مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۳، ص. ۶۱-۶۶

بررسی خطوط حالت در مخلوط ماسه و سیلت به‌کمک آزمایش‌های سه‌محوری تناوبی

عباس قلندرزاده (دانشیار)
علیرضا احمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تهران
عبدالجواد احمدی (دانشجوی کارشناسی)
دانشکده‌ی عمران، دانشگاه گیلان

روان‌گرایی خاک‌های ماسه‌یی اشباع در حین زلزله، پدیده‌ی شناخته‌شده‌یی است که توجه بسیاری از محققین را در سه دهه‌ی اخیر به خود جلب کرده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده بر روان‌گراییِ خاک‌های اشباع ماسه‌یی متمرکز بوده است در حالی که خاک‌های طبیعی به‌ندرت متشکل از ماسه‌های تمیز هستند، و به همین دلیل است که مطالعه خاک‌های مخلوط با رس یا سیلت خمیری و غیرخمیری اهمیت پیدا کرده است. علی‌رغم مطالعات بسیار زیاد بر روی این نوع خاک‌ها هنوز ابعاد مختلفی از رفتار این خاک‌ها ناشناخته مانده است. در این مطالعه اثر تحکیم ناهمسان و بازگشت تنش برشی بر رفتار خاک‌های ماسه‌یِ مخلوط با درصدهای مختلف سیلتِ غیرخمیری بررسی شده است. از نتایج حاصل از مجموع ۶۷ آزمایش سه‌محوری تناوبی که انجام شده چنین برمی‌آید که زاویه‌ی خط تغییر فاز اولیه (IPTL)[1] در فضای $q - p'$ شدیداً متأثر از درجه‌ی بازگشت تنش است. همچنین درصد ریزدانه‌ی مخلوط با خاک و تحکیم همسان یا ناهمسان خاک به‌وضوح بر خط تغییر فاز اولیه در فضای $q - p'$ تأثیر دارد.

واژگان کلیدی: خط حالت، مخلوط ماسه و سیلت، سه‌محوری تناوبی.

aghaland@ut.ac.ir
alireza.ahmady61@gmail.com
jjjavad.ahmady@gmail.com

مقدمه

پدیده‌ی روان‌گرایی برای اولین‌بار در سال ۱۹۲۵ در ادبیات فنی معرفی شد. از آن سال به بعد محققین بسیاری به بررسی روش‌هایی برای تخمین این پدیده در خاک‌ها پرداختند. اولین مطالعه در سال ۱۹۳۶، با تعریف خط تخلخل بحرانی (CVL) که به‌کمک چندین آزمایش برش مستقیم در فضای نسبت تخلخل ـ جابه‌جایی نسبی و نسبت تخلخل ـتنش قائم تعریف شده بود، انجام شد.[1] به‌تدریج و با پیشرفت بیشتر تحقیقات، تعاریف امروزی برای خطوط حالت به دست آمد. سه خط حالت اصلی که از آن‌ها برای سنجش پتانسیل روان‌گرایی یا تشخیص انواع حالات روان‌گرایی ـ نظیر جابه‌جایی دوره‌یی و روان‌گرایی تناوبی ـ استفاده می‌شود عبارت است از: خط حالت پایدار (SSL)[2]، خط تغییر حالت (PTL)[3] و خط تغییر حالت اولیه (IPTL).

خطوط حالت چنان که از نام آن‌ها پیداست برای مجزاکردن نواحی مختلف رفتاری کاربرد دارند. محاسبه‌ی دقیق خطوط حالت معمولاً با انجام آزمایش‌های یک‌سویه مقدور است، اما با توجه به اثباتِ هم‌زمانیِ تغییر رفتار در آزمایش‌های تناوبی و یک‌سویه، و نیز قابل استفاده بودن این خطوط برای آزمایش‌های تناوبی، می‌توان با دقت نسبتاً مناسبی به‌کمک آزمایش‌های تناوبی این خطوط را تخمین زد.[2]

خط تغییر حالت اولیه یا IPTL خطی است که از بیشترین تنش تفاضلی مقاومِ نمونه‌هایی که در تنش‌های همه‌جانبه‌ی متفاوت آزمایش شده‌اند به دست می‌آید، به‌گونه‌یی که نمودار مسیر تنش برای یک نمونه تا قبل از آن روند صعودی داشته و با عبور از این خط روندی نزولی خواهد داشت. خط PTL نیز خطی است که با رسیدن نمودارهای مسیر تنش به آن تغییر رفتار رخ می‌دهد، ولی این‌بار تغییرات در فشار آب حفره‌یی است به‌گونه‌یی که تا قبل از رسیدن نمودارهای مسیر تنش به آن، فشار آب حفره‌یی کاهش یافته و با عبور از آن فشار آب حفره‌یی افزایش خواهد یافت. البته این تغییر رفتار تنها در نمونه‌هایی با تراکم نسبی بالا یا در تنش‌های همه‌جانبه‌ی پایین رخ می‌دهد. خط حالت پایدار یا SSL نیز که مهم‌ترین خط حالت موجود است و در خاک‌هایی با چسبندگی پایین مانند ماسه‌ی خالص یا مخلوط ماسه و سیلت، درحقیقت همان خط CSL آزمایش‌های زهکشی‌شده است،[3] خطی است که نقاط تسلیم نمودارهای مسیر تنش بر روی آن قرار دارند و حتی نمودار مسیر تنش نمونه‌هایی با رفتار اتساعی بعد از عبور از خط PTL در امتداد آن است. خط CSL نیز خطی است که از آزمایش‌های کنترل تنش و در شرایط

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۴/۱۶، داوری ۱۳۸۸/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۷/۱۹.

زهکشی‌شده به دست می‌آید و زمانی که مسیر تنش یک نمونه‌ی خاک روی آن می‌افتد خاک در تنش ثابت تغییر شکل می‌دهد.

یکی از مباحثی که محققینِ پیشین همچون چانگ[4] (۱۹۸۹)، کنارد[5] (۱۹۹۰)، و وید[6] (۱۹۹۰) در تحقیقات خود به آن پرداخته‌اند عبارت است از: بررسی وابستگی یا عدم وابستگی خطوط حالت، نسبت به مسیر تنش و شرایط اعمالیِ اولیه.

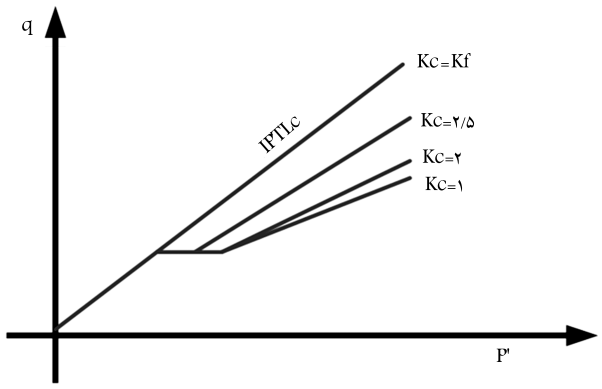
خطوط SSL و PTL به‌ازای درصد سیلت‌های متفاوت یا در نسبت تنش‌های تحکیمیِ مختلف، خطوطی یکه برای ماسه‌ی خالص به حساب می‌آیند ولی خط IPTL به‌ازای نسبت تنش‌های تحکیمی متفاوت یکه نیست و با افزایش آن شیب‌اش افزایش می‌یابد.[4] نکته‌ی قابل ذکر آن است که در ادبیات فنی در این زمینه، از آزمایش‌هایی که به‌صورت کششی تحکیم یافته‌اند کم‌تر بحث شده، و مشخص نیست که در این آزمایش‌ها نیز این خطوط یکه‌اند یا خیر، و اگر یکه نیستند روند تغییرات آن با نسبت تنش تحکیمی چگونه است. شکل ۱ تأثیر نسبت فشار تحکیمی را بر خطوط IPTL در آزمایش‌های فشاری نشان می‌دهد. یادآور می‌شود تعریف نسبت تنش تحکیمی در این تحقیق به‌صورت $K_c = \sigma'_3/\sigma'_1$ است، ولی در این شکل به‌صورت $K_c = \sigma'_1/\sigma'_3$ تعریف شده است.

مطابق نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی، سیلت حتی در درصدهای کم بر خصوصیات و نحوه‌ی رفتار ماسه تأثیر داشته است،[5] و لذا این سؤال مطرح است که آیا با وجود سیلت نیز خطوط SSL و PTL یکه‌اند؟ به‌عبارت دیگر آیا خط IPTL با تغییر نسبت فشار تحکیمی از خود روندی را نشان می‌دهد که در ماسه‌ی خالص نشان می‌دهد.

مشخصات فیزیکی نمونه‌ها

خاک مورد آزمایش، ماسه و سیلت ۱۶۱ فیروزکوه است. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده ارائه شده است. از داده‌های جدول ۱ پیداست که دانه‌بندی خاک ماسه‌یِ مورد مطالعه یکنواخت است، درصد ریزدانه‌ی آن (عبوری از الک نمره ۲۰۰) کم‌تر از ۵ درصد است و نشانه‌ی خمیری آن (PI) نیز از ۵ درصد کم‌تر است و بنابراین می‌توان آن را به‌عنوان خاک غیرخمیری نیز معرفی کرد.

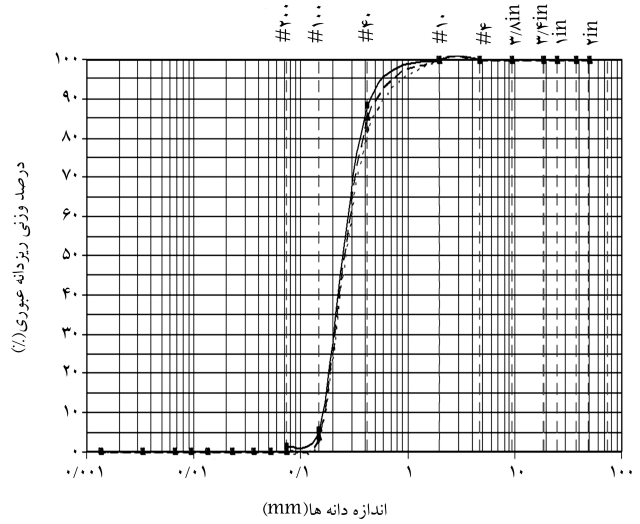
در شکل ۳ نیز نمودارهای e_{max} و e_{min} در درصد سیلت‌های مختلف آورده شده است. نحوه‌ی محاسبه‌ی مقادیر نسبت تخلخل بیشینه و کمینه، به‌ترتیب مطابق استاندارد ASTM۴۲۵۳-۰۰ و ASTM۴۲۵۴-۰۰ است.



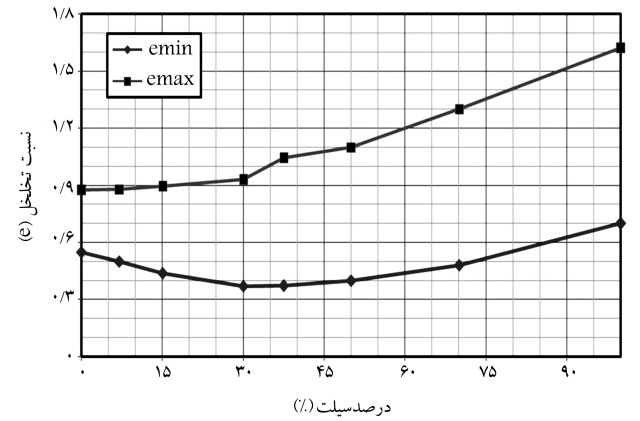
شکل ۱. یکتا نبودن خطوط IPTLc به‌ازای نسبت فشار تحکیمی متفاوت.[4]

نحوه‌ی نمونه‌سازی

نمونه‌سازی این آزمایش‌ها به‌صورت ریزش از قیف همراه با ضربه (TFD)[7] است و نحوه‌ی انجام آن و نیز مقایسه‌اش با سایر روش‌های نمونه‌سازی توسط یامامورا[8] شرح داده شده است.[6] در این روش ماسه از درون قیفی که انتهای آن مماس بر کف قالبِ نمونه است ریخته می‌شود و در انتها چند ضربه‌ی کوچک به نمونه وارد می‌شود تا تراکم نسبی (Dr) بالاتری حاصل شود. این روشِ نمونه‌سازی با وجود سادگی دقت بالایی دارد و در ارتفاعِ نمونه تراکم یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند. برای سهولت در اشباع‌کردن نمونه‌ها، طبق بند ۲-۱-۳-۹ از (D۵۳۱۱-۹۶) ASTM از گاز Co_2 استفاده شده است، به‌گونه‌یی که با عبور آن از درون نمونه این گاز جایگزین هوای موجود در خاک می‌شود که بسیار دیرتر از Co_2در آب حل می‌شود. بدین‌ترتیب تمامی آزمایش‌ها دارای عدد اسکمپتون ۰/۹۵ یا بیشتر بودند.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.



شکل ۳. منحنی نسبت تخلخل بیشینه وکمینه در درصد سیلت‌های مختلف.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

ماسه‌ی	Gs	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	٪FC	Cu	Cc
فیروزکوه	۲/۶۵	۰/۸۷۴	۰/۵۴۸	۰/۲۷	۱	۱/۸۷	۰/۸۸

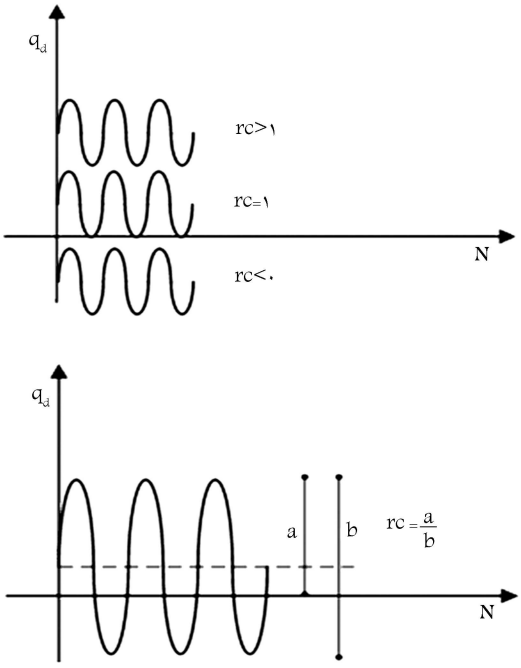
پارامترهای معرف تحکیم ناهمسان

برای مشخص‌کردن تحکیم ناهمسان در ادبیات فنی عموماً از پارامتر نسبت فشار تحکیمی (K) استفاده شده است. این پارامتر اگرچه یک پارامتر کلیدی است، به‌تنهایی نمی‌تواند تمام شرایط ناهمسان خاک را پوشش دهد. برای مثال، اثر چرخش یا بازگشت تنش‌های اصلی[9] در این پارامتر دیده نشده است که دلیل آن در نظر نگرفتن مرحله بارگذاری است. برای رفع این مشکل پارامتر جدیدی به‌نام ضریب بازگشت (rc)[10] که معرف نسبت تنش بازگشتی است برای تعریف تحکیم ناهمسان در نظر گرفته شد. ارتباط این پارامتر با K و $CSR(=\Delta\sigma_1/2p')$ در رابطه‌ی ۱ آمده است.[۷و۸]

چنان که از این معادله پیداست این پارامتر هم به نسبت فشار تحکیمی وابسته است و هم به بار وارده، و از همین‌رو در مقایسه با نسبت تنش تحکیمی به‌تنهایی پارامتر کامل‌تری است. در شکل ۴ تعریف پارامتر rc ارائه شده است؛ چنان که از شکل پیداست rc برابر است با نسبت قسمت‌فشاری نمودار تنش انحرافی اعمالی به کل دامنه‌ی رفت‌وبرگشتی آن.

$$rc = \frac{2CSR \times (1+2k) + 3(1-k)}{4CSR \times (1+2k)} \qquad (1)$$

با توجه به تعریف بالا مقادیر rc و K برای آزمایش‌های کششی و فشاری مطابق جدول ۲ است.



شکل ۴. تعریف پارامتر rc.

جدول ۲. مقادیر rc و k برای انواع مختلف تحکیم.

انواع تحکیم	rc	K
تحکیم همسان	۰/۵	۱
تحکیم ناهمسان کششی	بزرگ‌تر از ۰/۵	کوچک‌تر از ۱
تحکیم ناهمسان فشاری	کوچک‌تر از ۰/۵	بزرگ‌تر از ۱

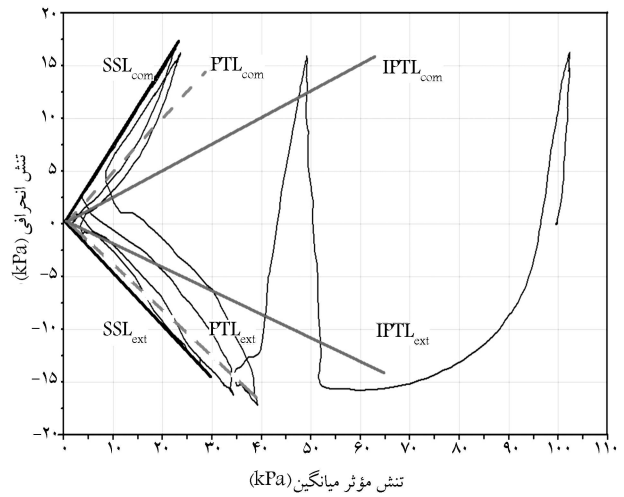
تخمین خطوط حالت پایدار فشاری وکششی برای ماسه خالص

آزمایش‌های انجام‌شده در ماسه‌ی خالص در تراکم نسبی بالا و در تنش تحکیمی نسبتاً پایین (۱۰۰kPa) انجام شده است و درنتیجه آن نمونه‌ها رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهند. به‌همین دلیل تمامی خطوط حالت معرفی‌شده در بالا، در نمودارهای به دست آمده از مسیر تنش آن‌ها قابل مشاهده است. در شکل ۵ نحوه‌ی تعریف خطوط حالت در ماسه‌ی خالص نشان داده شده است. از آنجا که خطوط SSL هریک به‌تنهایی در کشش و در فشار یکه‌اند، یعنی به شرایط اولیه یا مسیر تنش بستگی ندارند، باید برای تنش‌های برشی اولیه‌ی متفاوت نیز یکه باشند و زاویه‌ی آن‌ها با افق در فضای مسیر تنش نیز در محدوده‌ی ثابتی قرار داشته باشد. زوایای به دست آمده برای خطوط SSL_{ext} و SSL_{com} در فضای مسیر تنش درمورد آزمایش‌های کششی و فشاری ($\alpha_{ssl,e}, \alpha_{ssl,c}$) برای نسبت تنش بازگشتی‌های متفاوت در جدول ۳ آمده است. چنان که از اعداد جدول پیداست مقدار $\alpha_{ssl,e}$ و $\alpha_{ssl,c}$ برای rcهای مختلف تقریباً یکسان است؛ این مقدار برای $\alpha_{ssl,c}$ در حدود ۳۸/۵ درجه و برای $\alpha_{ssl,e}$ در حدود ۲۶ درجه است.

با توجه به اعداد به دست آمده و از آنجا که هر عدد در جدول ۳ میانگینی از چندین آزمایش است، این زوایا با دقت نسبتاً خوبی تخمین زده شده‌اند. بزرگ‌تر بودن $\alpha_{ssl,c}$ نسبت به $\alpha_{ssl,e}$ نشان‌دهنده‌ی تمایل بیشتر ماسه به تغییر شکل در کشش است. به‌همین دلیل درصورت اعمال تنش‌های دوره‌یی در حالت همسان، کرنش‌های دوره‌یی به‌صورت ناهمسان بوده و ناحیه‌ی کششی آن از ناحیه‌ی فشاری بیشتر است.[۹]

جدول ۳. زوایای خطوط SSL_{ext} و SSL_{com} در نسبت بازگشت تنش‌های متفاوت.

ماسه‌ی خالص	rc=۰	rc=۰/۲۵	rc=۰/۵	rc=۰/۷۵	rc=۱
$\alpha_{ssl,c}$	ندارد	۴۰/۱	۳۹/۹۸	۳۷/۰۶	۳۸/۸
$\alpha_{ssl,e}$	۲۴/۵	۲۶/۱	۲۶/۲۶	۲۸/۲۴	ندارد



شکل ۵. تعریف خطوط حالت در آزمایش تناوبی همسان انجام‌شده برای ماسه‌ی خالص.

تخمین خطوط تغییر فاز فشاری و کششی برای ماسه‌ی خالص

خطوط تغییر فاز فشاری و کششی (PTL_{ext} و PTL_{com}) در ادبیات فنی به نقاطی گفته می‌شود که روند تغییر فشار آب حفره‌یی از این نقطه تغییر می‌کند، به‌گونه‌یی که روند تغییرات فشار حفره‌یی تا قبل از آن منفی و بعد از آن مثبت است و خاک رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد. در جدول ۴ زوایای این خطوط در نمودارهای مسیر تنش برای نسبت بازگشت تنش‌های متفاوت آمده است.

چنان که گفته شد هرکدام از اعداد این جدول در حقیقت معدلی از چندین آزمایش است و با توجه به اعداد به دست آمده می‌توان گفت خطوط تغییر فاز در حالت کششی و فشاری همانند خطوط حالت پایدار یکه‌اند. براین اساس $\alpha_{PTL,c}$ و $\alpha_{PTL,e}$ در این تحقیق به‌ترتیب حدوداً برابر با ۳۳ و ۲۴ درجه است.

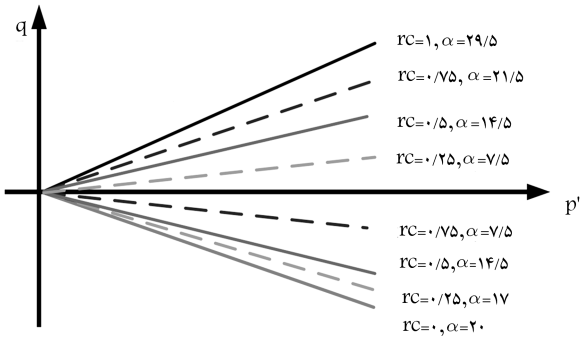
تخمین خطوط تغییر فاز اولیه‌ی فشاری و کششی برای ماسه‌ی خالص

خطوط تغییر فاز اولیه به خطوطی گفته می‌شود که از نقطه‌ی بیشینه‌ی منحنی‌های مسیر تنش می‌گذرد و با عبور نمودار مسیر تنش از این خط مقاومت برشی خاک شروع به کاهش می‌کند. چنان که در ادبیات فنی آورده شده این خطوط یکه نیستند و برای نسبت تنش‌های تحکیمی مختلف (K) متفاوت‌اند. در ادبیات فنی اطلاعات موجود درباره‌ی آزمایش‌های کششی بسیار کم‌تر از آزمایش‌های فشاری است. برای مثال مشخص نیست که خطوط تغییر فاز اولیه در آزمایش‌های کششی به چه صورت‌اند، یکه‌اند یا نه، و تأثیر تحکیم ناهمسان بر روی آن‌ها چیست.

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در ماسه‌ی خالص، براساس نتایج موجود در ادبیات فنی،[۴] شیب خطوط $IPTL_{com}$ براثر افزایش تحکیم ناهمسان فشاری افزایش می‌یابد، همچنین در آزمایش‌های ناهمسان کششی براثر افزایش تحکیم ناهمسان کششی شیب این خطوط کاهش می‌یابد (شکل ۶). چنان که در شکل مشاهده می‌شود خط $IPTL_{ext}$ نیز یکه نیست و در آزمایش‌های ناهمسان کششی، براثر افزایش تحکیم شیب آن افزوده می‌شود؛ به‌عکس در آزمایش‌های ناهمسان فشاری براثر افزایش تحکیم فشاری شیب آن کاهش می‌یابد.

جدول ۴. زوایای خطوط PTL_{ext} و PTL_{com} در نسبت بازگشت تنش‌های متفاوت.

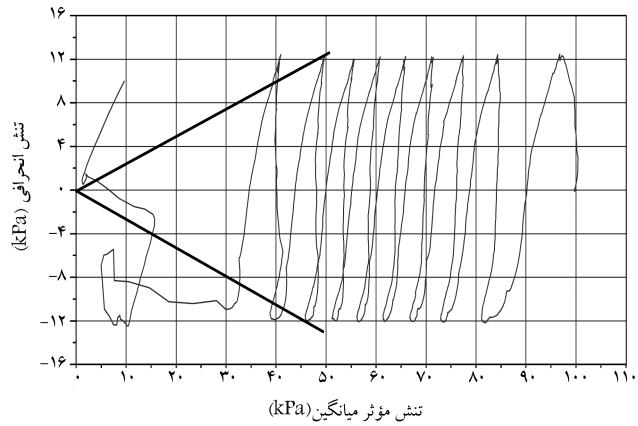
ماسه‌ی خالص	rc=۰	rc=۰/۲۵	rc=۰/۵	rc=۰/۷۵	rc=۱
$\alpha_{PTL,c}$	ندارد	۳۱/۷	۳۴/۱	۳۲/۸	۳۴/۲
$\alpha_{PTL,e}$	۲۴/۵	۲۳	۲۳/۶	۲۴	ندارد



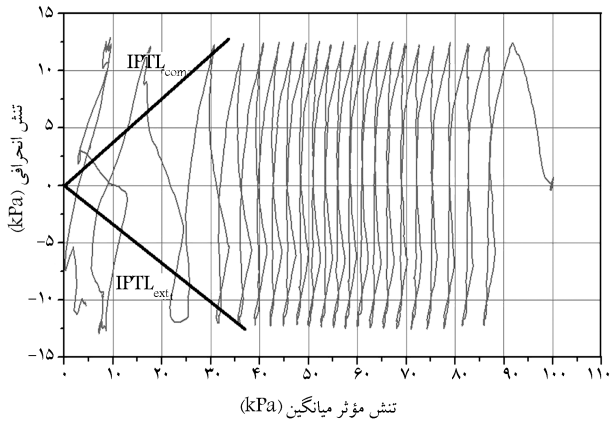
شکل ۶. شیب خطوط IPTL برای rcهای متفاوت در نمودارهای مسیر تنش.

تخمین خطوط حالت در مخلوط ماسه و سیلت

نمونه‌های حاوی سیلت به‌دلیل قابلیت تراکم‌پذیری بالایی که در مخلوط‌های حاوی سیلت وجود دارد رفتاری انقباضی از خود نشان می‌دهند. در نمونه‌هایی با رفتار انقباضی نمی‌توان خطوط SSL را به‌کمک آزمایش‌های تناوبی به دست آورد زیرا خطوط حاصل از آزمایش‌های تناوبی تنها در نمونه‌هایی با رفتار اتساعی که قسمتی از منحنی مسیر تنش بر روی خط SSL قرار می‌گیرد قابل دست‌یابی است. از سوی دیگر با توجه به این نوع رفتار که نمونه‌ها از خود نشان می‌دهند خطوط PTL نیز وجود نخواهند داشت زیرا فشار آب حفره‌یی با عبور منحنی مسیر تنش از روی این خطوط شروع به کاهش می‌کند، در حالی که در نمونه‌هایی با رفتار انقباضی در تمام طول مسیر تنش فشار آب حفره‌یی روندی افزایشی دارد. از همین رو، در نمونه‌های حاوی سیلت خطوط PTL را نیز نمی‌توان نشان داد. در آزمایش‌های انجام‌شده روی مخلوط‌های ماسه‌ی سیلتی تنها می‌توان $IPTL_{ext}$ و $IPTL_{com}$ را به دست آورد. شکل‌های ۷ و ۸ نحوه‌ی تشخیص این خطوط در آزمایش‌های



شکل ۷. تعریف خطوط حالت در آزمایش تناوبی همسان انجام شده برای مخلوط ماسه با ۱۵ درصد سیلت.



شکل ۸. تعریف خطوط حالت در آزمایش تناوبی همسان انجام‌شده برای مخلوط ماسه با ۳۰ درصد سیلت.

جدول ۵. زوایای خطوط $\mathbf{IPTL}_{ext}$ و $\mathbf{IPTL}_{com}$در نسبت بازگشت تنش‌های متفاوت برای ۱۵٪ سیلت.

۱۵٪ سیلت	rc=۰	rc=۰٫۵	rc=۰٫۷۵	rc=۱	rc=۱٫۲۵	rc=۱٫۴۷۴	rc=۱٫۸۶۴
$\alpha_{IPTL,c}$	ندارد	۱۲٫۵	۲۰	۲۸	۲۱٫۵	۱۶	۱۴
$\alpha_{IPTL,e}$	۱۵	۱۲٫۵	۶	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد

جدول ۶. زوایای خطوط $\mathbf{IPTL}_{ext}$ و $\mathbf{IPTL}_{com}$ در نسبت بازگشت تنش‌های متفاوت برای ۳۰٪ سیلت.

۳۰٪ سیلت	rc=۰	rc=۰٫۵	rc=۰٫۷۵	rc=۱
$\alpha_{IPTL,c}$	ندارد	۱۰	۱۳	۲۵
$\alpha_{IPTL,e}$	۱۲	۱۰	۶٫۵	ندارد

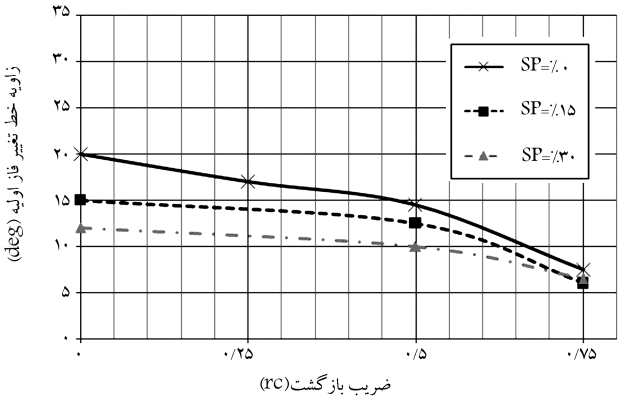
انجام‌شده روی مخلوط ماسه وسیلت را نشان می‌دهد. جدول ۵ زوایای این خطوط را در قسمت فشاری و کششی برایrc های مختلف در مخلوط ماسه با ۱۵٪ سیلت و جدول ۶ این زوایای را برای ۳۰٪ سیلت نشان می‌دهد. همچنین rcهای کوچک‌تر از ۰٫۵ نشان‌دهنده‌ی تحکیم ناهمسان کششی و rcهای بزرگ‌تر از ۰٫۵ نشان‌دهنده‌ی تحکیم ناهمسان فشاری است.

چنان که از جدول ۵ پیداست همانند ماسه‌ی خالص، با افزایش مقدار rc زاویه‌ی IPTL_{com} افزایش می‌یابد. با این وجود این روند صعودی پیوسته نیست و از $rc = 1$ به بعد برعکس کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به بالا رفتن تنش برشی اولیه ناشی از تحکیم منتج از بالارفتن مقدار rc و نزدیک‌شدن آن به مقدار مقاومت برشی باقی‌مانده (S_{us}) مربوط دانست.[۱۰] علت اینکه این روند کاهشی در ماسه‌ی خالص رخ نمی‌دهد آن است که مقاومت برشی باقی‌مانده‌ی نمونه‌های ماسه‌یی در مقایسه با نمونه‌های حاوی سیلت بالاتر است. این روند برای خط IPTL_{ext} نیز رخ می‌دهد و همانند ماسه‌ی خالص با افزایش مقدار rc زاویه‌ی آن کاهش می‌یابد.

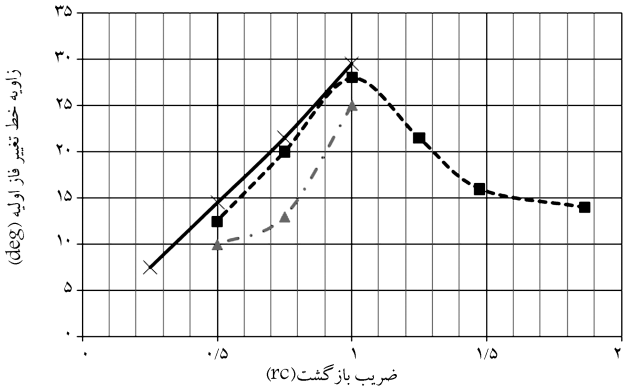
علت آن که نمی‌توان برای rcهای بزرگ‌تر از ۱ مقدار $\alpha_{IPTL,e}$ را به دست آورد این است که در این مقدار rc نمودار مسیر تنش کاملاً در قسمت فشاری ($q < 0$) قرار دارد و دیگر خط IPTL_{ext} موجود نیست.

چنان که از این جدول نیز پیداست در ۳۰٪ سیلت هم شرایطی همانند ماسه‌ی خالص قابل مشاهده است. مقایسه‌ی بین ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد سیلت در شکل ۹ انجام شده است. چنان که از شکل پیداست برای ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد سیلت با افزایش درصد سیلت در یک rc ثابت زاویه‌ی IPTL هم در قسمت کششی و هم در قسمت فشاری کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ تأثیر سیلت بر روی زاویه‌ی IPTL در نمونه‌های تحکیم همسان ($rc = 0.5$) آورده شده است. چنان که از شکل پیداست همانند شکل ۸ روند کاهشی زاویه‌ی IPTL تا ۳۰ درصد سیلت ادامه داشته ولی با افزایش بیشتر مقدار سیلت، یعنی درصد سیلت‌های ۵۰ و ۷۰، این روند معکوس شده و زاویه IPTL افزایش می‌یابد.

در مبحث مقاومت در مقابل روان‌گرایی در خاک‌های حاوی سیلت نیز روندی مشابه دیده می‌شود، به‌گونه‌یی که تا درصد خاصی از سیلت مقاومت در مقابل روان‌گرایی کاهش یافته و با افزایش بیشتر سیلت مقاومت در مقابل روان‌گرایی افزایش می‌یابد که به این درصد سیلت خاص «درصد سیلت بحرانی» نیز گفته می‌شود. بدین ترتیب، تأثیر درصد سیلت بحرانی در اینجا نیز دیده شده است به‌گونه‌یی که با

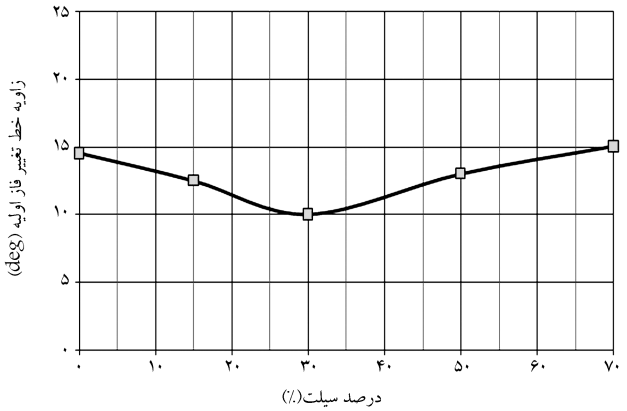


الف) مقایسه بین شیب خطوط IPTL در قسمت کششی برای rcهای متفاوت و دردرصد سیلت های مختلف؛



ب) مقایسه بین شیب خطوطIPTL در قسمت فشاری برای rcهای متفاوت و در درصد سیلت های مختلف.

شکل ۹. مقایسه شیب خطوط تغییر فاز اولیه (IPTL) در قسمت فشاری وکششی در ضریب بازگشت‌های مختلف (rc) و برای درصدهای سیلت متفاوت.



شکل ۱۰. مقایسه بین شیب خطوط IPTL در نمونه‌های تحکیم همسان یافته (rc=۰٫۵) در درصد سیلت‌های مختلف.

عبور از این مقدار زاویه‌ی IPTL که قبلاً روند کاهشی داشته، افزایش می‌یابد. از این مبحث این نکته نیز قابل نتیجه‌گیری است که مقاومت در مقابل روان‌گرایی با مقدار زاویه‌ی IPTL ارتباط مستقیم دارد.

نتیجه‌گیری

۱. خطوط حالت پایدارکششی و فشاری (SSL_{ext} و SSL_{com}) برای ماسه‌ی خالص یکه است و وجود برش اولیه‌ی ناشی از تحکیم ناهمسان هیچ تأثیری بر آن ندارد. زاویه‌ی خط حالت پایدار در حالت کششی با حالت فشاری متفاوت است و کم‌تر از آن است، به‌طوری که زاویه‌ی خط حالت پایدارکششی ماسه‌ی فیروزکوه ۲۶ درجه و فشاری آن ۳۸٫۵ درجه است که نشان‌گر تمایل بیشتر ماسه به تغییر شکل بیشتر درکشش است. به‌همین خاطر است که در صورت اعمال تنش‌های دوره‌یی در حالت تحکیم همسان کرنش‌های دوره‌یی به‌صورت ناهمسان است و ناحیه‌ی کششی آن از ناحیه فشاری بیشتر است.

۲. خطوط تغییر فازکششی و فشاری (PTL_{ext} و PTL_{com}) نیز در ماسه‌ی خالص یکه است و چنان که گفته شد وجود برش اولیه هیچ تأثیری بر آن ندارد. همانند خطوط حالت پایدار این زوایا درکشش و فشار متفاوت‌اند و درکشش کم‌تر از فشار است، به‌طوری که خط تغییر فازکششی زاویه‌یی برابر با ۲۴ درجه و خط تغییر فاز فشاری با محور تنش مؤثر میانگین (p') زاویه‌ی ۳۳ درجه دارد.

۳. یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق مشخص‌کردن تأثیرپذیری یا عدم تأثیرپذیری خط تغییر فاز اولیه‌ی فشاری و کششی ($IPTL_{ext}$ و $IPTL_{com}$) از برش اولیه بود، مخصوصاً در قسمت کششی که در تحقیقات محققین پیشین به آن پرداخته نشده بود. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که در قسمت فشاری چنان که در ادبیات فنی آمده است، با افزایش مقدار rc، و به‌عبارتی افزایش تحکیم فشاری، مقدار زاویه‌ی خط $IPTL_{com}$ با محور P'، در فضای q-p'، (α_{IPTLc}) افزایش می‌یابد؛ همچنین مقدار زاویه‌ی خط $IPTL_{ext}$ با افق ($\alpha_{IPTL,e}$) کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در آزمایش‌های کششی نیز روند معکوس قابل مشاهده است به‌گونه‌یی که در این آزمایش‌ها نیز با کاهش مقدار rc یا به‌عبارتی افزایش تحکیم کششی برعکس مقدار زاویه خط $IPTL_{com}$ با محور تنش مؤثر میانگین ($\alpha_{IPTL,c}$) کاهش یافته و همین‌طور مقدار زاویه‌ی خط $IPTL_{ext}$ با محور تنش مؤثر میانگین ($\alpha_{IPTL,e}$) افزایش می‌یابد.

۴. با توجه به آن‌که در آزمایش‌های حاوی سیلت رفتار انقباضی قابل مشاهده است، از میان خطوط حالت گفته‌شده تنها خط تغییر فاز اولیه به‌کمک آزمایش‌های تناوبی قابل دست‌یابی است. چنان که از نتایج پیداست بر اثر وجود سیلت نیز این خطوط متأثر از تحکیم ناهمسان بوده و یکه نیست و روندی مشابه با ماسه را از خود نشان می‌دهند. نکته‌ی قابل ذکر این است که درصورت افزایش بیش از حد مقدار rc این خطوط می‌توانند روندی معکوس داشته باشد به‌طوری که با افزایش rc، $\alpha_{IPTL,c}$ با کاهش همراه بوده است.

۵. با افزایش سیلت به نمونه‌های تحکیم همسان ($k = ۱, rc = ۰٫۵$) در ابتدا زوایای خطوط حالت کاهش و با افزایش بیشتر سیلت این زوایا افزایش می‌یابند. درصد سیلت بحرانی که این روند از آنجا شروع می‌شود حدود ۳۰٪ است.

پانوشت

1. initial phase transformation line
2. steady state line
3. phase transformation line
4. Chung
5. Konard
6. Vaid
7. taped funnel method
8. Yamamuro
9. stress reversal
10. reversal coefficient

منابع

1. Casagrande, A. "Characteristic of cohesionless soils affecting the stability of slope and earth fill", *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*, pp. 13-32 (January 1936).
2. Hyde, A.F.L.; Higuchi, T. and Yasuhara, K. "Liquefaction, cyclic mobility, and failure of silt", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(6), pp. 716-735 (2006).
3. Sladen, J.A.; D'Hollander, R.D. and Krahn J. "The liquefaction of sands, a collapse surface approach", *Can. Jeotech. J.*, **22**, pp. 564-578 (1985).
4. Kramer, S., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, pp. 363-365 (1996).
5. Bahadori, H.; Ghalandarzadeh, A.; Ahmadi, A. and Abadi, M. "Effect of silt content on the anisotropic behaviour of sand in cyclic loading", 4th International Confrence on Earthquake Engineering, Greece (2007).
6. Yamamuro, J.A. and Wood, M. "Effect of depositional method on the undrained behavior and microstructure of sand with silt," *Soil Daynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 751-760 (2004).
7. Ahmadi, A. "Evaloation of sand-silt mixtures behaviour under cyclic triaxial loading in compression and extension mode", MS Engineering Thesis, University of Tehran, (July 2008).
8. Ghalandarzadeh, A. and Ahmadi, A. "Effect of anisotropic consolidation on resistance to liquefaction of pure sands", 4th International Symposium on Civil Engineering, Tehran, Iran (2008).
9. Vaid, Y.P. and Sivathayalan, S. "Fundamental factors affecting liquefaction susceptibility of sands", *Can Geotech. J.*, **37**, pp. 592-666, (2000).
10. Mohammad, R. and Dorby, R. "Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand," *J. Geotech. Engng Dir. ASCE*, **112**, GT10, pp. 941-958 (1986).