

پارامترهای تناوبی رس با حد خمیری بالا در شرایط عادی تحکیم یافته غیر اشباع

محسن معجزی^{۱*}، مهنوش بیگلری^۲، محمدکاظم جعفری^۳

۱- دکترای عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- استادیار، دانشگاه رازی کرمانشاه،

۳- استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

m.mojezi@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۰۴/۰۴]

چکیده

مطالعه پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها نیازمند تخمین درست پارامترهای مدول برشی و نسبت میرایی لایه‌های زیرسطحی است. با توجه به طبیعت غیراشباع بخش‌های وسیعی از سطح زمین، طبیعتاً آزمایش‌های لازم برای تعیین صحیح پارامترهای مذکور برای این نواحی باید در شرایط غیراشباع انجام شود. در سال‌های اخیر با توسعه ابزارهای آزمایشگاهی پیشرفته مطالعات در حوزه غیر اشباع توسعه یافته است. در این پژوهش سعی شده است تا برای روشن شدن تغییرات پارامترهای تناوبی آبرفت‌های خاکی غیراشباع در سطوح کرنش متوسط تا بزرگ، با استفاده از تجهیزات سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش، پارامترهای مدول برشی و نسبت میرایی در سطوح کرنش متوسط تا بزرگ تعیین شده و اثر تغییرات مکش بافتی و تنش میانگین خالص بر پارامترهای مذکور در یک نوع رس با حد خمیری ۲۴ در شرایط غیر اشباع با آهنگ بارگذاری بالا مطالعه شود. در این راستا آزمایش‌هایی روی نمونه‌های عادی تحکیم یافته از رس مذکور در مسیرهای بارگذاری متفاوت شامل ۲ سطح مکش یک سطح تنش میانگین خالص سه دامنه تنش انحرافی تناوبی انجام شده است. همچنین برای بررسی تاثیر پارامتر شاخص خمیری، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش دیگر انجام گرفته در شرایط یکسان (نمونه سازی و مسیر تنش)، روی مصالحی ریزدانه با شاخص خمیری ۱۲ انجام گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش مکش موجب افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی می‌شود. همچنین با افزایش شاخص خمیری نیز کاهش قابل توجهی در سختی نمونه‌های آزمایش مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: رس با حد خمیری بالا، مدول برشی، نسبت میرایی، غیر اشباع، عادی تحکیم یافته

۱- مقدمه

در کرنش‌های بسیار کوچک و تعیین پارامترهای مدول برشی و نسبت میرایی اولیه (G_0 و D_0) در شرایط غیراشباع، با استفاده از تجهیزاتی مانند ستون تشدید- برش پیچشی و بندر المنت بوده است. این پژوهشگران تاثیر عواملی مانند مکش، تنش میانگین خالص، تاریخچه مکش، تاریخچه تنش میانگین خالص، ناهمسانی و آثار پیش تحکیم‌یافتگی بر پارامترهای D_0 و G_0

با توسعه تجهیزات مناسب برای انجام آزمایش‌های غیراشباع در سالهای اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در شاخه‌های مختلف از جمله بررسی رفتار تناوبی و دینامیکی مصالح غیراشباع شده است. بخش وسیعی از مطالعات انجام گرفته در زمینه مطالعه پارامترهای تناوبی مصالح غیراشباع شامل پژوهش‌های انجام گرفته

همچنین در پایان، به منظور بررسی اثر شاخص خمیری بر نتایج مورد مطالعه، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش دیگر انجام گرفته در شرایط یکسان آزمایش روی مصالحی ریزدانه با شاخص خمیری ۱۲ انجام گرفته است.

۲- ابزار آزمایش

آزمایش‌ها با استفاده از تجهیزات سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش توسعه یافته در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [15] انجام گرفته است. این تجهیزات توسط یک سیستم کنترل کننده کامپیوتری مدیریت و برنامه‌ریزی می‌شود. دستگاه شامل سیستم‌های کنترل مکش، اعمال و اندازه‌گیری تنش‌های محوری و همه‌جانبه، اندازه‌گیری تغییرات آب منفذی، درصد رطوبت، اعمال و اندازه‌گیری فشار آب منفذی، اعمال و اندازه‌گیری فشار هوای منفذی، اندازه‌گیری تغییرشکل‌های محوری و حجمی، به وسیله سیستم کنترل کامپیوتری است.

۳- مصالح مورد آزمایش و آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش یک نوع مصالح ریزدانه با طبقه بندی CH بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک متحد (USCS) و شاخص خمیری ۲۴ انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی مصالح مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح مورد آزمایش

Specification	Value
USCS	CH
Clayey Fraction (%)	45
Silty Fraction (%)	55
Plasticity Index (PI)	24
Liquid Limit (LL)	52
Plastic Limit (PL)	28
Specific Gravity (G_s)	2.63
Optimum Water Content (ω_{opt} : %)	25.8
Dry Density ($\gamma_{d(max)}$: g/cm^3)	1.5
Initial Void Ratio (e_0)	1.56
Initial Saturation Degree (S_{r0} : %)	39

Table 1. Physical specifications of the tested material

نمونه‌های غیراشباع با شاخص‌های خمیری مختلف را بررسی کردند [1,2,3,4,5,6,7]. برخی از آنها نیز روابطی تجربی برای تخمین این پارامترها ارائه داده اند [8,9,10,11,12,13].

در بخش دیگر می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته در محدوده کرنش‌های متوسط تا بزرگ پیرامون تعیین پارامترهای مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D)، تعیین منحنی‌های $G/G_0-\gamma$ و $D-\gamma$ ، تاثیر عوامل تاثیرگذار بر این پارامترها و نیز ارائه روابط تجربی برای تخمین پارامترهای مذکور اشاره داشت که البته در این گروه مطالعات وسیعی صورت نگرفته است و تنها می‌توان به پژوهش‌های انجام گرفته به وسیله بیگلری [14] و بیگلری و همکاران [15] اشاره نمود که پس از توسعه اولین دستگاه سه محوری تناوبی با قابلیت کنترل مکش به مطالعه مدول برشی و نسبت میرایی کائولینیت نوز غیراشباع در کرنش‌های متوسط تا بزرگ و ارائه مدل تجربی برای پیش‌بینی این پارامترها پرداختند.

با توجه به نیاز شناخت رفتار تناوبی خاک‌های غیراشباع، به داده‌های آزمایشگاهی بیشتر و جامع‌تری در این زمینه، هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای تناوبی خاک‌های غیر اشباع با حدود خمیری بالا (یعنی، مدول برشی و نسبت میرایی) و نیز مطالعه رفتار تغییرحجمی مصالح مورد آزمایش در مسیرهای تنش مختلف است. با توجه به اینکه در بیشتر موارد سازه‌های ژئوتکنیکی مانند سدهای خاکی، شیروانی‌ها و دیوارهای حائل و نیز سازه‌های واقع بر پی‌ها ارتباط مستقیمی با مصالح غیراشباع (در خود سازه یا در اندرکنش با آن) دارند، شناخت رفتار این گونه مصالح می‌تواند در تحلیل‌های مهندسی دقیقتر این سازه‌ها به ویژه در شرایط بارگذاری تناوبی استفاده شود.

این پژوهش شامل چند سری آزمایش روی یک نوع مصالح ریزدانه تجاری با شاخص خمیری ۲۴ بوده است. آزمایش‌ها در سطح تنش میانگین خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال و ۲ سطح مکش (صفر و ۳۰۰ کیلوپاسکال) انجام شده است. به منظور برقراری امکان مقایسه صحیح، شرایط اولیه همه نمونه‌ها به صورت یکسان در نسبت تراکم و فاصله یکسانی خشک‌تر از درصد رطوبت بهینه بوده است.

در مکش ثابت (سرعت بارگذاری کم برای کنترل تعادل مکش) و تنش محوری صفر تا سطح تنش میانگین خالص مورد نظر (۲۰۰ کیلوپاسکال) به صورت همسان تحکیم شده است. در انتها نیز مطابق برنامه آزمایش‌ها، سیکل‌های تنش محوری دو طرفه در دامنه تنش محوری مربوط به هر نمونه (۱۸، ۴۲ و ۸۱ کیلوپاسکال)، هر کدام تا ۶۰ سیکل بارگذاری و با فرکانس ۰/۰۰۳ هرتر اعمال شده است.

لازم به توضیح است که در این پژوهش، نامگذاری نمونه‌ها (یا آزمایش‌ها) جدا از جنس مصالح که به صورت P24 (کائولین زنوز با شاخص خمیری ۲۴) معرفی شده، با عبارتی به صورت S-M-D در نظر گرفته شده است، بطوریکه حرف S معرف مکش (Suction)، M معرف تنش میانگین خالص (Mean net stress) و حرف D معرف تنش انحرافی (Deviatoric stress) است. اعداد پس از این حروف نیز مقادیر تنش مربوطه به کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

۴-۲- مسیرهای تنش

آزمایش‌ها در یک سطح تنش میانگین خالص (۲۰۰ کیلو پاسکال) و دو سطح مکش صفر و ۳۰۰ کیلوپاسکال و سه دامنه تنش انحرافی (۱۸، ۴۲ و ۸۱ کیلوپاسکال) برنامه‌ریزی و انجام شده است. مسیرهای تنش در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این شکل‌ها، مسیر تنش در محورهای تنش میانگین خالص در مقابل مکش (قسمت a) و نیز محورهای تنش میانگین خالص در مقابل تنش انحرافی (قسمت b) معرفی شده‌اند. در شکل‌های مذکور پارامتر q معرف دامنه تنش انحرافی در هر آزمایش است. جزئیات آزمایش‌ها نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. جزئیات آزمایش‌های انجام گرفته و مسیرهای تنش طی شده حین آزمایش‌ها

No.	Sample Name	end of Initial Equalization			end of Isotropic Consolidation (before Cyclic Loading)			Suction (kPa)	Mean Net Stress (kPa)	Cyclic Amplitude (kPa)
		Pore Air Pressure: u_a (kPa)	Pore Water Pressure: u_w (kPa)	Stress: $\sigma_1=\sigma_3$ (kPa)	Pore Air Pressure: u_a (kPa)	Pore Water Pressure: u_w (kPa)	Stress: $\sigma_1=\sigma_3$ (kPa)			
1	S0M200D18	---	50	55	---	50	250	0	200	18
2	S0M200D42	---	50	55	---	50	250	0	200	42
3	S0M200D81	---	50	55	---	50	250	0	200	81
4	S300M200D18	350	50	400	350	50	550	300	200	18
5	S300M200D42	350	50	400	350	50	550	300	200	42
6	S300M200D81	350	50	400	350	50	550	300	200	81

Table 2. Tests details and stress paths during the tests

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا خاک در دسیکاتور و در مجاورت سیلیکا ژل خشک و سپس با افزودن آب مقطر به درصد رطوبت موردنظر رسانده شده است. در تراکم نمونه‌ها از روش زیر تراکم [16] استفاده شده است. به منظور دستیابی به شرایط عادی تحکیم یافته، کلیه نمونه‌ها در رطوبت ۳/۵ درصد کمتر از رطوبت بهینه و وزن مخصوص ۶۹ درصد وزن مخصوص خشک ماکزیمم حاصل از آزمایش پراکتور استاندارد ساخته شده‌اند. در این شرایط، نمونه‌ها با درصد رطوبت ۲۲/۳ درصد و وزن مخصوص ۱۰/۴ kN/m^3 به صورت استوانه‌ای شکل، با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر، در ۷ لایه متراکم و آماده شده‌اند. همچنین متوسط حجم ویژه اولیه (v₀) ۲/۵۶ و متوسط درجه اشباع اولیه (S_{r0}) ۳۹ درصد بوده است.

۴- مراحل انجام آزمایش‌ها

۴-۱- مراحل مشترک آزمایش‌ها

آزمایش‌های برنامه‌ریزی شده این پژوهش شامل مراحل مختلفی بوده که به صورت گام به گام انجام گرفته است. برخی از این گام‌ها در تمام آزمایش‌ها مشترک بوده است. در بخش مشترک آزمایش‌ها، ابتدا نمونه‌ای با شرایط درصد رطوبت مشخص برای ایجاد شرایط عادی تحکیمی نمونه‌ها پس از تراکم آماده شده است. سپس ضمن رعایت تمهیدات منظم و دقیق نمونه غیراشباع ساخته شده در سلول جایگذاری شده است. پس از بستن سلول و کنترل مسیرهای ورود و خروج آب و هوا و نیز مقدار تنش‌های محوری و همه جانبه، نمونه در مسیر تنش کنترل شده تا سطح مکش از قبل برنامه ریزی شده (۰ یا ۳۰۰ کیلوپاسکال) به تعادل اولیه مکش رسانده شده است. پس از اطمینان از ثابت بودن مکش، نمونه

شکل ۲. تغییرات حجم ویژه آب (dv_w) حین مرحله به تعادل رسانی اولیه مکش در آزمایشهای S300

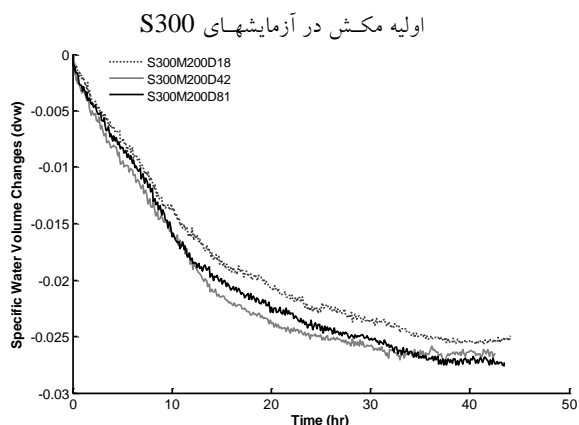


Fig. 2. Changes of specific water volume (dv_w) during initial suction equalization in S300 tests

شکل (۳) نیز تغییرات حجم ویژه ($v=1+e$) بر حسب زمان برای آزمایش‌های با مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال (S300)، در تنش میانگین خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال و تنش‌های انحرافی ۱۸، ۴۲ و ۸۱ کیلوپاسکال نشان می‌دهد.

باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل (۳)، کاهش حجم نمونه‌ها حین مرحله به تعادل رسانی اولیه مشهود است. بخشی از کاهش حجم ایجاد شده را می‌توان در نتیجه افزایش تنش خالص طی مرحله به تعادل رسانی اولیه دانست. بخش دیگر آن ناشی از تحکیم ایجاد شده در اثر افزایش مکش تا مقدار ۳۰۰ کیلوپاسکال بوده است.

شکل ۳. تغییرات حجم ویژه (dv) حین مرحله به تعادل رسانی اولیه مکش در الف- آزمایشهای S300

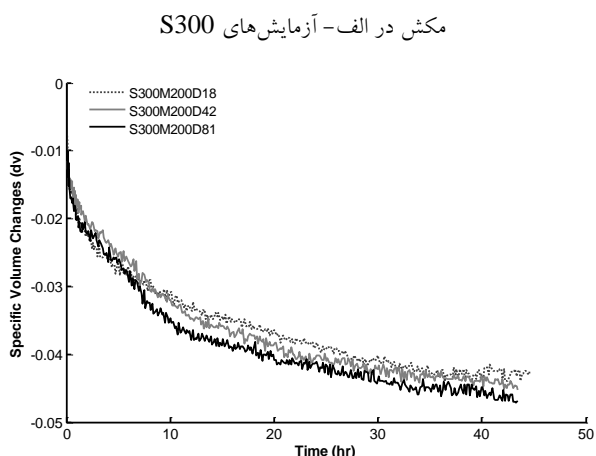


Fig. 3. Changes of specific volume (dv) during initial suction equalization in S300 tests

شکل ۱. مسیرهای تنش: الف- نمودار مکش در مقابل تنش میانگین خالص ب- نمودار تنش انحرافی در مقابل تنش میانگین خالص

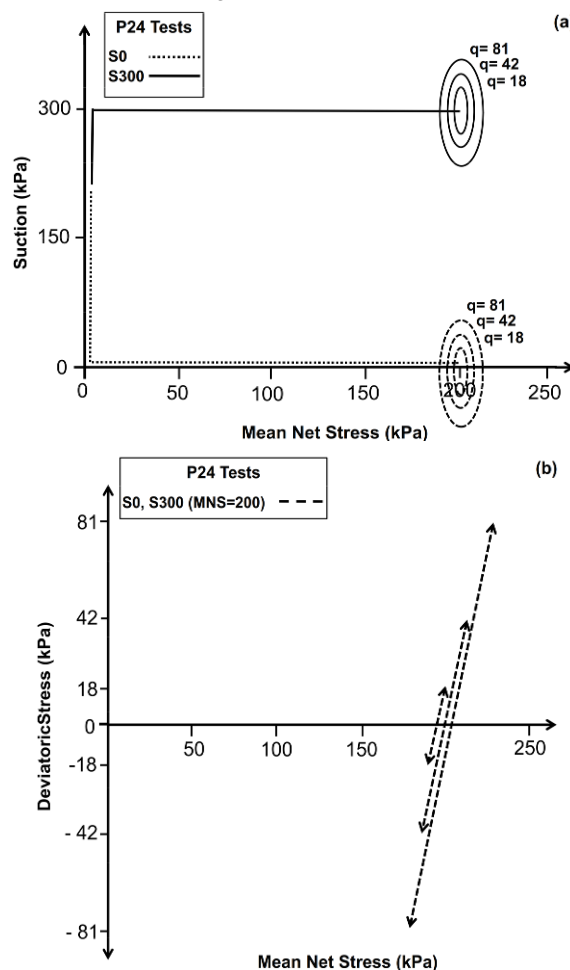


Fig. 1. Stress paths: a) suction versus mean net stress b) deviatoric stress versus mean net stress

۵- نتایج آزمایش‌ها

۵-۱- مرحله به تعادل رسانی اولیه مکش

شکل (۲) تغییرات حجم ویژه آب ($v_w=1+S_r$ ، e) که S_r درجه اشباع و e نسبت تخلخل نمونه است) در مقابل زمان، در مرحله به تعادل رسانی اولیه مکش، برای آزمایش‌های با مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال (آزمایش‌های S300) را نشان می‌دهد. نمودارهای مربوط به تغییرات مذکور در آزمایش‌های S300 نشان دهنده خارج شدن آب از نمونه‌ها در این مرحله است. این مساله نشان می‌دهد که مکش اولیه نمونه‌های ساخته شده، نسبت به مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال در تراز پائین‌تری قرار داشته است.

در شکل‌های (۶ و ۷) نیز مسیر حجم ویژه (v) در مقابل تنش میانگین خالص ($P-u_a$)، حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در سطوح مختلف تنش میانگین خالص، به ترتیب برای آزمایش‌های انجام گرفته در مکش صفر (S0) و نیز مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال (S300) ارائه شده است.

شکل ۶. حجم ویژه (v) حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در مقابل تنش میانگین خالص، در آزمایش‌های S0

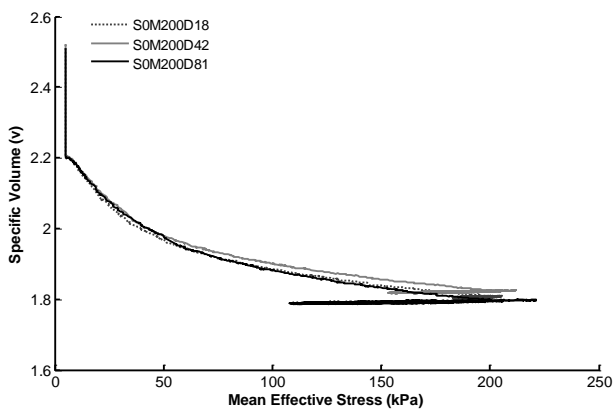


Fig. 6. Specific volume (v) path versus mean net stress during isotropic consolidation in S0 tests

شکل ۷. حجم ویژه (v) حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در مقابل تنش میانگین خالص، در آزمایش‌های S300

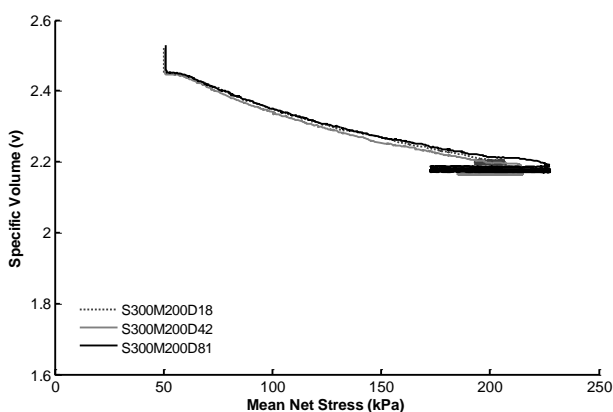


Fig. 7. Specific volume (v) path versus mean net stress during isotropic consolidation in S00 tests

مقایسه نمودارها در شکل‌های (۶ و ۷) نشان می‌دهد که کاهش حجم ویژه نمونه‌ها در آزمایش‌های S0 محسوس‌تر از آزمایش‌های S300 بوده است. این مساله به دلیل فروریزش

۲-۵- مرحله تحکیم ایزوتروپ نمونه‌ها در مکش ثابت پس از رسیدن به شرایط تعادل اولیه مکش، با اعمال تنش همه جانبه با نرخ ثابت ۴ کیلوپاسکال در ساعت، نمونه‌ها تا رسیدن به تنش میانگین خالص تعیین شده (۲۰۰ کیلوپاسکال)، در مکش ثابت به صورت ایزوتروپ تحکیم شده‌اند.

در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۴ و ۵) مسیر حجم ویژه آب (v_w) در مقابل تنش میانگین خالص ($p-u_a$)، حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در سطوح مختلف تنش میانگین خالص، به ترتیب برای آزمایش‌های انجام گرفته در مکش صفر (S0) و نیز مکش ۳۰۰ کیلوپاسکال (S300) ارائه شده است.

شکل ۴. حجم ویژه آب (v_w) حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در مقابل تنش میانگین خالص، در آزمایش‌های S0

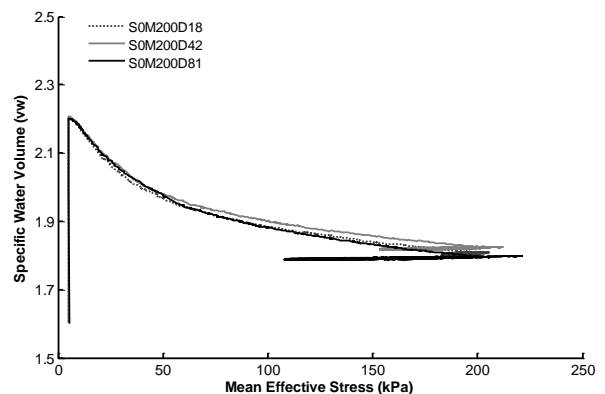


Fig. 4. Specific water volume (v_w) path versus mean net stress during isotropic consolidation in S0 tests

شکل ۵. حجم ویژه آب (v_w) حین مرحله تحکیم ایزوتروپ در مقابل تنش میانگین خالص، در آزمایش‌های S300

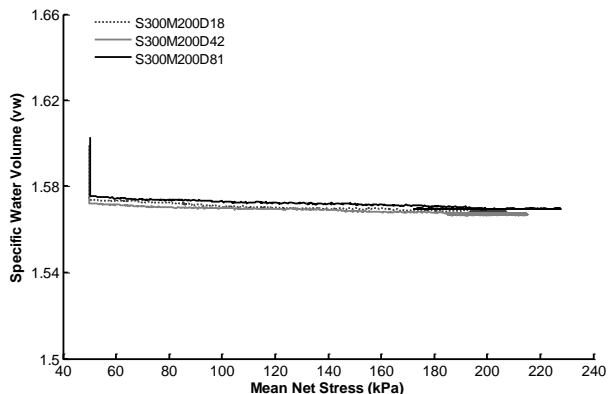


Fig. 5. Specific water volume (v_w) path versus mean net stress during isotropic consolidation in S300 tests

لازم به توضیح است که در برخی از آزمایش‌ها مسیر بارگذاری تناوبی در تعداد کمتری سیکل متوقف شده است. در آزمایش‌های *SOM200D81* و *S300M200D81* آزمایش به ترتیب در سیکل‌های ۲۵ و ۵ متوقف شده است. با توجه به تراکم نسبی پایین نمونه‌ها این گسیختگی می‌تواند ناشی از سرعت بارگذاری یا افزایش تدریجی دامنه بارگذاری‌ها باشد.

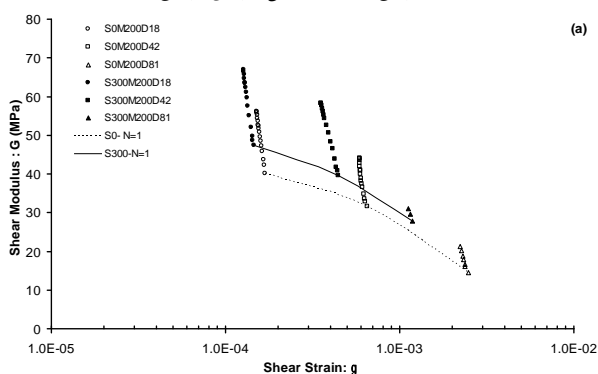
در نمودارهای ارائه شده مربوط به نتایج پارامترهای تناوبی، به دلیل تراکم داده‌های مربوط به تعداد سیکل‌ها، اعداد مربوط به سیکل‌های ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ...، ۶۰ نشان داده شده است. همچنین برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر مربوط به سیکل‌های اول بارگذاری با خط چین (برای آزمایش‌های *SO*) و خط ممتد سیاه (برای آزمایش‌های *S300*) به هم متصل شده‌اند.

تأثیر قابل توجه مکش بر پارامترهای تناوبی مورد بررسی از نتایج بدست آمده به خوبی قابل استنتاج است. به گونه‌ای که در سطح کرنش یکسان، با افزایش مکش مدول برشی (G) افزایش و مقادیر نسبت میرایی (D) کاهش یافته است. این مساله نشان می‌دهد که افزایش مکش با القاء یک چسبندگی مجازی بین ذرات نمونه‌ها به افزایش سختی آنها منجر شده است.

در هر دامنه تنش انحرافی، با افزایش تعداد سیکل، مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش نشان داده است. با رجوع به شکل‌های (۶ تا ۷) می‌توان کاهش حجم ویژه حین اعمال بارگذاری تناوبی (با افزایش تعداد سیکل) را مشاهده نمود. این کاهش حجم نیز منجر به افزایش سختی و در نتیجه افزایش مدول الاستیک و برشی و کاهش نسبت میرایی شده است.

شکل ۸ الف- مدول برشی (G) در مقابل کرنش برشی (γ)، ب-

نسبت میرایی (D) در مقابل کرنش برشی (γ)



نمونه‌ها در آزمایش‌های *SO* تحت تأثیر ورود آب و کاهش سطح مکش در مرحله به تعادل رسانی نمونه‌ها در مکش صفر است.

در ادامه مقادیر تنش‌های تسلیم بدست آمده از شکل‌های (۶ و ۷) با استفاده از روش ترسیم کاساگرانده، در جدول (۳) ارائه شده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول مذکور میانگین مقادیر تنش تسلیم برای آزمایش‌های *SO* و *S300* به ترتیب حدود ۱۴ و ۶۲ کیلوپاسکال بوده است. این مقادیر نشان می‌دهند که سطح تنش میانگین خالص در نظر گرفته شده برای انجام سیکل‌های تنش انحرافی (۲۰۰ کیلوپاسکال) بیشتر از تنش‌های تسلیم نمونه‌ها است و بنابراین می‌توان اطمینان داشت که شرایط عادی تحکیم یافته برای نمونه‌ها به درستی حاصل شده و سیکل‌های بارگذاری تنش انحرافی در شرایط عادی تحکیم یافته انجام گرفته است.

جدول ۳. موقعیت نقاط سیلان در مرحله تحکیم همسان در مکش ثابت

Test (Sample) Name	Mean Net Stress ($p-u_a$) kPa	Suction (u_a-u_w) kPa
SOM200D18	13	0
SOM200D42	14	0
SOM200D81	14	0
S300M200D18	63	300
S300M200D42	62	300
S300M200D81	62	300

Table 3. Yielding stresses location during isotropic consolidation in constant suction

۳-۵- مرحله اعمال سیکل‌های تنش انحرافی دوطرفه

پس از مرحله تحکیم همسان و رسیدن نمونه‌ها به تنش میانگین خالص (تنش موثر در مورد آزمون‌های مکش صفر) برنامه‌ریزی شده ۲۰۰ کیلوپاسکال، هر کدام از نمونه‌ها متناسب با دامنه‌ای که برای آن از قبل تعریف شده تحت بارگذاری تناوبی دوطرفه در بیشینه دامنه‌های ۱۸، ۴۲ و ۸۱ کیلوپاسکال تا ۶۰ سیکل بارگذاری با فرکانس ۰/۰۳ هر تیز قرار گرفته‌اند. از این آزمایش‌ها پارامترهای مدول برشی و نسبت میرایی بدست آمده‌اند که نتایج آن در شکل (۸) ارائه شده است.

مختلف مکش و تنش میانگین خالص ارائه نمودند. از آنجا که مسیرهای تنش طی شده در این پژوهش (آزمایش‌های P24) با مسیرهای تنش در بخشی از پژوهش مذکور (آزمایش‌های P12) یکسان بوده است، در ادامه مقایسه‌ای روی نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش معجزی و همکاران [17] در شرایط یکسان مسیر تنش و مصالح با شاخص‌های خمیری متفاوت (۱۲ و ۲۴) انجام گرفته است.

روند کلی مشاهده شده از نتایج آزمایش‌های P12 و P24 مانند هم است. به گونه‌ای که در سطح کرنش یکسان، با افزایش مکش، مدول برشی G افزایش و مقادیر نسبت میرایی D کاهش یافته است. همچنین در هر دامنه تنش انحرافی، با افزایش تعداد سیکل، G افزایش و D کاهش یافته است.

به منظور بررسی بهتر تاثیر شاخص خمیری بر پارامترهای تناوبی مصالح مورد آزمایش، مقادیر مربوط به پارامترهای مدول برشی G و نسبت میرایی D در سیکلهای اول آزمایش‌های S0 و S300 بصورت جداگانه، برای آزمایش‌های P12 و P24 در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) ارائه شده است.

مقایسه نمودارها در دو گروه آزمایش P12 و P24 در شرایط یکسان نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر مدول برشی در نمونه‌های P24 در تراز پائین‌تری نسبت به نمونه‌های P12 قرار گرفته است. این کاهش در آزمایش‌های S0 و S300 به ترتیب بطور متوسط حدود ۲۵ و ۱۸ درصد بوده است. این مساله نشان دهنده سختی بیشتر نمونه‌های با شاخص خمیری ۱۲ نسبت به نمونه‌های با شاخص خمیری ۲۴ است. همچنین شروع ناحیه غیرخطی در نمودارهای مربوط به نمونه‌های P24 به خوبی قابل تشخیص است. به نظر می‌رسد در نمودارهای P12 این شروع در کرنش‌های پائین‌تری اتفاق خواهد افتاد. در واقع می‌توان گفت با افزایش شاخص خمیری سختی برشی بیشتر شده است.

در خصوص پارامتر نسبت میرایی، مقایسه نمودارهای تغییرات این پارامتر در آزمایش‌های P12 و P24، روند تغییرات را تقریباً هماهنگ و همسو نشان می‌دهد. همچنین در شرایط یکسان با افزایش شاخص خمیری، نسبت میرایی کاهش یافته است.

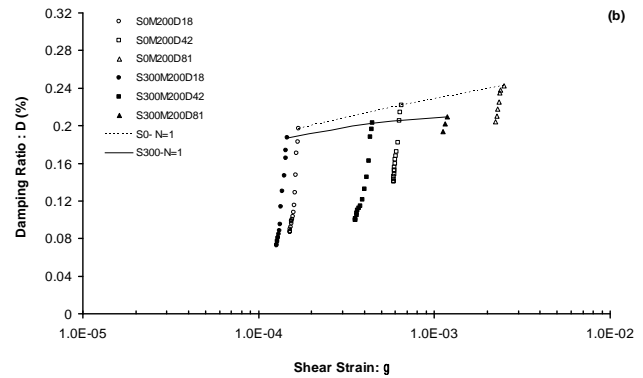


Fig. 8. a) shear modulus (G) versus shear strain (\square), b) damping ratio (D) versus shear strain (\square)

شکل ۹. پارامترهای تناوبی حاصل از آزمایش‌های تناوبی روی نمونه‌های کائولن P12 در سطح تنش میانگین خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال: الف- مدول برشی (G) در مقابل کرنش برشی (γ)، ب- نسبت میرایی (D) در مقابل کرنش برشی (γ) [۱۷]

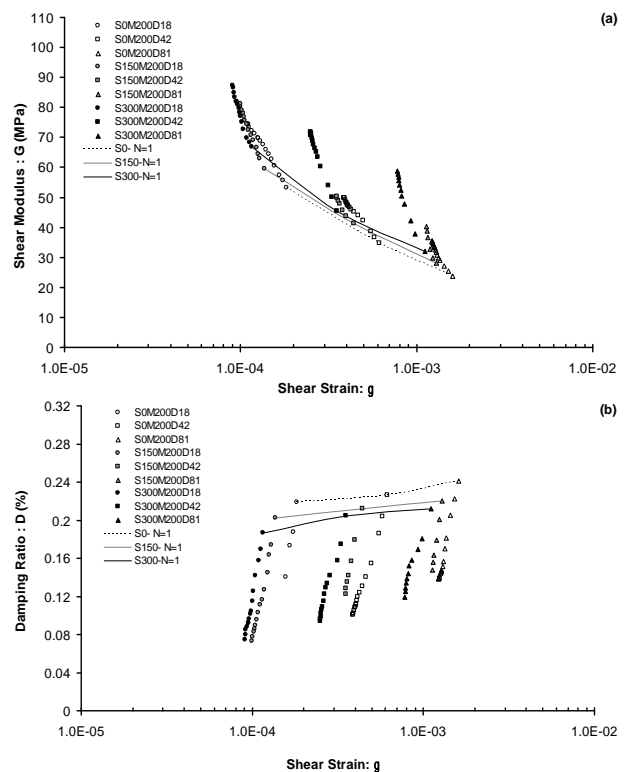


Fig. 9. Cyclic parameters resulted from cyclic tests on P12 materials in mean net stress of 200 kPa: a) shear modulus (G) versus shear strain (\square), b) damping ratio (D) versus shear strain (\square) [17]

معجزی و همکاران [17] نتایج پژوهش جامعتری را در خصوص پارامترهای دینامیکی غیراشباع یک نوع خاک ریزدانه با شاخص خمیری ۱۲ (کائولن زنونز با شاخص خمیری ۱۲) در شرایط

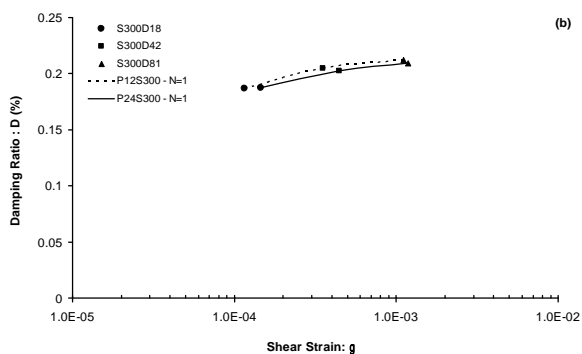


Fig. 11. a) Shear modulus (G) versus shear strain (\square), **b)** damping ratio (D) versus shear strain (\square) (in first cycle of S300 Tests on P12 & P24 materials)

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر مکش بر روی پارامترهای مدول الاستیک، مدول برشی و نسبت میرایی برنامه ریزی و انجام گرفته است.

در این راستا چند سری آزمایش سه محوری تناوبی با مکش کنترل شده روی نمونه‌های با شرایط اولیه یکسان از یک نوع مصالح ریزدانه رسی استاندارد به نام کائولین زنوز P24 (کائولینیت، با طبقه بندی CH و شاخص خمیری ۲۴ درصد)، برنامه ریزی و انجام شده است.

نمونه‌های آزمایش شده به روش دینامیکی زیر تراکم به گونه‌ای بازسازی شده‌اند که در شرایط پس از تراکم در حالت عادی تحکیم یافته قرار گرفته‌اند.

آزمایش‌ها و مسیرهای تنش در آنها به صورتی برنامه ریزی شده که در دو سطح مکش و یک سطح تنش میانگین خالص و سه دامنه تنش انحرافی تناوبی انجام گرفته است.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در سطح کرنش یکسان، با افزایش مکش پارامتر مدول برشی (G) افزایش و مقادیر نسبت میرایی (D) کاهش یافته است. همچنین در هر دامنه تنش انحرافی، با افزایش تعداد سیکل، مدول برشی افزایش و نسبت میرایی کاهش یافته است.

مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش (آزمایش روی نمونه‌های کائولن زنوز با شاخص خمیری ۲۴) با نتایج پژوهش معجزی و همکاران [17] (آزمایش روی نمونه‌های کائولن زنوز با شاخص

پارامترهای تناوبی رس با حد خمیری بالا در شرایط عادی ... مقادیر نسبت میرایی در آزمایش‌های S0 و S300 به ترتیب بطور متوسط حدود ۴ و ۲ درصد بوده است.

شکل ۱۰. الف- مدول برشی (G) در مقابل کرنش برشی (γ)، ب- نسبت میرایی (D) در مقابل کرنش برشی (γ) (در سیکل‌های اول آزمایش‌های S۰ روی نمونه‌های P۱۲ و P۲۴)

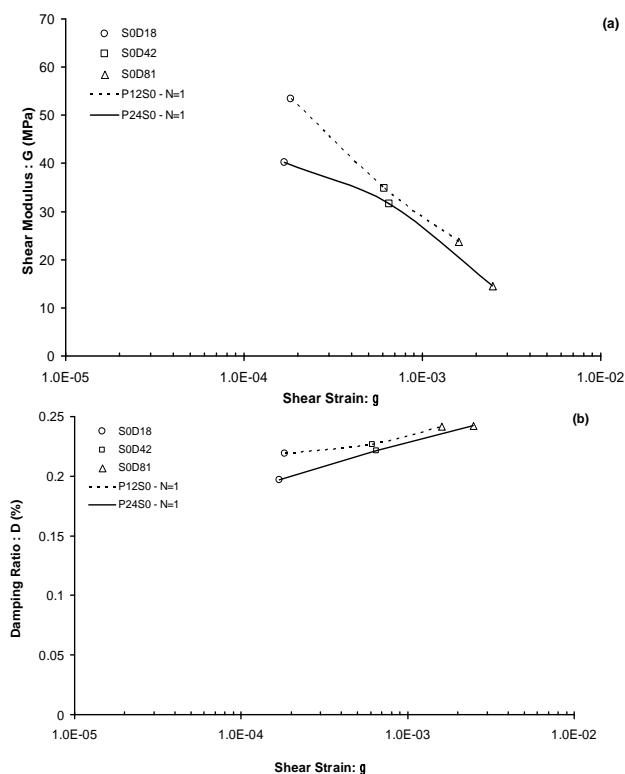
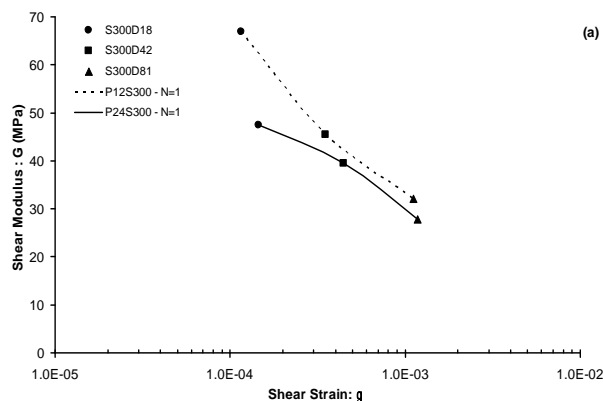


Fig. 10. a) Shear modulus (G) versus shear strain (\square), **b)** damping ratio (D) versus shear strain (\square) (in first cycle of S0 Tests on P12 & P24 materials)

شکل ۱۱. الف- مدول برشی (G) در مقابل کرنش برشی (γ)، ب- نسبت میرایی (D) در مقابل کرنش برشی (γ) (در سیکل‌های اول آزمایش‌های S۳۰۰ روی نمونه‌های P۱۲ و P۲۴)



[8] Vassallo R., Mancuso C. & Vinale F. 2007 Modelling the influence of stress-strain history on the initial shear stiffness of an unsaturated compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, **44**, 463-472.

[9] Biglari M., Mancuso C., d'Onofrio A. Jafari M. K. & Shafiee A. 2011 Modelling the initial shear stiffness of unsaturated soils as a function of the coupled effects of the void ratio and the degree of saturation. *Computers and Geotechnics*, Elsevier, **38**, 709-720.

[10] Leong E. C., Cahyadi J. & Rahardjo H. 2006 Stiffness of a compacted residual soil. *Proceedings of Unsaturated Soils 2006*, 1169-1180.

[11] Sawangsuriya A., Edil T.B. & Bosscher P.J. 2009 Modulus-suction-moisture relationship for compacted soils in postcompaction state. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(10), 1390-403.

[12] Khosravi A. & McCartney J.S. 2012 Impact of hydraulic hysteresis on the small strain shear modulus of low plasticity soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(11), 1326-1333.

[13] Wong K.S., Masin D. & Ng C.W.W. 2014 Modelling of shear stiffness of unsaturated fine grained soils at very small strains, *Computers and Geotechnics*, **56**, 28-39.

[14] Biglari M. 2011 Determination of shear modulus and damping ratio in cyclic loading and suction controlled condition, PhD Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, (In Persian).

[15] Biglari M., Jafari M. K., Shafiee A., Mancuso C. & d'Onofrio A. 2011 Dynamic properties of unsaturated kaolin measured in a wide strain range with new suction controlled cyclic triaxial device. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, AIP ID: 001105GTJ.

[16] Ladd R.S. 1978 Preparing testing specimens using under- compaction. *Geotechnical Testing Journal*, **1**, 16-23.

[17] Mojezi M., Biglari M., Jafari M.K. & Ashayeri I. 2017 Evaluating and Modeling the Effects of Suction and Mean Net Stress on Shear Modulus and Damping Ratio of Unsaturated Normally Consolidated Kaolin. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Taylor & Francis, (Under Review).

خمیری (۱۲) در شرایط یکسان مسیر تنش و بارگذاری تناوبی نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر مدول برشی در نمونه های P24 در تراز پائین‌تری نسبت به نمونه‌های P12 قرار گرفته که نشان دهنده سختی بیشتر نمونه‌های با شاخص خمیری ۱۲ است. از طرف دیگر روند تغییرات نسبت میرایی در هر دو گروه تقریباً هماهنگ و همسو بوده و در شرایط یکسان، با افزایش شاخص خمیری، نسبت میرایی کاهش یافته است.

References

۸- مراجع

[1] Marinho E. A. M., Chandler R. J. & Crilly M. S. 1995 Stiffness measurements on a high plasticity clay using bender elements. In *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 95, Paris, France, A.A. Balkema, Rotterdam*, **1**, 535- 539.

[2] Mancuso C., Vassallo R. & d'Onofrio A. 2000 Soil behaviour in suction controlled cyclic and dynamic torsional shear tests. In *Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore*, **1**, 539-544.

[3] Vassallo R., Mancuso C. & Vinale F. 2007 Effects of net stress and suction history on the small-strain stiffness of a compacted clayey silt. *Canadian Geotechnical Journal*, **44**, 447-462.

[4] Ng C.W.W. & Yung S.Y. 2008 Determination of the anisotropic shear stiffness of an unsaturated decomposed soil. *Géotechnique*, **58**(1), 23-35.

[5] Ng C.W.W., Xu J. & Yung S.Y. 2009 Effects of wetting-drying and stress ratio on anisotropic stiffness of an unsaturated soil at very small strains. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**, 1062-1076.

[6] Biglari M., d'Onofrio A., Mancuso C., Jafari M. K. & Shafiee A. 2012 Small-strain stiffness of Zenoz kaolin in unsaturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(3), 311-322.

[7] Walton-Macaulay C., Bryson S., Hippley B.T. & Hardin B.O. 2015 Uniqueness of a constitutive shear modulus surface for unsaturated soils. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, ISSN 1532-3641/06015002(6).

Cyclic Parameters of High Plasticity Clay in Normally Consolidated Unsaturated Condition

Mohsen Mojezi^{1*}, Mahnoosh Biglari², Mohmmad Kazem Jafari³

1. Ph.D., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, Tel: +9821-22830830

m.mojezi@iiees.ac.ir

2. Assistant Professor, Razi University, Kermanshah, Iran, m.biglari@razi.ac.ir

3. Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, jafari@iiees.ac.ir

m.mojezi@iiees.ac.ir

ABSTRACT

Study of the seismic response of a site, requires accurate estimation of the Shear modulus (G) and damping ratio (D) of underground layers in that area. According to the unsaturated condition of an extensive part of the earth surface, it is necessary to perform unsaturated tests to determine dynamic or cyclic parameters of these regions. On the other hand, because of inherent complications of unsaturated testing equipment, this field of experience has had less attention. But in recent years by the development of advanced experimental equipments some studies have been developed based on the dynamic parameters of unsaturated soils.

A large amount of the researches related to cyclic and dynamic parameters of unsaturated soils are the studies about determination of these parameters in very small strain levels (initial shear modulus and initial damping ratio) and the effects of some factors such as suction, mean net stress, suction history, anisotropy and pre-consolidation on them, using bender element technique and resonant column torsional shear apparatus. However, experimental studies have paid less attention to medium to large strain magnitudes, the determination of G (shear modulus) and D (damping ratio) parameters, and also the normalized shear modulus reduction and damping ratio curves for unsaturated soils.

In this research, it is tried to determine the shear modulus and damping ratio parameters in medium to large strain levels using suction controlled cyclic triaxial apparatus. Also, it is aimed to study the effect of changes in matric suction and mean net stress on these parameters in a kind of unsaturated clay with plasticity index of 24, under high loading rates. In this regard, some tests are performed on different paths including two suction levels (zero and 300 KPa), in mean net stress level of 200 KPa, and three deviatoric cyclic stress ranges (18, 42 and 81 KPa) up to 60 loading cycles. Also a comparison is carried out between the results obtained from the current research and the results of the researches performed in the same paths on a fine grained soil with plasticity index of 12, using the same equipment.

The results of this research show that increase in suction level results in an increase in shear modulus and a decrease in damping ratio. In addition, in the same strain level, by increasing the number of loading cycles, the shear modulus values are increased and the damping ratio values are decreased.

Comparing the results of current research (unsaturated cyclic tests on unsaturated normally consolidated fat clay with plasticity index of 24) with the results of another experimental research in the field of unsaturated cyclic tests on unsaturated normally consolidated lean clay with plasticity index of 12, with the same sample preparation process and the same stress paths, it is indicated that the changes of the shear modulus values of the high plasticity samples are in the lower level related to the values of the samples with plasticity index of 12. In other words, the increase in plasticity index considerably decreases the stiffness of the samples. However, a change in damping ratio values shows relatively the same trend in both groups of the samples.

KeyWords: High plasticity clay, Shear modulus, Damping ratio, Unsaturated, Normally consolidated