

ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی نشست خاک ناشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی در چارچوب مکانیک خاک غیر اشباع

جواد پرگر^۱، علی اخترپور^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

*Akhtarpour@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۵/۳]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۱۲/۱۴]

چکیده

در پژوهش حاضر به کمک نتایج مطالعات آزمایشگاهی و بر مبنای روابط پایه تئوری مکانیک خاک‌های غیراشباع اقدام به ارائه یک مدل تحلیلی جهت برآورد نشست خاک ناشی از بالا آمدن تراز آب زیرزمینی پس از ساخت و بررسی اهمیت آن در برآورد صحیح نشست نهایی خاک در طول بهره‌برداری سازه شده است. در این تحقیق رفتار خاک سیلتی تحت آزمایش‌های تحکیم همسان در شرایط اشباع و غیراشباع و همچنین تراندازی کنترل شده نمونه‌های تحکیم یافته در بارگذاری ثابت مورد بررسی قرار گرفت؛ سپس به کمک نتایج مطالعات آزمایشگاهی و ارائه یک مدل محاسباتی بر مبنای روابط پایه مکانیک خاک‌های غیراشباع و تئوری محاسبه نشست تحکیم ترزاقی به بررسی اثر بالا آمدگی تراز آب بر نشست شالوده واقع بر خاک مورد آزمایش تحت بارگذاری ثابت پرداخته شد. نتایج نشان داد میزان نشست خاک ناشی از این پدیده مرتبط با تراکم اولیه و ویژگی‌های تحکیمی خاک در شرایط غیر اشباع، ویژگی تغییر حجمی در مسیرهای تراندازی، ابعاد و شدت بارگذاری شالوده، عمق تراز آب زیرزمینی اولیه و میزان صعود آن خواهد بود؛ به نحوی که در مطالعه حاضر برای یک شالوده مربعی به ابعاد ۱۰ تا ۲۰ متر با بارگذاری یکنواخت واقع بر توده خاک سیلتی، عمق تراز آب زیرزمینی اولیه ۲۵ متری و صعود ۱ تا ۱۰ متری آن، میزان نشست از حدود ۵/۵ میلی‌متر (برای حداقل عرض پی و حداقل صعود تراز آب) تا ۴۹/۵ میلی‌متر (برای بیشترین عرض پی و بیشترین صعود تراز آب) محاسبه شد. همچنین نتایج نشان می‌دهد مقادیر نشست ناشی از ترشدگی خاک وابستگی بیشتری به عمق تراز آب زیرزمینی اولیه و میزان صعود آن نسبت به ابعاد و شدت بارگذاری شالوده دارد، که البته وقوع کامل این نشست‌ها مستلزم تعادل در مکش‌های بافتی پس از تراندازی توده خاک است.

واژگان کلیدی: نشست؛ خاک سیلتی؛ سه محوری غیراشباع؛ تحکیم همسان غیراشباع؛ تراز آب زیرزمینی؛ تراندازی؛ مکش بافتی.

۱- مقدمه

خاک است. برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده در طراحی، آزمایش‌ها در شرایط اشباع و یا در رطوبت محلی انجام می‌شوند و آثار تغییر در رطوبت و یا به عبارتی مسیرهای خشک‌اندازی و تراندازی در تغییر این پارامترها ملحوظ

یکی از نواقص موجود در طراحی‌های ژئوتکنیکی که امروزه در دست اقدام است، عدم توجه به آثار تغییر رطوبت در توده

نمی‌شود. اما رخدادهایی همچون وقوع بارش، شکستگی لوله‌های آب و فاضلاب، نشست از چاه‌های جاذب، بالا آمدن تراز آب زیرسطحی و ... همگی باعث ترشدگی خاک و تغییر رفتار آن و در پایان منجر به نرم‌شدگی و تحمیل نشست اضافی پس از ساخت و در هنگام بهره‌برداری خواهد شد. همچون خاک‌های اشباع، تغییرات رطوبت در خاک‌های غیراشباع منجر به تغییرات حجم در آنها می‌شود با این تفاوت که اندازه‌گیری میزان این تغییرات بسیار پیچیده‌تر خواهد بود. تغییرات حجم مصالح در مکانیک خاک کلاسیک تحت عنوان تورم یا فروریزش مطرح می‌شود و ایجاد این خواص علاوه بر تغییرات در رطوبت خاک به مقادیر بارگذاری روی توده خاک نیز مرتبط است [1].

در حوزه مطالعه اثر تغییرات مکش بافتی بر نشست توده خاک عابد و ورمر با تحلیل نشست فونداسیون در شرایط غیراشباع برای پروفیل‌های مکش بافتی مختلف و مدلسازی یک شالوده سطحی روی خاک سیلتی در فاصله ۳ متری از تراز آب زیر سطحی با مدل رفتاری بارسلونا نتیجه گرفتند که میزان نشست در شرایط رژیم های هیدرواستاتیک و تبخیر با توجه به شار پایین در نظر گرفته شده برای تبخیر سطحی اختلاف ناچیز کمتر از ۱۰ درصدی داشته اما در پروفیل‌های تراندازی ناشی از بارش، افزایش قابل ملاحظه نشست تا حدود ۲ برابر با کاهش مکش بافتی حاصل شده است [2]. کیم و همکاران با بررسی رفتار نشست شالوده‌های سطحی واقع بر خاک غیر اشباع در اثر کاهش مکش ناشی از بارندگی و شبیه سازی عددی یک پی بر روی توده خاک غیر اشباع به روش المان محدود به بررسی نشست پی در اثر بارگذاری در مکش‌های اولیه و کاهش مکش بافتی پس از آن پرداختند و برای محاسبه مدول الاستیک خاک در شرایط غیراشباع از رابطه نیمه تجربی (۱) استفاده کردند.

$$E_{i(unsat)} = E_{i(sat)} \left[1 + \alpha \frac{u_a - u_w}{p_a} s^{\beta} \right] \quad (1)$$

که در آن $E_{i(unsat)}$ و $E_{i(sat)}$ به ترتیب مدول الاستیسیته در شرایط غیر اشباع و اشباع، S درجه اشباع، u_a و u_w به ترتیب فشار هوا و فشار آب، p_a فشار اتمسفر و α و β پارامترهای تطبیقی هستند. ایشان نتیجه گرفتند که ظرفیت باربری پی برای

یک نشست مجاز ثابت با افزایش مدت زمان بارندگی کاهش یافته و میزان آن با تغییرات مکش یا به عبارتی تغییرات سطح زیر نمودار پروفیل مکش بافتی در برابر عمق رابطه مستقیم دارد و همچنین با فاصله گرفتن تراز آب زیرزمینی از پی، میزان نشست به طور چشمگیری کاهش می‌یابد که از علل آن می‌توان به افزایش مکش بافتی و به دنبال آن افزایش مدول الاستیک غیراشباع اشاره نمود [3]. فنگ و همکاران نیز به محاسبه نشست پی واقع بر توده خاک غیراشباع بر اساس اصل تنش موثر بیشاپ و منحنی مشخصه خاک ارائه شده توسط ون گشتاین [4] پرداخته و نتایج را با داده‌های حاصل از پایش نشست ناشی از احداث خاکریز یک ریل راه آهن درستی آزمایی کردند. ایشان با به کارگیری رابطه منحنی مشخصه خاک و ارتباط بین مکش بافتی و تغییرات رطوبت حجمی در آن برای خاک‌های مختلف و همچنین رابطه تنش موثر ارائه شده توسط بیشاپ (به کمک تخمین χ از رابطه تجربی وانگ و همکاران [5]) توانستند از رابطه ۲ با دقت مناسبی برای برآورد نشست پی استفاده کنند:

$$\Delta H = \left[\frac{\alpha_f \Delta(\sigma - u_a)}{1 + e_1} + \frac{\alpha_m \Delta(u_a - u_w)}{1 + e_1} \right] \cdot H_1 \quad (2)$$

که در آن ΔH نشست کل، H_1 ضخامت لایه خاک، e_1 تخلخل اولیه، u_a و u_w به ترتیب فشار هوا و فشار آب، σ تنش کل و α_m و α_f پارامترهای تطبیقی رابطه هستند. مبنای رابطه فوق در واقع رابطه تحکیم یک بعدی برای خاک‌های اشباع بوده با این تفاوت که تغییرات تخلخل در خاک به ازای تغییر در سطح تنش و مکش بافتی به صورت مجزا قابل محاسبه خواهد بود [6].

در ادامه مطالعات نشست در حوزه خاک‌های غیراشباع وون و همکاران با انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه در شرایط غیراشباع و همچنین بهره‌گیری از رابطه نیمه تجربی (۱) برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک در شرایط غیراشباع نتیجه گرفتند که تغییرات مکش بافتی در خاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تراکم پذیری تحت تنش ثابت داشته و وجود هوای محبوس در توده خاک منجر به ایجاد مقاومت اضافی در برابر تغییر شکل می‌شود که تغییر رطوبت خاک به سمت شرایط اشباع یا خشک باعث ناپدید شدن تدریجی این مقاومت خواهد شد [7].

نسبت پواسون و چسبندگی زهکشی نشده خاک به مکش بافتی، رفتار یک شالوده سطحی تحت بار قائم را تحت مکش‌های بافتی مختلف ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند که به ازای یک بارگذاری ثابت روی شالوده، میزان نشست تحت تاثیر پروفیل مکش بافتی در عمق بوده و با افزایش مکش بافتی به ویژه با خروج توده خاک از حالت اشباع مقادیر نشست کاهش قابل توجهی خواهند داشت و نرخ این کاهش نیز با افزایش بیشتر مکش بافتی تقلیل خواهد یافت، به شکلی که برای افزایش مکش بافتی خاک از شرایط اشباع تا مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال مقادیر ظرفیت باربری به ازای نشست ثابت رشد متوسط ۴۰۰ درصدی داشته اما در ادامه با افزایش مکش بافتی به حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال میزان این افزایش به حدود ۴۰ درصد تقلیل می‌یابد [11]. نتایج این پژوهش‌ها همگی حاکی از اهمیت وضعیت رطوبتی خاک در تماس با سازه‌های تحت بارگذاری و تاثیر چشمگیر آن بر رفتار تغییر حجمی و نشست پذیری توده خاک است. از این رو مطالعه اثر تغییرات رطوبت در خاک برای سازه‌های در حال بهره‌برداری و بررسی پتانسیل نشست شالوده و خسارات احتمالی ناشی از آن حائز اهمیت خواهد بود. در این پژوهش با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های سه محوری غیر اشباع در مسیرهای تحکیم همسان تحت مکش بافتی ثابت و مسیر تراندازی تحت بارگذاری ثابت و همچنین استفاده از روابط موجود ارائه شده توسط سایر پژوهشگران اقدام به برآورد نشست خاک ناشی از بالا آمدن تراز آب زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری شده است.

۲- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه و

آماده سازی نمونه‌ها

خاک مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیلتی بوده و آزمایش‌های شناسایی فیزیکی روی این خاک مطابق استانداردهای ASTM انجام شدند که نتایج آن در شکل و جدول (۱) قابل مشاهده است. بر اساس سامانه طبقه‌بندی متحد، این خاک در گروه ML قرار می‌گیرد.

بررسی لی و همکاران در مورد اثر کاهش مکش بافتی ناشی از بارندگی بر نشست نامتقارن پی‌های واقع بر خاک غیراشباع ناهمگن با کمک مدل رفتاری بارسلونا و مدل هیدرولیکی ارائه شده توسط ون گنشتاین نشان داد مقادیر نشست وابسته به شدت بارگذاری پی و همچنین طول دوره بارش است به طوری که برای تمامی متغیرهای تصادفی اعمال شده، افزایش مقادیر فوق منجر به افزایش مقادیر نشست میانگین و نامتقارن خواهد شد. همچنین میزان تغییر درحجم مخصوص خاک ناشی از تورم یا فروریزش در مسیرهای تراندازی یا به عبارتی تغییر شکل خاک در اثر نابودی مکش بافتی در بارگذاری ثابت نقش اساسی در تعیین مقادیر نشست در طول دوره بارش داشته است [8]. در ادامه این پژوهش‌ها لویز و همکاران نیز به بررسی اثر تغییرات پروفیل مکش بافتی ناشی از بارندگی بر نشست پی تحت بارگذاری‌های مختلف به کمک مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود پرداخته و نشان دادند که تغییرات پروفیل مکش بافتی در زیر پی ناشی از تراندازی می‌تواند منجر به اختلاف نشست محسوس در مقایسه با شرایط هیدرواستاتیک شود. مقادیر نشست حاصل شده از شبیه‌سازی عددی در این پژوهش ارتباط مستقیم با مساحت پروفیل مکش بافتی داشته به طوری که همپوشانی تقریبی پروفیل‌های مکش در رژیم تبخیر و هیدرواستاتیک منجر به هماهنگی کامل پروفیل نشست در این دو حالت شد و با کاهش تدریجی مکش بافتی ناشی از بارندگی، مقادیر نشست متناسب با تغییرات پروفیل مکش بافتی افزایش یافت [9]. ملکی و بیات نیز به بررسی رفتار مکانیکی خاک ماسه سیلت‌دار در شرایط غیراشباع تحت مکش بافتی ثابت پرداخته و نشان دادند رفتار تغییر حجمی خاک به مقادیر فشار همه جانبه و مکش بافتی وابسته است به طوری که حساسیت این رفتار وابستگی بیشتری به فشار همه جانبه نسبت به مکش بافتی دارد و همچنین با کاهش مکش بافتی تحت فشار همه جانبه یکسان نیز میزان تغییر حجم نمونه خاک افزایش خواهد یافت [10]. واناپالی و همکاران با بررسی رفتار تنش تغییر شکل شالوده‌های سطحی در محیط یک خاک چسبنده غیراشباع و استفاده از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود و با ایجاد وابستگی پارامترهایی همچون مدول الاستیسیته،

تغییر حجم کلی نمونه است.

ب- استفاده از ادوات تغییر شکل سنج محوری و شعاعی که از داده‌های آن‌ها تغییر حجم نمونه به دست می‌آید.

کاربرد سیستم سلول دو جداره در تعیین تغییر حجم نمونه نسبت به دیگر روش‌ها دقیق‌تر است و در واقع استفاده از تنها یک سلول در دستگاه، منجر به ایجاد خطا در اندازه‌گیری

جدول ۱. خواص فیزیکی خاک مورد مطالعه

LL (%)	32.3
PL (%)	24.1
PI	8.2
Gs	2.67
Gravel (%)	0
Sand (%)	9.1
Fine (%)	90.9

Table 1 - Physical properties of the studied soil

تغییر حجم نمونه خواهد شد؛ زیرا افزایش یا کاهش فشار در سلول، علاوه بر آنکه نمونه را تحت فشار همه جانبه قرار می‌دهد، باعث انبساط و یا انقباض خود سلول نیز خواهد شد و درصدی از حجم آبی که به سمت سلول فرستاده می‌شود یا از آن خارج می‌شود تا فشار در سلول را در حد ثابتی نگه دارد، در واقع متعلق به انبساط و انقباض سلول و نمونه است و نمی‌توان آن را یکجا به تغییر حجم نمونه نسبت داد. مزیت سلول دو جداره این است که اگر فشار مایع در سلول خارجی درست برابر با فشار سلول داخلی باشد، اختلاف فشار در سلول داخلی دستگاه به صفر رسیده پس هیچگونه انقباض یا انبساطی در سلول داخلی (که سلول اصلی دستگاه می‌باشد) رخ نخواهد داد. بدین طریق با یکسان کردن فشار در سلول‌های داخلی و خارجی، عامل تغییر حجم سلول داخلی که باعث کاهش دقت اندازه‌گیری تغییر حجم نمونه خاک می‌شود، مرتفع می‌شود که دستگاه مورد استفاده در این پژوهش نیز مجهز به این روش و ساخت شرکت ELE انگلستان (توسعه یافته در دانشگاه فردوسی مشهد) است. به منظور ایجاد مکش بافتی در نمونه نیز از روش انتقال محوری استفاده شده است. با توجه به اینکه کنترل فشار آب منفذی و فشار هوای منفذی در این روش به صورت مجزا صورت می‌گیرد پس می‌توان قابلیت

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

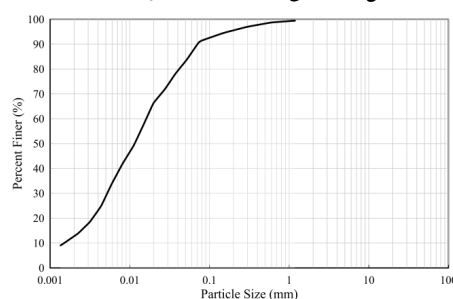


Fig. 1. particle distribution of the studied soil

برای تهیه نمونه‌ها سه روش نمونه دست نخورده، بازسازی به روش تراکم کوبشی و روش رسوب گذاری وجود دارد؛ اما به علت اینکه نمونه‌های مورد آزمایش باید همگن و ساخت آن‌ها تکرار پذیر باشد از روش اول نمی‌توان استفاده نمود. در پژوهش حاضر از روش تراکم کوبشی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. بدین منظور خاک مورد آزمایش با رطوبت مشخص بر اساس منحنی مشخصه آب-خاک و مکش بافتی هدف (۸ درصد با توجه به مکش بافتی حداکثر) مخلوط شده تا خاک برای رسیدن به تعادل اولیه در مکش بافتی مورد نظر در مسیر خشک اندازی قرار نگرفته و از آثار رفتار هیستریزس در مسیرهای خشک‌اندازی و تراندازی ایمن باشد؛ پس از حصول اطمینان از یکنواختی نمونه، مخلوط تهیه شده در ۸ لایه با ضخامت یکسان در قالب به قطر ۷ و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر برای رسیدن به وزن مخصوص خشک (1500 kN/m^3) متراکم شده است.

۳- دستگاه و تجهیزات آزمایش

در خاک‌های اشباع، تغییر حجم نمونه خاک معادل حجم آب ورودی و خروجی نمونه است که در دستگاه‌های سه محوری معمولی قابل اندازه‌گیری است. تعیین تغییر حجم خاک‌های غیراشباع به دلیل وجود همزمان فازهای آب و هوا در خاک مشکل است و بررسی تفسیر و بیان ویژگیهای مکانیکی این دسته از خاک‌ها، باید تغییرات به دست آمده در فازهای آب و هوا مشخص شود تا بتوان تغییر حجم کلی نمونه را به دست آورد. در دستگاه‌های سه محوری از دو روش برای اندازه‌گیری تغییر حجم یک نمونه خاک استفاده می‌شود که عبارتند از: الف- اندازه‌گیری تغییر حجم مایع اطراف نمونه خاک که مبین

از دو مسیر دیگر نیز در صفحه زیرین استفاده نمود. در دستگاه سه محوری اصلاح شده برای آزمایش روی نمونه‌های غیر اشباع، از طریق مسیر A پس فشار مورد نظر به نمونه اعمال می‌شود. همچنین از این مسیر آب به نمونه وارد و یا از آن خارج می‌شود. مسیر C که در دستگاه سه محوری معمولی برای عبور آب زهکشی شده از نمونه استفاده می‌شود، در دستگاه سه محوری ویژه خاک‌های غیر اشباع برای اعمال فشار هوا به کار برده می‌شود. این کار از طریق لوله کوچکی انجام می‌شود که از صفحه زیرین، هوای منفذی با فشار تعیین شده را به بالای نمونه و به کلاهک بالایی می‌رساند. در دستگاه سه محوری ویژه خاک‌های غیر اشباع، باید مسیری وجود داشته باشد که از طریق آن بتوان حباب‌های هوایی که از سنگ متخلخل پایه محل قرارگیری نمونه عبور کرده و در محفظه زیر سنگ جمع می‌شوند را از سیستم خارج نمود که در اصطلاح این عمل را شستشو می‌نامند. برای این کار باید مسیری مانند B در صفحه زیرین دستگاه گذاشته شود.

شکل ۴- نمای بالا از پایه زیرین دستگاه

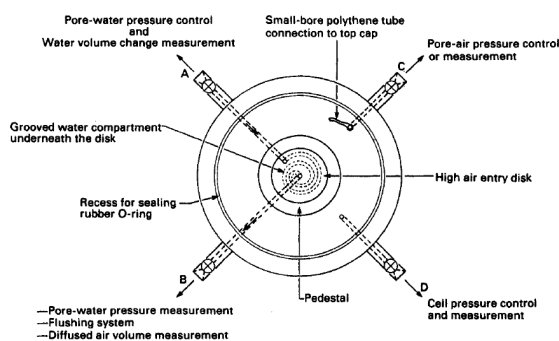


Fig. 4. Plan view of the pedestal

۳-۲- پایه محل قرار گیری نمونه

به دلیل عدم یکنواختی در سنگ در زمان ساخت در کارخانه یا مشکلات احتمالی که در زمان نصب سنگ ممکن است به وجود آید، ممکن است مقداری هوا بتواند از سنگ عبور کند. این مسئله توسط پژوهشگران دیگری از قبیل فردلاند و رهاردجو نیز بیان شده است [12]. به مرور زمان این حباب‌های هوا در فضای زیر سنگ متخلخل تجمع یافته و اندازه‌گیری تغییر حجم آب ورودی به نمونه و یا خروجی از

کنترل و تغییر تدریجی مکش و نیز ثبت داده‌های مربوط به فشار آب منفذی و فشار هوای منفذی در طول آزمایش را در طراحی دستگاه گنجانده. فشار آب منفذی (u_w) از طریق دیسک سرامیکی متخلخل (با عدد ورود هوای متناسب با مکش بافتی) به کف نمونه و فشار هوای منفذی (u_a) از بالای نمونه اعمال و اندازه‌گیری می‌شود. تغییر حجم نمونه خاک نیز با اندازه‌گیری میزان تغییر حجم آب سلول داخلی توسط یک دستگاه تغییر حجم سنج با سیستم صفحه دیافراگمی متصل به کرنش سنج با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میلی متر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه سه محوری غیر اشباع

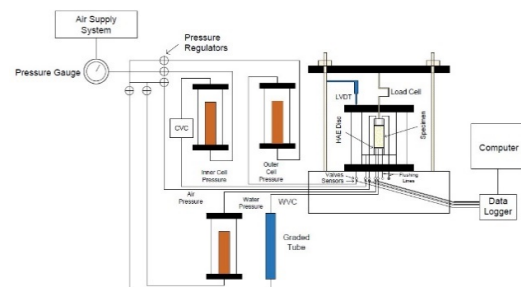


Fig. 2. Schematic of unsaturated triaxial device

شکل ۳. دیسک سرامیکی متخلخل

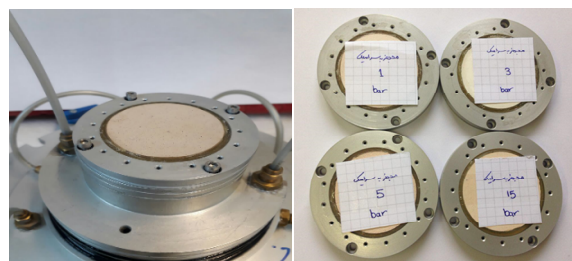


Fig. 3. HAE ceramic disc

۳-۱- مسیرهای اعمال فشار آب و هوا

دستگاه سه محوری معمولی که برای آزمایش روی نمونه‌های اشباع انجام می‌شود، شامل سه مسیر ورود و خروج آب به سلول دستگاه (مسیر D در شکل ۴) که برای اعمال فشار سلول نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، مسیر اعمال پس فشار (مسیر A در شکل ۴) و مسیر جمع آوری آب زهکشی شده از نمونه اشباع (مسیر C در شکل ۴) می‌شود. علاوه بر این سه مسیر موجود در صفحه زیرین یک دستگاه سه محوری معمولی و تغییرات لازم در کاربرد آن‌ها لازم است

خروجی از نمونه کمتر از ۰,۰۱ سانتی متر مکعب در روز شود [13-15].

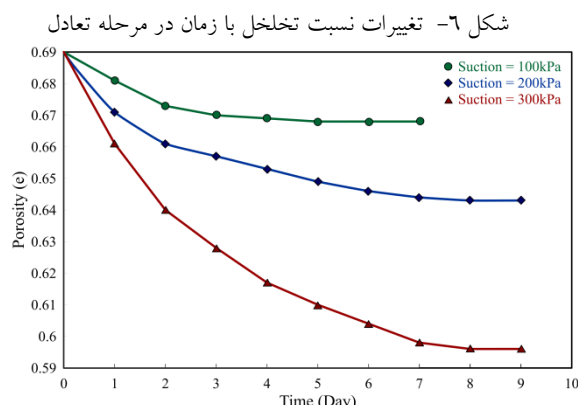


Figure 6. Void ratio variation with time at equilibrium stage

۴-۲- مرحله تحکیم

پس از انجام مرحله اشباع سازی در آزمایش حالت اشباع و همچنین برقراری تعادل (ایجاد مکش مورد نظر) در نمونه های غیراشباع، مرحله تحکیم با اعمال فشار همه جانبه انجام شد. در این مرحله در نمونه های غیراشباع مکش ایجاد شده نمونه در مقداری ثابت کنترل و به عبارتی مقادیر اولیه u_w و u_a حفظ شد. اعمال بار بر نمونه به صورت تدریجی با نرخ افزایش ۱ کیلوپاسکال در هر ساعت صورت گرفت و عمل بارگذاری تا رسیدن به فشار خالص ۳۰۰ کیلوپاسکال برای هر نمونه با مکش مورد نظر ادامه یافت. در طول مرحله تحکیم تغییرات فشار اعمال شده به نمونه و همچنین تغییرات حجم نمونه در فواصل زمانی مختلف ثبت و با استفاده از آن ها اقدام به رسم منحنی های تحکیم و استخراج خصوصیات تحکیمی خاک شد. در آزمایش تحکیم اشباع پس از رسیدن به فشار نهایی مرحله باربرداری برای تعیین شیب منحنی باربرداری نیز انجام شد.

۴-۳- مرحله تراندازی

در تمامی آزمون های تحکیم غیراشباع پس از رسیدن به فشار میانگین خالص ۳۰۰ کیلوپاسکال اقدام به کاهش مکش بافتی تحت فشار ثابت گردید تا تغییر حجم نمونه ها در مسیرهای تراندازی محاسبه شود. کاهش مکش بافتی با گام های ۱۰۰ کیلوپاسکال اعمال شده تا تفاوت تغییرات حجم در

نمونه را دچار اختلال کرده و سبب کاهش دقت اندازه گیری می شود. پس به منظور خارج کردن هوای نفوذ کرده به زیر سنگ متخلخل پایه محل قرار گیری نمونه، تغییراتی در این قسمت دستگاه داده شده است تا بتوان از آن برای استفاده در آزمایش های مربوط به خاک های غیر اشباع استفاده نمود. به این ترتیب که در زیر سنگ متخلخل نصب شده روی پایه محل قرارگیری نمونه، فضایی تعبیه شده است که امکان چرخش آب را از طریق دوایر متحد المרכזی که به وسیله شیارهای باریک به هم متصل شده اند فراهم آورد و از این طریق شستشوی هوای تجمع یافته با دقت و سهولت بیشتری انجام می شود (شکل ۵)، سپس از طریق مسیر B در شکل (۴) این حباب های هوای تجمع یافته از محیط پایه محل قرارگیری نمونه خارج می شود.

شکل ۵. پایه شیاردار زیرین



Fig. 5. Grooved base plate

۴-۴- روند آزمایش ها

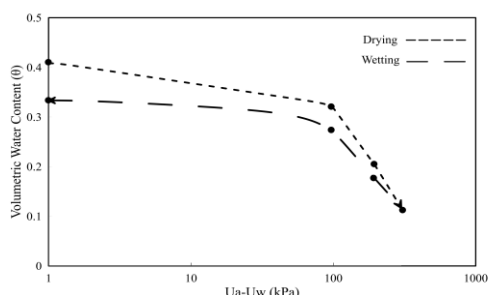
۴-۱- مرحله پایداری سازی مکش

برای انجام آزمایش های تحکیم در مکش بافتی ثابت ابتدا نیاز به رساندن نمونه به مکش بافتی مورد نظر و تعادل آن یا به عبارتی تحکیم تغییرات رطوبت در نمونه است که با اعمال فشار هوا و فشار آب از بالا و پایین نمونه خاک انجام می شود. برای این منظور پس از اشباع سازی نمونه ها، تحت تنش میانگین خالص ۲۵ کیلوپاسکال اقدام به افزایش مکش در خاک تا مقادیر مورد نظر برای شروع تحکیم شد. در هنگام تعادل نمونه ها میزان تغییر حجم نمونه و به دنبال آن تغییر تخلخل اولیه ثبت شد که جزئیات آن در شکل (۶) قابل مشاهده است. برای اطمینان از پایداری شدن مکش مورد نظر و رسیدن نمونه به تعادل، آزمایش تا جایی ادامه یافت که نرخ میزان آب

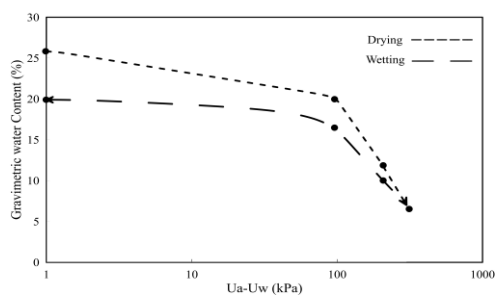
کیلوپاسکال و پایدار شدن آن، با کاهش مجدد فشار هوا به صورت تدریجی و با ثابت نگه داشتن فشار سلول‌های داخلی، خارجی و زیر نمونه، اقدام به کاهش مکش خاک تا رسیدن به مکش صفر شد. در حین این آزمایش مقادیر آب ورودی به نمونه و خروجی از آن و همچنین مقادیر آب ورودی به سلول داخلی و خروجی از آن اندازه‌گیری شد. سپس به کمک نتایج به دست آمده اقدام به رسم منحنی‌های درصد رطوبت حجمی، درصد رطوبت وزنی و درجه اشباع در مقابل مکش بافتی مطابق شکل (۷) شد.

شکل ۷- تغییرات الف) درصد رطوبت حجمی ب) درصد رطوبت وزنی

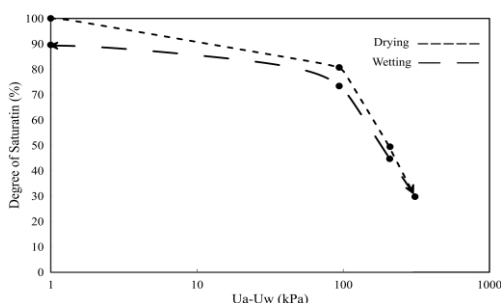
ج) درجه اشباع با مکش بافتی در مسیر تراندازی و خشک‌اندازی



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 7. Changes in a) volumetric water content b) gravimetric water content c) degree of saturation with matric suction in the wetting and drying path

مسیرهای تراندازی با توجه به مکش بافتی پیش از تراندازی نیز مورد ارزیابی قرارگیرد.

۴-۴- منحنی مشخصه آب - خاک

از اصلی‌ترین مشخصه‌های خاک در تئوری خاک‌های غیراشباع منحنی مشخصه آب - خاک بوده که در واقع بیانگر توزیع اندازه حفرات در خاک است. از این رو در این تحقیق برای دستیابی به رابطه این منحنی و استفاده از آن در محاسبات نشست، اقدام به انجام آزمایش استخراج منحنی مشخصه با استفاده از دستگاه سه محوری غیراشباع در مسیرهای خشک‌اندازی و تراندازی شد.

مسیر منحنی مشخصه در حالت خشک‌اندازی و تراندازی یکسان نیست به طوری که در یک مکش بافتی ثابت میزان رطوبت یا درجه اشباع در شاخه خشک و تر متفاوت خواهد بود. این پدیده تحت عنوان پسماند رطوبتی یا هیستریسیس بیان می‌شود. در زمان افت مکش بافتی و رسیدن خاک به حالت اشباع ممکن است تا مکش‌های بسیار پایین نیز مقداری هوا در نمونه به صورت غیر پیوسته وجود داشته باشد. پس درجه اشباع خاک در مکش‌های بسیار پایین نیز کمتر از صد درصد باقی خواهد ماند. مهم‌ترین تأثیر این پدیده در انتقال حالت خاک از شرایط اشباع به شرایط غیراشباع بروز می‌کند. چون خاک اشباع می‌تواند مکش‌های قابل توجهی را تا مرز عدد ورود هوا را تحمل کند بدون آن‌که درجه اشباع آن از مقدار واحد کمتر شود. بالعکس، درجه اشباع خاک در زمان کاهش مکش به سمت نقطه اشباع می‌تواند تا محدوده وسیعی، کمتر از واحد باقی بماند. برای دستیابی منحنی مشخصه خاک نمونه تهیه شده با تراکم مورد نظر ($15/5 \text{ kN/m}^3$) پس از اشباع سازی کامل به کمک عبور گاز CO_2 و سپس آب مقطر هواگیری شده از داخل نمونه و رسیدن به عدد B بزرگتر از ۹۵ درصد (طبق روش استاندارد ASTM D 854-02) اقدام به افزایش مکش بافتی به صورت تدریجی با کمک افزایش فشار هوا نسبت به فشار آب منفذی تا رسیدن به مکش‌های بافتی ۲۰۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال شد. در حین انجام آزمایش نیز فشار سلول‌های داخلی و خارجی برابر با ۲۵ کیلوپاسکال تنظیم شد. پس از رسیدن به مکش ۳۰۰

شکل ۸. نمای شماتیک لایه‌بندی و توزیع مکش بافتی در مراحل مختلف

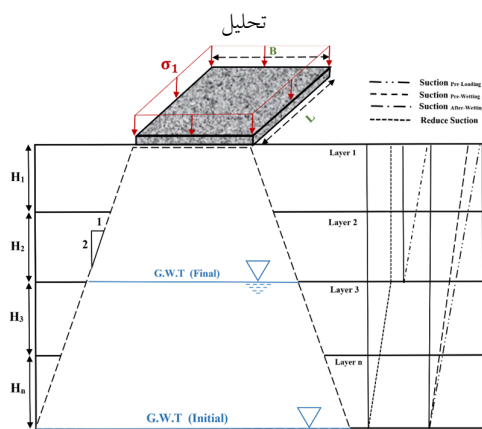


Fig. 8- Schematic of layering and distribution of matric suction in different stages of analysis

۵-۱- تنش میانگین خالص و مکش بافتی

به کمک داده‌ها و فرضیات اولیه مساله از جمله شدت بارگذاری یکنواخت روی پی، ابعاد پی، تعداد زیرلایه‌ها، تراز اولیه آب زیرزمینی، میزان اضافه تنش قائم ناشی از بارگذاری پی در مرکز هر لایه، وزن مخصوص لایه‌های خاک و ضریب فشار جانبی، مقادیر تنش میانگین خالص موجود قبل از بارگذاری و همچنین اضافه تنش میانگین خالص پس از بارگذاری با توجه به عمق قرارگیری مرکز هر لایه محاسبه شد. با توجه به عمق قرارگیری تراز اولیه آب زیرزمینی، توزیع مکش بافتی اولیه به روش هیدرواستاتیک و همچنین فرض میزان بالا آمدگی تراز آب، مکش بافتی اولیه و ثانویه نیز در مرکز هر لایه محاسبه شده و پس از برآورد تغییرات مکش بافتی ناشی از بارگذاری، تغییر مکش بافتی ناشی از صعود تراز آب در هرلایه محاسبه شده است.

۵-۲- تغییرات مکش بافتی ناشی از بارگذاری پیش از

بالا آمدگی تراز آب زیرزمینی

برای دقت در محاسبه مکش اولیه قبل از بالا آمدن تراز آب، فرض بر این است که توزیع مکش اولیه مربوط به قبل از بارگذاری بوده و اعمال بار و ایجاد تنش در لایه‌ها و به دنبال آن تغییرات تخلخل و نشست توده خاکی با فرض رطوبت وزنی ثابت حین بارگذاری منجر به تغییرات در مکش بافتی خواهد شد. برای آگاهی از این تغییرات نیاز است میزان

همانگونه که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود در ابتدا خاک کاملاً اشباع بوده و با خشک شدن یا به عبارتی افزایش مکش بافتی خاک تا میزان ۳۰۰ کیلوپاسکال، رطوبت کاهش یافته و از میزان ۲۵/۸ درصد به میزان ۷ درصد و درجه اشباع آن به حدود ۳۱/۲ درصد رسیده است که در این مرحله کاهش درصد رطوبت به میزان ۱۸/۸ درصد و کاهش درصد اشباع به میزان ۶۸/۸ درصد حادث شده است. پس از پایداری نمونه در شرایط حاصل از کاهش مکش، افزایش رطوبت نمونه و مرحله تر کردن خاک شروع شده و با کاهش مکش خاک تا مرحله اشباع مجدد میزان رطوبت خاک و درجه اشباع نسبت به مقدار اولیه در انتهای مرحله خشک افزایش یافته و به ترتیب به مقادیر ۱۹/۹ درصد و ۸۹/۳ درصد رسیده اند. طبق نتایج ذکر شده تغییرات درصد رطوبت و درجه اشباع خاک نسبت به مکش، در حالت تر شدن و خشک شدن خاک بر هم هماهنگ نبوده و در مکش‌های بافتی کمتر میزان اختلاف بین منحنی‌های تر و خشک بیشتر است که علت این عدم هماهنگی وجود رفتار هیسترسیس در مسیرهای خشک اندازی و تراندازی است.

۵- ارائه روش تحلیلی محاسبات نشست

مدل ارائه شده برای محاسبه نشست ناشی از بالا آمدگی تراز آب زیرزمینی به کمک کدنویسی در نرم‌افزار اکسل بر مبنای تغییر تخلخل خاک ناشی از مسیرهای تراندازی در شرایط غیراشباع و استفاده از رابطه ۳ بر پایه تئوری محاسبه نشست تحکیم ترازقی بر اساس تغییرات تخلخل است.

$$\Delta H = \frac{\Delta e \times H}{1+e} \quad (3)$$

که در آن ΔH نشست لایه خاک، Δe تغییر تخلخل، H ضخامت لایه خاک و e نسبت تخلخل اولیه است. در واقع بالا آمدن تراز آب زیرزمینی منجر به تغییرات مکش بافتی در لایه‌های غیراشباع بالای این تراز خواهد شد و این تغییرات مکش تحت تنش ثابت منجر به ایجاد کرنش‌های حجمی یا به عبارتی تغییر تخلخل در لایه‌های خاکی می‌شود. در مدل ارائه شده در این تحقیق توده خاک از تراز زیر پی تا تراز آب زیر زمینی به n لایه دلخواه تقسیم بندی شده و پی گسترده با ابعاد مشخص مطابق شکل (۸) روی آن مستقر شده است.

$(u_a - u_w)$ ، رطوبت حجمی باقیمانده و رطوبت حجمی حالت اشباع و a و b پارامترهای تطبیقی رابطه می‌باشند. به دنبال آن هرگونه تغییر تخلخل در گام‌های مدنظر منجر به تغییر در مقدار رطوبت حجمی و در پی آن تغییر در مکش بافتی خواهد شد و میزان این تغییرات طبق معادله فوق که پارامترهای آن بر اساس نتایج آزمایشگاهی در این تحقیق تطبیق یافته‌اند محاسبه خواهد شد؛ اعمال این تغییرات در مکش بافتی منجر به اصلاح پارامتر λ_s در گام بعدی بارگذاری با توجه به مکش بافتی جدید شده و سیر بارگذاری با به روزرسانی این دو متغیر اصلی در محاسبه نشست صورت می‌گیرد. همچنین رابطه منحنی مشخصه خاک برآزش شده نیز بر مبنای تغییر تخلخل در هر گام اصلاح شده و رطوبت حجمی حالت اشباع (θ_s) در آن با توجه به تخلخل جدید محاسبه می‌شود.

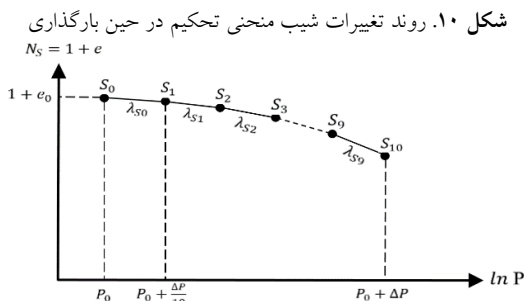


Fig. 10. changes in the slope of the consolidation curve during loading

۵-۳- تغییرات تخلخل ناشی از بالاآمدگی تراز آب زیرزمینی

در مدل تحلیلی ارائه شده با توجه به مقادیر تخلخل اولیه، تخلخل و مکش بافتی پس از بارگذاری، مکش ثانویه پس از بالاآمدگی تراز آب زیرزمینی و ضرایب λ_s مربوط به مکش‌های بافتی قبل و پس از تراندازی، میزان تغییر تخلخل ناشی از بالاآمدگی تراز آب زیرزمینی طبق رابطه ۶ ارائه شده توسط آلونسو و همکاران محاسبه شده است [۱۶].

$$dv = \left(N_{s1} - \lambda_{s1} \ln \left(\frac{p}{p_c} \right) \right) - \left(N_{s2} - \lambda_{s2} \ln \left(\frac{p}{p_c} \right) \right) \quad (6)$$

که در آن dv تغییر حجم ویژه، N_{s1} و N_{s2} حجم ویژه خاک در مکش‌های بافتی S_1 و S_2 ، λ_{s1} و λ_{s2} شیب منحنی تحکیم بکر در مکش‌های بافتی S_1 و S_2 ، p و p_c به ترتیب تنش میانگین خالص و تنش مرجع می‌باشند.

تغییرات تخلخل ناشی از بارگذاری در شرایط غیراشباع محاسبه شد. از این رو در ابتدا با توجه به نتایج تحکیم غیراشباع برای مکش‌های مختلف و استفاده از رابطه ۴ ارائه شده توسط آلونسو و همکاران اقدام به تعیین معادله شیب منحنی تحکیم بکر در شرایط غیر اشباع (λ_s) در برابر مکش بافتی (S) شد [16].

شکل ۹. روند تغییرات شیب منحنی تحکیم با مکش بافتی

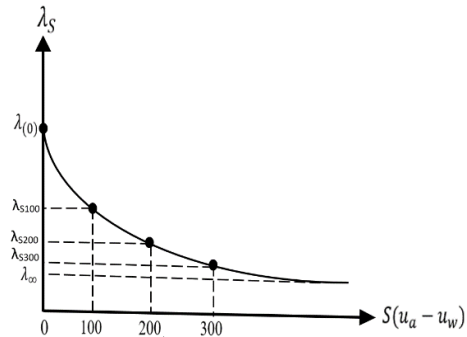


Fig. 9. changes in the slope of the consolidation curve with matric suction

$$\lambda_s = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (7)$$

که در آن S مکش بافتی، λ_s و $\lambda(0)$ به ترتیب شیب منحنی تحکیم بکر در مکش بافتی S و صفر و r و β پارامترهای تطبیقی در این رابطه هستند.

پس اعمال اضافه تنش میانگین خالص در هر لایه به ۱۰ گام تقسیم بندی شده و در هر گام با توجه به تخلخل اولیه (محاسبه شده بر مبنای وزن مخصوص و توده ویژه خاک)، میزان اضافه تنش میانگین خالص موجود و (λ_s) مربوط به مکش اولیه، میزان تغییر تخلخل و به دنبال آن تخلخل ثانویه ناشی از بارگذاری گام موجود در لایه موردنظر محاسبه شده است.

این تغییر تخلخل در هر گام با فرض رطوبت وزنی ثابت منجر به تغییر مکش بافتی در خاک خواهد شد؛ برای محاسبه میزان این تغییرات نیز اقدام به برآزش منحنی مشخصه خاک به کمک نتایج آزمایشگاهی مربوط به این آزمون و رابطه ۵ ارائه شده توسط ون گشتاین شد [5].

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\frac{u_a - u_w}{a})^b]^{(1-\frac{1}{b})}} \quad (8)$$

که در آن θ ، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی در مکش بافتی

شکل ۱۱. میزان تغییر حجم ویژه ناشی از تراندازی در انتهای بارگذاری

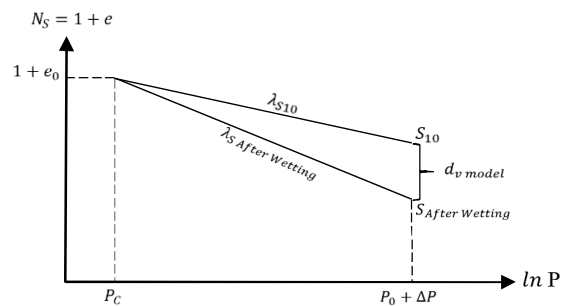


Fig. 11. Change in specific volume due to the wetting at the end of loading

شکل ۱۳. حجم ویژه تطبیق یافته با نتایج آزمایشگاهی ناشی از تراندازی

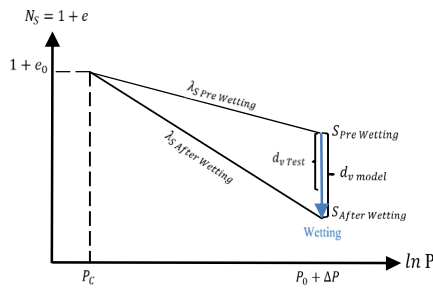


Fig. 13. The specific volume adapted to the laboratory results from the wetting

۴-۵- اصلاح تغییرات تخلخل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی

با توجه به اینکه مبنای محاسبه نشست در این پژوهش میزان تغییر حجم ناشی از ترشدگی خاک خواهد بود پس برای هماهنگی این محاسبات با نتایج آزمایشگاهی، مدل تحلیلی ارائه شده برای آزمون‌های تحکیم همسان انجام شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته و نتایج تغییر حجم ویژه حاصل از محاسبات تحلیلی با تغییر حجم ویژه حاصل از تراندازی نمونه‌ها در مطالعات آزمایشگاهی مقایسه شدند. نسبت تغییر حجم نمونه آزمایشگاهی (با توجه به مکش اولیه پیش از تراندازی) به تغییر حجم حاصل شده از محاسبات به صورت اعمال ضریب کاهش یا افزایشی (α_{dv}) طبق رابطه ۷ به مدل محاسباتی برای برآورد نشست لایه‌های خاک اعمال شد.

$$\alpha_{dv} = \frac{dv_{Test}}{dv_{model}} \quad (\text{For } S_{Pre\ Wetting}) \quad (7)$$

که در آن α_{dv} ضریب اصلاح حجم ویژه، dv_{Test} تغییر حجم ویژه حاصل از نتایج آزمایشگاهی و dv_{model} تغییر حجم ویژه حاصل از مدل تحلیلی هستند.

شکل ۱۲. تغییرات ضریب اصلاح حجم ویژه محاسباتی با مکش بافتی

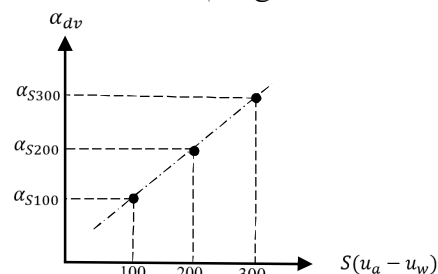


Fig. 12. Changes of computational specific volume modification coefficient with matric suction

۵-۵- نشست کل ناشی از بالا آمدگی تراز آب زیرزمینی

در نهایت با محاسبه میزان تغییر در تخلخل ناشی از تراندازی در لایه‌های زیر پی تا تراز آب زیرزمینی اولیه، میزان نشست هر لایه به تفکیک طبق رابطه ۸ محاسبه و از مجموع نشست لایه‌ها نشست کل حاصل شده است.

$$\Delta H_n = \frac{\Delta e_{Wetting} * H_n}{1 + e_0} \quad (8)$$

که در آن:

ΔH_n = نشست لایه شماره n

$\Delta e_{Wetting}$ = تغییر تخلخل ناشی از تراندازی

H_n = ضخامت لایه n ام

e_0 = تخلخل اولیه

۶- نتایج

۶-۱- آزمایش‌های تحکیم همسان

شکل (۱۴) نتایج تغییرات حجم ویژه ($1 + e$) نمونه خاک در برابر تنش میانگین خالص ($P' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_a$) در شرایط اشباع و غیر اشباع (مکش‌های بافتی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود حجم ویژه خاک در یک مکش بافتی ثابت با افزایش فشار خالص میانگین کاهش یافته که شیب قسمت خطی این نمودار نشان دهنده شیب منحنی تحکیم بکر در آن مکش بافتی مشخص خواهد بود. حجم ویژه خاک برای حالت اشباع از مقدار اولیه ۱/۶۹ پس از رسیدن به فشار ۳۰۰ کیلوپاسکال به ۱/۶ کاهش و پس از باربرداری تا فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال به مقدار ۱/۶۱۳ تغییر یافت. برای مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال حجم ویژه خاک پس از تعادل در تنش میانگین

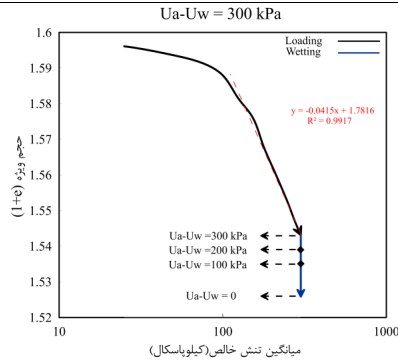


Fig. 14. Soil specific volume changes during consolidation and wetting

۲-۶- تابع تغییرات شیب منحنی تحکیم بکر غیر اشباع در برابر مکش بافتی

با آگاهی از مقادیر λ برای مکش‌های بافتی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و همچنین λ_0 برای حالت اشباع با روش سعی و خطا اقدام به تعیین تابع λ در برابر مکش بافتی بر اساس رابطه پیشنهادی ارائه شده توسط آلونسو و همکاران [16] شد به شکلی که تابع مورد نظر بتواند پیش‌بینی کاملاً دقیق از خروجی‌های نتایج آزمون تحکیم را ارائه دهد که نتایج آن در شکل (۱۵) قابل مشاهده است.

شکل ۱۵. تغییرات شیب منحنی تحکیم با مکش بافتی برای خاک مورد مطالعه

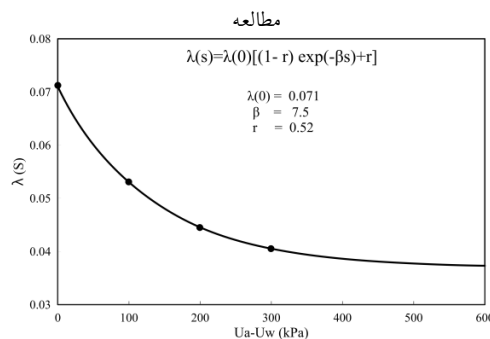


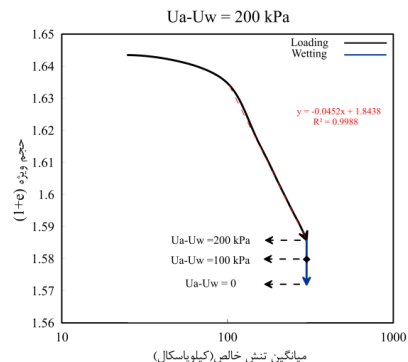
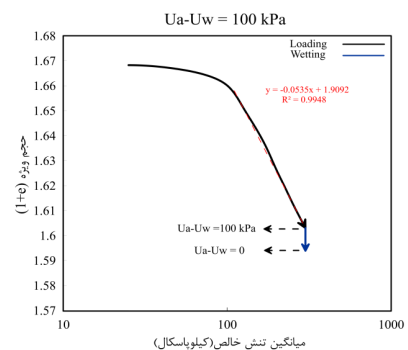
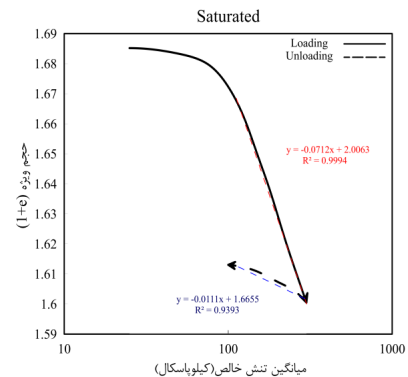
Fig. 15. Slope changes of consolidation curve with matric suction for the studied soil

۳-۶- منحنی مشخصه آب - خاک (SWCC)

برای استفاده از منحنی مشخصه آب-خاک در محاسبات نشست و پیش‌بینی تغییرات مکش بافتی به کمک تغییرات رطوبت حجمی اقدام به برازش رابطه ۵ ارائه شده توسط ونگشتاین [5] شد به نحوی که دارای بهترین همپوشانی با نتایج آزمایشگاهی باشد.

خالص ۲۵ کیلو پاسکال به ترتیب به مقادیر ۱/۶۶۸، ۱/۶۴۳ و ۱/۵۹۶ و پس از افزایش تنش میانگین خالص تا ۳۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب به مقادیر ۱/۶۰۳، ۱/۵۸۶ و ۱/۵۴۳ تغییر یافت؛ همچنین در مسیرهای تراندازی نیز حجم ویژه نمونه با مکش بافتی اولیه ۱۰۰ کیلو پاسکال پس از رسیدن به مکش بافتی صفر به مقدار ۱/۵۹۴، حجم ویژه نمونه با مکش بافتی اولیه ۲۰۰ کیلو پاسکال پس از رسیدن به مکش بافتی صفر به مقدار ۱/۵۷۲ و ۱/۵۸۰ و حجم ویژه نمونه با مکش بافتی اولیه ۳۰۰ کیلو پاسکال پس از رسیدن به مکش بافتی به مقادیر ۱/۵۳۸، ۱/۵۳۴ و ۱/۵۲۶ تغییر یافت.

شکل ۱۴. تغییرات حجم ویژه خاک در حین تحکیم و تراندازی



۵-۶- محاسبه نشست ناشی از بالا آمدن تراز آب زیرزمینی

در مطالعه حاضر به کمک مدل محاسباتی اشاره شده اقدام به بررسی نشست یک پی گسترده مربعی شکل واقع بر توده خاک سیلتی با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) ناشی از بالا آمدن تراز آب زیر زمینی شد که جزئیات نشست بر اساس ابعاد پی و میزان تغییرات تراز آب در شکل های (۱۸ و ۱۹) قابل مشاهده است.

شکل ۱۸- تغییرات نشست کل در اثر بالا آمدن تراز آب زیرزمینی با ابعاد پی و میزان صعود تراز آب

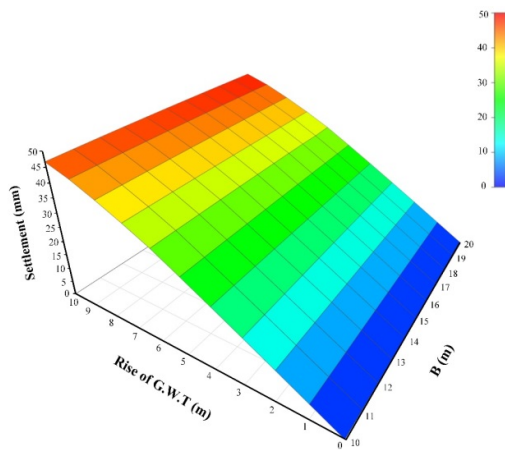


Figure 18 Changes in the total settlement due to rising groundwater level with the dimensions of the foundation and the rate of water level rise

جدول ۲- مشخصات خاک مورد استفاده در مدل محاسباتی جهت برآورد نشست ناشی از بالا آمدگی تراز آب زیرزمینی

USCS	ML
$\gamma_d (\frac{KN}{m^3})$	15.5
Gs	2.67
Void ratio (e)	0.69
K_0	0.625
$\lambda(0)$	0.071
$\lambda(\infty)$	0.037
square foundation width (m)	10-20
Loading (kPa)	100
G.W.T Initial (m)	25
Rise of G.W.T (m)	1-10

Table 2 - Soil characteristics used in the computational model to estimate settlement due to groundwater level rise

شکل ۱۶- برازش منحنی مشخصه آب-خاک ارائه شده توسط ون گنشتاین براساس نتایج آزمایشگاهی

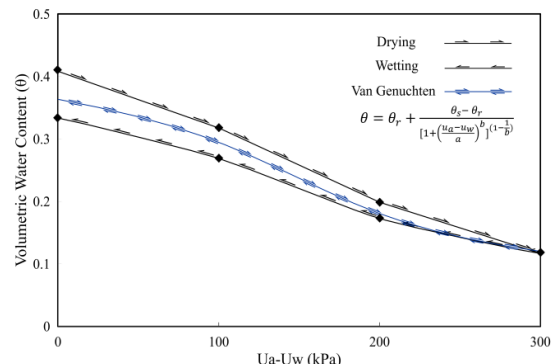


Figure 16- soil-water characteristic curve presented by Van Genuchten according to laboratory results

۴-۶- تابع ضریب تغییرات حجم ویژه در برابر مکش بافتی

همانگونه که بند ۵-۴ اشاره شد به علت اختلاف تغییرات حجم ویژه حاصل از نتایج آزمایشگاهی با مدل محاسباتی (اعمال شده بر نمونه های آزمایشگاهی) در مسیر تراندازی اقدام به دستیابی تابعی از این ضریب تغییرات در برابر مکش بافتی اولیه شد. به کمک این تابع و با آگاهی از مکش بافتی اولیه پس از بارگذاری پی و قبل از بالا آمدگی تراز آب زیرزمینی در هرلایه، ضریب تغییر حجم ویژه برای مکش بافتی موردنظر استخراج و به تغییر حجم ویژه پیش بینی شده مدل اعمال خواهد شد تا این تغییرات دارای بیشترین هماهنگی با نتایج حاصل از تراندازی نمونه های آزمایشگاهی باشد.

شکل ۱۷- ضریب تغییرات حجم ویژه آزمایشگاهی به مدل محاسباتی در برابر مکش بافتی اولیه

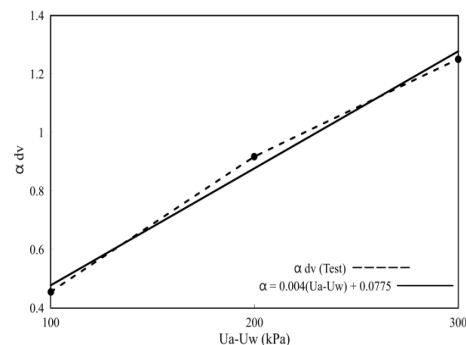


Fig. 17. Coefficient of laboratory specific volume changes to the computational model verses initial matric suction

[16] برای پیش‌بینی شیب منحنی تحکیم نرمال به کمک مکش بافتی است.

۲- مقادیر تغییر تخلخل نمونه‌های تحکیم یافته در مسیرهای تراندازی تحت تنش میانگین خالص و میزان افت مکش بافتی ثابت، وابستگی رفتار تغییر حجمی مصالح به مکش بافتی پیش از تراندازی را نشان می‌دهد. بررسی نشست تفکیکی لایه‌ها نیز نشان داد بیشترین سهم از نشست کل مربوط به لایه‌های فوقانی تراز آب اولیه به دلیل مکش بافتی اولیه کمتر در آنها خواهد بود. به عبارتی تغییرات ثابت مکش بافتی در مقادیر مکش بافتی اولیه کمتر و نزدیک تر به شرایط اشباع منجر به تغییر حجم بیشتری در توده خاک خواهد شد که با نتایج پژوهش واناپالی و همکاران [۱۱] همخوانی دارد.

۳- نتایج مدل تحلیلی این پژوهش نشان می‌دهد میزان نشست خاک تحت بارگذاری ثابت کاملاً وابسته به تغییرات توزیع مکش بافتی در توده خاک خواهد بود به شکلی که برای بالآمدگی ثابت تراز آب، افزایش ابعاد پی مربعی تحت بارگذاری ثابت از ۱۰ به ۲۰ متر منجر به افزایش کمتر از ۱۰ درصدی نشست شده در حالی که برای پی مربعی با ابعاد ثابت، تغییرات بالآمدگی تراز آب از ۱ به ۱۰ متر منجر به افزایش مقادیر نشست تا حدود ۱۰ برابر نسبت به حالت اولیه خواهد شد.

۸- مراجع

- [1] Gens, A. 1996. Constitutive modelling: application to compacted soils. In PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95/PARIS/France/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 3.
- [2] Abed, A. A., & Vermeer, P. A. 2006. Foundation analyses with unsaturated soil model for different suction profiles. In Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz (pp. 547-554).
- [3] Kim, Y., Park, H., & Jeong, S. 2017. Settlement behavior of shallow foundations in unsaturated soils under rainfall. *Sustainability*, 9(8), 1417.
- [4] van Genuchten MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*. 44, pp. 892-898.
- [5] Wang, L.Q., Yuan-zhan, W. and Kai-hui, J., 2011. Settlement observation and analysis on dynamic consolidation treated high-filled road ground. In 2011 International Conference on Electric

شکل ۱۹ - الف) تغییرات نشست با عرض پی مربعی برای بالآمدگی تراز آب زیرزمینی ۱ و ۱۰ متر ب) تغییرات نشست با بالآمدگی تراز آب زیرزمینی برای پی مربعی با عرض ۱۰ و ۲۰ متر

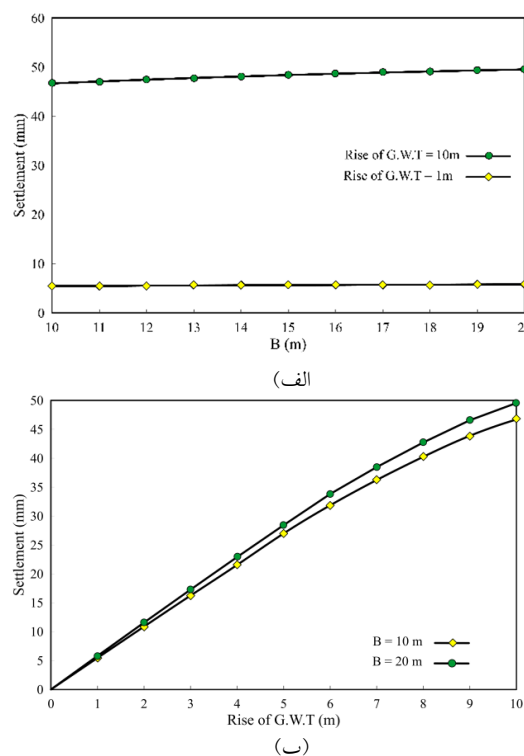


Fig. 19 - a) Settlement changes with square foundation width for groundwater level rise of 1 and 10 meters . **b)** Settlement changes with groundwater level rise for a square foundation with a width of 10 and 20 meters

نتیجه گیری

۱- نتایج آزمایشگاهی این پژوهش خطی بودن تغییرات حجم ویژه در شرایط تحکیم نرمال تحت مکش بافتی ثابت و کاهش مقادیر شیب و عرض از مبدا منحنی‌های تحکیم نرمال یا به عبارتی کاهش تحکیم پذیری خاک با افزایش مکش بافتی را نشان می‌دهد، اما نرخ کاهش تحکیم پذیری در مکش‌های بافتی بالاتر افت خواهد کرد به شکلی که برای گامهای افزایش مکش ۱۰۰ کیلوپاسکال شیب منحنی تحکیم بکر با خروج از حالت اشباع کاهش ۲۵ درصدی داشته اما این مقدار در گامهای بعدی به ۱۵ و ۸ درصد تقلیل می‌یابد که این تغییرات دارای همپوشانی مناسبی با رابطه (۵) پیشنهادی آلونسو و همکاران

- silty sand under constant water content condition. *Engineering geology*, 141, pp.45-56.
- [11] Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. 2018. Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach. *Soils and Foundations*, 58(2), 382-397.
- [12] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. 2012. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons.
- [13] Sharma, R. S. 1998. Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays (Doctoral dissertation, University of Oxford).
- [14] Zakaria, I. 1994. Yielding of unsaturated soil (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [15] Sivakumar, V. 1993. A critical state framework for unsaturated soil (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [16] Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- Technology and Civil Engineering (ICETCE) (pp. 668-670). IEEE.
- [6] Feng, J., Wu, X. Y., Zhu, B. L., & Yang, Q. X. 2013. Settlement Calculation for Unsaturated Soil Foundation Based on the Van Genuchten Model of SWCC.
- [7] Oh, Won Taek, Sai K. Vanapalli, and Anand J. Puppala. 2009. "Semi-empirical model for the prediction of modulus of elasticity for unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal* 46.8, pp. 903-914.
- [8] Le, Thi Minh Hue, et al. 2013 "Rainfall-induced differential settlements of foundations on heterogeneous unsaturated soils." *Géotechnique* 63.15, pp. 1346-1355.
- [9] Lopes, E. F., da Rocha Moreira, M. M., Leme, R. F., & da Silva Filho, F. C. 2021. Evaluation of settlement of shallow foundations laid on unsaturated soils. In MATEC Web of Conferences (Vol. 337, p. 03005). EDP Sciences.
- [10] Maleki, M. and Bayat, M., 2012. Experimental evaluation of mechanical behavior of unsaturated

Experimental and analytical assessment of soil settlement due to groundwater rising in the framework of unsaturated soil mechanics

J. Pargar¹, A. Akhtarpour^{2*}

1-M.Sc, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

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

*Akhtarpour@um.ac.ir

Abstract

In the present study, with the help of experimental studies and based on the basic relationships of unsaturated soil mechanics theory, an analytical model is proposed to estimate soil settlements due to groundwater level rise after construction and its importance in accurately estimating the final soil subsidence. To determine the geotechnical parameters used in the design, experiments are performed either under saturated conditions or at natural moisture, and the effects of changes in moisture; in other words, drying and wetting paths are not considered. However, in the event of rainfall, the burst of water and sewage pipes, leakage from absorption wells, rising groundwater levels, and similar phenomena, the soil becomes wet and its behavior changes, eventually leading to softening and imposing additional settlement which can cause damage to the surface structures. In traditional laboratory studies, this wetting is partially evaluated using the double consolidation test with the calculation of the collapsibility index. This assessment method is limited to soil with fully saturation in a one-dimensional and uncontrolled matric suction device. The results are qualitative and without enough accurate for use in settlement calculations in wetting paths for unsaturated soils. In this study, the behavior of silty soil under consolidated isotropic tests under saturated and unsaturated conditions as well as controlled wetting of consolidated specimens at constant loading with the help of an unsaturated triaxial device was investigated; Afterward; using the results of laboratory studies with presenting a analytical model based on the basic relationships of unsaturated soil mechanics and the theory of calculation of terzaghi consolidation, the effect of water level rising on the shallow foundation settlements under constant loading was investigated. The results showed that the amount of soil settlements due to this phenomenon is related to the initial density and soil consolidation properties in unsaturated conditions, volumetric change characteristics in the wetting paths, dimensions and intensity of foundation loading, initial groundwater level depth and ascent rising rate. In the present study, for a square foundation with dimensions of 10 to 20 meters with constant loading located on the silty soil mass, the depth of the initial groundwater level of 25 meters and its rise from 1 to 10 meters, the settlement amount of about 5.5 mm (For minimum foundation width and minimum water level rise) up to 49.5 mm (for maximum foundation width and maximum water level rise) was calculated. The results also show that the amount of settlement due to soil wetting is more dependent on the depth of the initial groundwater level and the rate of rising comparing with the dimensions and intensity of loading of the foundation.

Keywords

Settlement; Silty soil; Unsaturated triaxial; Unsaturated isotropic consolidation; Groundwater level; Wetting; matric suction