تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک‌های دارای اشباع‌شدگی متغیر به‌روش مدل سازی معکوس و بهره‌گیری از داده‌های توزیع مجدد رطوبت

محمد نخعی و وهاب امیری[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱)

چکیده

مدل سازی جریان آب و انتقال مواد محلول در محیط‌های متخلخل دارای اشباع‌شدگی متغیر نیازمند اطلاعات تکمیلی و دقیق خصوصیات هیدرولیکی خاک می‌باشد. خصوصیات هیدرولیکی که در این مطالعه با استفاده از حل معکوس تعیین شده‌اند هدایت هیدرولیکی غیراشباع K(h) و تابع نگهداشت آب **θ(h)** می‌باشد. در روش حل معکوس فرض می‌شود که **K(h)** و **θ(h)** را همانند پارامترهای انتقال به‌صورت **هم‌زمان و با استفاده از داده‌های جریان ناپایدار و به‌کارگیری آنها در حل معکوس معادلات حاکم بر جریان و انتقال مواد تعیین کرد. به‌منظور دستیابی به‌نتایجی واحد، قابل شناسایی و پایدار در موقعیت‌ها و شرایط مختلف آزمایشی، آزمایش عددی جدید توزیع مجدد مورد** ارزیابی و استفاده قرار گرفت. برای مطالعه شکل تابع هدف در حالت کمترین مقدار آن، سطوح پاسخ برای پارامترهای تخمینی تهیه شد. حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی نیز محاسبه و تحلیل شد. نتایج آزمایش توزیع مجدد نشان می‌دهد زمانی‌که **متغیرهای خروجی‌های مدل به‌اندازه کافی به پارامترهای بهینه شده حساس نیست عدم یگانگی جواب افزایش می‌یابد. مقادیر تخمینی پارامترها به** بزرگی خطای داده‌های اندازه‌گیری شده حساس است. در این آزمایش، تخمین پارامتر براساس داده‌های بار فشار حل یگانه‌ای را در اختیار قرار **می‌دهد. به‌دلیل جریان ترجیحی در نمونه، مشاهدات کشش‌سنجی می‌تواند نتایج اشتباهی برای حل معکوس مساله مورد نظر ارائه دهد. استفاده از اطلاعات هدایت هیدرولیکی می‌تواند یگانگی جواب را بیشتر کرده و خطای تخمین پارامترهای تجربی α و n را کاهش دهد. آنالیز حساسیت** می‌تواند ابزار مفیدی برای تعیین زمان بهینه و توزیع موقعیت نقاط مشاهداتی در آزمایش باشد.

واژه‌های کلیدی: تخمین پارامتر، حل معکوس، تابع هدف، سطح پاسخ

۱. گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vahab.amiri@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]

مقدمه

مدیریت بهینه منابع آبی و خاکی نیازمند مدل سازی ریاضیاتی می‌باشد که قادر به شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی باشد. این مدل‌ها به وضعیت فیزیکی و هندسه محیط، شرایط مرزی و خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله توابع هدایت هیدرولیکی و نگهداشت خاک وابسته می‌باشند(۴).

اطلاع از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع مانند هدایت هیدرولیکی غیراشباع برای شبیه‌سازی جریان آب و مواد محلول در محیط متخلخل ضروری می‌باشد. مبنای تمامی روش‌های حل عددی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال مواد محلول در محیط متخلخل معادله دیفرانسیلی ریچاردز می‌باشد(۲).

تحلیل جریان در منطقه غیراشباع خاک بسیار پیچیده بوده و به دو تابع غیرخطی K(h) و θ(h) که پارامترهای هیدرولیکی خاک نام دارند بستگی دارد (۲). در این مطالعه از فرم اصلاح شده مدل ون‌گنوختن(۸) که توسط فوگل و همکاران (۹) برای توابع غیرخطی K(h) و θ(h) ارائه شد؛ استفاده شده است. توابع غیرخطی یاد شده به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{\left[1+|\alpha h|^n\right]^m} & h<h_s\\ \theta_s & h\geq h_s\end{cases}$$

$$K_r=S_e^{\,l}\left[\frac{1-F(\theta)}{1-F(\theta_s)}\right]^2$$

که

$$K(h)=\begin{cases}K_sK_r(h) & h<h_s\\ K_s & h\geq h_s\end{cases}$$

$$F(\theta)=\left[1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_m-\theta_r}\right)^{1/m}\right]^m$$

$$F(\theta)=\left[1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_m-\theta_r}\right)^{1/m}\right]^m$$

که در روابط فوق $k_r(h)$ تابع هدایت هیدرولیکی نسبی، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع و h_s میزان مکش حد آستانه ورود هوا می‌باشند. در این مدل تحلیلی، توابع غیرخطی K(h) و θ(h) را به‌وسیله شش پارامتر هیدرولیکی θ_r، θ_s، θ_m، k_s ، α و n تعریف می‌کنند که θ_r رطوبت باقیمانده، θ_s رطوبت اشباع، θ_m پارامتر رطوبتی تجربی (empirical water content parameter)، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع و α و n پارامترهای شکل می‌باشند.

تخمین پارامترهای مؤثر جریان در مدل محیط‌های غیراشباع مبتنی بر مشاهدات صورت گرفته در مقیاسی کوچک‌تر از مقیاس واقعی مدل می‌باشد که این موجب ایجاد مشکلاتی در تخمین پارامترهای خاک‌های ناهمگن می‌شود. بنابراین باید سعی کرد مسیری را برای مطالعه در پیش گرفت که از این خطا و مشکل ذکر شده دوری کرد (۳).

عموماً اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات هیدرولیکی برای جریان غیراشباع وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. در روش مستقیم اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری میزان نفوذ از سطح یک نمونه خاک در آزمایشگاه بعد از پایدار شدن جریان انجام می‌گیرد. استفاده از روش‌های غیرمستقیم تخمین خواص هیدرولیکی محیط متخلخل جایگزینی مناسب برای روش‌های وقت‌گیر و پرهزینه مستقیم می‌باشد (۱).

یکی از روش‌های غیرمستقیم که مورد توجه محققین علم فیزیک خاک و جریان در محیط متخلخل قرار گرفته، روش حل معکوس تخمین پارامترهای مورد بحث می‌باشد. در این روش داده‌های حاصل از یک آزمایش غیرماندگار که"مشاهدات" نام دارند با روش حداقل مربعات براساس الگوریتم مارکورت بر داده‌های استخراج شده از مدل تشریح کننده پدیده مورد آزمایش برهم منطبق شده و پارامترهای محیط متخلخل تخمین زده می‌شود (۵).

تخمین پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل به روش حل معکوس بدین‌صورت است که با انتخاب یک تابع هدف که متشکل از خروجی‌های مدل حاکم بر جریان و مشاهدات

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]

اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و کمینه کردن آن به‌ازای پارامترهای مجهول در مدل یک سری مقادیر اولیه حدسی جایگزین گردیده و محاسبات با تغییر این پارامترها در جهت کمینه کردن تابع هدف ادامه می‌یابد تا جائیکه برازش خروجی‌های مدل و مشاهدات قابل قبول باشد (۷). بنابراین در مسائل معکوس، هدف پیدا کردن یک بردار بهینه p* می‌باشد به‌گونه‌ای که تابع هدف g(p) را به‌نحوی کاهش دهد که در بهترین حالت، ((v(p*) محاسباتی= (v) مشاهداتی(۲).

مواد و روش‌ها

الف)توصیف خصوصیات خاک و فرآیند مورد نظر

در این آزمایش از دو نمونه مغزه خاک دست نخورده و مشابه که در یک زمان و از عمق مشابهی تهیه شده بود استفاده شد. در این مطالعه فرض شد که پدیده پسماند (hysteresis) در خاک وجود ندارد. نمونه‌های تهیه شده دارای ارتفاع ۶ سانتی‌متر و قطر داخلی ۸ سانتی‌متر می‌باشند. یکی از این نمونه‌ها (نمونه ۱) با آب اشباع شده و نمونه دیگر (نمونه ۲) تا مقدار قابل قبولی خشک شد (در اندازه‌ای که کشش‌سنج (tensiometer) قادر به نمایش عدد باشد). در این مطالعه دو کشش‌سنج برای ثبت بار فشار مورد استفاده قرار گرفت. یکی از کشش‌سنج‌ها در سطح بالایی نمونه ۱ و کشش‌سنج دیگر در سطح زیرین نمونه ۲ نصب شد. سپس آزمایش توزیع مجدد با قرارگیری نمونه اشباع شده ۱ روی نمونه خشک ۲ و ثبت بار فشار توسط دو کشش‌سنج نصب شده شروع و پیگیری شد.

شرایط اولیه برای نمونه ۱ به‌صورت بار فشار تعادلی در تمامی پروفیل و h=۰ در سطح زیرین آن و برای نمونه ۲ نیز شرایط تعادلی با h=-۳۰۰ در مرز زیرین آن در نظر گرفته شد. شرایط مرزی بدون شار برای سطح بالایی نمونه ۱ و سطح زیرین نمونه ۲ در نظر گرفته شد. پارامترهای واقعی این نمونه‌های خاک به‌صورت زیر است:

θ_r=۰/۸, θ_s=۰/۴۵, θ_m=۰/۴۵, K_S=۴/۴۳ cm/hr, α= ۰/۸ cm^{-1}, n = ۱/۹۵

شکل‌های ۱ و ۲ خصوصیات هیدرولیکی واقعی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

ب) برداشت و تهیه داده

با استفاده از پارامترهای واقعی تعریف شده در بالا، مشاهدات ساختگی بار فشار و محتوی رطوبتی برای خاک‌های مورد مطالعه تولید شد. بار فشاری ثبت شده از سطح بالایی نمونه اشباع (نمونه ۱) و سطح زیرین نمونه خشک (نمونه۲) برای حل پیشرو مساله با استفاده از برنامه WS_1D_INV در زمان‌های تعیین شده مورد استفاده قرار گرفت. مشاهدات ساختگی بار فشار با استفاده از خطاهای تصادفی که دارای توزیع نرمال بود دستکاری شده که به این طریق بتوان خطای اندازه‌گیری واقعی را شبیه‌سازی کرد. انحراف معیار خطاهای اعمال شده بر اندازه‌گیری‌های ساختگی برابر یک سانتی‌متر انتخاب شد.

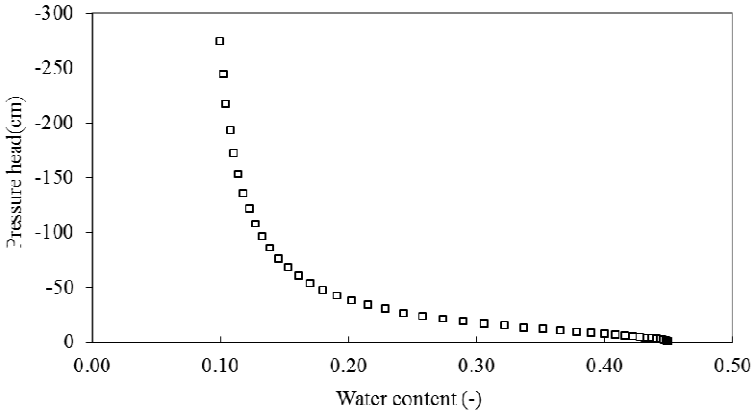
ج) حل معکوس مساله

در این مطالعه تخمین دو پارامتر تجربی (empirica parameter) a و n صورت گرفت و فرض بر این بود که سایر پارامترها معلوم بوده و در طول فرآیند بهینه‌سازی مساوی با مقادیر واقعی تعریف شده است. چهار تخمین اولیه از پارامترهای موردنظر[(۰/۰۳،۳/۱) (۰/۱۳،۱/۵) , (۰/۱۳،۳/۱) , (۰/۰۳،۱/۵)] برای گوشه‌های یک محدوده مستطیلی از α و n برای اجرای برنامه درنظر گرفته شد. استفاده از مقادیر اولیه تخمین‌ها این امکان را فراهم می‌کند که یگانگی فرآیند تخمین پارامتر در حل معکوس را مورد ارزیابی قرار گیرد.

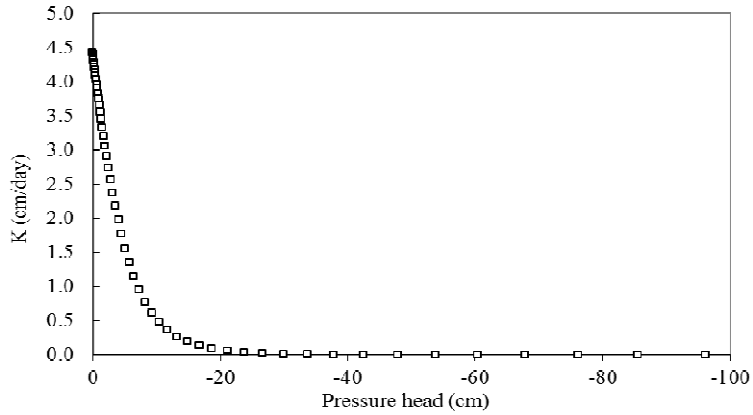
داده‌های مشاهداتی تولید شده با حل پیشرو در تابع هدف (φ) (objective function) وارد شد. در این مطالعه دو سناریو دنبال شد. در سناریوی اول داده‌ها بدون اضافه کردن خطا مورد استفاده قرار گرفت و این در حالی است که در سناریوی دوم داده‌ها با خطاهای تصادفی دارای توزیع نرمال مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، برنامه WS_1D_INV برای هر یک از مقادیر اولیه a و n یک بار اجرا شد. نتایج مربوط به ۴ بار اجرای برنامه در جدول ۱ ارائه شده است. در این مورد خطاها به مشاهدات اضافه نشده‌اند.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]



شکل۱. منحنی نگهداشت واقعی خاک فرضی در آزمایش توزیع مجدد



شکل۲. تابع هدایت هیدرولیکی واقعی خاک فرضی استفاده شده در آزمایش توزیع مجدد

جدول۱. نتایج تخمین پارامتر (داده‌ها بدون خطا مورد استفاده قرار گرفته است)

اجرای برنامه	مقدار اولیه		مقدار بهینه		تابع هدف	R۲
	α	n	α	n		
۱	۰/۰۳	۳/۱	۰/۰۸۰۰	۱/۹۴۹۳	۰/۰۹۶۴	۰/۹۹۹۹۹۹۸۶
۲	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۷۴۴	۲/۰۵۴۳	۴۶/۰۴۶۰	۰/۹۹۹۹۲۳۲۹
۳	۰/۱۳	۳/۱	۰/۰۷۳۶	۲/۰۳۷۳	۲۹/۲۵۶۰	۰/۹۹۹۹۶۶۹۰
۴	۰/۱۳	۱/۵	۰/۰۷۲۵	۲/۰۲۰۷	۳۱/۱۶۸۰	۰/۹۹۹۹۷۴۴۴

مقایسه مقادیر واقعی و تخمین‌های بهینه شده اولیه داده‌های بار فشار در سطح بالایی نمونه ۱ (عمق صفر سانتی‌متر) در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برازش و تطابق خوبی بین مقادیر واقعی و داده‌های بار فشار بهینه شده وجود دارد. شکل ۴ بار فشار تولید شده با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی واقعی خاک و تخمین اولیه پارامترهای مورد نظر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]

(n=۳/۱ ، α=۰/۰۳) و بار فشار به‌دست آمده با استفاده از حل معکوس در سطح زیرین نمونه ۲ را نمایش می‌دهد.

شکل ۵ منحنی نگهداشت تهیه شده با استفاده از مقادیر واقعی و تخمین اولیه (n=۳/۱ ، α=۰/۰۳)و مقدار بهینه شده را نشان می‌دهد. در این مورد بار فشار بدون خطا مورد استفاد قرار گرفته است.

مقادیر واقعی با تخمین اولیه (n=۳/۱ ، α=۰/۰۳) و مقدار بهینه شده توابع هدایت هیدرولیکی در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این مورد نیز از داده‌های بار فشار بدون وارد کردن خطای تصادفی استفاده شده است. توابع هدف در دامنه α-n محاسبه شد و براساس این توابع هدف محاسبه شده نیز سطوح پاسخ در یک شبکه مستطیلی تهیه شد. شکل سطح پاسخ نشان‌دهنده مقدار تابع هدف برای ترکیبات مختلف از پارامترهای قابل تعدیل است.

نتایج بهینه‌سازی که در جدول ۱ ارائه شده است همگرایی مناسب و قابل قبول این روش حل را با مقدار واقعی پارامترها در صفحه α-n برابر (۱/۵، ۰/۰۸) نشان می‌دهد. در شکل ۷ می‌توان سطح پاسخ تابع هدف در فضای پارامترهای بهینه شده α و n برای سناریوی اول را مشاهده کرد.

سطح پاسخ برای سناریوی اول که از داده‌های مشاهداتی بدون اضافه کردن خطا استفاده شده است به وضوح نشان می‌دهد که یک کاهش کلی در تابع هدف وجود دارد و این بیانگر وجود یگانگی در حل مساله مورد نظر بوده و آزمایش توزیع مجدد موفق می‌باشد.

د) اثر خطای داده‌ها

در این پژوهش هم‌چنین به‌بررسی اثر خطای داده‌ها بردقت تخمین و شناسایی پارامترها مورد ارزیابی پرداخته شد و فرض شد که در این مورد از یک مدل دقیق استفاده شده است ولی داده‌های ورودی دارای خطای تصادفی با توزیع نرمال هستند. خطای داده را می‌توان با(α،۰) N نمایش داد که این خطاها به مقادیر به‌دست آمده با استفاده از روش حل پیشرو اضافه شد. در حل پیشرو از پارامترهای واقعی ذکر شده در بالا استفاده شد. انحراف معیار خطاها برابر یک سانتی‌متر(α_h =۱)درنظر گرفته شد.

شکل ۸ داده‌های ساختگی بار فشار را در سطح بالایی نمونه ۱(عمق صفر سانتی‌متری) را برای دسته پارامترهای بهینه‌شده و تخمین‌های اولیه نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برازش خوبی بین داده‌های بار فشار ساختگی (واقعی) و سطوح پاسخ مدل بهینه شده وجود دارد.

شکل ۹ مشاهدات بار فشار تولید شده با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی واقعی خاک که دارای خطاهای تصادفی می‌باشند را نشان می‌دهد. در این حالت از تخمین اولیه (n=۳/۱ ، α=۰/۰۳) و نتایج بهینه شده مدل که با استفاده از حل معکوس مساله در سطح زیرین نمونه ۲ به‌دست آمد؛ استفاده شد. در جدول ۲ می‌توان نتایج تخمین پارامتر و اجرای مدل در قالب سناریوی دوم را مشاهده کرد.

شکل ۱۰ منحنی نگهداشت واقعی، به‌دست آمده با تخمین اولیه (n=۳/۱ ، α=۰/۰۳) و بهینه شده را نمایش می‌دهد.

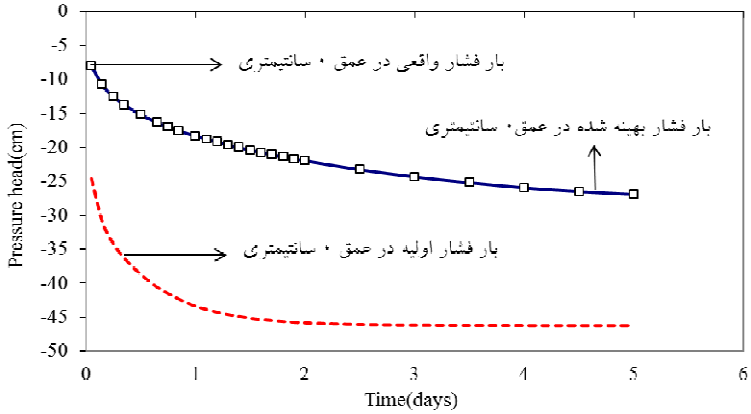
توابع هدایت هیدرولیکی خاک در حالت واقعی، به‌دست آمده با تخمین اولیه (n=۳/۱ ، α=۰/۰۳) و بهینه شده را می‌توان در شکل ۱۱ ملاحظه کرد.

سطح پاسخ تابع هدف برای سناریوی دوم در دامنه α-n تهیه شد. نتایج بهینه شده که در جدول ۲ ارائه شده است نشان می‌دهد تطابق و همگرایی خوبی بین مقادیر به‌دست آمده و پارامترهای واقعی در سطح α-n با (۱/۹۵، ۰/۰۸) وجود دارد. شکل ۱۲ سطح پاسخ تابع هدف را در سطح α-n نمایش می‌دهد(داده‌های بار فشار با خطای یک سانتی‌متری استفاده شده‌اند).

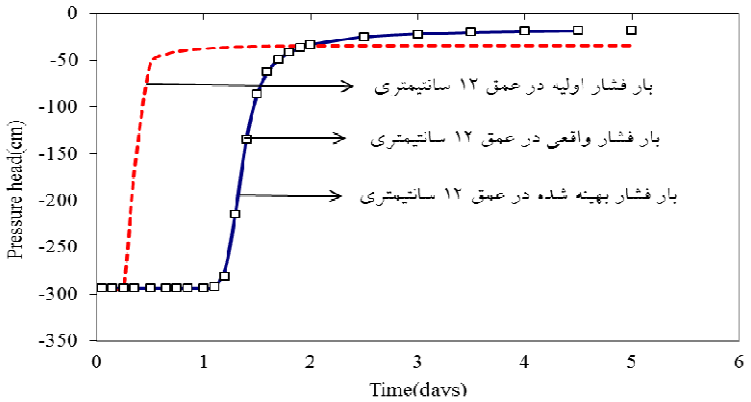
سطح پاسخ نشان می‌دهد با وجودی‌که داده‌ها دارای خطای تصادفی هستند ولی استفاده از آزمایش توزیع مجدد می‌تواند منجر به‌دستیابی نتایج مناسب و قابل قبولی در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با بهره‌گیری از روش حل معکوس شود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

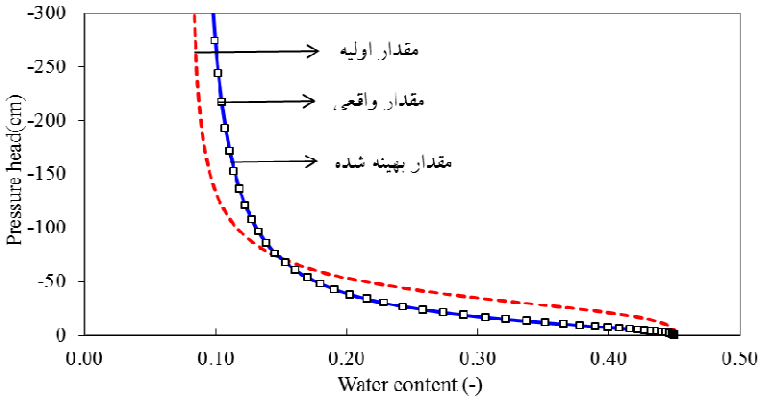
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]



شکل۳. مقایسه مشاهدات ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه (حدسی) و بهینه شده در سطح بالایی نمونه ۱ (داده‌های بار فشار در عمق صفر سانتی‌متری)



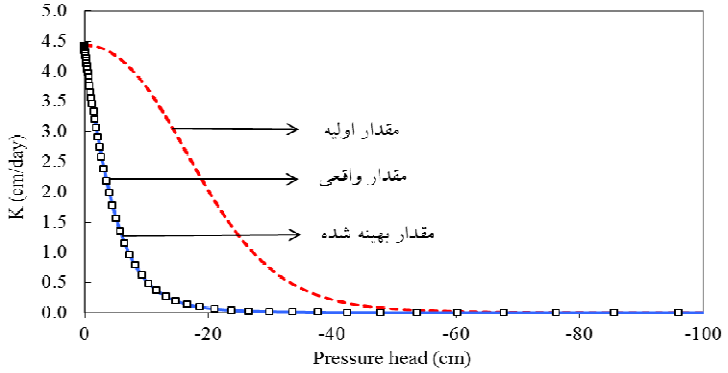
شکل۴. مقایسه مشاهدات ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه (حدسی) و بهینه شده در سطح زیرین نمونه۲ (داده‌های بار فشار در عمق ۱۲ سانتی‌متری)



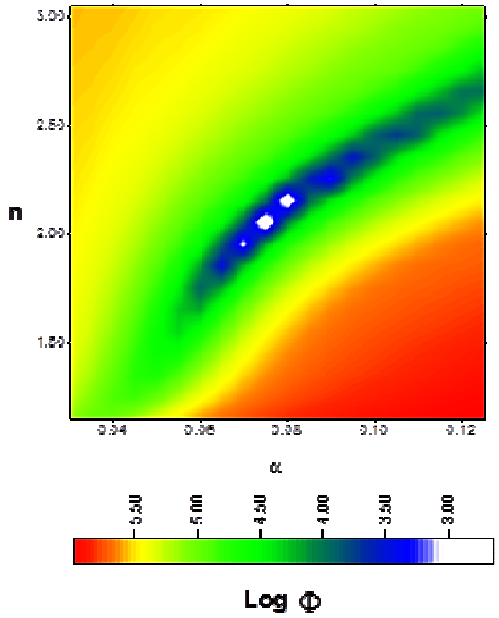
شکل۵ . تابع نگهداشت ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه(حدسی) و بهینه شده برای سناریو اول (تخمین اولیه n=۳/۱ ، α=۰/۰۳)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

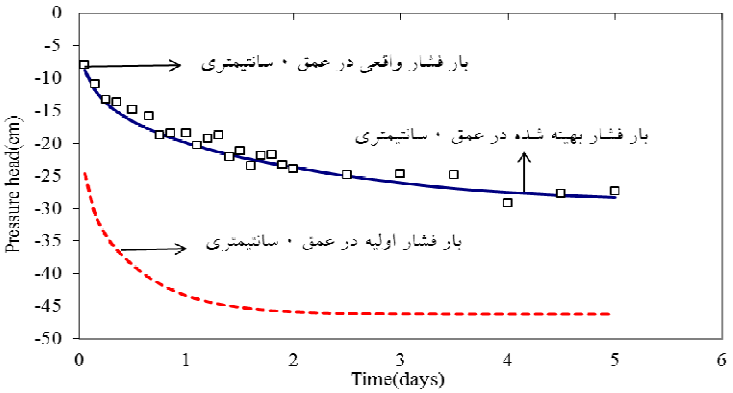
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]



شکل۶. تابع هدایت هیدرولیکی ساختگی(واقعی)، تخمینی اولیه(حدسی) و بهینه شده برای سناریو اول
(تخمین اولیه n=۳/۱ ، α=۰/۰۳)



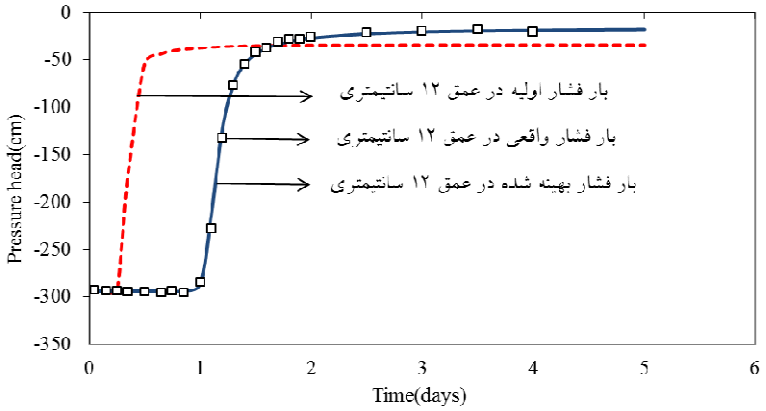
شکل۷. سطح پاسخ مربوط به تابع هدف در صفحه α-n (مشاهدات بار فشار بدون دخالت خطا می‌باشند)



شکل۸. مقایسه مشاهدات ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه (حدسی) و بهینه شده در سطح بالایی نمونه ۱
(داده‌های بار فشار در عمق صفر سانتی‌متری و دارای خطای تصادفی با توزیع نرمال می‌باشد)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

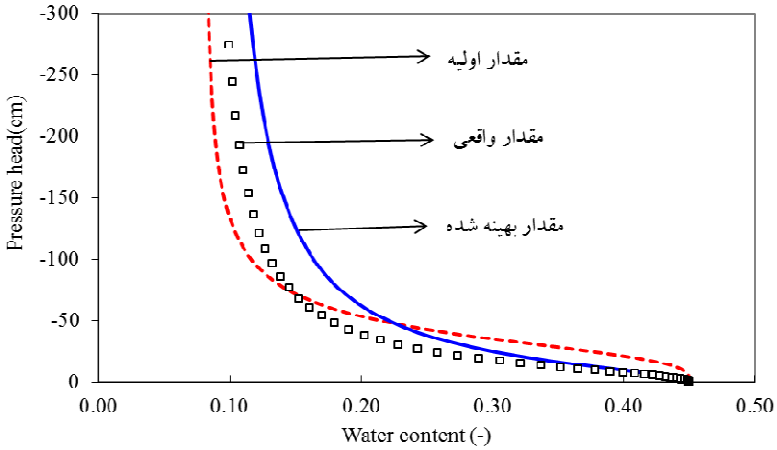
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]



شکل۹. مقایسه مشاهدات ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه (حدسی) و بهینه شده در سطح زیرین نمونه۲ (داده‌های بار فشار در عمق ۱۲ سانتی‌متری و دارای خطای تصادفی با توزیع نرمال می‌باشد)

جدول۲. نتایج تخمین پارامتر سناریو ۲ (خطای یک سانتی‌متری در داده‌های بار فشار وارد شد)

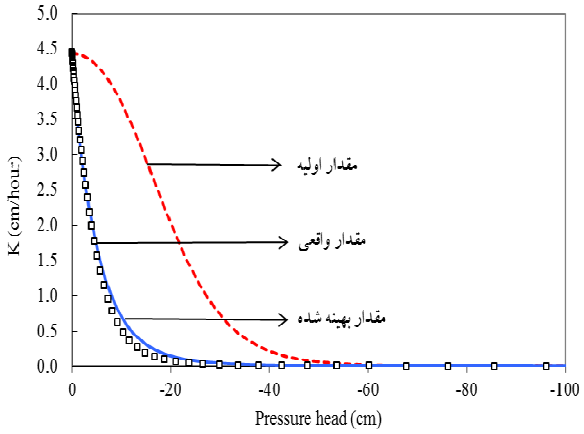
اجرای برنامه	مقدار اولیه		مقدار بهینه		تابع هدف	R۲
	α	n	α	n		
۱	۰/۰۳	۳/۱	۰/۰۷۲۲	۲/۰۲۱۵	۱۹۷	۰/۹۹۹۲۲۸۵
۲	۰/۰۳	۱/۵	۰/۰۷۳۸	۲/۰۴۳۴	۶۹/۳	۰/۹۹۹۷۵۶۹
۳	۰/۱۳	۳/۱	۰/۰۷۴۸	۲/۰۵۹۵	۷۲/۱	۰/۹۹۹۸۷۱۵
۴	۰/۱۳	۱/۵	۰/۰۶۲۶	۱/۸۰۳۷	۴۰۰	۰/۹۹۶۷۵۰۷



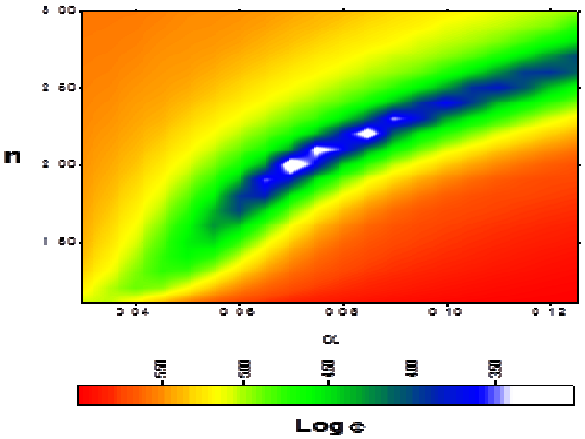
شکل۱۰. منحنی نگهداشت ساختگی (واقعی)، تخمینی اولیه (حدسی) و بهینه شده برای سناریو اول (داده‌ها دارای خطای یک سانتی‌متری تصادفی می‌باشند)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]



شکل۱۱. تابع هدایت هیدرولیکی واقعی، تخمین اولیه(حدسی) و بهینه شده برای سناریو دوم (تخمین اولیه n=۳/۱ ، α=۰/۰۳)



شکل۱۲. سطح پاسخ مربوط به تابع هدف در صفحه α-n (مشاهدات بار فشار دارای خطای یک سانتی‌متری می‌باشد)

نتایج

تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های کشش‌سنجی بار فشار و با بهره‌گیری از روش حل معکوس می‌تواند نتایج قابل قبولی را در اختیار قرار دهد. دستیابی به نتایج قابل قبول در قالب سطوح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعه در دو سناریو دنبال شد که در سناریو اول داده‌های بار فشار بدون خطا مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل از اجرای برنامه و سطوح پاسخ مرتبط با آنها نیز تهیه گردید. در سناریو دوم داده‌های بار فشار با خطای تصادفی داری توزیع نرمال مورد استفاده قرار گرفت و بار دیگر فرآیند اجرای مدل، تخمین پارامترهای موردنظر و نهایتاً ارزیابی نتایج با استفاده از سطوح پاسخ دنبال شد. در حالت اول می‌توان یک افت محلی کوچک را اضافه بر افت کلی در سطح پاسخ مشاهده کرد. در حالت دوم با اضافه کردن خطا به داده‌ها مشاهداتی، تعداد افت‌های محلی در نزدیکی افت کلی افزایش یافت. با وجودی‌که اضافه کردن خطا در داده‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در حل یگانه مساله به‌وجود آورد ولی در این مطالعه به‌منظور نزدیک شدن وضعیت آزمایش و داده‌های ثبت شده به‌شرایط واقعی از داده‌های بار فشار دارای خطا نیز استفاده شد و نتایج نیز نشان داد که تخمین پارامتر با استفاده از حل معکوس مبتنی بر داده‌های به‌دست آمده با آزمون توزیع مجدد می‌تواند مساله‌ای خوش وضع را پیش روی ما قرار داده که با حل آن به نتایجی با دقت بالا دست پیدا کنیم.

منابع مورد استفاده

1. Bnouni, C. J. Sghaier, H. Sammouda and F. Lehmann. 2010. Parameter Estimation of Soil Hydraulic Functions for Unsaturated Porous Media Using an Inverse Problem and Multistep Outflow Experiment. J. Porous Media.Vol.8
2. Dobre, G. R. and R. Drobot. 2010. Estimating Soil Hydraulic Parameters Using a Metaheuristic Algorithm. Scientific Bulletin. Series, Mathematical Modeling in Civil Engineering, ISSN: 1841-5555.
3. Erdal, D., I. Neuweiler and J. A. Huisman. 2012. Estimating effective model parameters for heterogeneous unsaturated flow using error models for bias correction. Water Resour. Res., 48: W06530, doi:10.1029/2011WR011062
4. Jadoon, K., Z. S. Lambot, H. Verrecken and E. Slob. 2009. Parameter Estimation for Unsaturated Soil Hydraulic Properties Using Full-waveform Hydrogeophysical Inversion of Time-lapse GPR Data. Society of Exploration Geophysicists.
5. Prasad, K., C. Ojha, P. Chandramouli and C. Madramootoo. 2010. Estimation of Unsaturated Hydraulic Parameters from Infiltration and Internal Drainage Experiments. J. Irrigation and Drainage Eng. 136(11): 766–773.
6. Raoof, M. and A. Pilpayeh. 2011. Estimating unsaturated soil hydraulic properties in sloping lands by numerical

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]

inversion. J. Food, Agri. & Environ. Vol.9 (3&4): 1067-1070.
7. Ritter, A. R. Munoz-Carpena, C. M. Regalado, M. Vanclooster and S. Lambot. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. J. Hydrol. 295:124–139
8. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
9. Vogel, T., K. Huang, R. Zhang and M. Th. van Genuchten. 1996. The HYDRUS code for simulating one dimensional water flow, solute transport, and heat movement in variably-saturated media, version 5.0. Research Report 140, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California, 131. p.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.18.5]