

بررسی عددی آسیب ساختمان با پی سطحی واقع بر خاک متورم شونده ناشی از تغییرات مکش بافتی

ریحانه نوری^۱، علی اخترپور^{۲*}، مریم منصوری^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران، گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشجوی دکتری عمران، گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد.

* Email: akhtarpour@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۰۰۰

تاریخ دریافت: ۰۰۰۰

چکیده

به طور کلی هرگونه آسیب و شکستگی در پی ساختمان، سبب نشست آن و در نتیجه خرابی فونداسیون و آسیب به سازه می‌شود. از نظر مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های متورم‌شونده از مهم‌ترین گروه‌های خاکی هستند که باید قبل از مطالعات طراحی، مشخصات آن‌ها به طور دقیق مشخص شود. این گونه خاک‌ها آسیب قابل توجهی به سازه‌ها وارد می‌کنند. پی‌های سطحی از قبیل پی منفرد و نواری ممکن است تحت تاثیر نشست نامتقارن، دوران و لنگر ناشی از تورم خاک، دچار آسیب شوند. یکی از عواملی که منجر به نشست نامتقارن و دوران در پی‌ها می‌شود، نفوذ آب در زیر پی است. بیشتر لایه‌های خاک نزدیک به سطوح زمین که رفتار مهندسی آن‌ها حائز اهمیت است در حالت غیراشباع قرار دارند، بنابراین درک رفتار دقیق خاک، مستلزم بهره‌گیری از قوانین پیچیده مکانیک خاک غیر اشباع است. در خاک متورم شونده، نفوذ آب باعث کاهش مکش بافتی و در نتیجه کاهش مقاومت برشی و نیز افزایش حجم خاک می‌شود. در این مقاله، بررسی عددی رفتار پی سطحی در دو مدل پی منفرد و نواری، تحت عوامل تغییردهنده مکش بافتی مانند ترکیب لوله و چاه جذبی، صورت گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار ژئواستودینو SIGMA/W و آنالیز کوپل، تأثیر هم‌زمان تغییر در مکش بافتی و تغییر در تنش و کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین اثر تعداد طبقات ساختمان و تغییر در موقعیت ترکیب لوله و یا چاه جذبی روی نتایج بررسی شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که ترکیب لوله و چاه جذبی با گذشت زمان باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در خاک شده و به دلیل ویژگی‌های خاک متورم شونده، هرچه شدت بار وارد بر خاک یا تعداد طبقات ساختمان کمتر باشد، مقادیر تورم خاک بیشتر خواهد بود. در مجموع رده آسیب به سازه برای پی منفرد بیشتر از پی نواری می‌باشد و در بسیاری موارد، ساختمان آسیب بسیار شدید را تجربه خواهد کرد، پس استفاده از پی نواری با رعایت ضخامت مناسب برای ساختمان واقع بر خاک متورم شونده توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: خاک غیر اشباع، مکش بافتی، خاک متورم شونده، آسیب پی ساختمان، تحلیل کوپل، چاه جذبی، ترکیب لوله.

۱- مقدمه

مربوط به خاک‌های غیر اشباع، تغییر در مکش بافتی و رطوبت خاک است که تغییر شکل‌های خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد [1]. یکی از شرایط پر خطر برای پی هنگامی است که خاک زیر فونداسیون تحت نفوذ آب قرار گیرد. در خاک متورم شونده، که به طور معمول مخلوطی از کانی‌های رسی و غیر رسی اند، خاک با آبیگری متورم شده

پی از مهم‌ترین عناصر هر سازه است. هرگونه آسیب در پی، سبب نشست و در نتیجه خرابی آن و آسیب به سازه می‌شود. پی‌های سطحی در لایه‌های بالایی سطح زمین احداث می‌شوند. در بیشتر موارد، لایه‌های سطحی خاک در شرایط غیر اشباع قرار دارند. از اصلی‌ترین مسائل

و بر اثر از دست دادن آب منقبض می‌شوند [2-4]. در خاک متورم شونده، نفوذ آب باعث کاهش مکش بافتی و در نتیجه کاهش مقاومت برشی و نیز افزایش حجم خاک می‌شود [2, 3, 5]. تعیین خواص تورمی خاک از نظر تبیین رفتار خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. فشار تورم، فشار لازم برای ثابت نگه داشتن حجم خاک هنگام اضافه کردن آب توصیف می‌شود که می‌توان آن را به عنوان انبساط ناشی از کشش الاستیک کریستال‌ها توصیف کرد. این کشش به دلیل تخلیه و تورم ناشی از فشار هوا در طول فرآیند خیس شدن در خاک به وجود می‌آید. خاک‌های رسی با خاصیت تورم، بسته به تغییر شرایط تنش، تغییر شکل در سازه‌های مهندسی ایجاد می‌کنند. برآوردها نشان می‌دهد که هزینه سالانه خسارات ناشی از متورم شدن خاک می‌تواند به میلیاردها دلار در سراسر جهان برسد. در حالی که به دلیل افزایش شرایط تنش، نشست روی خاک‌ها رخ می‌دهد، در حالیکه در نتیجه کاهش تنش، تورم مشاهده می‌شود. تغییرات حجم توده خاک که به دلیل نشست و ویژگی‌های تورمی رخ می‌دهد، موثرترین عوامل در طراحی پروژه‌های مربوط به خاک است [2].

کسکین و همکاران در سال ۲۰۲۳، تغییرات فشار تورمی خاک رس بنتونیتی در مقابل تغییرات محتوای آب را مورد بررسی قرار دادند. یک ارزیابی کلی بر روی نمودارهای فشار تورم خاک رس بنتونیت تهیه شده در محتویات آب متفاوت انجام شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که تورم خاک در حین نفوذ آب، سبب ایجاد تغییر شکل‌ها و دوران در پی سازه می‌شود. با استفاده از تغییر شکل‌ها و دوران‌های ایجاد شده در پی می‌توان درجه آسیب به سازه را ارزیابی نمود [2]. هوانگ و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۲۳، آزمایش‌های تغییر شکل تورم و فشار را برای توصیف آثار محتوای آب اولیه روی خواص تورمی خاک انجام دادند. علاوه بر این، آثار وزن مخصوص خشک و تنش عمودی بر خواص انبساطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با افزایش بارگذاری عمودی، نمونه‌های خاک ابتدا منبسط شده و سپس نمونه‌های با تراکم خشک

کم‌تر فرو ریختند. با این حال، نمونه‌های با وزن مخصوص خشک بالاتر تحت یک بارگذاری عمودی قابل توجهی فرو ریختند [6].

مطالعات دیگری نیز روی خاک غیراشباع با هدف بررسی تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن خاک روی پارامترهای مقاومت برشی انجام شده است. نتایج حاصل نشان داد که نفوذ آب در خاک، مکش خاک و در نتیجه مقاومت برشی و پایداری را کاهش می‌دهد [7-10].

عواملی همچون ترکیب لوله و چاه جذبی باعث نفوذ آب به داخل خاک و کاهش مکش بافتی و در نتیجه تغییر شکل‌هایی می‌شود. این تغییر شکل‌ها می‌تواند باعث آسیب و شکستگی در پی و در نتیجه خسارات جبران ناپذیر به سازه شود. در ادبیات فنی بررسی‌های متعددی روی خاک‌های متورم شونده انجام شده است ولیکن خساراتی که این پدیده به پی‌ها وارد می‌کند کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این پژوهش به بررسی آسیب وارد به سازه پرداخته می‌شود. پی‌های سطحی در انواع گوناگون مانند پی نواری و منفرد طراحی و اجرا می‌شوند [11]. تغییر در شدت بارگذاری، نوع پی سطحی (منفرد یا نواری) و موقعیت‌های گوناگون ترکیب لوله و چاه جذبی، می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل و دوران‌های مختلف در پی شود که اثر هر کدام از این عوامل با بررسی آسیب وارد به سازه، ارزیابی شده است. افزایش حجم خاک در صورت نامتقارن بودن می‌تواند منجر به آثار مخربی در سازه شود. به منظور مدل‌سازی از آنالیز کوپل استفاده شده و تأثیر همزمان تغییر در مکش بافتی و تغییر در تنش و کرنش بررسی شده است. در ادامه نمودارهای آسیب سازه با محاسبه کرنش افقی و دوران پی ارائه شد.

۲- مشخصات مصالح

خاک مورد بررسی در این پژوهش از منطقه خانگیران سرخس می‌باشد [12, 13]. این خاک مطابق معیار مک‌کین درجه تورم بالا دارد [14]. مشخصات این خاک در جدول (۱) آورده شده است. سایر ویژگی‌های هیدرولیکی و مدول متورم شونده‌گی خاک نیز در ادامه آمده است.

مختلف به خاک انجام شده است. مطابق رابطه ۱ برای منحنی مشخصه می توان درصد رطوبت حجمی مربوط به مکش های بافتی مورد نظر را محاسبه کرد [17].

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

در رابطه فوق ψ_m مکش بافتی، θ درصد رطوبت حجمی است. با توجه به رابطه ونجن اشتن Van Genuchten می توان پارامتر تنش مؤثر (χ) را به دست آورد [16].

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

که در این رابطه θ درصد رطوبت حجمی، θ_r درصد رطوبت حجمی ماندگار و θ_s درصد رطوبت حجمی اشباع است.

هم چنین با استفاده از رابطه زیر مقدار تنش مؤثر برای هر مکش بافتی و سربار مشخص محاسبه می شود [5] که جمله اول نشان دهنده سربار موجود و جمله دوم پارامتر تنش مؤثر در مکش بافتی است که در رابطه دو بیان شده است.

شکل ۱. منحنی مشخصه آب-خاک [۱۲]

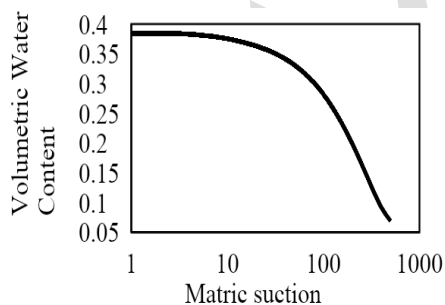


Fig. 1. swcc curve [12]

شکل ۲. منحنی هدایت هیدرولیکی-مکش بافتی [۱۲]

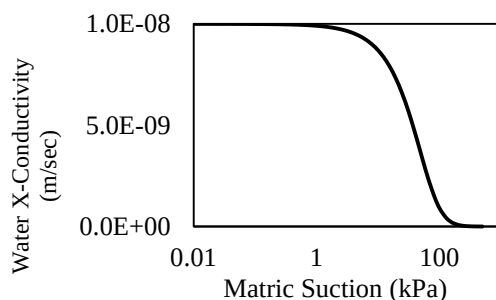


Fig. 2. Hydraulic conductivity-matric suction curve [12]

جدول ۱. ویژگی های خاک متورم شونده [۱۲ و ۱۳]

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

Table 1. Properties of swelling soil [12,13]

۲-۱- خصوصیات هیدرولیکی

ویژگی های هیدرولیکی خاک با دو نمودار منحنی مشخصه آب-خاک و نمودار هدایت هیدرولیکی در برابر مکش بافتی مشخص می شود. مقدار 10^{-6} سانتی متر بر ثانیه به عنوان نفوذپذیری اشباع برای این خاک که از جنس رس می باشد در نظر گرفته شده است [15]. نمودار هدایت هیدرولیکی در برابر مکش بافتی، با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع انتخاب شده و منحنی مشخصات آب-خاک توسط رابطه ونجن اشتن [16] تخمین زده می شود. نمودارهای منحنی مشخصه آب-خاک و هدایت هیدرولیکی-مکش بافتی در شکل های (۱ و ۲) آورده شده است.

۲-۲- مدول متورم شوندگی خاک E_{swell}

به منظور مدل سازی عددی در نرم افزار Geostudio، مدول الاستیسیته خاک مورد نیاز است. در این نرم افزار، 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. بدین منظور برای انجام محاسبات در این نرم افزار نیاز به دو مدول است. در مرحله اول که مدل سازی شرایط درجا است، مقدار مدول برابر ۱۸۰۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده و در مرحله تنش-تغییر شکل برای شبیه سازی تورم باید از مدول متورم شوندگی استفاده شود. در پژوهش حاضر برای شبیه سازی رفتار تورمی خاک در نرم افزار، رابطه ای بین مدول متورم شوندگی خاک و تنش مؤثر به کمک داده های مرجع [12] ارائه شده است. در این مرجع آزمایش تحکیم یک بعدی ترزاقی به صورت غیر اشباع با ثابت نگه داشتن سربار و اعمال مکش های بافتی

منظور از آنالیز کوپل، جفت شدن انتقال آب و رفتار تنش- کرنش برای شبیه سازی فشار آب حفره ای گذرا و تغییر شکل ناشی از بارگذاری و/یا باربرداری و/یا تغییرات در شرایط هیدرولیکی می باشد [18]. نرم افزار ژئواستودیو برای آنالیز کوپل در شرایط خاک اشباع-غیراشباع 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 مقادیر تنش و کرنش هستند. $[D']$ ماتریس سختی تنش موثر، δu_w تغییرات فشار آب حفره ای و $\{m\}$ بردار پارامترهای حالت است. ماتریس $\{m\}^T$ شامل یک هایی 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 α به طور شهودی بین ۰ و ۱ بسته به درجه اشباع متفاوت است. ضریب α برابر با درجه اشباع مؤثر در نظر گرفته شده است [16]:

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

در رابطه فوق θ_w درصد رطوبت حجمی خاک، θ_r درصد حجمی رطوبت پسماند خاک و θ_s درصد حجمی رطوبت اشباع خاک می باشد. ابعاد مدل ۵۰ در ۵۰ متر و سطح آب پیزومتريک در کف مدل و شرایط اولیه ی مکش مطابق با منحنی SWCC خاک موردنظر به صورت هیدرواستاتیک با بیشینه مکش ۲۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. در ابتدا نیز از مدل تک المان به منظور درستی آزمایی در نرم افزار استفاده شده که مشخصات آن در ادامه آورده شده است. سپس مشخصات مدل های عددی برای پی منفرد و نواری به تفکیک آورده شده است.

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

در رابطه بالا، σ' تنش موثر، σ_n تنش کل، u_a فشار هوای حفره ای، u_w فشار آب حفره ای، χ پارامتر تنش موثر می باشد. مقدار مدول متورم شونده گی با توجه به رابطه زیر محاسبه می شود.

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

در رابطه فوق m_v ضریب قابلیت فشرده گی حجمی، ν ضریب پواسون، E مدول الاستیسیته، ΔH تغییرات ضخامت، H_0 ضخامت اولیه، $\Delta\sigma'$ تغییرات تنش موثر است. مدول متورم شونده گی محاسبه شده بین دو تنش مؤثر به تنش مؤثر میانگین اختصاص داده می شود. در ادامه نمودار مدول متورم شونده گی در برابر تنش مؤثر مطابق شکل (۳) به دست می آید. بدیهی است این مدول به طور کلی با مفهوم مدول الاستیک خاک در بارگذاری متفاوت است و مقدار آن به میزان خاصیت متورم شونده گی خاک بستگی دارد. معادله حاصل برای تحلیل تغییر شکل ناشی از تغییر مکش به نرم افزار معرفی شده است.

شکل ۳. نمودار مدول متورم شونده گی - تنش مؤثر

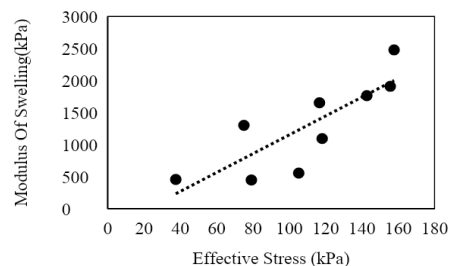


Fig. 3. Diagram of swelling modulus - effective stress

۳- مدل سازی عددی

به منظور بررسی اثر تغییرات مکش بافتی بر پی سطحی از نرم افزار ژئواستودیو SIGMA/W استفاده شده است. محیط خاک به همراه مدل پی سطحی در شکل (۴) نشان داده شده است. تحلیل ابتدا در شرایط درجا و سپس آنالیز بارگذاری-تغییر شکل^۱ و تغییر مکش بافتی همزمان با تغییر شکل ها با کمک آنالیز کوپل^۲ مدلسازی شده است.

¹ Load/Deformation

² Coupled Stress/pwp

شکل ۵. هندسه تک المان

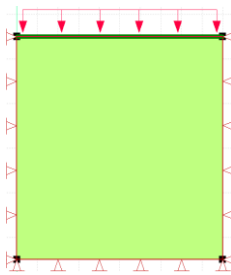


Fig. 5. Single element geometry

جدول ۲. مقایسه مقدار عددی و آزمایشگاهی

Time (d)	Y-Displacement (m)	Calculated strain percentage	Experimental strain percentage
0	0		
1	-0.1012	3.18	3.18
2	-0.0694		

Table 2. Comparison of numerical and tested value

در نرم افزار ژئواستوديو از المان Beam برای مدل سازی پی با مقدار مدول الاستیسیته بتن ۲۸ گیگاپاسکال استفاده شده است. بار ستون ها به صورت متمرکز و عمودی، برای حالت منفرد به مرکز هر پی و برای حالت نواری به مکان ستون ها وارد شده است. با توجه به آیین نامه های طراحی پی، در هر حالت و برای هر بارگذاری، مقدار ضخامت پی، سطح مقطع عرضی و ممان اینرسی مقطع محاسبه شده و در جدول (۳) آمده است. همچنین برای پی منفرد، مقدار عرض پی ها و فاصله از یکدیگر برآورد شده است. در شکل زیر، ابعاد توده خاک، پی و چگونگی بارگذاری نشان داده شده است.

شکل ۶. مدل پی منفرد

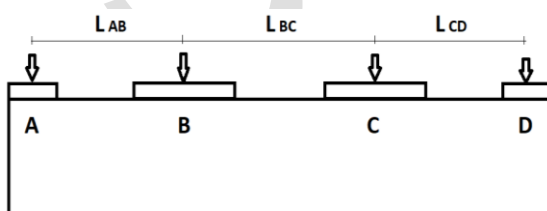


Fig. 6. Singular foundation model

مدل سازی پی نواری مانند پی منفرد انجام شده با این تفاوت که طول کلی پی نواری برابر با ۱۲ متر و مختصات نقاط A تا D در این حالت برابر با مختصات مرکز پی های

شکل ۴. هندسه مدل

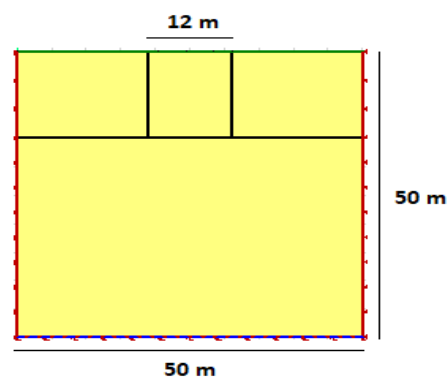


Fig. 4. Geometry of model

۳-۱- درستی آزمایی

به منظور درستی آزمایی مدل عددی، از یکی از آزمایش های تحکیم انجام شده توسط نادای یزدی و همکاران [12]، با استفاده از تک المان در حالت مقارن محوری (Axisymmetric) با نرم افزار SIGMA/W مدل سازی شده است. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، هندسه مدل عددی یک تک المان با ابعاد یک متر در یک متر بوده و مرزهای جانبی مدل در جهت افق و مرز تحتانی مدل در جهت قائم بسته شده است. در این مدل، سربار معادل ۲۵ کیلوپاسکال با مکش بافتی اولیه ۲۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. در مرحله تنش-تغییر شکل، مصالح و تغییرات مکش از مقدار ۲۰۰ کیلوپاسکال به ۱۰۰ کیلوپاسکال تورم در این نمونه شبیه سازی شده است. طبق جدول (۲) میزان درصد کرنش افزایش حجم در مدل عددی معادل ۳/۱۸٪ بوده که با مرجع [12] هم خوانی دارد.

۳-۲- مشخصات مدل پی منفرد و نواری

مدل سازی برای دو حالت مختلف پی منفرد و نواری، برای ۱۲ متر میانی و برای دو حالت چاه جذبی و ترکیبگی لوله در پنج موقعیت مختلف انجام شده است. همچنین برای هر حالت، چهار شدت مختلف بارگذاری، ساختمان یک، سه، پنج و هفت طبقه در نظر گرفته شده است. اثر نوع پی، شرایط وجود آب در محیط، موقعیت های مختلف چاه یا لوله و شدت بارگذاری بررسی شده است.

A تا D در حالت پی منفرد است. مقدار لنگر نهایی برای 0.002 برابر سطح مقطع بتن و $f_y=420$ MPa مطابق با مقطع بتن مسلح پی (با فرض اینکه سطح مقطع میلگرد آیین نامه ACI [19] نیز محاسبه شده است).

جدول ۳. مشخصات پی منفرد

Number of roofs	Equivalent load (kpa)	A and D foundation load (KN)	C and B foundation load (KN)	Thickness of Foundation (m)	Length of foot A and D (m)	Length of foot B and C (m)	Cross-sectional area in one meter width (m ²)	Moment of inertia in one meter width (m ⁴)
2	20	40	80	0.6	0.8	1.6	0.6	0.018
4	40	80	160	0.6	1	2	0.6	0.018
6	60	120	240	0.8	1.2	2.4	0.8	0.0427
8	80	160	320	1	1.4	2.8	1	0.0833

Table 3. Characteristics of single foundation

جدول ۴. مشخصات پی نواری

Number of roofs	Equivalent load (kpa)	Column load at point A and D (KN)	Column load at point B and C (KN)	Thickness of Foundation (m)	Cross-sectional area in one meter width (m ²)	Moment of inertia in one meter width (m ⁴)	Ultimate bending moment (kN.m)
2	20	40	80	0.6	0.6	0.018	247
4	40	80	160	0.6	0.6	0.018	247
6	60	120	240	0.8	0.8	0.0427	461
8	80	160	320	1	1	0.0833	741

Table 4. Characteristics of strip foundation

جدول ۵. مشخصات موقعیت های مختلف لوله و چاه جذبی

Location	Longitudinal coordinate x (m)	Horizontal coordinates of the well y (m)	Pipe Horizontal coordinate y (m)
1- In the neighboring land	15	38 48	48
2-In the neighboring land	17.5	38 48	48
3- On the border with the neighbor	19	38 48	48
4-Between A and B foundation	21	38 48	48
5-Between B and C foundation	25	38 48	48

Table 5. different positions of the pipe and well

۴/۵ میلی متر، با استفاده از المان Beam شبیه سازی شده 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^۱ و با توجه به فشار آب شهری مقدار ۲۰ متر آب تعریف شده است. برای بررسی تأثیر موقعیت لوله و چاه جذبی، تحلیل در موقعیت های مختلفی انجام شد که در نهایت پنج موقعیت بحرانی که در شکل (۷) نشان داده شده اند، در نظر گرفته شده است.

۳-۳- مدل سازی ترکیبگی لوله آب و چاه جذبی

چاه جذبی مطابق با شکل زیر با عمق پرشدگی ۱۰ متر مدل سازی شده است. در مدل سازی چاه جذبی از قطر چاه در برابر ابعاد مدل صرف نظر شده است. شرایط مرزی برای چاه از نوع هد کل آب، water total head، به مقدار ۴۸ متر می باشد. تحلیل چاه جذبی به صورت کوپل تنش و فشار آب حفراهی، Coupled Stress/PWP و در زمان یک سال انجام شده است. به منظور مدل سازی ترکیبگی لوله آب، لوله به صورت یک ناحیه دایروی شکل به قطر ۰.۳ متر مدل می شود، جداره لوله فولادی با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضخامت

¹ Water Pressure Head

و افقی، دوران و لنگرهای ایجاد شده در پی، مقادیر آسیب به سازه برآورد شده است. در ادامه نمودار تغییر مکان های قائم و افقی و فشار آب حفره‌ای در روز ۳۶۵م برای نقاط مختلف پی آورده شده است. همچنین نمودارهای آسیب سازه با محاسبه کرنش افقی و دوران پی برای زمان‌ها و بارگذاری‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۱- اثر چاه جذبی

نمودارهای مربوط به مقادیر فشار آب حفره‌ای، نشست‌های زیر پی و تغییر مکان افقی با در نظر گرفتن اثر چاه جذبی در موقعیت ۴ و برای ساختمان ۵ طبقه، برای پی منفرد و نواری در شکل‌های زیر آورده شده است.

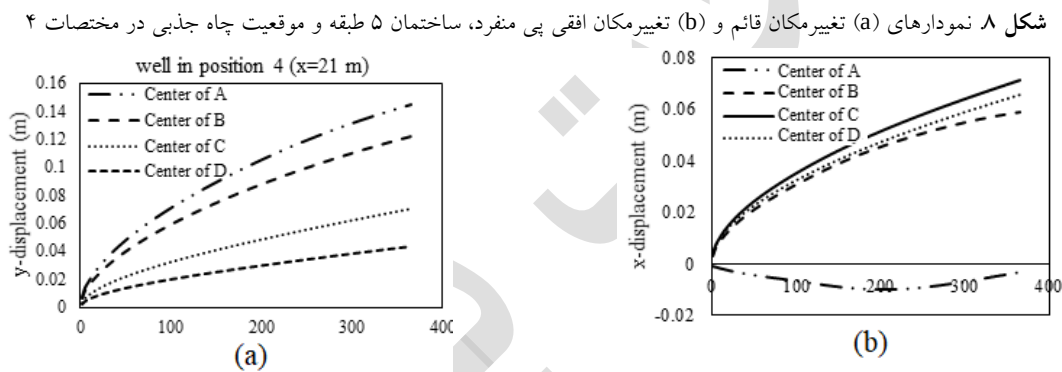


Fig. 8. Diagrams of (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement, singular foundation, 5-story building and the position of the well in 4

شکل ۹. کانتورهای (a) فشار آب حفره ای، (b) تغییر مکان قائم و (c) تغییر مکان افقی برای ساختمان ۵ طبقه و موقعیت چاه جذبی در مختصات ۴ برای پی منفرد

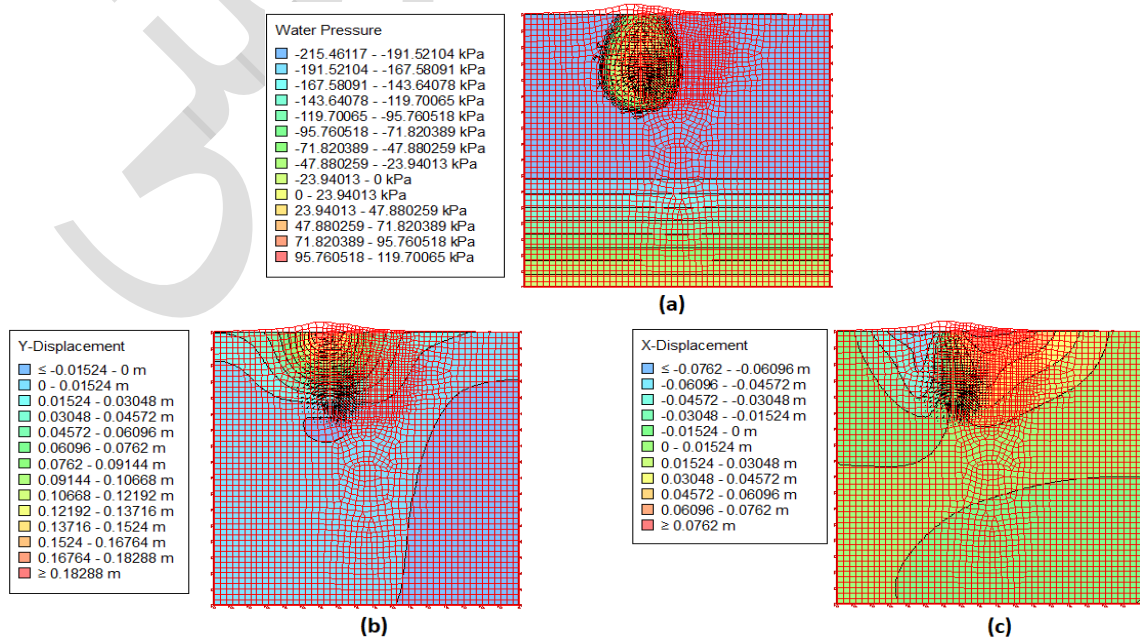


Fig. 9. Contours of (a) pore water pressure, (b) vertical displacement and (c) horizontal displacement, 5-story building and the position of the well in 4, singular foundation

شکل ۷. چاه و لوله در پنج موقعیت مختلف



Fig. 7. Five well and pipe positions

۴-۲ بحث و بررسی نتایج

تحلیل و بررسی اثر هر یک از حالات پر شدن چاه جذبی و ترکیب لوله در موقعیت‌های مختلف روی پی منفرد و نواری انجام شده است. در نهایت با توجه به کرنش‌های قائم

شکل ۱۰. نمودارهای (a) تغییر مکان قائم و (b) تغییر مکان افقی پی نواری، ساختمان ۵ طبقه و موقعیت چاه جذبی در مختصات ۴

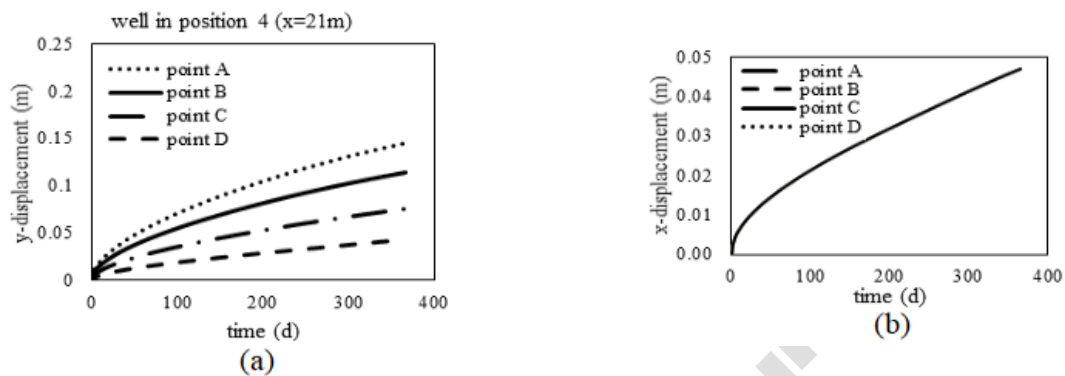


Fig. 10. Diagrams of (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement, strip foundation, 5-story building and the position of the well in 4

شکل ۱۱. کانتورهای (a) فشار آب حفره ای، (b) تغییر مکان قائم و (c) تغییر مکان افقی برای ساختمان ۵ طبقه و موقعیت چاه جذبی در مختصات ۴ برای پی نواری

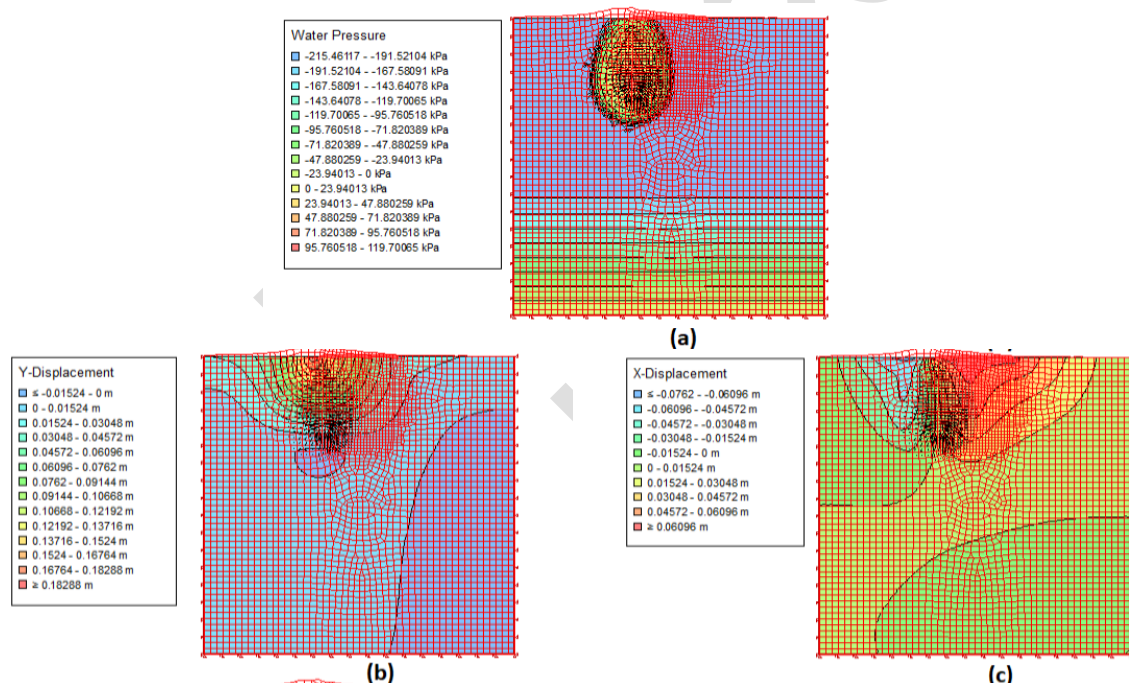


Fig. 11. Contours of (a) pore water pressure, (b) vertical displacement and (c) horizontal displacement, 5-story building and the position of the well in 4, strip foundation

۴-۲- اثر ترکیدگی لوله

در اثر ترکیدگی لوله، کانتورهای فشار آب حفره ای برای پی منفرد، نمودارهای تغییر مکان افقی و قائم نقاط زیر پی در موقعیت ۴ و برای ساختمان ۵ طبقه، برای پی منفرد و نواری در شکل های زیر آورده شده است. برخلاف چاه جذبی که نشأت آب در طول ۱۰ متر رخ می دهد، ترکیدگی لوله در یک نقطه و در فاصله دو متری از سطح زمین اتفاق افتاده و سبب می شود که تغییرات تغییر مکان های افقی و قائم نقاط زیر پی بر اثر چاه جذبی نواحی بیشتری را تحت تاثیر قرار دهد.

با مقایسه شکل های (۸ و ۱۰) می توان گفت که تغییر مکان افقی برای نقاط هر پی منفرد با یکدیگر برابر است و تغییر مکان افقی پی نواری به دلیل صلیبیت آن برای تمام نقاط یکسان است. در نتیجه به دلیل اختلاف تغییر مکان افقی در پی های منفرد، اثر کرنش افقی نیز باید محاسبه و رده آسیب به پی بررسی شود. هم چنین به دلیل موقعیت چاه که در بین پی های A و B قرار گرفته است، تغییر مکان قائم در این نقاط بیشترین مقدار را دارد و هر چه از موقعیت چاه جذبی فاصله گرفته، تغییر مکان کاهش می یابد.

شکل ۱۲. نمودارهای (a) تغییر مکان قائم و (b) تغییر مکان افقی پی منفرد، برای ساختمان ۵ طبقه و موقعیت ترکیدگی لوله در مختصات ۴

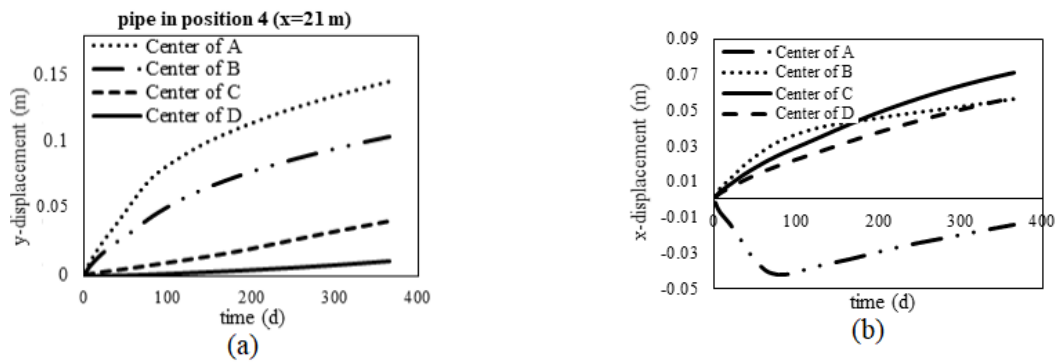


Fig. 12. Diagrams of (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement, singular foundation, 5-story building and the position of the pipe in 4

شکل ۱۳. کانتورهای (a) فشار آب حفره‌ای، (b) تغییر مکان قائم و (c) تغییر مکان افقی برای ساختمان ۵ طبقه و موقعیت ترکیدگی لوله در مختصات ۴ پی منفرد

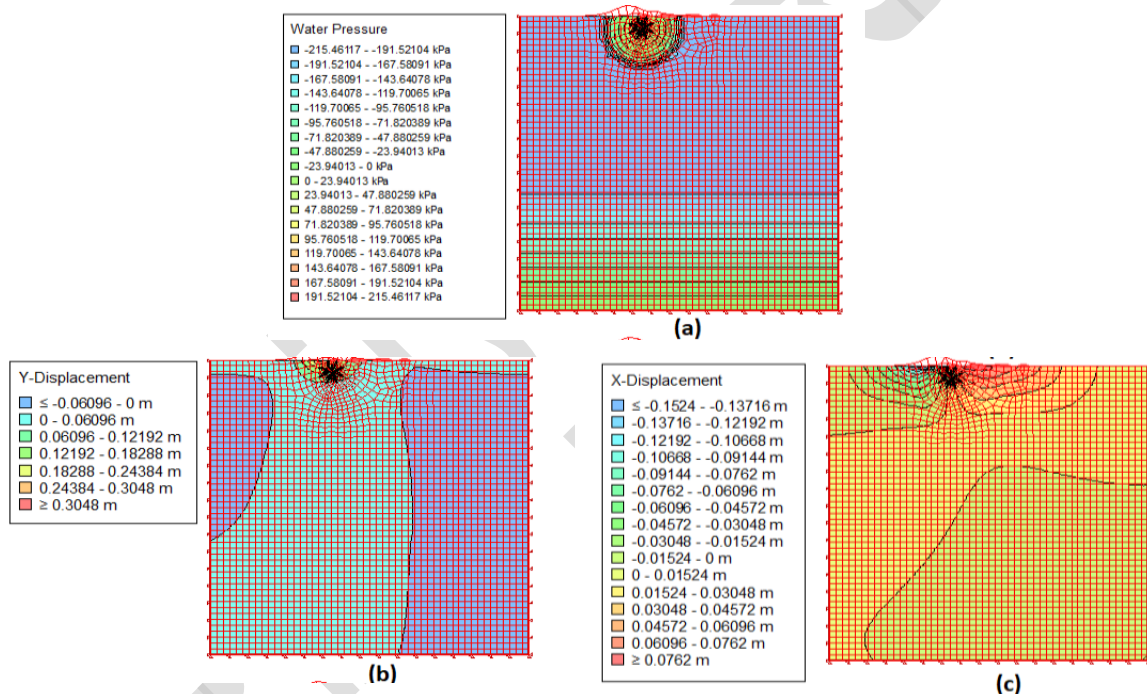


Fig. 13. Contours of (a) pore water pressure, (b) vertical displacement and (c) horizontal displacement, 5-story building and the position of the pipe in 4, singular foundation

شکل ۱۴. نمودارهای (a) تغییر مکان قائم و (b) تغییر مکان افقی پی نواری، افقی برای ساختمان ۵ طبقه و موقعیت ترکیدگی لوله در مختصات ۴

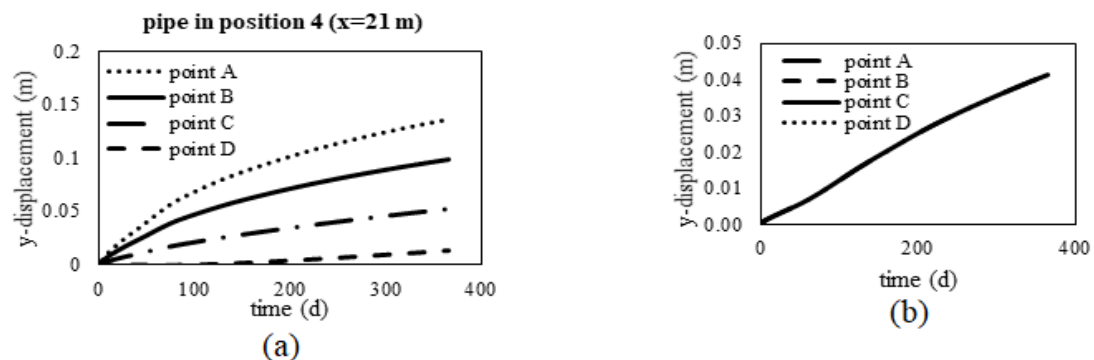


Fig. 14. Diagrams of (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement, strip foundation, 5-story building and the position of the pipe in 4

۳-۴- ارزیابی آسیب وارد بر سازه

به دلیل نشت آب در توده خاکزیر پی و از طرفی به دلیل متورم شونده بودن خاک، در زیر پی تغییر شکل های جانبی و عمودی به وجود می آید که سبب می شود روسازه دچار تغییر شکل شود. چنانچه مقدار آن از میزان تغییر شکل قابل تحمل سازه بیشتر باشد، می تواند باعث ایجاد خسارت و آسیب شود [20, 21]. به طور کلی نشست تفاضلی، دوران نسبی و نسبت تغییر شکل پارامترهایی هستند که با تغییر شکل و ترک خوردگی اعضا نسبت مستقیم دارند. تعاریف پارامترهای تغییر شکلی به شرح زیر است [21, 22]:

$$\beta = \frac{\Delta y}{L} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{L} \quad (9)$$

که در این رابطه، β دوران نسبی بین دو نقطه، Δy اختلاف نشست، ε کرنش افقی، Δx اختلاف تغییر مکان افقی و L فاصله بین دو نقطه است.

یکی از معیارهای برآورد آسیب به سازه، معیار Boscardin & cording است که در این معیار مجموعه ای از نمودارها که ارتباط دهنده کرنش افقی، دوران نسبی و سطح خرابی برای ساختمان های دارای اسکلت و یا سیستم دیوار باربر می باشند، مطابق شکل زیر است [23].

شکل ۱۵. نمودار سطح آسیب سازه براساس دوران نسبی و کرنش افقی با معیار Boscardin & cording [۲۳]

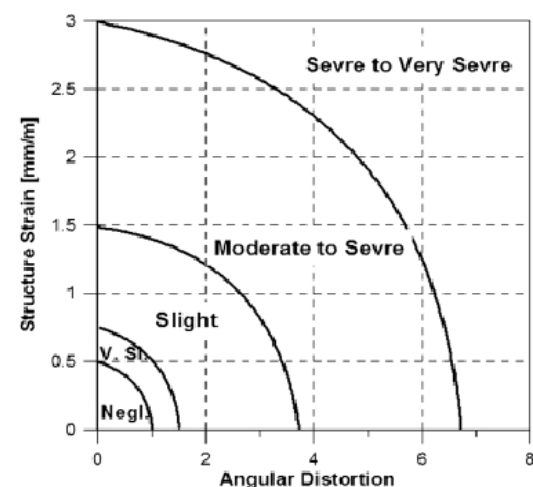


Fig. 15. Diagram of structural damage level based on angular distortion and horizontal strain with Boscardin & cording[23]

با استفاده از نتایج حاصل از مدلسازی، مقادیر دوران نسبی (β) و کرنش افقی (ε) در پی منفرد و مقادیر لنگر و دوران در پی نواری برای حالات مختلف بین پی های A و B و C و در زمان های یک روز، یک ماه و یک سال محاسبه و در نمودارهای بعدی آورده شده اند.

با بررسی نمودارهای فوق می توان بیان کرد که در پی منفرد، آسیب به سازه با گذشت زمان بیشتر شده و در یک ماه اول رشد بیشتری داشته است. هم چنین رده آسیب به سازه برای مدل هایی که سازه یک طبقه بر روی پی بنا شده است، از حالات دیگر شدیدتر است. به دلیل ترکیبگی لوله یا وجود چاه جذبی، به طور کلی با نشت آب و هم چنین خاصیت متورم شوندگی خاک زیر پی، هرچه شدت بار وارد بر خاک کمتر باشد، مقادیر تورم خاک بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است که رده آسیب در حالت ترکیبگی لوله بیشتر از چاه جذبی برآورد شده است. در مورد موقعیت چاه و لوله نیز می توان گفت که از نظر دوران نسبی، نشت آب در موقعیت های ۲ و ۳ (نواحی نزدیک به مرز همسایه) و از نظر کرنش افقی، نشت آب در موقعیت ۵ (ناحیه مرکزی) بیشترین میزان خسارت را بر عهده دارند.

شکل ۱۶. نمودارهای آسیب پی منفرد، در شدت های مختلف بارگذاری و برای موقعیت های متفاوت چاه جذبی پس از یک روز

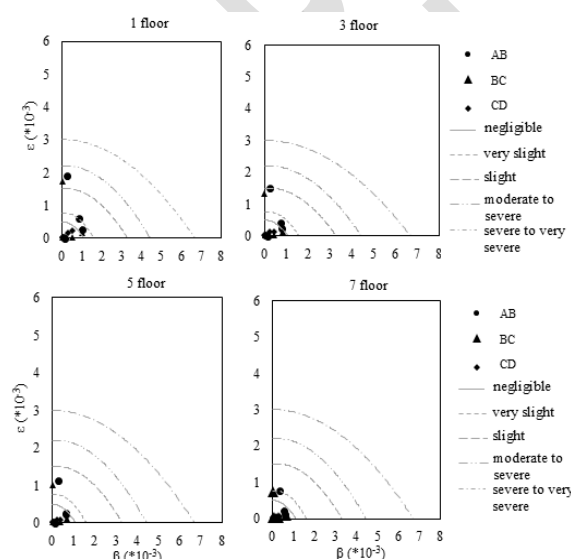


Fig. 16. Diagrams of singular footing damage, at different loading and for different positions of the absorption well after one day

شکل ۱۹. نمودارهای آسیب پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت ترکیب‌گی لوله پس از یک روز

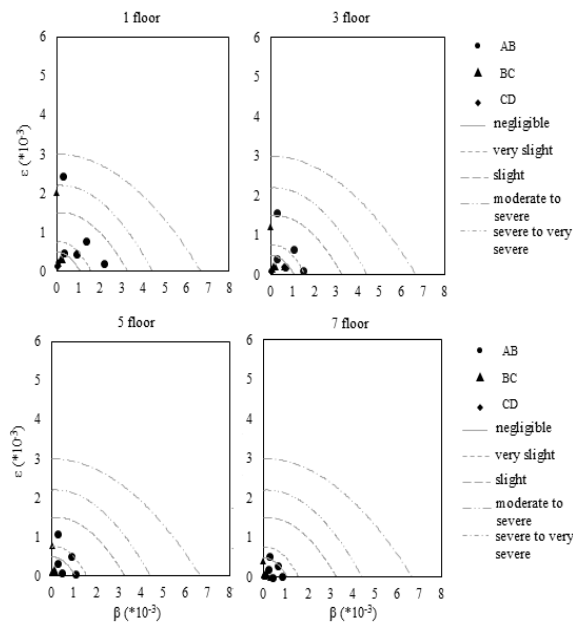


Fig. 19. Diagrams of singular footing damage, at different loading and for different positions of the pipe after one day

شکل ۱۷. نمودارهای آسیب پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت چاه جذبی پس از یک ماه

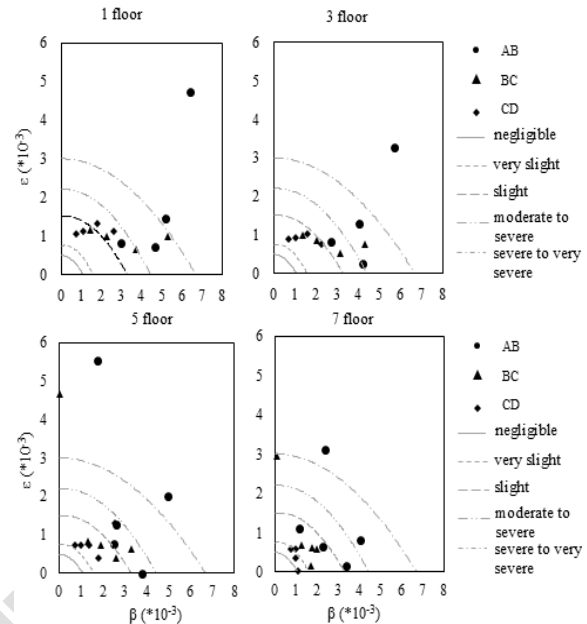


Fig. 17. Diagrams of singular footing damage, at different loading and for different positions of the absorption well after one month

شکل ۲۰. نمودارهای آسیب پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت ترکیب‌گی لوله پس از یک ماه

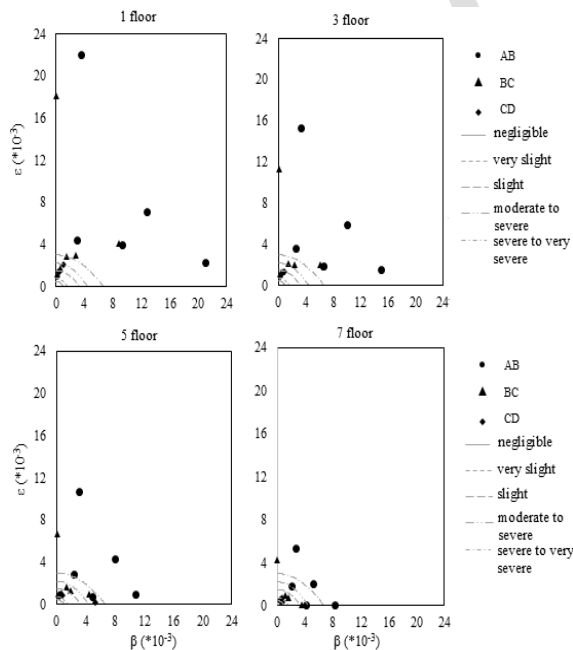


Fig. 20. Diagrams of singular footing damage, at different loading and for different positions of the pipe after one month

شکل ۱۸. نمودارهای آسیب پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت چاه جذبی پس از یک سال

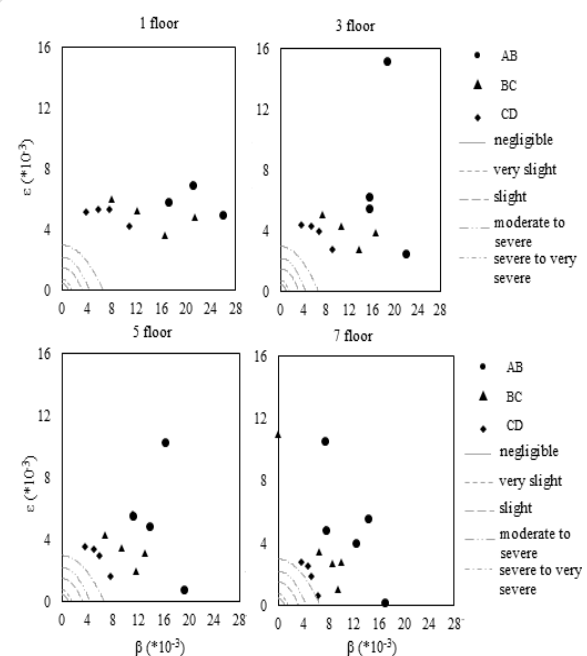


Fig. 18. Diagrams of singular footing damage, at different loading and for different positions of the absorption well after one year

جدول ۶. مقادیر دوران نسبی و کرنش افقی پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری، در موقعیت‌های متفاوت چاه جذبی پس از یک سال

well position In 365 days		1	2	3	4	5
distance from center of model (m)		-10	-7.5	-6	-4	0
β (*10 ⁻³)	7 floor	AB	12.39	16.94	14.24	7.45
		BC	6.45	8.60	9.40	9.95
		CD	3.73	4.76	5.18	6.27
ε (*10 ⁻³)	7 floor	AB	4.03	0.27	5.61	10.55
		BC	3.48	2.75	1.10	2.80
		CD	2.82	2.58	1.91	0.67
β (*10 ⁻³)	5 floor	AB	13.85	19.18	16.29	6.56
		BC	6.85	9.48	11.60	13.13
		CD	3.65	4.97	5.97	7.71
ε (*10 ⁻³)	5 floor	AB	4.91	0.82	10.29	18.15
		BC	4.30	3.50	1.98	3.15
		CD	3.62	3.44	2.97	1.65
β (*10 ⁻³)	3 floor	AB	15.43	21.94	18.54	6.17
		BC	7.33	10.63	13.80	16.58
		CD	3.69	5.31	6.69	9.14
ε (*10 ⁻³)	3 floor	AB	5.54	2.57	15.23	25.03
		BC	5.13	4.33	2.78	3.95
		CD	4.40	4.34	4.03	2.80
β (*10 ⁻³)	1 floor	AB	17.17	25.81	21.94	5.61
		BC	7.93	12.15	16.55	21.50
		CD	3.89	5.83	7.67	10.94
ε (*10 ⁻³)	1 floor	AB	5.83	5.06	21.25	33.81
		BC	6.03	5.25	3.65	4.85
		CD	5.19	5.39	5.33	4.25

Table 6. Angular distortion and horizontal strain of single footing, at different loading and for different positions of absorption well after one year

جدول ۷. مقادیر دوران نسبی و کرنش افقی پی منفرد، در شدت‌های مختلف بارگذاری و موقعیت‌های متفاوت ترکیبگی لوله پس از ۱ سال

pipe position In 365 days		1	2	3	4	5
distance from center of model (m)		-10	-7.5	-6	-4	0
β (*10 ⁻³)	7 floor	AB	15.06	15.29	20.54	9.85
		BC	4.73	8.46	12.45	12.70
		CD	2.25	2.98	4.19	7.72
ε (*10 ⁻³)	7 floor	AB	8.05	0.85	1.93	9.30
		BC	3.98	2.92	2.30	2.09
		CD	2.73	2.38	2.43	1.62
β (*10 ⁻³)	5 floor	AB	19.15	24.18	28.29	12.29
		BC	4.95	10.40	14.78	15.80
		CD	1.79	2.88	4.44	8.65
ε (*10 ⁻³)	5 floor	AB	14.59	2.38	4.97	20.68
		BC	6.35	6.38	3.95	3.65
		CD	4.18	4.53	4.68	4.15
β (*10 ⁻³)	3 floor	AB	23.29	39.91	42.60	14.11
		BC	5.05	12.28	19.20	22.70
		CD	1.60	3.00	4.71	10.09
ε (*10 ⁻³)	3 floor	AB	20.20	5.97	7.69	33.89
		BC	8.38	9.68	6.83	3.90
		CD	5.14	6.09	6.51	6.97
β (*10 ⁻³)	1 floor	AB	28.42	75.50	118.75	22.47
		BC	4.88	15.15	27.10	43.38
		CD	1.36	2.94	5.00	12.19
ε (*10 ⁻³)	1 floor	AB	25.14	20.08	3.72	70.89
		BC	10.80	15.55	13.23	1.78
		CD	6.03	8.22	9.44	11.78

Table 7. Angular distortion and horizontal strain of single footing, at different loading and for different positions of pipe after one year

این نمودارها می‌توان اظهار کرد که مقادیر آسیب به پی نواری بر اثر ترکیب لوله بیشتر از چاه جذبی است. همچنین با افزایش شدت بارگذاری از میزان آسیب کاسته شده و بیشینه دوران نسبی نیز در مجاورت با مرز همسایه رخ می‌دهد.

شکل ۲۲. نمودار دوران نسبی پی نواری، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت ترکیب لوله لوله پس از یک سال

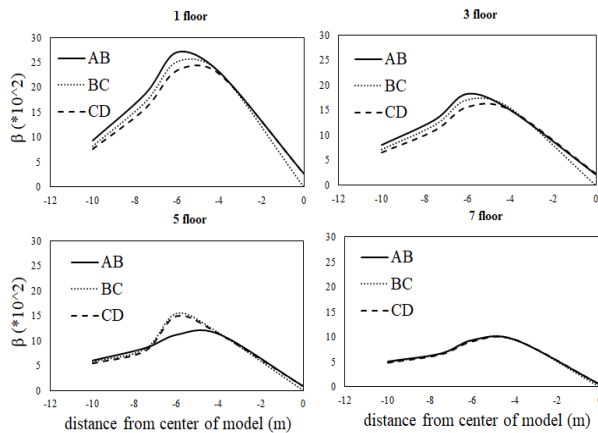


Fig. 22. The diagram of the angular distortion of the strip foundation, in different loading and for different positions of the pipe after one year

لنگرهای بدست آمده با مقادیر مجاز آیین‌نامه نشان می‌دهد که پی نواری مدل شده در هیچ حالتی وارد حالت پلاستیک نمی‌شود.

شکل ۲۳. نمودار لنگر خمشی پی نواری، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت ۲ ($x=17.5$ m) چاه جذبی

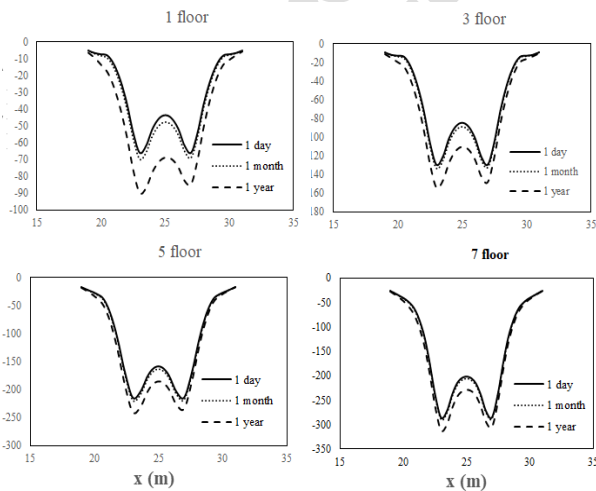


Fig. 23. Moment diagram of strip foundation, at different loading and for position 2 ($x=17.5$ m) of absorption well

برای بررسی آسیب به پی نواری، از آنجایی که مقادیر کرنش افقی ناچیز است، دوران نسبی پی بررسی می‌شود. شکل‌های (۲۱ و ۲۲) نمودارهای دوران نسبی پی نواری را در شدت‌های مختلف بارگذاری، برای چاه جذبی و ترکیب لوله لوله پس از یک سال نشان می‌دهد. با توجه به

شکل ۲۱. نمودار دوران نسبی پی نواری، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت‌های متفاوت چاه جذبی پس از یک سال

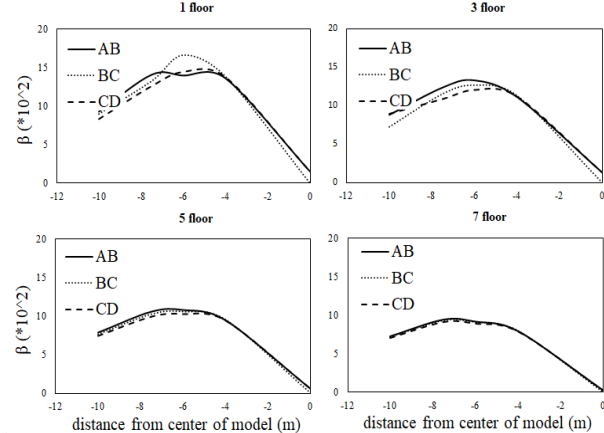


Fig. 21. The diagram of the angular distortion of the strip foundation, in different loading and for different positions of the absorption well after one year

رده‌های آسیب به سازه، دوران و کرنش افقی، در حالتی که پی منفرد باشد بیشتر از پی نواری است. در پی نواری به دلیل صلبیت و یکپارچه بودن پی، کرنش افقی ناچیز بوده ولی باید مقادیر لنگر ایجاد شده در پی با مقادیر مجاز آیین‌نامه مقایسه شود. مطابق با شکل‌های (۲۳ و ۲۴)، بحرانی‌ترین مقادیر لنگر خمشی به وجود آمده در طول پی، مربوط به موقعیت ۲ برای چاه جذبی و موقعیت ۳ برای ترکیب لوله است که در ادامه آورده شده است.

با افزایش بار وارد بر پی و در طول زمان یک سال، مقادیر لنگر افزایش یافته است که بیشینه آن در محدوده مرکزی پی رخ می‌دهد. مطابق با آیین‌نامه ACI 318-08 [19]، حداکثر مقدار لنگر خمشی مقطع بتن مسلح محاسبه شده است. با در نظر گرفتن عدد ۰٫۹ به عنوان ضریب کاهش مقاومت، مقدار لنگر حداکثر برای ساختمان ۱ و ۳ طبقه، ۲۲۲، ساختمان ۵ طبقه، ۴۱۵ و ساختمان ۷ طبقه، ۶۶۷ کیلونیوتن متر می‌باشد. مقایسه

و همچنین خاصیت متورم شوندگی خاک زیر پی، هرچه شدت بار وارد بر خاک کمتر باشد، مقادیر تورم خاک بیشتر خواهد بود.

۳- مقادیر آسیب در حالت ترکیدگی لوله بیشتر از چاه جذبی برآورد شده است. در حالت ترکیدگی لوله می‌توان گفت که از نظر دوران نسبی، در مرز همسایه و از نظر کرنش افقی، در زیر مرکز پی، بیشترین میزان خسارت اتفاق می‌افتد.

۴- تغییرات ممان خمشی در پی نواری با زمان به موقعیت لوله و چاه و همچنین شدت بارگذاری بستگی دارد. بدین صورت که با افزایش بار وارد بر پی و در طول زمان یک سال، مقادیر لنگر افزایش یافته است که مقادیر آن در محدوده مرکزی پی به بیشینه خود می‌رسد.

۵- رده‌های آسیب به سازه، دوران و کرنش افقی، در حالتی که پی منفرد باشد بیشتر از پی نواری است. در پی نواری به دلیل صلبیت و یکپارچه بودن پی، کرنش افقی ناچیز است. در نتیجه در طراحی پی‌ها با رعایت ضخامت پی، برای عدم ایجاد مفصل پلاستیک، توصیه به پی نواری می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Maleki, Stress path effect on wetting behaviour of unsaturated soils, MCEJ 15 (2015) 143-155.
- [2] I. Keskin, M. Salimi, E.Ö. Ateyşen, S. Kahraman, A.H. Vakili, Comparative Study of Swelling Pressure in Expansive Soils considering Different Initial Water Contents and BOFS Stabilization, Advances in Civil Engineering, 2023 (2023).
- [3] Y. Wei, C. Liu, Y. Shu, Effects of compaction conditions and external stress on the one-dimensional swelling behaviors of expansive clay, Environmental Earth Sciences, 82 (2023) 194.
- [4] Zomorodian, Assessment of Electro-Osmotic Stabilization of Expansive Soils, ijswr, (2013).
- [5] M. Mansoori, L. Aliye, A. Akhtarpour, the effect of matric suction changes on the behavior of Anchored excavations in expansive soil, Modares Civil Engineering journal, 24 (2024) 0-0.

شکل ۲۴. نمودار لنگر خمشی پی نواری، در شدت‌های مختلف بارگذاری و برای موقعیت ۳ ($x=19\text{ m}$) ترکیدگی لوله

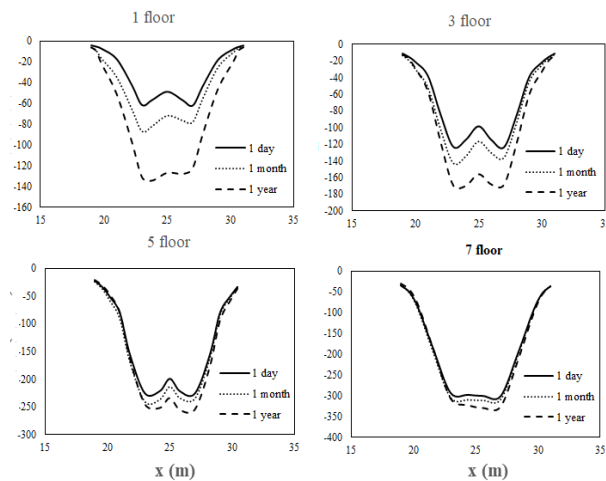


Fig. 24. Moment diagram of strip foundation, at different loading and for position 3 ($x=19\text{ m}$) of pipe

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش عددی اجزای محدود و نرم افزار ژئواستودیو، اثر چاه جذبی و ترکیدگی لوله آب در موقعیت‌های مختلف برای دو مدل پی منفرد و نواری، در شدت‌های مختلف بارگذاری روی جابه‌جایی‌های افقی و قائم، دوران و لنگرهای ایجاد شده در پی و برآورد آسیب ساختمان با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین این مقاله روش کلی را برای ارزیابی آسیب به سازه ناشی از تغییرات در مکش بافتی خاک در گذر زمان را ارائه می‌دهد. خاک مورد بررسی در این پژوهش از نوع متورم شونده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- ترکیدگی لوله و چاه جذبی باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود؛ تغییرات تغییر مکان‌های قائم و افقی پی با زمان به موقعیت لوله و چاه بستگی دارد. این مقادیر برای نوع پی مدلسازی شده که نواری یا منفرد باشد، متفاوت است.
- ۲- آسیب به سازه با گذشت زمان بیشتر می‌شود و در ماه اول رشد بیشتری داشته است. همچنین رده آسیب به سازه برای مدل‌هایی که سازه یک طبقه بر روی پی بنا شده است، از حالات دیگر شدیدتر است. به دلیل ترکیدگی لوله و یا وجود چاه جذبی

- conference on expansive soils, 1992, pp. 1-6.
- [15] B.M. Das, Principles of geotechnical engineering, Cengage learning, 2021.
- [16] 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.
- [17] y. A, 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.
- [18] W. Geostudio Sigma, Engineering Book for Stress-Deformation Modeling with Sigma/W, Geo-Slope International Ltd., Calgary, (2012).
- [19] A. Committee, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [20] Hamidi, The effect of nailing system on reducing building damage, in: 1st conference of civil engineering and development, zibakenar, 2012.
- [21] Yeganeh, Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction for High Rise Building Adjacent to Deep Excavation, in: faculty of engineering Department of civil engineering, ferdowsi university of mashhad, 2014.
- [22] C.-Y. Ou, Deep excavation: Theory and practice, Crc Press, 2014.
- [23] M.D. Boscardin, E.J. Cording, Building response to excavation-induced settlement, Journal of Geotechnical Engineering, 115 (1989) 1-21.
- [6] C. Huang, X. Wang, H. Zhou, Y. Liang, Factors affecting the swelling-compression characteristics of clays in yichang, China, Advances in Civil Engineering, 2019 (2019).
- [7] Y.J. Cui, A. Ferrari, D. Gallipoli, C. Jommi, L. Laloui, M. Pirone, E. Romero, G. Russo, L. Sanavia, T. Schanz, Unsaturated soil mechanics, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2004 (2004).
- [8] D.G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, 1993.
- [9] 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.
- [10] C.-S. Tang, Q. Cheng, T. Leng, B. Shi, H. Zeng, H.I. Inyang, Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil, Catena, 194 (2020) 104721.
- [11] B.M. Das, N. Sivakugan, Principles of foundation engineering, Cengage learning, 2018.
- [12] A.N. Yazdi, A. Akhtarpour, M.M. Abdalhusein, M.S. Baradaran, Experimental Investigation of the Volume Change of a Swelling Clay and Its Improvement, Transportation Infrastructure Geotechnology, (2023) 1-24.
- [13] 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, mashhad, 2023.
- [14] R.G. McKeen, A model for predicting expansive soil behavior, in: International

Numerical study of building damage with surface foundation located on expansive soil caused by matric suction changes

Reihaneh Nouri¹, Ali Akhtarpour^{*2}, Maryam Mansouri³

1. PhD student, Ferdowsi University of Mashhad

2. Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3. PhD student, Ferdowsi University of Mashhad

* Email: akhtarpour@um.ac.ir

Received: - Accepted:

Abstract

In general, any damage or breakage in a building's foundation will cause it to settlement, resulting in damage to both the foundation and the structure itself. Considering the extent of the construction, it is important to pay attention to the issues related to the design and performance of the foundation of the structure. From a geotechnical engineering perspective, expansive soils are among the most important soil groups that need to have their characteristics accurately determined before design studies. Such soils cause significant damage to structures. For this reason, the behavior of expansive soils should be investigated and determined in advance to minimize the damage caused to the structure. Shallow foundations such as singular and strip foundations may be affected by non-uniform settlement, rotation, and bending moment due to soil expansion, leading to damage. One of the factors leading to non-uniform settlement and rotation in foundations is water infiltration under the foundation. Often, soil layers near the ground surface, crucial for engineering purposes, are in an unsaturated state. Thus, understanding the precise behavior of soil necessitates the application of complex unsaturated soil mechanics principles. In expansive soils, water infiltration causes a reduction in matric suction and consequently a decrease in shear strength and an increase in soil volume. In this paper, a numerical investigation of the behavior of shallow foundations in two models of singular and strip foundations under changing factors such as pipe bursting and absorption well has been conducted. Using Geostudio SIGMA/W software and Couple analysis, the simultaneous effect of change in matric suction and change in stress and strain has been investigated. Additionally, the effect of the number of building stories and changes in the position of pipe bursting or absorption well on the results has been studied. The analysis of the results indicates that pipe bursting and absorption wells lead to an increase in pore water pressure in the soil over time. Additionally, due to the characteristics of expansive soil, The damage to the structure increases with the passage of time and it has grown more in the first month. Also, the category of damage to the structure is more severe for the models where the one-story structure is built on the foundation. Due to the bursting of the pipe or the existence of the absorption well and also the expansive property of the soil under the foundation, the lower the intensity of the load on the soil or the number of floors of the building, the higher the swelling values of the soil will be. So it is recommended to construction tall structures on this soil. The amount of damage in the case of pipe burst is estimated to be higher than that of the absorption well. In terms of angular distortion, water permeation under the foundation and in neighboring borders, and in terms of horizontal strain, permeation under the center of the foundation are responsible for the most damage. Overall, the damage rating to the structure is higher for singular foundations than for strip foundations, and in many cases, the structure will experience severe damage, thus the use of strip foundations with appropriate thickness for buildings located on expansive soils is recommended.

Keywords: unsaturated soil, matric suction, expansive soil, building foundation damage, Couple analysis, absorption well, pipe burst.