



## Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs

Mehrab Balighi, Mohammad Saleh Baradaran , Ali Akhtarpour \* 

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

**ABSTRACT:** The majority of building and infrastructure projects are typically situated on soils that have a greater elevation than the underlying water table. As a consequence, these soils exist in an unsaturated state, resulting in the development of matric suction inside them. The manipulation of soil saturation levels significantly influences its mechanical and hydraulic characteristics. Swelling soils refer to a type of soil that undergoes volumetric expansion as a result of moisture absorption and a subsequent decrease in matric suction. Hence, this matter gives rise to irreversible harm in the realm of infrastructure, transportation networks, and facilities such as oil and gas. This study focuses on the numerical analysis and discussion of the swelling soil surrounding a gas well located within the Khangiran gas refinery. The findings from the numerical simulation demonstrated that, at the critical juncture of the steel pipe within the well structure, the tensile force induced by soil expansion infiltrates the surrounding area. To withstand this force, the design and permissible thickness of the well pipe can be evaluated using two approaches: load coefficients-resistance and allowable resistance. The action is permissible. The findings indicate that the thicknesses obtained are relatively small, thereby suggesting that there is no significant risk associated with soil swelling and the resultant tensile force exerted on the well casing. However, it is important to note that the durability of the good body's steel material over time is crucial in preventing breakage due to soil swelling-induced tension.

### Review History:

Received: Aug. 17, 2023  
Revised: Apr. 13, 2024  
Accepted: Jun. 08, 2024  
Available Online: Jul. 04, 2023

### Keywords:

Swelling Soil  
Unsaturated Soil Mechanics  
Numerical Modelling  
Khangiran Sarakhs Gas Zone  
Gas Well

## 1- Introduction

Expansive soils undergo volume changes based on water content, especially swelling types due to clay minerals like smectite, which absorb water [1]. Their behaviour in unsaturated states is critical due to potential structural damage. Al-Yaqoub et al. [2] examined loading rates, types, and overburden's effect on soil deformation, noting decreased swelling pressure with more cycles and higher initial moisture. Zhang and Feng [3] found matric suction increases from 100 to 200 kPa raised deviatoric stress in unsaturated clay at higher pressures. Trinh [4] used GeoStudio to model rainfall-induced swelling, affirming reliable predictions with coupled and uncoupled methods. Rajeev and Kodikara [5] used FLAC 3D for soil-pipe interactions in swelling soils, matching experiments. Al-Juari et al. [6] compared swelling pressures in retaining walls, revealing reduced effects with depth. Nadi Yezdi et al. [7] used apparatus to study cement's role in lowering swelling pressure. This research models the volume change behaviour of a specific expansive soil under varying matric suctions and confining pressures using GeoStudio. Objectives include assessing the effects of suction and pressure on soil around Khangiran gas wells, the

impact of annual rainfall, tensile forces on well casings, and the likelihood of casing failure over time.

## 2- Materials and Methods

### 2- 1- Soil Properties

The soil used in this study was collected from the Khangiran operational area of Iran's largest oil industry (Figure 1).

Based on initial tests on the collected soil samples, the soil was classified as CL according to the Unified Soil Classification System (USCS). Additional tests and standards provided further soil specifications, summarized in Table 1. Given the Atterberg limits obtained, the soil's relative swelling potential is moderate based on various criteria. The soil's grain size distribution is shown in Figure 2.

The soil-water characteristic curve (SWCC) was determined using unsaturated consolidation, following Nadi Yazdi et al. [7] (Figure 3). The air entry value (AEV) is 49 kPa, with Aubertin et al.'s modified Kovacs method predicting an AEV of 53 kPa, close to the lab result. Figure 3 shows good agreement with curves from three-bar and five-bar pressure plate tests.

\*Corresponding author's email: akhtarpour@um.ac.ir





Fig. 1. Geographical location of the soil of the studied area [7]

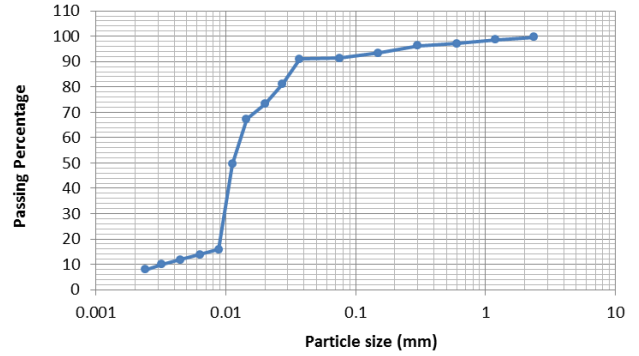


Fig. 2. Particle size distribution of the studied [7]

Table 1. Characteristics of the soil [7]

Test	Specification	Result
Soil Gradation	ASTM D422-63	Passing percentage of sieve #200 = 91.43%
Density of solid grains	ASTM D854	2.7
In situ Soil moisture	ASTM D2216-19	19%
Atterberg limits	ASTM D4318	PL=23 % , LL=42%
Apparent specific gravity	ASTM D1556/1556M	1.837
Gypsum (%)	ASTM C25-19	3.212

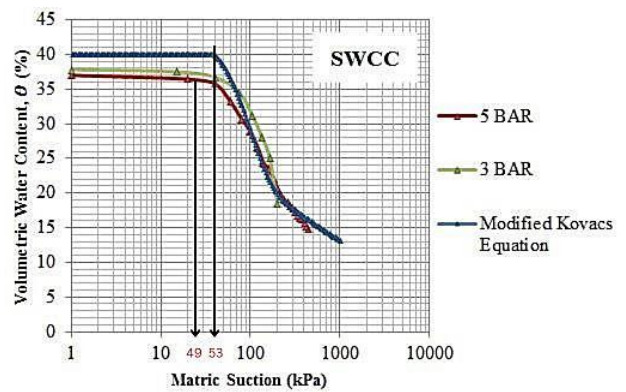


Fig. 3. Soil-water characteristic curve (SWCC) of the studied soil [7]

### 2- 2- Numerical Modeling

Gas well modelling in this region considers a groundwater level 13 meters below ground, influenced by soil suction post-rainfall (100 kPa, down from 130 kPa pre-rain). Modelling excludes saturated depths unaffected by rain-induced swelling. The process involves two stages: analyzing soil stress without the well and simulating well drilling and steel casing placement (Figure 4a). The outer casing is 26 inches in diameter, with the gas well at 7 inches. The steel casing, 1.61 cm thick, is stainless steel with a tensile strength of 655 MPa, exceeding ST37 steel's yield strength of 362 MPa. Rainfall moistens the upper soil, lowering suction. Soil is divided into upper (100 kPa suction) and lower (50 kPa suction) sections for precise calculations. The model spans 5 years, 258 days (50,000 hours), stabilizing water conditions and observing swelling effects. Figure 4b illustrates the final model incorporating climate conditions. Boundaries prevent movement, showing soil swelling-induced height changes without steel casing shear forces.

## 3- Results and Discussion

### 3- 1- Soil Effective Elasticity Modulus

The elastic modulus due to pre-rainfall swelling and during gas well construction is calculated using triaxial

unsaturated test results. With initial moisture content ( $w$ ) at 19%, volumetric moisture content ( $q$ ) is estimated at 29%, corresponding to a soil suction of 100 kPa. Triaxial tests at 100 kPa suction determine the soil's elastic modulus 7 m above ground, while at 6 meters depth, the average suction is 50 kPa. The Hyperbolic model is applied for modulus calculation, revealing that higher soil suction increases modulus, indicating greater stiffness and reduced displacement. The relationship between soil elastic modulus and post-rainfall effective stress is illustrated in Figure 5.

### 3- 2- Pore Water Pressure in Soil

After constructing and analyzing the model per the Materials and Methods, a specific point 2 meters deep at the model's centre is selected to study pore water pressure and displacements in the soil. Using precipitation data from September 2018 to September 2019. From day 1 to 240 days post-rainfall start, both pressure and suction decrease, reflecting peak soil moisture. Subsequent heat and reduced rainfall until September increase soil dryness, stabilizing pore pressure around 1600 days, indicating stable water flow. Figure 6 confirms water flow effects from a year of rainfall dissipate after about 1600 days, with analysis extended to 2083 days.

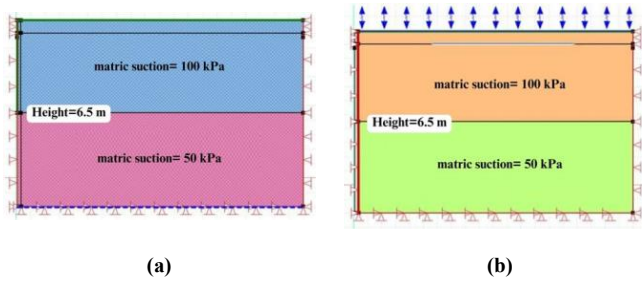


Fig. 4. A view of the built model and soil division, (a) before and (b) after flow analysis

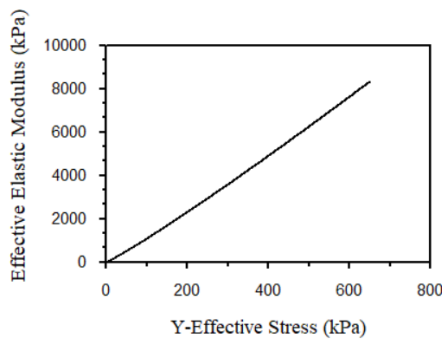


Fig. 5. Diagram of the effective modulus of elasticity versus the effective vertical stress after flow analysis

### 3- 3- Soil Displacements

Significant swelling occurred in the modelled soil after 2083 days of modelling. Approximately 5.8 cm of swelling was observed over 13 meters, constituting 0.70% of the total model. Figure 7(a) shows that vertical displacements stabilize beyond approximately 15 meters horizontally from the casing. Figure 7(b) illustrates a vertical displacement over time at a depth of two meters in the model's centre. Swelling continues due to water infiltration for up to 1600 days, followed by stabilization, indicating no further swelling.

### 3- 4- Forces in the Well Steel Body

Figure 8 illustrates axial force distribution in the steel casing after one, two, and three years. Changes in axial force reveal varying soil behaviour influenced by suction and shear resistance. Increased soil suction increases stiffness and reduces displacement, lowering axial forces in the top six meters of the casing due to swelling. This reduction contributes to fractures observed in axial force diagrams over time along the casing. After 1600 days, soil water flow stabilizes, halting further swelling and fixing axial forces. The maximum axial force, 163 kN, occurs at the critical point. The current 1.61 cm steel thickness proves adequate against soil-induced tensile stresses, barring extensive corrosion, aligning with prior studies [8-9].

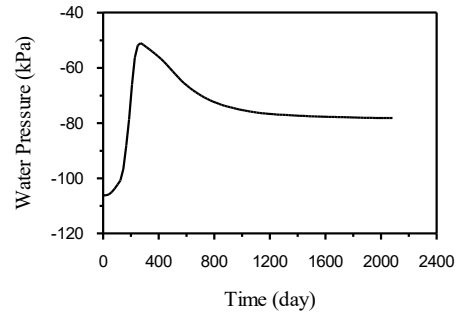
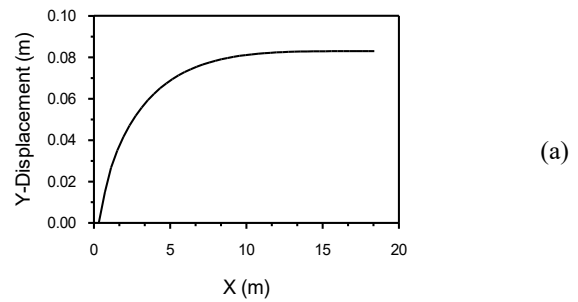
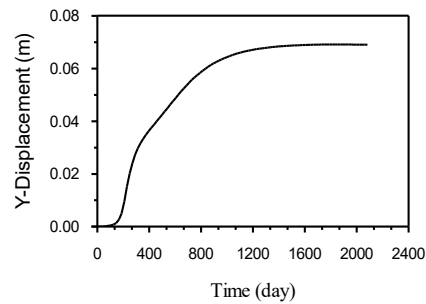


Fig. 6. Diagram of pore pressure changes over time at the desired point



(a)



(b)

Fig. 7. (a) vertical displacement diagram along the horizon, (b) vertical displacement diagram over time

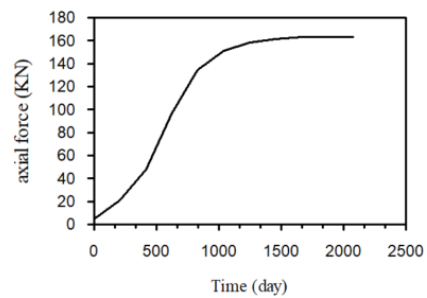


Fig. 8. Diagram of axial force overtime for the critical point in the steel body of the well

#### 4- Conclusions

This study focused on numerical modelling of the soil around a gas well in Khangiran, Sarakhs. The modelling considered the region's climate from late 2018 to mid-2019, determining soil swelling and tensile forces on the steel casing of the well, and identifying the minimum required thickness to withstand these forces. Key findings are summarized below:

- Before rainfall, soil matric suction was 130 kPa. It takes about 3.4 years for rainfall to fully impact soil swelling to a depth of 13 m, with annual swelling of 8.49 cm.
- Swelling is minimal near the well but increases with distance, peaking further away.
- The gas well structure enhances soil stiffness within a 15-meter radius.
- Maximum tensile force of 163 kN occurs at the steel casing's lowest point, 13 m deep, due to swelling-induced forces.

#### References

- [1] Cui, Y. J., Ferrari, A., Gallipoli, D., Jommi, C., Laloui, L., Pirone, M., ... & Wheeler, S. Unsaturated soil mechanics. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2004.
- [2] Al-Yaqoub, Thamer H., Jafarali Parol, and Dobroslav Znidarcic. "Experimental investigation of volume change behaviour of swelling soil." *Applied Clay Science* 137 (2017): 22-29.
- [3] Feng, Jun, and Guangze Zhang. "Study on soil water and suction stress characteristics for unsaturated clay soil of airport engineering based on laboratory tests." *Geofluids* 2021, no. 1 (2021): 5233045.
- [4] Trinh, Minh Thu. "Coupled and uncoupled approaches for the estimation of 1-d heave in expansive soils due to transient rainfall infiltration: a case study in central Vietnam." *GEOMATE Journal* 17, no. 64 (2019): 152-157.
- [5] Rajeev, Pathmanathan, and Jayantha Kodikara. "Numerical analysis of an experimental pipe buried in swelling soil." *Computers and Geotechnics* 38, no. 7 (2011): 897-904.
- [6] Al-Juari, Khawla AK, Mohammed Y. Fattah, Suhail IA Khattab, and Mohammed K. Al-Shamam. "Simulation of behaviour of swelling soil supported by a retaining wall." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 175, no. 4 (2022): 293-302.
- [7] Yazdi, Amir Nadi, Ali Akhtarpour, Mustafa M. Abdalhusein, and Mohammad Saleh Baradaran. "Experimental Investigation of the Volume Change of a Swelling Clay and Its Improvement." *Transportation Infrastructure Geotechnology* (2023): 1-24.
- [8] Nie, Zhen, Shuzhe Shi, Bohong Wu, and Xueqin Huang. "Axial Force Calculation Model for Completion String with Multiple Point Resistances in Horizontal Well." *Processes* 11, no. 9 (2023): 2621.
- [9] Fyrileiv, Olav, and Leif Collberg. "Influence of pressure in pipeline design: effective axial force." In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 41979, pp. 629-636. 2005.



## بررسی عددی رفتار خاک متورم‌شونده و تاثیر آن بر نیروهای داخلی غلاف چاه‌های گاز بر پایه‌ی مکانیک خاک غیراشباع، مطالعه موردی: خانگیران سرخس

محراب بلیغی، محمدصالح برادران<sup>1b</sup>، علی اخترپور<sup>2b</sup>

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۶  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

### کلمات کلیدی:

خاک متورم‌شونده  
مکانیک خاک غیراشباع  
مدلسازی عددی  
خانگیران سرخس  
غلاف چاه

**خلاصه:** اکثر طرح‌ها و پروژه‌های عمرانی بر روی خاک‌هایی بنا می‌شود که بالاتر از سطح آب زیرزمینی است و این امر موجب می‌شود که، خاک در فاز غیراشباع قرار گرفته و در آن مکش بافتی ایجاد شود. افزایش و یا کاهش درجه اشباع خاک، بر روی خواص مکانیکی و هیدرولیکی آن تاثیر بسیار زیادی می‌گذارد. خاک‌های متورم‌شونده خاک‌هایی هستند که با جذب رطوبت و کاهش مکش بافتی، افزایش حجم از خود نشان می‌دهند. بنابراین، این موضوع خسارت‌های جبران ناپذیری را در صنعت ساخت و ساز، راهسازی و صنایعی از قبیل نفت و گاز به وجود می‌آورد. در این تحقیق خاک متورم‌شونده‌ی اطراف یکی از چاه‌های گاز خانگیران سرخس مورد بحث و تحلیل عددی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد در نقطه‌ی بحرانی لوله‌ی فولادی بدنه‌ی چاه، نیروی کششی ناشی از تورم خاک به اطراف آن وارد می‌شود که ضخامت طراحی و مجاز لوله‌ی چاه برای تحمل این نیرو با استفاده از دو روش ضرایب بار، مقاومت و مقاومت مجاز به دست می‌آید. نتایج نشان داد ضخامت‌های به دست آمده اعداد کوچکی هستند، در نتیجه خطری جدی ناشی از تورم خاک و ایجاد نیروی کششی بر بدنه‌ی چاه مطرح نیست و اگر فولاد بدنه‌ی چاه در طول زمان دچار خوردگی‌های بسیار گسترده نشود، در اثر کشش ناشی از تورم خاک گسیخته نخواهد شد.

### ۱- مقدمه

اساساً خاک متورم‌شونده خاکی است که حجم آن با تغییرات درصد آب موجود در آن تغییر می‌کند و عمدتاً تمرکز بر روی خاک‌هایی است که تورم قابل توجهی از خود نشان می‌دهند [۱]. برخی از خاک‌های موجود در طبیعت تورم در آن‌ها از طریق تغییرات ناشی از واکنش‌های شیمیایی (مانند تورم خاک‌های سولفات‌های آهکی) رخ می‌دهد [۳ و ۲]. با این حال بسیاری از خاک‌هایی که رفتار تورمی و انقباضی از خود نشان می‌دهند حاوی مواد معدنی رسی مانند استکمیت هستند. این مواد آب را جذب می‌کنند و هرچه بیشتر از این ماده‌ی معدنی درون خاک وجود داشته باشد پتانسیل تورم آن افزایش می‌یابد. از آنجا که خاک‌های غیراشباع پتانسیل جذب آب در طول زمان را دارند، بررسی خاک‌های متورم‌شونده و رفتار تورمی آن‌ها در خاک‌های غیراشباع از اهمیت فراوانی برخوردار است [۴]. تغییر حجم ناشی از این نوع خاک‌ها موجب وقوع بلایای گوناگون و آسیب‌زدن به سازه‌ها و زیرساخت‌های روی آن می‌شود [۷-۵]. این امر حتی باعث شده است که برخی از محققین از آن‌ها به عنوان "خاک‌های مصیبت بار" یاد کنند [۸].

ال‌یعقوب<sup>۱</sup> و همکاران [۹] طی پژوهشی، با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نرخ تراندازی، نوع تراندازی، اثر سربار و فشار همه‌جانبه بر تغییر شکل خاک تورمی پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان می‌دهد که با افزایش سیکل‌های بارگذاری - باربرداری فشار تعادلی تورم کاهش می‌یابد، همچنین درصد رطوبت اولیه رابطه‌ی عکس با فشار تورم تعادلی دارد و با کاهش درصد رطوبت اولیه فشار تورم تعادلی افزایش می‌یابد. ژانگ و فنگ<sup>۲</sup> [۱۰] تحقیقی بر روی چهار نمونه خاک رسی متورم‌شونده‌ی غیراشباع در کشور چین پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش مکش بافتی از ۱۰۰ به ۲۰۰ kPa، به طرز قابل توجهی تنش انحرافی در نتیجه مقاومت نمونه‌ها بالا می‌رود و این اختلاف برای تنش‌های همه‌جانبه خالص بالا اتفاق می‌افتد و برای تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ kPa اختلاف چندانی مشاهده نمی‌شود. همچنین اعلام داشتند که با افزایش تنش همه‌جانبه یعنی افزایش عمق خاک تنش انحرافی در مقابل کرنش انحرافی در نتیجه مقاومت خاک افزایش می‌یابد.

1 Al-Yaqoub  
2 Feng and Zhang

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: akhtarpour@um.ac.ir



یکی از مسائل و مشکلاتی که در دهه‌ی اخیر برای مهندسی حوزه‌ی ژئوتکنیک خانگیان سرخس حائز اهمیت بوده است، نشست حلقه‌های چاه در ابعاد گسترده بوده که با توجه به اهمیت اقتصادی منطقه‌ی گازی خانگیان و تامین انرژی آن در کشور نیاز است که علت این نشست‌ها بررسی شده و از روند پیش‌روی آن در آینده جلوگیری شود. مطلب حائز اهمیت در این تحقیق که تاکنون در پژوهش‌های پیشین، علیرغم بررسی جنبه‌های مختلف ژئوتکنیکی این چاه‌ها، بصورت مستقیم به آن پرداخته نشده است، بررسی مقاومت جدار فلزی لوله‌ی گاز در مقابل تنش کششی ناشی از تورم خاک در اثر بارش‌های مخرب در منطقه خانگیان سرخس می‌باشد، چراکه ممکن است این تورم موجب شکستگی و تخریب بخشی از جدار چاه گاز و حتی مسدود شدن آن شود.

در پژوهش حاضر، رفتار تغییر حجم یک نوع خاک متورم‌شونده در مکش‌های بافتی متفاوت و همچنین فشارهای همه جانبه ای که شبیه به آن ممکن است در طبیعت وجود داشته باشد، در نرم‌افزار GeoStudio مدل شده و نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در تحقیق حاضر جهت دستیابی به اهداف زیر به بررسی خاک منطقه‌ی خانگیان سرخس به وسیله‌ی دستگاه سه محوری غیراشباع پرداخته شده است: (۱) بررسی تاثیر مکش بافتی و فشار همه جانبه بر میزان تغییر حجم و مقاومت برشی خاک متورم‌شونده اطراف چاه گاز خانگیان سرخس، (۲) بررسی تاثیر بارش‌های یک ساله بر میزان تورم خاک متورم‌شونده‌ی موجود در منطقه‌ی خانگیان سرخس، (۳) بررسی نیروهای کششی ایجاد شده در بدنه‌ی چاه گاز به دلیل تورم خاک متورم‌شونده‌ی اطراف آن در اثر بارش‌های یک ساله و حداقل ضخامت لازم برای تحمل این نیروی کششی و (۴) بررسی احتمال شکست در غلاف فولادی بدنه‌ی چاه گاز مورد نظر در حال حاضر یا در طول زمان.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خصوصیات خاک مورد بررسی

خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه عملیاتی خانگیان، ۱۸۰ km شمال شرق مشهد و ۲۵ km شمال غربی شهر مرزی سرخس، در گستره‌ای به وسعت ۵۰ در ۷۰ km<sup>2</sup> (شکل ۱) برداشت شده است [۱۵-۱۷]. خانگیان یکی از وسیع‌ترین مناطق عملیاتی صنعت نفت ایران است به‌طوری‌که فاصله دو چاه در این منطقه به حدود ۶۰ km می‌رسد [۱۸].

ترین<sup>۱</sup> [۱۱] مدل‌سازی بر روی تورم یک بعدی یک نوع خاک متورم‌شونده ناشی از نفوذ بارندگی به صورت دوتایی (ترکیب SEEP/W و SIGMA/W) و غیر دوتایی با نرم‌افزار GeoStudio انجام داد. روش تحلیل جفت در SIGMA/W انجام شد و فشار آب منفذی و جابه‌جایی‌ها به طور هم‌زمان اندازه‌گیری شد. اما در روش غیر جفت، تغییر فشار آب منفذی ناشی از بارندگی با استفاده از SEEP/W به تنهایی شبیه‌سازی شد و تغییر فشار آب منفذی حاصل در SIGMA/W برای تحلیل تغییر حجم استفاده شد. نتایج نشان داد که هر دو روش گفته شده ابزارهای قابل اطمینانی هستند و می‌توانند در عمل مهندسی برای تخمین تورم خاک ناشی از نفوذ بارندگی در گذر زمان مورد استفاده قرار گیرند.

راجیو و کودیکارا<sup>۲</sup> [۱۲] به بررسی برهم‌کنش بین لوله و خاک برای لوله‌های مدفون در خاک‌های متورم‌شونده در زمانی که خاک بدلیل افزایش رطوبت، اقدام به جابجایی و حرکت می‌کند، پرداختند. آن‌ها برای مدلسازی عددی خود از نرم‌افزار FLAC 3D بهره بردند و نتایج حاصل، توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی قبلی را از خود نشان دادند.

الجواری<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] در پژوهشی، به بررسی فشار تورم جانبی و فشار عمودی خاک متورم‌شونده، در حضور دیوار حائل در شرایط اشباع و غیراشباع پرداختند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نرم‌افزار GeoStudio و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که، تورم عمودی و درصد کاهش تورم با عمق خاک کاهش یافته است. همچنین سرعت تورم با افزایش عمق خاک کاهش یافته و زمان لازم برای رسیدن به حالت تعادل تورم به صورت خطی با عمق خاک کاهش می‌یابد.

نادی یزدی و همکاران [۱۴] به منظور بررسی تغییرات حجم خاک‌های متورم شونده، از دستگاه تحکیم غیراشباع با قابلیت کنترل مکش استفاده نمودند آن‌ها ابتدا به بررسی فشار تورم خاک در مکش‌های مختلف پرداختند و سپس جهت کنترل فشار تورم از سیمان به عنوان افزودنی استفاده نمودند. در حالت با وجود افزودنی سیمان، آزمایش‌ها میزان تورم و تغییر حجم نمونه بر اساس تغییرات مکش بافتی تحت سربار ثابت انجام گردید و مشاهده شد که میزان تغییر حجم در حالت تورم آزاد که خاک بیشترین تورم را دارد، ۶/۸۲٪ است. همچنین فشار تورم خاک در حالت تراندازی ۹۹/۸ kPa اندازه‌گیری شد که اگر از سیمان به میزان ۲/۵ الی ۱۰٪ جهت بهسازی استفاده شود، فشار تورم به ترتیب به میزان ۵۰ الی ۹۵٪ کاهش می‌یابد.

1 Trinh  
2 Rajeev and Kodikara  
3 Al-Juari



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی خاک منطقه مورد بررسی [۱۴]

Fig. 1 . Geographical location of the soil of the studied area [14]

جدول ۱. مشخصات اولیه خاک [۱۴]

Table 1. Characteristics of the soil [14]

نتایج	نام استاندارد	نام آزمایش
درصد عبوری از الک ۲۰۰ برابر ۹۱/۴۳٪	ASTM D422-63	دانه بندی
ترسیم منحنی دانه‌بندی	ASTM D421	هیدرومتری
۲/۷	ASTM D854	چگالی دانه‌های جامد
۱۹٪	ASTM D2216-19	رطوبت خاک در محل
PL=23 % , LL=42%	ASTM D4318	حدود اتربرگ
۱/۸۳۷	ASTM D1556/1556M	وزن مخصوص ظاهری
۳/۲۱۲	ASTM C25-19	درصد گچ

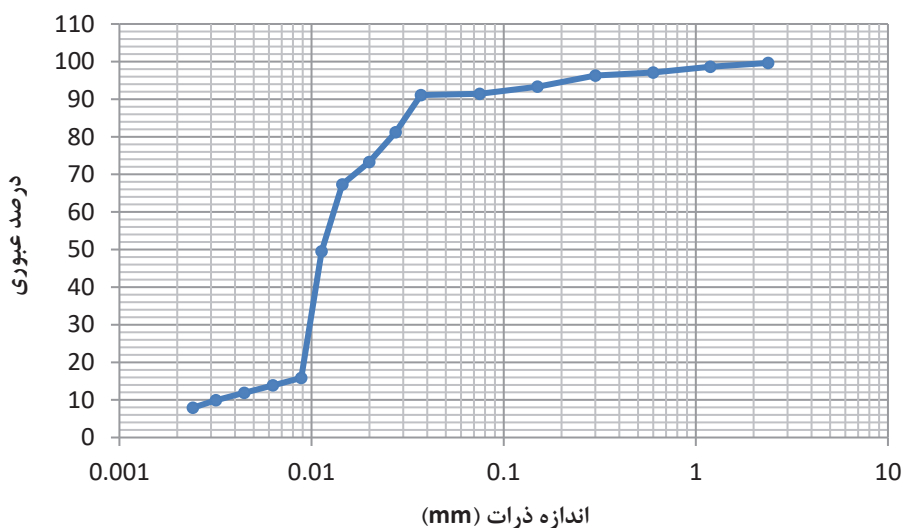
است. باتوجه به حدود اتربرگ بدست آمده برای خاک موردنظر، پتانسیل نسبی غیرمستقیم تورم خاک براساس معیارهای مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین نمودار دانه‌بندی خاک موردنظر نیز در شکل ۲ ارائه گردیده است.

باتوجه به آزمایش‌های انجام گرفته اولیه بر روی نمونه‌های خاک برداشت شده، خاک مدنظر براساس استاندارد سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS) در رده خاک‌های CL قرار گرفته و براساس دیگر آزمایشات و استانداردها، مشخصات موردنیاز خاک در جدول (۱) آورده شده

جدول ۲. پتانسیل نسبی تورم غیرمستقیم خاک

Table 2. Relative potential of indirect soil swelling

پتانسیل نسبی تورم غیرمستقیم	معیار
PL=23 % , LL=42%	
متوسط	معیار داکشانمورتی و رامان [۱۹]
کم	معیار USBR [۲۰]
زیاد	معیار مک کین [۲۱]
۸/۵ - ۵ %	معیار سیید و همکاران [۲۲]



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک [۱۴]

Fig. 2. Particle size distribution of the studied [14]

منحنی مشخصه‌ی آب - خاک برای خاک مورد نظر در این پژوهش با استفاده از تحکیم غیراشباع، مطابق با پژوهش نادى یزدى و همکاران [۱۴] تعیین شده است (شکل ۴). همانطور که از شکل ۴ میتوان دریافت، نقطه‌ی ورود هوا، ۴۹ kPa است. لازم به ذکر است که در سال آبرترین و همکاران روشی را به منظور پیش‌بینی منحنی نگهداشت آب - خاک با استفاده از توابع اصلاح شده کوواکس<sup>۴</sup> ارائه کردند [۲۳]. از ویژگی‌های این روش این است که می‌تواند منحنی نگهداشت آب - خاک را با استفاده از خواص اولیه خاک که به سهولت در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است، پیش‌بینی کند. نقطه‌ی ورود هوا طبق شکل ۴ براساس توابع اصلاح شده‌ی کوواکس عدد ۵۳ به

همچنین با استفاده از دستگاه آنالیز پراش ایکس<sup>۱</sup> (XRD) برای شناسایی فازهای کریستالی معدنی و فراوانی کانی‌های موجود در خاک اقدام گردید و طیف فراوانی کانی‌های موجود در نمونه خاک در جدول (۳) و شکل ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است حدود ۹/۸٪ مجموع دیگر کانی‌های ناشناخته در این طیف وجود دارد که در گزارش آزمایشگاه ارائه نگردیده است. وجود کانی مونت‌موریلونیت<sup>۲</sup> و کانی اترینگایت<sup>۳</sup> که از وجود گچ به وجود می‌آید در این خاک دیده شده و علت تورم را می‌توان در این دو کانی پیدا نمود.

- 1 X-Ray diffraction
- 2 Montmorillonite
- 3 Antigorite

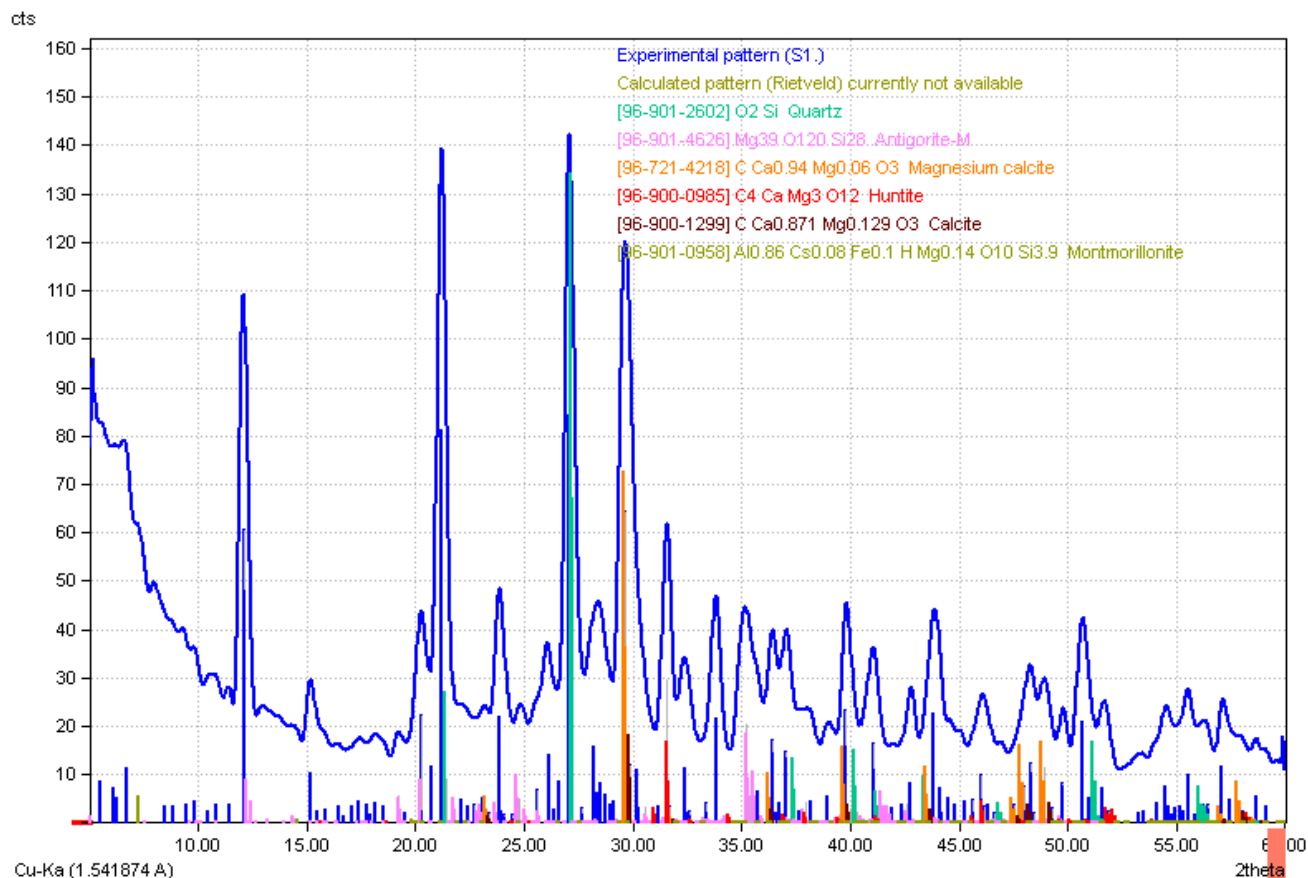
4 Kovacs



جدول ۳. ترکیبات کانی تعیین شده با XRD [۱۴]

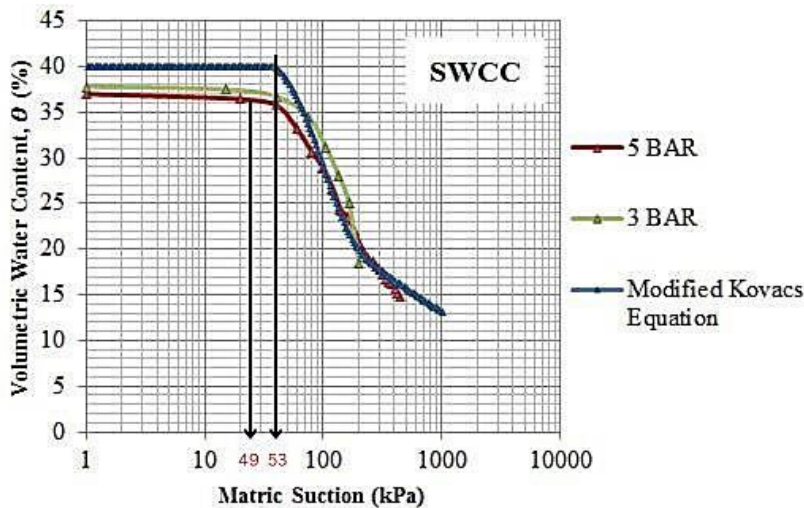
Table 3. Mineral compositions determined by XRD [14]

درصد تشکیل دهنده	نام	نماد شیمیایی	ترتیب
۳۷/۲	Quartz	SiO <sub>2</sub>	۱
۲۱/۸	Antigorite-M	Mg <sub>6</sub> [(OH) <sub>8</sub> - Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ]	۲
۱۸/۹	Magnesium calcite	(Ca <sub>0.998</sub> ,Mg <sub>0.002</sub> )CO <sub>3</sub>	۳
۶/۸	Huntite	Mg <sub>3</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	۴
۵	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	۵
۰/۶	Montmorillonite	(Na,Ca) <sub>0.33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	۶



شکل ۳. الگوی گرافیکی پراش اشعه ایکس (XRD) [۱۴]

Fig. 3. Graphic pattern of X-ray diffraction (XRD) [14]



شکل ۴. منحنی نگهداشت آب - خاک (SWCC) خاک مورد بررسی [۱۴]

Fig. 4. Soil-water characteristic curve (SWCC) of the studied soil [14]

درصد رطوبت اشباع است. در این پژوهش، مطابق نادى یزدى و همکاران [۱۴] مقدار درصد رطوبت ماندگار  $6/78\%$  و مقدار رطوبت اشباع  $38/41\%$  می باشد. در ادامه به کمک رابطه ۲ مقدار تنش مؤثر برای هر مکش بافتی و سربار مشخص محاسبه می شود [۲۴]. در این رابطه، بخش اول نشان دهنده سربار موجود و بخش دوم ضرب پارامتر تنش مؤثر در مکش بافتی می باشد.

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_x) \quad (2)$$

در ادامه میزان مدول متورم شوندگی با توجه به رابطه‌ی ۳ محاسبه می گردد.

$$m_v = \frac{3(1-2\nu)}{E} = \frac{\left(\frac{\Delta H}{H_0}\right)}{\Delta \sigma'} \quad (3)$$

مدول متورم شوندگی محاسبه شده بین دو تنش مؤثر به تنش مؤثر میانگین اختصاص داده شد. در ادامه با حذف نتایجی که موجب افزایش خطا می گردد، نمودار مدول متورم شوندگی در برابر تنش مؤثر مطابق شکل ۵ به دست آمده است.

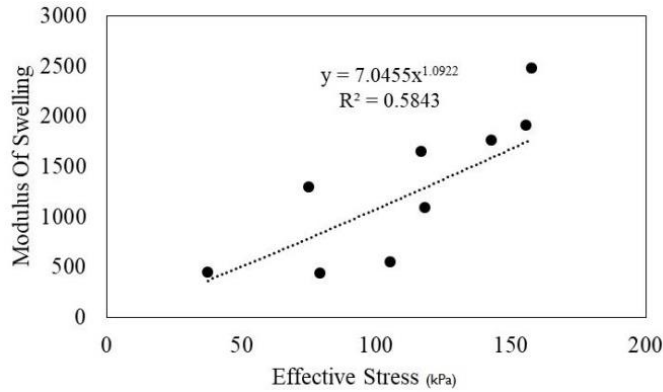
دست می آید که فاصله‌ی کمی با نتایج آزمایشگاهی (عدد ۴۹) دارد. همچنین در شکل ۴ میزان تطابق این نمودار با نمودارهای حاصل از آزمایش با دیسک سه بار و پنج بار قابل مشاهده است.

## ۲-۲- مدول متورم شوندگی

در نرم افزار GeoStudio با تغییر در مکش بافتی تنش مؤثر تغییر کرده و با تغییر در تنش مؤثر بر اساس مدول متورم شوندگی کرنش حجمی در خاک تغییر می کند. لذا برای انجام محاسبات در این مرحله مدول‌های مرحله قبل قابل استفاده نبوده و برای شبیه سازی تورم بایستی مدول متورم شوندگی که در آن تغییر در تنش مؤثر به تغییر در کرنش‌های حجمی ارتباط داده می شود؛ استفاده گردد. در پژوهش حاضر به منظور شبیه سازی رفتار تورمی خاک، رابطه‌ای بین مدول متورم شوندگی خاک و تنش مؤثر ارائه شده است. با توجه به رابطه ونجن اشتن [۲۴] (رابطه‌ی ۱) می توان پارامتر تنش مؤثر  $\chi$  را به دست آورد.

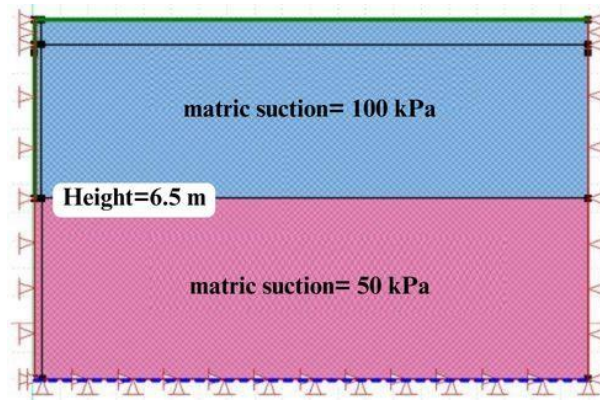
$$\chi = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\theta$  درصد رطوبت حجمی،  $\theta_r$  درصد رطوبت ماندگار و



شکل ۵. نمودار مدول متورم شونده - تنش مؤثر

Fig. 5. Swelling modulus - effective stress diagram



شکل ۶. تقسیم‌بندی خاک قبل از تحلیل جریان

Fig. 6. Soil division before flow analysis

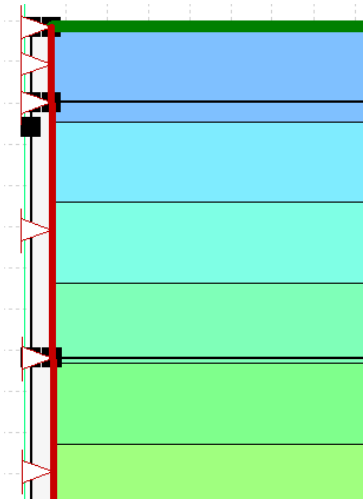
سال پربارندگی برداشت شده دارای مکش ۱۰۰ kPa بوده است لذا قبل از مدل‌سازی باید آب زیر زمینی در مرزی فرض شود که قادر به ایجاد مکشی در خاک شود که پس از بارندگی به مکش ۱۰۰ kPa برسد. به علت موجود نبودن داده‌های قبل بارش با آزمون و خطا مکش بافتی خاک سطح زمین قبل از بارندگی ۱۳۰ kPa تخمین زده شده که معادل وجود مرز آب زیرزمینی در عمق ۱۳ m سطح زمین است. پایین‌تر از ۱۳ m از آن، جایی که خاک اشباع بوده است و تغییرات تورمی در طی بارش‌ها تاثیری بر آن ندارد، مدل نشده و در واقع خاک غیر اشباع بالای سطح آب زیرزمینی مورد تحلیل قرار می‌گیرد (شکل ۶).

بدیهی است این مدول به‌طور کلی با مفهوم مدول الاستیک خاک در بارگذاری متفاوت است و اندازه آن کاملاً به میزان خاصیت متورم شونده خاک بستگی دارد. معادله ۴ جهت تحلیل تغییر شکل ناشی از تغییر مکش به نرم‌افزار معرفی شده است.

$$E = 7.0455 \times \sigma^{1.0922} \quad (4)$$

### ۳- مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی چاه گاز در این منطقه عمق سطح آب زیرزمینی در ۱۳ متر زیر زمین فرض شده است زیرا خاکی که از محل بعد از وقوع



شکل ۷. نمایی از غلاف چاه

Fig. 7. A view of the well casing

قرار دارد. ضلع پایینی مدل از دو جهت افقی و عمودی و ضلع سمت راست و چپ در جهت افقی گیردار شده‌اند و اجازه‌ی انجام حرکت در این راستاها را ندارند. اضلاع سمت راست و چپ مدل اجازه حرکت قائم را دارند تا بتوانند تغییر ارتفاع ناشی از تورم خاک را نشان دهند. از آنجایی که سمت چپ مدل یعنی دیواره‌ی دارای غلاف فولادی تغییر مکان افقی ندارد پس نیروی برشی در غلاف فولادی ایجاد نمی‌شود و نیروها همگی از نوع کشش هستند. علت در نظر گرفتن این فرض برای مدل‌سازی، متقارن بودن چاه و در نتیجه خنثی شدن نیروهای افقی ایجاد شده از دو طرف است که اجازه‌ی ایجاد برش در دیواره‌ی چاه وجود ندارد.

در این پژوهش، به منظور تحلیل بوسیله نرم‌افزار SEEP/W، شرایط آب و هوایی یک سال پربارش از مهرماه سال ۱۳۹۷ تا انتهای شهریور سال ۱۳۹۸ سرخس مورد مطالعه قرار گرفته است و نمودارهای آن در شکل ۹ مشاهده می‌گردد.

در نرم‌افزار SEEP/W امکان مدل‌سازی تبادل رطوبت خاک و هوا از طریق عواملی چون دما، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد، ارتفاع پوشش گیاهی و تابش خورشیدی می‌باشد. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی شرایط آب و هوایی شهر سرخس، از روش پنمان - مونیث جهت محاسبات تبخیر و تعرق استفاده شد. معادله پنمان - مونیث<sup>۱</sup> (رابطه‌ی ۵) تبخیر و تعرق بالقوه را به دو بخش تشعشع و آثرودینامیکی جدا می‌کند و یک مدل ترکیبی

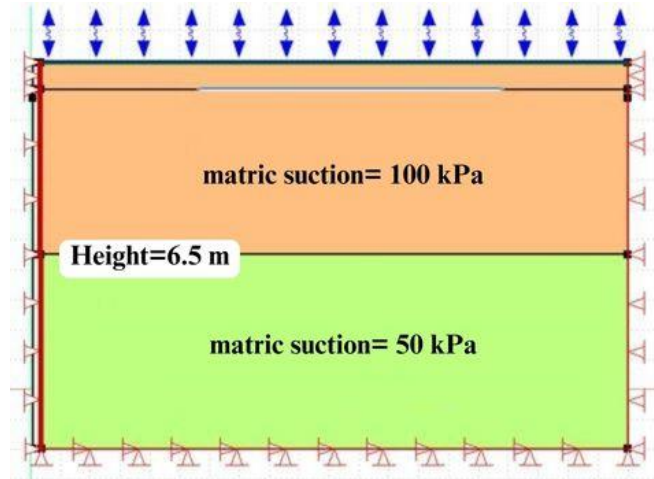
مدل‌سازی چاه گاز در دو مرحله انجام می‌شود، مرحله‌ی اول مدل‌سازی تنش‌های برجا برای کل حجم خاک بدون چاه و مرحله‌ی دوم حفاری چاه و جایگذاری غلاف فولادی بدنه‌ی چاه است. با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت نفت قطر دورترین غلاف فولادی چاه ۲۶ inch و قطر چاه گاز هفت inch است. حد فاصل دورترین غلاف فولادی تا چاه گاز به صورت لایه ای دوغاب سیمان و غلاف فولادی کار گذاشته شده است. ضخامت فولاد غلاف فولادی آخر ۱/۶۱ cm است. غلاف بدنه‌ی چاه از فولاد ضد زنگ با مقاومت کششی ۶۵۵ MPa ساخته شده است. این مقاومت کششی ۱/۸۳ برابر تنش جاری شدن فولاد ST37 (۳۶۲ MPa) است. شکل ۷ نمایی از کارگذاری فولاد بدنه‌ی چاه را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی بعد از بارش، خاک بالا مرطوب‌تر شده و مکش بافتی آن کاهش می‌یابد. برای دقت در محاسبات خاک به دو بخش بالا با مکش میانگین ۱۰۰ kPa و بخش زیرین با مکش بافتی میانگین ۵۰ kPa تقسیم می‌شود (شکل ۷).

زمان مدل‌سازی ۵ year و ۲۵۸ day معادل ۵۰۰۰۰ hr (۲۰۸۳ day) انجام می‌شود تا آب به شرایط پایدار برسد و همه تاثیر تورم ناشی از بارندگی در آن دیده شود. شکل ۸ نمای کلی و نهایی از مدل را پس از اعمال شرایط اقلیمی نشان می‌دهد.

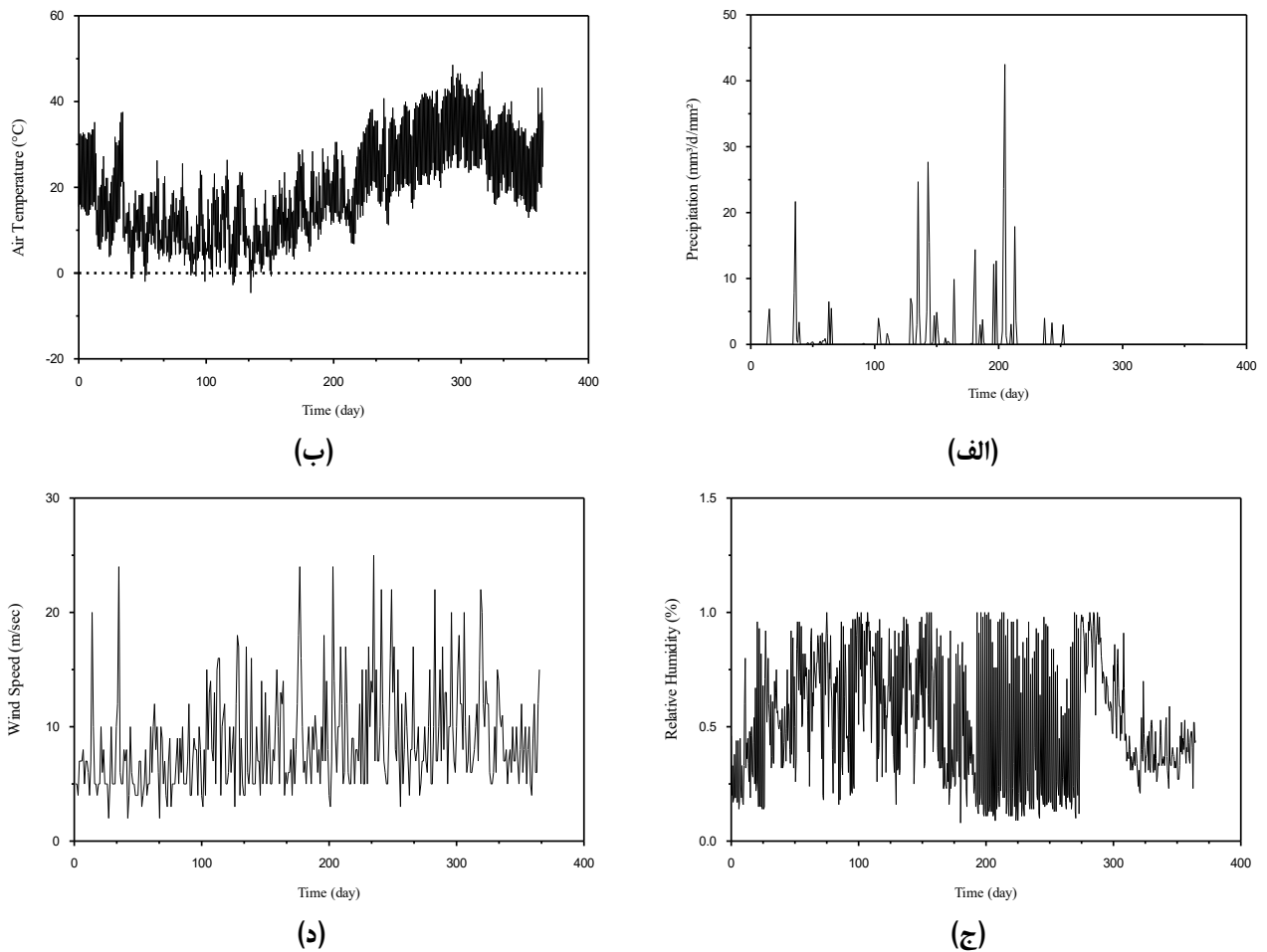
شرایط مرزی مدل به این گونه است که در سمت چپ مدل به اندازه‌ی شعاع چاه از مبدا مختصاتی برنامه غلاف فولادی روی ضلع سمت چپ مدل

1 Penman-Monteith equation



شکل ۸. نمایی از مدل ساخته شده و تقسیم بندی خاک بعد از تحلیل جریان

Fig. 8. A view of the built model and soil division after flow analysis



شکل ۹. نمودارهای مورد استفاده شرایط آب و هوایی در مدل سازی عددی از مهرماه ۱۳۹۷ تا مهرماه ۱۳۹۸ (الف) بارندگی، (ب) دما، (ج) رطوبت نسبی، (د) سرعت باد

Fig. 9. Graphs used for weather conditions in numerical modeling from October 2017 to October 2018 a) rainfall, b) temperature, c) relative humidity, d) wind speed

جدول ۴. پارامترهای مدل هذلولوی

Table 4. Hyperbolic model parameters

	k	n
مکش بافتی ۵۰ kPa	۲۲۷۰/۳۸	۰/۳۲۱۹
مکش بافتی ۱۰۰ kPa	۱۵۱۳/۵۶	۰/۴۸۵

#### ۴- نتایج و بحث

در نظر گرفته می‌شود (موازنه انرژی و روش آئرو دینامیکی) [۲۵]:

$$q_{PET} = q_{PET}^{rad} + q_{PET}^{aero} = .$$

$$\frac{1}{h_{fg}} \left[ \frac{\Gamma(q_n - q_g)}{\Gamma + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} + \frac{p_a c_{sa} (p_{v0}^a - p_v^a) / r_a}{\Gamma + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right] \quad (5)$$

که در آن  $q_{PET}$  شار تبخیر بالقوه،  $h$  گرمای نهان تبخیر،  $q_n$  تشعشع خالص،  $q_g$  شار حرارتی زمین،  $\rho_a$  میانگین چگالی هوا (اتمسفیر)،  $c_{sa}$  گرمای ویژه هوای مرطوب،  $(p_{v0}^a - p_v^a)$  کمبود فشار بخار،  $P_{v0}^a$  فشار بخار اشباع در دمای متوسط هوا،  $P_v^a$  فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع مرجع،  $r_c$  مقاومت در سطح حجیم (سایبان زراعی)،  $r_a$  مقاومت آئرو دینامیکی می‌باشد [۲۵].

پارامترهای ورودی برای روش پنمان - مونیث شامل دما در برابر زمان، بارندگی در برابر زمان، رطوبت نسبی در برابر زمان، سرعت باد در برابر زمان، ارتفاع پوشش گیاهی در برابر زمان و تابش خورشیدی می‌باشد. در اینجا از پارامتر ارتفاع پوشش گیاهی نسبت به زمان صرف نظر شده است. تابع دما در برابر زمان به صورت سینوسی وارد شده است. بدین شکل که بیشینه دما در ساعت ۱۳ و کمینه دما در ساعت ۱ بامداد اعمال می‌گردد. به منظور محاسبه تابش خورشیدی عرض جغرافیایی سرخس (۳۶/۵) زمان شروع تحلیل (اول مهرماه ۱۳۹۷) و ضریب آلودگی منطقه اعمال شده است. انعکاس انرژی تأیید به سطح زمین، آلودگی زمین گفته می‌شود و مقدار آن با توجه به پژوهش کربلایی و همکاران، ۰/۲۲ در نظر گرفته شده است [۲۶].

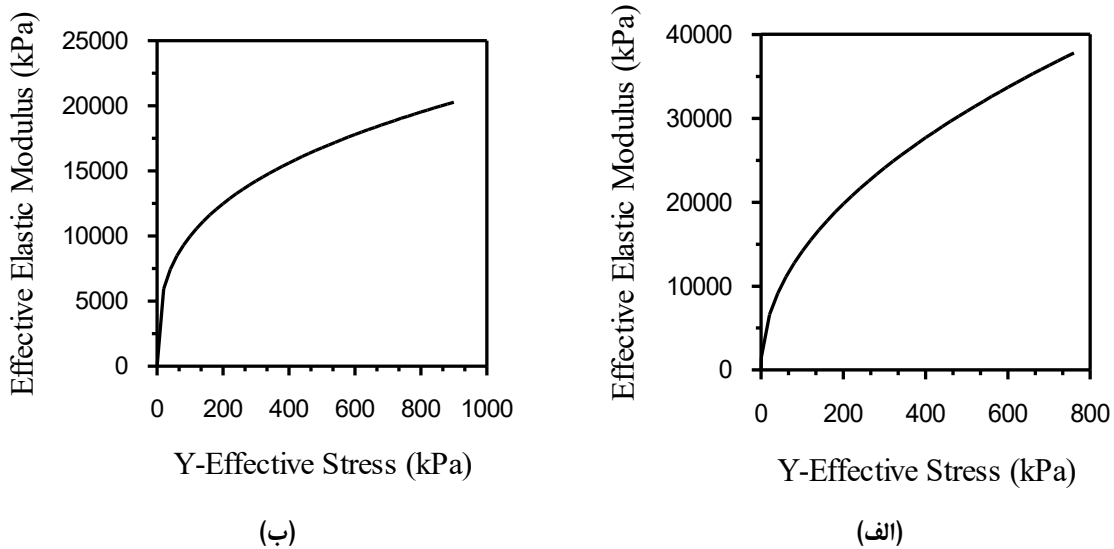
در این قسمت، با انجام مدل سازی چاه و خاک اطراف آن، میزان تورم و فشارهای آب منفذی، مدول الاستیسیته قبل و بعد از بارندگی و نیروهای کششی ایجاد شده در بدنه فولادی چاه در طول زمان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل در ادامه آورده شده است.

۴-۱- تعیین مدول الاستیسیته ی موثر خاک قبل و بعد از جریان بارندگی برای محاسبه ی مدول الاستیسیته ی ناشی از تورم قبل از بارندگی و در مراحل خاک برداری و احداث چاه گاز (کارگذاری کیسینگ‌ها) بایستی از نتایج آزمون‌های سه محوری غیراشباع استفاده شود. با توجه به رطوبت موجود در محل (w) که از آزمایش‌های اولیه ۰/۱۹٪ محاسبه شده است، رطوبت حجمی موجود در محل (q)، ۰/۲۹٪ برآورد می‌شود که بر اساس نمودار SWCC خاک مکش معادل این رطوبت ۱۰۰ kPa است. در نتیجه از نتایج آزمون سه محوری غیراشباع در مکش ۱۰۰ kPa برای محاسبه ی مدول الاستیسیته ی خاک در هفت متر بالایی سطح خاک استفاده می‌شود. شش متر پایین تر نمونه، دارای یک بازه مکش از صفر تا ۶۰ kPa است که میانگین همه ی لایه‌ها را مکش ۵۰ kPa در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه ی مدول الاستیسیته با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های سه محوری از مدل هذلولوی استفاده می‌شود. پارامترهای هذلولوی در جدول ۴ بیان شده‌اند.

با جایگذاری مقادیر  $k$  و  $n$  در رابطه ی ۶، در مکش‌های بافتی ۵۰ و ۱۰۰ kPa روابط ۷ و ۸ بیان می‌شوند:

$$\log E = \log(K \times P_a) + n \log \frac{(\sigma_3 - u_a)}{P_a} \rightarrow . \quad (6)$$

$$E = (K \times P_a) \times (\sigma_3 - u_a)^n$$



شکل ۱۰. نمودار مدول الاستیسیته موثر در مقابل تنش موثر قائم الف) مکش بافتی ۱۰۰ kPa، ب) مکش بافتی ۵۰ kPa

Fig. 10. Diagram of the effective modulus of elasticity against the effective vertical stress a) matric suction 100 kPa, b) matric suction 50 kPa

#### ۴-۲- فشار آب منفذی در خاک

پس از ساخت و تحلیل مدل بصورت آنچه در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، در این قسمت به منظور بررسی فشار آب منفذی و جابه‌جایی‌ها در خاک، نقطه مشخصی در عمق ۲ متری از سطح زمین در وسط مدل انتخاب می‌گردد. به منظور بررسی و تحلیل تغییرات فشار آب منفذی نقطه مورد نظر، از داده‌های بارش در فاصله زمانی مهر ماه سال ۱۳۹۷ تا انتهای شهریور سال ۱۳۹۸ مطابق شکل ۷ الف) استفاده شده است.

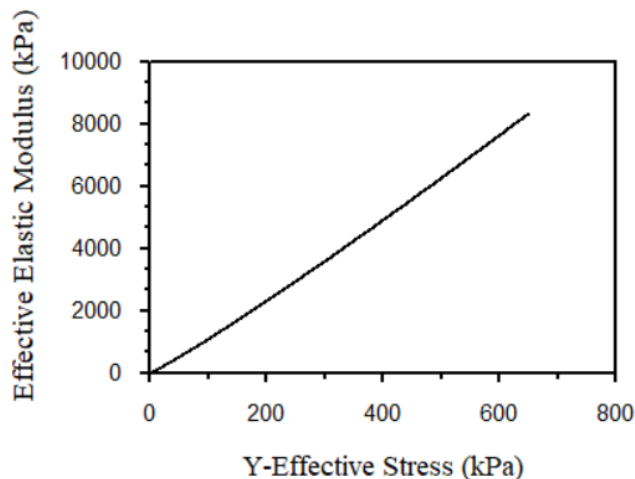
شکل ۱۲ تغییرات فشار آب منفذی برای یک نقطه در عمق دو متری از سطح زمین را در وسط مدل نشان می‌دهد. از نمودار برداشت می‌شود که از روز اول تا ۲۴۰ day پس از آغاز بارش‌ها، فشار آب منفذی و مکش بافتی کاهش می‌یابد. یعنی پس از ۲۴۰ day که معادل انتهای اردیبهشت است، خاک در مرطوب‌ترین حالت ممکن قرار دارد، چرا که بارش‌ها در این زمان بیشینه است. پس از اردیبهشت به علت وجود گرمای زیاد و بارش اندک تا انتهای شهریور ماه رطوبت خاک کمتر شده و فشار آب منفذی و مکش بافتی مجدداً افزایش می‌یابد تا تقریباً پس از ۱۶۰۰ day ثابت می‌شود و در واقع جریان آب در خاک پایدار شده است.

$$E = 1513.56 \times (\sigma_3 - u_a)^{0.485} \quad (7)$$

$$E = 2270.4 \times (\sigma_3 - u_a)^{0.3219} \quad (8)$$

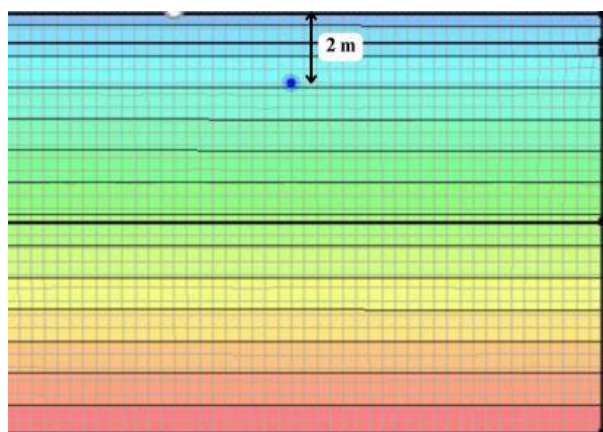
از تحلیل نتایج، نمودار شکل ۱۰ الف) روند افزایش مدول الاستیسیته‌ی خاک را نسبت به افزایش تنش موثر قائم قبل از وقوع بارندگی در مکش موجود در سطح خاک ( $y = 100 \text{ kPa}$ ) نشان می‌دهد و شکل ۱۰ ب) ارتباط بین مدول الاستیسیته را با تنش موثر قائم برای خاک در مکش ۵۰ kPa قبل از بارندگی را نشان می‌دهد. از مقایسه‌ی نمودارها و روابط ۸ و ۷ روشن است که روند افزایشی مدول خاک در مکش ۱۰۰ kPa بیشتر است، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش مکش بافتی مدول الاستیسیته‌ی خاک بیشتر شده و خاک صلبیت بیشتری می‌یابد و جابه‌جایی‌ها در آن کمتر می‌شود.

باتوجه به معادلات بیان شده و شکل ۸، رابطه‌ی بین مدول الاستیک خاک با تنش موثر بعد از بارندگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار مدول الاستیسیته‌ی موثر در مقابل تنش موثر قائم بعد از تحلیل جریان

Fig. 11. Diagram of the effective modulus of elasticity versus the effective vertical stress after flow analysis



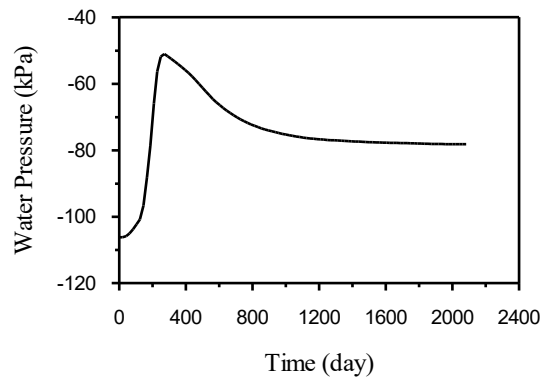
شکل ۱۲. نقطه‌ی مورد نظر برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای

Fig. 12. The target point for pore water pressure measurement

۴-۳- جابه‌جایی‌ها در خاک  
 شکل ۱۴ جابه‌جایی در راستای قائم را به صورت شماتیک بعد از گذشت ۲۰۸۳ day (زمان مدلسازی در بخش ۳) نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است در خاک مدل‌سازی شده تورم قابل توجهی رخ داده است. این تورم برای ۱۳ m خاک حدود ۸/۵ cm دیده می‌شود. این عدد معادل ۰/۶۳۷٪ از کل مدل است. خاک در اطراف چاه به علت وجود فولاد بدنه‌ی چاه جابه‌جایی‌های بسیار کوچکی را از خود نشان می‌دهد چرا که فولاد

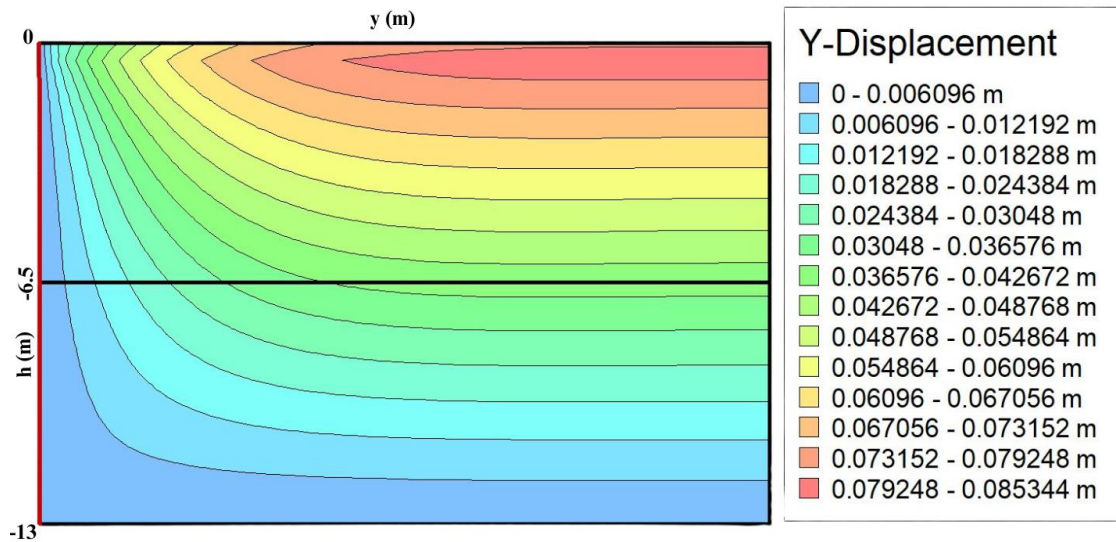
با توجه به نمودار شکل ۱۳، اثرات جریان آب ناشی از یک سال بارش مدل شده پس از گذشت مدت زمان حدودی ۱۶۰۰ day معادل ۴/۴ year از بین می‌رود و برای بالا بردن اطمینان از مجانب شدن کامل نمودار در طول زمان، با تحلیل زمانی در نرم‌افزار تحلیل تا ۲۰۸۳ day معادل ۵/۷ year ادامه می‌یابد. قابل توجه این‌که پس از این یک سال هیچ داده‌ی مربوط به اقلیم به برنامه داده نمی‌شود که علت اصلی این موضوع اهمیت تمرکز بر همان سال پر بارش و اثرات دراز مدت آن بر خاک است.





شکل ۱۳. نمودار تغییرات فشار حفره‌ای در طول زمان در نقطه‌ی مورد نظر

Fig. 13. Diagram of pore pressure changes over time at the desired point



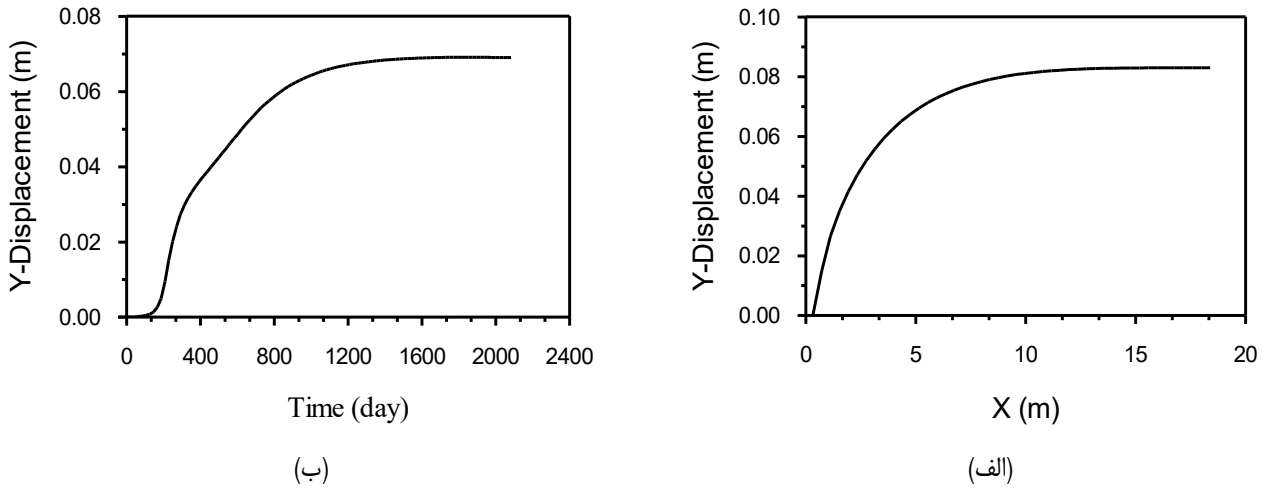
شکل ۱۴. جابه‌جایی‌های قائم مدل خاک و چاه در انتهای زمان

Fig. 14. Vertical displacements of soil and well models at the end of time

شکل ۱۵ (ب) نمودار جابه‌جایی قائم در طول زمان را برای نقطه مورد نظر در عمق دو متری خاک و در وسط مدل نشان می‌دهد. از شکل ۱۳ (ب) میتوان دریافت که پس از یک سال که جریان آب و دما و تابش خورشید برداشته می‌شود، همچنان تورم تا ۱۶۰۰ روز ادامه پیدا می‌کند، چرا که آب درون خاک در حال نفوذ است. تحلیل نشان می‌دهد پس از حدود ۱۶۰۰ روز جریان ثابت شده و پس از آن تورمی رخ نخواهد داد.

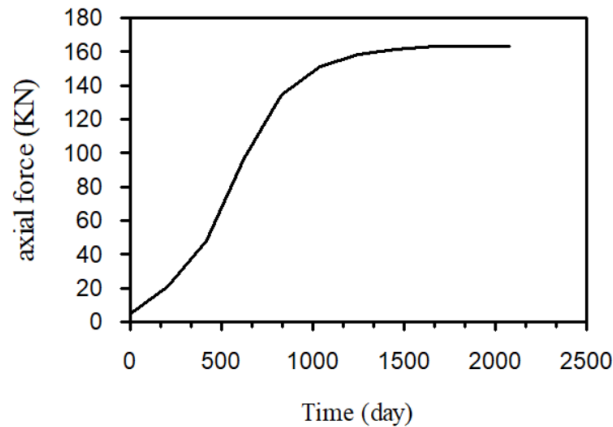
بدنه‌ی چاه اطراف را مانند غلاف در بر گرفته و از حرکت آن جلوگیری می‌کند [۲۷] در نتیجه هرچه از بدنه‌ی چاه دور می‌شویم جابه‌جایی‌ها (تورم) بیشتر می‌شود و در واقع بدنه‌ی چاه موجب کاهش تورم می‌شود. این امر نیز در پژوهش‌های پیشین مورد تایید قرار گرفته است [۲۸].

شکل ۱۵ (الف)، جابه‌جایی‌های قائم سطح خاک را در فاصله‌ی افقی نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار پیداست، پس از حدود ۱۵ متر فاصله‌ی افقی از فولاد بدنه‌ی چاه، میزان جابه‌جایی قائم مقداری ثابت می‌شود.



شکل ۱۵. الف) نمودار جابه‌جایی قائم در طول افق، ب) نمودار جابه‌جایی قائم در طول زمان

Fig. 15. a) vertical displacement diagram along the horizon, b) vertical displacement diagram over time



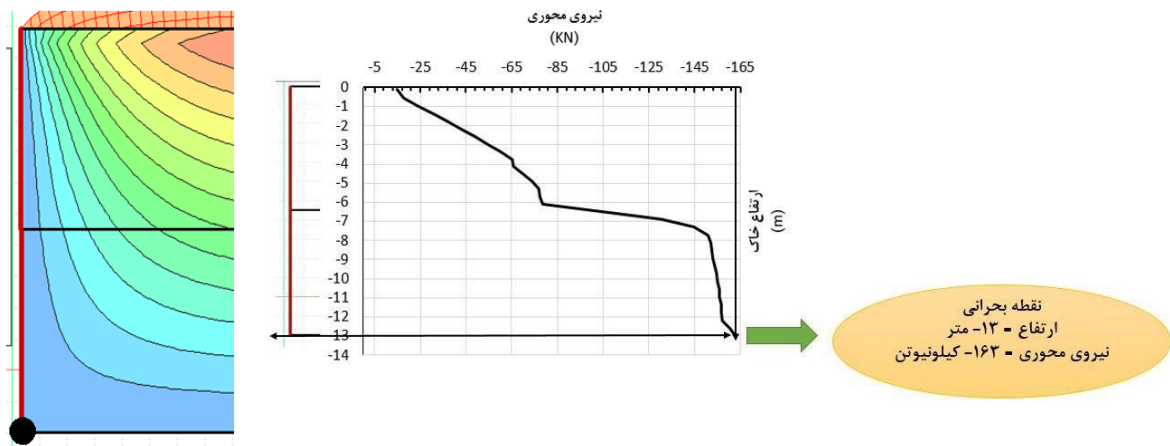
شکل ۱۶. نمودار نیروی محوری در طول زمان برای نقطه‌ی بحرانی در بدنه‌ی فولادی چاه

Fig. 16. Diagram of axial force over time for the critical point in the steel body of the well

در آن نقطه از نظر مکش بافتی و پارامترهای مقاومت برشی است. با افزایش مکش بافتی مدول الاستیسیته‌ی خاک افزایش و در نتیجه صلبیت خاک بیشتر و جابه‌جایی‌ها کمتر می‌شود. لذا نیروهای کششی ایجاد شده در شش متر بالایی فولاد بدنه‌ی چاه ناشی از تورم خاک کاهش می‌یابد و این موضوع دلیل ایجاد شکستگی‌هایی در نمودارهای نیروی محوری در طول بدنه‌ی فولادی چاه در زمان‌های مختلف است.

#### ۴-۴- نیروها در بدنه‌ی فولادی چاه

بر اثر ایجاد تورم در خاک نیروهای کششی در چاه ایجاد می‌شود. شکل ۱۶ نمودار نیروی کششی ایجاد شده در محیط بدنه‌ی دایره شکل فولادی چاه را بعد از یک، دو، سه سال و در انتهای زمان برای نقطه بحرانی (شکل ۱۷) نشان می‌دهد. در همه‌ی نمودارها تغییری در نیروی محوری در میانه‌ی ارتفاع مدل دیده می‌شود که این تفاوت رفتاری ناشی از تغییر در نوع خاک



شکل ۱۷. نمایش نقطه‌ی بحرانی پس از پایان مدت زمان مدلسازی ۲۰۸۳ days

Fig. 17. Showing the critical point after the end of the modeling period of 2083 days

جدول ۵. حداقل ضخامت و سطح مقطع موردنیاز برای غلاف فولادی چاه

Table 5. The minimum thickness and cross-sectional area required for the steel casing of the well

ضخامت (cm)	$A_n$ (cm <sup>2</sup> )	$F_u$	$P_n$ (kN)	معادله	روش
۰.۰۱۶	۳.۳	۶۵۵۰۰۰	۱۶۳	$A_n = \frac{P_n}{F_u \times 0.75}$	LRFD
۰.۰۲۴	۴.۹۷	۶۵۵۰۰۰	۱۶۳	$A_n = \frac{P_n \times 2}{F_u}$	ASD

ضخامت دورترین فولاد مورد استفاده‌ی فعلی ۱/۶۱ cm است. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول ۵ می‌توان گفت که ضخامت فولاد کارگذاشته برای مقاومت کششی در برابر تورم خاک رسی کافی بوده و اگر خوردگی گسترده‌ی فولاد مطرح نباشد، گسیختگی کششی رخ نخواهد داد. این امر در تطابق خوبی با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین قرار دارد [۲۹ و ۳۰].

#### ۴-۵- مقایسه‌ی مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

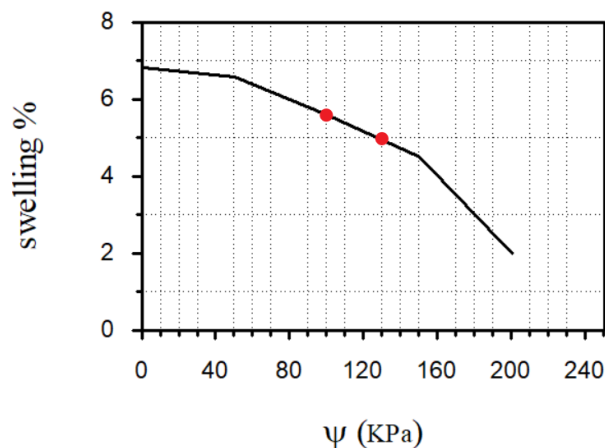
نادی یزدی و همکاران [۱۴] درصد تورم خاک مورد نظر را در مکش‌های بافتی مختلف با شروع از مکش بافتی بسیار بالا (مکش بافتی اولیه = ۳۰۰۰ kPa) تا مکش بافتی صفر به دست آوردند. نتایج آزمایش‌ها

همانطور که در شکل ۱۶ میتوان دید، بیشترین نیروی محوری در پایین‌ترین قسمت بدنه‌ی چاه (نقطه‌ی بحرانی) ایجاد می‌شود. به عبارتی میتوان بیان داشت آن نقطه از خاک که در پایان زمان مدل‌سازی دارای بیشترین مقدار نیروی محوری باشد، نقطه بحرانی در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که دیده شد، بعد از ۱۶۰۰ روز جریان آب در خاک ثابت شده و تورمی در خاک وجود ندارد، لذا نیروهای محوری بعد از آن زمان در بدنه‌ی چاه ثابت می‌شوند. نیروی محوری ایجاد شده‌ی حداکثر ۱۶۳ kN گزارش می‌شود که به آن نقطه‌ی بحرانی اطلاق می‌شود. با توجه به روابط موجود برای محاسبه حداقل سطح مقطع مجاز برای فولاد موردنظر، جدول ۵ حداقل سطح مقطع و ضخامت موردنیاز را نشان می‌دهد.

جدول ۶. میزان تورم آزاد در مکش‌های بافتی مختلف [۱۴]

Table 6. The amount of free swelling in different matric suctions [14]

تغییر حجم (%)	تورم (mm)	مکش بافتی (kPa)	مراحل آزمایش
صفر			
۲.۰۱	۰.۴۰۲	۲۰۰	۱
۴.۵	۰.۹۰۱	۱۵۰	۲
۵.۶	۱.۱۲	۱۰۰	۳
۶.۵۸	۱.۳۱۶	۵۰	۴
۶.۸۲	۱.۳۶۴	۰	۵



شکل ۱۸. نمودار درصد تورم در برابر مکش بافتی

Fig. 18. Swelling percentage against matric suction

در سربار صفر (سربار آزاد) در جدول ۶ آورده شده است. از داده‌های جدول ۶ می‌توان شکل ۱۸ را رسم کرده و معادله‌ی ۸ را بین مکش بافتی و درصد تورم خاک در بازه‌ی مکش بافتی صفر تا ۲۰۰ kPa معرفی نمود که در آن  $\lambda$  میزان مکش بافتی موجود می‌باشد.

تورم برای مکش بافتی ۱۰۰ kPa در جدول ۶، ۵/۶٪ است که اختلاف این دو درصد تورم برابر است با ۰/۶۰٪. تفاوت این عدد با درصد تورم ناشی از مدل‌سازی (درصد تورم مدل‌سازی = ۶۳٪)، ۵٪ است که نشان از صحت مدل‌سازی و هم‌خوانی آن با مطالعات آزمایشگاهی دارد.

= درصد تورم

$$-4E - 07 y^3 + 5E - 07y^2 - 0.0066 y + 6.8543 \quad (9)$$

در مدل‌سازی عددی که در این تحقیق انجام شد، ارتفاع مدل ۱۳ m و میزان تورم آزاد حداکثری آن ۸/۲۹ cm ثبت شد. از تقسیم میزان تورم بر ارتفاع مدل درصد تورم خاک در مدل‌سازی عددی ۰/۶۳ به دست می‌آید. این درصد تورم ناشی از تغییر مکش خاک از ۱۳۰ kPa به ۱۰۰ kPa است که بر اساس رابطه‌ی ۹، درصد تورم در مکش ۱۳۰ kPa معادل ۵٪ و درصد

در مدل‌سازی عددی که در این تحقیق انجام شد، ارتفاع مدل ۱۳ m و میزان تورم آزاد حداکثری آن ۸/۲۹ cm ثبت شد. از تقسیم میزان تورم بر ارتفاع مدل درصد تورم خاک در مدل‌سازی عددی ۰/۶۳ به دست می‌آید. این درصد تورم ناشی از تغییر مکش خاک از ۱۳۰ kPa به ۱۰۰ kPa است که بر اساس رابطه‌ی ۹، درصد تورم در مکش ۱۳۰ kPa معادل ۵٪ و درصد

## ۵- نتیجه‌گیری

## منابع

- [1] Chapman, Tim, Hilary Skinner, D. G. Toll, Kelvin Higgins, Mike Brown, and John Burland, eds. ICE Manual of Geotechnical Engineering Volume 2: Geotechnical design, construction and verification. Vol. 2. Emerald Group Publishing, 2023.
- Baradaran, Mohammad Saleh, Ramin Qazanfari, and Sajed Baradaran. "Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule." *Materials Research Express* 10, no. 5 (2023): 055202.
- Baradaran, Sajed, and Mahmoud Ameri. "Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies." *Road* 31, no. 114 (2023): 53-70.
- Cui, Y. J., Ferrari, A., Gallipoli, D., Jommi, C., Laloui, L., Pirone, M., ... & Wheeler, S. *Unsaturated soil mechanics*. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2004.
- Huang, Runqiu, and W. U. Lizhou. "Stability analysis of unsaturated expansive soil slope." *Earth Science Frontiers* 14, no. 6 (2007): 129-133.
- Avsar, Elif, Resat Ulusay, and Harun Sonmez. "Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay." *Engineering Geology* 105, no. 1-2 (2009): 24-31.
- Langroudi, Arya Assadi, and S. Shahaboddin Yasrobi. "A micro-mechanical approach to swelling behavior of unsaturated expansive clays under controlled drainage conditions." *Applied Clay Science* 45, no. 1-2 (2009): 8-19.
- Liang, C. H. E. N., Zong-Ze Yin, and Pei Zhang. "Relationship of resistivity with water content and fissures of unsaturated expansive soils." *Journal of China University of Mining and Technology* 17, no. 4 (2007): 537-540.
- Al-Yaqoub, Thamer H., Jafarali Parol, and Dobroslav Znidarcic. "Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil." *Applied Clay Science* 137 (2017): 22-29.
- Feng, Jun, and Guangze Zhang. "Study on soil water and suction stress characteristics for unsaturated

در این تحقیق به مدل‌سازی عددی پیرامون خاک اطراف یکی از چاه‌های گاز خانگیران سرخس پرداخته شد. با نتایج حاصل از مدل‌سازی چاه گاز و خاک اطراف آن با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی منطقه از ابتدای نیمه‌ی دوم سال ۱۳۹۷ تا انتهای نیمه‌ی اول سال ۱۳۹۸، میزان تورم خاک و نیروهای کششی ایجاد شده ناشی از آن در بدنه‌ی فولادی چاه تعیین و حداقل ضخامت لازم برای مقاومت در برابر این نیرو اعلام شد. نتایج حاصل از این پژوهش بصورت خلاصه در زیر آورده شده است:

- ۱- با توجه به بارش‌های رخ داده مکش بافتی قبل از بارش در خاک  $130 \text{ kPa}$  بوده است. مدت زمان حدود  $3/4$  سال پس از اتمام سال بارانی زمان می‌برد تا بارش‌های یک سال پر بارش در عمق  $13 \text{ m}$  خاک تاثیر تورمی کامل بگذارد و به جریان پایدار برسد. تورم آزاد خاک بر اثر این بارندگی سالانه معادل  $8/49 \text{ cm}$  است که برابر  $0/63\%$  ارتفاع خاک است.
  - ۲- تورم در اطراف چاه بسیار کم و در فواصل دورتر از چاه تورم بیشتر می‌شود تا نهایتاً به تورم آزاد خاک می‌رسد. در نتیجه سازه‌ی چاه گاز موجب افزایش سختی و کاهش تورم خاک اطراف خود می‌شود. فاصله‌ی تاثیر این چاه که در آن تورم کاهش می‌یابد،  $15 \text{ m}$  گزارش شد.
  - ۳- در اثر تورم خاک نیروهای کششی در بدنه‌ی فولادی چاه پدید می‌آید که می‌تواند موجب بیرون کشیدگی و یا گسیختگی بدنه‌ی چاه شود. طبق نتایج مدل عددی انجام شده بیشترین نیروی کششی به پایین‌ترین نقطه‌ی لوله‌ی فولادی در عمق  $13$  متری وارد شده و مقدار آن برابر  $163 \text{ kN}$  است که بر کل محیط چاه وارد می‌شود.
- در این بخش توصیه‌هایی جهت انجام پژوهش‌هایی که در آینده پیرامون این بحث انجام خواهد شد، به شرح زیر مطرح می‌شود:
- انجام آزمایش‌هایی بر روی ترکیبات این خاک متورم‌شونده با مواد بهبود دهنده برای کاهش تورم، بطور مثال پیشنهاد می‌شود در شعاعی از اطراف چاه تا عمق مشخص قابل تعیین، خاکبرداری انجام شده و با مصالح مخلوط شده با سیمان جایگزین گردد.
  - مدل‌سازی بارش‌های ده ساله بر روی خاک اطراف چاه خانگیران سرخس
  - بررسی تاثیر موقعیت آب زیرزمینی بر تورم خاک و همچنین مدل‌سازی لایه‌ی آب زیرزمینی تحت فشار در منطقه

- no. 1 (1973): 97-104.
- United States. Bureau of Yards, and Docks. Building Maintenance: Structures. US Government Printing Office, 1963.
- McKeen, R. Gordon. Design of airport pavements for expansive soils. No. DOT/FAA/RD-81/25 Final Rpt. NTIS, 1981.
- Seed, H. Bolton, Richard J. Woodward Jr, and Raymond Lundgren. "Prediction of swelling potential for compacted clays." *Journal of the soil mechanics and foundations division* 88, no. 3 (1962): 53-87.
- Aubertin, Michel, Jean-Francois Ricard, and Robert P. Chapuis. "A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines." *Canadian Geotechnical Journal* 35, no. 1 (1998): 55-69.
- Van Genuchten, M. Th. "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil science society of America journal* 44, no. 5 (1980): 892-898.
- Chen, Yanyan, Yuanming Lai, Hongwei Li, and Wansheng Pei. "Finite element analysis of heat and mass transfer in unsaturated freezing soils: Formulation and verification." *Computers and Geotechnics* 149 (2022): 104848.
- Karbalae, Ali Reza, Zahra Hedjazizadeh, and Seyed Abolfazl Masoodian. "Spatiotemporal variations of albedo using MODIS and PCA analysis in Iran." *Theoretical and Applied Climatology* 145, no. 1 (2021): 245-260.
- Cheuk, C. Y., W. A. Take, M. D. Bolton, and J. R. M. S. Oliveira. "Soil restraint on buckling oil and gas pipelines buried in lumpy clay fill." *Engineering structures* 29, no. 6 (2007): 973-982.
- Scanlon, Bridget R., Jean Phillippe Nicot, and Joel W. Massmann. "Soil gas movement in unsaturated systems." *Soil physics companion* 389 (2002): 297-341.
- Nie, Zhen, Shuzhe Shi, Bohong Wu, and Xueqin Huang. "Axial Force Calculation Model for Completion String with Multiple Point Resistances in Horizontal Well." *Processes* 11, no. 9 (2023): 2621.
- clay soil of airport engineering based on laboratory tests." *Geofluids* 2021, no. 1 (2021): 5233045.
- Trinh, Minh Thu. "Coupled and uncoupled approaches for the estimation of 1-d heave in expansive soils due to transient rainfall infiltration: a case study in central Vietnam." *GEOMATE Journal* 17, no. 64 (2019): 152-157.
- Rajeev, Pathmanathan, and Jayantha Kodikara. "Numerical analysis of an experimental pipe buried in swelling soil." *Computers and Geotechnics* 38, no. 7 (2011): 897-904.
- Al-Juari, Khawla AK, Mohammed Y. Fattah, Suhail IA Khatlab, and Mohammed K. Al-Shamam. "Simulation of behaviour of swelling soil supported by a retaining wall." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings* 175, no. 4 (2022): 293-302.
- Yazdi, Amir Nadi, Ali Akhtarpour, Mustafa M. Abdalhusein, and Mohammad Saleh Baradaran. "Experimental Investigation of the Volume Change of a Swelling Clay and Its Improvement." *Transportation Infrastructure Geotechnology* (2023): 1-24.
- Mahedi, Masrur, Bora Cetin, and David J. White. "Performance evaluation of cement and slag stabilized expansive soils." *Transportation Research Record* 2672, no. 52 (2018): 164-173.
- Baradaran, Sajed, Jamal Rahimi, Mahmoud Ameri, and Ali Maleki. "Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET." *Case Studies in Construction Materials* 20 (2024): e02740.
- Ayar, Pooyan, Sajed Baradaran, and Sepehr Abdipour Vosta. "A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)." *Road* 30, no. 110 (2022): 57-86.
- Kermani, Sajjad, Mahdi Deymi-Dashtebayaz, and Esmail Lakzian. "Investigation of the effects of wind velocity and flame pulldown on flare flame shape in Khangiran gas refinery." *Heat and Mass Transfer* 58, no. 6 (2022): 991-1004.
- Dakshanamurthy, V., and V. Raman. "A simple method of identifying an expansive soil." *Soils and foundations* 13,

Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 41979, pp. 629-636. 2005.

Fyrileiv, Olav, and Leif Collberg. "Influence of pressure in pipeline design: effective axial force." In International

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Balighi , M.S. Baradaran , A. Akhtarpour , Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs, Amirkabir J. Civil Eng., 56(7) (2024) 885-908.*

DOI: [10.22060/ceej.2024.22616.8006](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22616.8006)



