

## بررسی تاثیر تغییرات مکش بافتی بر رفتار گود مهار شده در خاک متورم شونده

مریم منصوری<sup>۱</sup>، عالیه لیبب<sup>۲</sup>، علی اخترپور<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Emial: akhtarpour@um.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۲/۴]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۷/۲۷]

### چکیده

با توجه به نیاز روزافزون به ساخت و ساز، مسائل مربوط به گودبرداری و پایداری گود مورد اهمیت قرار گرفته است. یکی از عوامل منجر به ناپایداری گود، نفوذ آب به گود می باشد. نفوذ آب باعث کاهش مکش بافتی و در نتیجه کاهش مقاومت برشی و نیز افزایش حجم خاک در خاک های متورم شونده می شود. در این پژوهش گود مهار شده با دو روش شمع-انکر و شمع به تنهایی، در معرض عوامل تغییردهنده مکش بافتی مانند ترکیدگی لوله، چاه جذبی و شرایط آب و هوایی قرار گرفته است. با استفاده از نرم افزار SIGMA/W و آنالیز کوپل تأثیر همزمان تغییر در مکش بافتی و تغییر در تنش و کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به رفتار مخرب خاک های متورم شونده در شرایط غیراشباع، خاک مورد مطالعه در این پژوهش از نوع متورم شونده می باشد. نتایج نشان داد که افزایش رطوبت در خاک و در نتیجه کاهش مکش بافتی در خاک متورم شونده باعث افزایش نیرو در انکرها و لنگر در شمع می شود. همچنین میزان افزایش نیرو در انکرها در صورت مدل سازی ترکیدگی لوله و چاه جذبی بسیار بیشتر از شرایط تأثیر مرز آب و هوایی برای دو ماه پربارش از سال است. با افزایش فاصله چاه جذبی و ترکیدگی لوله از گود افزایش نیروی ایجاد شده در انکرها کاهش می یابد.

**واژگان کلیدی:** خاک غیراشباع، خاک متورم شونده، پایداری گود، تحلیل کوپل، چاه جذبی، ترکیدگی لوله، شرایط آب و هوایی

روش‌های پایداری گود و همچنین عوامل تهدیدکننده پایداری آن امری مهم می‌باشد. یکی از روش‌های پایداری گود استفاده از انکر است. از این روش به‌طور گسترده‌ای در مهندسی به منظور حفاظت در برابر زمین‌لغزش و سایر بلایای زمین‌شناسی استفاده می‌شود [1, 2]. پژوهشگران مطالعاتی روی انکرها با هدف بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل زاویه و طول مهاری انکر، تعداد و نیروی پیش‌تیدگی انکرها و ... انجام دادند و مقادیر بهینه‌ای برای این پارامترها به دست‌آوردند [1, 3, 4].

یکی دیگر از روش‌های پایدارسازی گود استفاده از شمع بتنی و فولادی در جداره گود می‌باشد. از این شمع‌ها به‌طور گسترده در مناطق شهری و صنعتی به عنوان یک سیستم نگه‌دارنده موقت یا دائمی استفاده می‌شود. مزیت اصلی این سیستم پایین بودن هزینه و ساخت سریع آن است [5]. جوهری و کلاتری در سال ۲۰۲۰، خرابی گود تقویت‌شده با شمع در خاک غیراشباع را مورد بررسی قرار دادند [5].

مکش بافتی که به عنوان اختلاف فشار هوای منفذی و فشار آب منفذی تعریف می‌شود، نقش عمده‌ای در رفتار مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع دارد. با کاهش مکش بافتی مقدار تنش مؤثر و مقاومت برشی کاهش می‌یابد؛ این امر باعث کاهش پایداری می‌شود [6-8]. طبق مطالعات انجام‌شده روی خاک غیراشباع توسط پژوهشگران، مسائل مربوط به خاک غیراشباع یکی از عواملی است که در پایداری گود دخیل می‌باشد؛ و پایداری گود در خاک غیراشباع ارتباط تنگاتنگی با تغییرات خواص خاک و پارامترهای مکش بافتی دارد [5, 7, 9].

تحقیقاتی روی خاک غیراشباع با هدف بررسی تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن خاک روی پارامترهای مقاومت برشی انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که اثرات تر و خشک‌کردن می‌تواند باعث ناپایداری شیروانی‌ها در حین و پس از باران شود [10]. [11]. به طور کلی نفوذ آب به نیمرخ خاک، مکش خاک و در نتیجه مقاومت برشی موجود را کاهش می‌دهد، در نتیجه مهم است که بتوان از ناحیه خاک غیراشباع در یک شیب با کنترل سطح آب زیرزمینی و شرایط مرزی جریان در سطح شیروانی به عنوان یک روش تثبیت شیب محافظت کرد [12]. در پژوهش

سابق مؤلفین، سعی شد تا عواملی که باعث نفوذ آب به داخل خاک می‌شود از جمله ترکیب لوله، چاه جذبی و لایه آرتزین را به عنوان عوامل مؤثر در پایداری گود مورد بررسی قرار گیرد [13]. چرخه‌های ناشی از عوامل آب و هوایی باعث ایجاد چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شوند و می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی خاک و عملکرد آن در کاربردهای مختلف ژئوتکنیکی تأثیر بگذارند [14]. بالاتر و همکاران مدل‌سازی این شرایط را با کمک SEEP/W و SLOPE/W انجام داده‌اند [15].

شکست‌های شیروانی ناشی از باران در خاک‌های متورم شونده به دلیل کاهش مقاومت برشی و افزایش حجم خاک می‌باشد. چسبندگی و وانایالی باهدف ارزیابی اثر تورم روی پایداری لایه سطحی یک شیروانی با خاک متورم‌شونده در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار SIGMA/W و SEEP/W انجام دادند؛ نتایج نشان داد که خاک متورم‌شونده تأثیر نامطلوبی بر پایداری شیروانی دارد [16].

تغییر در مکش بافتی و در نتیجه تورم خاک می‌تواند باعث افزایش نیرو در انکرها شود. در صورتی که این افزایش نیرو بیش از ظرفیت انکرها باشد، می‌تواند باعث خسارات جبران‌ناپذیری شود. همچنین افزایش حجم در قسمتی از خاک در صورت نامتوازن بودن می‌تواند منجر به آثار مخربی در سازه شود. با وجود مطالعات انجام شده روی تأثیر خاک متورم‌شونده در شرایط غیر اشباع بر پایداری شیروانی، اثر وجود این نوع خاک بر تغییرات نیروها در انکرها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. پس هدف از این پژوهش در نظر گرفتن اثر تورم بر تغییر نیروی انکرها و شمع و همچنین میزان تورم ایجاد شده در خاک می‌باشد. بدین منظور اثر وجودی یک چاه جذبی و ترکیب لوله آب و تغییر موقعیت آن‌ها و همچنین شرایط آب‌وهوایی بر روی افزایش نیروهای داخلی اجزای سازه‌ای یک گود تقویت‌شده با روش انکراژ و شمع با گذشت زمان به کمک تحلیل کوپل در نرم‌افزار SIGMA/W مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مشخصات مصالح

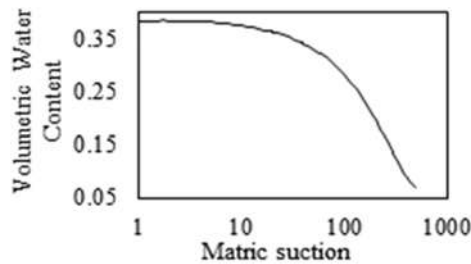


Fig. 1. swcc curve[17]

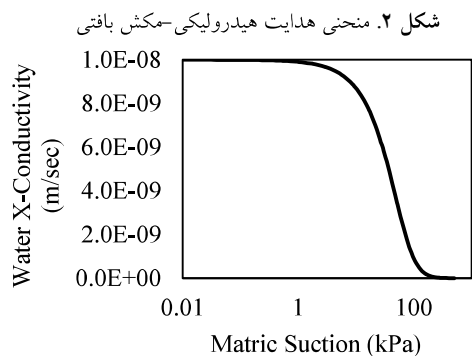


Fig. 2. Hydraulic conductivity-matric suction curve

خاک مورد بررسی در این پژوهش از منطقه خانگیان سرخس می‌باشد. مشخصات این خاک در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک متورم شونده [۱۷, ۱۸]

Value	Soil characteristics
18.37	Soil specific weight ( $\frac{KN}{m^3}$ )
23%	plasticity limit
42%	Liquid limit
25	(Kpa) cohesion
14	(°)Friction Angle
2.7	(Gs) specific density
19%	The percentage of field natural humidity
6.78%	Residual water content ( $\theta_r$ )
38.41%	Saturated water content ( $\theta_s$ )

Table 1. Properties of swelling soil[17, 18]

## ۲-۲- مدول متورم شوندگی خاک Eswell

در نرم‌افزار 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 می‌کند. پس برای انجام محاسبات در این نرم‌افزار نیاز به دو مدول می‌باشد. در مرحله اول که مدلسازی شرایط درجا و گودبرداری و نصب انکرها می‌باشد، مقدار مدول برابر ۱۸۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته می‌شود. ولی در مرحله اعمال تغییرات رطوبتی به خاک و برای شبیه‌سازی تورم باید مدول متورم شوندگی که در آن تغییر در تنش مؤثر به تغییر در کرنش‌های حجمی ارتباط داده می‌شود؛ استفاده شود. در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی رفتار تورمی خاک در نرم‌افزار، رابطه‌ای توسط مؤلفین بین مدول متورم شوندگی خاک و تنش مؤثر به کمک داده‌های مرجع [17] ارائه شده است و روند آن در ادامه ذکر شده است.

در مرجع مذکور آزمایش تحکیم یک‌بعدی ترزاقی به صورت غیراشباع با ثابت نگه‌داشتن سربار و اعمال مکش‌های بافتی مختلف به خاک انجام شد. مطابق رابطه ۱ برای منحنی مشخصه

## ۲-۱- ویژگی‌های هیدرولیکی

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با دو نمودار منحنی مشخصه آب-خاک و همچنین نمودار هدایت هیدرولیکی در برابر مکش بافتی مشخص می‌شود. مقدار  $10^{-6}$  سانتی‌متر بر ثانیه به عنوان نفوذپذیری اشباع برای این خاک که از جنس رس می‌باشد در نظر گرفته شده است [19]. نمودار هدایت هیدرولیکی در برابر مکش بافتی، با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع انتخاب شده و منحنی مشخصات آب-خاک توسط رابطه ونجن‌اشتن [20] تخمین زده می‌شود. نمودارهای منحنی مشخصه آب-خاک و هدایت هیدرولیکی-مکش بافتی در شکل (۱ و ۲) آورده شده است.

شکل ۱. منحنی مشخصه آب-خاک [۱۷]

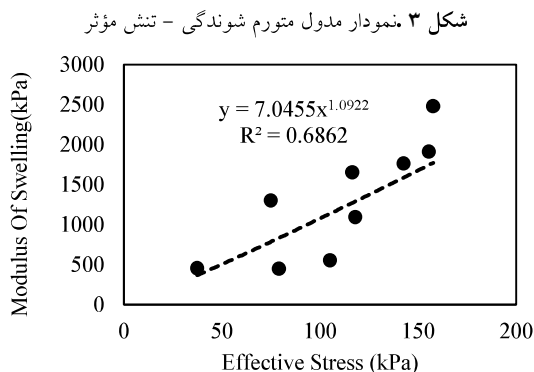


Fig. 3. Diagram of swelling modulus - effective stress

### ۳- درستی آزمایشی

به منظور اطمینان از درستی مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق یکی از آزمایش‌های تحکیم انجام شده توسط نادای یزدی و همکاران [17]، با استفاده از تک المان در حالت متقارن محوری (Axisymmetric) با نرم‌افزار SIGMA/W مدل‌سازی شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود؛ هندسه مدل عددی یک تک المان با ابعاد ۱ در ۱ متر مربع بوده و مرزهای جانبی مدل در جهت افق و مرز تحتانی مدل در جهت قائم بسته شده‌است. در این مدل سربار معادل ۲۵ کیلوپاسکال با مکش بافتی اولیه ۲۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. در مرحله بعد با اعمال تابع E (که در بخش ۲ استخراج شد) به مصالح و تغییرات مکش از مقدار ۲۰۰ کیلوپاسکال به ۱۰۰ کیلوپاسکال تورم در این نمونه شبیه‌سازی شده است. مطابق جدول (۲) میزان درصد کرنش افزایش حجم در مدل عددی معادل ۳/۱۱۹٪ بوده که در تطبیق با مرجع [17] با شرایط مشابه می‌باشد.

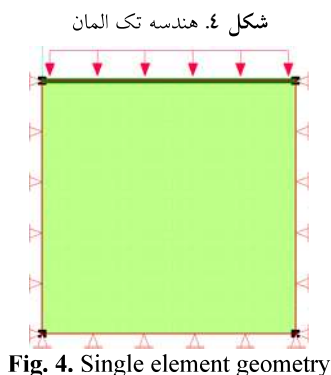


Fig. 4. Single element geometry

می‌توان درصد رطوبت حجمی مربوط به مکش‌های بافتی مورد نظر را محاسبه کرد [21].

$$\theta = 0.0001\psi_m^2 - 0.1133\psi_m + 38.522 \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\psi_m$  مکش بافتی و  $\theta$  درصد رطوبت حجمی می‌باشد. و با توجه به رابطه ونجن اشتن Van Genuchten می‌توان پارامتر تنش مؤثر ( $\chi$ ) را به دست آورد [20].

$$\chi = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

که در این رابطه  $\theta$  درصد رطوبت حجمی،  $\theta_r$  درصد رطوبت ماندگار و  $\theta_s$  درصد رطوبت اشباع است.

در ادامه به کمک رابطه زیر مقدار تنش مؤثر برای هر مکش بافتی و سربار مشخص محاسبه می‌شود [8]. در اینجا ترم اول نشان‌دهنده سربار موجود و ترم دوم ضرب پارامتر تنش مؤثر که در رابطه (۲) بیان شد در مکش بافتی می‌باشد.

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_x) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $\sigma'$  تنش مؤثر،  $\sigma_n$  تنش کل،  $u_a$  فشار هوای حفره‌ای،  $u_w$  فشار آب حفره‌ای،  $\chi$  پارامتر تنش مؤثر می‌باشد. در ادامه میزان مدول متورم شوندگی با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$m_v = \frac{3(1 - 2\nu)}{E} = \frac{\left(\frac{\Delta H}{H_0}\right)}{\Delta\sigma'} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $m_v$  ضریب قابلیت فشردگی حجمی،  $\nu$  ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته،  $\Delta H$  تغییرات ضخامت،  $H_0$  ضخامت اولیه،  $\Delta\sigma'$  تغییرات تنش مؤثر می‌باشد. مدول متورم شوندگی محاسبه شده بین دو تنش مؤثر به تنش مؤثر میانگین اختصاص داده می‌شود. در ادامه با حذف نتایجی که موجب زیاد شدن خطا می‌شود نمودار مدول متورم شوندگی در برابر تنش مؤثر مطابق شکل (۳) به دست می‌آید. بدیهی است این مدول به‌طور کلی با مفهوم مدول الاستیک خاک در بارگذاری متفاوت است و اندازه آن کاملاً به میزان خاصیت متورم شوندگی خاک بستگی دارد. معادله حاصله برای تحلیل تغییر شکل ناشی از تغییر مکش به نرم‌افزار معرفی شده است.

جدول ۲. مقایسه مقدار محاسبه شده و آزمایش شده

Time (d)	Y-Displacement (m)	Calculated strain percentage	Experimental strain percentage
0	0		
1	-0.22344	3.119	3.11
2	-0.19225		

Table 2. Comparison of calculated and tested value

## ۴- مدل سازی عددی

به منظور بررسی اثر تغییرات مکش بافتی بر گود پایدار شده با انکر از نرم افزار SIGMA/W استفاده شده است. مراحل ساخت گود با آنالیز بارگذاری-تغییر شکل<sup>۱</sup> و تغییر مکش بافتی هم زمان با تغییر شکل ها با کمک آنالیز کوپل<sup>۲</sup> مدلسازی شده است. آنالیز کوپل در اینجا به مفهوم جفت شدن انتقال آب و رفتار تنش- کرنش برای شبیه سازی فشار آب حفره ای گذرا و تغییر شکل (یعنی تحکیم) ناشی از بارگذاری و/یا باربرداری و/یا تغییرات در شرایط هیدرولیکی می باشد [22]. نرم افزار Geostudio به منظور آنالیز کوپل در شرایط خاک اشباع-غیر اشباع از رابطه زیر استفاده می کند:

$$\{\delta\sigma\} = [D']\{\delta\varepsilon\} + \{m\}\alpha\delta u_w \quad (5)$$

که:

$$\{m\}^T = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\} \quad (6)$$

که در آن  $\{\delta\sigma\}$  و  $\{\delta\varepsilon\}$  بردارهای متشکل از شش افزایش تنش و شش افزایش کرنش هستند.  $[D']$  ماتریس سختی تنش موثر،  $\delta u_w$  تغییرات فشار آب حفره ای و  $\{m\}$  بردار پارامترهای حالت است. ماتریس  $\{m\}^T$  شامل یک‌هایی است که در سه موقعیت اول قرار دارند زیرا فشار آب به صورت ایزوتوپی عمل می کند. سه موقعیت آخر  $\{m\}^T$  صفر هستند زیرا آب نمی تواند تنش برشی را تحمل کند. ضریب  $\alpha$  به طور شهودی بین ۰ و ۱ بسته به درجه اشباع متفاوت است. ضریب  $\alpha$  برابر با درجه اشباع مؤثر در نظر گرفته شده است [20]:

$$\alpha = S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

در رابطه فوق  $\theta_w$  درصد حجمی رطوبت خاک،  $\theta_r$  درصد حجمی رطوبت پسماند خاک و  $\theta_s$  درصد حجمی رطوبت

اشباع خاک می باشد. ابعاد مدل  $54m \times 36m$  بوده و سطح آب زیرزمینی در ۳۶ متری زمین در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه مکش در خاک به صورت هیدرواستاتیک با بیشینه مکش ۲۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. در این پژوهش دو نوع مدل سازی انجام شده است. مدل نوع یک، گودی به عمق ۱۲ متر که به وسیله شمع و چهار ردیف انکر پایدار شده است. مدل نوع دو، گودی است با همان مشخصات که تنها به وسیله شمع پایدار شده است.

## مدل یک

مدل ۱ شامل یک گود پایدار شده با شمع و چهار ردیف انکر به فواصل افقی دو متر و قائم سه متر می باشد. به منظور مدل سازی این حالت ابتدا آنالیز درجا انجام شده است. سپس توسط آنالیز بار-تغییر شکل لایه اول خاک برداشته شد. در مرحله بعد انکر فعال سازی شده و نیروی کششی به آن اختصاص داده شد. این مراحل به صورت لایه به لایه تا آخرین انکر انجام شد. طراحی انکر مطابق استاندارد FHWA-IF-99-015 [23] انجام شده است و مشخصات انکرها در جدول (۳) آورده شده است. شمع مورد استفاده 2IPE24 بوده و طول آن ۱۴ متر است. فاصله افقی شمع ها نیز دو متر می باشد.

جدول ۳. مشخصات انکرها

Anchor angle	Tensile capacity (kN)	The length of the unbounded part	The length of the bounded part	Anchor number
10	450	11	12	1
10	450	9	12	2
10	450	7	12	3
10	600	5	12	4

Table 2. Properties of anchors

## مدل ۲

مدل شامل یک گود پایدار شده با شمع به فواصل افقی دو متر می باشد. در مدل سازی این حالت مشابه حالت قبل ابتدا آنالیز درجا انجام شده و سپس گودبرداری انجام می شود. شمع مورد استفاده در این مدل یک شمع بتنی با مقطع دایره ای به قطر یک متر و طول ۱۴ متر بوده و مدول الاستیسیته آن ۲۸ مگاپاسکال است.

زمان به صورت سینوسی وارد شده است. بدین شکل که بیشینه دما در ساعت ۱۳ و کمینه دما در ساعت ۱ بامداد اعمال می‌شود. به منظور محاسبه تابش خورشیدی عرض جغرافیایی سرخس (۳۶/۵) زمان شروع تحلیل (اول فروردین ماه ۱۳۹۸) و ضریب آلبدو<sup>۴</sup> منطقه اعمال شده است. انعکاس انرژی تابیده به سطح زمین، آلبدوی زمین گفته می‌شود و مقدار آن با توجه به پژوهش زهرا حجازی زاده و همکاران ۰/۲۲ در نظر گرفته شده است [25]. در این پژوهش شرایط آب و هوایی دو ماه پربارش فروردین و اردیبهشت در سال ۱۳۹۸ سرخس مورد مطالعه قرار گرفته است و نمودارهای آن در شکل (۵) مشاهده می‌شود.

شکل ۵. متوابع آب و هوایی شامل الف) دما-زمان ب) بارندگی-زمان ج)

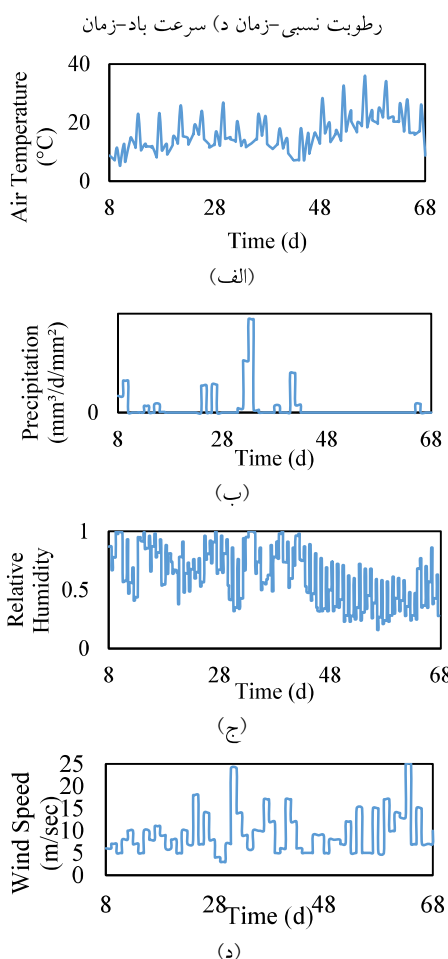


Fig. 5. Climate functions include a) temperature-time b) precipitation-time c) relative humidity-time d) wind speed-time

در ادامه شرایط هیدرولیکی برای سه حالت اعمال شرایط مرزی آب و هوایی، ترکیبگی لوله و چاه جذبی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این مرحله از آنالیز کوپل به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان شرایط هیدرولیکی و تغییر شکلی استفاده شده است. در این پژوهش ترکیبگی لوله و همچنین چاه جذبی مطابق روش متداول اعمال مرز فشار آب، برای هر دو مدل ۱ و ۲ شبیه سازی شده است و شرایط آب و هوایی با اعمال مرز Climate تنها برای مدل ۱ شبیه‌سازی شده است.

### ۱-۴- مدل‌سازی تأثیر شرایط آب و هوایی (شرایط مرزی Climate)

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 دو ماه پربارش شهر سرخس از روش پنمان-مونیت<sup>۳</sup> برای محاسبات تبخیر و تعرق استفاده شد. معادله پنمان-مونیت تبخیر و تعرق بالقوه را به دو ترم تشعشع و آئروپنایمیکی جدا می‌کند و یک مدل ترکیبی در نظر گرفته می‌شود (موازنه انرژی و روش آئروپنایمیکی) [24]:

$$q_{PET} = q_{PET}^{rad} + q_{PET}^{aero} = \frac{1}{h_{fg}} \left[ \frac{\Gamma(q_n - q_g)}{\Gamma + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} + \frac{p_a c_{sa} (p_{v0}^0 - p_v^0) / r_a}{\Gamma + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right] \quad (8)$$

که در آن  $q_{PET}$  شار تبخیر بالقوه،  $h$  گرمای نهان تبخیر،  $q_n$  تشعشع خالص،  $q_g$  شار حرارتی زمین،  $p_a$  میانگین چگالی هوا (اتمسفرا)،  $c_{sa}$  گرمای ویژه هوای مرطوب،  $(p_{v0}^0 - p_v^0)$  کمبود فشار بخار،  $P_{v0}^a$  فشار بخار اشباع در دمای متوسط هوا،  $P_{v0}^a$  فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع مرجع،  $r_c$  مقاومت در سطح حجیم (سایبان زراعی)،  $r_a$  مقاومت آئروپنایمیکی می‌باشد.

پارامترهای ورودی برای روش پنمان-مونیت 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 صرف‌نظر شده است. تابع دما در برابر

## ۴-۲- مدل‌سازی ترکیب‌گی لوله آب و چاه جذبی

مدل‌سازی لوله آب در گود به صورت یک ناحیه دایره‌ای شکل با قطر کوچک صورت گرفته است. تحلیل ترکیب‌گی لوله به صورت Coupled Stress/PW و در زمان یک سال انجام شده است. شرایط مرزی برای لوله از نوع هد فشار آب<sup>۵</sup> و با توجه به فشار آب شهری مقدار ۲۰۰ مگا پاسکال تعریف شده است. چاه جذبی در گود با کمک دستور خط<sup>۶</sup> و به عمق ۱۲ متر (عمق پرشدگی ۱۰ متر) مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی چاه جذبی از قطر چاه در برابر ابعاد گود صرف‌نظر شده است. شرایط مرزی برای چاه از نوع هد کل آب<sup>۷</sup> به مقدار ۳۴ متر می‌باشد. تحلیل چاه جذبی به صورت کوپل تنش و فشار آب حفره‌ای<sup>۸</sup> و در زمان یک سال انجام شده است. برای بررسی تأثیر موقعیت لوله و چاه جذبی در پایداری گود، در سه موقعیت متفاوت، یعنی داخل گوه گسیختگی، روی خط گوه گسیختگی و در نهایت خارج از آن در نظر گرفته شده است. در شکل (۶ و ۷) به ترتیب موقعیت قرارگیری لوله‌ها و چاه جذبی مشاهده می‌شود.

شکل ۶. موقعیت ترکیب‌گی لوله در مختصات متفاوت

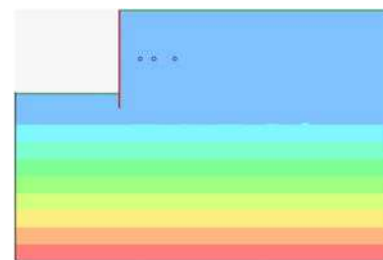


fig. ۶ Pipe burst position in different locations

شکل ۷. موقعیت چاه جذبی در مختصات متفاوت

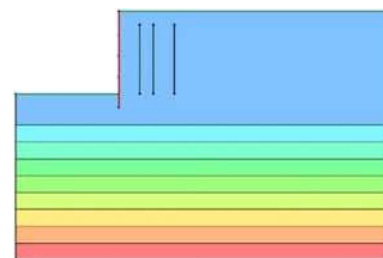


fig. ۷ The position of the absorption well in different locations

## ۵- نتیجه‌گیری و بحث

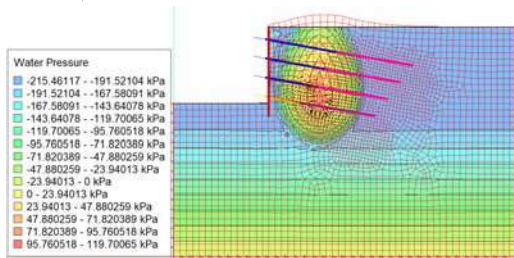
در این بخش به تحلیل و بررسی اثر هر یک از حالات پر شدن چاه جذبی، ترکیب‌گی لوله و شرایط آب‌وهوایی در پایداری گود پرداخته شده است. پارامترهای ممان خمشی دیواره گود، نیروی برشی انکرها، فشار آب حفره‌ای در بالای گود و حداکثر مقدار جابه‌جایی افقی و قائم روی سطح زمین برای بررسی پایداری گود مورد مقایسه قرار گرفتند.

## ۵-۱- تأثیر چاه جذبی در عملکرد گود

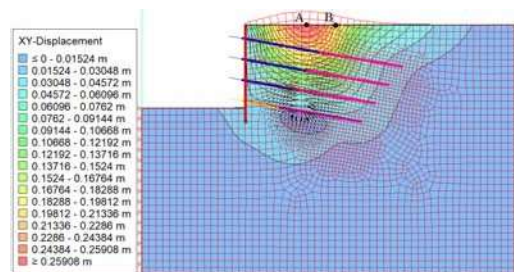
در شکل‌های (۸ و ۹) به ترتیب کانتورهای فشار آب حفره‌ای و جابه‌جایی کلی مدل در روز ۳۶۵ ام آورده شده است؛ با این تفاوت که شکل (۸) مربوط به روش انکراژ (مدل یک) و شکل (۹) مربوط به سیستم شمع (مدل دو) می‌باشد. نقاط A و B به ترتیب مربوط به بیشینه جابه‌جایی قائم و افقی در مدل یک و نقاط C و D به ترتیب مربوط به بیشینه جابه‌جایی افقی و قائم در مدل دو می‌باشد.

شکل ۸. کانتور الف) کانتور فشار آب حفره‌ای مدل ۱ در روز ۳۶۵ ام. ب)

کانتور جابه‌جایی کلی مدل ۱ در روز ۳۶۵ ام



(الف)



(ب)

fig. ۸ Contour. A) pore water pressure contour model 1 on the 365th day. b) The contour of the overall displacements of model 1 on the 365th day

به دلیل اینکه انکرها از حرکت بالای گود جلوگیری می‌کنند؛ بیشترین جابه‌جایی افقی در سیستم انکراژ کمی قبل از چاه رخ

- 5 Head Water Pressure
- 6 Line
- 7 Water Total Head
- 8 CoupledStress/PWP



شکل ۱۰. نمودار ممان خمشی- عمق دیواره گود برای گود پایدارسازی به روش انکراژ در مجاورت چاه جذبی. الف) ۳ متر، ب) ۵ متر، ج) ۸ متر از جدارگود

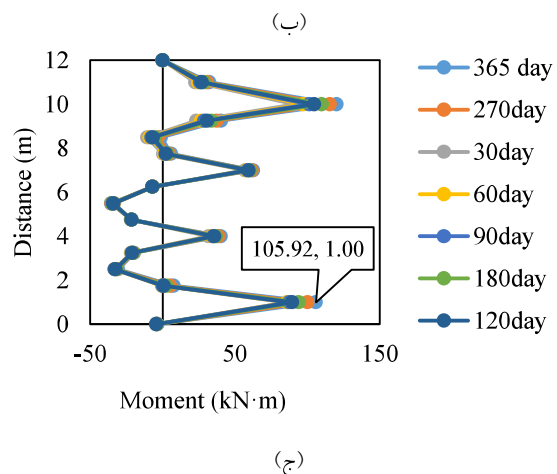
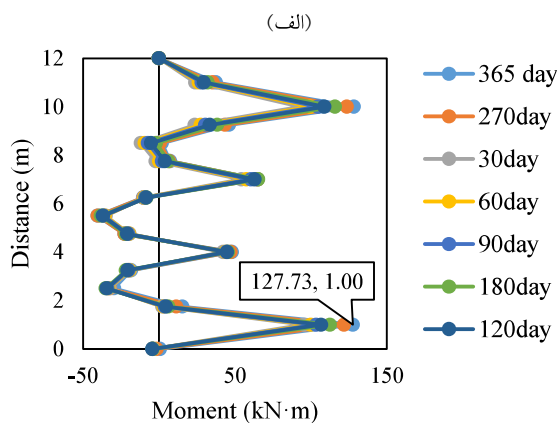
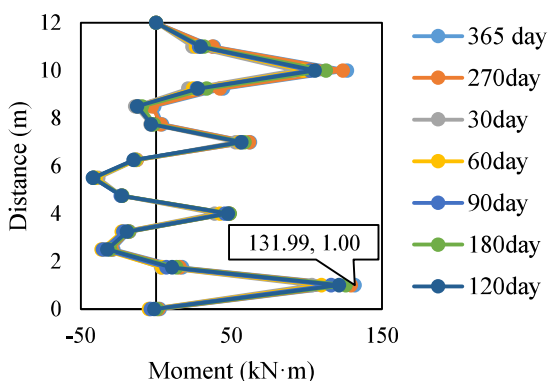


Fig. ۱۰ Diagram of bending moment-depth of the excavation wall for the stabilization excavation by anchoring method in the vicinity of the absorption well. a) 3 meters, b) 5 meters, c) 8 meters from Jadhargod

مقادیر ممان خمشی برای روش پایدارسازی با شمع بیشتر از ۲ برابر روش انکراژ می‌باشد. علت این امر این است که در مدل

می‌دهد. ولی در پایداری به روش شمع؛ بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی در بالای گود رخ می‌دهد.

شکل ۹. کانتور. الف) کانتور فشار آب حفره‌ای مدل ۲ در روز ۳۶۵ م. ب) کانتور جابه‌جایی های کلی مدل ۱ در روز ۳۶۵ م

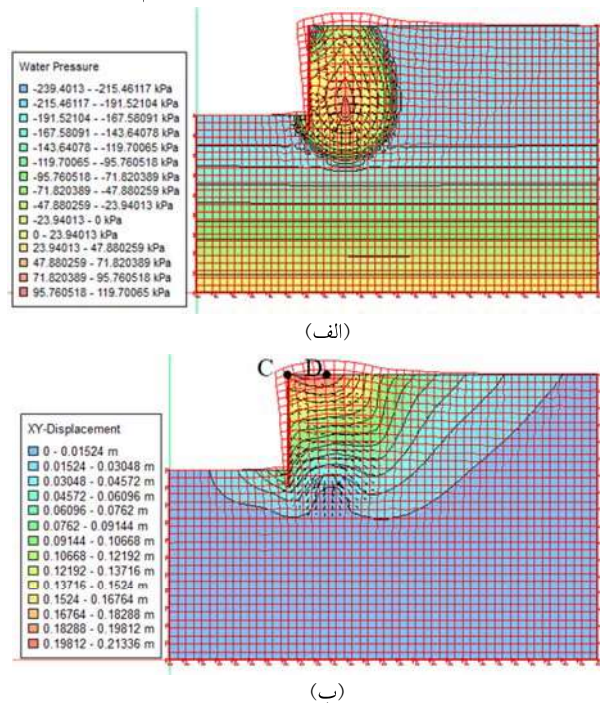


Fig. 8. Contour. A) pore water pressure contour model 1 on the 365th day. b) The contour of the overall displacements of model 1 on the 365th day

شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودارهای لنگر خمشی عضو قائم در مدل ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود در هر دو مدل با افزایش فاصله چاه از جداره گود میزان لنگر ایجاد شده در عضو قائم کاهش می‌یابد. تفاوت دو مدل در این است که در مدل یک همواره با گذر زمان مقدار لنگر افزایش می‌یابد در حالیکه در مدل دو تغییرات لنگر با زمان به موقعیت چاه جذبی بستگی دارد. بدین صورت که با افزایش فاصله چاه از دیواره گود تأثیر زمان بر تغییرات ممان کم می‌شود و در فاصله ۸ متری چاه از جداره گود، ممان مستقل از زمان می‌باشد. علت این امر می‌تواند به خاطر حرکت آزادانه شمع در مدل دو و در نتیجه تأثیر گذاری کمتر چاه در فاصله دور از گود بر ممان خمشی باشد. در فواصل سه‌متری مقدار ممان تا ۹۰ روز افزایش و پس‌از آن کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار ممان برای فاصله پنج‌متری در ۱۸۰ روز رخ می‌دهد.



جابه‌جایی‌های افقی در حالت بدون انکر، منفی می‌باشد و حرکت خاک به سمت گود می‌باشد. در صورتی‌که در حالت پایدارسازی با انکر مقادیر بیشترین جابه‌جایی مقادیر مثبت است. علت این امر این است که انکرها از حرکت خاک به سمت گود جلوگیری می‌کنند. وجود چاه به عنوان یک عامل مخرب در ناحیه متصل باعث کاهش مقاومت سیستم خاک و انکر می‌شود. بنابراین هرچه چاه از گود فاصله گرفته و به ناحیه متصل نزدیک‌تر شود؛ میزان جابه‌جایی‌های افقی به سمت گود (جابه‌جایی افقی منفی) افزایش می‌یابد. در این حالت گود جابه‌جایی منفی را نیز تجربه می‌کند که در فاصله هشت‌متری برابر ۷ سانتی‌متر و در فاصله ۵ متری ۴/۵ و در ۳ متری برابر ۴ سانتی‌متر می‌باشد.

شکل ۱۲. بیشترین جابه‌جایی‌های الف) قائم در مقابل زمان، ب) افقی در مقابل زمان

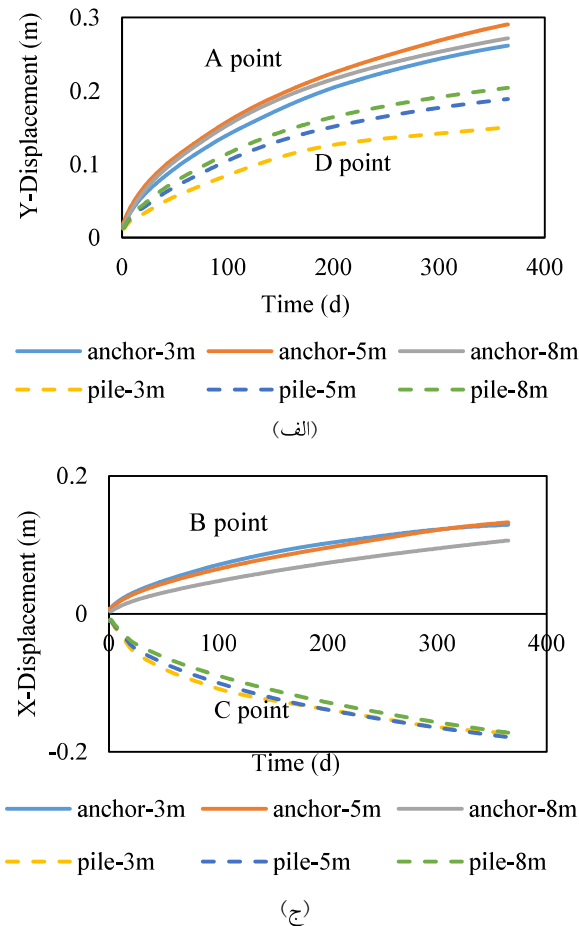


Fig. 12. Maximum displacements a) vertical displacements versus time, b) horizontal displacements versus time

یک، بخشی از نیروی وارد شده توسط انکرها تحمل می‌شود. درحالی‌که در مدل دو تمام نیرو به شمع وارد می‌شود.

شکل ۱۱. نمودار ممان خمشی - عمق دیواره گود برای گود پایدارسازی به روش شمع در مجاورت چاه جذبی. الف) ۳ متر، ب) ۵ متر، ج) ۸ متر از جدار گود

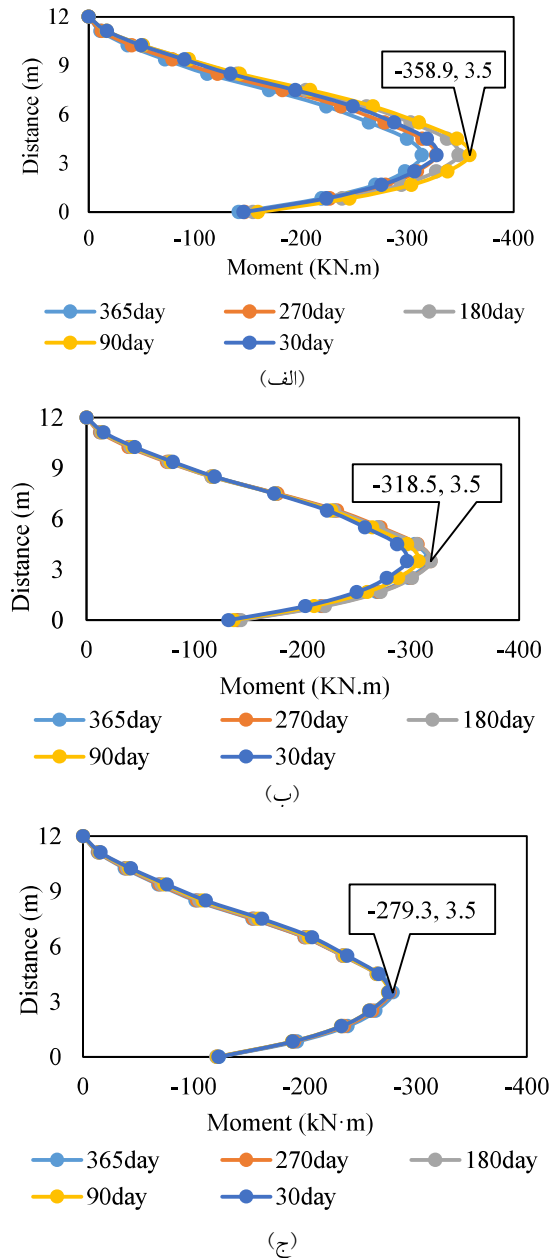


Fig. 11. Diagram of bending moment-depth of the excavation wall for the stabilization pit by the pile method in the vicinity of the absorption well. a) 3 meters, b) 5 meters, c) 8 meters from excavation wall

شکل (۱۲) جابه‌جایی‌های افقی و قائم مدل یک و دو را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، کلیه مقادیر

مقادیر جابه‌جایی قائم نیز برعکس می‌باشد؛ زیرا انکر مانع جابه‌جایی افقی شده و مقدار جابه‌جایی قائم افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در حالت گود بدون انکر با افزایش فاصله چاه از جداره گود مقدار جابه‌جایی قائم بیشتر می‌شود چرا که وقتی چاه به گود نزدیک باشد بخش بیشتری از نیروی ایجاد شده صرف جابه‌جایی افقی گود می‌شود. ولی در حالت با انکر با افزایش فاصله چاه از جداره گود تا ۵ متر مقدار جابه‌جایی بیشتر و سپس کاهش می‌یابد شکل (۱۱ الف)، جابه‌جایی افقی در هر دو حالت با افزایش فاصله چاه از جداره گود افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ زیرا چاه با فاصله ۵ متر و ۳ متر داخل و روی گوه گسیختگی قرار دارد و شرایط بحرانی‌تری نسبت به چاه با فاصله ۸ متری که بیرون از گوه قرار دارد، دارند.

مطابق شکل (۱۳) با افزایش فاصله چاه از گود، افزایش نیروی محوری انکرها کاهش می‌یابد. علت این امر قرارگیری چاه در گوه گسیختگی در نزدیکی شمع می‌باشد. مطابق شکل (۱۴) هرچه فاصله چاه از گود کمتر باشد، درصد افزایش نیروی تمامی انکرها به جز انکر ردیف اول افزایش می‌یابد. علت استثنا بودن ردیف اول انکر را می‌تواند این گونه تفسیر نمود که فاصله کم چاه از لبه انکر باعث می‌شود که نیرو به صورت کامل در انکر بسیج نشود.

شکل ۱۴. درصد افزایش نیروی انکرها در صورت وجود چاه جذبی

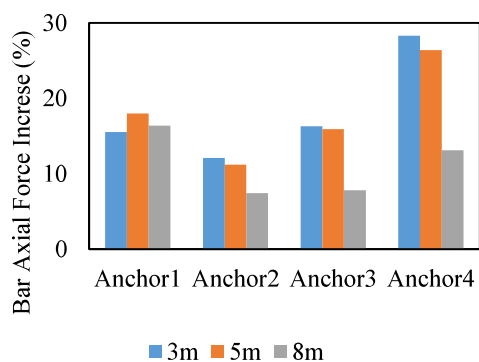


fig. 14. The percentage of increase in the force of anchors in the presence of an absorption well

## ۲-۵- تأثیر ترکیب لوله بر عملکرد گود

در ادامه به بررسی تأثیر ترکیب لوله در سه مکان مختلف داخل گوه گسیختگی، روی گوه گسیختگی و خارج از آن بر

جابه‌جایی‌های افقی در حالت بدون انکر بحرانی‌تر و بیشتر از حالت با انکر می‌باشد.

شکل ۱۳. نمودار نیروی محوری انکرها در برابر زمان الف) انکر ۱ ب) انکر ۲ ج) انکر ۳ د) انکر ۴

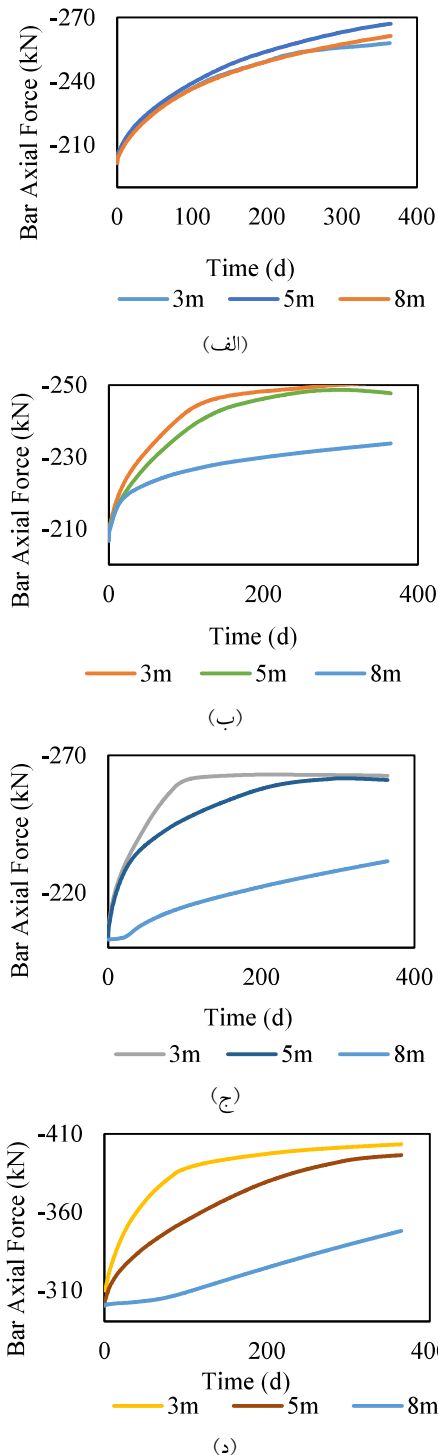
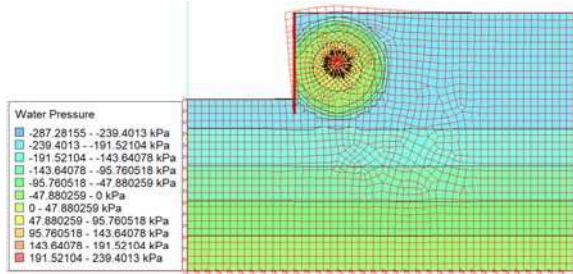


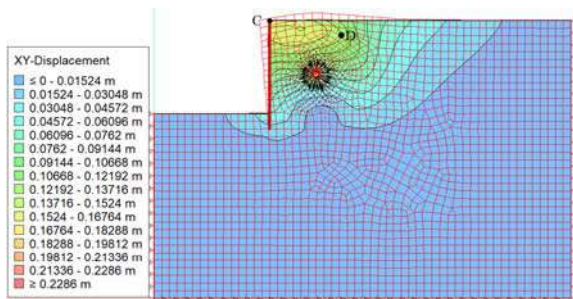
fig. 13. Diagram of axial force of anchors against time a) Anchor 1 b) Anchor 2 c) Anchor 3 d) Anchor 4

یابد که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌گردد که این اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش فاصله لوله از گود میزان فشار آب حفره ای و در نتیجه لنگر وارد بر شمع کاهش می‌یابد.

شکل ۱۶. الف) کانتور فشار آب حفره‌ای مدل ۲ در روز ۳۶۵ ام. ب) کانتور جایه جایی های کلی مدل ۲ در روز ۳۶۵ ام



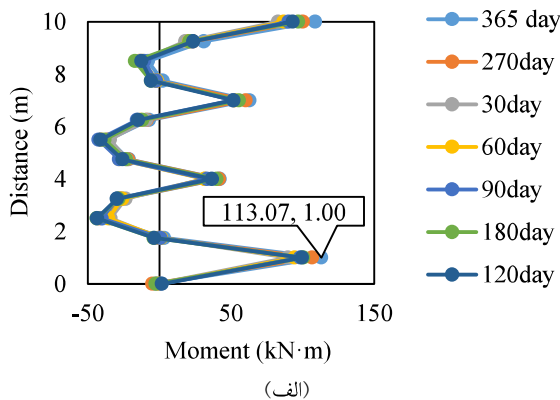
(الف)



(ب)

Fig. 16. A) model 2 pore water pressure contour on the 365th day. b) The contour of the overall displacements of model 1 on the 365th day

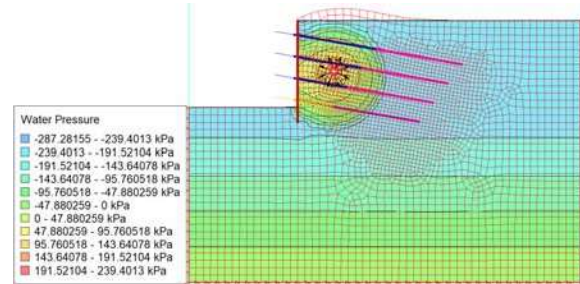
شکل ۱۷. نمودار ممان خمشی شمع در گود پایدار شده با شمع و انکر در مجاورت ترکیبگی لوله به فواصل الف) ۳ متر ب) ۵ متر ج) ۸ متر از گود



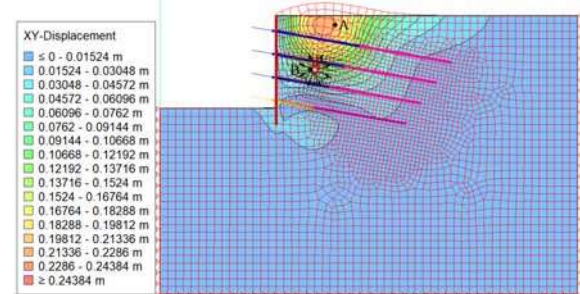
(الف)

عواملی چون لنگر وارد بر شمع، نیروی محوری انکرها و جابه‌جایی‌های افقی و قائم پرداخته می‌شود. در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) به ترتیب کانتورهای فشار آب حفره ای و جابه‌جایی کلی مدل در روز ۳۶۵ ام آورده شده است؛ با این تفاوت که شکل (۱۵) مربوط مدل یک و شکل (۱۶) مربوط به مدل دو می‌باشد. نقاط A و B به ترتیب مربوط به بیشینه جابه‌جایی قائم و افقی در مدل یک و نقاط C و D به ترتیب مربوط به بیشینه جابه‌جایی افقی و قائم در مدل دو می‌باشد. بیشترین جابه‌جایی افقی در مدل یک کمی قبل از چاه رخ می‌دهد. ولی مدل دو حداکثر مقدار جابه‌جایی افقی در بالای گود رخ می‌دهد. علت این مسئله جلوگیری انکرها از حرکت افقی بالای گود است.

شکل ۱۵. کانتور. الف) کانتور فشار آب حفره‌ای مدل ۱ در روز ۳۶۵ ام. ب) کانتور جایه جایی های کلی مدل ۱ در روز ۳۶۵ ام



(الف)



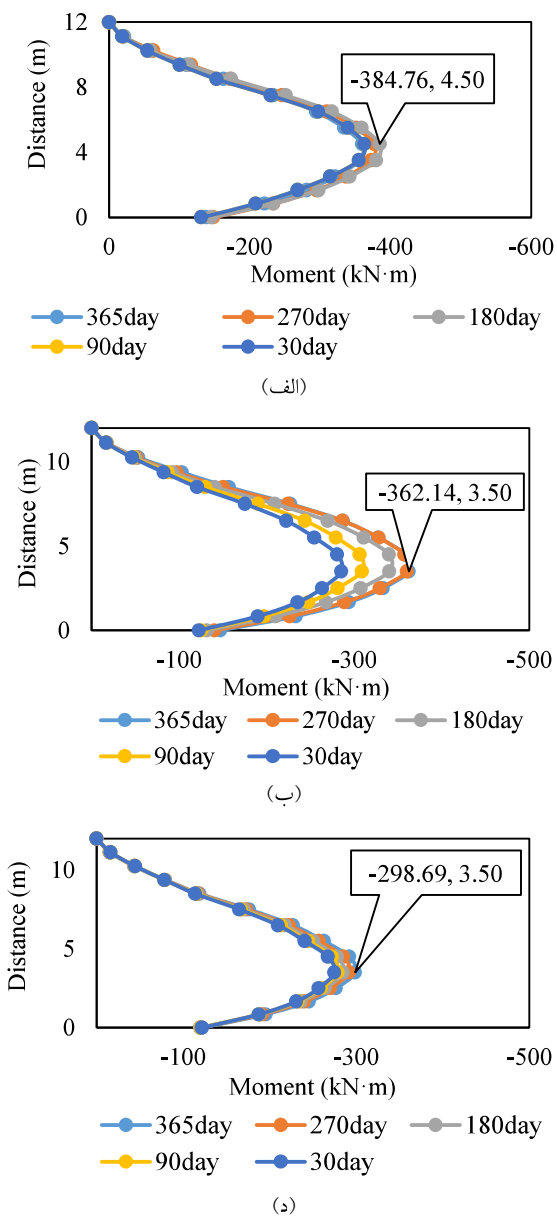
(ب)

Fig. 15. Contour. A) Model 1 pore water pressure contour on the 365th day. b) The contour of the overall displacements of model 1 on the 365th day

شکل ۱۷ نشان‌دهنده‌ی لنگر وارد بر شمع در یک گود پایدار شده با انکر می‌باشد. از آنجا که با گذر زمان میزان فشار آب حفره ای افزایش می‌یابد، لنگر وارد بر شمع نیز باید افزایش

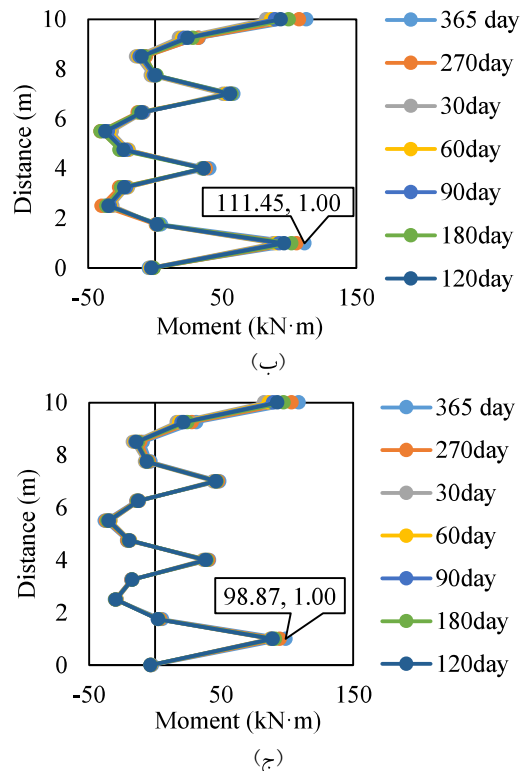
می‌افتد و بیشترین جابه‌جایی افقی در سمت چپ لوله رخ می‌دهد.

شکل ۱۸. نمودار ممان خمشی شمع در گود پایدار شده با شمع در مجاورت ترکیبگی لوله به فواصل الف) ۳ متر ب) ۵ متر ج) ۸ متر



**Fig. 18.** Diagram of the bending moment of the pile in the excavation stabilized with the pile in the vicinity of the pipe burst at distances a) 3 meters b) 5 meters c) 8 meters

مطابق شکل (۱۹) با دور شدن از گود از فاصله معینی به بعد تاثیر گود از بین رفته و جابه‌جایی قائم ثابت می‌ماند. این فاصله برای گود پایدار شده با انکر و گود پایدار شده با شمع



**fig. 17.** Diagram of the bending moment of the pile in the excavation stabilized with the pile and anchor in the vicinity of the pipe burst at distances a) 3 meters b) 5 meters c) 8 meters from the excavation

شکل (۱۷) لنگر وارد بر شمع یک گود پایدار شده با شمع را نشان می‌دهد. فاصله لوله از گود بر تغییرات فشار آب حفره‌ای با زمان و در نتیجه تغییرات لنگر با زمان تاثیر گذار است. مطابق شکل (۱۸) تغییرات لنگر با زمان به فاصله لوله از گود بستگی دارد. همچنین با توجه به این شکل می‌توان دریافت با افزایش فاصله لوله از گود میزان لنگر وارد بر شمع کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های (۱۷ و ۱۸) می‌توان دریافت که مقدار لنگر شمع گود پایدار شده با شمع و انکر کمتر از گود پایدار شده با شمع است. علت این امر این است که انکر بخشی از نیروی وارد شده ناشی از ترکیبگی لوله را به خود جذب می‌کند.

در گود پایدار شده به کمک شمع، بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی در بالای گود و بیشترین مقدار جابه‌جایی قائم در پایین لوله رخ می‌دهد. در صورت استفاده از انکر در پایدارسازی، انکرها از حرکت بالای گود جلوگیری می‌کنند از این رو بیشترین جابه‌جایی قائم در نزدیکی سطح زمین و کمی قبل از لوله اتفاق

شکل ۲۰. نمودار نیروی محوری انکرها در برابر زمان الف) انکر ۱ ب)

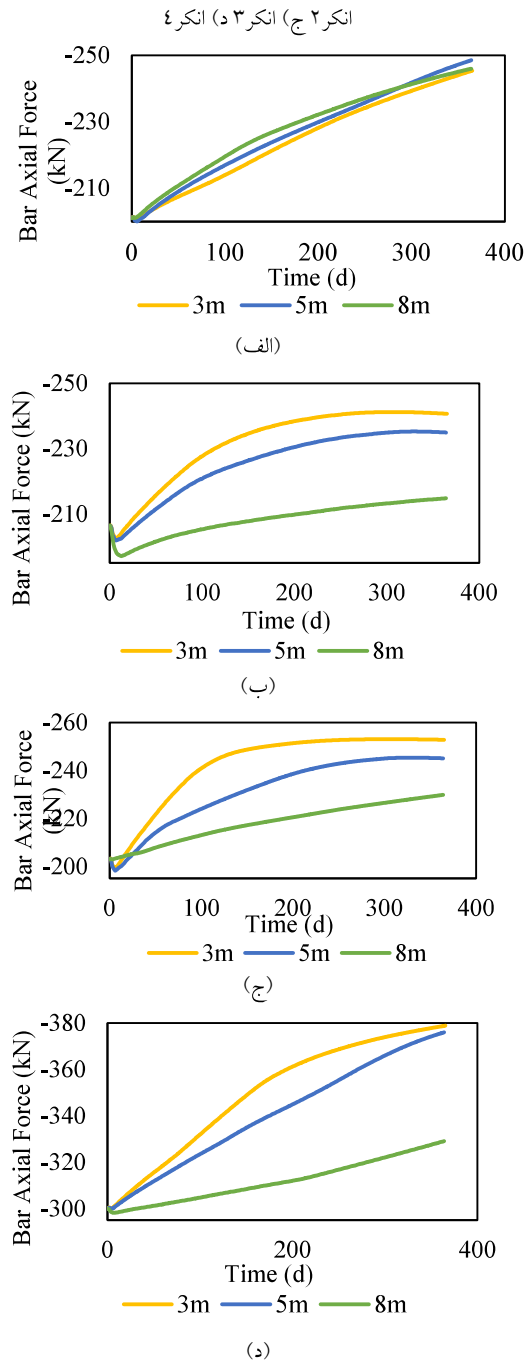


fig. 20. Diagram of axial force of anchors against time a) Anchor 1 b) Anchor 2 c) Anchor 3 d) Anchor 4

انکر ۱ بالاترین ردیف انکر و انکر ۴ پایین ترین ردیف انکر است. مطابق شکل (۲۰) افزایش نیروی بالاترین انکر تقریباً مستقل از محل ترکیب لوله است در حالی که در سه انکر دیگر با افزایش فاصله‌ی ترکیب لوله از گود به علت کاهش فشار

متفاوت است. به طوری که در گود پایدار شده با انکر به دلیل وجود انکرها تا فاصله بیش از ۸ متر و تاثیر انکر هنوز افزایش جابه‌جایی قائم موجود است ولی در گود پایدار شده با شمع از آنجا که از ناحیه تاثیر شمع خارج می‌شود دیگر افزایش جابه‌جایی قائم نبوده و پس از فاصله پنج متر جا به جایی قائم ثابت باقی می‌ماند. مطابق شکل (۱۹ ب) در گود پایدار شده به وسیله شمع جابه‌جایی‌های افقی منفی (به سمت گود) می‌باشد. از آنجا که فاصله ۳ متر داخل گوه گسیختگی و فاصله ۵ متر روی گوه گسیختگی و فاصله ۸ متر خارج از گوه گسیختگی است بدیهی است که در هردو گود پایدار شده به وسیله شمع و انکر پس از گذر ۳۶۵ روز با افزایش فاصله لوله از گود تا ۵ متر جابه‌جایی افقی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

شکل ۱۹. حداکثر جابه‌جایی‌های الف) قائم (در نقطه A و D) و ب) افقی (در نقطه B و C) در طول زمان

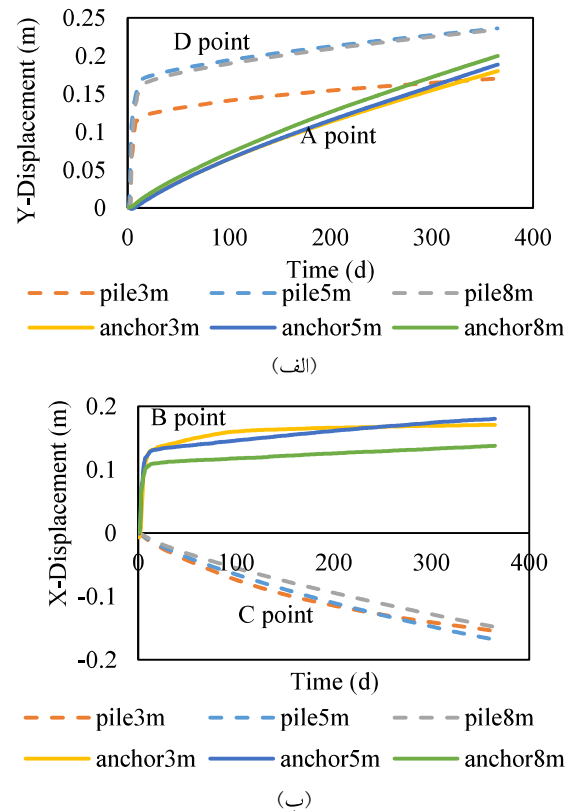


Fig. 6. Maximum displacements a) vertical (at point A and D) and b) horizontal (at point B and C) during time

مطابق شکل (۲۰) به علت ترکیب لوله و تغییر در مکش باقی نیروی محوری در انکرها افزایش می‌یابد.



شکل ۲۲. الف) کانتور فشار آب حفره‌ای در روز ۶۰ ام. ب) کانتور تغییر شکل کلی در روز ۶۰ ام

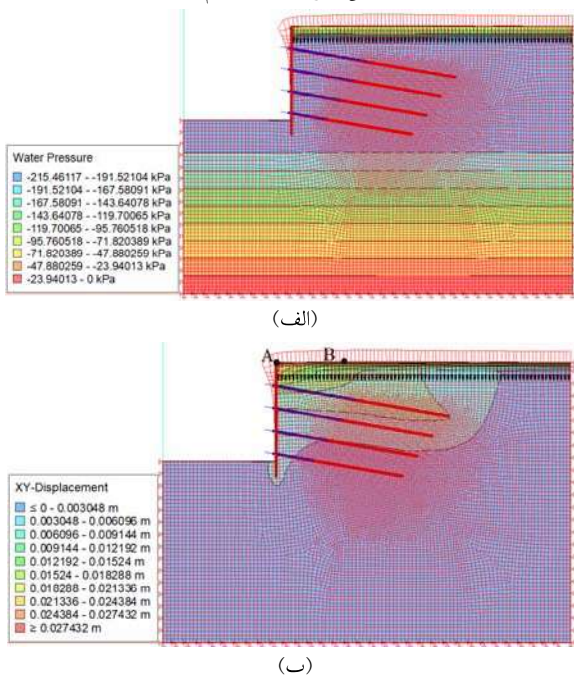


fig. 22. A) Contour of pore water pressure on the 60th day. b) contour of overall deformation on the 60th day

شکل ۲۳. نمودار لنگر وارد بر شمع در طول آن

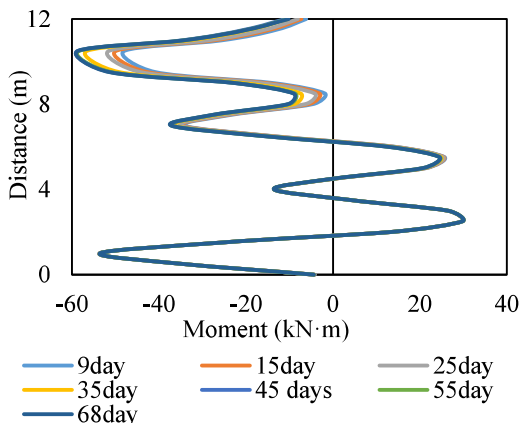


fig. 23. Diagram of the moment applied to the pile along its length

در این حالت بیشترین جابه‌جایی افق در بالای گود و بیشترین جابه‌جایی قائم در سطح زمین و با فاصله از گود می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲۴) ملاحظه می‌شود، جابه‌جایی افقی منفی (به سمت گود) بوده و بیشترین مقدار آن ۲/۹ سانتی‌متر می‌باشد. بیشترین جابه‌جایی قائم ۳ سانتی‌متر بوده و در ۴۲ امین روز اتفاق افتاده است. مقدار جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در

آب حفره‌ای نیروی انکر کاهش می‌یابد. شکل (۲۱) نشان‌دهنده درصد افزایش نیروی محوری در انکرها است. انکر شماره ۲ همواره کمترین افزایش نیرو را دارد. علت این مسئله می‌تواند در مرکز واقع شدن این انکر و نزدیک بودنش به لوله و در نتیجه کمتر بودن تغییر شکل‌ها باشد. هرچه فاصله لوله از گود بیشتر باشد افزایش نیرو کاهش می‌یابد. از آنجاکه انکر ۱ بیشترین جابه‌جایی افقی را تحمل می‌کند افزایش نیروی این انکر کمی بیشتر از بقیه انکرها است.

شکل ۲۱. درصد افزایش نیروی انکرها در ترکیدگی لوله

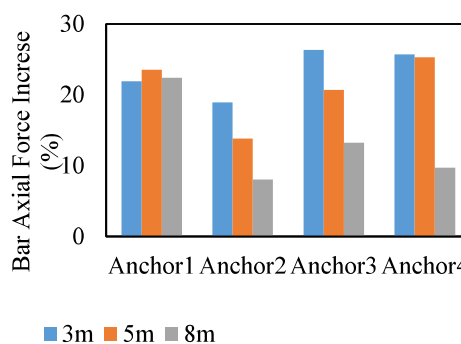


fig. 21. Percentage increase in anchor force in pipe burst

### ۳-۵- تأثیر شرایط آب و هوایی (شرایط مرزی Climate)

از عوامل تأثیرگذار بر مکش بافتی شرایط آب و هوایی می‌باشد. در این پژوهش شرایط آب و هوایی دو ماه پربارش از شهرستان سرخس به مدل اعمال شده است. در قسمت‌های الف و ب شکل ۲۲ به ترتیب کانتورهای فشار آب حفره‌ای و جابه‌جایی کلی در روز ۶۰ ام می‌باشد. در شکل ۲۲ نقطه A بیشینه جابه‌جایی افقی و نقطه B بیشینه جابه‌جایی قائم می‌باشد. مطابق شکل (۲۳) با گذر زمان لنگر وارد بر شمع افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس این شکل می‌توان دریافت که شرایط مرزی آب و هوایی تنها روی ممان خمشی تقریباً ۶ متر بالای شمع تأثیرگذار است. این ناحیه همان ناحیه فعال است [8] که تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی شبانه‌روز قرار می‌گیرد و به کمک این مدل‌سازی کاملاً قابل مشاهده است.



بیش از ۲۰ درصد می‌باشند بسیار کمتر است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت وجود چاه جذبی و یا ترکیدگی لوله نسبت به دو ماه پربارش برای پایداری گود بحرانی‌تر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با کمک روش عددی اثر وجودی یک چاه جذبی و ترکیدگی لوله آب و تغییر موقعیت آن‌ها و همچنین شرایط آب‌وهوایی روی تغییر شکل و نیروهای داخلی در اجزای سازه‌ای یک گود تقویت‌شده با روش انکراژ و شمع با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است. خاک مورد بررسی در این پژوهش از نوع متورم شونده هست. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

۱- در صورت وجود ترکیدگی لوله و چاه جذبی که باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه نیروهای داخلی می‌شود؛ تغییرات ممان خمشی با زمان به فاصله لوله و چاه از جداره گود بستگی دارد. بدین صورت که با افزایش فاصله منبع نفوذ آب از جداره گود میزان ممان خمشی وارد بر شمع کاهش می‌یابد.

۲- میزان کاهش ممان خمشی با افزایش فاصله برای چاه و لوله در مدل ۱ و مدل ۲ متفاوت است. برای نمونه در چاه پایدار شده با شمع و انکر با افزایش فاصله از ۳ متر به ۸ متر، ۱۹/۷ درصد کاهش، چاه پایدار شده با شمع به تنهایی ۲۲/۲ درصد، ترکیدگی لوله گود پایدار شده با شمع و انکر ۱۲/۵ درصد و ترکیدگی لوله پایدار شده با شمع به تنهایی ۲۲/۴ درصد کاهش ممان خمشی موجود است. این نتایج نشانگر این مسئله است که وجود انکر باعث کم شدن کاهش ممان خمشی با افزایش فاصله می‌شود.

۳- مقدار ممان خمشی متأثر از وجود چاه جذبی و ترکیدگی لوله در شمع، در روش گود پایدار شده با شمع بیش از ۲ برابر گود پایدار شده با شمع و انکر است. زیرا انکرها تا حدی در مقابل نیروهای داخلی ناشی از نفوذ آب مقاومت می‌کنند.

۴- در گود پایدار شده با سیستم شمع و انکر، جابه‌جایی قائم با افزایش فاصله ترکیدگی لوله از جداره گود، ۱۰/۸

اثر شرایط آب و هوایی دو ماه پربارش به مراتب کمتر از جابه‌جایی ناشی از مدل‌سازی چاه جذبی و ترکیدگی لوله به مدت یک سال می‌باشد.

شکل ۲۴. نمودار جابه‌جایی حداکثر الف) افقی در نقطه A ب) قائم در

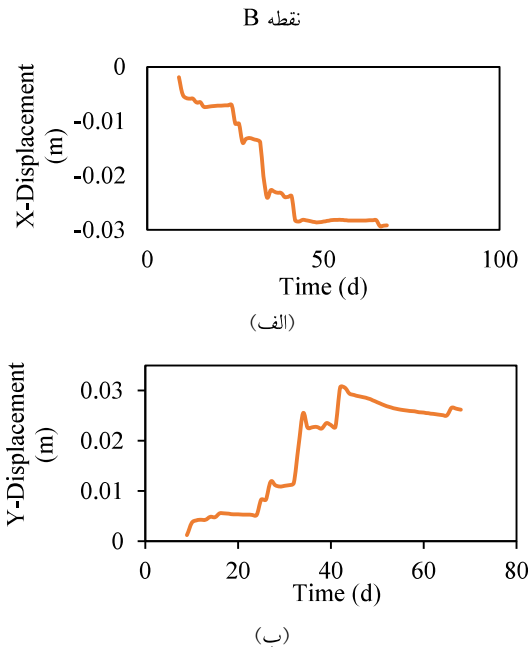


Fig. 24. Maximum displacement diagram a) horizontal at point A b) vertical at point B

شکل ۲۵. نمودار نیروی محوری انکر در برابر زمان تحت شرایط آب‌وهوایی

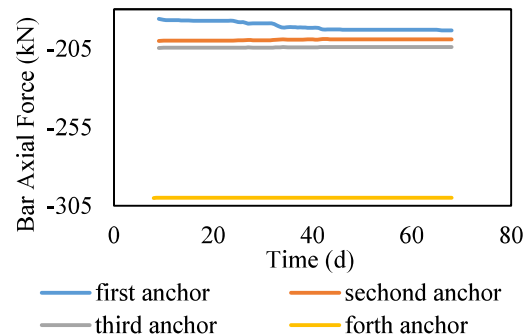


fig. 25. Diagram of anchor axial force versus time under climate conditions

مطابق شکل (۲۵) در اثر مدل‌سازی شرایط آب و هوایی تنها در انکر اول افزایش نیرو اتفاق می‌افتد. در انکرهای ۲ و ۳ و ۴ تقریباً نیروی محوری تغییری نمی‌کند. مقدار افزایش نیروی انکر اول ۴/۵ درصد می‌باشد. این مقدار در مقابل افزایش نیروی انکرهای گود در مجاورت چاه جذبی و ترکیدگی لوله

دصد و ۴۸۰ درصد بیشتر از شرایط آب و هوایی است. پایداری گود در صورت وجود چاه جذبی و ترکیدگی لوله به مدت یک سال نسبت به دو ماه پربارش شهر سرخس بحرانی-تر می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- [۱] A.P. Pratama, H.C. Hardyatmo, F. Faris, Parametric Study of the Effect of Ground Anchor on Deep Excavation Stability, in: J. Civ. Eng. Forum, 2020, pp. 19.
- [۲] R. Zhang, J. Zhao, G. Wang, Stability analysis of anchored soil slope based on finite element limit equilibrium method, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016. (۲۰۱۶)
- [۳] C.S. Josefino, N. Guerra, A. Antão, Influence of the embedded length on the overall stability of single anchored retaining walls, *Soils Rocks*, 40 (2017) 133-145.
- [۴] K. Papadopoulou, A. Sofianos, Factors Affecting the Behaviour of Retaining Structures with Prestressed Anchorages Under 2D and 3D Conditions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34 (2016) 1877-1887.
- [۵] A. Johari, A. Kalantari, System reliability analysis of soldier-piled excavation in unsaturated soil by combining random finite element and sequential compounding methods, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80 (2021) 2485-2507.
- [۶] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, 1993.
- [۷] A. Gholampour, A. Johari, Reliability-based analysis of braced excavation in unsaturated soils considering conditional spatial variability, *Computers and Geotechnics*, 115 (2019) 103163.
- [۸] L. Ning, J.L. William, *Unsaturated Soil Mechanics*, 2004.
- [۹] G. Sivakumar Babu, D. Murthy, Reliability analysis of unsaturated soil slopes, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131 (2005) 1423-1428.
- [۱۰] S.E. Cho, S.R. Lee, Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration, *Computers and geotechnics*, 28 (2001) 185-208.
- [۱۱] C.P.K. Gallage, T. Uchimura, Effects of wetting and drying on the unsaturated shear strength of a silty sand under low suction, in: *Unsaturated soils 2006*, 2006, pp. 1247-1258.
- [۱۲] H. Rahardjo, A. Satyanaga, E.C. Leong, Unsaturated soil mechanics for slope stabilization, *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, 43 (2012) 48-58.
- [۱۳] J. Ali, S. Narges, E.F. Amin, R.K. Amir abas, Effect of matric suction on excavation stability in unsaturated soil, *Journal of the Engineering Geological Society of Iran*, 15 (1401) 1-17.
- [۱۴] C.-S. Tang, Q. Cheng, T. Leng, B. Shi, H. Zeng, H.I. Inyang, Effects of wetting-drying cycles and

درصد افزایش می‌یابد و در گود پایدار شده با شمع با افزایش این فاصله تا مرزگوه گسیختگی ۳۸/۲ درصد افزایش یافته و پس‌از آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۵- جابه‌جایی افقی در گود پایدار شده به وسیله شمع تحت تأثیر ترکیدگی لوله و چاه جذبی، منفی (به سمت گود) می‌باشد. در صورتی که در حالت پایداری با انکر مقادیر بیشترین جابه‌جایی مثبت می‌باشند ولی با افزایش فاصله چاه از جداره گود مقادیر جابه‌جایی‌های افقی منفی نیز افزایش می‌یابد. در این حالت گود جابه‌جایی منفی را نیز تجربه می‌کند. جابه‌جایی افقی تحت شرایط آب و هوایی نیز منفی می‌باشد.

۶- در هردو گود پایدار شده به وسیله انکراژ و شمع پس از گذر ۳۶۵ روز با افزایش فاصله لوله از گود تا مرز گوه گسیختگی جابه‌جایی افقی افزایش یافته و پس‌از آن کاهش می‌یابد.

۷- افزایش نیروی بالاترین انکر تقریباً مستقل از محل ترکیدگی لوله و چاه جذبی است درحالی‌که در سه انکر دیگر با افزایش فاصله ترکیدگی لوله و چاه از جداره گود این درصد افزایش، کاهش می‌یابد. همچنین نیروی انکرها در صورت وجود ترکیدگی لوله بیشتر از چاه جذبی است.

۸- در روش پایداری گود با شمع وانکر، افزایش نیروی انکرها در صورت وجود ترکیدگی لوله به صورت میانگین ۳/۴۳ درصد بیشتر از چاه جذبی در طول یک سال می‌باشد.

۹- شرایط آب و هوایی روی ۶ متر بالایی گود یعنی ناحیه فعال تأثیر می‌گذارد.

۱۰- مقدار جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در اثر شرایط آب و هوایی دو ماه پربارش به مراتب کمتر از جابه‌جایی ناشی از مدلسازی چاه جذبی و ترکیدگی لوله به مدت یک سال می‌باشد. برای مثال کمترین جابه‌جایی افقی برای چاه و ترکیدگی لوله در فاصله ۸ متر رخ میدهد که به ترتیب ۲۶۲ درصد و ۳۷۳ درصد از شرایط آب و هوایی بیشتر است. همچنین کمترین جابه‌جایی قائم برای چاه جذبی و ترکیدگی لوله در فاصله ۳ متری از گود رخ میدهد که به ترتیب ۷۴۰

[۲۰] M.T. Van Genuchten, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil science society of America journal, 44 (1980) 892-898.

[۲۱] A. Yazdi Laboratory investigation of expansive soil volume change and its improvement method based on unsaturated soil mechanics, in: faculty of engineering Department of civil engineering Ferdowsi University of Mashhad, 1400.

[۲۲] W. Geostudio Sigma, Engineering Book for Stress-Deformation Modeling with Sigma/W, Geo-Slope International Ltd., Calgary, Alberta, Canada. (۲۰۱۲),

[۲۳] P. Sabatini, D. Pass, R. Bachus, Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems, in, 1999.

[۲۴] GEO-SLOPE, Heat and Mass Transfer Modeling with GeoStudio, Geostudio Help, 2022.

[۲۵] H.z. Zahra, B. Nasrin, R. Alireza, T.n. Meysam, B. Atefe, Spatial-temporal modeling of albedo in the area of Iran, Applied Research of Geographical Sciences, 17 (1396) 1-17.

desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil, Catena. ۱۰۴۷۲۱ (۲۰۲۰) ۱۹۴,

[۱۵] J.A. Blatz, N.J. Ferreira, J. Graham, Effects of near-surface environmental conditions on instability of an unsaturated soil slope, Canadian Geotechnical Journal, 41 (2004) 1111-1126.

[۱۶] S. Qi, S.K. Vanapalli, Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes, Computers and Geotechnics, 70 (2015) 68-82.

[۱۷] A.N. Yazdi, A. Akhtarpoor, M.M. Abdalhussein, M.S. Baradaran, Experimental Investigation of the Volume Change of a Swelling Clay and Its Improvement, Transportation Infrastructure Geotechnology, (2023) 1-24.

[۱۸] Balighi, Laboratory and numerical investigation of the swelling soil behavior using unsaturated triaxial test - case study: Khangiran Sarakhs, in: faculty of engineering Department of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 1402.

[۱۹] B.M. Das, Principles of geotechnical engineering, Cengage learning, 2021.

# The effect of matric suction changes on the behavior of restrained excavations in expansive soil

Maryam Mansouri<sup>1</sup>, Aliyeh Labib<sup>2</sup>, Ali Akhtarpour<sup>3</sup>

1- PhD student, Ferdowsi University of Mashhad

2- PhD student, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Email: akhtarpour@um.ac.ir

## Abstract:

Due to the increase in population and the increasing need for construction, the issues related to excavation and stability of the excavation have been given importance. The stability of excavations can be controlled and improved by various methods such as anchoring, retaining walls, shielding, etc. that in each project, according to the characteristics of that project and the type of factors threatening the stability of that excavation, one or more stabilization methods can be used. The excavation investigated in this research is stabilized by two pile-anchor and concrete pile methods. One of the factors leading to the instability of the excavation is the infiltration of water into the excavation. Water infiltration into the excavation can be due to various reasons such as rainfall, rise of the underground water level, pipe burst, etc.; Therefore, the possibility of water infiltration into the excavation should be checked in each excavation, and necessary measures should be taken in case of water infiltration. matric suction is defined as the difference between pore air pressure and pore water pressure, which plays a major role in the shear resistance behavior of unsaturated soils; Now, water infiltration reduces matric suction and as a result reduces shear resistance and increases soil volume in expansive soils. The well studied in this research has been exposed to factors that change matric suction such as pipe burst, absorption well and climate conditions. The boundary conditions of pipe bursting and absorption well are assumed for a period of one year; Also, the weather conditions have been obtained from the meteorological data of the two rainy months of Sarakhs city. Using sigma/W software and Couple analysis, the simultaneous effect of change in matric suction and change in stress and strain has been investigated. Also, the Penman-Monteith method has been used for the calculation of evaporation and transpiration to model the climate conditions. In this research, a comparison was made between different excavation stabilization situations (pile-anchor and pile method) under different conditions of matric suction (pipe burst, absorption well and weather conditions). Also, in this research, the effect of the location of the burst pipe and absorption well (distance from the excavation wall) on factors such as deformations, the moment created in the pile and the forces created in the anchors (behavior of the excavation) was investigated. Considering the destructive behavior of expansive soils in unsaturated conditions, the soil studied in this research is of expansive type. The characteristics of the modeled soil are related to the area of Sarakhs city. In order to consider the effect of soil swelling, the used elasticity modulus is related to the effective stress and as a result matric suction, which is called the swelling modulus. The results showed that the increase in moisture in the soil and as a result the decrease in matric suction in the swelling soil increases the force in the anchors and the bending moment in the pile. Also, the increase in the force of the anchors and the displacement created in the case of pipe bursting and absorption well modeling is much more than the conditions of the climate boundary effect for the two rainy months of the year. By increasing the distance of the absorption well and the bursting of the pipe from the excavation, the increase in the force created in the anchors decreases. climate conditions affect the upper 6 meters of the excavation, i.e. the active zone.

**Keywords:** unsaturated soil, expansive soil, excavation stabilization, Couple analysis, absorption well, pipe burst, climate condition.