

Evaluation of Mechanical Properties of Fine-Grained Soil Contaminated with Solid Waste Landfill Leachate

AHMADREZA HASANZADEH¹, ALI BIGLARI FADAFAN^{2*}, SEYED YASIN MOUSAVI², ALIREZA TABARSA²

1. Department of Geotechnic, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

(Received: Dec. 12, 2019- Revised: Feb. 1, 2020- Accepted: Feb. 19, 2020)

ABSTRACT

One of the most significant environmental consequences of municipal solid waste is the generation of leachate at landfills. Leachate is a very hazardous liquid leading many difficulties including contamination of surface, groundwater, and soil. The mechanical parameters of the soil can be affected in contact with leachate and its changes depend upon the type of leachate and soil. The reactions between the soil system and the leachate cause changes in landfill soil mechanical properties that may affect the structural stability of the landfill structures. So that, the present study investigate the effects of natural leachate of Aq Qala landfill on silty-clay soil. For this purpose, the natural leachate samples and the untouched soil samples with leachate were collected from the Aq Qala landfill. Unconsolidated no drained (UU) triaxial test was performed on soil specimens containing 0, 5 and 15% leachate at three curing times; 7, 14, 28 days. In order to analyze the obtained results, the stress-strain curve was investigated in terms of leachate amount, curing period and cell pressure as the variables applied to the samples. The results indicate that the contamination of soil by leachate reduces the maximum deviator stress and the friction angle, while it increases the soil adhesion. In addition, the influence of leachate increases by leachate concentration in the soil and curing period.

Keywords: Leachate, Triaxial Tests, Land Fill, Friction Angle, Cohesion.

ارزیابی تأثیر شیرابه زائدات شهری بر ویژگی‌های مکانیکی خاک ریزدانه

احمدرضا حسن‌زاده^۱، علی بیگلری فدافن^{۲*}، سید یاسین موسوی^۳، علیرضا طبرسا^۴

۱. گروه ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰)

چکیده

یکی از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی مواد زائد شهری، تولید شیرابه ناشی از مواد آلی در محل دفن می‌باشد. شیرابه مایع بسیار خطرناکی است که باعث آلودگی آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک‌های اطراف می‌شود. پارامترهای مکانیکی خاک تحت تأثیر تماس با شیرابه تغییر می‌کند که این تغییرات به نوع خاک و شیرابه وابسته است. شایان ذکر است که این تغییرات در خاک مراکز دفن، ممکن است که بر پایداری ساختاری سازه مرکز دفن اثرگذار باشد. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر شیرابه طبیعی مرکز دفن زباله آق‌قلا بر خاک ریزدانه سیلتی-رسی محل دفن پرداخته شد. به این منظور شیرابه طبیعی مرکز دفن زباله آق‌قلا و خاک محل مرکز دفن که از قبل تماسی با شیرابه نداشته است، تهیه شد. سپس نمونه‌های حاوی ۰، ۵ و ۱۵ درصد شیرابه تهیه شد و در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزگی تحت آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده قرار گرفتند. در تحلیل نتایج آزمایش‌ها، به بررسی منحنی تنش-کرنش با در نظر گرفتن میزان درصد شیرابه، زمان قرارگیری در معرض شیرابه و فشار همه‌جانبه به عنوان متغیرهای اعمالی به نمونه‌ها پرداخته شد. علاوه بر این نتایج مربوط به مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن شیرابه موجب کاهش حداکثری تنش محوری اضافی خاک می‌شود و این روند با افزایش غلظت شیرابه و گذشت زمان در خاک افزایش می‌یابد. علاوه بر آن بررسی تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی نشان داد که آلوده شدن خاک به شیرابه منجر به کاهش زاویه اصطکاک و افزایش چسبندگی آن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شیرابه، آزمایش سه محوری، محل دفن، زاویه اصطکاک، چسبندگی.

مقدمه

بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر طبق اطلاعات موجود به صورت تقریبی ۷۰ میلیون تن زباله در سال تلنبار و ۳۴۰ میلیون تن در سال در مراکز دفن زباله مدفون می‌شوند که این موضوع نشان‌دهنده اهمیت بررسی اثرات این روش بر روی محیط اطراف محل دفن می‌باشد (Hoorweg and Bhada-Tata, 2012).

یکی از مهم‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی روش دفن زباله، تولید شیرابه می‌باشد. بلافاصله پس از تخلیه زباله در ترانشه، شیرابه حاصل از رطوبت اولیه زباله جدا می‌شود و از طریق منافذ، تخلیه و دفن می‌شود. علاوه بر این با نفوذ آب باران، برف و جریانات سطحی و جذب آن‌ها توسط زباله جامد، شیرابه ثانویه تولید می‌شود (Bagchi, 2004). از لحاظ مواد تشکیل‌دهنده شیرابه‌ها عمدتاً دارای مواد آلی تجزیه‌پذیر و غیرقابل تجزیه مانند آمونیاک، کلر، نمک‌های غیر آلی و فلزات سنگین می‌باشد (Renou et al., 2008; Loni et al., 2013; Khodary et al., 2018). این مواد در اثر رطوبت، هیدرولیز، تجزیه زیستی

امروزه عوامل متفاوتی مانند توسعه اقتصادی، رشد چشم‌گیر جمعیت، افزایش رفاه نسبی و گسترش تکنولوژی در جوامع بشری منجر به افزایش میزان تولید زباله‌های شهری شده است. طبق گزارش منتشرشده در سال ۲۰۱۲، در شهرهای جهان حدود ۱/۳ میلیارد تن زباله در سال تولید می‌شود که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۵ این مقدار به ۲/۲ میلیارد تن افزایش یابد (Hoorweg and Bhada-Tata, 2012). شایان ذکر است که برای کشور ایران، نرخ تولید زباله به میزان ۷۱۹۷ تن در روز گزارش شد که پیش‌بینی می‌شود این مقدار در سال ۲۰۲۵ به میزان ۴۰۱۵۸ تن در روز افزایش یابد (Hoorweg and Bhada-Tata, 2012) که بر طبق آمار یک‌پنجم این مقادیر، سهم شهر تهران است (Gholami et al., 2019). این حجم بالا از تولید زباله، منجر به گسترش سریع فناوری‌های مرتبط با مدیریت زباله شده است. هرچند چگونگی روش دفع زباله‌های جامد شهری با توجه به سطح درآمد کشورها متفاوت است، اما روش دفن به دلیل کم‌هزینه بودن در

توسط Hou *et al.* (2019) منتشر شد.

همان‌گونه که مطالعات گذشته نشان دادند، نوع شیرابه و میزان درصد آلودگی خاک به شیرابه باعث تغییر در خواص مکانیکی خاک آلوده به آن می‌شود. از این رو مطالعه اثر شیرابه بر خاک، نقش کلیدی در ارزیابی ساختاری و ژئوشیمیایی^۱ یک مرکز دفن دارد (Osinubi *et al.*, 2020). لذا به نظر می‌رسد باید مطالعات جامعی بر روی تأثیر شیرابه به صورت موردی بر خواص مکانیکی خاک صورت پذیرد. این مهم، با در نظر گرفتن این موضوع که نوع خاک نیز بر رفتار آن در مقابله با شیرابه‌ها تأثیرگذار است، نمود بیشتری پیدا می‌نماید. بر این مبنا در این پژوهش به ارزیابی اثر شیرابه محل دفن زباله شرق استان گلستان در شهر آق‌قلا بر پارامترهای مقاومتی خاک پرداخته شده است. به این منظور با انجام آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی-نشده غیر اشباع خواص مکانیکی خاک آلوده به درصدهای مختلف شیرابه طی سه دوره قرارگیری در معرض شیرابه ارزیابی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند اطلاعات لازم جهت تمهید ایمنی مراکز دفن را در اختیار متخصصین قرار دهد تا بدین منظور مشکل کمبود زمین جهت توسعه ساخت‌وساز که پاسخگوی رشد جمعیت باشد را فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

محل مورد مطالعه

سایت مورد مطالعه در این پژوهش، مرکز دفن زباله آق‌قلا می‌باشد که در ۴۰ کیلومتری شمال شهر گرگان قرار دارد و تصویر هوایی آن در شکل (۱) ارائه شد. این مرکز دفن در مساحت ۴۰ هکتار مربع احداث شده است و پسماندهای برگشت‌خورده از خط تولید کمپوست و بی‌کیفیت از لحاظ بازیافت در این مرکز دفن دپو می‌شود.

خاک منطقه تحت آزمایش

خاک مورد بررسی در این مطالعه از محل مرکز دفن برداشت شده است. خاک به دست آمده ابتدا از الک شماره ۱۰ عبور داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در اون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. پس از انجام آزمایش‌ها اولیه، خاک از نوع سیلتی-رسی با خاصیت خمیری کم بوده (CL-ML) که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۲) ارائه شده است. همچنین مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. شایان ذکر است که نمونه خاک برداشتی تمیز بوده و از قبل تماسی با شیرابه نداشته است.

آلاینده‌های آلی و غیر آلی و فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیکی در زباله‌های جامد شهری تولید می‌شود (Arasan, 2010; Shariatmadari *et al.*, 2016). مطالعات گذشته نشان داده است که شیرابه می‌تواند بر روی خواص و شاخص‌های مهندسی خاک‌های اطراف از جمله پارامترهای مقاومت برشی، حدود اتربرگ و مشخصات شیمیایی خاک تأثیر بسزایی بگذارد (Sunil *et al.*, 2009). این تأثیرات تابع عوامل مختلفی مانند نوع شیرابه از منظر مواد تشکیل‌دهنده، مدت‌زمان تماس خاک با شیرابه، غلظت شیرابه و واکنش بین سیستم خاک و شیرابه می‌باشد (Cyrus *et al.*, 2010). به عنوان نمونه (Khodary *et al.*, 2018). در گزارشی تأثیر نفوذ انواع شیرابه از جمله تأثیر برخی مواد شیمیایی حاوی NaOH ، $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ، $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ، $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ و SaSO_4 بر مقاومت برشی، تراکم، حدود اتربرگ و نفوذپذیری خاک را بررسی نمودند و نشان دادند که تغییرات حاصل در خواص خاک آلوده به شیرابه متأثر از نوع شیرابه می‌باشد.

(Ozcoban *et al.*, 2006) به بررسی اثر شیرابه تهیه‌شده از محل دفن زباله بر روی نفوذپذیری خاک رس محل دفن پرداختند و افزایش نفوذپذیری به دلیل تغییر شکل ساختار خاک رس ناشی از واکنش شیمیایی خاک و شیرابه را گزارش دادند. افزایش نفوذپذیری خاک در اثر شیرابه اسیدی توسط Nayak *et al.* (2007) گزارش شده است. علاوه بر آن اثر شیرابه حاوی نمک بر حدود اتربرگ خاک CL توسط Arasan and Yetimoglu (2008) مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی اثر آلاینده‌های نمک غیر آلی بر حدود اتربرگ خاک CL نشان داد که حد روانی و حد خمیری خاک با افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد (Arasan and Yetimoglu, 2008). در مطالعه‌ای Li *et al.* (2013) تأثیر غلظت شیرابه بر نفوذپذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک سیلتی-رسی را مورد بررسی قرار دادند. (Harun *et al.*, 2013) اثر آلوده شدن خاک به درصدهای مختلف شیرابه را ارزیابی کردند و نشان دادند با افزایش درصد شیرابه از ۰ تا ۲۰ درصد مقاومت برشی نمونه خاک ۶۴/۴ درصد کاهش یافت. (Sunil *et al.*, 2009) تأثیر شیرابه شبیه‌سازی‌شده در آزمایشگاه بر روی خصوصیات شیمیایی و مقاومتی خاک لاتریتی آلوده را بررسی کردند و نشان دادند که چسبندگی نمونه‌های خاک در اثر شیرابه افزایش و مقدار زاویه اصطکاک آن کاهش می‌یابد. در این بین، Zhao *et al.* (2016) به بررسی ریزساختار و رفتار مکانیکی خاک رس فشرده آلوده به شیرابه پرداختند و افزایش در مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک آلوده را گزارش نمودند. همچنین، طی مطالعه‌ای اثرگذاری شیرابه مرکز دفن بر خاک رس تثبیت‌شده

جدول ۲- نتایج آنالیز شیرابه

ردیف	عنوان آزمون	واحد اندازه‌گیری	نتیجه آزمون
۱	pH	pH	۷/۶۶
۲	COD	mgO ₂ /L	۱۱۴۰۰
۳	BOD	mgO ₂ /L	۵۳۵۰
۴	TSS	mg/L	۸۴۰
۵	TDS	mg/L	۱۰۳۰۰
۶	هدایت الکتریکی	μs/cm	۲۰۴۰۰
۷	کلرید (cl)	ppm	۵۰۰
۸	آمونیم (NH ₃)	ppm	۰/۹
۹	نیترات (NO ₃)	ppm	۲۰
۱۰	نیتريت (NO ₂)	ppm	۰/۲
۱۱	سولفات (SO ₄)	ppm	۱۶۰
۱۲	منیزیم (Mg)	ppm	۱۲۰

طریقه انجام آزمایش‌ها و آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت دستیابی به خصوصیات مهندسی خاک مورد مطالعه، پس از بررسی اولیه آزمایش‌های متفاوتی مانند تراکم، حدود اتربرگ و دانه‌بندی انجام شد سپس برای رسیدن به اهداف این پژوهش آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده در حالت غیر اشباع مطابق روش زیر بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده به شیرابه انجام پذیرفت.

آزمایش سه محوری: ۲۱ آزمایش سه محوری تحکیم-

نیافته-زهکشی‌نشده غیراشباع بر روی خاک تمیز (CS) و آلوده به شیرابه در چند دسته انجام شده است تا چگونگی تأثیر شیرابه بر روی رفتار تنش-کرنش و پارامترهای مقاومت برشی خاک آلوده به شیرابه بررسی شود. پارامترهای درصد شیرابه، زمان قرارگیری در معرض شیرابه و فشار همه‌جانبه در این مرحله بر اساس آزمایش‌ها اولیه و همچنین مطالعات گذشته به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است (Sunil, 2014; Afolagboye and Talabi, 2009):

- دو نسبت وزنی مختلف شیرابه (۵ درصد (L5) و ۱۵ درصد (L15))
- سه دوره زمان قرارگیری در معرض شیرابه (۷، ۱۴ و ۲۸ روز)
- سه فشار همه‌جانبه (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال)

برای ساخت نمونه‌های آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده، رطوبت ۱۵ درصد به عنوان مناسب‌ترین حالت انتخاب شد که در آن امکان رسیدن به تراکم مناسب وجود دارد و تراکم متناظر آن در منحنی تراکم به میزان ۱۵ kN/m³ می‌باشد. این میزان بر اساس مطالعات مختلف، انجام آزمایش‌ها اولیه و شرایط ساخت در قالب نمونه سه محوری انتخاب شد. لذا با حفظ رطوبت ۱۵ درصد، ابتدا شیرابه به میزان ۵ و ۱۵ درصد وزن خشک خاک به خاک اضافه شد سپس مخلوط همگن حاصل



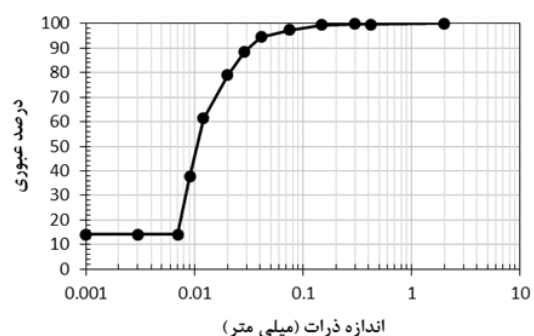
شکل ۱- تصویر هوایی مرکز دفن زباله آق‌قلا

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

ردیف	عنوان	مقدار
۱	چگالی ویژه خاک (G _s)	۲/۵۶
۲	تراکم خشک حداکثر (γ _{dmax})	۱۸/۷۴ kN/m ³
۳	میزان رطوبت بهینه	۱۳/۴٪
۴	ماسه	۲/۶۱٪
۵	سیلت	۸۳/۳۷٪
۶	رس	۱۴/۰۲٪
۷	حد روانی (LL)	۲۴/۱۵٪
۸	حد خمیری (PL)	۱۹٪
۹	شاخص خمیری (PI)	۶/۱۵٪
۱۰	طبقه‌بندی خاک	CL-ML

شیرابه مورد استفاده

برای بررسی اثر شیرابه بر روی پارامترهای مقاومتی خاک، از شیرابه طبیعی تازه تهیه‌شده از مرکز دفن زباله آق‌قلا در آزمایش‌ها استفاده شد. نمونه‌های شیرابه در فصل تابستان، از کانال‌های زهکشی زیر سالن دپو اولیه برداشت شدند. سپس نمونه‌های شیرابه در شرایط بدون اکسیژن به آزمایشگاه منتقل و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا پایان آزمایش‌ها نگهداری شدند. نتایج آنالیز شیرابه مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

فشار همه‌جانبه در آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده غیر اشباع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه را می‌توان به صورت زیر به تفسیر مورد بررسی قرار داد.

منحنی تنش-کرنش

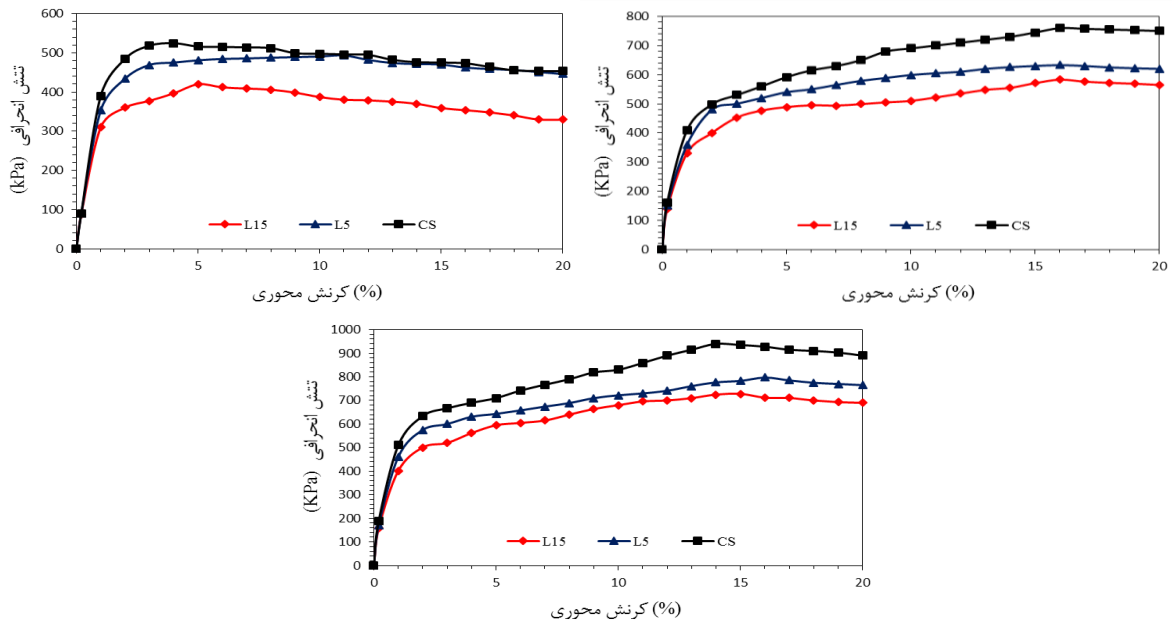
اثر درصد شیرابه بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌های خاک

نتایج مربوط به بررسی اثر درصد شیرابه بر خاک تمیز در سه زمان قرارگیری در معرض شیرابه ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب در اشکال (۳) تا (۵) ارائه شده است.

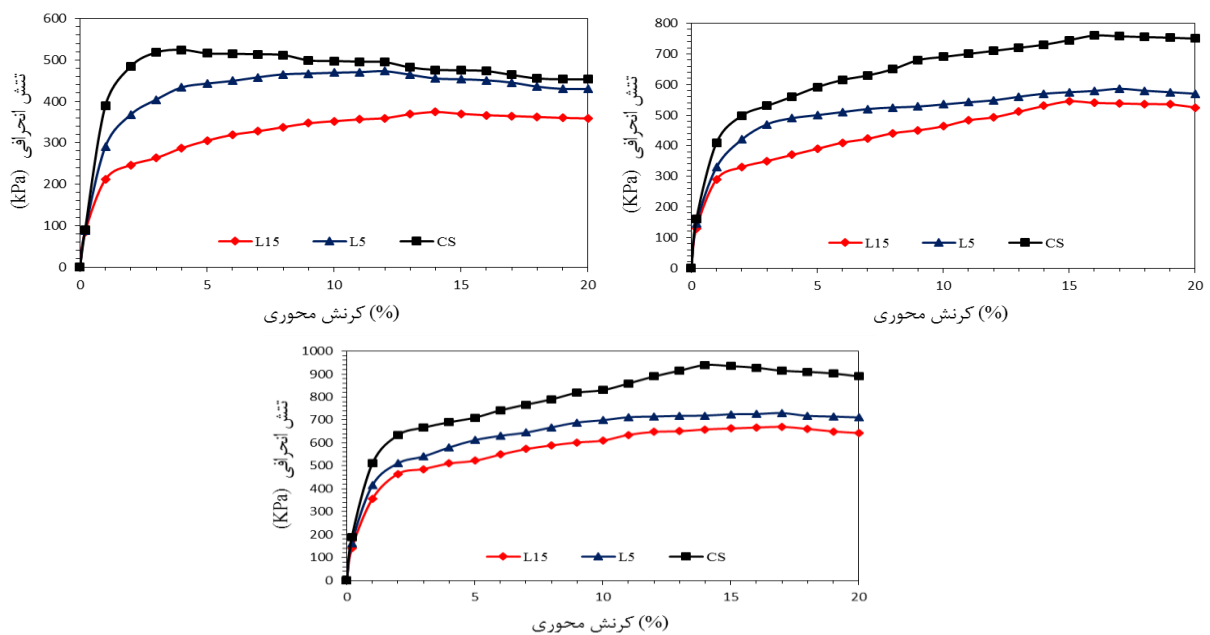
در سه لایه به ضخامت ۲۵/۵ میلی‌متر در قالب استوانه‌ای جهت دستیابی به وزن مخصوص خشک 15 kN/m^3 کوبیده شد. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به ترتیب ۳۷/۶ و ۷۶/۶ میلی‌متر بوده و به منظور حفظ رطوبت، نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی و در دمای محیط تا زمان آزمایش قرار گرفتند.

نتایج و بحث

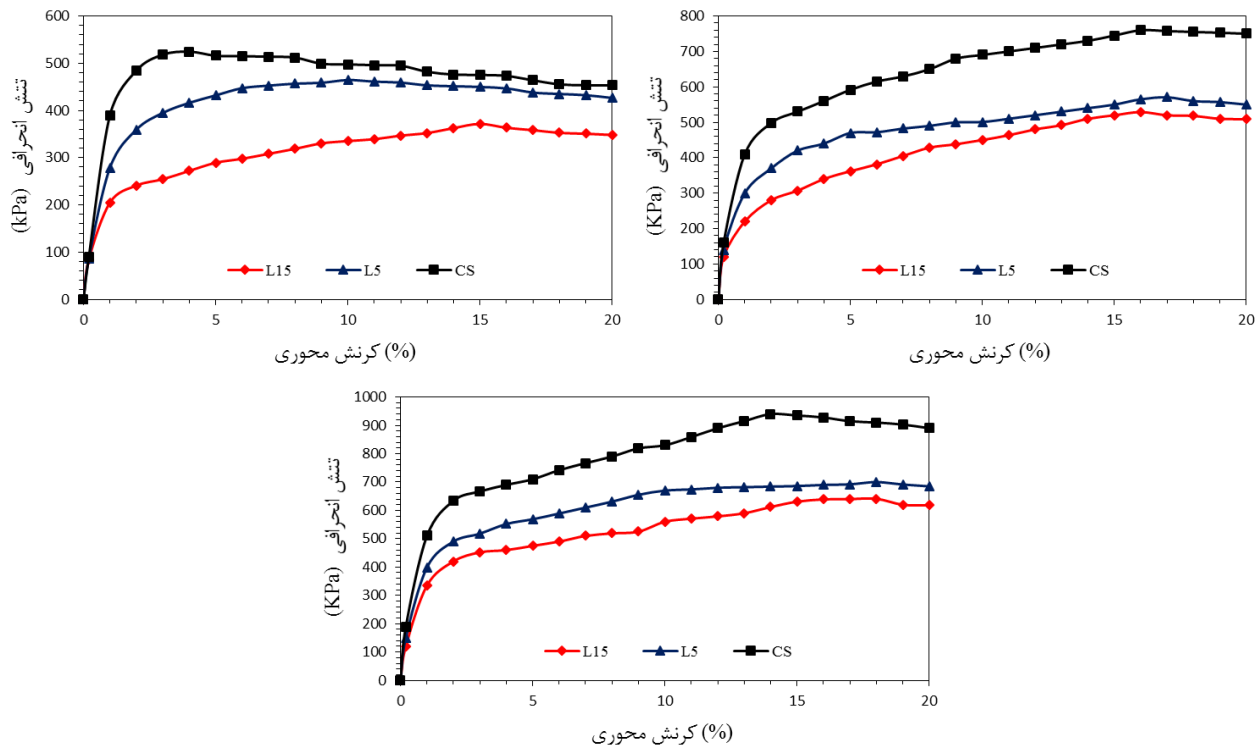
در این پژوهش پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تحت اثر عواملی چون تغییرات زمان قرارگیری در معرض شیرابه، درصد شیرابه و



شکل ۳- نتایج مربوط به بررسی اثر درصد شیرابه بر خاک تمیز پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، الف. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، ب. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پ. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۴- نتایج مربوط به بررسی اثر درصد شیرابه بر خاک تمیز پس از ۱۴ روز قرارگیری در معرض شیرابه، الف. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، ب. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پ. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.



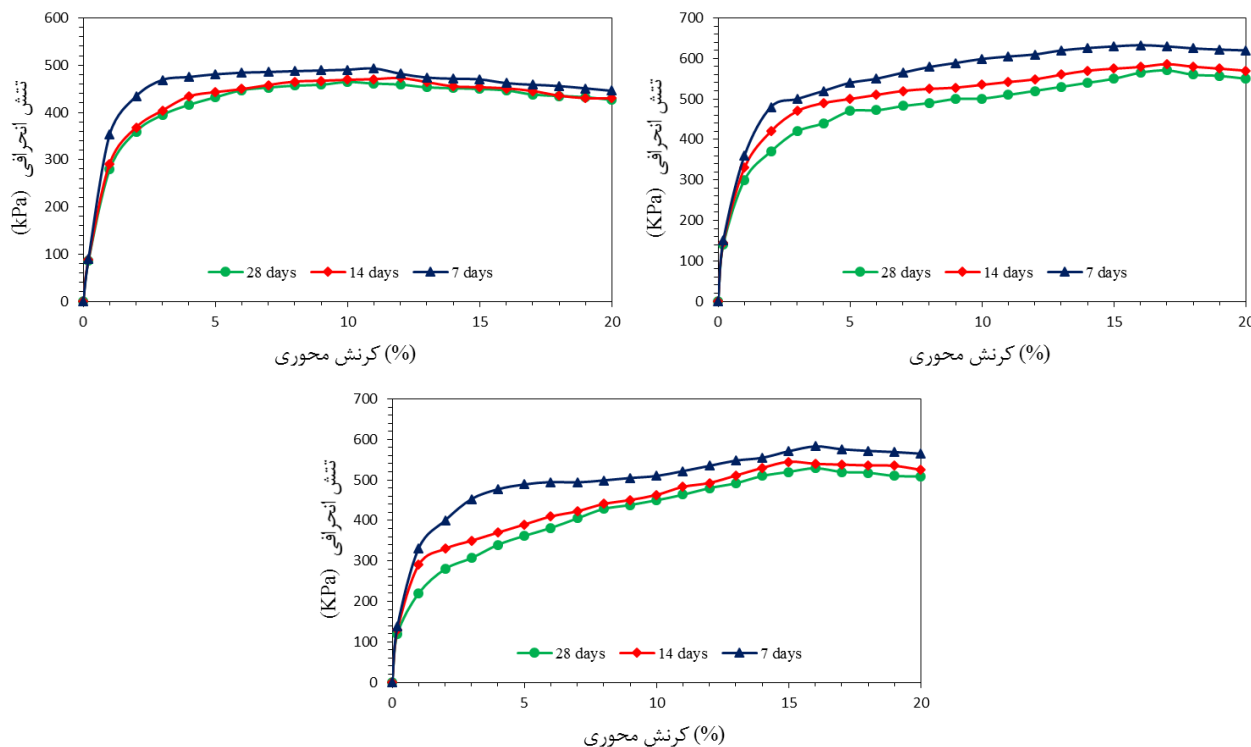
شکل ۵- نتایج مربوط به بررسی اثر درصد شیرابه بر خاک تمیز پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه، الف. منحنی تنش- کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، ب. منحنی تنش- کرنش در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پ. منحنی تنش- کرنش در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.

(2016) که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت خاک بعد از آلوده شدن به شیرابه می‌شود. همچنین، نتایج مشابه در مطالعات گذشته منتشر شده است. در این رابطه می‌توان به نتایج Shivaraju *et al.* (2016) اشاره کرد که به میزان ۶۱ تا ۳۲ درصد کاهش در مقاومت محصور نشده نمونه خاک به دست آمده از اعماق ۰ تا ۱ متری مرکز دفن مشاهده نمودند. آن‌ها دلیل این مهم را به واکنش شیرابه و ذرات خاک مرتبط دانستند. علاوه بر این Shariatmadari *et al.* (2016) منتشر کردند که با افزایش درصد آلودگی در خاک، مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. همچنین طی مطالعه‌ای بر روی خاک‌های متراکم و غیر متراکم Oztoprak and Pisirici که با آب و شیرابه ترکیب شده بودند، (2011) گزارش کردند که شیرابه ساختار خاک را تغییر می‌دهد و قرارگیری خاک در معرض شیرابه، سبب کاهش مقاومت تک‌محوری نمونه خاک می‌شود.

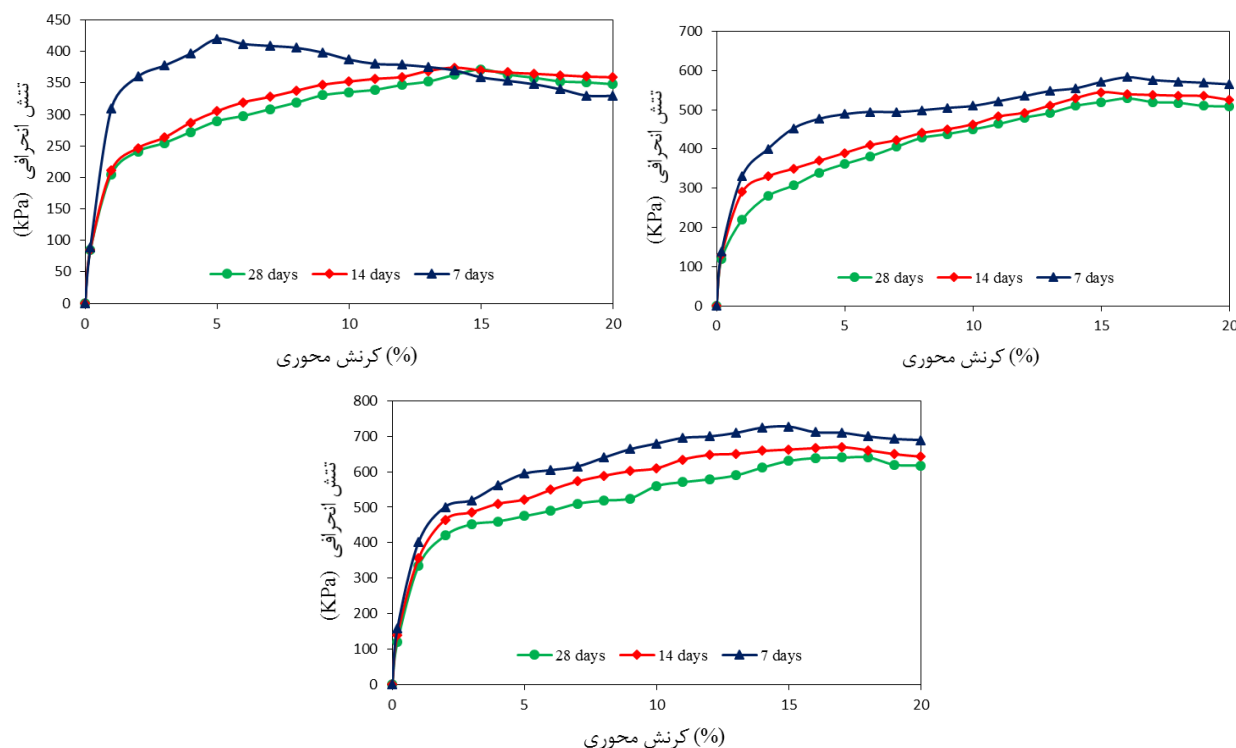
اثر زمان قرارگیری در معرض شیرابه بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌های آلوده به ۵ و ۱۵ درصد شیرابه

در شکل‌های (۶) و (۷) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد شیرابه با تمرکز بر زمان قرارگیری در معرض شیرابه ارائه شده است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که صرف نظر از زمان قرارگیری در معرض شیرابه، حضور شیرابه در خاک سبب کاهش تنش محوری اضافی می‌شود. به عنوان مثال، مطابق نتایج (شکل ۵) در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال و پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه برای نمونه L5 ۱۱/۴ درصد و برای نمونه L15 ۲۹ درصد کاهش در بیشینه تنش محوری اضافی نسبت به نمونه CS دیده می‌شود و همین روند در باقی نمونه‌ها نیز مشاهده شد؛ به این ترتیب که پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه و فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه L5 و L15 میزان ۲۵ و ۳۰/۲ درصد کاهش و در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال میزان ۲۵/۵ و ۳۱/۸ درصد کاهش در بیشینه تنش محوری اضافی دیده می‌شود. از طرفی نتایج فوق نشان می‌دهد که میزان کاهش بیشینه تنش محوری اضافی با افزایش درصد وزنی شیرابه افزایش پیدا نموده است به این صورت که تنش محوری اضافی نمونه L15 کمتر از نمونه L5 و هر دو کمتر از نمونه CS می‌باشند. این‌طور به نظر می‌رسد که اضافه شدن شیرابه به خاک منجر به تغییر در بافت و ساختار اولیه خاک می‌شود (Khodary *et al.*, 2018). در اثر اندرکنش بین خاک و شیرابه، ساختار دانه‌های خاک نابود می‌شود، اندازه دانه‌ها کوچکتر می‌شود و حفرات میکرو در خاک ایجاد می‌شود لذا تخلخل خاک افزایش می‌یابد (Zhao *et al.*,



شکل ۶- نتایج مربوط به بررسی اثر زمان قرارگیری در معرض شیرابه بر روی نمونه‌های خاک حاوی ۵ درصد شیرابه، الف. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، ب. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پ. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.



شکل ۷- نتایج مربوط به بررسی اثر زمان قرارگیری در معرض شیرابه بر روی نمونه‌های خاک حاوی ۱۵ درصد شیرابه، الف. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال، ب. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۲۰۰ کیلو پاسکال، پ. منحنی تنش-کرنش در فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.

اثرات منفی شیرابه بر مقدار بیشینه تنش محوری اضافی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۶ نمایش داده شده است، در نمونه L5 و فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال با گذشت زمان از ۷ روز

مطابق نتایج آزمایش‌ها (شکل ۶ و ۷) با گذشت زمان قرارگیری در معرض شیرابه از ۷ به ۲۸ روز، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی کاهش می‌یابد؛ به بیانی دیگر با گذشت زمان،

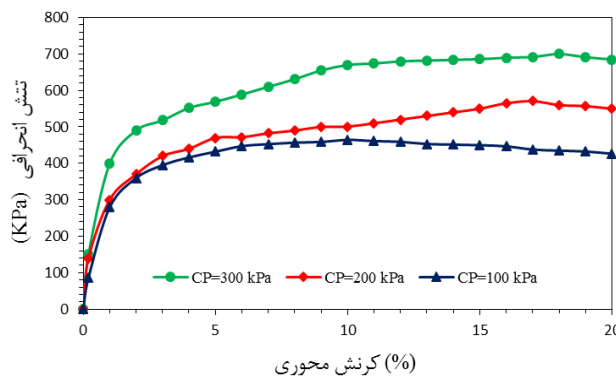
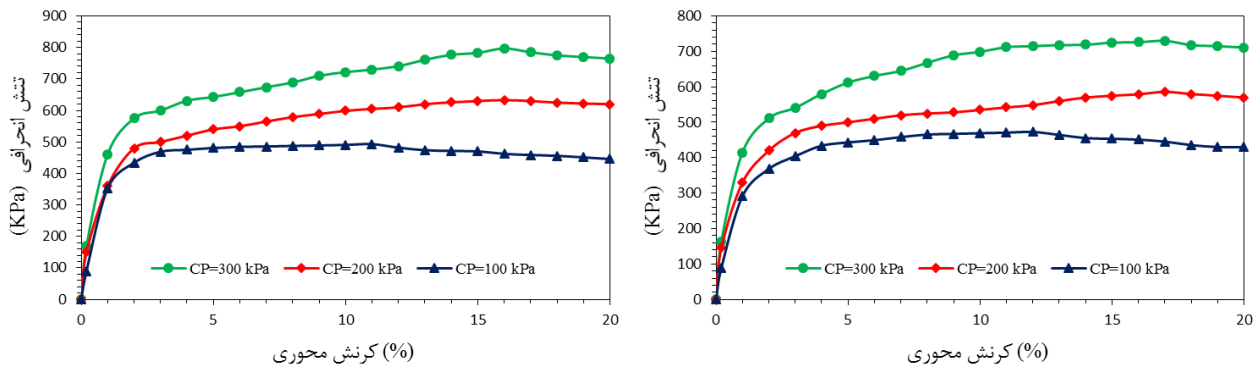
آزمایش نمونه‌ها برای درصدهای مختلف شیرابه در فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال پس از گذشت ۱۴، ۷ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه ارزیابی شد که نتایج آن به ترتیب در اشکال (۸) و (۹) نشان داده شده است.

مقایسه نتایج (شکل ۸ و ۹) نشان می‌دهد با افزایش فشار همه‌جانبه از ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلو پاسکال و محصورشدگی بیشتر امکان تغییر مکان برای دانه‌ها دشوارتر شده در نتیجه با افزایش فشار همه‌جانبه، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، در نمونه L5 با افزایش فشار همه‌جانبه از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلو پاسکال، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی به میزان ۲۸/۱ درصد افزایش یافته است. در صورت افزایش فشار همه‌جانبه از ۲۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی به میزان ۲۶/۱ درصد افزایش یافته و همین روند برای نمونه L15 به صورت افزایش ۳۸/۸ و ۲۴/۸ درصدی در مقدار بیشینه تنش محوری اضافی مشاهده شده است. در نگاه کلی تر می‌توان گفت که با افزایش فشار همه‌جانبه از ۱۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال، در مجموع افزایش بیشتری در بیشینه تنش محوری اضافی نمونه L15 رخ می‌دهد و این امر تأثیرگذاری بیشتر تغییرات فشار همه‌جانبه در نمونه L15 نسبت به L5 را نشان می‌دهد.

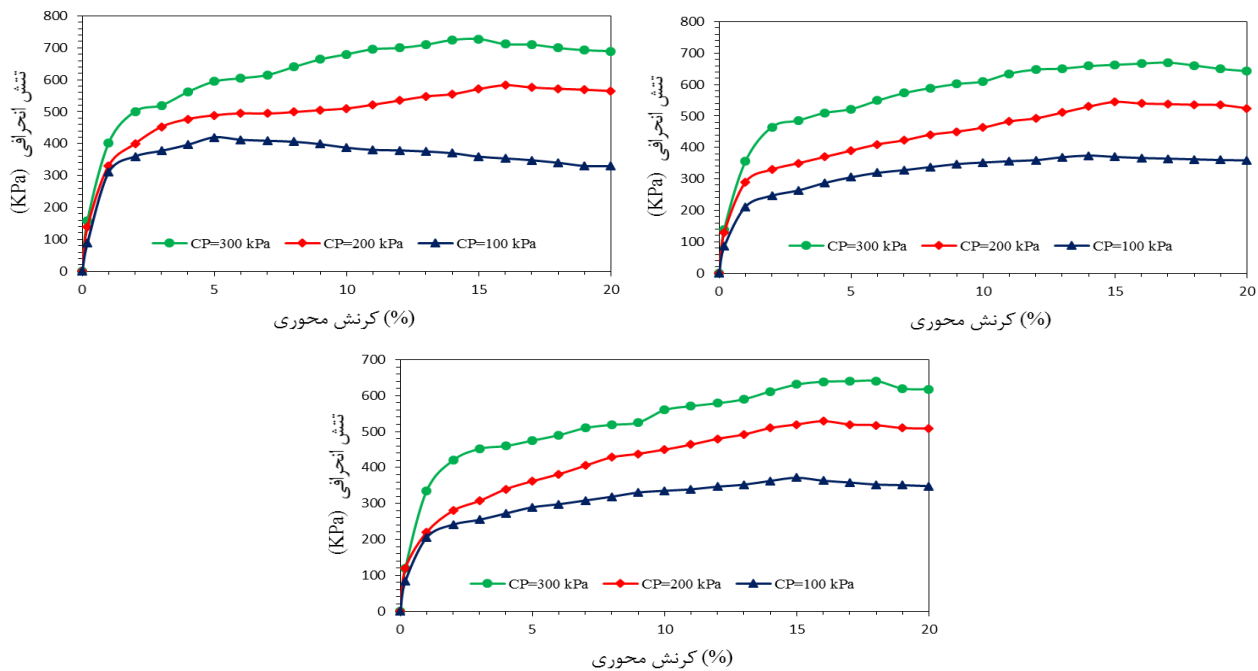
به ۱۴ روز ۴ درصد و از ۱۴ روز به ۲۸ روز ۱/۹ درصد کاهش در تنش محوری اضافی بیشینه رخ می‌دهد. مطابق شکل (۷)، این اعداد برای نمونه L15 میزان ۱۰/۷ و ۱ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج موجود در شکل (۶) و (۷) نشان می‌دهد که میزان افت تنش محوری اضافی پس از گذشت زمان از ۷ روز به ۱۴ روز نسبت به ۱۴ روز به ۲۸ روز بیشتر است. به بیانی دیگر شیرابه بیشترین تأثیر را در ۱۴ روز اول می‌گذارد و این امر به وضوح از روی هم قرارگیری تقریبی نمودار ۱۴ و ۲۸ روزگی (شکل ۶ و ۷) در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال در نمونه‌های L5 و L15 قابل مشاهده است. در این رابطه می‌توان به پژوهش Ouria and Farsijani (2019) اشاره کرد. آن‌ها گزارش کردند که با گذر زمان از نفوذ شیرابه به درون خاک حتی با درصدهای کم، تأثیرات منفی بر روی کاهش مقاومت برشی خاک بیشتر خواهد شد. علاوه بر این Oztoprak and Pisirici (2011) طی مطالعه‌ای بر روی نمونه‌های ۱۵ الی ۳۰ روزه مشاهده کردند که تأثیرات منفی شیرابه بر خاک با گذشت زمان بیشتر می‌شود.

اثر فشار همه‌جانبه بر منحنی تنش-کرنش نمونه‌های آلوده به ۵ و ۱۵ درصد شیرابه

نتایج آزمایش با تمرکز بر فشار همه‌جانبه به عنوان متغیر مستقل اصلی نیز قابل تفسیر می‌باشد. مقادیر بیشینه تنش مربوط به

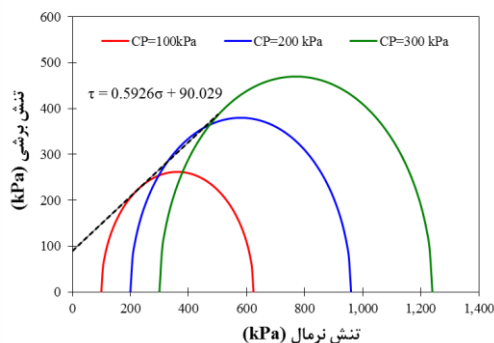


شکل ۸- نتایج مربوط به بررسی اثر فشار همه‌جانبه بر روی نمونه‌های خاک حاوی ۵ درصد شیرابه، الف. منحنی تنش-کرنش پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، ب. منحنی تنش-کرنش پس از ۱۴ روز قرارگیری در معرض شیرابه، پ. منحنی تنش-کرنش پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه.



شکل ۹- نتایج مربوط به بررسی اثر فشار همه‌جانبه بر روی نمونه‌های خاک حاوی ۱۵ درصد شیرابه، الف. منحنی تنش- کرنش پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، ب. منحنی تنش- کرنش پس از ۱۴ روز قرارگیری در معرض شیرابه، پ. منحنی تنش- کرنش پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه.

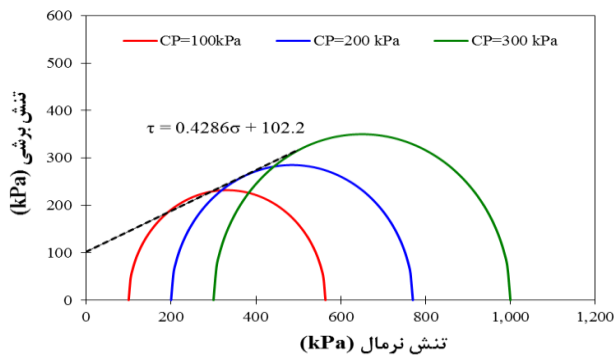
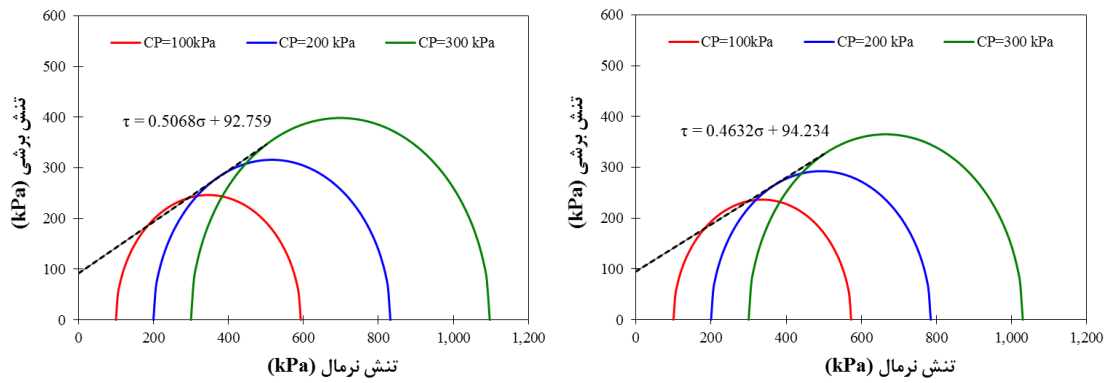
همچنین، این مقادیر به میزان ۳۰، ۳۱، ۲۸ و ۲۶ درجه برای زاویه اصطکاک خاک منتشر کردند (Sunil *et al.*, 2009). همچنین Abdi and Fakharian (2002) برای نمونه خاک آغشته به شیرابه نسبت به نمونه خاک مینا افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک را منتشر کردند. قابل ذکر است که Ouria and Farsijani (2019) طی مطالعه‌ای بر روی رفتار مقاومتی خاک‌های رس گزارش کردند که تحت اثر شیرابه، بین ساختارهای توده‌ای خاک فاصله ایجاد می‌شود. از این رو درگیری در ساختار خاک کمتر شده و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین افزایش چسبندگی خاک را مشاهده کردند که علت این مهم را چسبندگی ذاتی شیرابه بیان نمودند. علاوه بر این، Zhao *et al.* (2016) طی مطالعه‌ای با انجام آزمایش برش مستقیم بر نمونه خاک رس فشرده‌شده آلوده به شیرابه، افزایش در مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک رس مشاهده کردند.



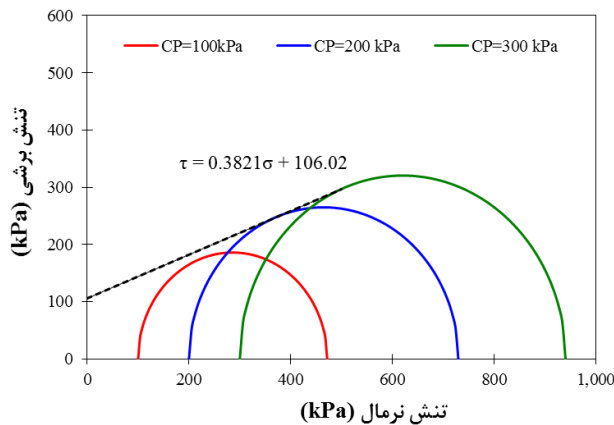
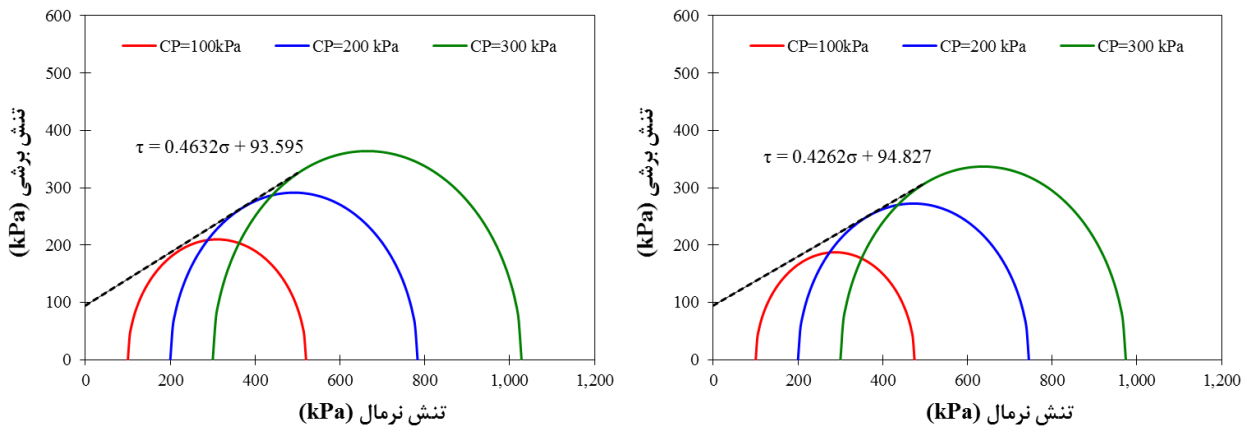
شکل ۱۰- پوش گسیختگی موهر-کولمب مربوط به نمونه خاک تمیز.

تأثیر شیرابه بر پارامترهای مقاومت برشی

شکل (۱۰) تا (۱۲) به ترتیب پوش گسیختگی موهر-کولمب مربوط به نمونه‌های خاک تمیز و آلوده به ۵ و ۱۵ درصد شیرابه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) نشان می‌دهند، مقادیر چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) خاک بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری با رسم پوش گسیختگی موهر-کولمب در فشارهای همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال به دست آمده است. همچنین، تغییرات C و ϕ برای مقادیر مختلف شیرابه پس از دوره‌های مختلف قرارگیری در معرض شیرابه در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس جدول (۳)، با افزایش درصد وزنی شیرابه زاویه اصطکاک خاک به آرامی کاهش می‌یابد. به این صورت که در نمونه حاوی ۱۵ درصد شیرابه در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، زاویه اصطکاک به مقدار ۹ درجه نسبت به خاک تمیز کاهش می‌یابد و علت این مهم می‌تواند در واکنش شیمیایی و لزجت شیرابه روی بافت خاک باشد که با محصور کردن ذرات خاک باعث کاهش درگیری بین دانه‌ها گشته و منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود (Abdi and Fakharian, 2002). این در حالی است که چسبندگی نمونه L15 در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به مقدار ۱۶ کیلو پاسکال نسبت به نمونه CS افزایش پیدا می‌کند. نتایج مشابه در بررسی‌های Sunil *et al.* (2009) گزارش شده است. آن‌ها برای نمونه حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد شیرابه، مقادیر چسبندگی را به میزان ۱۸/۲، ۱۸/۵، ۱۹ و ۲۰ کیلو پاسکال گزارش کردند.



شکل ۱۱- پوش گسیختگی موهر-کولمب مربوط به نمونه خاک آلوده به ۵ درصد شیرابه، الف. پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، ب. پس از ۱۴ روز قرارگیری در معرض شیرابه، پ. پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه.



شکل ۱۲- پوش گسیختگی موهر-کولمب مربوط به نمونه خاک آلوده به ۱۵ درصد شیرابه، الف. پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه، ب. پس از ۱۴ روز قرارگیری در معرض شیرابه، پ. پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه.

جدول ۳- پارامترهای مقاومت برشی خاک تمیز و حاوی شیرابه مربوط به حالت تنش کل بر اساس نتایج آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی‌نشده

نمونه	زمان قرارگیری در معرض شیرابه (روز)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلو پاسکال)
CS	-	۳۰	۹۰
L5	۷	۲۷	۹۲
L5	۱۴	۲۵	۹۴
L5	۲۸	۲۳	۱۰۲
L15	۷	۲۵	۹۴
L15	۱۴	۲۳	۹۵
L15	۲۸	۲۱	۱۰۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی اثر شیرابه بر روی پارامترهای مقاومتی خاک، نمونه‌های خاک تمیز و آلوده به شیرابه با رطوبت ۱۵ درصد و وزن مخصوص خشک 15 kN/m^3 تهیه شد. اثر زمان قرارگیری در معرض شیرابه، درصد شیرابه و تغییرات فشار همه‌جانبه، با انجام آزمایش سه محوری تحکیم‌نیافته-زهکشی-نشده غیر اشباع مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج با افزودن شیرابه به خاک، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی کاهش می‌یابد و میزان افت مشاهده‌شده با افزایش درصد شیرابه از ۵ به ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. به این ترتیب که پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه و فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال در نمونه L5 و L15 میزان $11/4$ و 29 درصد کاهش در مقدار بیشینه تنش محوری اضافی نسبت به نمونه CS مشاهده شد. گذشت زمان نیز منجر به کاهش بیشینه تنش محوری اضافی می‌شود و بیشترین تأثیر شیرابه در افت بیشینه تنش محوری اضافی در ۱۴ روز اول قرارگیری در معرض شیرابه مشاهده می‌شود. در فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال در نمونه L5 با گذشت زمان از ۷ روز به ۱۴ روز و از ۱۴ روز به ۲۸ روز میزان $4/9$ درصد کاهش در مقدار تنش محوری اضافی بیشینه دیده شد. این مقادیر برای نمونه L15 میزان $10/7$ و 1 درصد می‌باشد؛ در مجموع می‌توان

گفت که اثرگذاری نمونه حاوی ۱۵ درصد شیرابه در طول ۱۴ روز اول قرارگیری در معرض شیرابه بیش از تأثیر نمونه آلوده به ۵ درصد شیرابه در پایان ۲۸ روز می‌باشد. بررسی نتایج از منظر تغییرات فشار همه‌جانبه نشان می‌دهد که در تمام نمونه‌ها با افزایش فشار همه‌جانبه مقدار بیشینه تنش محوری اضافی افزایش می‌یابد. به این صورت که برای نمونه L5 پس از ۷ روز قرارگیری در معرض شیرابه با افزایش فشار همه‌جانبه از ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال مقدار بیشینه تنش محوری اضافی به میزان $28/1$ درصد افزایش یافته است. در صورت افزایش فشار همه‌جانبه از ۲۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال، مقدار بیشینه تنش محوری اضافی به میزان $26/1$ درصد افزایش می‌یابد و این مقادیر برای نمونه L15 به میزان $38/8$ و $24/8$ درصدی می‌باشد. همچنین از نتایج آزمایش سه محوری، پارامترهای مقاومت برشی به دست می‌آید. برای نمونه L15 پس از ۲۸ روز قرارگیری در معرض شیرابه مقدار زاویه اصطکاک نسبت به نمونه CS به میزان ۹ درجه کاهش یافت؛ در حالی که در مقدار چسبندگی ۱۶ کیلو پاسکال افزایش دیده شد. در نتیجه با آلوده شدن خاک به شیرابه مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک به ترتیب دچار افزایش و کاهش می‌شوند. البته توجه به این نکته ضروری است که با افزایش درصد شیرابه، تأثیر شیرابه بر این مقادیر افزایش می‌یابد.

REFERENCES

- Abdi, M., & Fakharian, K. (2002). Study of leachate effect on soil behavior of solid waste landfill in Tehran (Fukuka design), in: Proceedings of Conference on Land Improvement, 5-6 March, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (in Persian)
- Afolagboye, L. O., & Talabi, A. O. (2014). Effect of curing time on unconfined compressive strength of lateritic soil stabilized with tyre ash. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences*, 2(6), 189-200.
- Arasan, S. (2010). Effect of chemicals on geotechnical properties of clay liners: a review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(8), 765-775.
- Arasan, S., & Yetimoglu, T. (2008). Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32(2), 107-115.
- Bagchi, A. (2004). Design of landfills and integrated solid waste management. John Wiley & Sons.
- Cyrus, S., Kumar, T. G., Abraham, B. M., Sridharan, A., & Jose, B. T. (2010). Effect of industrial wastes on the physical and engineering properties of soils. In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference GEOTrendz, 16-18 December, pp.

- 357-360.
- Gholami, Y., Saghafi, M., & Heidari, M. (2019). The effect socio-economic indicators of citizen participation in the management of household waste (case study of GORGAN). *Geographical arrangement of space*¹, 8(30), 149-158.
- Harun, N. S., Ali, Z. R., Rahim, A. S., Lihan, T., & Idris, R. M. W. (2013). Effects of leachate on geotechnical characteristics of sandy clay soil. In: *Proceedings of AIP Conference*, November, 1571(1), pp. 530-536.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global review of solid Waste Man.* Urban Development Series Knowledge Papers.
- Hou, J., Li, J., & Chen, Y. (2019). Coupling effect of landfill leachate and temperature on the microstructure of stabilized clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 629-640.
- Khodary, S. M., Negm, A. M., & Tawfik, A. (2018). Geotechnical properties of the soils contaminated with oils, landfill leachate, and fertilizers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 13.
- Li, J. S., Xue, Q., Wang, P., & Liu, L. (2013). Influence of leachate pollution on mechanical properties of compacted clay: a case study on behaviors and mechanisms. *Engineering geology*, 167, 128-133.
- Loni, O. A., Hussein, M. T., & Alrehaili, A. M. (2013). Geo-environmental effect of landfill site, southeast of Riyadh, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(6), 2021-2033.
- Nayak, S., Sunil, B. M., & Shrihari, S. (2007). Hydraulic and compaction characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. *Engineering Geology*, 94(3-4), 137-144.
- Osinubi, K. J., Eberemu, A. O., Ijimdiya, T. S., & Yohanna, P. (2020). Interaction of landfill leachate with compacted lateritic soil treated with bacillus coagulans using microbial-induced calcite precipitation approach. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(1), 04019024.
- Ouria, A., & Farsijani, A. (2019). The Effect of Waste Leachate on the Strength Parameters of Clay with High and Low Plasticity, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6), 1081-1092.
- Ozcoban, M. S., Tufekci, N., Tutus, S., Sahin, U., & Celik, S. O. (2006). Leachate removal rate and the effect of leachate on the hydraulic conductivity of natural (undisturbed) clay. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 65, 264-269.
- Oztoprak, S., & Pisirici, B. (2011). Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. *Engineering Geology*, 121(3-4), 110-122.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468-493.
- Shariatmadari, N., La, B. A., Nezhad, H. E., & Askari, B. (2016). Investigating the stress-strain and failure behavior of soils contaminated with urban solid waste leachate: a case study from the landfill area of Saravan, Rasht. *International Journal of Civil Engineering*, 14(7), 451-457.
- Shivaraju, R., Ravishankar, B. V., & Nanda, H. S. (2016). Impact of municipal solid waste disposal on compaction characteristics and strength of red soil. *Journal of civil engineering and architecture*, 10, 1168-1172.
- Sunil, B. M., Shrihari, S., & Nayak, S. (2009). Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. *Engineering Geology*, 106(1-2), 20-25.
- Zhao, Y., Xue, Q., Huang, F. X., Hu, X. T., & Li, J. S. (2016). Experimental study on the microstructure and mechanical behaviors of leachate-polluted compacted clay. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1006.