش زیرزمینی، محدوده بررسی جریان

<sup>1</sup> -Boussinesq equation

<sup>2</sup> - Dupuit - Forchheimer

خصوصیات طبیعی و فیزیکی پارامترهای مورد مطالعه، برای کالیبراسیون مدل باید از یکی از روش های بهینه سازی مقید استفاده شود.

در برنامه کامپیوتری تهیه شده با زبان برنامه نویسی ، تابع هدفی که حداقل می گردد، بصورت زیر تعریف شده است.

$$F = \sum_{i=1}^n (h_i^m - h_i^c)^2 \quad (5)$$

که در آن  $h_i^m$ : مقدار ارتفاع سطح ایستابی اندازه گیری شده در بالای سطح زهکش،  $h_i^c$ : مقدار ارتفاع سطح ایستابی محاسبه شده در بالای سطح زهکش ها است که با مدل عددی تهیه شده و معادله گلور - دام (معادله ۶) در هر نقطه و در هر زمان، محاسبه می گردد و  $n$ : تعداد نقاط اندازه گیری است.

$$h_i^c(x, t) = \frac{4h_o}{\pi} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m} \cdot e^{-m^2 \cdot a' \cdot t} \cdot \text{Sin}\left(\frac{m \pi x}{L}\right)$$

که در آن

$$a' = \frac{\pi^2 k D}{f L^2} \quad (7)$$

$$D = d_e + \frac{h_o}{2} \quad (8)$$

در این معادلات  $D$  مقدار متوسط پتانسیل هیدرولیکی می باشد.

باتوجه به تابع هدف مسئله که محاسبه مشتق آن امکان پذیر نیست، لذا بایستی از روش های مستقیم که نیازی به محاسبه مشتق تابع ندارند، استفاده شود. در این تحقیق از روش تابع جریمه<sup>۳</sup> برای تبدیل مسئله مقید به نامقید استفاده شد. در این روش محدودیت های مساله با تغییر متغیر حذف می گردد و در نتیجه می توان از یکی از روش های بهینه سازی نامقید برای این حالت استفاده نمود (Greig ۱۹۸۰).

روش های مختلف بهینه سازی نامقید را Box (۱۹۶۶) برای توابع هدف ۲،۳،۵،۱۰ و ۲۰ متغیر مستقل مقایسه نموده است. این مقایسه ها بر اساس تعداد متغیرهای مستقل انجام شده است. به دلیل نتایج خوب و عدم نیاز به محاسبه مشتق تابع هدف، روش پاول از بین روش های مختلف انتخاب گردید.

روش پاول، روشی بسیار قوی در به دست آوردن نقطه حداقل توابع چند متغیره بدون محدودیت به حساب می آید. در این روش برای پیدا کردن نقطه با تابع هدف

<sup>3</sup> - Penalty function

(۳)

$$\int_w^{w+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} \left[ k(H) \frac{\delta H}{\delta x} \right] dx dt = \int_w^{w+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} f \frac{\delta H}{\delta t} dt dx$$

با انجام انتگرال گیری، معادله دیفرانسیلی حاکم منفصل سازی و به یک معادله جبری بشکل زیر تبدیل شود.

$$a_i H_{i-1}^{n+1} + c_i H_{i+1}^{n+1} + d_i H_i^n = b_i H_i^{n+1} \quad (4)$$

که در آن

$$c_i = \frac{k \Delta t H_e^{n+1}}{\Delta x} \quad a_i = \frac{k \Delta t H_w^{n+1}}{\Delta x}$$

$$b_i = a_i + c_i + d_i \quad d_i = f \Delta x$$

$$H_e^{n+1} = \frac{H_{i+1}^{n+1} + H_i^{n+1}}{2}$$

$$H_w^{n+1} = \frac{H_{i-1}^{n+1} + H_i^{n+1}}{2}$$

که در آن  $H_{i-1}^{n+1}, H_i^{n+1}, H_{i+1}^{n+1}$  به ترتیب ارتفاع سطحی ایستابی در گره های  $i-1, i, i+1$  و در زمان  $n+1, \Delta t, \Delta x$  بترتیب طول گام مکانی و زمانی می باشد.

اعمال این معادله جبری بر گره های محاسباتی، دستگاه معادلاتی را تشکیل می دهند که با اعمال شرایط اولیه و مرزی و به روش تکرار گوس - سایدل<sup>۱</sup>، می توان مقادیر پتانسیل هیدرولیکی ( $H$ ) را در زمان و مکانهای مختلف محاسبه نمود.

### ارزیابی صحت مدل عددی

برای اثبات صحت مدل عددی، مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در حد واسط دو زهکش توسط مدل های عددی و گلور - دام مورد پیش بینی قرار گرفت. در این حالت پارامترهای ورودی به دو مدل بصورت زیر در نظر گرفته شد.

$$h_o = 1.22 \text{ m} \quad d_e = 0.38 \text{ m} \quad L = 9.4 \text{ m}$$

$$f = 0.031 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \quad k = 0.0375 \text{ m/day}$$

مقادیر ارتفاع سطح ایستابی پیش بینی شده بوسیله مدل های عددی و گلور - دام در شکل ۳ ترسیم گردیده است. این شکل نشان می دهد، در تمامی زمانها نتایج این دو مدل همخوانی مناسبی دارند. این مطلب بیانگر صحت پیش بینی مدل عددی پیشنهادی می باشد.

### الگوریتم بهینه سازی

بسط مدل معکوس مناسب مستلزم انتخاب الگوریتم بهینه سازی قوی در تعیین حداقل مطلق<sup>۲</sup> خطای پیش بینی مدل شبیه سازی می باشد. در این تحقیق به علت

<sup>1</sup> - Gauss - Seidel

<sup>2</sup> - Absolute minimum

اعتبار سنجی مدل

برای تشخیص اینکه کدام یک از مقادیر خصوصیات هیدرولیکی (جدول ۱) دارای دقت بالاتری در پیش بینی نیمرخ سطح ایستابی است، از مقادیر مذکور برای پیش بینی نیمرخ سطح ایستابی در زمانهای ۳ و ۵ روز از آغاز زهکشی استفاده گردید که در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همچنین با استفاده از این مقادیر تغییرات زمانی ارتفاع سطح ایستابی در حد فاصل دو زهکش پیش بینی و با مقادیر اندازه گیری شده آنها مقایسه گردید (شکل شماره ۶). بدیهی است مقادیری دقت بالاتری دارند که نیمرخ های سطح ایستابی پیش بینی شده با آنها تطابق بیشتری با واقعیت داشته باشد.

#### مقایسه کمی مدل های معکوس عددی و تحلیلی

برای مقایسه کمی عملکرد مدل معکوس عددی و تحلیلی می توان از تجزیه و تحلیل خطاهای باقیمانده<sup>۳</sup> و اختلاف بین مقادیر اندازه گیری و برآورد شده، بهره گرفت. آماره های زیادی برای ارزیابی عملکرد مدل ها وجود دارد (Homaei و همکاران (۲۰۰۲)). در این مقاله از جذر میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE، خطای حداکثر<sup>۵</sup> (ME)، راندمان یا کارایی مدل<sup>۶</sup> (EF) برای ارزیابی عملکرد مدل معکوس عددی و تحلیلی استفاده شد. بیان ریاضی این آماره ها بصورت زیر می باشد:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (h_i^c - h_i^m)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$ME = \max |h_i^c - h_i^m|_{i=1}^n \quad (9)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i^m - \bar{h})^2 - \sum_{i=1}^n (h_i^c - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^n (h_i^m - \bar{h})^2} \quad (10)$$

که در آن  $h_i^c$  و  $h_i^m$  بترتیب مقدار ارتفاع سطح ایستابی پیش بینی و اندازه گیری شده،  $n$  تعداد نقاط اندازه گیری،  $\bar{h}$  مقدار میانگین ارتفاع سطح ایستابی اندازه گیری شده، است.

در شرایطی که مقادیر ارتفاع سطح ایستابی پیش بینی و اندازه گیری شده با هم برابر باشند (بهترین حالت) مقدار آماره ها به ترتیب،  $EF = 1, ME = 0, RMSE = 0$  خواهد بود. مقادیر محاسبه شده آماره های فوق الذکر برای

حداقل،  $n$  امتداد هادی در نظر گرفته و روی آن حرکت می کنیم تا نقطه بهینه روی یکی از این امتداد ها بدست آید (Greig ۱۹۸۰).

#### تشریح مدل های معکوس

در مدل های معکوس پیشنهادی، مدل ریاضی که خصوصیات جریان آب بطرف زهکش ها را شبیه سازی می کند، مدل عددی یک بعدی غیرماندگار زهکشی و مدل تحلیلی گلور - دام می باشد. از این مدل ها برای محاسبه تئوری ارتفاع سطح ایستابی در بالای سطح زهکشی در هر زمان و در هر نقطه استفاده می گردد.

حداقل بودن تابع هدف این مطلب را آشکار می کند که مقادیری برای هدایت آبی و تخلخل موثر در نظر گرفته که در هر نقطه و در هر زمان مقادیر ارتفاع سطح ایستابی محاسبه شده از مدل عددی و تحلیلی ( $h_c$ ) با تقریب خوبی نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده آنها ( $h_m$ ) است. به عبارت بهتر منحنی سطح ایستابی که مدل های عددی و تحلیلی پیش بینی می نمایند و منحنی که از آزمایش به دست آمده است، با مقدار خطای حداقل بر هم منطبق خواهند شد.

#### واسنجی مدل<sup>۱</sup>

برای واسنجی و اعتبارسنجی<sup>۲</sup> مدل عددی و تحلیلی از اطلاعات و داده های ارائه شده توسط Pandey و همکاران (۱۹۹۲) استفاده گردید. آنان در قالب یک طرح تحقیقاتی نیمرخ سطح ایستابی، هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر را اندازه گیری نمودند. آنها با استفاده از یک مدل تانک ماسه نیمرخ های سطح ایستابی در زمان های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ روز از شروع زهکشی را اندازه گیری نمودند. مقدار هدایت هیدرولیکی خاک مورد آزمایش، با استفاده از روش های چاهک و چاهک معکوس برابر ۰/۰۳۷۵ متر در روز برآورد شد. مقدار تخلخل موثر نیز در آزمایشگاه برابر ۰/۰۳۱ اندازه گیری گردید.

در این واسنجی نخست مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در زمان های ۲، ۴ و ۶ روز از آغاز زهکشی و در فواصل مختلف از زهکش تعیین گردید و به عنوان داده های ورودی به برنامه کامپیوتری معرفی شد. برنامه اجرا و مقادیر بهینه هدایت آبی و تخلخل موثر در دو مدل معکوس عددی و تحلیلی تعیین گردید. این مقادیر در جدول ۱ قید شده است.

<sup>3</sup> - Residual error

<sup>4</sup> - Root mean squar error

<sup>5</sup> - Maximum error

<sup>6</sup> - Modeling efficiency

<sup>1</sup> - Calibration

<sup>2</sup> - Verification

مدل معکوس گلور- دام می‌باشد. این جدول همچنین نشان می‌دهد که کارایی مدل معکوس عددی (۰/۹۳) در پیش بینی کل نیمرخ سطح ایستابی بهتر از مدل معکوس تحلیلی (۰/۷۵) است. بنابراین مدل معکوس عددی با کارایی و دقت بهتری نیمرخ سطح ایستابی را پیش بینی می‌نماید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش مسئله معکوس با مدل عددی یک بعدی غیرماندگار جریان اشباع بطرف زهکش، روشی موثر در پیش بینی هدایت آبی و تخلخل موثر بوده و دقت پیش‌بینی آن بسیار بهتر از روش مسئله معکوس مدل تحلیلی می‌باشد. در این تحقیق مشاهده گردید که انطباق خوبی مابین نیمرخ های سطح ایستابی پیش‌بینی شده بوسیله مدل عددی و نیمرخ‌های آزمایشگاهی مشابه وجود دارد و خطای ایجاد شده کمتر از مدل تحلیلی گلور- دام است (جدول ۲). وقتی دو نیمرخ سطح ایستابی پیش بینی شده و اندازه گیری شده با دقت قابل قبولی بر هم منطبق شود، هدف ما که همان پیش بینی صحیحتر افت سطح آب در زمان‌ها و مکان‌های مختلف است، برآورده شده است. یعنی اینکه طراحی فاصله زهکش‌ها با دقت خیلی بالاتری صورت گرفته است.

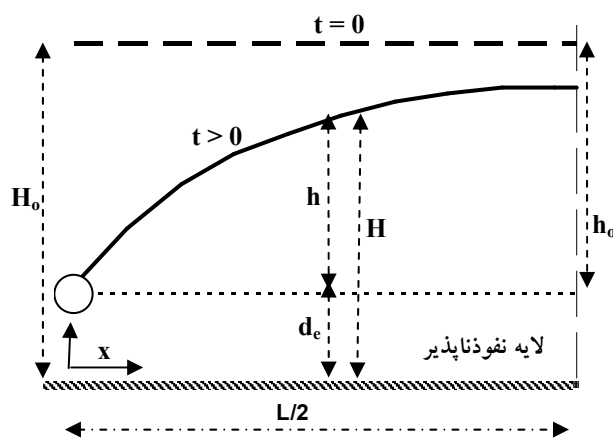
تمامی نقاط نیمرخ سطح ایستابی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

### بحث و نتیجه گیری

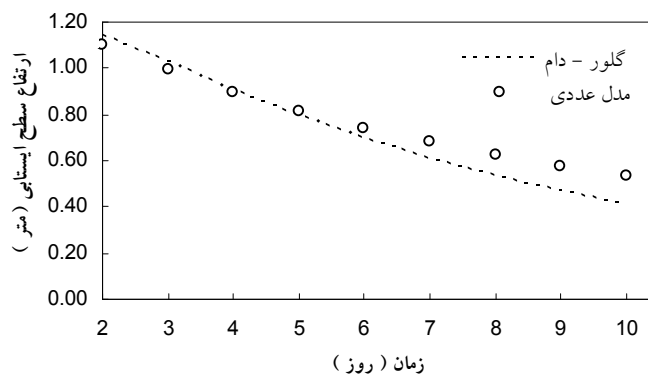
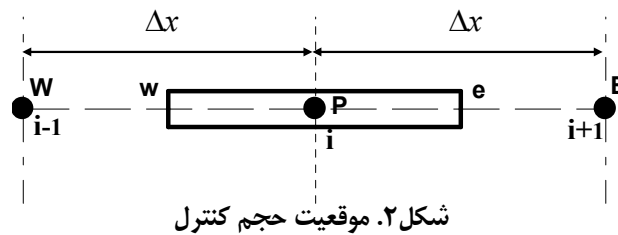
مشاهده شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نیمرخ‌های سطح ایستابی پیش‌بینی شده با مقادیر بهینه هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر به مراتب دقیق‌تر از نیمرخ‌هایی است که با استفاده از ارقام آزمایشگاهی این خصوصیات پیش‌بینی شده‌اند. این موضوع را می‌توان به عدم تطابق شرایط واقعی هیدرولیک جریان به طرف زهکش با شرایط آزمایشگاهی تعیین هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر مرتبط دانست. مشاهده این اشکال نشان می‌دهد که تأثیر خطای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی فوق‌الذکر بر دقت پیش‌بینی مدل‌های ریاضی بسیار قابل توجه است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت آبی و تخلخل موثر، خطای قابل توجهی در پیش‌بینی نوسانات زمانی سطح ایستابی در حد واسط دو زهکش ایجاد نموده است.

مشاهده جدول ۲ نشان می‌دهد که مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، خطای حداکثر روش معکوس عددی کمتر از



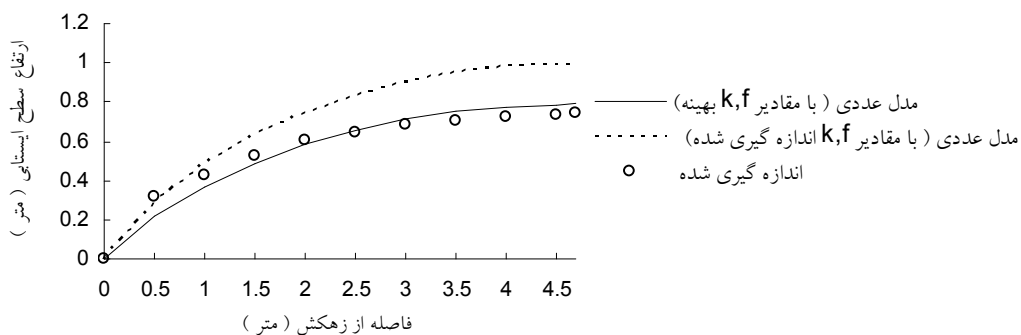
شکل ۱- شماتیک و علائم توصیف کننده مسائل زهکشی زیر زمینی



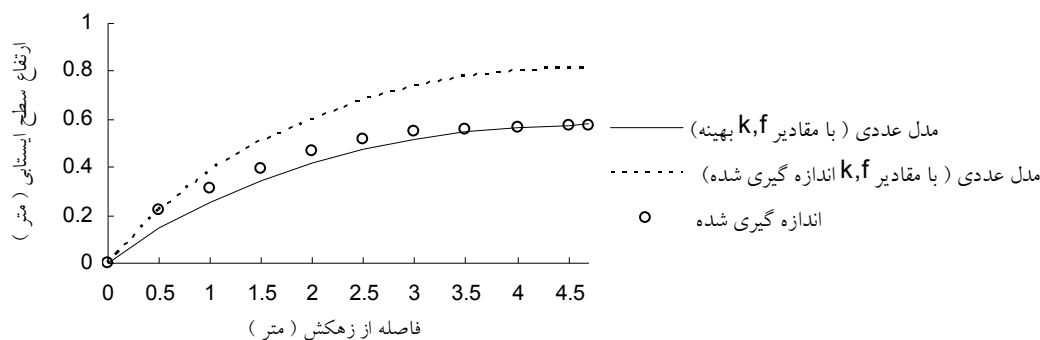
شکل ۳- تغییرات زمانی ارتفاع سطح ایستابی در حد واسط دو زهکش

جدول ۱- مقادیر هدایت آبی اشباع و تخلخل موثر اندازه گیری و بیش بینی شده بوسیله مدل های مختلف مسئله معکوس

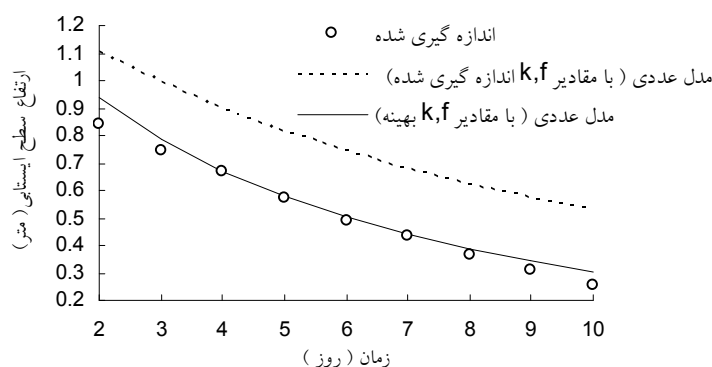
$F$ ( $m^3/m^3$ )	$K$ ( $m / days$ )	
۰/۰۳۱	۰/۰۳۷۵	اندازه گیری شده
۰/۰۱۷۴۳	۰/۰۳۷۵۳	مدل معکوس عددی
۰/۰۲۴۳	۰/۰۳۹۶	مدل معکوس تحلیلی



شکل ۴- نیمرخ سطح ایستابی اندازه گیری شده و تخمینی از مدل عددی در زمان سه روز از شروع زهکشی.



شکل ۵- نیمرخ سطح ایستابی اندازه گیری شده و تخمینی از مدل عددی در زمان پنج روز از شروع زهکشی.



شکل ۶- تغییرات زمانی مقدار ارتفاع سطح ایستابی در حد واسط دو زهکش

جدول ۲- مقدار آماره ها برای کل نقاط نیمرخ سطح ایستابی

	مدل عددی	مدل تحلیلی گلور - دام
RMSE ( m )	۰/۰۵۰۹	۰/۰۹۳۹
ME ( m )	۰/۱۹۹۴	۰/۲۷۸۵
EF	۰/۹۲۷۸	۰/۷۵۴۷

#### فهرست منابع:

1. Biggar, J. W. and Nielsen, D. R., 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resource Research*. 12: 78-84
2. Box, M. J., 1966. A comparison of several current optimization methods and use of transformation in constrained problems. *The Computer Journal*, 9: 67-77
3. Chauhan, H. S. Schwab, G. O. and Hamdy, M. Y., 1968. Analytical and computer solutions of transient water tables for drainage of sloping lands. *Water Resour. Res.*, 4: 573 – 579
4. Dagne, J. H. and Hruska, S., 1983. In – situ determination of soil hydraulic properties during drainage. *Soil Science Society of American Journal*. 47: 619 – 624
5. Greig, M. D., 1980. *Optimization*. Longman Publishing Company. New York.
6. Homaei, M. Dirksen, C. and Feddes, R. A., 2002. Simulation of root water uptake I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57: 89-109

7. Hopmans, J. W. and Simunek, J., 1999. Review of inverse estimation of hydraulic properties. In : Van Genuchten, M. TH., Leij, F. J., Wu, L. (Eds), Proceedings of the International Workshop, characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. University of California, Riverside, CA. PP: 713 – 724
8. Jury, W. A., 1985. Spatial variability of soil physical parameters in solute migration. A critical literature review. ERRI Report no. EA-4228. Electric power research institute, Palo Alto, California.
9. Kumar, S., Gupta, S. K. and Ram, S. 1994. Inverse technique for estimating transmissivity and drainable pore space utilizing data from subsurface drainage experiment. *Agricultural Water Management*. 26: 41-58
10. Lorraine, E. F. and Selker, J. S., 2003. Use of porosity to estimate hydraulic properties of volcanic tuffs, *Advances in Water Resources*. 26: 5, 561 – 571
11. Malik, R. S., Chauhan, P. S. and Dahiya, I. S., 1983. Spatial variability of infiltration parameters. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 32: 644-648
12. Nikam, P. J., 1989. Effect of evapotranspiration and variable drainable pore space on subsurface drainage design. M. Tech. Thesis, G. B. Pant University of Agricultural and Technology, Pantnagar, India ( unpublished )
13. Pandey, R. S., Bhattacharya, A. K., Singh, O. P. and Gupta, S. K., 1992. Drawdown solutions with variable drainable porosity. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 118: 382-395
14. Rao, K. V. G. K., Singh, O. P., Gupta, R. K., Kamra, S. K., Pandy, R. S. Kumbhare and Abrol, I. P., 1986. Drainage investigations for salinity control in Haryana. Central soil Salinity Research Institute, Karnal, Bull. N., 10: 95 pp.
15. Ritter, A., Hupet, F., Carpena, R. M., Lambot, S. and Van Clooster, 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
16. Simmons, C. S., 1982. A stochastic – convective transport representation of dispersion in one – dimensional porous media system. *Water Resour. Res.*, 18: 1193-1241.
17. Van de Pol, R. M., Wierenga, P. J. and Nielsen, D. R., 1977. Solute movement in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 10-13
18. Van Schilfgaarde, J., 1974. Non-steady flow to drains. In: J. van Schilfgaarde (Editor), *Drainage for Agriculture*. American Soc. Of Agronomy, Madison, pp. 245-270
19. Warrick, A. W. and Nielsen, D. R., 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: D. Hillel (Editor ), *Application of Soil Physics*. Academic Press, New York, pp. 319-344
20. Zou, Z. Y., Young, M. H., Li, Z. and Wierenga, P. J., 2001. Estimation of depth averaged unsaturated soil hydraulic properties from infiltration experiments. *Journal of Hydrology*. 242: 26 – 42



