برآورد پارامترهای پراکندگی هیدرودینامیکی و هدایت حرارتی خاک با روش‌های ژئوفیزیکی و حرارت‌سنجی

محمد نخعی؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین

چکیده

تاریخ: دریافت ۹۱/۷/۲ **پذیرش** ۹۲/٦/١٦

در مباحث کشاورزی اطلاع از خصوصیات هیدرولیکی، فیزیکی و حرارتی خاک به‌منظور پیش‌بینی دقیق تأثیر حرارت خاک بر چگونگی نمو دانه، نگه‌داشت آب در خاک، هدایت هیدرولیکی محیط غیراشباع و جریان بخار آب در خاک ضروری است. در تحقیق حاضر با استفاده از بررسی‌های ژئوفیزیکی و حرارت‌سنجی به تعیین خصوصیات هیدرولیکی و حرارتی محیط متخلخل غیراشباع پرداخته شد. از تزریق آب با دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ثبت داده‌های حرارتی محیط به‌مدت ۳۲۵۵ ثانیه از شروع نشت با ۲ حس‌گر حرارتی برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز حل معکوس استفاده شد. از ٤٨ دادهٔ حرارتی حس‌گر نصب شده در عمق ۵۰ سانتی‌متری و ٤٨ داده برداشت شده از تغییرات دمایی آب تزریقی برای تعیین پارامترهای هیدورلیکی و حرارتی استفاده شد. در این پژوهش از ۱۲۱ موقعیت سونداژ ژئوالکتریکی برای برداشت داده به‌روش ونر، شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی استفاده شد. بررسی و تفسیر منحنی‌های به‌دست آمده از این سونداژها نشان داد که عمق سطح ایستابی در ۷۵ متری است. لایه‌بالای (منطقه غیراشباع) از نوع آبرفتی است که از سه لایه تشکیل شده است. در این پژوهش از آب نمک با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر به‌عنوان آلودگی برای بررسی توزیع و پخش‌شدگی آن در منطقه غیراشباع استفاده شد. آرایه‌های ونر و قطبی- قطبی برای ردیابی و به تصویر در آوردن آلودگی استفاده شد. آرایهٔ قطبی-قطبی نسبت به آرایهٔ ونر گسترش پولوم را در جهت عمقی و افقی کم‌تر از مقدار واقعی نشان داد. به‌خصوص گسترش عمقی را خیلی کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. بر اساس تزریق آب در مجاورت ترانشه و مشاهدهٔ زمان رسیدن آب به آن، سرعت واقعی آب در جهت ۳۵ درجه نسبت به افق برابر ۰/۱۵۹ متر بر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

ساعت به‌دست آمد. ضریب گسترش عمودی به افقی برابر با ۱/٤ تعیین شد. بررسی خصوصیات هیدرولیکی و حرارتی محیط متخلخل غیراشباع با استفاده از نرم‌افزار هیدروس-۲ D[1] انجام شد. در این پژوهش ۵ پارامتر هیدرولیکی خاک شامل θ_r، θ_s، α، n و K_s و هم‌چنین ۵ پارامتر انتقال حرارت خاک شامل λ_L، λ_T، C_n،C_0 وC_w بهینه‌یابی شد. پس از اجرای مدل، تخمین پارامترها (تطبیق مقادیر حرارتی مشاهداتی و پیش‌بینی شده) با R^2 برابر ۰/۹۷ و مقدار تابع هدف برابر ۱۱/۵ صورت گرفت. مقدار خطای محاسباتی در بیلان جرمی نیز برابر با ۰/٦۷ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: محیط غیراشباع، ژئوالکتریک، HYDRUS-2D، پارامترهای هیدرولیکی خاک، پارامترهای حرارتی خاک.

* **نویسندهٔ مسئول** nakhaei@khu.ac.ir

مقدمه

در مباحث کشاورزی مانند جوانه زدن دانه و شروع و ادامه رشد آن اطلاع از خصوصیات فیزیکی و حرارتی خاک به‌منظور پیش‌بینی دقیق تأثیر حرارت خاک بر چگونگی نمو دانه، نگه‌داشت آب در خاک، هدایت هیدرولیکی محیط غیراشباع و جریان بخار آب در خاک ضروری است [۱]. در سال‌های اخیر بررسی‌های فراوانی در زمینهٔ تعیین خصوصیات حرارتی خاک مانند هدایت حرارتی خاک (λ)، ظرفیت حجمی حرارت(C) و انتشار حرارتی خاک (K) صورت گرفته است.

انتقال و مهاجرت حرارت در یک محیط عمدتاً به مقاومت حرارتی (قابلیت یک ماده در جلوگیری از انتقال حرارت)، گرمای ویژه آن (توانایی ماده در ذخیرهٔ حرارت) و انتشار حرارتی (ترکیبی از خصوصیات انتقالی و ذخیره‌ای ماده و محیط که نرخ تغییر حرارت در محیط را نشان می‌دهد) بستگی دارد [۲].

تعیین پارامترهای حرارتی خاک با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌شود. در پژوهشی که در سال ۲۰۰٦ مورتنسن و همکاران انجام دادند [۳]، پارامترهای جریان، انتقال مواد محلول

۱. HYDRUS-2D

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

و حرارت با بهره‌گیری از اندازه‌گیری حس‌گرهای پالسی چند تابعی حرارت (MFHPP[۱]) و استفاده از مدل‌سازی معکوس انتقال و حرارت در محیط نرم‌افزار هیدروس-D۲ به‌دست آمد [۳].

انتقال حرارت و رطوبت در محیط خاکی به‌هم وابسته است و نمی‌توان آن‌ها را جدا از هم در نظر گرفت و ارزیابی کرد [٤]. پژوهش‌های فراوانی در زمینهٔ تخمین پارامتر هیدرولیکی و حرارتی محیط متخلخل انجام شده است که در هر یک از این بررسی‌ها روش مختلفی ارزیابی شده است [۵]-[۱۵]. بنا بر این، پیش از تعیین خصوصیات حرارتی خاک باید ساختار فیزیکی محیط را ارزیابی کرد و به بررسی خصوصیات هیدرولیکی آن پرداخت.

اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی برای جریان آب و آلودگی در محیط غیراشباع به‌صورت مستقیم عموماً وقت‌گیر و پرهزینه است. در روش مستقیم اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری میزان نفوذ از سطح نمونه‌ای از خاک در آزمایشگاه بعد از پایدار شدن جریان انجام می‌گیرد [١٦].

در این پژوهش از مدل هیدرولیکی و معادلات وان گنوختن [۲۲] استفاده شد و فرض شد که هیچ پسماندی[۲] در محیط وجود ندارد. شبکه‌بندی محیط با استفاده از ٤۰۰ گره[۳]، ۷٦ عنصر یک بعدی و ۷۲۲ عنصر دو بعدی انجام شد.در این پژوهش ۵ پارامتر هیدرولیکی خاک شامل θ_r[٤]، θ_s[۵]، α[٦]، n[۷] و K_s[۸] و هم‌چنین ۵ پارامتر انتقال حرارت خاک شامل λ_L[۹]، λ_T[۱۰]، C_n[۱۱]، C_o[۱۲] و C_w[۱۳] بهینه‌یابی گردید.

۱. Multi-Functional Heat Pulse Probe ۲. Hysteresis ۳. Node
۴. Residual soil water content ۵. Saturated soil water content
۶. Parameter α in the soil water retention function
۷. Parameter n in the soil water retention function
۸. Saturated hydraulic conductivity ۹. Longitudinal thermal dispersivity
۱۰. Transverse thermal dispersivity
۱۱. Volumetric heat capacity of the solid phase
۱۲. Volumetric heat capacity of organic matter
۱۳. Volumetric heat capacity of the liquid phase

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

جریان یک بعدی آب در محیط غیر اشباع و اشباع خاک تحت شرایط هم‌دما را می‌توان با فرم اصلاح شده معادلهٔ ریچاردز بدین‌صورت ارائه کرد:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[k(\frac{\partial h}{\partial x}-\cos\varphi)\right]-S \qquad (۱)$$

که در معادلهٔ (۱)، θ میزان رطوبت خاک، t زمان، x طول، k هدایت هیدرولیکی و h میزان بار فشار هستند. زوایهٔ Φ زاویه جهت جریان با جهت قائم و S میزان جذب آب به‌وسیلهٔ ریشه گیاهان است . برای حل معادلهٔ (۱) نیاز به اطلاعات دقیق در مورد توابع K(h) و θ (h) است.

تحلیل جریان در منطقه غیراشباع خاک بسیار پیچیده است و به دو تابع غیرخطی K(h) و θ(h) که پارامترهای هیدرولیکی خاک نام دارند بستگی دارد. توابع غیرخطی K(h) و θ (h) براساس مدل فوگل و همکاران [۲۳] که در این مقاله استفاده شده است، فرم اصلاح شده مدل فان گنوختن [۲۲] هستند که امروزه به‌عنوان یک استاندارد به‌کار گرفته می‌شوند. فرم این توابع غیرخطی به‌صورت معادله‌های (۲) است.

(۲)

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

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

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

که در روابط فوق kr(h) تابع هدایت هیدرولیکی نسبی، ks هدایت هیدرولیکی اشباع و hs میزان مکش حد آستانه ورود هوا هستند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

در این مدل تحلیلی، توابع غیرخطی K(h) و θ (h) را با شش پارامتر هیدرولیکی θr، θs، θm، ks، α و n تعریف می‌کنند که θr رطوبت باقی‌مانده، θs رطوبت اشباع، θm پارامتر ساختگی، ks هدایت هیدرولیکی اشباع، α و n پارامترهای شکل هستند. تفاوت مدل فوگل و همکاران نسبت به مدل اصلی فان گنوختن برای پارامتر اضافی θm است که کمی بزرگ‌تر از θs است. این پارامتر هیچ تأثیری روی شکل θ (h) ندارد ولی برروی تابع K(h) اثر بسیار زیادی دارد و در خاک‌های ریزدانه که ارتفاع موئین زیادی دارند بیان‌گر دقیق‌تر شکل تابع نسبت به مدل تحلیلی وان‌گنوختن است.

کنستانز وابستگی هدایت هیدرولیکی خاک به حرارت را با معادلهٔ (۳) ارائه کرد [۲۱]:

$$K_T(\theta) = \frac{\mu_{ref}}{\mu_T}\frac{\rho_T}{\rho_{ref}} K_{ref}(\theta) = \alpha_K^* K_{ref}(\theta) \qquad (۳)$$

که در آن K_{ref}و K_T به‌ترتیب هدایت هیدرولیکی در حرارت مرجع T_{ref} و حرارت T هستند. μ_{ref} و μ_T به‌ترتیب ویسکوزیته دینامیکی در حرارت مرجع T_{ref}و حرارت T هستند. پارامتر αK^* ضریب مقیاس حرارتی هدایت هیدرولیکی خاک است.

معادلهٔ دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در محیط متخلخل سه‌بعدی بر طبق معادلهٔ سوفوکلئوس [۲۰] به‌صورت معادلهٔ (٤) است:

$$C(\theta)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_{ij}(\theta)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) - C_w q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \qquad (٤)$$

در این معادله $\lambda_{ij}(\theta)$ هدایت حرارتی ظاهری خاک و $C(\theta)$ و C_wبه‌ترتیب ظرفیت حجمی حرارتی فاز جامد و مایع هستند.

یکی از روش‌هایی که در مقیاس بزرگ می‌تواند برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی محیط و ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی استفاده شود، روش‌های ژئوفیزیکی‌اند. اندازه‌گیری‌ها و داده‌های برداشتی با این روش می‌تواند اطلاعاتی با وضوح زیاد و کم‌ترین خطا را از محیط زیرسطحی در اختیار قرار دهد. با استفاده از دو روش GPR[۱] و ETR[۲]

۱. Ground Penetrating Radar ۲. Electrical Resistivity Tomography

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

(توموگرافی مقاومت الکتریکی) می‌توان محتویات رطوبتی و تغییرات هدایت الکتریکی خاک را شناسایی کرد. داده‌های به‌دست آمده از این روش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از پارامترهای هیدرولیکی جریان و انتقال مواد محلول را در اختیار قرار دهد [۱۷].

در یکی از جدیدترین بررسی‌هایی که در نیجریه با استفاده از روش سونداژ ژئوالکتریکی به بررسی و تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک پرداخته شده است، از داده‌های به‌دست آمده از ۲۸ سونداژ الکتریکی قائم (VES[۱]) برداشت شده برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک استفاده شد [۱۸].

خصوصیات منطقهٔ بررسی شده

منطقهٔ مورد نظر در ٤٥ کیلومتری غرب تهران و در شمال‌غربی شهر کرج در منطقهٔ حصارک واقع شده است. محدودهٔ بررسی شده در فضای داخل دانشگاه خوارزمی قرار گرفته است که در شکل۱ موقعیت محل مورد نظر نمایش داده شده است.

نوع آبخوان به‌صورت آزاد و آبرفتی است. شرکت مهندسین مشاور لار در سال ۱۳۸٤بر اساس بررسی‌هایش، مقدار ضریب انتقال (T) در محدودهٔ بررسی شده تقریباً ۱۵۰ مترمربع بر روز برآورد شده است.

مواد و روش کار

پژوهش مورد نظر در دو بخش کلی دنبال شد:

۱.بررسی ژئوالکتریکی و تعیین برخی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال آلودگی خاک

۲. بررسی حرارت‌سنجی و تخمین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال حرارت.

در مرحلهٔ اول، محل مناسبی واقع در محوطهٔ پردیس کرج دانشگاه خوارزمی برای انجام پروژه انتخاب شده و با استفاده از سونداژهای ژئوالکتریکی و تهیه پروفیل از برداشت‌های صورت گرفته، عمق سطح آب و لیتولوژی منطقه تعیین شد. پس از تعیین عمق سطح آب، به‌منظور تعیین نحوهٔ انتقال و تحلیل گسترش مکانی و زمانی پلوم آلودگی در محیط از تزریق محلول آب‌نمک استفاده شد. در این بخش از بررسی، روش‌های مختلف ژئوالکتریکی هم‌زمان با پیش‌روی پلوم آلودگی بررسی و نهایتاً پروفیل‌های تهیه شده با هر یک از روش‌ها ارزیابی شد.

۱. Vertical Electrical Sounding

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

در ادامه و پس از برداشت‌های ژئوالکتریکی صورت گرفته در سطح منطقه، تعیین مقدار سرعت نفوذ آب در خاک با انجام آزمون نفوذ و مشاهده سطح نشت از دیواره یک ترانشه حفاری شده در نزدیکی چاله نفوذ در دستور کار قرار گرفت.

انجام مرحلهٔ دوم پژوهش که تعیین پارامترهای انتقال حرارت در محیط غیراشباع است، با استفاده از تزریق آب گرم و ثبت تغییرات دمایی محیط با استفاده از سنسورهای حرارتی دنبال شد. اطلاعات حرارتی برداشت شده در این مرحله برای استفاده در مدل عددی هیدروس-D۲ و تعیین پارامترهای حرارتی خاک به‌صورت حل معکوس استفاده شد.



شکل ۱ . موقعیت منطقهٔ بررسی شده واقع در محوطهٔ دانشگاه خوارزمی

بحث و نتیجه‌گیری

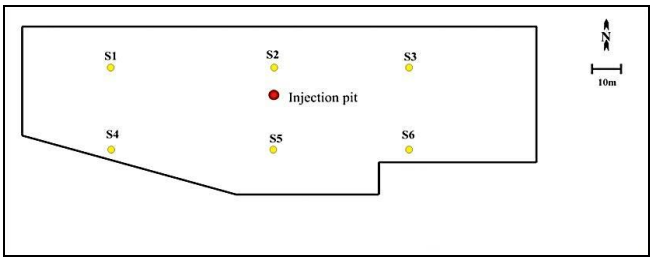
الف) بررسی‌های ژئوالکتریکی

در این پژوهش با ایجاد منشأ آلودگی مصنوعی به بررسی نحوهٔ انتقال هالهٔ آلودگی در محیط غیراشباع پرداخته شد. به‌منظور تزریق آلودگی به زمین، چاله‌ای با ابعاد ۱ متر و عمق ۱ متر حفر شد. اطراف چاله تزریق مختصات‌بندی و محدودهٔ مربعی شکل به ابعاد ۴۰ متری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

انتخاب شد به‌طوری که محل تزریق در وسط قرار گرفته و فضای درونی محدودهٔ مشخص شده به فاصله‌های ٤ متری شبکه‌بندی شد.در این پژوهش از ۱۲۱ موقعیت سونداژ ژئوالکتریکی برای برداشت داده به روش ونر- شلومبرژه استفاده شد.

بعد از بررسی‌های زمین‌شناسی برای تعیین محل انجام پروژه، تعداد ٦ نقطه سونداژ به روش شولومبرژه با AB/۲=۱۵۰m در محل انجام شد. این سوندازها به‌منظور بررسی لیتولوژیکی و عمق، ضخامت منطقه غیراشباع به‌کار گرفته شد (شکل ۳).



شکل ۲. محدودهٔ انجام پروژه، موقعیت سونداژهای VES (S_1-S_6) و محل انجام تزریق

بررسی و تحلیل منحنی سونداژهای به دست آمده از این سونداژها نشان داد که عمق سطح ایستابی در ۷۵ متری است. لایه بالای (منطقه غیراشباع) از نوع آبرفتی بوده که خود از سه لایه تشکیل شده است.

شروع تزریق آلودگی و طراحی و انتخاب آرایه برداشت داده-تزریق آلودگی

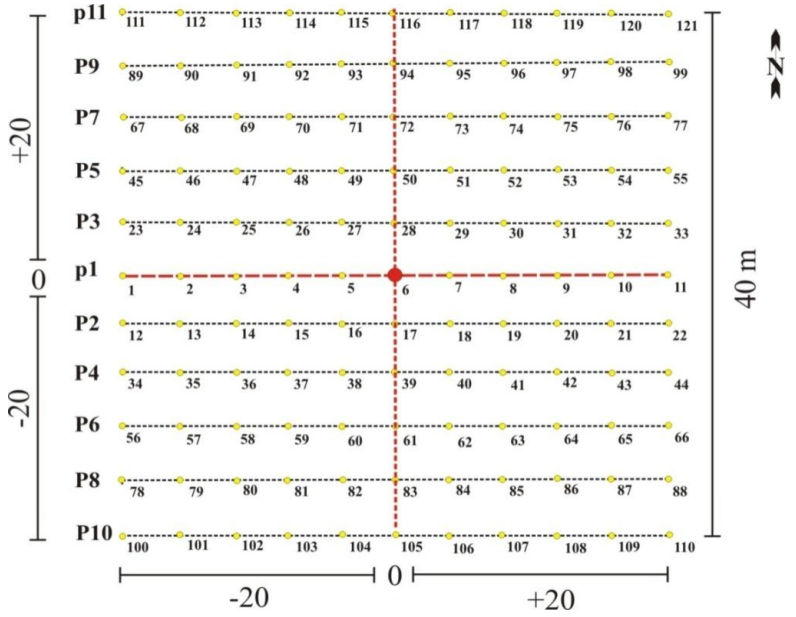
در این پژوهش از آب نمک با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر به‌منظور ایجاد هالهٔ آلودگی قابل تفکیک برای بررسی توزیع و پخش‌شدگی آن در منطقه غیراشباع استفاده شد. بعد از آماده کردن آب نمک با غلظت ذکر شده، با دبی کنترل شده وارد چاله تزریق شد و بار اتفاعی آب نمک در چاله در طول مدت تزریق ثابت (۷۰ سانتی متر از کف چاله) نگه داشته شد. مدت زمان تزریق آلودگی ۱۰ روز به طول انجامید.

انتخاب آرایه و جهت و زمان برداشت

آرایه‌های ونر و قطبی- قطبی برای ردیابی و به تصویر در آوردن آلودگی استفاده شد، به‌منظور برداشت کامل و یک‌نواخت داده‌ها و هم‌چنین برای بررسی توموگرافی با گذشت زمان[1]، برداشت باید به گونه‌ای انتخاب شود که در فاصلهٔ زمانی مشخص داده‌برداری انجام شود. از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

این رو برداشت مقاطع به‌صورت ستاره‌ای هر دو روز یک‌بار تکرار و با توجه به گستردگی پولوم در زمان‌های خاصی به‌اجرا در آمد. به‌طور متوسط در هر روز ٤- ٥ پروفیل داده برداشت شد. موقعیت پروفیل‌ها در محل انجام پروژه در شکل۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک (چاله تزریق نمک در مرکز است)

توموگرافی پروفیل‌های خطی با گذشت زمان

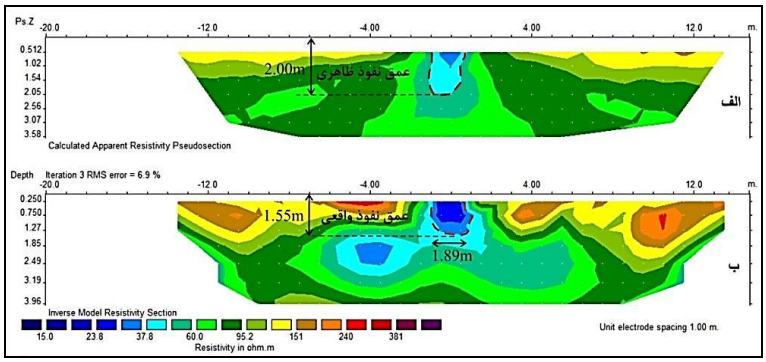
این پروفیل‌ها در جهت شرقی- غربی با فاصلهٔ الکترودی ۱ متر به‌اجرا در آمد. فاصلهٔ جانبی هر پروفیل ۲ متر و با آرایه ونر اجرا شد. در این پژوهش تعداد ۲۲ پروفیل با فاصلهٔ زمانی مشخص در ۱۱ موقعیت مکانی برداشت شد.

مدل دوبعدی پروفیل P_1

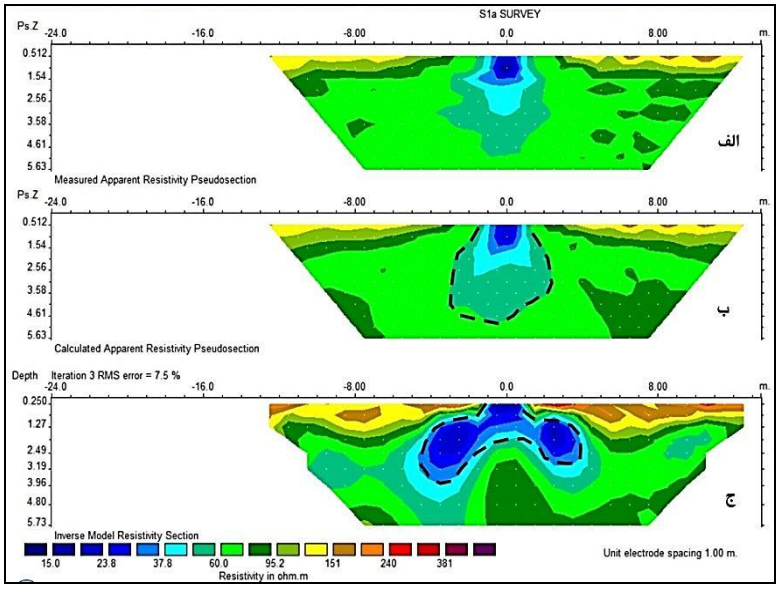
پروفیل P_1 از وسط شبکه‌بندی در جهت EW برداشت شده است. زمان اجرای داده‌برداری ۵ ساعت بعد از شروع تزریق بود. شکل٤ شبه مقطع ظاهری و مقطع حل معکوس را نشان می‌دهد. مقدار نفوذ آلودگی که با نقطه‌چین مشخص شده است که در مقطع حل معکوس ب، در جهت عمودی ۱/۵۵ متر در جهت افقی ۱/۸۹ متر گسترش دارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]



شکل٤. الف) شبه مقطع ظاهری، ب) مقطع واقعی در نیمرخ p_1



شکل ۵. الف) شبه مقطع اندازه‌گیری شده، ب) شبه مقطع مقاومت ظاهری محاسبه شده، ج) مقطع حل معکوس پروفیل S_1A در جهت EW

توموگرافی پروفیل‌های ستاره‌ای با گذشت زمان

چنان‌که در شکل ٤ مشخص شده (خطوط مشکی)، پروفیل‌های ستاره‌های به‌صورت ٤ پروفیل عمود بر هم به‌علاوه‌ای در جهت شرقی- غربی (A) و شمالی- جنوبی (B)، ضربدری در جهت شمال غربی- جنوب شرقی (C) و شمال شرقی- جوب غربی (D) به‌اجرا در آمد. زمان اجرای این پروفیل‌های طوری انجام شد که هر مرحله از پروفیل‌های ستاره‌ای به فاصلهٔ یک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

روز در میان به‌اجرا در آمد. فاصلهٔ الکترودها در S_1، S_2، S_3 یک متر و در S_4، S_5 دو متر انتخاب شد. پروفیل‌های ستاره‌ای در ۵ مرحلهٔ S_1، S_2، S_3، S_4، S_5 که هر مرحله از ٤ سونداژ عمود بر هم تشکیل می‌شود. آرایه استفاده شده ونر است. در همین رابطه به‌عنوان نمونه شبه مقطع ظاهری و مقطع حل معکوس پروفیل S_1A در شکل ۵ نشان داده شده است که در این مورد نیز مقدار گسترش پولوم با خط چین مشخص شده است.

برداشت‌های قطبی- قطبی[۱]

پروفیل‌های قطبی- قطبی در موقعیت پروفیل‌های ستاره‌ای با فاصلهٔ الکترودی ۱ متر به اجرا در آمد. نکتهٔ حائز اهمیت این است که این آرایه نسبت به آرایهٔ ونر گسترش پولوم را در جهت عمقی و افقی کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد به‌خصوص گسترش عمقی را خیلی کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد.

مدل دوبعدی پروفیل $P\text{-}P_1$

این پروفیل در جهت شرقی– غربی و از غرب به شرق داده‌بردای شد. زمان اجرای آن یک روز بعد از اتمام تزریق یعنی روز یازدهم شروع تزریق بود. شکل ٦ مقطع حل معکوس و مدل حساسیت این پروفیل را نشان می‌دهد. محل گسترش آلودگی با خط‌چین نشان داده شده است.

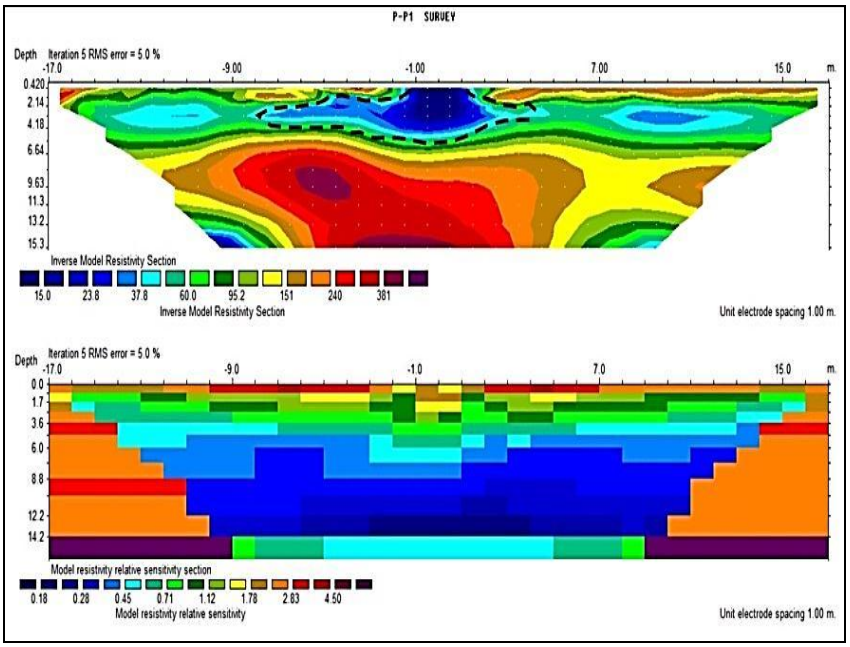
مدل سه بعدی نیمرخ‌های عمودی با گذشت زمان

برای تهیهٔ مدل عمودی سه‌بعدی با گذشت زمان از برداشت‌های ستاره‌ای استفاده شد. روش کار به این ترتیب است که مقاطع عمودی به‌دست آمده از مدل دوبعدی در یک جهت، با فاصله‌های زمانی متوالی کنار یک‌دیگر قرار گرفته و گسترش هر یک نسبت به مقطع قبلی و بعدی بررسی می‌شود. از مقاطع حل معکوس هر پروفیل برای این مدل استفاده شده است. محورهای این مدل به این صورت است که دو محور افقی و یکی عمودی است. یکی از محورهای افقی زمان که بر حسب روز، و دیگری گسترش جانبی بر حسب متر است. محور عمودی نیز عمق نفوذ بر حسب متر است. در ضمن محور مرکزی همهٔ پروفیل‌ها منطبق بر مرکز تزریق است. در همین مورد می‌توان مدل سه‌بعدی مقطع قائم در جهت شمالی جنوبی را در قالب شکل ۷ نمایش داد که در این شکل گسترش بیش‌تر پولوم در جهت جنوبی نسبت به شمال مشهود است.

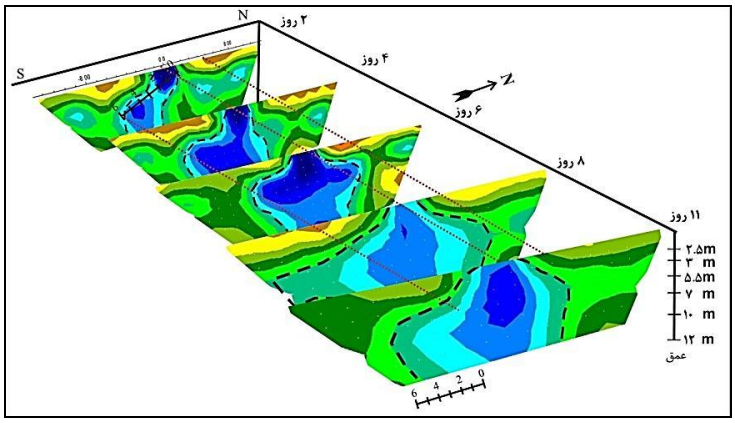
۱. Pole-Pole

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]



شکل٦. مقطع حل معکوس (بالا) و مدل حساسیت (پایین) پروفیل p_1-p



شکل ۷. گسترش پولوم در جهت افقی و عمودی در زمان‌های متوالی در جهت شمالی- جنوبی

آزمون اندازه‌گیری سرعت واقعی درجا

برای مقایسهٔ سرعت پخش‌شدگی و گسترش پولوم با یک مدل و داده واقعی، تعیین سرعت واقعی آب در منطقه غیراشباع ضروری است. برای این منظور در ۲ متری چاله تزریق ترانشه‌ای به‌عمق ۲/۵ متر حفر شد. شکل ۸ موقعیت ترانشه و چاله تزریق نشان داده شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

است. ارتفاع آب را در چاله تزریق به ۷۰ سانتی‌متر از کف رسانده شد تا برابر ارتفاع آب نمک در مرحلهٔ تزریق آلودگی باشد.



شکل۸. نمایی از ترانشه حفر شده در ۲ متری چاله تزریق (دید از غرب به شرق)

طی ۱۵ ساعت از شروع تزریق، آب در ترانشه ظاهر شد. در ادامه با استفاده از روابط مثلثاتی فاصلهٔ بین دو نقطه ۲/۳۸ سانتی‌متر به‌دست آمد. در نهایت با استفاده از رابطهٔ $v = x/t$ سرعت واقعی آب در این محل در جهت ۳۵ درجه نسبت به افق به‌دست آمد که برابر ۰/۱۵۹ متر بر ساعت است.

برای به‌دست آوردن سرعت واقعی در دیگر جهات (قائم و افقی) از نسبت گستردگی پولوم آلودگی در مدل‌های دوبعدی پروفیل‌های مقاومت ویژه استفاده شد. در شکل ۹ مقطع دوبعدی، شبه مقطع ظاهری و مقطع حل معکوس پروفیل P_1 نشان داده شده است. در هر دو مقطع نسبت گسترش پولوم در جهت افقی و عمودی اندازه‌گیری شده و از تقسیم آن‌ها بر یک‌دیگر ضرایب گسترش عمودی و افقی به‌دست می‌آید.

برای مقطع حل معکوس $\frac{\alpha_v}{\alpha_h} = \frac{۱/۸٤}{۱/٦۲} = ۱/۳٤$

برای شبه مقطع مقاومت ظاهری $\frac{\alpha_v}{\alpha_h} = \frac{۲/۰٥}{۱/۷۹} = ۱/٤٥$

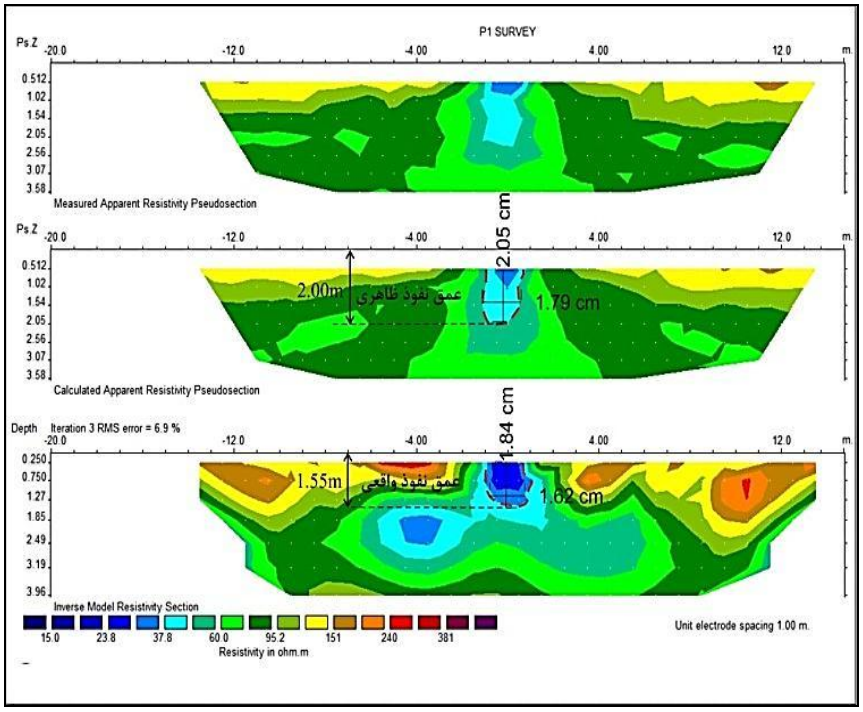
به‌طور میانگین ضریب گسترش عمودی به افقی برابر با ۱/٤ است و بالعکس افقی به عمودی برابر ۰/۸۷ به‌دست می‌آید. برای این‌که سرعت واقعی در جهت قائم را به‌دست آوریم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

سرعت واقعی به‌دست آمده را در ضریب گسترش ضرب کرده، سرعت در جهات عمودی و افقی به‌دست خواهد آمد. به این ترتیب سرعت واقعی در جهت قائم برابر ٤/۳٦٥ متر بر روز و سرعت واقعی در جهت افقی برابر ۳/۳٦ متر بر روز به‌دست آمد.

بدین‌ترتیب صحت داده‌های به‌دست آمده از برداشت‌های ژئوالکتریک را می‌توان بررسی کرد. روش کار به‌این صورت است که زمان برداشت پروفیل را در سرعت واقعی به‌دست آمده ضرب کرده تا مقدار گسترش و جابه‌جایی پولوم در آن جهت به‌دست آید. به‌عنوان مثال برای پروفیل P_1 که ۵ ساعت بعد از شروع تزریق برداشت شده است، مقدار فاصلهٔ جابه‌جا شده در جهت افقی و عمودی به‌ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۹ متر است. در نتیجه فاصلهٔ عمودی جابه‌جا شده برابر ۹۰ سانتی‌متر است، که اگر با ۱ متر عمق چاله جمع شود برابر ۱۹۰ سانتی‌متر می‌شود که این گسترش در شبه مقطع مقاومت ظاهری برابر ۲ متر و در مقطع حل معکوس برابر ۱۵۵ سانتی‌متر است.



شکل ۹. نسبت گسترش آلودگی در پروفیل P_1 بعد از ۵ ساعت از شروع تزریق آلودگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

ب) تعیین پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک

بررسی خصوصیات هیدرولیکی و حرارتی محیط متخلخل غیراشباع در محدودهٔ بررسی شده در قالب آزمایشی صحرایی حرارت‌سنجی و بررسی داده‌های صحرایی در محیط نرم‌افزار هیدروس-D۲ دنبال شد. در این پژوهش به‌منظور برداشت و ثبت تغییرات دمایی در محیط آزمایش مورد نظر از دو حس‌گر حرارتی استفاده شد. یکی از حس‌گرها درون حلقه نفوذ و حس‌گر دیگر در عمق ۵۰ سانتی‌متری از کف حلقه نفوذ و درون دیواره ترانشه قرار داده شد. حس‌گر به گونه‌ای در دیواره نصب شد که حدود ۲۰ سانتی‌متر به درون دیواره نفوذ کرده و فضای خالی پشت آن‌ها نیز با گل پر شده که تبادل گرمایی با هوای آزاد بیرون نداشته باشند. ثبت داده‌های حرارتی محیط به‌مدت ۳۲۵۵ ثانیه از شروع نشت آب با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد ادامه پیدا کرده و در کل برای هر حس‌گر ٤٨ مورد داده به ثبت رسید. در شکل۱۰ نمایی از محیط مورد آزمایش، حس‌گر و موقعیت حلقه نفوذ ارائه شده است.



شکل۱۰. آزمایش حرارت‌سنجی با استفاده از تزریق آب گرم ۵۰ درجه و ثبت حرارت با حس‌گر حرارتی

محیط طراحی و ساخته شده در نرم‌افزار هیدروس-D۲ طول ۱۵۰ و ارتفاع (یا عمق) ۲۰۰ سانتی‌متر دارد. در این بررسی با توجه به ناهمگن و انیزوتروپ بودن محیط متخلخل و عدم تعیین پارامترهای مربوطه سعی شد به‌منظور حصول نتایج با دقت بالا تنها از حس‌گر شمارهٔ ۱ که در عمق ۵۰ سانتی‌متری کف حلقه نفوذ نصب شده بود استفاده شد. در همین رابطه نیز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

داده‌های حس‌گر دیگر که به ثبت تغییرات حرارت آب تزریقی در محیط می‌پرداخت در تعریف شرایط مرزی متغیر با زمان در کف حلقه نفوذ استفاده شد.

در این بررسی از دانه‌بندی رسوبات و تعیین درصد دانه‌ها و هم‌چنین میزان رطوبت در دو عمق متفاوت برای تعریف شرایط اولیه مدل استفاده شد. در این پژوهش با استفاده از مدول شبکهٔ عصبی تعبیه شده در نرم‌افزار هیدروس-D۲ پارامترهای اولیه هیدرولیکی انتقال حرارت خاک تعیین و به مدل وارد شد. در این مدل برای تعیین شرایط اولیه از محتوی رطوبتی و دمای محیط طبیعی و آب تزریقی استفاده شد. میزان رطوبت بر اساس محاسبات صورت گرفته با بسته مبتنی بر شبکهٔ عصبی نرم‌افزار هیدروس-D۲ و تعیین شده با بررسی‌های آزمایشگاهی به مدل اعمال شد که این مقدار از عمق به سطح دامنهٔ تغییرات ۰/۰٤۵ تا ۰/٤۵ را داشت. از دمای ۱۷/۵ درجهٔ سانتی‌گراد در محیط و ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد در محل حلقه نفوذ نیز برای ورود شرایط اولیه استفاده شد. در این بررسی، سه نوع شرط مرزی برای جریان آب و انتقال حرارت تعریف شد. در مدل جریان از مرز زه‌کشی آزاد[۱] برای کف محیط مدل‌سازی، از بار متغیر[۲] برای محل نشت آب گرم و در سایر نقاط مدل از مرز بدون جریان[۳] استفاده شد. در مدل انتقال حرارت نیز از سه نوع مرز نوع سوم برای کف محیط، نوع اول برای محل نشت آب گرم و بدون جریان برای سایر نقاط محیط استفاده شد.

تخمین پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل بروش حل معکوس بدین صورت است که با انتخاب یک تابع هدف که متشکل از خروجی‌های مدل حاکم بر جریان و مشاهده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و کمینه کردن آن، به‌ازاء پارامترهای مجهول در مدل یک‌سری مقادیر اولیه حدسی جای‌گزین شده و محاسبات با تغییر این پارامترها در جهت کمینه کردن تابع هدف ادامه می‌یابد تا جایی‌که برازش خروجی‌های مدل و مشاهده‌ها قابل قبول باشد . در این مقاله تابع هدف از خروجی‌های مدل و مشاهده‌ها بار فشار انتخاب شد ه و در روش حداقل مربعات با استفاده از آلگوریتم مارکورت کمینه می‌گردد.

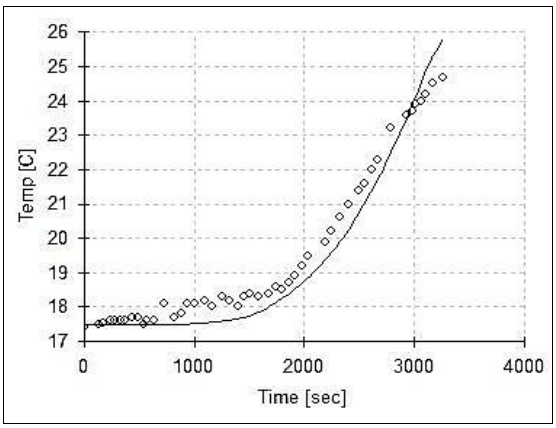
با توجه به این‌که هدف از این بخش پژوهش تعیین پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک در محدودهٔ مورد نظر است، از تعداد ٤۸ داده حرارتی ثبت شده در بازهٔ زمانی ۳۲۵۵ ثانیه‌ای

۱. Free drainage ۲. Variable head ۳. No flow

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

برای تعیین مقادیر واقعی پارامترهای مورد نظر به‌صورت حل معکوس استفاده شد. در حل معکوس مسئلهٔ مورد نظر هیچ‌گونه محدودیتی برای مقادیر اولیه اعمال نشد و به این‌ترتیب به مدل اجازه داده شد که بر اساس داده‌های واقعی به تعیین و بهینه کردن پارامترها مبادرت کند. پس از اجرای مدل، خروجی و نتیجه محاسبه دما در نقطه مشاهداتی تعبیه شده در عمق ۵۰ سانتی‌متری مبنای بررسی‌ها قرار گرفت (شکل۱۰). چنان‌که از این شکل مشخص است محاسبهٔ دمای محیط در عمق مورد نظر مقادیری بسیار مشابه مقادیر واقعی را نشان می‌دهد و بر این اساس در نتیجه‌گیری اولیه می‌توان صحت مدل طراحی شده را مشاهده کرد. بنا بر این می‌توان به این نتیجه رسید که پارامترهای مهم هیدرولیکی و انتقال حرارت که در این بررسی به آن‌ها توجه شده است به‌گونه‌ای بهینه شده‌اند که مقادیر واقعی حرارت با مقادیر محاسباتی تطابق بسیار زیاد دارند. در این مورد می‌توان عنوان کرد که به‌طورکلی، تخمین پارامترها (تطبیق مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده) با R^2 برابر ۰/۹۷۸۳۵ و مقدار تابع هدف برابر ۱۱/۵ انجام گرفته است. این نتایج بسیار مناسب و قابل قبول است. مقدار خطای محاسباتی در بیلان جرمی نیز برابر با ۰/٦۷۱۹ درصد است که این مقدار بسیار ناچیز است. در شکل ۱۱ مقدار تغییرات حرارتی محاسباتی و مشاهداتی در عمق ۵۰ سانتی‌متری نمایش داده شده است.



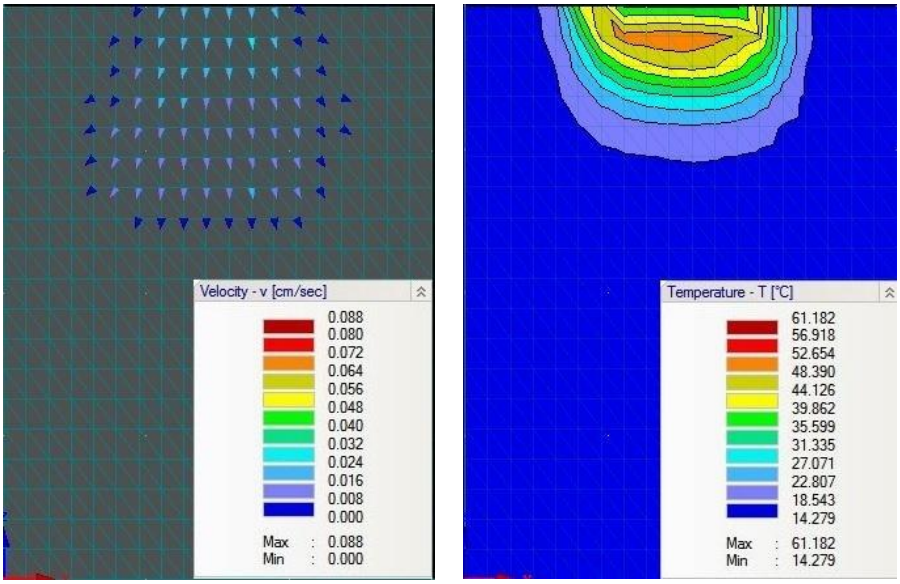
شکل۱۱. تغییرات حرارتی محاسباتی و مشاهداتی در عمق ۵۰ سانتی‌متری

در جداول ۱ و ۲ مقادیر اولیه و بهینه شده پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی بررسی شده ارائه شده است. در جدول ۳ نیز می‌توان ماتریس همبستگی پارامترهای بررسی را مشاهده کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

در شکل ۱۲ الف نمایی از محیط مدل‌سازی شده به‌همراه کنتورهای حرارتی و در شکل ۱۲ ب بردارهای سرعت نفوذ آب تزریقی نمایش داده شده است.



ب الف

شکل۱۲. الف) محیط مدل‌سازی شده به همراه کنتورهای حرارتی و ب) بردارهای سرعت نفوذ آب تزریقی

جدول۱. مقادیر اولیه و بهینه شده پارامترهای هیدرولیکی

پارامتر	θ_r	θ_s	α	n	K_s
مقدار اولیه	۰/۰٤٤	۰/٤۳	۰/۱٤٥	۲/٦۸	۰/۰۰۸۲٥
مقدار بهینه شده	۰/۰۰۱٥۷	۰/٤۸	۰/۱٦۸	۱/٥۱	۰/۰۰٦۹٦

جدول۲. مقادیر اولیه و بهینه شده پارامترهای انتقال حرارت

پارامتر	λ_L	λ_T	C_n	C_o	C_w
مقدار اولیه	۰/۰٥	۰/۰٥	۱۹۲۰۰	۲٥۱۰۰	٤۱۸۰۰
مقدار بهینه شده	۰/۷٥۲	۹/۸۱	۲٦٦۳۰	٤۲۳۲۰۰۰	۲٥٥۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

جدول۳. ماتریس هم‌بستگی پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	λ_L	λ_T	C_n	C_o	C_w
θ_r	۱,۰۰									
θ_s	-۰/۳۱	۱,۰۰								
α	۰/۰۵۹	۰/۱۷	۱,۰۰							
n	-۰/۰۶	-۰/۰۲	-۰/٤۸	۱,۰۰						
K_s	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۵۵	-۰/۹۱	۱,۰۰					
λ_L	-۰/٦۷	۰/۳۸	-۰/٦۲	۰/۲۷	-۰/٤۲	۱,۰۰				
λ_T	-۰/٦۸	۰/۳۳	۰/۲۹	-۰/۲۵	۰/۲٦	۰/۲۰	۱,۰۰			
C_n	۰/۷۸	-۰/۵۸	-۰/۰۱	-۰/۳۰	۰/٤۲	-۰/٦۷	-۰/۳٤	۱,۰۰		
C_o	-۰/۹٦	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۰۷	-۰/۲۱	۰/۵٦	۰/۵۷	-۰/۷۷	۱,۰۰	
C_w	-۰/۱۵	-۰/۳۲	-۰/۵۲	۰/۹۰	-۰/۹٤	۰/۲٦	-۰/۱٤	-۰/۲۱	۰/۱٦	۱,۰۰

نتایج

آرایهٔ قطبی-قطبی نسبت به آرایهٔ ونر گسترش پولوم را در جهت عمقی و افقی کم‌تر از مقدار واقعی نشان داد. به‌خصوص گسترش عمقی را خیلی کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. بر اساس تزریق آب در مجاورت ترانشه و مشاهده زمان رسیدن آب به آن، سرعت واقعی آب در جهت ۳۵ درجه نسبت به افق برابر ۰/۱۵۹ متر بر ساعت به‌دست آمد. ضریب گسترش عمودی به افقی برابر با ۱/٤ تعیین شد.

تخمین پارامترها (تطبیق مقادیر حرارتی مشاهداتی و پیش‌بینی شده) با R^2 برابر ۰/۹۷۸۳۵ و مقدار تابع هدف برابر ۱۱/۵ صورت گرفت. مقدار خطای محاسباتی در بیلان جرمی نیز برابر با ۰/٦۷۱۹ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل هیدروس-D۲ برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی محیط متخلخل غیراشباع می‌تواند بسیار مفید است و با استفاده از برداشت داده‌های حرارتی محدود و تعریف دقیق شرایط مدل به نتایج قابل قبولی دست یافت.

منابع

1. Hopmans J. W., Simunek J., Bristow K. L., "Indirect estimation of soil thermal properties and water flux using heat plus probe

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

measurements:Geometry and dispersion effects", Water Resources Research, Vol.38, No.1 (2002) 10.1029/2000WR000071.

2. Oladunjoye M. A., Sanuade O. A., "In Situ Determination of Thermal Resistivity of Soil :Case Study Of Olorunsogo Power Plant, Southwestern Nigeria", International Scholarly Research Network, ISRN Civil Engineering, Article ID591450 (2012).
3. Mortensen A. P., Hopmans J. W., Mori Y., Simunek J., "Multi-functional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport", Advances in Water Resources 29 (2006) 250-267.
4. Parlangea M. B., Cahill A. T., Nielsenb D. R., Hopmans J. W., Wendrothc O., "Review of heat and water movement in field soils", Soil & Tillage Research 47 (1996).
5. Ghanbarian-Alavijeh B., Hunt A. G., "Unsaturated hydraulic conductivity in porous media: Percolation theory". Geoderma 187-188 (2012) 77-84.
6. Jhorar R. K., Bastiaanssen W. G. M., Feddes R. A., Van Dam J. C. "Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes", Journal of Hydrology 258, (2002)198-213.
7. Swain M., Lohmann M., Swain E., "Experimental determination of soil heat storage for the simulation of heat transport in a coastal wetland", Journal of Hydrology 422-423 (2012) 53-62.
8. Heitmana J. L., Hortonb R., Sauerc T. J., Rend T. S., Xiao X., "Latent heat in soil heat flux measurements", Agricultural and Forest Meteorology 150 (2010) 1147-1153.
9. Bristow L. K., "Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes", Agricultural and Forest Meteorology 89 (1998) 75-84.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

10. Chen Y., Shi M., Li X., "Experimental investigation on heat, moisture and salt transfer in soil", International Communications in Heat and Mass Transfer 33 (2006) 1122-1129.
11. Wang Z., Fu Q., Jiang Q., Li T., "Numerical simulation of water-heat coupled movements in seasonal frozen soil", Mathematical and Computer Modelling 54 (2011) 970-975.
12. Kato C., Nishimura T., Imoto H., Miyazaki T., "Applicability of HYDRUS to predict soil moisture and temperature in vadose zone of arable land under monsoonal climate region, Tokyo", 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia (2010).
13. Sandor R., Fodor N., "Simulation of Soil Temperature Dynamics with Models UsingDifferent Concepts", The Scientific World Journal, (2012) doi:10.1100/2012/590287.
14. Mori Y., Hopmans J. W., Mortensen A. P., Kluitenberg G. J., "Multi-Functional Heat Pulse Probe for the Simultaneous Measurement of Soil WaterContent, Solute Concentration, and Heat Transport Parameters", Vadose Zone Journal 2 (2003) 561-571.
15. Wu C. L., Chau K. W., Huang J. S., "Modeling coupled water and heat transport in a soil–mulch-plant–atmosphere continuum (SMPAC) system", Applied Mathematical Modeling 31 (2007) 152-169.
16. Bnouni C., Sghaier J., Sammouda H., Lehmann F., "Parameter Estimation of Soil Hydraulic Functions For Unsaturated Porous Media Using An Inverse Problem And Multistep Outflow Experiment", Journal of Porous Media.vol.8 (2010).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]

17. Looms M. C., Jensen K. H., Nielsen L., "Monitoring Unsaturated Flow and Transport Using Cross-Borehole Geophysical Methods", Vadose zone journal (2008) 227-237.

18. Opara A. I., Onu N. N., Okereafor D. U., "Geophysical Sounding for the Determination of Aquifer Hydraulic Characteristics from Dar- Zurrock Parameters: Case Study of NgorOkpala, Imo River Basin, Southeastern Nigeria", The Pacific Journal of Science and Technology. Vol. 13 (2012).

19. Hocine Bendjoudi, Bruno Cheviron, Roger Gu´erin and Alain Tabbagh, "Determination of upward/downward groundwater fluxes using transient variations of soil profile temperature: test of the method with Voyons (Aube, France) experimental data", Hydrol, Process, 19, 3735-3745 (2005).

20. Sophocleous M., "Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media", Water Resour. Res., 15 (5) (1979) 1195-1206.

21. Constantz J., "Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils", Soil Sci.Soc. Am. J., 46(3) (1982) 466-470.

22. Van Genuchten, M. Th., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Sci. Soc. Am. J., 44 (1980) 892-898.

23. Vogel, T., K. Huang, R. Zhang, and M. Th. van Genuchten, "The HYDRUS code for simulating onedimensional water flow", solute transport, and heat movement in variably-saturated media, Version 5.0, Research Report No 140, U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA (1996).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.8.0]