

ارائه‌ی یک مدل هیدرومکانیکی اصلاح شده جهت پیش‌بینی رفتار غیراشباع خاک‌های فروریزی در شرایط مکش ساختاری ثابت و تنش خالص میانگین متغیر

سید محسن حائری* (استاد)

مجید بیگی (کارشناس ارشد)

سعید صابری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیر اکبری گرگانی (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۳۵-۱۴۰، (پادداست نمی)

خاک لس در حالت خشک و یا در رطوبت طبیعی، مقاومت مناسب و نشست‌پذیری کم دارد، اما در صورتی که بارگذاری شود و رطوبت آن متناسب با بار وارده از حد مشخصی عبور کند، ساختار خاک به یک‌باره فرو می‌ریزد و نشست ناگهانی زیادی در آن رخ می‌دهد و موجب تخریب سازه می‌شود. به منظور ارزیابی رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های مذکور، تعدادی آزمایش بر روی نمونه‌های دست‌نخورده از خاک لس گرگان با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع ارتقاء یافته در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. تعدادی از آزمایش‌ها در شرایط اعمال مکش ساختاری ثابت و تنش خالص میانگین متغیر انجام شده است. در نوشتار حاضر، نتایج حاصل از انجام برخی از آزمایش‌های مذکور با یک تحلیل سه فاز و در نظر گرفتن پارامترهای خاک در شرایط غیراشباع ارزیابی و سپس با الهام از مفاهیم کلاسیک مکانیک خاک‌های غیراشباع، یک مدل رفتاری اصلاح شده‌ی جدید که انطباق مناسبی با رفتار خاک‌های فروریزی دارد، جهت پیش‌بینی رفتار خاک‌های مذکور ارائه شده است.

smhaeri@sharif.edu
majidbeigi60@gmail.com
saeed.s.saberi@gmail.com
akbari_amir@alum.sharif.edu

واژگان کلیدی: خاک فروریزی، خاک لس، نمونه‌ی دست‌نخورده، دستگاه سه‌محوری غیراشباع، سطح تسلیم - بارگذاری.

۱. مقدمه

به‌طورکلی می‌توان ۴ شرط برای وقوع فروریزش در نوع خاک‌های مذکور منظور کرد:

۱. وجود ساختار باز، شرایط غیراشباع و تا حدودی ناپایدار.
۲. وجود مکش ساختاری کافی یا پیوندها و عوامل سیمانی کهنه‌ی دیگر برای ایجاد پایداری خاک در رطوبت طبیعی و نیمه‌خشک.
۳. افزایش درصد رطوبت خاک به نحوی که باعث کاهش مقاومت پیوندی یا سیمانی می‌شود و آنها را برای شکسته شدن و فروریختن تحت تنش مناسب آماده می‌کند.
۴. ایجاد تنش کمینه‌ی لازم جهت ایجاد شرایط ناپایدار.^[۱]

وجود خاک‌های فروریزی نظیر لس در هر ۵ قاره‌ی جهان گزارش شده است. لس‌ها مناطق وسیعی از آمریکا، اروپای شرقی، چین، جنوب شرقی آسیا، آسیای مرکزی و خاورمیانه را پوشانده‌اند. حضور خاک لس همچنین در آمریکای مرکزی و جنوبی، استرالیا، نیوزلند و آفریقای جنوبی گزارش شده است.^[۱] این نوع از خاک‌ها، خصوصیات فیزیکی مشابهی، از جمله: ساختار فیزیکی باز، تخلخل زیاد (بیش از ۴۰٪) و چگالی خشک کم هستند. همچنین از دیدگاه زمین‌شناسی، رسوبات جوانی هستند که فرصت کافی برای تراکم آنها در طبیعت وجود ندارد و رفتار آنها به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی، از جمله: تغییرات درصد رطوبت در سطح تنش ثابت و یا تغییرات تنش در درصد رطوبت ثابت است.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۶/۱۰/۱۳۹۴، اصلاحیه ۴/۲/۱۳۹۵، پذیرش ۳۱/۵/۱۳۹۵.

DOI: 10.24200/J30.2018.1329

با توجه به عوامل ذکر شده، رفتار هیدرومکانیکی خاک مذکور باید در چارچوب مکانیک خاک‌های غیراشباع بررسی شود. وجود مناطق وسیعی از خاک‌های لسی

$$p_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a \quad (1)$$

$$s = u_a - u_w \quad (2)$$

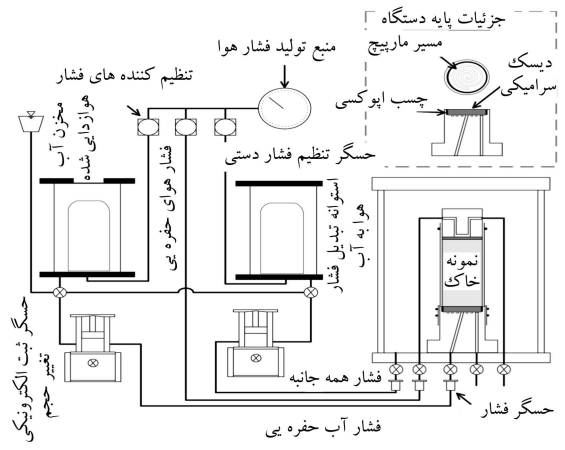
که در آنها، σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی و p_n تنش خالص میانگین هستند. همچنین u_a و u_w به ترتیب فشار آب حفره‌ی و فشار هوای حفره‌ی است و s مقدار مکش ساختاری موجود در خاک را نشان می‌دهد.

۳. دستگاه سه‌محوری غیراشباع دانشگاه صنعتی شریف

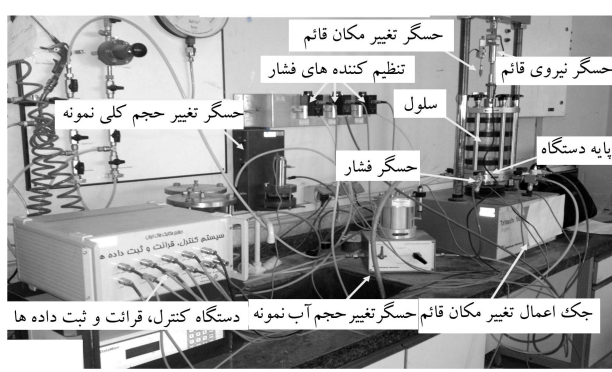
در شکل ۱، دستگاه سه‌محوری غیراشباع ارتقاء یافته‌ی دانشگاه صنعتی شریف نشان داده شده است، [۱۳] که در آن، قسمت الف، ساختار شماتیک دستگاه و قسمت ب، تصویر دستگاه موجود را نشان می‌دهد.

در دستگاه مذکور، کنترل مقدار مکش ساختاری با استفاده از روش انتقال محوری و با بهره‌گیری از یک قطعه سرامیک HAE با ظرفیت اعمال مکش ساختاری 150° کیلوپاسکال که در پدستال سلول دستگاه تعبیه شده است، صورت می‌گیرد.

برای محاسبه‌ی تغییر حجم کلی نمونه و مقدار آب جذب شده یا دفع شده از نمونه از دو دستگاه دیجیتالی ثبت تغییر حجم استفاده می‌شود. تغییرات حجم اجزاء سلول و شلنگ‌های رابط با مقادیر مختلف فشار قبل از انجام آزمایش‌ها، اندازه‌گیری و تصحیحات لازم در این خصوص لحاظ شده است. برای اعمال و کنترل فشارهای



الف) ساختار شماتیک دستگاه؛



ب) تصویر دستگاه موجود در دانشگاه شریف.

شکل ۱. اجزای تشکیل دهنده دستگاه سه‌محوری غیراشباع ساخته شده در دانشگاه شریف.

در بخش‌های مرکزی و شرقی ایران و توسعه‌ی شهرنشینی و افزایش ساخت و ساز در این مناطق، اهمیت بررسی دقیق رفتار خاک‌های مذکور را ایجاب می‌کند.

در پژوهشی در سال ۱۹۷۶ توسط فردلوند و مورگنسترن، متغیرهای مستقل تنش به منظور بررسی رفتار تغییر حجمی خاک‌های غیراشباع معرفی شد و بر طبق نظریه‌ی مذکور، رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع با استفاده از دو متغیر مستقل تنش معرفی شد. این متغیرها عبارت‌اند از: «تنش خالص میانگین» و «مکش ساختاری» [۵]. در سال ۱۹۹۰، نیز آلونسو و همکاران اولین مدل کشسان خمیری با نام Barcelona برای خاک‌های غیراشباع را پیشنهاد کردند که بر پایه‌ی تئوری سخت‌شوندگی خمیری بود و با معرفی سطوح تسلیم متعدد در فضای مکش ساختاری، تنش خالص و حجم مخصوص، قابلیت پیش‌بینی سطوح حالت غیریکتا را داشت و می‌توانست رفتار تغییر حجمی و برشی خاک‌های غیراشباع را پیش‌بینی کند. [۶] براساس نظریه‌ی مذکور با افزایش مکش ساختاری، قابلیت فشردگی در خاک کاهش می‌یابد و بنابراین عملکرد مدل معرفی شده برای خاک‌های معمولی و متورم شونده مناسب است، اما نمی‌تواند پتانسیل کاهش حجم «خاک‌های فروریزی» را در اثر ترشدگی در مکش ساختاری مشخص تعیین کند و در نتیجه نمی‌تواند پتانسیل فروریزش را به درستی پیش‌بینی کند. [۶] لذا در سال ۱۹۹۵، ویلر و سیواکومار با انجام اصلاحاتی بر روی چارچوب ارائه شده‌ی مدل اخیر، مدل رفتاری اصلاح شده‌ی جدیدی ارائه کردند که با استفاده از آن پیش‌بینی رفتار تغییر حجمی خاک‌ها بعد از وقوع تسلیم دقت بالاتری یافت. مدل رفتاری مذکور عمدتاً برای خاک‌های معمولی یا متورم شونده مناسب است و پیش‌بینی رفتار فروریزی خاک‌ها بر پایه‌ی فرضیات این مدل نیاز به اعمال اصلاحاتی در فرضیات آن دارد. [۷]

از آنجا که خاک‌های فروریزی رفتاری خاص و متفاوت با خاک‌های متداول دارند، برای بررسی دقیق رفتار هم‌بسته‌ی هیدرومکانیکی آنها، مطالعات گسترده‌ی بر روی آنها با استفاده از یک دستگاه سه‌محوری غیراشباع ارتقاء یافته و دو دستگاه اودومتر غیراشباع ساخته شده در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. [۸-۱۳] در قسمتی از مطالعات ذکر شده، آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع با کنترل مکش ساختاری بر روی نمونه‌های «دست‌نخورده» از خاک لس‌گرگان تحت دو مسیر بارگذاری شامل «اعمال مکش ساختاری ثابت و تنش خالص میانگین متغیر» و «اعمال تنش خالص میانگین ثابت و مکش ساختاری متغیر» انجام و نتایج آن‌ها با توجه به مفهوم «تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع» ارزیابی شده است. [۱۳] [۱۴]

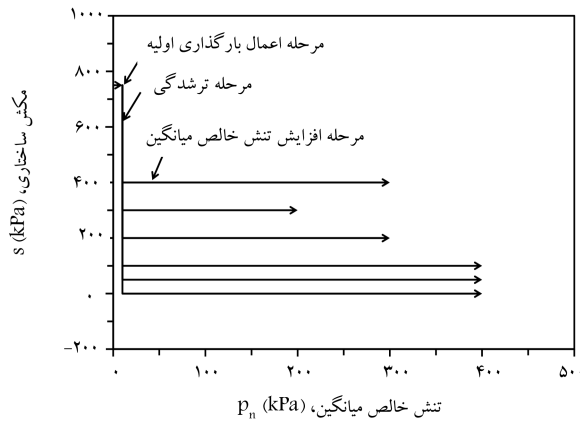
در نوشتار حاضر، با استفاده از نتایج آزمایش‌های پیشین، [۱۳] رفتار تغییر حجمی خاک فروریزی لس‌گرگان در مسیر «اعمال مکش ساختاری ثابت و تنش خالص میانگین متغیر» از یک دیدگاه متفاوت بررسی شده و با فرض وجود رفتار دو خطی در فضای تغییر حجم - تنش خالص میانگین $(v - p_n)$ ، تنش خالص میانگین تسلیم در مکش‌های ساختاری مختلف به‌دست آمده است. با استفاده از مقادیر تنش‌های خالص میانگین در شرایط تسلیم، منحنی بارگذاری - تسلیم (LC) در فضای مکش ساختاری - تنش خالص میانگین $(s - p_n)$ به‌دست آمده است که برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های فروریزی در شرایط اعمال مسیر تنش یاد شده مدنظر قرار گرفته و نتایج پیش‌بینی با استفاده از روش ذکر شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و انطباق مناسبی مشاهده شده است.

۲. معرفی متغیرهای تنش در خاک

متغیرهای تنش مورد استفاده در نوشتار حاضر، با استفاده از روابط ۱ و ۲ تعریف شده‌اند:

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای خاک لس گرگان. [۱۴]

نوع خاک	درجه‌ی اشباع اولیه (S_r)	درصد رطوبت اولیه (w_o (%))	چگالی خشک نمونه‌ی دست نخورده (γ_d (kN/m^3))	چگالی نسبی دانه‌های خاک (G_s)
لای با حالت خمیری کم	۰/۲۵-۰/۲۶	۶/۹۲-۷/۲۹	۱۴/۹۸-۱۵/۱۲	۲/۷۲



شکل ۲. روند انجام آزمایش‌های سه‌محوری مکش ساختاری ثابت - تنش خالص میانگین افزایشی. [۱۴]

این خصوص لازم به ذکر است که تمام نمونه‌ها ابتدا تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۱۰ کیلوپاسکال و مکش ساختاری موردنظر آزمایش، به تعادل رسیده (مرحله‌ی اعمال بارگذاری اولیه و مرحله‌ی ترشدگی) و پس از آن با ثابت نگه داشتن مکش ساختاری، تنش خالص میانگین به‌صورت گام به گام افزایش داده شده است (مرحله‌ی افزایش تنش خالص میانگین). [۱۴، ۱۳]

۵. مدل رفتاری

۵.۱. مدل رفتاری کشسان خمیری ویلر و سیواکومار

در سال ۱۹۹۵، ویلر^۱ و سیواکومار^۲ از داده‌های یک سری از آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع بر روی نمونه‌های بازسازی شده‌ی کائولن در جهت ارتقاء چارچوب قوانین حاکم بر رفتار خاک‌های غیراشباع استفاده کرده‌اند. [۷] این چارچوب، بر مبنای ۴ متغیر حالت، یعنی: تنش خالص میانگین (p_n)، تنش تفاضلی (q)، مکش ساختاری (s) و حجم مخصوص (v) تعریف شده است که بر این اساس منحنی تحکیم با کنترل مکش ساختاری، منحنی حالت بحرانی، و سطح تسلیم برای خاک مورد آزمایش را مشخص می‌کند. براساس نظر ویلر و سیواکومار (۱۹۹۵)، برای حالتی از خاک که در داخل سطح تسلیم قرار گیرد، رفتار کشسان فرض می‌شود؛ که با تغییر وضعیت حالت نمونه و حرکت به سمت خارج این مرز رفتار خمیری آغاز می‌شود و سطح تسلیم نیز توسعه می‌یابد.

روند افزایش یا کاهش حجم مشاهده شده در اثر بارگذاری همه‌جانبه، به شکل سطح تسلیم وابسته است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با فرض معتبر بودن اصل جمع آثار قوا، تغییر حجم نمونه‌های تحت افزایش هم‌زمان تنش خالص میانگین و افزایش مکش ساختاری (مسیر AC) را می‌توان معادل مجموع تغییر حجم ناشی از مسیر افزایش مکش ساختاری در شرایط تنش خالص میانگین ثابت (مسیر AB) و تغییر حجم ناشی از بارگذاری مرتبط با افزایش تنش خالص میانگین در شرایط مکش ساختاری ثابت (مسیر BC) فرض کرد.

اعمالی به نمونه (شامل: فشار همه‌جانبه، فشار آب حفره‌یی و فشار هوای حفره‌یی) از ۳ تنظیم کننده‌ی الکترونیکی و ۳ حس‌گر الکترونیکی فشار استفاده می‌شود. داده‌های آزمایش به‌صورت منظم با استفاده از سیستم فرانت داده‌ها در توالی زمانی ۳ ثانیه ثبت و ذخیره می‌شود. [۱۳، ۱۴]

۴. آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع انجام شده

آزمایش‌های سه‌محوری غیراشباع بر روی نمونه‌های دست نخورده‌ی خاک لس اخذ شده از تپه‌های هزارپیچ واقع در شهر گرگان، در استان گلستان ایران انجام شده است. در این راستا، ابتدا نمونه‌های دست نخورده‌ی بلوکی از عمق ۱ متری خاک با استفاده از جعبه‌هایی به ابعاد $30 \times 30 \times 30$ سانتی‌متر استخراج و پس از موم اندود کردن به آزمایشگاه انتقال یافته و سپس با استفاده از یک سیستم جک و قاب فولادی، نمونه‌های آزمایشگاهی استوانه‌یی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر از داخل جعبه‌ها اخذ شده است.

برای اخذ نمونه‌های صحرايي، ابتدا خاک سطحی به عمق حدود ۱ متر کاملاً برداشته شده است. سپس جعبه‌ی نمونه‌گیر بر سطح صافی از زمین قرار گرفته و اطراف جعبه به فاصله‌ی ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر علامت‌گذاری شده است. حد فاصل محل علامت‌گذاری شده تا عمق ۵۰ سانتی‌متر حفاری و پس از آن با قرار دادن یک صفحه‌ی فلزی بر روی جعبه، با استفاده از یک چکش پلاستیکی بر صفحه‌ی فلزی و جداری جعبه، ضربات خفیفی وارد کرده و جعبه به آرامی داخل خاک فرو برده شده است. بعد از آنکه جعبه کاملاً درون خاک فرو رفت، خاک اطراف با اره بریده و با استفاده از یک سیم، جعبه از خاک زیر جدا شده است. به منظور جلوگیری از دست‌خوردگی خاک، ابتدا پارافین ذوب شده روی سطح خاک جعبه ریخته و سپس پارچه‌ی نظیف دورتادور جعبه قرار داده شده و در انتها، مجدداً روی پارچه، پارافین ذوب شده ریخته شده است. همچنین به منظور تهیه‌ی نمونه‌های استوانه‌یی دست‌نخورده، از یک سیستم قاب فلزی و جک استفاده شده است. بدین صورت که نمونه‌ی جعبه‌یی بر روی صفحه بالایی جک قرار گرفته و در بالای نمونه‌ی جعبه‌یی، یک نمونه‌گیر استوانه‌یی قرار داده شده است. با بالا آمدن جک، نمونه‌گیر استوانه‌یی به داخل نمونه‌ی جعبه‌یی وارد و با بیرون کشیدن نمونه‌گیر استوانه‌یی و خاک اخذ شده از داخل آن، نمونه‌ی استوانه‌یی دست‌نخورده با طول دلخواه تهیه شده است.

مشخصات اولیه و پارامترهای فیزیکی مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. [۱۳، ۱۴]

در پژوهش حاضر، نتایج ۶ آزمایش فشار همه‌جانبه از آزمایش‌های انجام شده تحت شرایط کنترل مکش ساختاری ثابت و تنش خالص میانگین متغیر با استفاده از دستگاه سه‌محوری غیراشباع، [۱۳، ۱۴] با یک رویکرد جدید ارزیابی مجدد شده است. در این راستا، تغییرات حجم نمونه‌ها نسبت به تغییرات تنش خالص میانگین ترسیم و نقطه‌ی تسلیم در مکش‌های ساختاری مختلف مشخص شده و در نتیجه، سطح تسلیم خاک مورد مطالعه به‌دست آمده است.

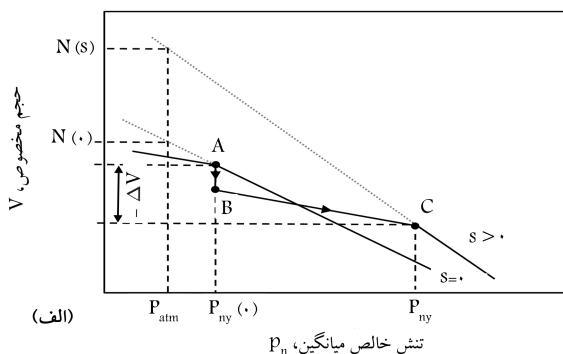
در شکل ۲، مراحل بارگذاری به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. در

۲.۵. بررسی نتایج آزمایش‌ها بر روی خاک لس گرگان و مدل رفتاری پیشنهادی برای خاک‌های فروریزشی

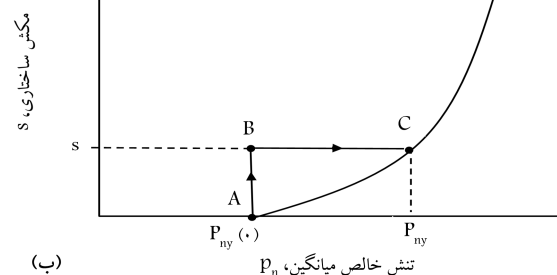
در بخش کنونی، از نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک لس گرگان، که مشخصات آن قبلاً ذکر شده است، ب ه منظور تعیین تنش خالص تسلیم، پارامترهای مرتبط با رابطه‌ی ۳ و در نهایت سطح بارگذاری - تسلیم (LC) استفاده شده است. به دلیل عدم پاسخ‌گویی مناسب مدل رفتاری ارائه شده‌ی ویلر و سیواکومار (۱۹۹۵) برای خاک مورد آزمایش، با توجه به ماهیت خاک فروریزشی مورد مطالعه، به منظور محاسبه‌ی پارامترهای مدل اصلاحاتی بر روی رابطه ۳ صورت گرفته است که در ادامه به آنها اشاره شده است.

۱.۲.۵. تنش خالص تسلیم

در شکل ۴، نمودار $\nu - \log(p_n)$ مربوط به آزمایش‌های تراکم هم‌جانبه‌ی تحت بارگذاری تنش خالص میانگین متغیر در مکش ساختاری ثابت ارائه شده است. خطوط نقطه‌چین بر روی شکل مذکور، نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ی شروع آزمایش تا به تعادل رسیدن نمونه‌ها تحت تنش خالص میانگین ۱۰ کیلوپاسکال از مکش ساختاری اولیه تا رسیدن به مکش ساختاری مورد نظر آزمایش است. نمودارهای شکل ۴، در شکل ۵ به‌صورت دو خطی ساده‌سازی شده و مقدار تنش خالص میانگین محل برخورد دو خط ذکر شده، به‌عنوان تنش هم‌جانبه‌ی خالص تسلیم (p_{ny}) در هر مکش ساختاری در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که



(الف)



(ب)

شکل ۳. نحوه‌ی استخراج رابطه‌ی سطح بارگذاری - تسلیم (LC). [۶]

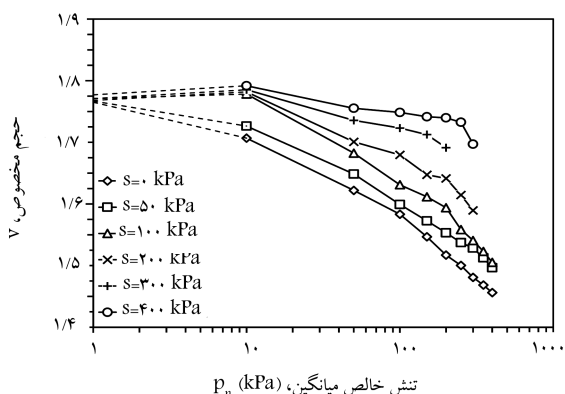
بنابراین با استفاده از فرض ذکر شده، رابطه‌ی ۳ که شکل ساده شده‌ی رابطه‌ی آلونسو و همکاران است، [۶] به‌عنوان معادله‌ی منحنی بارگذاری - تسلیم (LC)، در فضای مکش ساختاری - تنش خالص میانگین ارائه شده است.

$$(\lambda(s) - \kappa) \ln\left(\frac{p_{ny}}{p_{atm}}\right) = (\lambda(0) - \kappa) \ln\left(\frac{p_{ny}(0)}{p_{atm}}\right) + N(s) - N(0) + \kappa_s \ln\left(\frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}\right) \quad (3)$$

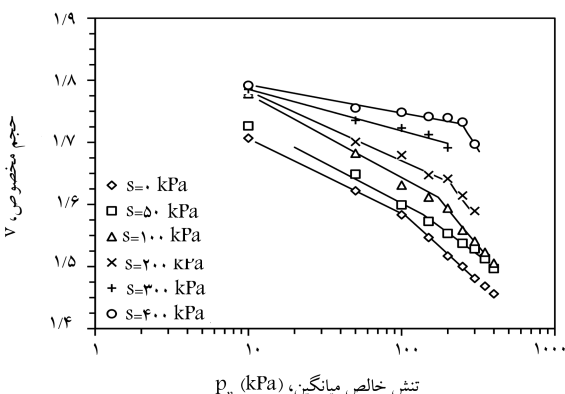
که در آن، $N(s)$ حجم اولیه‌ی نمونه‌ی تحت تنش خالص میانگین یک اتمسفر در مکش ساختاری s و $\lambda(s)$ ضریب قابلیت فشردگی و یا شیب نمودار $\nu - \log(p_n)$ در مکش ساختاری ثابت هستند که به‌صورت تابعی از مکش ساختاری تعریف می‌شوند. در همین راستا $N(0)$ و $\lambda(0)$ مقادیر این پارامترها در حالت مکش ساختاری صفر یا حالت اشباع هستند.

همچنین $p_{ny}(0)$ و p_{ny} به ترتیب تنش خالص تسلیم در مکش ساختاری s و در مکش ساختاری صفر (حالت اشباع) هستند κ و κ_s نیز به ترتیب شیب نمودار $\nu - \log(p_n)$ و $\nu - \log(s)$ در حالت باربرداری یا بارگذاری مجدد فرض می‌شوند که به علت تغییرات بسیار کم تحت تغییرات تنش خالص میانگین و مکش ساختاری در خاک کائولینی استفاده شده در آزمایش‌های مرتبط، مقادیری ثابت و مستقل از دو متغیر حالت مذکور در نظر گرفته شده‌اند.

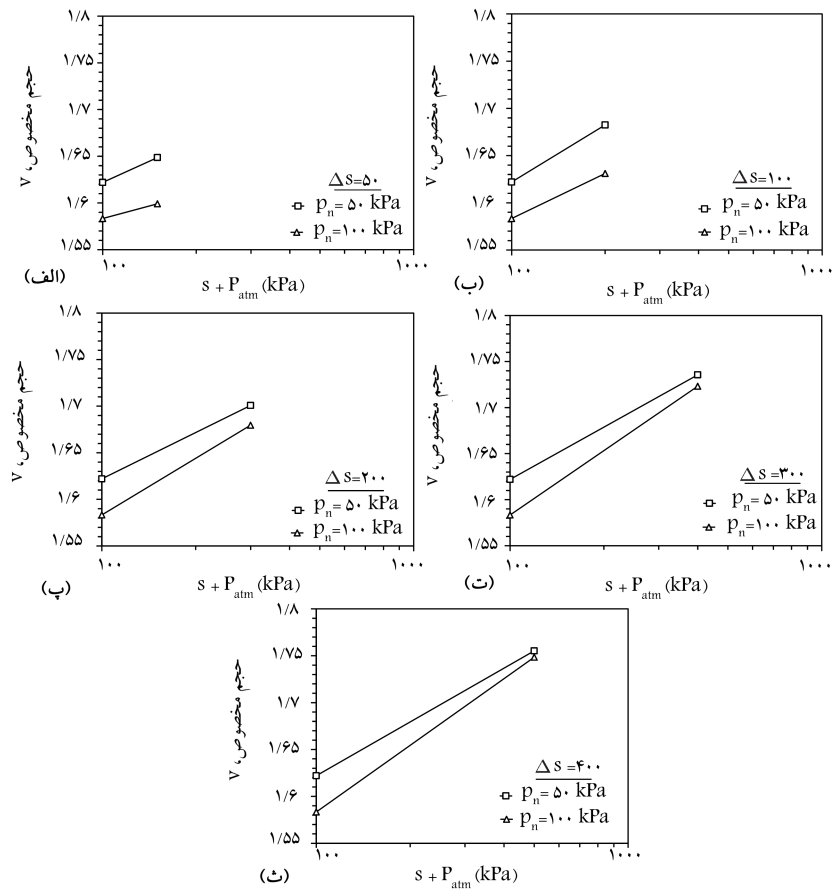
ویلر و سیواکومار (۱۹۹۵) در مطالعه‌ی خود نتیجه گرفتند که با افزایش مکش ساختاری در نمونه‌های خاک، مقدار تنش خالص تسلیم و $\lambda(s)$ افزایش می‌یابد و پتانسیل تسلیم (پتانسیل تغییرات حجم نمونه در مکش ساختاری مورد نظر تا حالت اشباع در شرایط تنش خالص میانگین ثابت) در تنش‌های میانی به بیشترین حالت خود می‌رسد و با افزایش مقدار تنش خالص میانگین، پتانسیل تسلیم در نمونه‌ها کم می‌شود.



شکل ۴. نمودار تغییرات حجم بر حسب افزایش تنش خالص میانگین در مکش ساختاری ثابت.



شکل ۵. نمودار ساده‌سازی شده‌ی (دو خطی) تغییرات حجم بر حسب افزایش تنش خالص میانگین در مکش ساختاری ثابت.



شکل ۶. نمودار تغییرات حجم مخصوص بر حسب تغییرات مکش ساختاری استفاده شده در تعیین پارامتر κ_s برای مکش‌های ساختاری مختلف.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۴.

s (kPa)	$\kappa(s)$	$\lambda(s)$	$N(s)$	$\kappa_s(s)$	p_{ny} (kPa)
۰	۰٫۰۵۲	۰٫۰۹۸	۱٫۵۹	-۰٫۰۶۱	۱۰۵
۵۰	۰٫۰۵۶	۰٫۰۸۰	۱٫۶۲	-۰٫۰۶۱	۱۳۵
۱۰۰	۰٫۰۵۸	۰٫۱۳۰	۱٫۶۸	-۰٫۰۸۴	۱۷۳
۲۰۰	۰٫۰۴۹	۰٫۱۴۵	۱٫۷۴	-۰٫۰۸۳	۲۰۷
۳۰۰	۰٫۰۲۹	۰٫۱۶۰	۱٫۸۲	-۰٫۰۹۳	۲۲۰
۴۰۰	۰٫۰۲۱	۰٫۱۷۱	۱٫۸۸	-۰٫۰۹۸	۲۴۷

برای هر مکش ساختاری مشخص با استفاده از اختلاف تغییر حجم نمونه در مکش ساختاری مورد نظر تا مکش ساختاری صفر و یا حالت اشباع (Δs) برای تنش‌های خالص میانگین ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به دست آمده است. لازم به ذکر است که به دلیل فضای لگاریتمی و عدم وجود جواب برای مکش ساختاری صفر در فضای مذکور، از فضای $s + p_{atm}$ استفاده شده است (شکل ۶).

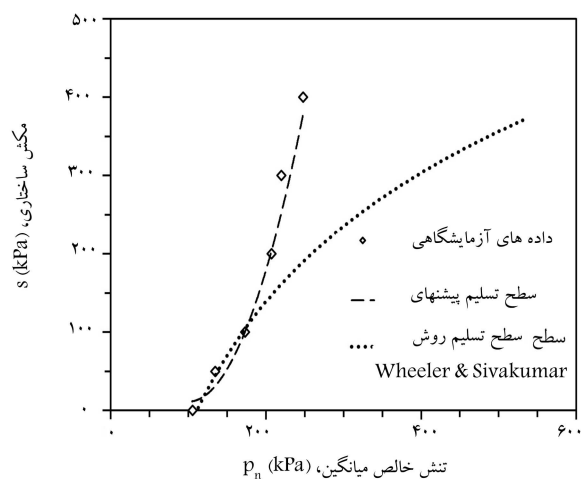
همان‌طور که قبلاً بیان شد، ویلر و سیواکومار (۱۹۹۵)، پارامترهای κ_s و κ را برای خاک‌های کائولینی مورد آزمایش ثابت به دست آورده و آنها را ثابت فرض کرده‌اند، در صورتی که در خاک لس مورد آزمایش مقادیر پارامترهای κ_s و κ به

تنش خالص میانگین نمونه‌ی تحت مکش ساختاری ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال، به علت محدودیت‌های پیش آمده در زمان اعمال بار، فقط تا تنش خالص میانگین ۲۰۰ کیلوپاسکال آزمایش شده است که تحت این شرایط در نمونه‌ی مورد آزمایش تسلیم رخ نداده و پارامترهای $N(s)$ و $\lambda(s)$ و تنش خالص تسلیم (p_{ny}) در این مکش ساختاری با استفاده از درون‌یابی بین تنش‌های خالص تسلیم در مکش‌های ساختاری ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به دست آمده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که تحت مکش ساختاری ثابت بیشتری آزمایش شده‌اند، مقدار تنش خالص تسلیم بزرگ‌تری را به دست داده‌اند. حال اگر مشخصات نقاط تسلیم نمونه‌ها در فضای $(s - p_n)$ رسم شود، منحنی بارگذاری - تسلیم LC به دست می‌آید.^[۶]

با استفاده از اطلاعات نمودارهای ارائه شده در شکل ۵، پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۴ که فرم اصلاح شده‌ی رابطه ۳ برای خاک‌های فروریزشی هستند، در تنش‌های خالص تسلیم به دست آمده و در جدول ۲ خلاصه‌ی از آنها ارائه شده است.

$$(\lambda(s) - \kappa(s)) \ln\left(\frac{p_{ny}}{p_{atm}}\right) = (\lambda(0) - \kappa(0)) \ln\left(\frac{p_{ny}(0)}{p_{atm}}\right) + N(s) - N(0) + \kappa_s(s) \ln\left(\frac{s + p_{atm}}{p_{atm}}\right) \quad (4)$$

در پژوهش حاضر، برای تعیین پارامتر κ_s نتایج آزمایش‌ها در فضای $\nu - \log(s + p_{atm})$ ترسیم و همان‌طور که در شکل ۶ ارائه شده است، مقدار κ_s



شکل ۷. سطح بارگذاری - تسلیم (LC) خاک فروریزی تحت بارگذاری مکش ساختاری ثابت - تنش خالص میانگین متغیر مقایسه سطح پیشنهادی (رابطه ۴) و روش ویلر و سیواکومار، [۷] (رابطه ۳).

حاضر انجام شده است، مطابق شکل ۷، سطح تسلیم حاصل از آزمایش های انجام شده و همچنین سطح تسلیم به دست آمده از رابطه ۴ تطبیق خوبی با هم پیدا کرده اند.

با توجه به سطح تسلیم به دست آمده در شکل ۷ و تعاریف موجود، می توان رفتار خاک های فروریزی را تحت مسیر تنش خالص میانگین افزایشی در مکش ساختاری ثابت پیش بینی کرد. به این صورت که در مکش ساختاری ثابت با افزایش تنش خالص میانگین تا سطح تسلیم به دست آمده، تغییر شکل های کم در نمونه ها مشاهده می شود و با رسیدن به سطح تسلیم، تغییر شکل های بزرگی در خاک ایجاد می شود. لازم به ذکر است که تغییر شکل های خاک در ناحیه ی مذکور از نوع خمیری است. همچنین با افزایش مکش ساختاری، تنش خالص تسلیم افزایش می یابد، ولی با قرار گرفتن خاک در مکش های ساختاری زیاد (از مکش ساختاری ۲۰۰ کیلو پاسکال تا مکش ساختاری ۴۰۰ کیلو پاسکال) تنش تسلیم تغییر زیادی نمی کند که نشان دهنده ی تأثیر کم مکش ساختاری در سطح تسلیم در مکش های ساختاری زیاد در خاک های فروریزی نظیر لس به دلیل سختی باندهای بین ذرات آن ها در شرایط خشک تا نیمه خشک است.

۶. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، با بررسی رفتار تغییر حجمی نمونه های دست نخورده ی لس گرگان تحت تنش خالص میانگین متغیر در مکش ساختاری ثابت و با ایده گرفتن از مدل رفتاری پیشنهادی ویلر و سیواکومار، [۷] مدل رفتاری اصلاح شده ی جدیدی برای خاک های فروریزی با در نظر گرفتن اصلاحات مورد نیاز در قالب منحنی بارگذاری - تسلیم (LC) ارائه و با نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده بر روی خاک مذکور مقایسه شده است. با توجه به مطالب بیان شده در نوشتار حاضر، به طور کلی می توان این نتایج را بیان کرد:

- در خاک فروریزی آزمایش شده، با افزایش مکش ساختاری، مقدار تنش تسلیم و شیب منحنی های بارگذاری بعد از تنش تسلیم ($\lambda(s)$) افزایش می یابد. همچنین پارامترهای k_s و k_c مقادیر ثابتی نیستند و تابعی از مکش ساختاری موجود در خاک هستند. بنابراین مقادیر آنها به صورت جداگانه در هر سطح مکش ساختاری محاسبه و تعیین شده و رابطه ی پیشنهادی ویلر و سیواکومار، [۷] اصلاح و به شکل رابطه ی جدید (رابطه ۴) برای خاک های فروریزی پیشنهاد شده است.
- مقدار k_c در محدوده ی مکش های ساختاری زیاد کاهش می یابد که به دلیل قوی بودن پیوندهای بین دانه یی و کم شدن تغییرات حجمی نمونه ها با افزایش بارگذاری در سطوح مکش ساختاری بالاست.
- رفتار خاک های فروریزی در اثر ترشدگی، در محدوده ی تنش های خالص میانگین کم و قبل از تنش خالص تسلیم تقریباً کشسان است، ولی با کاهش حجم همراه است. بنابراین بر خلاف پیشنهاد ویلر و سیواکومار، [۷] مقدار پارامتر k_s ثابت نیست و علامت آن نیز منفی است.
- سطح تسلیم حاصل از نتایج آزمایشگاهی با سطح تسلیم پیش بینی شده با استفاده از روش پیشنهادی در نوشتار حاضر تطابق خوبی دارد و این روش استفاده از رابطه ی ۴ برای خاک های فروریزی پیشنهاد می شود.

دلیل ماهیت فروریزی خاک ذکر شده، تابعی از متغیر حالت مکش ساختاری s هستند. به همین دلیل در پژوهش حاضر به ازاء هر مکش ساختاری ثابت، k_s و k_c به صورت جداگانه محاسبه و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش مکش ساختاری، قدرمطلق k_s نیز افزایش یافته است که دلالت بر حساسیت تغییر حجم نمونه های خاک فروریزی آزمایش شده به تغییرات مکش ساختاری دارد. همچنین مشاهده شده است که مقدار k_c از حالت اشباع تا مکش ساختاری ۲۰۰ کیلو پاسکال تقریباً یکسان است؛ ولی با افزایش مکش ساختاری از مقدار ۲۰۰ کیلو پاسکال، مقدار k_c کاهش یافته است که به دلیل قوی تر بودن پیوندهای بین دانه یی خاک مذکور در مکش های ساختاری زیاد و کاهش تغییرات حجمی آن در مکش های بیشتر است.

تفاوت بسیار مهم و اساسی دیگر نتایج آزمایش بر روی خاک فروریزی با نتایج ویلر و سیواکومار (۱۹۹۵)، [۷] تغییر علامت در پارامتر k_s برای خاک فروریزی آزمایش شده و منفی به دست آمدن آن بر حسب قرارداد پیشنهادی ایشان است که نشان دهنده ی رفتاری توأم با کاهش حجم در اثر ترشدگی در خاک های فروریزی، حتی در محدوده ی بارگذاری کمتر از تنش خالص تسلیم است. لازم به ذکر است که در مرحله ی به تعادل رسیدن نمونه ها از مکش ساختاری اولیه تا مکش ساختاری مورد نظر (خط چین های موجود در شکل ۴)، همان طور که مشاهده می شود در آزمایش هایی که در مکش های ساختاری ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است، نمونه ها تا تنش خالص کم (۱۰ کیلو پاسکال) دچار تورم کمی شده اند، که نشان از تورم پل های رسی در اثر جذب آب در این مکش ها و تحت تنش خالص میانگین ۱۰ کیلو پاسکال دارد. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش تنش خالص میانگین فروریزش شروع می شود و حجم نمونه کاهش می یابد.

۲.۲.۵. سطح بارگذاری - تسلیم (LC)

همان طور که قبلاً بیان شد، با رسم نقاط تسلیم نمونه ها در فضای $(s - p_n)$ ، سطح بارگذاری - تسلیم (LC) به دست می آید. [۶] با توجه به اصلاحاتی که در تعیین پارامترهای مورد نیاز براساس ماهیت خاک فروریزی مورد استفاده در پژوهش

پانوشتها

1. Wheeler
2. Sivakumar

منابع (References)

1. El Howayek, A., Huang, P. and Santaga, M. "Identification and behavior of collapsible soils", Joint Transportation Research Program Technical Report Series (2011).
2. Rogers, C.D.F., *Types and Distribution of Collapsible Soils in Genesis and Properties of Collapsible Soil*, Kluwer Academic Publishers, E. Derbyshire et al., pp. 1-17 (1995).
3. Barden, L., McGown, A. and Collins, K. "The collapse mechanisms in partly saturated soils", *Engineering Geology*, **7**(1), pp. 49-60 (1973).
4. Mitchell, J.K. *Fundamentals of Soils Behavior*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., pp. 222-252 (1976).
5. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. "Stress state variable for unsaturated soil", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, **103**(GT5), pp. 447-466 (1976).
6. Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. "A constitutive model for partially saturated soils", *Geotechnique*, **40**(3), pp. 405-430 (1990).
7. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil", *Geotechnique*, **45**(1), pp. 35-54 (1995).
8. Haeri, S.M., Zamani, A. and Garakani, A.A. "Collapse potential and permeability of undisturbed and remolded loessial soil samples", *Unsaturated Soils: Research and Applications*, pp. 301-308 (2012a).
9. Haeri, S.M. and Garakani, A.A. "The variation of total volume change, water volume change, yielding net confining stress and shear strength of undisturbed unsaturated loess under isotropic compression", *Unsaturated Soils: Research and Applications*, pp. 293-300 (2012b).
10. Haeri, S.M., Khorshidi M. and Akbari Garakani A. "Variation of the volume change and water content of undisturbed loessial samples in controlled matric suction odometer tests", *4th International Conference on Problematic Soils*, Wuhan, China (2012c).
11. Haeri, S.M., Khosravi, A. and Ghazizadeh, S. "The measurement of suction stress characteristic curve for a highly collapsible loessial soil", *IFCEE2015*, San Antonio, Texas, USA (2015).
12. Garakani, A.A., Haeri, S.M., Khosravi, A. and Habibagahi, G. "Hydro-mechanical behavior of undisturbed loessial soil under different stress state conditions", *Engineering Geology*, **195**, pp. 28-41 (2015).
13. Garakani, A.A. "Laboratory assessment of the hydro-mechanical behavior of unsaturated undisturbed collapsible soils-case study: Gorgan loess", Dissertation submitted for partial fulfillment of Ph.D. degree, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2013).
14. Haeri, S.M., Garakani, A.A., Khosravi, A. and Mihan, L.C. "Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device", *Geotechnical Testing Journal*, **37**(2), pp. 1-15 (2014).