



Research Article

A Novel Analytical-Statistical-Numerical Framework for Investigating the Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Heterogeneous Subsidence Phenomena, Moisture and Temperature Variations in Cracked Soils Under Soil-Atmosphere Interaction

Milad Jabbarzadeh and Hamed Sadeghi*

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author: (hsadeghi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received: 18 August 2024

Revised: 23 November 2024

Accepted: 27 November 2024

Keywords:

Heterogeneous land subsidence, thermo-hydro-mechanical modeling, statistical analysis, desiccation-cracked clay, land-climate interaction.

Abstract

This study presents an analytical–statistical–numerical framework to examine the thermo-hydro-mechanical (THM) behaviour and the resulting heterogeneous subsidence and swelling of desiccation-cracked expansive soils under realistic soil–atmosphere interactions. Desiccation cracks, by creating preferential pathways for water and vapour, significantly alter the near-surface hydraulic and thermal regimes, leading to non-uniform moisture distribution and temperature gradients. The study employs a statistical characterisation of crack geometry, including crack width, depth and ratio, based on log-normal and Gaussian probability distributions, and applies climatic data from Qom as time-dependent Neumann boundary conditions. The modelling results demonstrate that cracked ground experiences up to 4.6-fold greater cumulative subsidence compared with uncracked ground, and the spatial variability of deformation strongly depends on crack geometry and spacing. Narrow cracks induce intense local desiccation and deep suction zones, whereas wide cracks promote infiltration and transient swelling during rainfall events. The distinctive pattern of concave deformation during wetting and convex deformation during drying highlights the complex cyclic behaviour of cracked soils. The developed framework provides a physically consistent and practical approach to evaluate climate-driven subsidence hazards in expansive soils.

Introduction

Expansive clayey soils are highly sensitive to changes in environmental moisture and temperature [4]. Under cyclic drying and wetting, these soils develop tensile stresses that lead to desiccation cracking, which can propagate several metres below the surface [2]. These cracks act as open conduits that accelerate evaporation and rainfall infiltration, significantly modifying hydraulic conductivity, suction distribution and heat transfer within the soil mass [41]. Consequently, heterogeneous deformation occurs, which may threaten infrastructure such as pavements, canal linings, and shallow foundations [1]. Conventional assessments in unsaturated soil behaviour can therefore underestimate hazard. While most previous numerical studies treat the soil as a homogeneous continuum, ignoring the impact of surface

cracking, field observations and satellite monitoring reveal that spatially variable subsidence is predominantly associated with cracked zones [45]. This research aims to overcome these limitations by developing a computational framework that explicitly represents crack geometry and soil–atmosphere interaction. The objectives are: (i) to formulate THM governing equations capturing the simultaneous exchange of liquid, vapour and energy; (ii) to statistically describe realistic crack geometries derived from field observations and prior literature; and (iii) to simulate three years of actual climatic variations to assess their influence on subsidence and swelling behaviour in cracked and uncracked soils.

Methodology

The governing equations consist of mass conservation for

To Cite this article:

Jabbarzadeh, M. and Sadeghi, H. 2025. A novel analytical-statistical-numerical framework for investigating the thermo-hydro-mechanical behavior of heterogeneous subsidence phenomena, moisture and temperature variations in cracked soils under soil-atmosphere interaction, *Sharif Mechanical Engineering Journal*, 41(1), 13-28.

<https://doi.org/10.24200/j40.2024.65047.1718>

each solid phase (Eq. 1), fluid phase (Eq. 2), the energy balance accounting for conduction and latent heat effects (Eq. 3), and the momentum equilibrium equation for the porous skeleton (Eq. 4). The liquid and vapour fluxes are computed using generalised Darcy and Fick's laws (Eqs. 11, 17), while thermal conduction follows Fourier's law with saturation- and porosity-dependent effective conductivity (Eq. 5). The soil–water retention curve (SWRC) is represented by the van Genuchten equation (Eq. 14). The mechanical behaviour is governed by the Barcelona Expansive Model (BExM), which considers coupled elasto-plasticity and swelling behaviour in a double-structure porous medium (Eqs. 19–25). The numerical implementation employs a combined finite-element and finite-difference scheme. The spatial discretisation is performed by Galerkin finite elements, while time integration uses implicit finite-difference steps for stability. To ensure numerical stability, the initial time step was set to 1×10^{-5} days (0.864 s), while the maximum time step was limited to 1×10^{-2} days (864 s) to balance computational efficiency and accuracy. An upper limit of 20 iterations per time step was imposed, beyond which the solution was terminated automatically if convergence was not achieved. The iterative solution algorithm and convergence process are illustrated in Figure 2. The computational domain, boundary conditions and mesh distribution are shown in Figure 5, where the upper boundary interacts dynamically with the atmosphere through climatic fluxes. The three-year meteorological dataset for 2015 to 2017 from Qom (temperature, radiation, rainfall, wind speed, and relative humidity) is applied to simulate realistic environmental variations. Atmospheric fluxes were applied to the ground surface and crack walls as time-dependent flux (Neumann) boundary conditions. Based on field data from the Qom plain, the groundwater table lies at a considerable depth of approximately 90 m below the ground surface. Accordingly, a hydrostatic boundary condition of 4 MPa suction was applied at the model base. Considering the arid climatic conditions of Qom, the presence of deep desiccation cracks, and the low permeability of the soil, the initial suction at the ground surface was set to 10 MPa, following a bilinear distribution between the surface and the groundwater table. A statistical study of crack geometry (width, depth and crack ratio) is performed to develop representative scenario sets named DiRj (Table 2). Each scenario corresponds to a combination of crack spacing and crack ratio drawn from probability distributions (Table 1). This enables quantification of the sensitivity of soil deformation to crack geometry. Three representative crack ratios (5 %, 13 %, and 35 %) were selected to capture the variability of natural cracking. Each scenario was assigned a constant crack depth of 1 m. Random crack spacing along the ground surface was generated following the procedure illustrated in Figure 4.

Model parameters are calibrated against Boom clay as a typical expansive soil properties and verified through mesh and time-step refinement analyses.

Results and Discussion

The simulation outcomes reveal that cracking introduces pronounced THM heterogeneity. Cumulative subsidence in cracked scenarios reaches 4.6 times that of the uncracked case (Fig. 6), confirming the amplifying role of cracking on ground deformation. Narrow cracks (low crack ratio) cause deeper desiccation and higher negative pore-water pressure, producing more severe volumetric shrinkage, while wider cracks enhance infiltration during rainfall and induce temporary swelling in the surrounding soil. This dual behaviour of shrinkage and swelling under alternating climate conditions demonstrates the cyclic nature of soil response (Fig. 7). Parametric analyses show that close crack spacing results in superposition of suction fields and increased total settlement, whereas larger spacing produces isolated deformation zones. Additionally, the temperature field within cracked soils exhibits larger diurnal fluctuations at depth, accelerating vapour transport and enhancing energy exchange (Fig. 8). In soil upper layers the temperature gradient is higher. It is due to the direct exposure of the soil surface and crack walls to the atmosphere. By moving downward, the temperature gradient decreases and reaches the equilibrium temperature (Fig. 9). Figure 10 shows the non-uniform distribution of saturation degree adjacent to the cracks. The cracked domain exhibits localised drying zones near crack walls due to enhanced vapour diffusion, resulting in strong vertical and lateral gradients in suction. These gradients intensify deformation around the crack edges.

Conclusion

This study proposes a physically consistent and computationally efficient framework that integrates THM processes with statistical crack representation to model heterogeneous subsidence in expansive soils. Key conclusions include: (1) desiccation cracks markedly modify moisture, temperature and stress fields, amplifying subsidence and inducing differential deformation; (2) the magnitude of deformation is sensitive to crack ratio, spacing and climatic forcing intensity; (3) narrow cracks are critical for long-term shrinkage, while wide cracks cause local swelling after rainfall; and (4) climatic fluctuations interact strongly with crack geometry to control temporal deformation patterns. The methodology can be extended to field-scale applications, probabilistic hazard mapping and integration with remote sensing for real-time prediction of climate-induced ground movements.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



ارائه یک چارچوب تحلیلی-آماری- عددی نو برای بررسی رفتار ترموهیدرومکانیکی پدیده‌ی فرونشست ناهمسان و تغییرات رطوبت و دما در خاک‌های ترک‌خورده تحت تأثیر اندرکنش خاک- اتمسفر

میلاد جبارزاده و حامد صادقی*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (hsadeghi@sharif.edu)

چکیده

با تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، لایه‌های سطحی زمین‌های حاوی خاک خمیری و مستعد فرونشست خشک می‌شوند و ترک‌های خشک‌شدگی غالباً با مکانیزم ترک کششی، ظهور و در اعماق خاک گسترش پیدا می‌کنند. ترک‌ها رفتار ترموهیدرومکانیکی خاک را تغییر می‌دهند و با ایجاد مسیرهای ترجیحی و ناهمگنی در مرز محیط نیمه بی‌نهایت زمین-اتموسفیر منجر به تغییر رژیم جریان سیال، انتقال حرارت، و درنهایت تغییر شکل زمین می‌شوند. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، معرفی یک چارچوب ترکیبی مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی پدیده‌ی فرونشست در زمین‌های با شکاف سطحی است، که مصادیق آن در پهنه‌ی فلات ایران به وفور در سال‌های اخیر گزارش شده است. نتایج مدل عددی نشان داده است که ترک‌خوردگی خاک منجر به غیریکنواختی رژیم جریان می‌شود، که درنهایت تغییر شکل ناهمسان زمین را در پی دارد. خاک‌های ترک‌خورده، ۴/۶ برابر فرونشست بیشتری نسبت به خاک بدون ترک نشان داده‌اند. همچنین، ترک‌های باریک‌تر پتانسیل تغییر شکل خاک را افزایش داده‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

واژگان کلیدی:

فرونشست ناهمسان زمین،
مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی،
تحلیل آماری،
رس ترک‌خورده در اثر
خشک‌شدگی،
اندرکنش خاک- اقلیم.

که این امر باعث افزایش سریع‌تر رطوبت خاک و تشدید تورم خاک می‌شود.^[۴] چندین مطالعه‌ی تجربی به بررسی رفتار حجمی خاک تحت چرخه‌های تر و خشک‌شدگی پرداخته‌اند.^[۵] در طول فرایند خشک‌شدگی، انقباض خاک عمدتاً به دلیل کاهش حجم درشت‌حفره‌ها رخ می‌دهد.^[۶] پس از رسیدن به حد انقباض، ساختار حفره‌های داخلی همچنان تغییر می‌یابد، هر چند تخلخل کل ثابت می‌ماند.^[۷] در مقابل، در طول فرایند ترشدگی، هم ریزحفره‌ها و هم درشت‌حفره‌ها افزایش حجم می‌یابند، با این تفاوت که تغییرات درشت‌حفره‌ها غالب است. بنابراین، تغییر شکل خاک و تغییر حجم حفره‌ها در طول چرخه‌های مذکور، کاملاً برگشت‌پذیر نیستند و به مکانیزم رفتاری کشسان خمیری خاک بر می‌گردد.^[۸] مشخص شده است که تغییرات حجمی تجمعی خاک متورم‌شونده عمدتاً از تغییرات حجم درشت‌حفره‌ها ناشی می‌شود و به تعداد چرخه‌ها وابسته است. با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدگی، تغییر شکل حجمی تمایل به رسیدن به حالت تعادل دارد.^[۹] اگرچه رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های متورم‌شونده در مطالعات پیشین به‌خوبی شناخته شده است، اما تأثیر ترک‌های عمیق و وسیع در مقیاس میدانی تحت تأثیر شرایط اقلیمی واقعی در دینامیک حجمی خاک ترک‌خورده همچنان نیازمند بررسی بیشتری است.

۱. مقدمه

خاک در مناطق گرم و خشک به دلیل بارش‌های پراکنده و دوره‌های طولانی خشکی، به‌طور مکرر در معرض چرخه‌های تر و خشک‌شدگی قرار دارد. شرایط اقلیمی مذکور منجر به تغییرات قابل توجهی در رطوبت خاک می‌شود، که به نوبه‌ی خود باعث تغییرات حجمی در ساختار خاک می‌شود. فرایند خشک‌شدن خاک و انقباض ناشی از آن به تشکیل ترک‌های خشک‌شدگی منجر می‌شود، که تا اعماق زمین نیز ادامه پیدا می‌کند.^[۱] ترک‌های خشک‌شدگی باعث افزایش حساسیت خاک به تغییرات حجمی می‌شوند، که چالش‌های جدی برای امور مهندسی ایجاد می‌کنند.

مکانیزم ترک‌خوردگی خاک در اثر خشک‌شدگی عمدتاً به دلیل تنش‌های کششی است، که از مقاومت کششی خاک فراتر می‌روند.^[۲] با این حال، به ترک‌خوردگی ناشی از تنش برشی نیز در مطالعات پیشین توجه شده است.^[۳] ترک‌ها سطوح جدیدی برای تبادل رطوبت و حرارت با جو ایجاد می‌کنند، که این امر تبخیر خاک را تسریع و انقباض خاک را در طول خشک‌شدن تشدید می‌کند. به همین ترتیب، در هنگام ترشدگی نیز نفوذ از سطح خاک و سطوح جدید ایجادشده توسط ترک‌ها به‌عنوان مسیرهای ترجیحی صورت می‌گیرد،

استناد به این مقاله:

جبارزاده، میلاد و صادقی، حامد، ۱۴۰۴. ارائه یک چارچوب تحلیلی-آماری- عددی نو برای بررسی رفتار ترموهیدرومکانیکی پدیده‌ی فرونشست ناهمسان و تغییرات رطوبت و دما در خاک‌های ترک‌خورده تحت تأثیر اندرکنش خاک- اتمسفر. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۱)، صص. ۱۳-۲۸. <https://doi.org/10.24200/j40.2024.65047.1718>



متورم‌شونده در معرض اقلیم واقعی و بررسی همزمان اثر ترک‌ها در ناهمسانی فرونشست و تورم ناشی از مسیرهای ترموهیدرولیکی خشک و ترشوندگی وجود دارد. بدین منظور، در پژوهش حاضر، یک رویکرد ترکیبی مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی بر پایه‌ی روش اجزاء محدود برای تحلیل انتقال حرارت، جریان سیال در محیط متخلخل، و تغییرشکل‌های متعاقب به همراه تحلیل آماری جهت تعیین هندسه‌ی خاک ترک‌خورده معرفی شده است؛ که قادر است تأثیر هندسه‌ی ترک، فواصل بین آن‌ها، و شرایط آب و هوایی متغیر را در توزیع دما، رطوبت، و تغییرشکل ناهمسان خاک به‌دست آورد.

۲. فرمول‌بندی ترموهیدرومکانیکی مدل عددی

هدف اصلی پژوهش حاضر، تبیین رفتار ترموهیدرومکانیکی خاک‌های رسی ترک‌خورده در شرایط آب و هوایی متغیر بوده و برای دستیابی به آن، از برنامه‌ی اجزاء محدود کد- برایت^[۲۰، ۱۸] استفاده شده است؛ که قابلیت انجام تحلیل‌های عددی همبسته‌ی ترموهیدرومکانیکی با اعمال شرط مرزی اتمسفری را دارد. بنابراین، معادله‌های بنیادی حاکم بر این مسئله، شامل معادله‌های: پیوستگی، رفتاری، و اندرکنش خاک و جو است.

فرمول‌بندی‌های ترموهیدرومکانیکی، که در مطالعه‌ی حاضر استفاده شده‌اند، قبلاً توسط اولیوللا^۹ و همکاران (۱۹۹۶ و ۱۹۹۴)^[۲۱، ۲۰] به تفصیل تشریح و در پژوهش حاضر فقط به‌صورت مختصر اشاره شده‌اند. یک رویکرد چندفازی^{۱۰} و چندگونه‌ای^{۱۱} اتخاذ شده است، که در آن فازها با زیرنویس‌های: S: جامد، L: مایع و G: گاز و گونه‌ها با بالانویس‌های: W: آب و a: هوای خشک مشخص شده‌اند. متغیرهای اصلی حالت در مطالعه‌ی حاضر: جابه‌جایی (u)، فشار مایع (P_l)، و دما (T) هستند و متغیرهای وابسته از متغیرهای حالت با استفاده از معادله‌های رفتاری محاسبه شده‌اند.

مجهولات مسئله با حل عددی سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی محاسبه شده‌اند. گسسته‌سازی فضایی با استفاده از روش اجزاء محدود گالرکین^{۱۲} انجام شده است، در حالی که گسسته‌سازی زمانی با استفاده از روش تفاضل محدود^{۱۳} انجام شده است. گسسته‌سازی زمانی خطی بوده و از یک طرح ضمنی استفاده شده است.

۱.۲. معادله‌های پایستگی

فرمول‌بندی معادله‌های پایستگی جرمی با استفاده از رویکرد ترکیبی انجام شده است. در این رویکرد، محاسبات پایستگی جرمی برای گونه‌ها انجام می‌شود، نه برای فازها. علاوه بر این، یک معادله‌ی پایستگی انرژی برای کل محیط و یک معادله‌ی پایستگی مومنتوم^{۱۴} برای محیط متخلخل برقرار شده است، که به تعادل تنش ساده منجر شده است.

۱.۱.۲. پایستگی جرمی جامد

معادله‌ی پایستگی جرمی فاز جامد در محیط خاک به صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:

علاوه بر تغییرشکل هندسی ترک‌ها، که به‌دلیل شرایط اقلیمی رخ می‌دهد، ترک‌های اخیر باعث تغییرشکل‌های ناهمسان در خاک اطراف می‌شوند. به عبارت دیگر، زمین به‌دلیل تغییرات اقلیمی در حضور ترک‌ها شدیدتر هستند و هم تورم و هم انقباض را تجربه می‌کنند.^[۱۰] در نتیجه، نوع تغییرشکل زمین در مناطق ترک‌خورده با مناطق بدون ترک متفاوت است. حضور ترک‌های عمیق در زمینی که با پدیده‌ی فرونشست نیز همراه است، نگرانی‌هایی درباره‌ی ایمنی و پایداری بلندمدت سازه‌های سطحی و زیرزمینی ایجاد می‌کنند.^[۱۱] چرا که وقوع ناهمسانی در نشست پایه‌های سازه‌ها می‌تواند منجر به واژگونی آن‌ها یا وقوع ترک‌خوردگی و گسیختگی در اتصال‌ها شود. بنابراین، درک پیامدهای ترک‌خوردگی خاک برای کاهش مخاطرات و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه ضروری است.

در چند دهه‌ی گذشته، مطالعات زیادی انجام شده است، که همه بر ترک‌خوردگی ناشی از خشک‌شدگی خاک متمرکز بوده‌اند. در زمینه‌ی مطالعات میدانی، شروع و گسترش ترک‌های خشک‌شدگی به‌دلیل اندرکنش بین عوامل محیطی و ناهمگنی خاک بررسی شده است.^[۱۳، ۱۲] در مطالعات آزمایشگاهی نیز پژوهش‌های متعددی در شرایط کنترل‌شده به بررسی شروع و گسترش ترک‌های خشک‌شدگی خاک پرداخته و ایجاد شبکه‌های ترک تحت شرایط مختلف محیطی و آماده‌سازی نمونه‌ها را بررسی کرده‌اند.^[۱۴] علاوه بر این، در حوزه‌ی ژئومکانیک محاسباتی بسیاری از شبیه‌سازی‌های عددی از روش‌های مختلفی، از جمله: روش‌های مبتنی بر شبکه، بدون شبکه، و روش‌های ترکیبی برای بررسی رفتار ترک‌خوردگی خاک استفاده کرده‌اند.^[۱۵، ۱۶]

در پژوهش‌های اخیر، برای مدل‌سازی گسترش شبکه‌های ترک ناشی از انقباض در خاک‌های خشک‌شده، رویکرد تکه‌تکه‌کردن مش توسط سانچز^۱ و همکاران (۲۰۱۴)،^[۱۷] معرفی شده است. به‌طور مشابه، شبیه‌سازی‌های عددی شامل نمونه‌های خاک سالم و ترک‌خورده توسط ترن^۲ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] انجام شده است. ایشان از مدل ترموهیدرومکانیکی برای خاک غیراشباع استفاده کرده و ایده‌ی گسترش ترک کششی را برای بررسی تأثیر ترک‌ها در نرخ تبخیر بررسی کرده‌اند. اخیراً، گو^۳ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۱۶] رویکرد جدیدی به نام تحلیل تغییرشکل ناپیوسته (DDA)^۴ معرفی کرده‌اند، که ویژگی‌های روش اجزاء محدود و روش اجزاء مجزا (المان مجزا) (DEM)^۵ را در برمی‌گیرد.

رویکردهای مدل‌سازی عددی به‌طور قابل توجهی تکامل یافته‌اند و پیشرفت‌های روش‌های محاسباتی و همبستگی چندفیزیکی را در بر می‌گیرند. حقیقت و همکاران (۲۰۲۳)،^[۱۹] روش اجزاء محدود- مجزا (FDEM) دوبعدی را برای تغییرشکل و ترک‌خوردگی فاز جامد و معادله‌ی ریچاردز غیرخطی^۶ را برای جریان سیال توسعه داده و از گسسته‌سازی حجم محدود^۷ برای حل دینامیک سیالات استفاده کرده‌اند.

با وجود پیشرفت روش‌های محاسباتی در زمینه‌ی ژئومکانیک، اما همچنان محدودیت‌هایی در بررسی تغییرشکل انقباضی و تورمی خمیری خاک‌های

⁸ CODE_BRIGHT

⁹ Olivella

¹⁰ Multiphase

¹¹ Multispecies

¹² Galerkin finite element method

¹³ Finite difference method

¹⁴ Momentum balance

¹ Sánchez

² Tran

³ Guo

⁴ Discontinuous Deformation Analysis

⁵ Discrete Element Method

⁶ Nonlinear Richards' equation

⁷ Finite volume discretization

جابجایی‌ها $u: (u_x, u_y)$ با حل معادله‌ی تعادل مومنتوم به دست می‌آیند.

۲.۲. معادله‌های رفتاری

۱.۲.۲. معادله‌های رفتاری حرارتی

برای در نظر گرفتن انتقال حرارت هدایت‌شده در محیط متخلخل، از قانون فوریه^{۱۶} (رابطه‌ی ۵) استفاده می‌شود:

$$i_c = -\kappa \nabla T \quad (5)$$

که در آن، κ هدایت حرارتی خاک است. هدایت حرارتی به تخلخل خاک و درجه‌ی اشباع بستگی دارد. همچنین، هدایت حرارتی یک محیط چندفازی تحت تأثیر ساختار میکروسکوپی ماده قرار می‌گیرد و منجر به یک مقدار میانگین می‌شود، که شامل هدایت‌های حرارتی فازهای مختلف است. تخمین مناسب هدایت حرارتی می‌تواند با استفاده از میانگین هدایت‌های حرارتی سه فاز خاک، آب، و گاز حاصل شود (رابطه‌ی ۶):

$$\kappa = \kappa_s^{(1-\phi)} \kappa_l^{\phi S_l} \kappa_g^{\phi(1-S_l)} = \kappa_{sat}^{S_l} \kappa_{dry}^{(1-S_l)} \quad (6)$$

که در آن، κ_{sat} و κ_{dry} به ترتیب هدایت حرارتی خاک اشباع و خشک هستند. با وارد کردن هدایت حرارتی خاک در حالت اشباع و خشک، مدل قادر خواهد بود هدایت حرارتی کل را با توجه به درجه‌ی اشباع خاک، که در اثر تغییرات اقلیمی در حال تغییر است، برای هر گام زمانی حل بروزرسانی کند. بدین منظور، هدایت حرارتی خاک اشباع و خشک از رابطه‌ی خطی پیشنهادی توسط ولکارت^{۱۷} و همکاران (۱۹۷۶)^{۱۲۲} مطابق رابطه‌ی ۷ تخمین زده شده است:

$$\kappa_{unsat} = 0.7936 S_l + 0.646 \quad (7)$$

فرض بر این است که تغییر فازها مانند تبخیر آب، نسبت به مقیاس‌های زمانی مسئله به سرعت اتفاق می‌افتد. این بدان معناست که تغییرات فازی مذکور می‌توانند به عنوان دستیابی سریع به تعادل موضعی در نظر گرفته شوند. این فرض یک محدودیت تعادلی را تحمیل می‌کند، که باید به طور مداوم رعایت شود. بنابراین، برای در نظر گرفتن غلظت بخار در فاز گازی (θ_g^w) از قانون سایکرومتریک^{۱۸} (رابطه‌ی ۸) استفاده می‌شود:

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)^0 \exp \left[\frac{-(P_g - P_l) M_w}{R(273.15 + T) \rho_l} \right] \quad (8)$$

که در آن، M_w وزن مولکولی آب (kg/mol)، R ثابت جهانی گازها (J/(mol.K))، و (θ_g^w) غلظت بخار اشباع در فاز گازی در تعادل با مایعی با سطح صاف در همان دماست (kg/m^۳)، که به صورت رابطه‌ی ۹ تعیین می‌شود:

$$(\theta_g^w)^0 = \frac{M_w P_{v(T)}}{R(273.15 + T)} \quad (9)$$

که در آن، $P_{v(T)}$ مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$P_{v(T)} = 136075 \exp \left[\frac{-5239.7}{273.15 + T} \right] \quad (10)$$

که در آن، $P_{v(T)}$ فشار بخار اشباع (Pa) است. غلظت بخار آب در فاز گازی، که در قالب کمیت نرمال‌شده‌ی رطوبت نسبی (RH) در محدوده‌ی صفر تا

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1-\phi)) + \nabla \cdot (j_s) = 0 \quad (1)$$

که در آن، ρ_s چگالی فاز جامد و ϕ تخلخل است. در محیط‌های چندفازی، مانند خاک، مفهوم شار برای توصیف حرکت ماده (اعم از سیالات یا جامدات) نسبت به یک سیستم مرجع خاص استفاده می‌شود. بنابراین، j_s شار کل فاز جامد نسبت به یک سیستم مرجع ثابت است، که توصیف‌کننده‌ی نرخ انتقال جرم فاز جامد به دلیل جابجایی‌ها و تغییرات تخلخل است. معادله‌ی اخیر برای تعیین تغییرات تخلخل در طول زمان حل می‌شود.

۲.۱.۲. پایستگی جرمی آب

آب در یک محیط متخلخل می‌تواند به دو صورت مایع یا بخار آب در فاز گازی ظاهر شود. بنابراین، هنگام نوشتن معادله‌ی پایستگی آب برای سیستم‌های مذکور، ضروری است که هر دو فاز مایع و گاز در نظر گرفته شوند. بنابراین، معادله‌ی پایستگی جرمی آب را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۲ بیان کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} ((\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g)) + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w \quad (2)$$

که در آن، ω کسر جرمی، ρ چگالی فاز، S درجه‌ی اشباع، j شار کل جرم به ازاء واحد سطح، و f^w تأمین خارجی آب به ازاء واحد حجم هستند. با حل معادله‌ی اخیر، تغییرات فشار مایع قابل تعیین است.

۳.۱.۲. پایستگی انرژی

در بسیاری از مسائل، پایستگی انرژی معمولاً به پایستگی آنتالپی^{۱۵} ساده می‌شود. با این حال، می‌توان آن را به صورت انرژی داخلی نیز ارائه کرد. با فرض تعادل حرارتی بین فازها و دمای یکنواخت در تمام فازها، یک معادله برای انرژی کل کافی است. بنابراین، پایستگی انرژی داخلی برای محیط متخلخل، با در نظر گرفتن انرژی داخلی در هر فاز می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1-\phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (i_c + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}) = f^E \quad (3)$$

که در آن، E_s ، E_l ، و E_g انرژی داخلی ویژه‌ی مربوط به هر فاز، i_c شار انرژی ناشی از هدایت در محیط متخلخل، j_{Es} ، j_{El} ، و j_{Eg} شارهای همرفت انرژی، و f^E چاهک و چشمه‌ی انرژی هستند. منظور از انرژی داخلی ویژه، انرژی داخلی هر فاز به ازاء واحد جرم آن فاز است. برای محاسبه‌ی انرژی داخلی کل در واحد حجم محیط متخلخل، انرژی داخلی ویژه‌ی هر فاز به جرم آن فاز در واحد حجم ضرب می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، انتقال حرارت فقط با مکانیسم هدایت حرارتی در نظر گرفته شده است.

۴.۱.۲. تعادل تنش

با صرف نظر از آثار اینرسی، پایستگی مومنتوم به معادله‌ی تعادل تنش ساده‌سازی می‌شود (رابطه‌ی ۴):

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad (4)$$

که در آن، σ تانسور تنش و b بردار نیروهای حجمی است. در نهایت،

¹⁷ Volckaert

¹⁸ Psychrometric law

¹⁵ Enthalpy balance

¹⁶ Fourier's law

اشباع تعریف می‌شود. بنابراین، منحنی نگهداشت آب- خاک با استفاده از مدل ون گنوختن (۱۹۸۰)،^[۲۴] مطابق رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P_0 (\sigma / \sigma_0)} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (14)$$

که در آن، P فشار ورود هوا، σ تنش سطحی در دمای T ، و σ_c تنش سطحی در دمایی است که P اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه‌ی جریان همرفتی فاز گاز، ضروری است که نفوذپذیری نسبی فاز گاز تعیین شود. بدین منظور از روش توانی تعمیم‌یافته^{۲۰} مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ استفاده شده است:

$$k_{rg} = AS_{eg}^{\lambda} \quad (15)$$

$$S_{eg} = \frac{S_g - S_{rg}}{S_{gs} - S_{rg}} \quad (16)$$

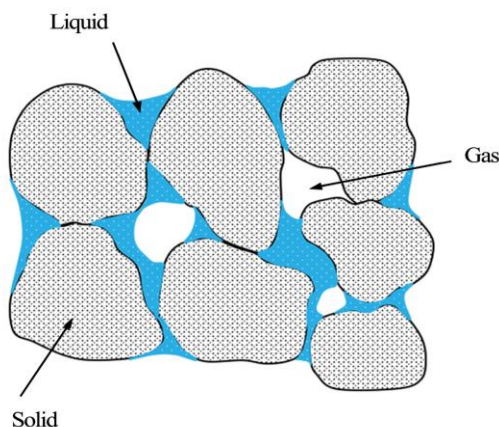
که در آن‌ها، A یک ثابت، λ پارامتر مدل، و S_{eg} درجه‌ی اشباع مؤثر گاز است. براساس تعریف درجه‌ی اشباع فاز سیال ($S_l + S_g = 1$) و S_{gs} و S_{eg} به ترتیب به صورت $1 - S_{ls}$ و $1 - S_{rl}$ تعریف می‌شوند. برای در نظر گرفتن جریان غیرهمرفت گونه‌ها در فازهای مایع و گاز، که شامل انتشار بخار آب در فاز گازی و انتشار هوا در آب می‌شود، قانون فیک^{۲۱} مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ استفاده شده است:

$$i_g^w = -(\tau \phi \rho_g S_g D_g^w I) \nabla \omega_g^w \quad (17)$$

$$D_g^w = D \left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right) \quad (18)$$

که در آن‌ها، τ ضریب انحنای مسیر، D_g^w ضریب انتشار بخار در هوا، I ماتریس واحد، D ، و n پارامترهای مدل هستند. در شکل ۱، جریان آب، بخار آب و انرژی در محیط متخلخل خاک با تفکیک فازی جهت نمایش بهتر تبادلات بین فازهای مختلف مشاهده می‌شود.

(a)



(b)

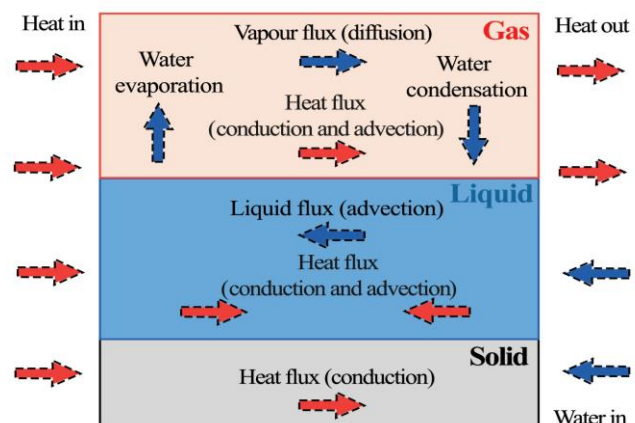


Figure 1. (a) Schematic illustration of unsaturated soil, and (b) a diagram depicting the coupled thermohydraulic phenomena in an unsaturated porous medium subjected to heat and hydration (after^[21]).

شکل ۱. (الف) شکل شماتیک خاک غیراشباع، و (ب) شماتیک پدیده‌های ترموهیدرولیکی همبسته در یک محیط متخلخل غیراشباع در معرض حرارت و هیدراتاسیون (برگرفته از نوشتار اولیولا^۱ و همکاران (۱۹۹۴)^[۲۱]).

۱۰۰ درصد بیان می‌شود، نقش بسیار مهمی در رفتار خاک‌های غیراشباع ایفا می‌کند؛ به ویژه زمانی که تغییرات شار سطحی، مانند تبخیر، ترقی، یا بارش رخ می‌دهد. بنابراین در نظر گرفتن غلظت بخار آب در فضای متخلخل خاک غیراشباع از منظر جریان آب در حفره‌های خاک، انتقال حرارت، و تغییر شکل ناشی از فرآیندهای هیدرولیکی- حرارتی اهمیت دارد. همچنین در فرمول‌بندی ارائه‌شده، غلظت بخار در تعیین انرژی فاز گاز تأثیرگذار است.

۲.۲.۲. معادلات رفتاری هیدرولیکی

جریان همرفتی فازهای مایع و گاز در خاک با استفاده از قانون عمومی دارسی (رابطه‌ی ۱۱) محاسبه می‌شود:

$$q_\alpha = -\frac{Kk_{ra}}{\mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha g) \quad (11)$$

که در آن، K تانسور نفوذپذیری ذاتی، k_{ra} نفوذپذیری نسبی، μ_α ویسکوزیته‌ی دینامیکی، P_α فشار که α می‌تواند مایع (l) یا گاز (g) باشد، و g بردار جاذبه هستند. تانسور نفوذپذیری ذاتی به‌عنوان تابعی از تخلخل می‌تواند با استفاده از معادله‌ی کوزنی (رابطه‌ی ۱۲) تعریف شود:

$$K = K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right)^2 \quad (12)$$

که در آن، ϕ_0 تخلخل مرجع و K_0 نفوذپذیری ذاتی است، که فرض می‌شود در تخلخل مرجع همسانگرد است. علاوه بر نفوذپذیری ذاتی خاک، مدل ون گنوختن^{۱۹} معلم (۱۹۹۶ و ۱۹۷۶)،^[۲۳] برای محاسبه‌ی نفوذپذیری نسبی فاز مایع در درجه‌های مختلف اشباع استفاده شده است (رابطه‌ی ۱۳):

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right]^2 \quad (13)$$

که در آن، λ پارامتر شکل و S_e درجه‌ی اشباع مؤثر فاز مایع هستند، که همراه با درجه‌ی اشباع پسماند (S_{rl}) و درجه‌ی اشباع بیشینه (S_{ls}) تعریف می‌شود. درجه‌ی اشباع مؤثر همچنین برای برقراری رابطه بین مکش و درجه‌ی

²¹ Fick's law

¹⁹ Van Genuchten

²⁰ Generalized power method

۳.۲.۲. معادله‌های رفتاری مکانیکی

در مطالعه‌ی حاضر، مدل متورم‌شونده‌ی بارسلونا^{۲۲} توسعه‌یافته توسط آلونسو^{۲۳} و همکاران (۱۹۹۹)،^[۲۵] برای شبیه‌سازی کرنش‌های تورمی قابل توجه مناسب برای خاک‌های متورم‌شونده استفاده شده است. مدل رفتاری اخیر به دلیل قابلیت رفع محدودیت‌های مدل‌های پیشین، که فقط امکان تورم‌های برگشت‌پذیر کوچک در محدوده‌ی کشسان را دارند، انتخاب شده است.^[۲۶ و ۲۷] با این حال، رس‌های متورم‌شونده تغییرات حجمی قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند، که اغلب غیرقابل‌برگشت هستند و نیاز به رویکرد مدل‌سازی جامع‌تری دارند. یکی از جنبه‌های با اهمیت خاک‌های متورم‌شونده‌ی غیراشباع، نقش پدیده‌های ریزساختاری در سطح ذرات است. برای توسعه‌ی یک مدل، که با درک فعلی از فرآیندهای اساسی اخیر همخوانی داشته باشد، لازم است تا آثار ریزساختاری به‌وضوح در فرمول‌بندی گنجانده شوند. چارچوب مدل رفتاری بارسلونا به‌طورمؤثری این ملاحظات ریزساختاری را ادغام می‌کند، که برای درک رفتار کلی خاک‌های متورم‌شونده ضروری هستند. در مدل بارسلونا، حفره‌های ریزساختاری همواره اشباع فرض می‌شوند، بنابراین مفهوم تنش مؤثر ترزاقی برقرار است؛ تغییرات در مکش (S) همان تغییر حجم را مانند تغییرات در تنش خالص متوسط (p) القا می‌کند. کرنش حجمی در ریزساختار قابل برگشت (ε_{vm}^e) و مستقل از آثار درشت‌ساختاری است (روابط ۱۹ و ۲۰):

$$d\varepsilon_{vm}^e = \frac{de_m}{1+e_m} = \frac{d(p+s)}{K_m} \quad (۱۹)$$

$$K_m = \frac{\exp[\alpha_m(p+s)]}{\beta_m} \quad (۲۰)$$

که در آن‌ها، S مکش، p تنش خالص میانگین، e_m نسبت تخلخل ریزساختار، K_m مدول ریزساختاری، α_m و β_m پارامترهای مدل هستند.^[۲۵] کرنش حجمی درشت‌ساختار را می‌توان به کرنش‌های حجمی کشسان و خمیری تقسیم کرد. کرنش حجمی کشسان درشت‌ساختار (ε_{VM}^e) می‌تواند ناشی از تغییرات در تنش یا مکش باشد. این رفتار به صورت رابطه‌ی ۲۱ بیان می‌شود:

$$d\varepsilon_{VM}^e = \frac{de_M}{1+e_M} = \left(\frac{\kappa}{1+e_M} \right) \frac{dp}{p} + \left(\frac{\kappa_s}{1+e_M} \right) \frac{ds}{s+p_{atm}} \quad (۲۱)$$

که در آن، e_M نسبت تخلخل درشت‌ساختار، p_{atm} فشار جو، κ و κ_s پارامترهای قابلیت فشردگی کشسان درشت‌ساختار برای تغییرات در تنش و مکش هستند. علاوه بر این، کرنش حجمی خمیری درشت‌ساختار (ε_{VM}^p) هم از برخورد مسیر تنش به منحنی تسلیم بار-فروریزش (LC)^{۲۴} با تغییر در تنش یا مکش و هم از تغییر شکل‌های کشسان ریزساختار، که در آرایش درشت‌ساختار تأثیر می‌گذارند، ناشی می‌شود. کرنش حجمی خمیری ناشی از تغییر تنش و مکش به صورت رابطه‌ی ۲۲ تعریف می‌شود:

$$d\varepsilon_{VM}^p = \frac{\lambda(s) - \kappa dp_0}{1+e_M p_0} \quad (۲۲)$$

که در آن، $\lambda(s)$ شیب خط تحکیم اولیه در مکش S است، که به شیب خط تحکیم اشباع اولیه $\lambda(0)$ و پارامترهای مدل (r, β) بستگی دارد:

$$\lambda(s) = \lambda(0) [r + (1-r)e^{-\beta s}] \quad (۲۳)$$

کرنش حجمی خمیری درشت‌ساختار ناشی از فعال‌سازی سطوح تسلیم ریزساختار افزایش مکش (SI) و کاهش مکش (SD) نیز به صورت روابط ۲۴ و ۲۵ بیان می‌شود:

$$d\varepsilon_{VM}^p = f_I d\varepsilon_{vm}^e \quad (۲۴)$$

$$d\varepsilon_{VM}^p = f_D d\varepsilon_{vm}^e \quad (۲۵)$$

که در آن‌ها، f_I و f_D توابع همبستگی ریزساختار و درشت‌ساختار در زمانی هستند که دو سطح تسلیم SI و SD ریزساختار به ترتیب فعال می‌شوند.

۳.۲.۳. معادله‌های حاکم بر اندرکنش خاک-اقلیم

اندرکنش خاک و جو با تبادل رطوبت، حرارت، و انتشار گاز در سطح واسط محیط متخلخل خاک و محیط جوی تعریف می‌شود.^[۲۸] انتقال رطوبت شامل حرکت پیچیده‌ی بخار آب بین خاک و جو به دلیل گرادیان‌های رطوبت، دما، و فشار است. تبادل حرارت، شامل انتقال انرژی حرارتی از طریق هدایت، همرفت، و تابش است.^[۲۹ و ۳۰] فرمول‌بندی این مسئله توسط سلر^{۲۵} و همکاران (۱۹۸۶)،^[۳۱] و سمت^{۲۶} (۲۰۱۶)،^[۳۲] مفصلاً ارائه شده است، که در پژوهش حاضر نیز به اختصار به آن پرداخته شده است.

۳.۳.۱. شارهای جرمی آب و گاز

فاز گاز در خاک، شامل دو گونه هوای خشک و بخار آب است. در اثر اختلاف بین فشار هوا و فشار جزئی بخار آب در فاز گاز، جریان همرفت رخ می‌دهد. فشار جزئی بخار آب نیز به نسبت فشار اشباع بخار آب از منحنی تبخیر تابع دما به دست می‌آید، که در نتیجه، غلظت بخار آب موجود در هوا از شرایط تقریباً خشک تا آستانه‌ی میعان و بارش طبیعی را بیان می‌کند. جریان همرفت هوا در فاز گاز (j_a) به صورت رابطه‌ی ۲۶ محاسبه می‌شود:

$$j_a = \omega_g^a q_g = (1 - \omega_g^w) \gamma_g (P_g - P_{ga}) \quad (۲۶)$$

که در آن، q_g جریان فاز گاز ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)، P_{ga} فشار جو (Pa)، γ_g ضریب تراوش^{۲۷} هستند. بسته به فشار هوا و فشار فاز گاز داخل خاک، جریان همرفت گاز می‌تواند از فشار بیشتر به سمت فشار کمتر باشد. تبخیر (E) را می‌توان با استفاده از یک معادله‌ی انتشار آیرودینامیک^{۲۸} به صورت رابطه‌ی ۲۷ محاسبه کرد:

$$E = \frac{1}{r_a} (\rho_{va} - \rho_v) = \frac{k^2 v_a \varphi}{\left(\ln \frac{z_a}{z_0} \right)^2} (\rho_{va} - \rho_v) \quad (۲۷)$$

که در آن، r_a مقاومت آیرودینامیک هوا (s/m)، v_a سرعت باد (m/s)، φ ضریب پایداری، k ثابت ون‌کارمن^{۲۹}، z_a طول زبری سطح زمین (m)، z_0 ارتفاعی است که در آن v_a و ρ_{va} اندازه‌گیری می‌شوند، ρ_v و ρ_{va} (kg/m^3) به ترتیب برابر جرم بخار در واحد حجم گاز اتمسفر و خاک هستند. برای در نظر گرفتن حرکت بخار آب در منافذ خاک ناشی از تبخیر، جریان همرفت بخار از طریق فاز گاز به صورت رابطه‌ی ۲۸ تعریف می‌شود:

26 Samat

27 Leakage coefficient

28 Aerodynamic diffusion equation

29 von Karman's constant

22 Barcelona expansive model

23 Alonso

24 Load-Collapse

25 Sellers

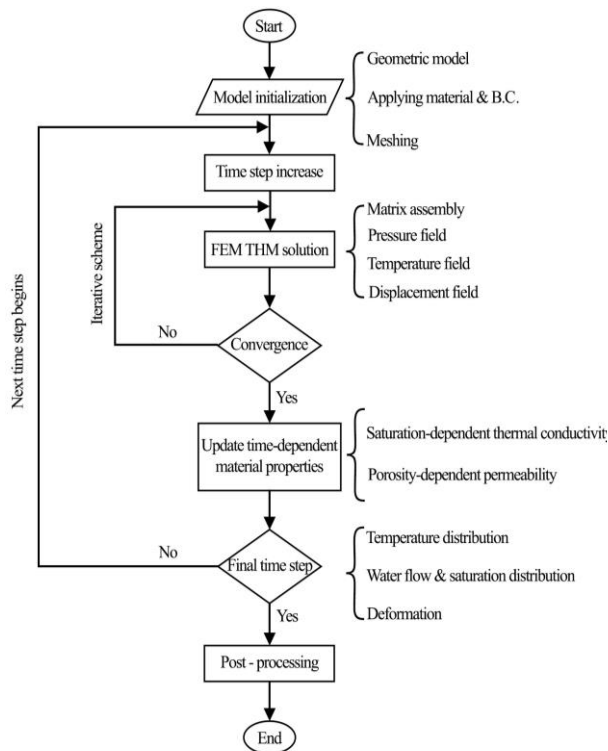


Figure 2. Flowchart of the algorithm for solving the soil-climate interaction problem, considering hydraulic and thermal fluxes.

شکل ۲. فلوچارت الگوریتم حل مسئله ی اندرکنش خاک- اقلیم با در نظر گرفتن شارهای هیدرولیکی و حرارتی.

عمیق و عریض در شرایط واقعی باشد. برای غلبه بر چالش اخیر، رویکردی آماری استفاده شد تا از مجموعه ی داده های موجود در مطالعات پیشین برای هندسه ی ترک ها در خاک های خشک شده به بهترین نحو استفاده شود. این رویکرد امکان استفاده از داده های محدود را فراهم می سازد تا بینش های ارزشمندی کسب شود. همچنین، پیش بینی های قابل اعتمادی درباره ی رفتار ترک ها در شرایط مختلف ارائه داده شود. بدین منظور، برای امکان استفاده از طیف گسترده ای از داده های خصوصیات هندسی ترک در مطالعات آزمایشگاهی و عددی کوچک مقیاس، پارامتر بی بُعدی به نام نسبت ترک C_R معرفی شده است؛ که به عنوان نسبت عرض ترک (C_W) به عمق ترک (C_D) تعریف می شود، و مقادیر آن در جدول ۱ برای مطالعات مختلف جمع آوری شده است. در مطالعات میدانی، عمق ترک تا ۶ متر گزارش شده است. در دشت قم نیز به عنوان منطقه ی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، ترک های عمیقی با طول های قابل توجه مشاهده شده اند. مقدار ۱ متر براساس مطالعات پیشین و مشاهدات میدانی برای عمق ترک در نظر گرفته شده است.

طبق جدول ۱، نسبت ترک می تواند بین ۱ تا ۴۲ درصد متغیر باشد، که دامنه ی نسبتاً گسترده ای را در بر می گیرد. اما انتخاب فقط مقدار متوسط دامنه ی مذکور نمی تواند نماینده ی مناسبی باشد. برای برآورد دقیق مقدار نماینده ی C_R ، از رویکرد استنباط متغیر با استفاده از نرم افزار RTX^[۳۳] استفاده شده است. در شکل ۳-الف، توزیع های گاوسی یا نرمال و لاگ نرمال در کنار داده های نسبت ترک ترسیم شده اند.

$$j_g^w = \omega_g^w q_g \quad \text{if} \quad P_g > P_{ga} \quad (28)$$

$$j_g^w = \frac{\rho_{va}}{\rho_{ga}} q_g \quad \text{if} \quad P_g \leq P_{ga}$$

که در آن، ρ_{ga} چگالی هوای اتمسفر است. در نهایت، جریان کل آب (j_w) به صورت رابطه ی ۲۹ تعریف می شود:

$$j_w = k_{rain} P + k_{evap} E + j_g^w \quad (29)$$

که در آن، P بارندگی $(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ ، k_{rain} و k_{evap} ضرایبی هستند که می توانند تأثیر پارامترهای مرتبط را تغییر دهند.

۲.۳.۲. شار انرژی

طبق معادله ی انتشار آیرودینامیک، جریان حرارت محسوس (H_s) که شامل انتقال انرژی حرارتی به دلیل تفاوت دما بین ذرات است، به صورت رابطه ی ۳۰ تعریف می شود:

$$H_s = \frac{\rho_{ga} C_a}{r_a} (T_a - T) = \left(\frac{k^2 v_a \phi}{\ln \frac{z_0}{z_a}} \right) \rho_{ga} C_a (T_a - T) \quad (30)$$

که در آن، C_a ظرفیت گرمایی ویژه ی هوا $(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$ ، T_a و T $(^\circ \text{C})$ به ترتیب دمای هوا و خاک هستند. جهت جریان حرارت محسوس به تفاوت دمای بین هوا و خاک بستگی دارد. اگر دمای هوا بیشتر از دمای سطح خاک باشد، جریان حرارت محسوس از هوا به خاک خواهد بود. اگر دمای سطح خاک بالاتر از دمای هوا باشد، جهت جریان حرارت محسوس از خاک به هوا انتقال می یابد. بنابراین، جهت جریان حرارت محسوس با توجه به شرایط دمایی محیط و خاک تعیین می شود و تفاوت دمای مذکور سبب جریان حرارت محسوس میان دو محیط مذکور می شود. جهت حرارت همرفتی (H_e) با در نظر گرفتن انرژی داخلی آب مایع، بخار، و هوا به صورت رابطه ی ۳۱ محاسبه می شود:

$$H_e = h_v (E + j_w^g) + h_{la} (P + j_w^l) + h_{a0} j_a \quad (31)$$

که در آن، h_v ، h_{la} ، و h_{a0} به ترتیب آنتالپی ویژه ی بخار، آب مایع، و هوا هستند. بنابراین، جریان کل انرژی (j_e) به صورت رابطه ی ۳۲ نوشته می شود:

$$j_e = k_{rad} R_n + H_s + H_e \quad (32)$$

که در آن، k_{rad} ضریبی است که می تواند تأثیر تابش خالص، R_n $(\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ را تغییر دهد. لذا، چارچوب نظری اساسی برای تحلیل اندرکنش خاک و اتمسفر شامل جریان گاز (رابطه ی ۲۶)، جریان آب (معادله ی ۲۹)، و جریان انرژی (معادله ی ۳۲) است. در شکل ۲، الگوریتم حل مسئله ی اندرکنش خاک- اقلیم با در نظر گرفتن شارهای هیدرولیکی و حرارتی مشاهده می شود.

۳. رویکرد آماری جهت تعیین خصوصیات هندسی ترک خشک شدگی

هندسه و فاصله ی بین ترک ها از جمله پارامترهای اساسی هستند که رفتار خاک های ترک خورده را تحت تأثیر قرار می دهند. با این حال، اندازه گیری ویژگی های اخیر در مطالعات میدانی بزرگ مقیاس می تواند دشوار باشد. از طرفی، انتخاب ترک های در مقیاس آزمایشگاهی نمی تواند نماینده ی ترک های

جدول ۱. جمع‌آوری و خلاصه‌ی پارامترهای عرض، عمق، و نسبت ترک از مطالعات پیشین.

Table 1. Summary of parameters for width, depth, and crack ratio from previous studies.

Crack type	Procedure	C_W (mm)	C_D (mm)	C_R (%)	Reference
Natural	Field observation	50.8 – 76.2	609.6	8.3 – 12.5	[34]
Artificial	Experimental test	6.4 – 19.1	300	2.13 – 6.36	[35]
Natural	Field observation	50 – 70	600 – 900	7.7 – 8.3	[36]
Natural	Field observation	5	400 – 500	1 – 1.25	[37]
Natural	Field observation	–	500 – 6000	–	[12]
Natural	Field observation	17 – 21	50	34 – 42	[2]
Natural	Experimental test	10	160	6.25	[14]
Natural	Field observation	25	300	8.33	[13]
Natural	Numerical modeling	12 – 18	300	4 – 6	[15]
Artificial	Experimental test	5 – 20	50 – 100	5 – 40	[38]
Natural	Experimental test	4.5	15	30	[39]
Natural	Experimental test	0.4 – 1	8	5 – 12.5	[40]
Artificial	Experimental test	4 – 10	50	8 – 24	[41]

جدول ۲. سناریوهای مدل‌سازی و پارامترهای هندسی ترک.

Table 2. Modeling scenarios and geometric parameters of cracks.

Model name	(m) C_D	(%) C_R	(m) C_W
SWC	–	–	–
DIR5	1	5	0.05
D1R13	1	13	0.13
D1R35	1	35	0.35

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نسبت ترک از توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند. با استفاده از میانگین و ضریب تغییرات پارامتر C_R ، که به ترتیب برابر ۱۳/۲ و ۸۵/۷ درصد است، تابع چگالی احتمال (PDF) ^{۳۱} برای داده‌های C_R ترسیم شده است، که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود.

نقطه‌ی اوج منحنی اخیر، مود داده‌ها را نشان می‌دهد، که نمایانگر C_R با بالاترین چگالی در میان داده‌های موجود است. بنابراین، اولین مقدار نماینده برای C_R به‌عنوان مود داده‌ها، ۵٪ برآورد شده است. دومین مقدار نماینده برای C_R مقدار میانگین انتخاب شده است، که تقریباً مساوی ۱۳٪ است. برای بررسی اثر نسبت ترک‌های بزرگ‌تر، سومین مقدار نماینده برابر میانگین نسبت ترک به‌علاوه‌ی ۲ برابر انحراف معیار یا ۳۵٪ برآورد شده است. سناریوهای نهایی مدل‌سازی عددی با تعیین هندسه‌ی ترک با رویکرد آماری در جدول ۲ ارائه شده‌اند. هر سناریو با فرمت «DiRj» نامگذاری شده است.

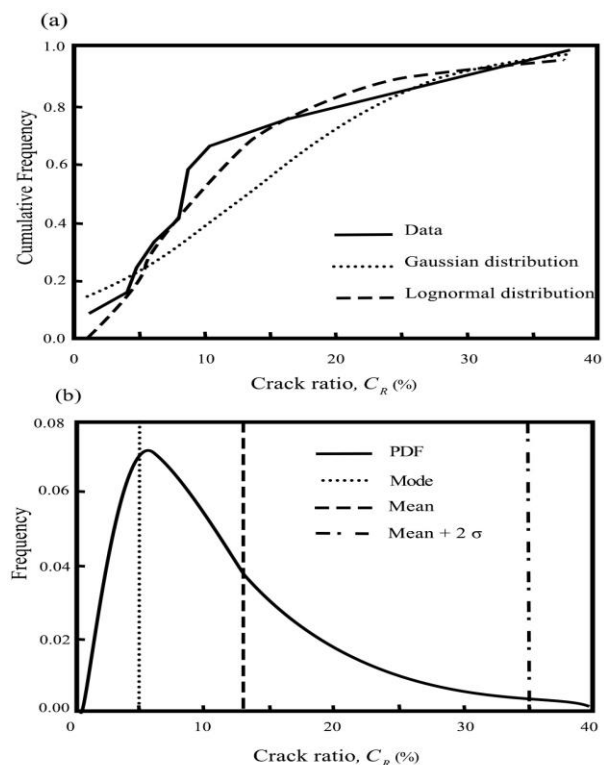


Figure 3. (a) Comparison of Gaussian and log-normal distributions with the data, and (b) selection of crack ratio modeling scenarios.

شکل ۳. (الف) مقایسه‌ی توزیع گاوسی و لاگ‌نرمال با داده‌ها؛ و (ب) انتخاب سناریوهای مدل‌سازی نسبت ترک.

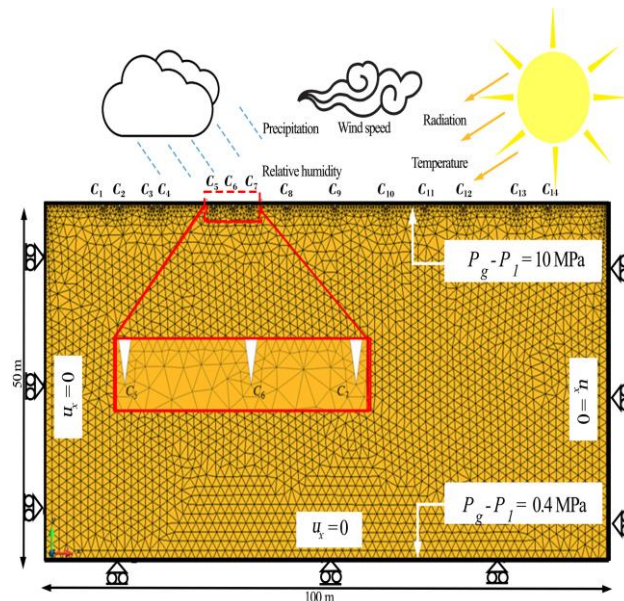


Figure 5. Geometry of the numerical model and finite element meshing, along with a schematic of the applied climatic conditions.

شکل ۵. هندسه ی مدل عددی و مش بندی اجزاء محدود به همراه شمایکی از شرایط اقلیمی اعمال شده.

مکانیکی بارسلونا برای خاک رس بوم نیز طبق پژوهش سانچز^{۳۳} و همکاران (۲۰۰۵)^[۴۴] اعمال شده است.

در برخی مطالعات (۲۰۰۲)^[۴۶]، دمای اولیه ی خاک رس بوم در عمق ۲۲۳ متری برابر با ۱۶/۶ درجه ی سانتی گراد گزارش شده است. بنابراین، در مدل پیشنهادی، دمای اولیه ی خاک ۱۵ درجه ی سانتی گراد فرض شده است، که این دما با تغییرات اقلیمی از طریق مکانیزم هدایت حرارتی تغییر می کند. هندسه ی نهایی مدل به طول ۱۰۰ متر بود، که ۱۴ ترک داشت. براساس شکل ۴، کمینه و بیشینه ی فاصله بین ترک ها به ترتیب ۱/۳ متر (بین ترک های سوم و چهارم) و ۹/۱ متر (بین ترک های دوازدهم و سیزدهم) بوده است. ترک های اول و آخر نیز تقریباً ۱۰ متر از مرزهای جانبی مدل فاصله داشتند، تا تأثیر مرزهای جانبی در رفتار ترک ها به میزان کمینه برسد. عمق خاک ۵۰ متر در نظر گرفته شده است، تا دامنه ی تغییرات حرارتی در عمق خاک را پوشش دهد. هندسه ی مدل و مش شبکه ی اجزاء محدود برای مدل D1R13 در شکل ۵ مشاهده می شوند.

به عنوان شرط اولیه برای مدل عددی، تخلخل اولیه ی خاک برابر با ۰/۴۸۷ فرض شده است، که مطابق با گزارش های پیشین^[۴۳ و ۴۲] برای خاک موردنظر استفاده شده است. براساس گزارش های میدانی از دشت قم، سطح آب زیرزمینی عمیق بوده و تقریباً ۹۰ متر زیر سطح زمین گزارش شده است. در مطالعه ی حاضر، با فرض عمق ۹۰ متری برای سطح آب زیرزمینی، یک شرط مرزی هیدرواستاتیک به مرز تحتانی مدل با مکش اولیه ی ۰/۴ مگاپاسکال اعمال شده است. طبق اکتشاف های صحرائی^[۴۵]، با توجه به اقلیم خشک قم، حضور ترک های عمیق در مدل و استفاده از خاک با نفوذپذیری کم، مکش اولیه، ۱۰ مگاپاسکال در سطح خاک فرض شده است، که به صورت توزیع دوخطی از سطح آب زیرزمینی تا سطح خاک در نظر گرفته شده است.

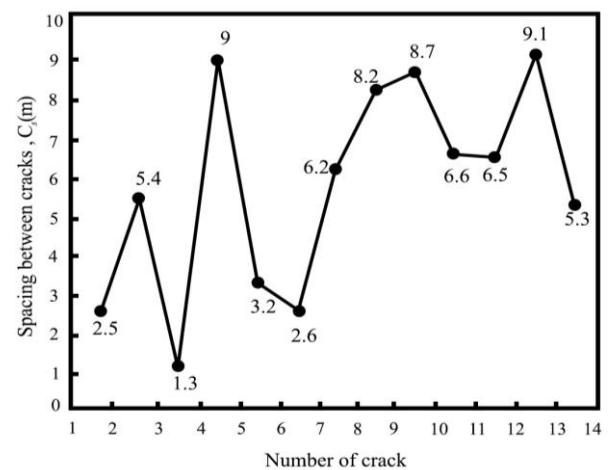


Figure 4. Random spacing between cracks.

شکل ۴. فاصله ی تصادفی بین ترک ها.

علاوه بر هندسه ی ترک، فاصله ی بین ترک ها نیز در پاسخ ترموهیدرومکانیکی خاک ترک خورده به تغییرات اقلیمی اهمیت زیادی دارد، چرا که ترک های نزدیک تر به دلیل اندرکنش بیشتری که با هم دارند، پاسخ متفاوتی به تغییرات اقلیمی نسبت به ترک های دورتر نشان می دهند. از آنجایی که پدیده ی ترک خوردگی خاک و گسترش آن در شبکه های ترک وسیع به صورت تصادفی رخ می دهد؛ در مطالعه ی حاضر، مقادیر تصادفی برای فاصله ی ترک ها استفاده شده است. فاصله ی ترک با دو پارامتر x و r_i تعریف شده است. پارامتر x برای تعیین حد بالای فاصله ی بین ترک ها استفاده شده است. براساس مشاهده های میدانی و هندسه ی محدود مدل شبیه سازی شده، بیشینه ی فاصله ی بین ترک ها ۱۰ متر فرض شده است. پارامتر r_i نیز برای ایجاد تغییرات تصادفی در فاصله ی بین ترک ها معرفی شده است؛ که مقادیر تصادفی در محدوده ی ۰/۱ تا ۱ را در بر می گیرد. حاصل ضرب دو پارامتر اخیر، فاصله ی ترک ($C_s = x r_i$) را تعیین می کند. براساس تعریف ذکر شده، محدوده ی تعیین شده برای فاصله ی ترک از ۱ متر تا ۱۰ متر متغیر است. فاصله های ترک تصادفی نیز در شکل ۴ مشاهده می شوند.

۴. توسعه ی مدل عددی اجزاء محدود

برای بررسی رفتار خاک تحت تغییرات اقلیمی، داده های هواشناسی شهر قم طی یک دوره ی سه ساله از ابتدای سال ۲۰۱۵ تا انتهای ۲۰۱۷ (معادل ۱۱ دی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶) جمع آوری شده اند؛ که شامل: دما، بارش، رطوبت نسبی، تابش، و سرعت باد هستند. تغییرات سه ساله ی آب و هوایی شهر قم در بازه ی زمانی مذکور توسط جبارزاده و همکاران (۲۰۲۴)^[۴۱] ارائه شده است.

به منظور ساده سازی، داده های هواشناسی به طوریکه نواخت به عنوان شرایط مرزی جوی به سطح خاک و دیواره های ترک ها در مدل عددی اعمال شده اند. از آنجا که خاک های متورم شونده به تغییرات رطوبت حساس هستند و در طی چرخه های تر و خشک شوندگی، مستعد ترک خوردگی هستند؛ در مطالعه ی حاضر از خاک رسی بوم^{۳۲} برای شبیه سازی رفتار چرخه های خاک های متورم شونده تحت تغییرات اقلیمی واقعی استفاده شده است. پارامترهای ترموهیدرولیکی خاک رس بوم در مطالعات پیشین به طور گسترده ی گزارش و در مطالعه ی حاضر استفاده شده اند.^[۴۲ و ۴۳] علاوه بر آن، پارامترهای مدل

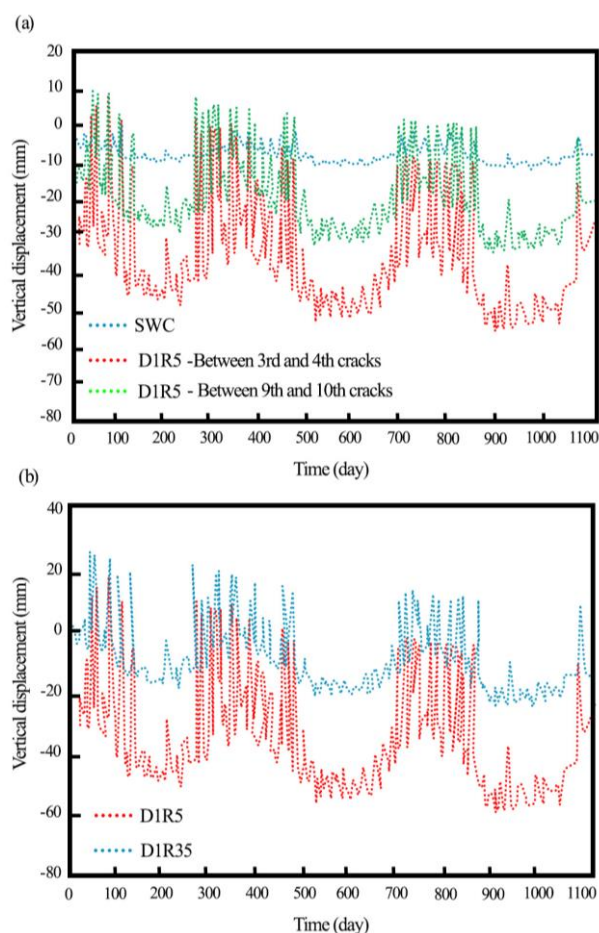


Figure 6. (a) Comparison of vertical deformation in uncracked soil with cracked soil at various crack spacings, (b) the effect of crack width on vertical deformation.

شکل ۶. (الف) مقایسه‌ی تغییرشکل قائم در خاک بدون ترک با خاک ترک‌خورده در فواصل ترک مختلف، و (ب) تأثیر عرض ترک در تغییرشکل قائم.

بین ترک‌های نهم و دهم برابر $9/8$ میلی‌متر و در خاک بدون ترک $1/6$ میلی‌متر محاسبه شده است.

در شکل ۶-ب، تأثیر عرض ترک در تغییرشکل ناهمسان خاک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن با افزایش عرض ترک مقادیر تغییرشکل قائم به سمت فرونشست‌های کمتر و تورم‌های بیشتر تغییر یافته‌اند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش ۷ برابر در عرض ترک، مقدار بیشترین فرونشست از $57/1$ میلی‌متر به 26 میلی‌متر کاهش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش $2/2$ برابری است. اما در مقابل، تورم از 6 میلی‌متر به $26/5$ میلی‌متر افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش $4/4$ برابری است. ترک‌های عریض‌تر با فراهم کردن فضای بیشتر برای نفوذ آب در هنگام بارندگی، آب بیشتری را به اعماق پایین‌تر خاک هدایت می‌کنند، که منجر به ترشوندگی لایه‌های عمیق‌تر خاک و به تبع آن تغییرشکل تورمی خاک می‌شود. فرونشست بیشتر در ترک‌های عریض نیز با نتایج پژوهش آدامز^{۳۷} و همکاران (۱۹۶۴)^[۳۴] اعتبارسنجی شده است. ایشان نتیجه گرفته‌اند که تبخیر از ترک‌های باریک‌تر، شدیدتر از ترک‌های عریض

از دیگر موارد پراهمیت در مدل‌سازی عددی، انتخاب بهینه‌ی گام‌های زمانی ابتدایی و بیشینه است. انتخاب گام‌های زمانی باید با دقت و براساس نیازهای خاص مدل‌سازی انجام شود. در حالی که کاهش گام‌های زمانی می‌تواند دقت را افزایش دهد، اما باید به هزینه‌های محاسباتی و مسائل پایداری عددی نیز توجه کرد. از آنجایی که از ابتدایی‌ترین لحظات تحلیل، گرایان‌های شدید جریان و انرژی در خاک غیراشباع ایجاد می‌شود، انتخاب نامناسب گام زمانی ابتدایی می‌تواند منجر به عدم همگرایی و یا انحراف نتایج شود.

بنابراین، گام زمانی ابتدایی برابر 1×10^{-5} روز یا $0/864$ ثانیه در نظر گرفته شده است. بیشینه‌ی گام زمانی در حین تحلیل، یکی دیگر از عوامل مهم بر راستی‌آزمایی نتایج است. انتخاب نامناسب آن می‌تواند یا منجر به کاهش دقت نتایج با عدم در نظر گرفتن تغییر قابل توجه و یا منجر به هزینه‌ی محاسباتی غیرمعقول شود. بنابراین، در پژوهش حاضر، گام زمانی بیشینه برابر 1×10^{-2} روز یا 864 ثانیه اعمال شده است. علاوه بر این، بیشینه‌ی تعداد تکرار در هر گام زمانی ۲۰ اختصاص داده شده است، که تکرار بیش از آن در هر گام زمانی منجر به اتمام حل با خطای عدم همگرایی می‌شود. در فرمول‌بندی ارائه‌شده، متغیرهای وابسته از متغیرهای حالت، شامل: تغییر مکان‌ها، فشار آب، و دما با استفاده از معادله‌های رفتاری محاسبه می‌شوند. در نهایت، مجهولات مسئله با حل عددی سیستم معادلات دیفرانسیل جزئی محاسبه می‌شوند. گسسته‌سازی فضایی با استفاده از روش اجزاء محدود گالرکین^{۳۴} و گسسته‌سازی زمانی با استفاده از روش تفاضل محدود^{۳۵} انجام می‌شود. گسسته‌سازی زمان خطی است و از یک روش ضمنی استفاده می‌شود. در حل عددی از حلگر تکراری اسپارس به همراه روش گرایان مزدوج^{۳۶} استفاده شده است؛ که از مزیت‌های آن نسبت به روش‌های مستقیم، مانند روش حذف گاوسی، این است که برای مسائل مقیاس‌بزرگ و پیچیده مناسب هستند و راحت‌تر به هم همگرا می‌شوند. بدین ترتیب خطای پسماند را کاهش می‌دهد و به افزایش دقت نتایج کمک می‌کند.

۵. بررسی و تفسیر نتایج

۵.۱. فرونشست و تورم ناهمسان در خاک ترک‌خورده

رژیم غیریکنواخت جریان منجر به تغییرشکل ناهمسان خاک ترک‌خورده می‌شود. این ناهمسانی به هندسه‌ی ترک، فاصله‌ی بین ترک‌ها، و شرایط اقلیمی بستگی دارد. در مسیرهای خشک‌شوندگی، فرونشست ناهمسان و در مسیرهای ترشوندگی، تورم ناهمسان رخ می‌دهد. از بین عوامل تأثیرگذار در شکل ۶-الف، به تأثیر فاصله بین ترک‌ها پرداخته شده است. مقادیر منفی، نشان‌دهنده‌ی فرونشست و مقادیر مثبت به معنی تورم است. نتایج نشان می‌دهند که فرونشست در بین ترک‌های سوم و چهارم با کمترین فاصله بین ترک ($1/3$ متر)، بیشترین مقدار را دارد. با افزایش فاصله بین ترک‌ها، مثلاً بین ترک‌های نهم و دهم، با $8/7$ متر فاصله، مقدار فرونشست کاهش یافته است. به صورت کمی‌تر، بیشترین فرونشست بین ترک‌های سوم و چهارم برابر $57/1$ میلی‌متر، بین ترک‌های نهم و دهم برابر $35/4$ میلی‌متر، و در خاک بدون ترک برابر $12/3$ میلی‌متر بوده است. به عبارت دیگر، حضور ترک‌های مجاور همدیگر می‌تواند منجر به تشدید فرونشست تا $4/6$ برابر شود. حال آنکه با افزایش هندسه‌ی ترک، احتمال افزایش شدت فرونشست بیشتر می‌شود. به طور مشابه، حضور ترک منجر به تشدید تغییرشکل تورمی خاک نیز می‌شود. بیشترین تورم در

³⁶ Iterative sparse + Conjugate Gradient Squared (CGS)

³⁷ Adams

³⁴ Galerkin finite element method

³⁵ Finite difference method

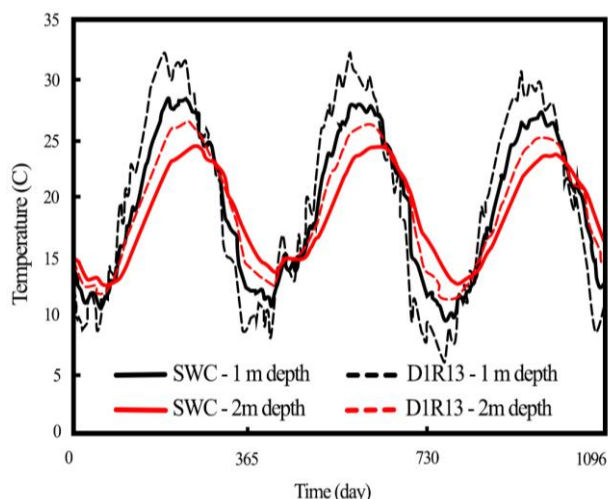


Figure 8. Temporal variations in the temperature of cracked and uncracked soil.

شکل ۸. تغییرات زمانی دمای خاک ترک‌خورده و بدون ترک.

اعماق ۱ و ۲ متری سطح خاک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تغییرات دمایی زمین از مقدار اولیه‌ی خود یعنی ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد آغاز شده و روندهای سه ساله‌ی خود را طی کرده است. نتایج نشان می‌دهند که با حرکت در اعماق زمین از نرخ تغییرات دمای خاک در اثر تغییرات آب و هوایی کاسته شده است. به عبارت دیگر، لایه‌های سطحی خاک بیشتر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارند.

به‌طور مثال، در تغییرات دمای عمق یک متری خاک بدون ترک، بازه‌ی تغییرات از حدود ۹/۵ تا ۲۸/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. در حالی که بازه‌ی مذکور تغییرات دمایی در عمق ۲ متری از سطح خاک بدون ترک به ۱۳/۱ تا ۲۴/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد محدود شده است. حضور ترک به‌طور کلی منجر به افزایش نرخ تغییرات دمایی در اعماق خاک می‌شود. به عبارت دیگر، در مقایسه با روند تغییرات دمایی خاک بدون ترک، خاک ترک‌خورده، بازه‌ی دمایی گسترده‌تری را تجربه می‌کند. به عنوان مثال، بازه‌ی اخیر در عمق یک متری خاک ترک‌خورده از ۶/۵ تا ۳۲/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر است، که نسبت به همان عمق خاک بدون ترک، بیشینه‌ی بازه‌ی ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشتر و کمینه‌ی بازه‌ی ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد کمتری داشته است.

در شکل ۹، توزیع مکانی دما در خاک ترک‌خورده‌ی مدل DIR13 بین ترک‌های سوم و چهارم در روزهای مختلف مشاهده می‌شود. در روز ۴۰ ام (سال اول) به دلیل بارش بارانی به مقدار ۷ میلی‌متر در روز، دمای هوا به ۸/۷ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافته است.

در روز ۶۰۰ ام (سال دوم) و ۱۰۱۲ ام (سال سوم) نیز دمای هوا به ترتیب برابر ۲۱ و ۳۱ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. با مقایسه‌ی روندهای سالانه می‌توان مشاهده کرد که با گذشت سال‌های متمادی، نمودار تغییرات عمقی دما از مقدار اولیه‌ی ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد فاصله گرفته است. این بدان معناست که اعماق زمین نیز در طول زمان تحت مکانیزم هدایت حرارتی در اثر تغییرات آب و هوایی تغییر دما پیدا کرده‌اند. تغییرات اقلیمی منجر به تغییر دمای عمق مشخصی از زمین می‌شود، که عمق تعادل دمایی نام دارد.^[۴۷] مطابق شکل ۹، تغییرات دمایی در عمق ۲۰ متری خاک رخ داده و سپس روندهای دمایی بر هم منطبق شده‌اند، که نشان از تعادل دمایی در اعماق بیشتر است.

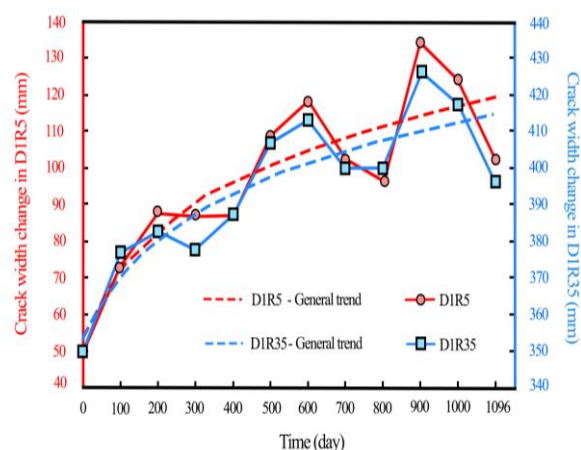


Figure 7. Variation in crack width under the influence of climatic conditions.

شکل ۷. تغییر عرض ترک‌ها تحت تأثیر شرایط اقلیمی.

است و دلیل آن را ایجاد چرخش هوا در داخل ترک‌های باریک عنوان کرده‌اند.

علاوه بر تغییر شکل سطح خاک در اثر تغییرات اقلیمی، ترک‌ها نیز دچار تغییر شکل می‌شوند. تغییر عرض ترک ششم (C_6) در دو مدل DIR5 و DIR35 در شکل ۷ مقایسه شده است. به دلیل اقلیم گرم و خشک شهر قم، روند کلی تغییرات عرض ترک در هر دو مدل صعودی بوده است. در روزهای بارندگی که رطوبت هوا نیز بالا بوده است، به دلیل افزایش رطوبت، حفره‌های خاک متورم‌شونده افزایش حجم داده و متورم شده‌اند. در اثر تورم خاک، عرض ترک نیز کاهش یافته است، که دلیل کاهش آن در اواخر هر سال مصادف با فصل زمستان است.

به دلیل رفتار کشسان خمیری خاک انتظار می‌رود پس از تجربه‌ی چند چرخه‌ی تر و خشک‌شوندگی، خاک به تعادل برسد و نرخ تغییر حجم و تغییر شکل آن کاسته شود. چرخه‌های تر و خشک‌شوندگی به‌طور طبیعی تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی پیوسته اعمال می‌شوند. به‌طور کلی می‌توان یک سال را شامل یک مسیر ترشوندگی از پاییز به زمستان و یک مسیر خشک‌شوندگی از بهار تا تابستان در نظر گرفت. هر چند که هر کدام از فصول ذکر شده به تنهایی شامل چرخه‌های تر و خشک‌شوندگی متعددی هستند. با مقایسه‌ی روند تغییرات عرض هر مدل می‌توان به این نتیجه رسید که از تابع لگاریتمی تبعیت می‌کند. این بدان معناست که با گذشت زمان از نرخ تغییرات کاسته می‌شود، که مطابق با مکانیک خاک‌های متورم‌شونده‌ی غیراشباع است. علاوه بر آن، نتایج نشان می‌دهند که نرخ تغییر عرض در ترک‌های باریک‌تر بیشتر است. به طور مثال، عرض ترک اولیه در مدل DIR5 برابر ۵۰ میلی‌متر است، که طبق شکل ۷ در روز ۹۰۰ ام به مقدار ۱۳۳/۷ میلی‌متر رسیده است. این به معنی افزایش ۲/۶ برابری عرض ترک در طول سه سال است. به‌طور مشابه، عرض اولیه‌ی ترک در مدل DIR35 از ۳۵۰ میلی‌متر به ۴۲۶ میلی‌متر در روز ۹۰۰ ام رسیده است، که نشان‌دهنده‌ی افزایش ۱/۲ برابری است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترک‌های عمیق و باریک پتانسیل تغییر شکل بیشتری نسبت به حالت اولیه‌ی خود را دارد و با افزایش عرض ترک پتانسیل تغییر شکل آن کمتر می‌شود.

۲.۵. توزیع دمایی خاک ترک‌خورده

از نتایج مدل عددی می‌توان به توزیع زمانی و مکانی دما در خاک اشاره کرد. در شکل ۸، مقایسه‌ی توزیع زمانی دما در خاک ترک‌خورده و بدون ترک در

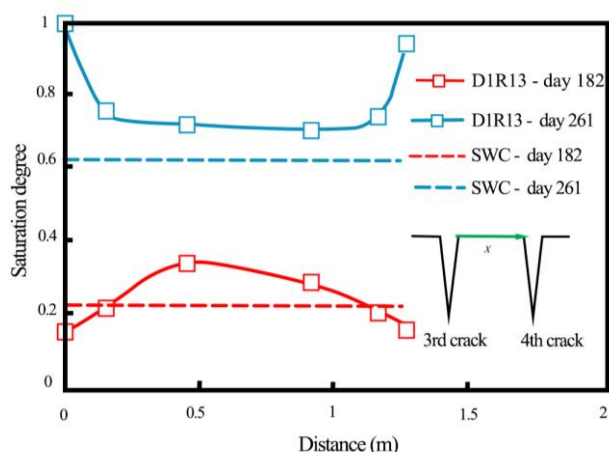


Figure 10. Variations in degree of saturation from the edge of the third crack to the edge of the fourth crack in soil with a crack depth of 1 m and in uncracked soil.

شکل ۱۰. تغییرات درجه‌ی اشباع از لبه‌ی ترک سوم تا لبه‌ی ترک چهارم در خاک با عمق ترک ۱ متر و خاک بدون ترک.

کرده‌اند. البته این روند تابع زمان است و با گذشت زمان آثار حضور ترک قابل توجه‌تر خواهد بود. علاوه بر آن، تغییرات مذکور فقط در سطح خاک بررسی شده است، که تأثیر ترک در اعماق خاک نیز وجود دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل ترکیبی شامل مدل عددی اجزاء محدود ترموهیدرومکانیکی به همراه تحلیل آماری جهت مشخصه‌بندی خصوصیات هندسه‌ی خاک ترک‌خورده به منظور مطالعه‌ی فرونشست ناهمسان در اثر تغییرات اقلیمی معرفی شده است. جنبه‌ی تئوری مدل، شامل: جریان همرفت آب و گاز با تعریف قانون دارسی تعمیم‌یافته، انتشار بخار در فاز گاز با تعریف قانون فیک، و هدایت حرارتی در محیط متخلخل با تعریف قانون فوریه می‌شود. علاوه بر آن، با جمع‌آوری داده‌های موجود در مطالعات گذشته و مشاهده‌های میدانی از دشت قم به عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه، تحلیل آماری جهت تعیین خصوصیات هندسی ترک انجام شده است. نتایج آماری نشان داده است که نسبت ترک به معنی نسبت عرض به عمق ترک از توزیع لاگ‌نرمال تبعیت می‌کند. بر همین اساس، سناریوهای مدل‌سازی تعریف شده‌اند، به صورتی که عمق ترک برابر ۱ متر فرض شده و سه نسبت ترک، شامل: مود، میانگین، و میانگین به علاوه ۲ برابر انحراف معیار داده‌ها انتخاب شده است. شرایط آب و هوایی شهر قم به مدت ۳ سال از ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، شامل: دما، رطوبت هوا، تشعشع خورشید، بارش، و سرعت باد به عنوان شرط مرزی به سطح خاک اعمال شده است.

مدل ارائه‌شده قادر به محاسبه‌ی توزیع دوبعدی مکانی و زمانی دما، رطوبت، و تغییر شکل است. توزیع زمانی دما نشان داد که با حرکت در جهت عمق خاک از نرخ تغییرات دمایی زمین در اثر تغییرات اقلیمی کاسته می‌شود. تفاوت پاسخ خاک ترک‌خورده نسبت به خاک بدون ترک در افزایش بازه‌ی تغییرات زمانی دمای خاک مشاهده شده است. ترک‌ها با ایجاد کانال‌هایی مضاعف برای تبادل انرژی با محیط اطراف، امکان تأثیرپذیری اعماق بیشتری از سطح خاک را فراهم می‌کنند. تغییرات عمقی دما نیز نشان داد که سطح زمین، بیشترین تأثیرپذیری را از تغییرات اقلیمی دارد و عمق تعادل دمایی خاک با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

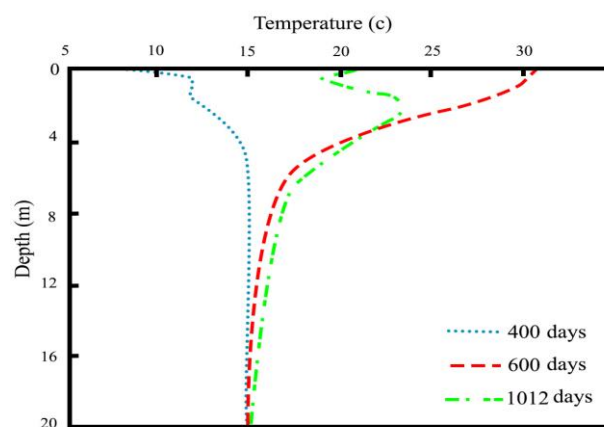


Figure 9. Two-dimensional temperature distribution on different days under climatic variations in model D1R13 between the third and fourth cracks.

شکل ۹. توزیع دوبعدی دما در روزهای مختلف تحت تغییرات آب و هوایی در مدل D1R13 بین ترک‌های سوم و چهارم.

۳.۵. توزیع رطوبتی و رژیم جریان در خاک ترک‌خورده

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، با حضور ترک‌های عمیق در خاک، رژیم جریان تغییر کرده و مسیرهای تر و خشک‌شوندگی علاوه بر سطح خاک، از دیواره‌های ترک نیز انتقال یافته‌اند. برای بررسی این موضوع، تغییرات درجه‌ی اشباع خاک ترک‌خورده در بین ترک‌های سوم و چهارم به همراه نتایج خاک بدون ترک در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، تغییرات درجه‌ی اشباع از لبه‌ی راست ترک سوم آغاز (فاصله‌ی صفر) و تا لبه‌ی چپ ترک چهارم (فاصله‌ی ۱/۳ متری) ادامه پیدا کرده است. دو روز ۱۸۲ م با دمای هوای ۳۹/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد و روز ۲۶۱ م با بارش ۴ میلی‌متر بر روز و دمای ۲۳/۶ درجه‌ی سانتی‌گراد انتخاب شده‌اند، که به ترتیب نماینده‌ی مسیرهای خشک و ترشوندگی هستند.

مطابق شکل ۱۰، تغییرات درجه‌ی اشباع در خاک ترک‌خورده، ناهمسان و در خاک بدون ترک، یکنواخت بوده است. دلیل یکنواختی رژیم جریان در خاک بدون ترک، فرض همگن و همسان‌بودن خاک است، که این فرض در خاک ترک‌خورده نیز برقرار است. اما دلیل غیریکنواختی رژیم جریان در خاک ترک‌خورده، حضور ترک‌های عمیق است، که اندرکنش خاک و اتمسفر را از دیواره‌های ترک نیز برقرار می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین تغییرات درجه‌ی اشباع در لبه‌های ترک رخ داده است. به عبارت دیگر، در مسیر ترشوندگی (روز ۲۶۱ م) لبه‌های ترک‌های سوم و چهارم بیشترین درجه‌ی اشباع را داشته‌اند، در حالی که مابین دو ترک، کمترین درجه‌ی اشباع، حدود ۰/۷ را داشته است. در مسیر خشک‌شوندگی (روز ۱۸۲ م) نیز بیشترین تغییر در لبه‌ی ترک‌ها رخ داده است. بدین صورت که کمترین درجه‌ی اشباع برابر ۰/۱۵ در لبه‌ی ترک مشاهده می‌شود و مابین دو ترک در اثر مسیر خشک‌شوندگی کمتر خشک شده‌اند.

با مقایسه‌ی تغییرات درجه‌ی اشباع در مسیر ترشوندگی برای خاک ترک‌خورده و بدون ترک مشاهده می‌شود که نمودار خاک ترک‌خورده، درجه‌ی اشباع بیشتری را نشان می‌دهد. این بدان معناست که حضور ترک باعث ایجاد مسیرهای ترجیحی برای نفوذ آب به درون خاک شده است، که منجر به افزایش رطوبت بیشتری نسبت به خاک بدون ترک شده است. در مسیر خشک‌شوندگی نیز لبه‌های ترک نسبت به خاک بدون ترک خشک‌شدگی بیشتری را تجربه

خاک ترک‌خورده حدود ۴/۶ برابر، فرونشست بیشتری را نسبت به خاک بدون ترک نشان داده است، که با کاهش فاصله‌ی بین ترک‌ها و باریک‌تر شدن ترک‌های عمیق بر نرخ فرونشست افزوده شده است. برعکس، تورم در ترک‌های عریض مقدار بیشتری نشان داده است، که به دلیل ایجاد فضای بازتری برای نفوذ آب در فصول بارندگی است. نتایج همچنین نشان داد که ترک‌های باریک‌تر نسبت به حالت اولیه‌ی خود تغییر شکل بیشتری پیدا می‌کنند. به طور کمی‌تر، ترک با عرض اولیه‌ی ۵۰ میلی‌متر در طول ۳ سال بیشترین افزایش عرض ۲/۶ برابری و ترک با عرض اولیه‌ی ۳۵۰ میلی‌متر بیشترین افزایش عرض ۱/۲ برابری را تجربه کرده‌اند. بنابراین، پتانسیل تغییر شکل ترک‌های باریک‌تر بیشتر از ترک‌های عریض است.

نتایج همچنین نشان داد که رژیم جریان در خاک ترک‌خورده حتی با فرض رفتار همگن و همسان مصالح، غیریکنواخت است. دلیل این امر تبخیر در مسیرهای خشک‌شوندگی و نفوذ آب در مسیرهای ترشوندگی از دیواره‌های ترک است. لبه‌های ترک‌ها بیشترین تغییرات رطوبتی را نشان داده‌اند؛ به صورتی که در نقطه‌ی میان دو ترک، کمترین تغییرات رطوبتی رخ داده است. دلیل این امر تبادل رطوبتی و حرارتی در لبه‌های ترک به‌طور هم‌زمان از دیواره‌های ترک و سطح خاک است.

علاوه بر آن، نتایج نشان داد که تغییر شکل در خاک‌های ترک‌خورده، ناهمسان است؛ که دلیل آن غیریکنواختی رژیم جریان در اثر تبخیر و نفوذ از کانال‌های تبادل انرژی و رطوبت با محیط اطراف است، که توسط ترک مهیا شده است.

References- منابع

- Sadeghi, H., Jabbarzadeh, M. and Tourchi, S., 2024. Thermo-hydro-mechanical modelling of the heterogeneous subsidence and swelling in the desiccation cracked clayey strata. *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107798>
- Konrad, J.M. and Ayad, R.J.C.G.J., 1997. Desiccation of a sensitive clay: field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), pp.929-942. <https://doi.org/10.1139/t97-063>
- Wei, X., Hattab, M., Bompard, P. and Fleureau, J.M., 2016. Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path. *Géotechnique*, 66(4), pp.287-300. <https://doi.org/10.1680/jgeot.14.P.227>
- Jabbarzadeh, M., Sadeghi, H., Tourchi, S. and Darzi, A.G., 2024. Thermo-hydraulic analysis of desiccation cracked soil strata considering ground temperature and moisture dynamics under the influence of soil-atmosphere interactions. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 38, pp.100558. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100558>
- Nowamooz, H. and Masroui, F., 2008. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Engineering Geology*, 101(3-4), pp.154-164. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.04.011>
- Ghandilou, M.J., Tourchi, S. and Sadeghi, H., 2023. Numerical investigation of cyclic wetting and drying of Boom clay based on the Barcelona Expansive Model". In *84th EAGE Annual Conference & Exhibition*, pp. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202310400>
- Tang, C.S., Cheng, Q., Gong, X., Shi, B. and Inyang, H.I., 2023. Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focusing on wetting/drying process. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1), pp.269-284. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.004>
- Tourchi, S., Jabbarzadeh, M. and Sadeghi, H., 2024. Thermo-hydro-mechanical analysis of soil strata suffered from desiccation cracking. In *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, pp. 1362-1367, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-249>
- Wang, G. and Wei, X., 2015. Modeling swelling–shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting–drying cycles. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), pp.783-794. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0059@cgj-ec.2015.01.issue-4>
- Huang, Q. and Azam, S., 2023. Modeling of Weather-Induced Volumetric Changes in Cracked Expansive Clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(2), pp.861-879. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02310-7>
- Tourchi, S., Jabbarzadeh, M., Lavasan, A., Sadeghi, H. and Racek, O., 2024. Thermo-Hydro-Mechanical Dynamics of a Rock Slope: Integrated Field and Numerical Analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.09.052>
- Morris, P.H., Graham, J. and Williams, D.J., 1992. Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), pp.263-277. <https://doi.org/10.1139/t92-030>
- Philip, L., Shimell, H., Hewitt, P.J. and Ellard, H.T., 2002. A field-based test cell examining clay desiccation in landfill liners. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35(4), pp.345-354. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2001-37>

14. Miller, C.J., Mi, H. and Yesiller, N., 1998. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(3), pp.677-686. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb00964.x>
15. Amarasiri, A.L. and Kodikara, J.K., 2013. Numerical modelling of a field desiccation test. *Géotechnique*, 63(11), pp.983-986. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.010>
16. Guo, L., Chen, G., Ding, L., Zheng, L. and Gao, J., 2023. Numerical simulation of full desiccation process of clayey soils using an extended DDA model with soil suction consideration. *Computers and Geotechnics*, 153, p.105107. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105107>
17. Sánchez, M., Manzoli, O.L. and Guimarães, L.J., 2014. Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique. *Computers and Geotechnics*, 62, pp.27-39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.06.009>
18. Tran, D.K., Ralaizafisoloarivony, N., Charlier, R., Mercatoris, B., Léonard, A., Toye, D. and Degré, A., 2019. Studying the effect of desiccation cracking on the evaporation process of a Luvisol–Fr om a small-scale experimental and numerical approach. *Soil and Tillage Research*, 193, pp.142-152. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.018>
19. Haghighat, N., Sattari, A.S. and Wuttke, F., 2023. Finite discrete element modeling of desiccation fracturing in partially saturated porous medium. *Computers and Geotechnics*, 164, p.105761. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105761>
20. Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. and Alonso, E.E., 1996. Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering computations*, 13(7), pp.87-112. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>
21. Olivella, S., Carrera, J., Gens, A. and Alonso, E.E., 1994. Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in porous media*, 15, pp.271-293. <https://doi.org/10.1007/BF00613282>
22. Volckaert, G., Bernier, F., Alonso, E., Gens, A., 1996. Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories (model development and validation).
23. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), pp.513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
24. Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), pp.892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
25. Alonso, E.E., Vaunat, J. and Gens, A., 1999. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering geology*, 54(1-2), pp.173-183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00079-4)
26. Ghandilou, M.J., Turchi, S., Darzi, A.G. and Sadeghi, H., 2023. Numerical modeling of volumetric behavior of unsaturated expansive soil under wetting and drying cycles. In *5th Iranian Conference on Geotechnical Engineering*. <https://www.researchgate.net/publication/377265206>
27. Gens, A. and Alonso, E.E., 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), pp.1013-1032. <https://doi.org/10.1139/t92-120>
28. Blight, G.E. Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, 47, pp.715-67. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.4.713>
29. Turchi, S., Jabbarzadeh, M., Sadeghi, H. and Lavasan, A.A., 2024. Thermo-hydro-mechanical modelling of rock cliff-atmosphere interaction: the case of the Pozary test site in Czechia. In No. *EGU24-20407*, Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20407>
30. Valipour, M., Jabbarzadeh, M., Sadeghi, H., Roghangar, K., 2024. Volumetric behavior of a soil column subjected to freeze-thaw cycles under coupled thermo-hydro-mechanical conditions. In *GeoMontréal* 2024. <https://www.researchgate.net/publication/384431981>
31. Sellers, P.J., Mintz, Y.C., Sud, Y.E., Dalcher, A., 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the atmospheric sciences*, 43, pp.505-31. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2)
32. Samat, S., 2016. Thermomechanical modelling of ground response under environmental actions. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
33. Mahsuli, M. and Haukaas, T., 2013. Computer program for multimodel reliability and optimization analysis. *Journal of computing in civil engineering*, 27, pp.87-98. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000204](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000204)
34. Adams, J.E. and Hanks, R.J., 1964. Evaporation from soil shrinkage cracks. *Soil Science Society of America Journal*, 28, pp.281-284. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800020043x>
35. Selim, H.M. and Kirkham, D., 1970. Soil temperature and water content changes during drying as influenced by cracks: A laboratory experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 34, pp.565-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400040010x>

36. Ritchie, J.T. and Adams, J.E., 1974. Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks. *Soil Science Society of America Journal*, 38, pp.131-134. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800010040x>
37. Hatano, R., Nakamoto, H., Sakuma, T. and Okajima, H., 1988. Evapotranspiration in cracked clay field soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 34, pp.547-555. <https://doi.org/10.1080/00380768.1988.10416470>
38. Poulsen, T.G., Cai, W. and Garg, A., 2020. Water evaporation from cracked soil under moist conditions as related to crack properties and near-surface wind speed. *European Journal of Soil Science*, 71, pp.627-640. <https://doi.org/10.1111/ejss.12926>
39. Ferreira, S.R.D.M., Araújo, A.G.D.D., Barbosa, F.A.S., Silva, T.C.R. and Bezerra, I.M.D.L., 2020. Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190169>
40. Zeng, H., Tang, C.S., Zhu, C., Vahedifard, F., Cheng, Q. and Shi, B., 2022. Desiccation cracking of soil subjected to different environmental relative humidity conditions. *Engineering Geology*, 297, p.106536. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106536>
41. Poulsen, T.G., 2022. Predicting evaporation from moist, cracked soil, based on near-surface wind speed, crack width and crack distance. *European Journal of Soil Science*, 73, p.e13215. <https://doi.org/10.1111/ejss.13215>
42. Delage, P., Sultan, N. and Cui, Y.J., 2000. On the thermal consolidation of Boom clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, pp.343-354. <https://doi.org/10.1139/t99-105>
43. Bernier, F., Li, X.L., Bastiaens, W., 2007. Twenty-five years' geotechnical observation and testing in the Tertiary Boom Clay format. In *Stiff Sedimentary Clays: Genesis and Engineering Behaviour, Géotechnique*, pp.223-231. <https://doi.org/10.1680/ssc.41080.0020>
44. Sánchez, M., Gens, A., do Nascimento Guimarães, L. and Olivella, S., 2005. A double structure generalized plasticity model for expansive materials. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 29, pp.751-787. <https://doi.org/10.1002/nag.434>
45. Sadeghi, H., Darzi, A.G., Voosoghi, B., Garakani, A.A., Ghorbani, Z., Mojtahedi, S.F.F., 2023. Assessing the vulnerability of Iran to subsidence hazard using a hierarchical FUCOM-GIS framework. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, p.100989. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100989>
46. De Bruyn, D., Labat, S., 2002. The second phase of ATLAS: the continuation of a running THM test in the HADES underground research facility at Mol. *Engineering Geology*, 64, pp.309-316. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00109-0)
47. Badache M, Eslami-Nejad P, Ouzzane M, Aidoun Z, Lamarche L., 2016. A new modeling approach for improved ground temperature profile determination. *Renewable Energy*, 85, pp.436-444. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.020>