

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^۱، محمدصالح برادران^۲، علی اخترپور^{۳*}

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران، گرایش مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

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.

کلمات کلیدی

خاک متورم‌شونده، مکانیک خاک غیراشباع، مدل‌سازی عددی، خانگیران سرخس، غلاف چاه

* نویسنده مسئول: دکتر علی اخترپور | ایمیل: akhtarpour@um.ac.ir

اساساً خاک متورم‌شونده حاکی 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 [۲ و ۳]. 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^۱ 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^۲ [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.

ترین^۳ [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^۴ [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 3D FLAC بهره بردند و نتایج حاصل، توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی قبلی را از خود نشان دادند.

الجواری^۵ 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 فشارتورم 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

¹ Al-Yaqoub

² Feng and Zhang

³ Trinh

⁴ Rajeev and Kodikara

⁵ Al-Juari

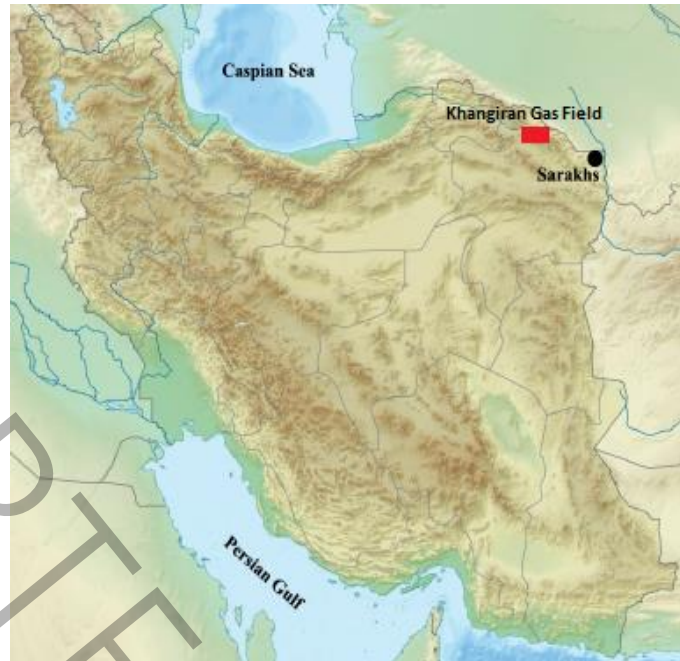
حجم نمونه بر اساس تغییرات مکش بافتی تحت سربار ثابت انجام گردید و مشاهده شد که میزان تغییر حجم در حالت تورم آزاد که خاک بیشترین تورم را دارد، ۶/۸۲٪ است. همچنین فشار تورم خاک در حالت تراندازی ۹۹/۸ kPa اندازه‌گیری شد که اگر از سیمان به میزان ۲/۵ الی ۱۰٪ جهت بهسازی استفاده شود، فشار تورم به ترتیب به میزان ۵۰ الی ۹۵٪ کاهش می‌یابد. یکی از مسائل و مشکلاتی که در دهه‌ی اخیر برای مهندسیین 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 km² (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].



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

Figure 1 - Geographical location of the soil of the studied area [14]

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 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.

جدول (۱) مشخصات اولیه خاک [۱۴]

Table (1) Characteristics of the soil [14]

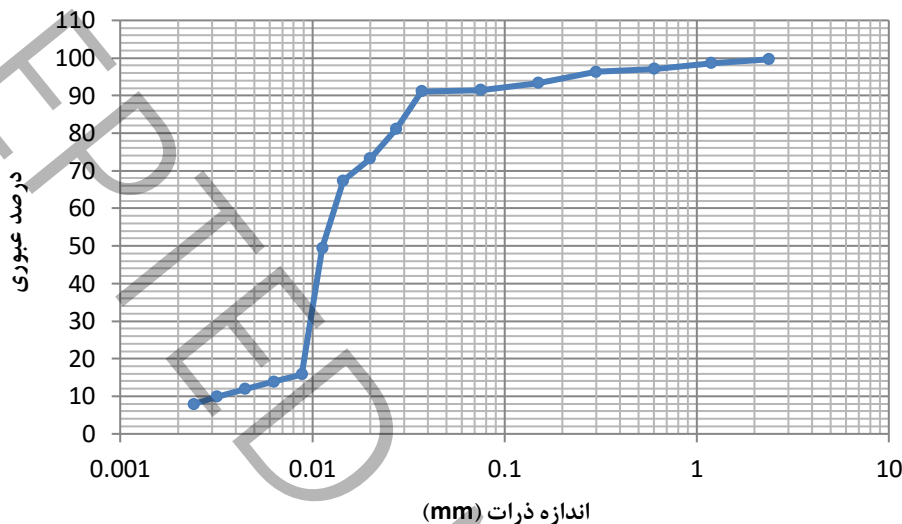
نام آزمایش	نام استاندارد	نتایج
دانه بندی	ASTM D422-63	درصد عبوری از الک ۲۰۰ برابر ۹۱/۴۳٪
هیدرومتری	ASTM D421	ترسیم منحنی دانه‌بندی
چگالی دانه‌های جامد	ASTM D854	۲/۷
رطوبت خاک در محل	ASTM D2216-19	٪۱۹
حدود اتربرگ	ASTM D4318	PL=23 % , LL=42%
وزن مخصوص ظاهری	ASTM D1556/1556M	۱/۸۳۷
درصد گچ	ASTM C25-19	۳/۲۱۲

جدول (۲) پتانسیل نسبی تورم غیرمستقیم خاک

Table (2) Relative potential of indirect soil swelling

معیار	پتانسیل نسبی تورم غیرمستقیم
-------	-----------------------------

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



شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک [۱۴]

Figure 2- Particle size distribution of the studied [14]

همچنین با استفاده از دستگاه آنالیز پراش ایکس^۶ (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 مونت موریلونیت^۷ و کانی اترینگایت^۸ که از وجود گچ به وجود می‌آید در این خاک دیده شده و علت تورم را می‌توان در این دو کانی پیدا نمود.

جدول (۳) ترکیبات کانی تعیین شده با XRD [۱۴]

Table (3) Mineral compositions determined by XRD [14]

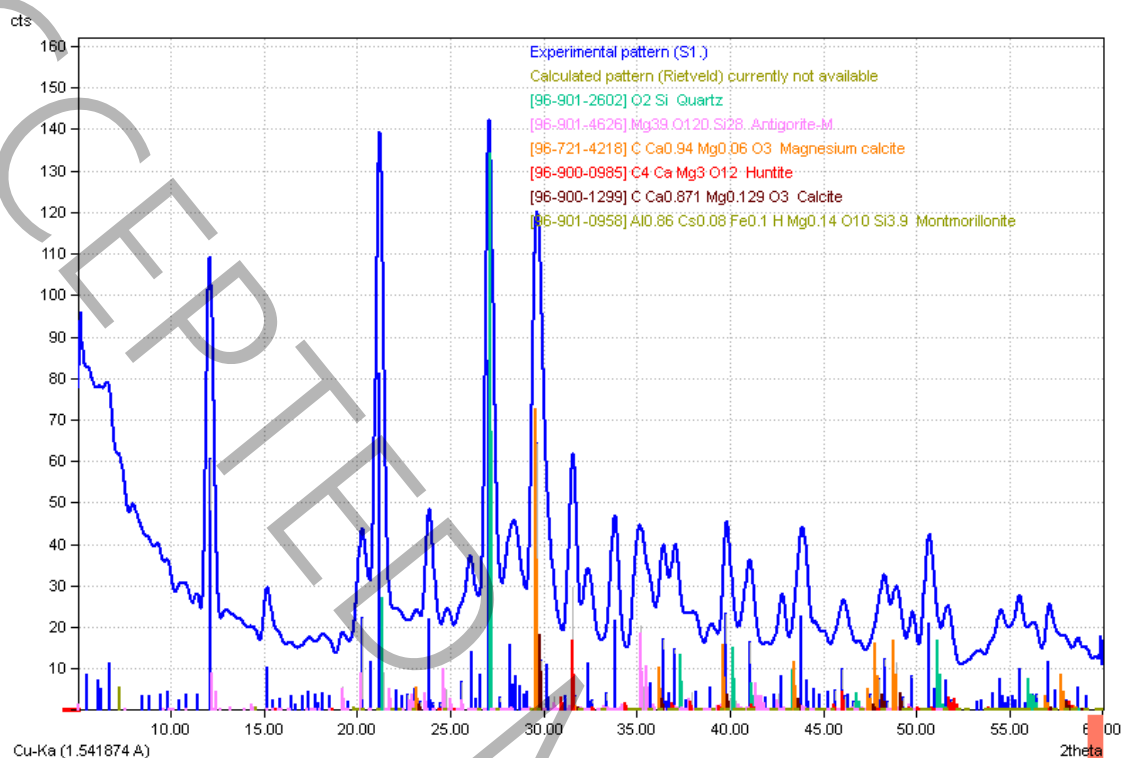
ترتیب	نماد شیمیایی	نام	درصد تشکیل دهنده
۱	SiO ₂	Quartz	۳۷/۲
۲	Mg ₆ [(OH) ₈ - Si ₄ O ₁₀]	Antigorite-M	۲۱/۸
۳	(Ca _{0.998} ,Mg _{0.002})CO ₃	Magnesium calcite	۱۸/۹
۴	Mg ₃ Ca(CO ₃) ₄	Huntite	۶/۸

^۶ X-Ray diffraction

^۷ Montmorillonite

^۸ Antigorite

۵	Calcite	CaCO ₃	۵
۰/۶	Montmorillonite	(Na,Ca) _{0.33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·nH ₂ O	۶

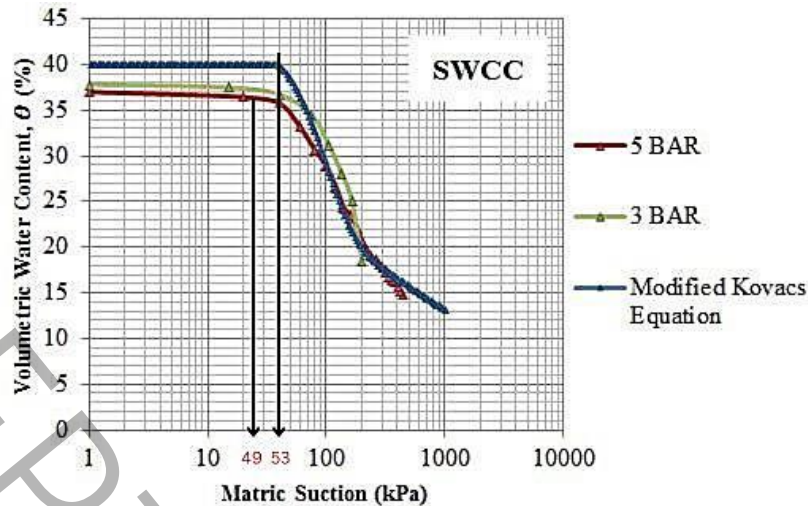


شکل ۳- الگوی گرافیکی پراش اشعه ایکس (XRD) [۱۴]

Figure 3- Graphic pattern of X-ray diffraction (XRD) [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 آبرتین و همکاران روشی را به منظور پیش‌بینی منحنی نگهداشت آب - خاک با استفاده از توابع اصلاح شده کوواکس^۹ 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 دست می‌آید 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.

^۹ Kovacs



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

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

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 مدول های مرحله قبل قابل استفاده نبوده و برای شبیه سازی تورم بایستی مدول متورم شوندگی که در آن تغییر در تنش مؤثر به تغییر در کرنش های حجمی ارتباط داده می شود؛ استفاده گردد. در پژوهش حاضر به منظور شبیه سازی رفتار تورمی خاک، رابطه ای بین مدول متورم شوندگی خاک و تنش مؤثر ارائه شده است. با توجه به رابطه ونجن اشتن^{۱۰} [۲۴] (رابطه ی ۱) می توان پارامتر تنش مؤثر (χ) را به دست آورد.

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

که در این رابطه θ درصد رطوبت حجمی، θ_r درصد رطوبت ماندگار و θ_s درصد رطوبت اشباع است. در این پژوهش، مطابق نادای یزدی و همکاران [۱۴] مقدار درصد رطوبت ماندگار ۶/۷۸٪ و مقدار رطوبت اشباع ۳۸/۴۱٪ 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.

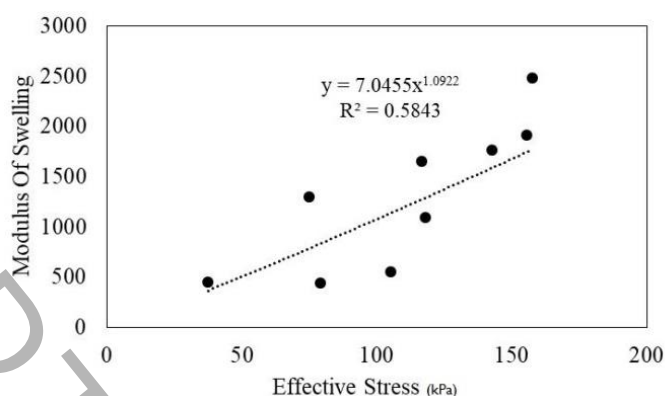
$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_x) \quad (2)$$

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

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

¹⁰ Van Genuchten

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



شکل ۵ - نمودار مدول متورم شوندگی - تنش مؤثر

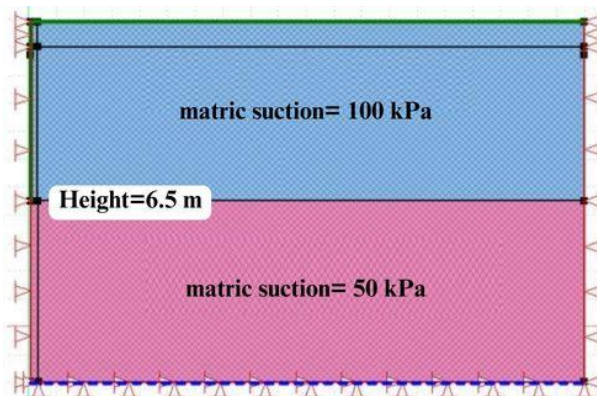
Figure 5 - Swelling modulus - effective stress diagram

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

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

۳- مدل سازی عددی

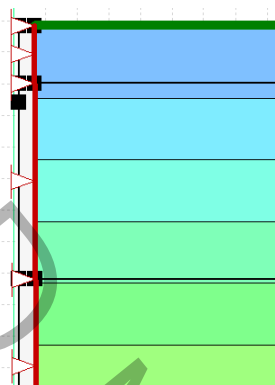
برای مدل سازی عددی چاه گاز در این منطقه عمق سطح آب زیرزمینی در ۱۳ متر زیر زمین فرض شده است زیرا خاکی که از محل بعد از وقوع سال پربارندگی برداشت شده است دارای مکش ۱۰۰ kPa بوده است لذا قبل از مدل سازی باید آب زیر زمینی در مرزی فرض شود که قادر به ایجاد مکشی در خاک شود که پس از بارندگی به مکش ۱۰۰ kPa برسد. به علت موجود نبودن داده های 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. پایین تر از ۱۳ m از آن، جایی که خاک اشباع بوده است و تغییرات تورمی در طی بارش ها تاثیری بر آن ندارد، مدل نشده و در واقع خاک غیر اشباع بالای سطح آب زیرزمینی مورد تحلیل قرار می گیرد (شکل ۶).



شکل ۶ - تقسیم‌بندی خاک قبل از تحلیل جریان

Figure 6 - Soil division before flow analysis

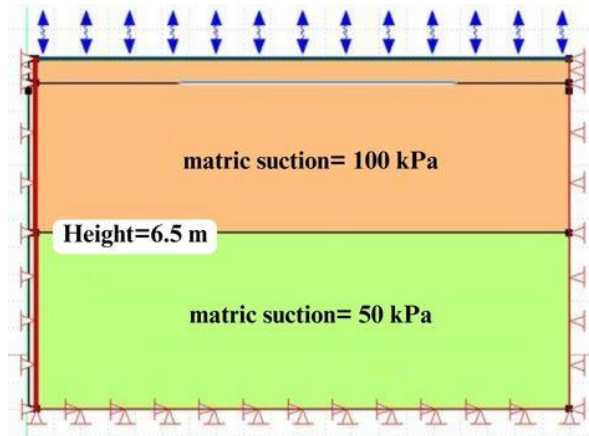
مدل‌سازی چاه گاز در دو مرحله انجام می‌شود، مرحله‌ی اول مدل‌سازی تنش‌های برجا برای کل حجم خاک بدون چاه و مرحله‌ی دوم حفاری چاه و جایگذاری غلاف فولادی بدنه‌ی چاه است. با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت نفت قطر دورترین غلاف فولادی چاه ۲۶ inch و قطر چاه گاز هفت inch است. حد فاصل دورترین غلاف فولادی تا چاه گاز به صورت لایه‌ای 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.



شکل ۷ - نمایی از غلاف چاه

Figure 7 - A view of the well casing

برای مدل‌سازی بعد از بارش، خاک بالا مرطوب‌تر شده و مکش بافتنی آن کاهش می‌یابد. برای دقت در محاسبات خاک به دو بخش بالا با مکش میانگین ۱۰۰ kPa و بخش زیرین با مکش بافتنی 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 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.



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

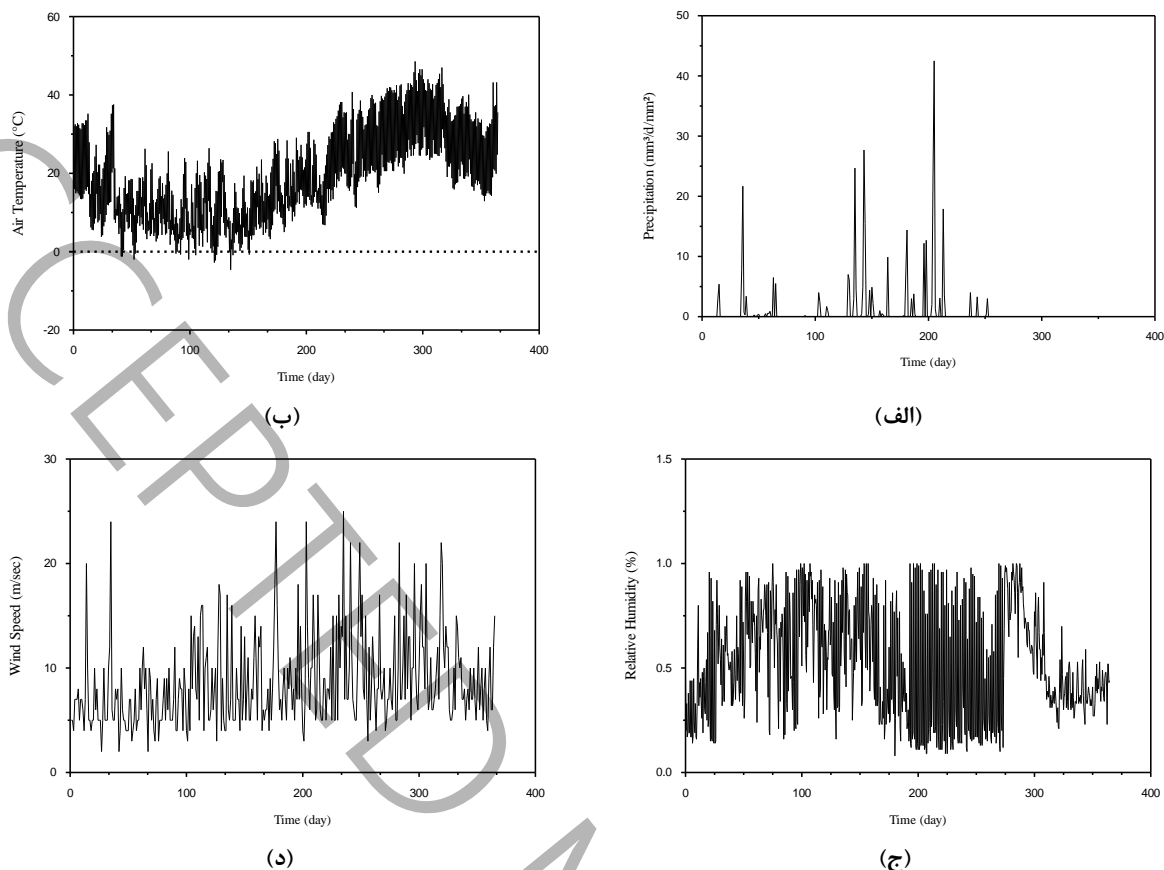
Figure 8- A view of the built model and soil division after flow analysis

در این پژوهش، به منظور تحلیل بوسیله نرم افزار 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 می گردد. در نرم افزار SEEP/W امکان مدل سازی تبادل رطوبت خاک و هوا از طریق عواملی چون دما، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد، ارتفاع پوشش گیاهی و تابش خورشیدی می باشد. در این پژوهش به منظور شبیه سازی شرایط آب و هوایی شهر سرخس، از روش پنمان - مونیث جهت محاسبات تبخیر و تعرق استفاده شد. معادله پنمان - مونیث^{۱۱} (رابطه ی ۵) تبخیر و تعرق بالقوه را به دو بخش تشعشع و آئرو دینامیکی جدا می کند و یک مدل ترکیبی در نظر گرفته می شود (موازنه انرژی و روش آئرو دینامیکی) [۲۵]:

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

که در آن q_{PET} شار تبخیر بالقوه، h گرمای نهان تبخیر، q_n تشعشع خالص، q_g شار حرارتی زمین، ρ_a میانگین چگالی هوا (اتمسفِر)، 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 می باشد [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 می باشد. 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 می گردد. به منظور محاسبه تابش خورشیدی عرض جغرافیایی سرخس (۳۶/۵) زمان شروع تحلیل (اول مهرماه ۱۳۹۷) و ضریب آبدوی منطقه اعمال شده است. انعکاس انرژی تابیده به سطح زمین، آبدوی زمین گفته می شود و مقدار آن با توجه به پژوهش کربلایی و همکاران، ۰/۲۲ در نظر گرفته شده است [۲۶].

¹¹ Penman-Monteith equation



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

Figure 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

۴- نتایج و بحث

در این قسمت، با انجام مدل‌سازی 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 محاسبه‌ی مدول الاستیسیته‌ی 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 ۱۹٪ محاسبه شده است، رطوبت حجمی موجود در محل (q)، 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 محاسبه‌ی مدول الاستیسیته‌ی خاک در هفت متر بالایی سطح خاک استفاده می‌شود. شش متر پایین‌تر نمونه، دارای یک بازه مکش از صفر تا ۶۰ kPa است که میانگین همه‌ی لایه‌ها را مکش ۵۰ kPa در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه‌ی

مدول الاستیسیته با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های سه محوری از مدل هذلولوی استفاده می‌شود. پارامترهای هذلولوی در جدول ۴ بیان شده‌اند.

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

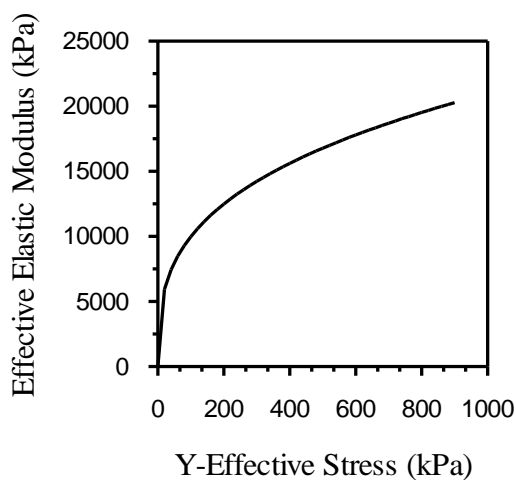
با جایگذاری مقادیر k و n در رابطه‌ی ۶، در مکش‌های بافتی ۵۰ و ۱۰۰ kPa روابط ۷ و ۸ بیان می‌شوند:

$$\log E = \log(K \times P_a) + n \log \frac{(\sigma_3 - u_a)}{P_a} \rightarrow E = (K \times P_a) \times (\sigma_3 - u_a)^n \quad (۶)$$

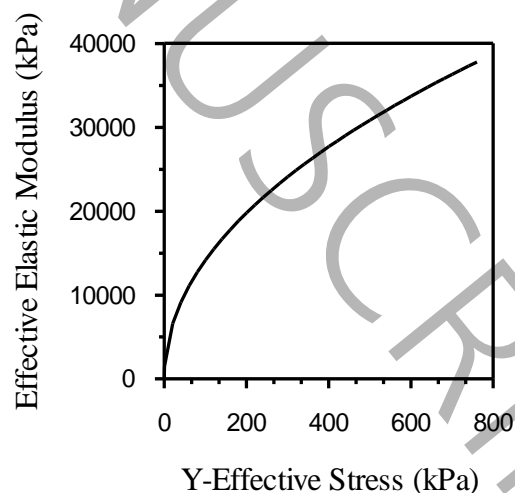
$$E = 1513.56 \times (\sigma_3 - u_a)^{0.485} \quad (۷)$$

$$E = 2270.4 \times (\sigma_3 - u_a)^{0.3219} \quad (۸)$$

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 ($\gamma = 100$ 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 ۷ و ۸ 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.



(ب)

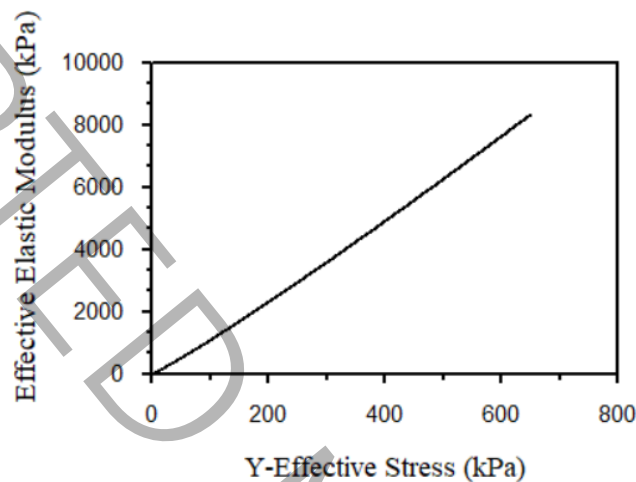


(الف)

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

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

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.



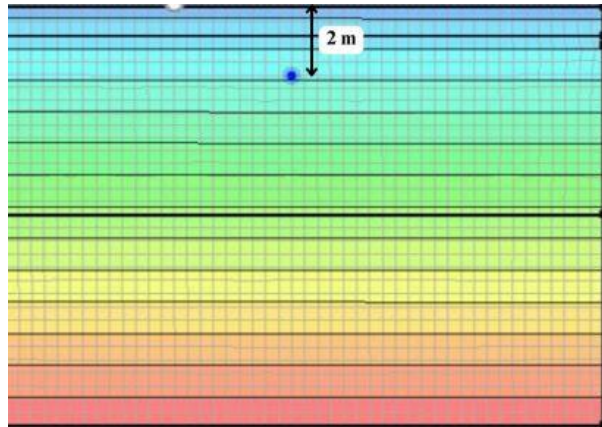
شکل ۱۱ - نمودار مدول الاستیسیته‌ی موثر در مقابل تنش موثر قائم بعد از تحلیل جریان

Figure 11 - Diagram of the effective modulus of elasticity versus the effective vertical stress after flow analysis

۲-۴- 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.

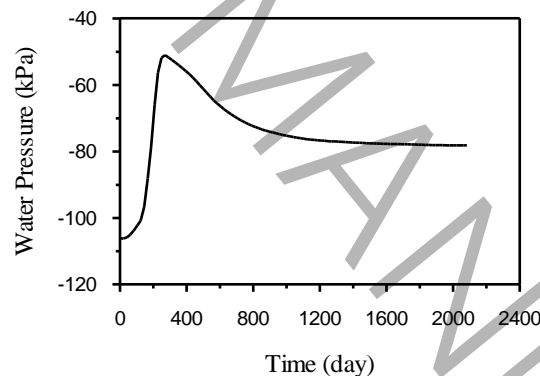
شکل ۱۲ تغییرات فشار آب منفذی برای یک نقطه در عمق دو متری از سطح زمین را در وسط مدل نشان می‌دهد. از نمودار برداشت می‌شود که از روز اول تا ۲۴۰ day پس از آغاز بارش‌ها، فشار آب منفذی و مکش بافتی کاهش می‌یابد. یعنی پس از ۲۴۰ day که معادل انتهای اردیبهشت است، خاک در مرطوب‌ترین حالت ممکن قرار دارد، چرا که بارش‌ها 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.



شکل ۱۲- نقطه‌ی مورد نظر برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای

Figure 12- The target point for pore water pressure measurement

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.

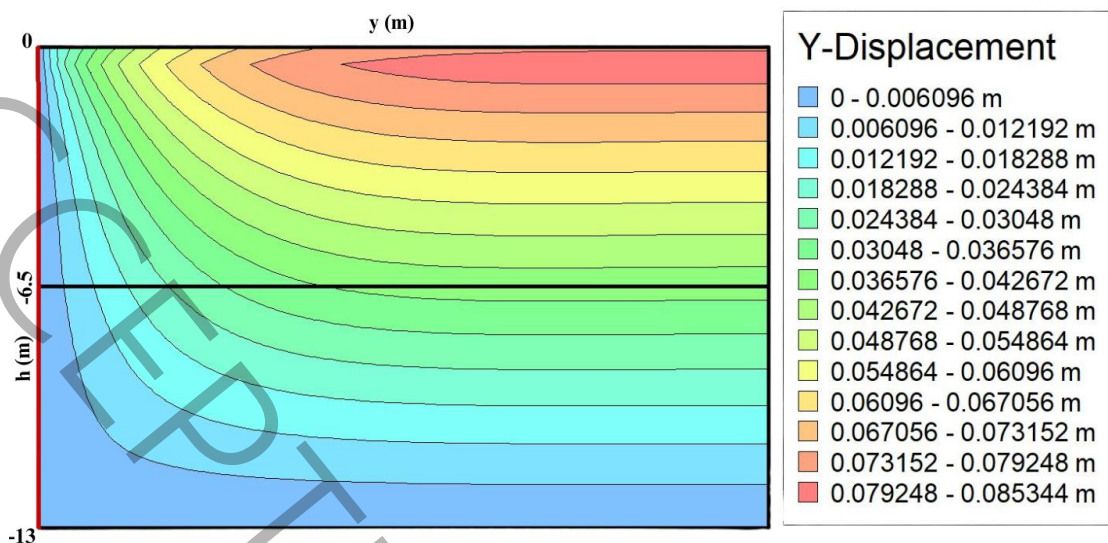


شکل ۱۳ - نمودار تغییرات فشار حفره‌ای در طول زمان در نقطه‌ی مورد نظر

Figure 13 - Diagram of pore pressure changes over time at the desired point

۳-۴- جابه‌جایی‌ها در خاک

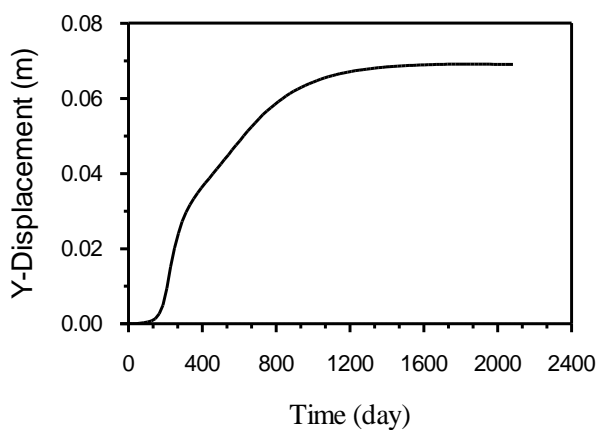
شکل ۱۴ جابه‌جایی در راستای قائم را به صورت شماتیک بعد از گذشت ۲۰۸۳ day (زمان مدلسازی در بخش ۳) نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است در خاک مدل‌سازی شده تورم قابل توجهی رخ داده است. این تورم برای ۱۳ m خاک حدود ۸/۵ cm دیده می‌شود. این عدد معادل ۰/۶۳۷٪ از کل مدل است. خاک در اطراف چاه به علت وجود فولاد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



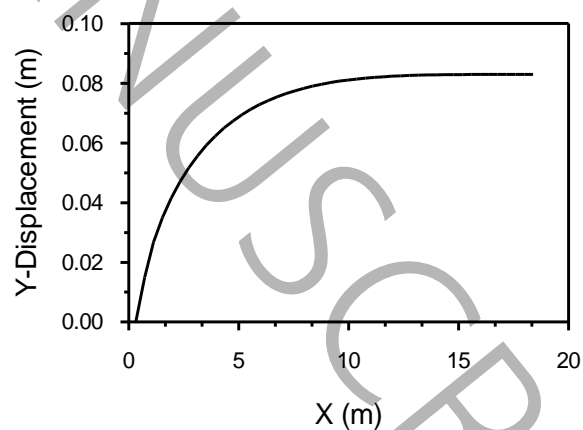
شکل ۱۴ - جابه‌جایی‌های قائم مدل خاک و چاه در انتهای زمان

Figure 14 - Vertical displacements of soil and well models at the end of time

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 (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.



(ب)



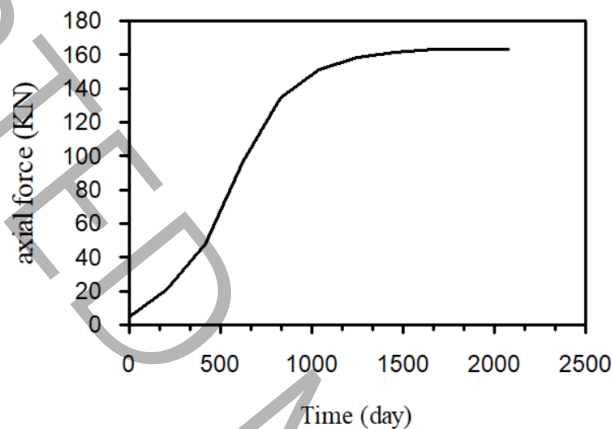
(الف)

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

Figure 15 - a) vertical displacement diagram along the horizon, b) vertical displacement diagram over time

۴-۴- نیروها در بدنه‌ی فولادی چاه

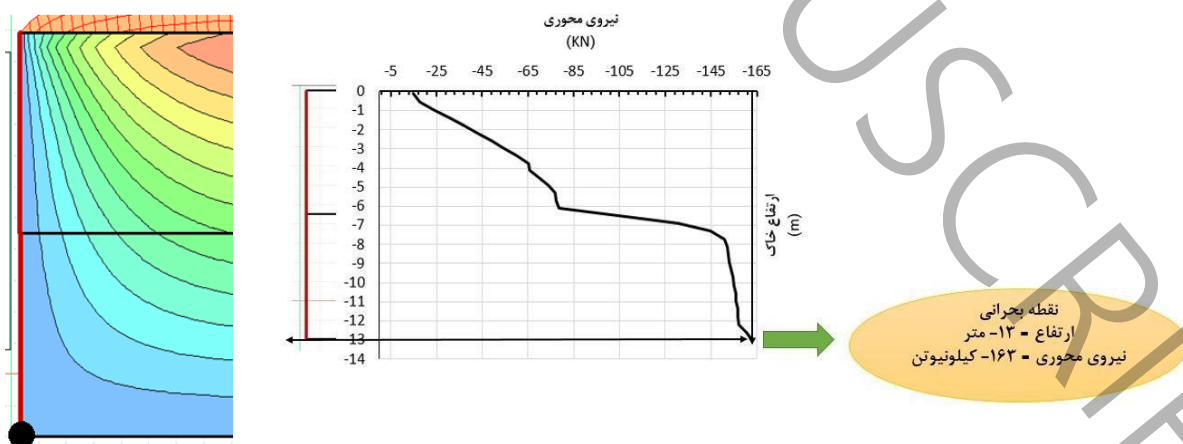
بر اثر ایجاد تورم در خاک نیروهای کششی در چاه ایجاد می‌شود. شکل ۱۶ نمودار نیروی کششی ایجاد شده در محیط بدنه‌ی دایره شکل فولادی چاه را بعد از یک ، دو، سه سال و در انتهای زمان برای نقطه بحرانی (شکل ۱۷) نشان می‌دهد. در همه‌ی نمودارها تغییری در نیروی محوری در میانه‌ی ارتفاع مدل دیده می‌شود که این تفاوت رفتاری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



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

Figure 16 - Diagram of axial force over time for the critical point in the steel body of the well

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.



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

Figure 17 - Showing the critical point after the end of the modeling period of 2083 days

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 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

روش	معادله	P_n (kN)	F_u	A_n (cm ²)	ضخامت (cm)
LRFD	$A_n = \frac{P_n}{F_u \times 0.75}$	۱۶۳	۶۵۵۰۰۰	۳,۳	۰,۰۱۶
ASD	$A_n = \frac{P_n \times 2}{F_u}$	۱۶۳	۶۵۵۰۰۰	۴,۹۷	۰,۰۲۴

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].

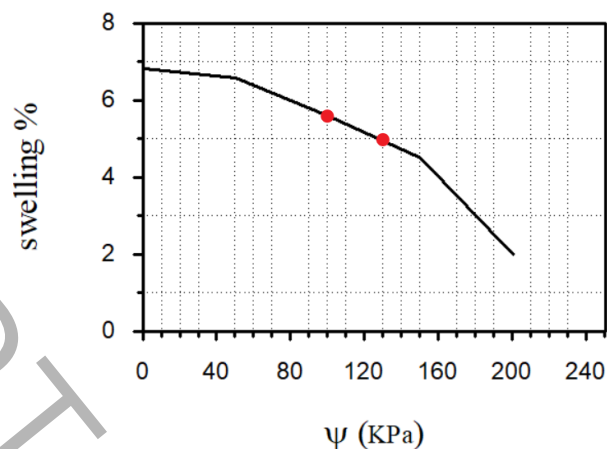
۵-۴- مقایسه‌ی مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی

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 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 γ میزان مکش بافتی موجود می‌باشد.

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

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

مراحل آزمایش	مکش بافتی (kPa)	تورم (mm)	تغییر حجم (%)
۱	۲۰۰	۰,۴۰۲	۲,۰۱
۲	۱۵۰	۰,۹۰۱	۴,۵
۳	۱۰۰	۱,۱۲	۵,۶
۴	۵۰	۱,۳۱۶	۶,۵۸
۵	۰	۱,۳۶۴	۶,۸۲



شکل ۱۸ - نمودار درصد تورم در برابر مکش بافتی

Figure 18 - Swelling percentage against matric suction

در مدل سازی 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 مدل سازی عددی ۰/۶۳ به دست می آید. این درصد تورم ناشی از تغییر مکش خاک از ۱۳۰ kPa به ۱۰۰ kPa است که بر اساس رابطه ی ۹، درصد تورم در مکش ۱۳۰ kPa معادل ۰/۵ درصد تورم برای مکش بافتی ۱۰۰ kPa در جدول ۷، ۵/۶٪ است که اختلاف این دو درصد تورم برابر است با ۰/۶۰٪. تفاوت این عدد با درصد تورم ناشی از مدل سازی (درصد تورم مدل سازی = ۰/۶۳)، ۵٪ است که نشان از صحت مدل سازی و همخوانی آن با مطالعات آزمایشگاهی دارد.

$$\text{درصد تورم} = -4E - 07 y^3 + 5E - 07 y^2 - 0.0066 y + 6.8543 \quad (9)$$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به مدل سازی عددی پیرامون خاک اطراف یکی از چاه های گاز خانگیان سرخس پرداخته شد. با نتایج حاصل از مدل سازی چاه گاز و خاک اطراف آن با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی منطقه از ابتدای نیمه ی دوم سال ۱۳۹۷ تا انتهای نیمه ی اول سال ۱۳۹۸، میزان تورم خاک و نیروهای کششی ایجاد شده ناشی از آن در بدنه ی 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 بارش های رخ داده مکش بافتی قبل از بارش در خاک ۱۳۰ kPa بوده است. مدت زمان حدود ۳/۴ سال پس از اتمام سال بارانی زمان می برد تا بارش های یک سال پر بارش در عمق ۱۳ m خاک تاثیر تورمی کامل بگذارد و به جریان پایدار برسد. تورم آزاد خاک بر اثر این بارندگی سالانه معادل ۸/۴۹ cm است که برابر ۰/۶۳٪ 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، ۱۵ 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 ۱۳ متری وارد شده و مقدار آن برابر ۱۶۳ 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 خانگیان سرخس
- بررسی تاثیر موقعیت آب زیرزمینی بر تورم خاک و همچنین مدل‌سازی لایه‌ی آب زیرزمینی تحت فشار در منطقه

مراجع

- [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.
- [2] 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.
- [3] Baradaran, Sajed, and Mahmoud Ameri. "Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies." *Road* 31, no. 114 (2023): 53-70.
- [4] 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.
- [5] Huang, Runqiu, and W. U. Lizhou. "Stability analysis of unsaturated expansive soil slope." *Earth Science Frontiers* 14, no. 6 (2007): 129-133.
- [6] Avsar, Elif, Resat Ulusay, and Harun Sonmez. "Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay." *Engineering Geology* 105, no. 1-2 (2009): 24-31.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]Rajeev, Pathmanathan, and Jayantha Kodikara. "Numerical analysis of an experimental pipe buried in swelling soil." *Computers and Geotechnics* 38, no. 7 (2011): 897-904.
- [13]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.
- [14]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.
- [15]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.
- [16]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.
- [17]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.
- [18]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.
- [19]Dakshanamurthy, V., and V. Raman. "A simple method of identifying an expansive soil." *Soils and foundations* 13, no. 1 (1973): 97-104.
- [20]United States. Bureau of Yards, and Docks. *Building Maintenance: Structures*. US Government Printing Office, 1963.
- [21]McKeen, R. Gordon. *Design of airport pavements for expansive soils*. No. DOT/FAA/RD-81/25 Final Rpt. NTIS, 1981.
- [22]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.
- [23]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.
- [24]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.
- [25]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.

- [26] Karbalaee, 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.
- [27] 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.
- [28] Scanlon, Bridget R., Jean Phillippe Nicot, and Joel W. Massmann. "Soil gas movement in unsaturated systems." *Soil physics companion* 389 (2002): 297-341.
- [29] 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.
- [30] 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.

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

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 well body's steel material over time is crucial in preventing breakage due to soil swelling-induced tension.

Keywords: swelling soil, unsaturated soil mechanics, numerical modeling, Khangiran Sarakhs gas zone, gas well