



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۵۱ تا ۶۵  
Vol. 47, No. 2, Fall 2015, pp. 51- 65



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست  
Amirkabir Journal of Science & Research Civil & Environmental Engineering  
(AJSR - CEE)

## مطالعه آزمایشگاهی بر استعداد روانگرایی ماسه بابلسر در شرایط تحکیم همسان و ناهمسان از دیدگاه پارامتر حالت

یاسر جعفریان<sup>۱\*</sup>، علی قربانی<sup>۲</sup>، سیاوش سلامت پور<sup>۳</sup>، سینا سلامت پور<sup>۳</sup>

۱- استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه گیلان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

(دریافت ۱۳۹۱/۹/۱۷، پذیرش ۱۳۹۳/۶/۲۵)

### چکیده

نتایج آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده مختلفی که در شرایط همسان و ناهمسان بر روی نمونه‌های بازسازی شده ماسه بابلسر انجام شده است ارائه می‌شوند. این نوع ماسه در بخش عمده‌ای از نوار ساحلی دریای مازندران که شرایطی نظیر خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی شده، لرزه‌خیزی و بالا بودن سطح آب زیرزمینی را دارد، احتمال بالایی از وقوع پدیده روانگرایی در این منطقه را خاطرنشان می‌نماید. با توجه به حجم بالای ساخت‌وسازهای شهری بر روی این ماسه، شناخت پارامترهای مکانیکی آن در چارچوب مفهوم حالت پایدار و استعداد روانگرایی بسیار اهمیت دارد. از پارامتر حالت به‌عنوان توصیف‌کننده‌ای مناسب برای بیان رفتار خاک‌های درشت‌دانه در تراکم‌ها و تنش‌های اولیه مختلف استفاده شده است. داده‌های آزمایش‌ها برای بررسی مقاومت حالت پایدار و استعداد روانگرایی این نوع ماسه با در نظر گرفتن تراکم‌های نسبی و تنش‌های مؤثر اولیه مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که رابطه‌ای بسیار منطقی میان فشار آب حفره‌ای اضافی و پارامترهای حالت وجود دارد. همچنین ناهمسانی تنش اولیه تأثیر قابل توجهی بر تغییرات حجم و فشار آب حفره‌ای ایجاد خواهد نمود. این در حالی است که خط حالت پایدار برای نمونه‌های زهکشی شده و نشده در حالت تحکیم همسان و ناهمسان، خطی یکتاست.

### کلمات کلیدی

آزمایش سه محوری استاتیکی، حالت پایدار، همسان و ناهمسان، پارامتر حالت، استعداد روانگرایی

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: yjafarianm@gmail.com

## ۱- مقدمه

تغییر دهد. مطالعه روانگرایی با استفاده از دستگاه سه محوری استاتیکی به درک بهتر مکانیزم و رفتار پارامترهای کنترل کننده خاک در پدیده روانگرایی کمک خواهد کرد. جعفریان و همکاران [۶] مشاهده کردند که انجام آزمایش روی نمونه‌های تحکیم یافته ناهمسان برای بررسی رفتار ماسه‌های واقع در زمین‌های شیب‌دار و تحت سازه‌هایی که به بستر خود تنش برشی زیادی را تحمیل می‌نمایند مفید خواهد بود. کاسترو [۱] آزمایش‌های استاتیکی مختلفی روی نمونه‌های تحکیم یافته ناهمسان انجام داد و سه حالت مختلف برای ماسه که به ترتیب شامل: روانگرایی، روانگرایی محدود و حالت اتساع می‌باشد را مشخص کرد. همچنین، بوبه‌ای و همکاران [۷] در خصوص رفتار ماسه تحکیم یافته ناهمسان در شرایط زهکشی نشده مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که برخی از نمونه‌ها به خط حالت پایدار (SSL) می‌رسند اما برخی هرگز نمی‌رسند.

در این مطالعه، تنش مؤثر اولیه به همراه تنش برشی و تراکم نسبی اولیه به‌عنوان متغیرهایی برای پیش‌بینی رفتار روانگرایی استاتیکی ماسه بد دانه‌بندی شده منطقه بابلسر که در استان مازندران واقع شده استفاده شده است. آزمایش‌های مختلف سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده استاتیکی تحت شرایط تحکیم یافته همسان و ناهمسان انجام پذیرفته است. ماسه بابلسر در شرایط مختلف از خود رفتاری متفاوت نظیر: روانگرایی کامل، روانگرایی محدود و حالت اتساع را نشان می‌دهد. برای این نوع ماسه، تنش ناهمسان می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده ماسه را تغییر دهد اما خط حالت پایدار برای شرایط همسان و ناهمسان یکتا است. بر طبق مطالعه انجام شده وجود باربرشی اولیه و افزایش آن می‌تواند استعداد روانگرایی را کاهش دهد. همچنین خط حالت پایدار برای این نوع ماسه ارائه شده است که این خط مرزی را بین شرایط روانگرا و غیر روانگرا مشخص می‌نماید. سپس، به بیان رفتار منبسط شونده و منقبض شونده ماسه بابلسر با استفاده از پارامترهایی از قبیل: پارامتر حالت و نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در لحظه گسیختگی پرداخته می‌شود.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- مشخصات شاخصی

در این مطالعه آزمایش‌های سه محوری بر روی ماسه تمیز بابلسر، که این نوع ماسه بخش وسیعی از سواحل دریای مازندران را پوشانده است، انجام پذیرفت. این ماسه بر طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، به‌صورت ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) می‌-

پدیده روانگرایی یکی از بحث‌برانگیزترین پدیده‌ها برای مهندسين ژئوتکنیک در دهه‌های اخیر بوده است. در اثر پدیده روانگرایی که ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای است خاک‌ها بخش عمده-ای از مقاومت برشی خود را از دست خواهند داد. روانگرایی منجر به تغییر شکل‌های بزرگی در نزدیکی سطح زمین می‌شود که معمولاً خسارت‌های فراوانی به ساخته‌های بشر و عوارض طبیعی زمین از قبیل نشست، کج شدن سازه‌ها و زمین‌لغزش را در پی دارد. روانگرایی در شیب‌های زمین و خاک‌ریزها ممکن است ایجاد گسیختگی جریانی سریع کرده که معمولاً با خطرات زیادی به همراه است. دقت در ارزیابی پتانسیل روانگرایی، هزینه ساخت را کمتر کرده و یا طراحی ایمن‌تری را موجب می‌شود. مطالعات پیشرفته‌ای در خصوص روانگرایی خاک‌ها پس از روانگرایی معروف نیگاتا در سال ۱۹۶۴ و زلزله آلاسکا شروع شد. ارزیابی مقاومت حالت پایدار با آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده و در شرایط استاتیکی و تفسیر نتایج آن‌ها توسط محققینی نظیر کاسترو [۱] و دلا و همکاران [۲] بررسی شده است. کاسترو [۱] مشاهده کرد که خاک‌های غیر چسبنده در تراکم‌های نسبی مختلف، از خود سه رفتار متمایز را نشان خواهند داد که عبارت‌اند از: روانگرایی، روانگرایی محدود و حالت اتساع. این حالات، در یک نرخ ثابت از تنش مشخص‌کننده تغییر شکل حالت پایدار هستند [۳ و ۴]. روانگرایی کامل حالتی است که خاک در خلال بارگذاری برشی یک افزایش فشار آب حفره‌ای مثبت را به‌صورت مداوم تجربه می‌کند و به‌صورت همزمان تنش مؤثر کاهش می‌یابد. در صورتی که خاک با یک تنش برشی اولیه تحکیم شده باشد کاهش تنش مؤثر منجر به حالتی می‌شود که خاک دیگر نتواند آن تنش برشی اولیه را تحمل کند و در نتیجه دچار روانگرایی کامل (یا جریانی) می‌شود.

نسبت تخلخل (e) به‌عنوان متغیری بسیار مهم در جهت تعیین میزان استعداد روانگرایی استاتیکی بکار می‌رود. رفتار ماسه می‌تواند به‌وسیله تعیین تعریف دقیقی از حالت خاک نسبت به خط حالت پایدار در یک تنش همه‌جانبه مؤثر بیان گردد. پارامتر حالت توسط بین و جفریز [۵] به‌صورت تفاوت دقیق بین نسبت تخلخل اولیه و نسبت تخلخل روی خط حالت پایدار در یک تنش مؤثر متوسط یکسان بیان شده است. بنابراین، پارامتر حالت می‌تواند به ارزیابی مستعد و نامستعد بودن روانگرایی خاک‌ها بپردازد. تنش اولیه ناهمسان در برخی از شرایط محیطی از قبیل ساخت‌وسازها ممکن است استعداد روانگرایی ماسه را

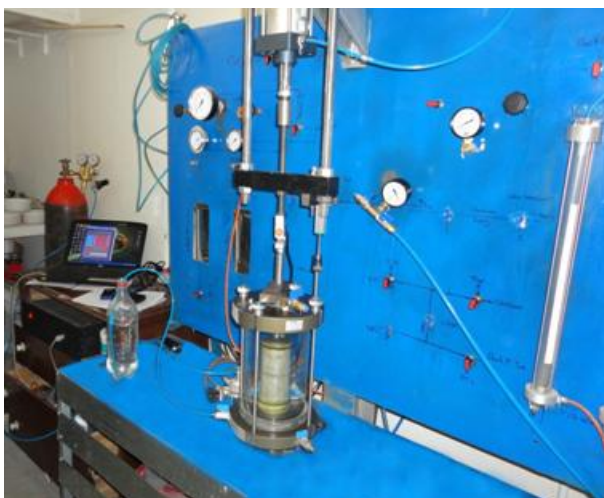
نماید. سلول دستگاه نیز می‌تواند فشار همه جانبه‌ای تا ۲ مگا پاسکال تحمل نماید.

### ۲-۲-۲- سیستم پنوماتیک

نیروی پنوماتیک توسط یک کمپرسور بادی قوی تولید و برای اعمال و کنترل اعمالی همانند اعمال تنش‌های همه‌جانبه به نمونه‌ها و اعمال پس فشار برای کمک به اشباع نمونه‌ها بکار می‌رود.

### ۲-۲-۳- ثبت‌کننده داده‌ها یا (LVDT)

این دستگاه سه محوری دارای یک جعبه‌ی ثبت داده‌ها می‌باشد که در آن ۸ کانال مجزا برای اندازه‌گیری مبدل‌های نیرو، جابجایی و فشارسنج تعبیه شده است. شکل (۲) دستگاه سه محوری با سیستم ثبت داده‌ها (LVDT) را نشان می‌دهد.

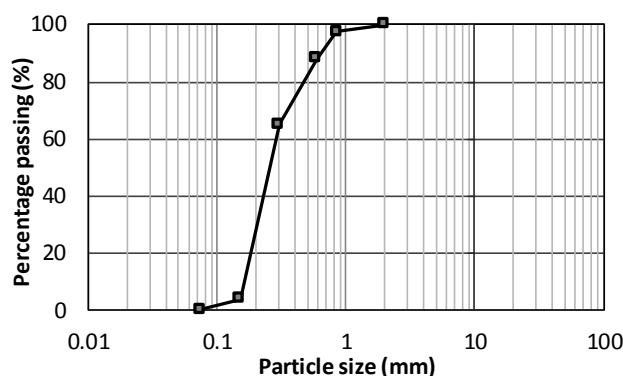


شکل (۲): نمایی از دستگاه سه محوری

### ۲-۳- روش انجام آزمایش

برای آماده‌سازی نمونه از روش نمونه‌سازی مرطوب استفاده شد. روش کار بدین گونه است که ماسه‌های که در گرمخانه خشک شده را با مقدار ۵ درصد آب مقطر مخلوط کرده و ماسه مرطوب شده به ۵ قسمت با وزن مساوی تقسیم می‌شود. هر قسمت با دقت به داخل قالب استوانه‌ای که بدنه آن با غشاء لاستیکی پوشانده شده است، توسط قاشق ریخته می‌شود. غشاء لاستیکی دارای ضخامتی برابر ۰/۳ میلیمتر است که توسط اعمال مکش قبل از نمونه‌سازی به بدنه‌ی داخلی قالب چسبانیده شده است. روی هر لایه برای ایجاد اصطکاک بیشتر با لایه بالایی خراش داده شده و سپس لایه بعدی را ریخته درحالی که ارتفاع هر لایه با کولیس اندازه‌گیری می‌شود. این روند تا پایان لایه

باشد و منحنی توزیع دانه‌بندی این ماسه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): منحنی توزیع دانه‌بندی ماسه بابلسر

تراکم نسبی، یکی از پارامترهای مهم برای کنترل رفتار تنش- کرنش و یا تغییر در استعداد روانگرایی خاک‌های دانه‌ای می‌باشد که از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$D_r = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min}) \quad (1)$$

که در آن  $e_{min}$  و  $e_{max}$  مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تخلخل خاک هستند. این مقادیر ( $e_{min}$  و  $e_{max}$ ) مطابق استاندارد ASTM (D20-40) اندازه‌گیری می‌شوند. تمامی مشخصات شاخصی این ماسه در آزمایشگاه تعیین و در جدول شماره (۱) شرح داده شده است.

جدول (۱): مشخصات شاخصی ماسه بابلسر

$e_{max}$	$e_{min}$	$G_s$	$D_{50}$ (میلیمتر)	$C_u$
۰/۸۱	۰/۵۶	۲/۷۸	۰/۲۴	۱/۸

### ۲-۲- دستگاه سه محوری

دستگاه سه محوری بکار گرفته شده در این پژوهش دستگاهی بوده که طراحی و مونتاژ آن در داخل کشور صورت گرفته است. طراحی و تولید این دستگاه شامل چهار قسمت اصلی به شرح ذیل است:

### ۲-۲-۱- بخش اسکلت و الکترومکانیک

دستگاه سه محوری شامل یک قاب فلزی و تابلو می‌باشد که بر روی تابلو، گیج‌ها و شیرهای کنترل‌کننده زیادی نصب شده است. قاب دستگاه به گونه‌ای طراحی شده که بتواند ظرفیت بارگذاری قائم در حدود ۵ تن را بدون هیچ تغییر شکلی تحمل

شرایط ناهمسان پارامتری بنام  $\alpha$  به صورت نسبت تنش برشی اولیه به تنش همه‌جانبه مؤثر (تنش برشی اولیه، برابر تنش انحرافی تقسیم‌بر دو) تعریف می‌گردد. براین اساس،  $\alpha=0$  مربوط به نمونه‌های تحکیم یافته همسان می‌باشد. برای این سری، مقدار پارامتر برشی برابر  $0/2$  و تنش مؤثر متوسط اولیه برابر  $40$  و  $300$  کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین تراکم نسبی اولیه از  $5$  الی  $55$  درصد متغیر است.

سری D: آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی نشده (ACU)، شامل ۶ آزمون که تفاوت آن با سری C در مقدار پارامتر برشی می‌باشد. این پارامتر در سری D برابر  $0/4$  در نظر گرفته شده است.

سری E: آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی شده (ACD)، شامل ۴ آزمون تحت تنش مؤثر متوسط اولیه  $40$  الی  $300$  کیلوپاسکال و تراکم نسبی‌های اولیه  $5$  و  $55$  درصد و پارامتر برشی برابر  $0/2$  ( $\alpha=0/2$ ).

سری F: آزمایش‌های سه محوری به صورت تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی شده (ACD)، شامل ۴ آزمون که تنها تفاوت آن با سری E در مقدار پارامتر برشی است که در این سری برابر  $0/4$ ، ( $\alpha=0/4$ ) می‌باشد.

مسیرهای تنش برای کلیه آزمایش‌های تحکیم یافته همسان (سری‌های A و B) در شکل (۴d) و همچنین برای آزمایش‌های تحکیم یافته ناهمسان (سری‌های C، D، E و F) در شکل (۴e) نشان داده شده است.

از میان آزمایش‌های تحکیم یافته همسان و زهکشی نشده در سری A، سه نمونه سست A1 الی A3 دارای رفتار منقبض شونده بوده که مسیر تنش آن‌ها در فضای  $q-p'$  در شکل (۴f) نشان داده شده است. هنگامی که برش در حالت زهکشی نشده آغاز می‌شود، این نمونه‌ها رفتاری منقبض شونده که ناشی از ایجاد فشار آب حفره‌ای مثبت می‌باشد پیدا می‌کنند و سپس مقاومت برشی نمونه‌ها به مقدار ماکزیمم خود در کرنش متناظر کمی رسیده و پس‌از آن نمونه‌ها گسیخته خواهند شد. پس‌از نقطه ماکزیمم در مسیر تنش در این نمونه‌ها فشار آب حفره‌ای به صورت مثبت به افزایش خود ادامه خواهد داد تا مسیر تنش به خط حالت پایدار برسد. در این حالت، نمونه‌ها رفتار روانگرایی جریانی را از خود به نمایش می‌گذارند. همچنین شکل (۴f) مسیر تنش مؤثر برای دو نمونه‌ی تحکیم یافته ناهمسان با پارامتر برشی  $0/2$ ، ( $\alpha=0/2$ ) را نشان می‌دهد.

پنجم تکرار می‌گردد. پس‌از جایگذاری کلاهک بر روی قالب، مقدار کمی مکش از بالا به نمونه اعمال شده تا در همان وضعیت قرار گیرد. سپس ارتفاع و قطر نمونه پس‌از باز کردن قالب اندازه‌گیری می‌گردد. ارتفاع و قطر تقریبی تمامی نمونه‌ها به ترتیب  $100$  و  $50$  میلی‌متر است. بعد از برداشتن قالب از نمونه سلول دستگاه روی نمونه نصب گردیده و داخل سلول آبیگری می‌شود. تنش همه‌جانبه  $10$  کیلوپاسکال به نمونه اعمال گشته تا اثر مکش از دستگاه حذف شود. سپس به نمونه دی‌اکسید کربن دمیده می‌شود تا آسان‌تر اشباع گردد. آب بدون هوا به داخل نمونه وارد شده و همچنین ضمن بررسی وضعیت اشباع از پس فشار لازم نیز استفاده می‌شود. این کار تا مادامی که نمونه به بیش از  $95$  درصد اشباع برسد ادامه می‌یابد. پس‌از تحکیم و اندازه‌گیری آب خروجی در بورت تغییر حجم در شرایط زهکشی شده و یا زهکشی نشده، نمونه به صورت کرنش-کنترل بارگذاری می‌شود. این روند تا وقتی که نمونه گسیخته نشود و یا به تغییر آزمایش‌های زهکشی شده و زهکشی نشده مختلفی تحت شرایط تحکیم یافته همسان و ناهمسان بر روی ماسه اشباع تمیز بابلسر انجام پذیرفته است. شرایط انجام آزمون در جدول شماره (۲) آمده است.

در شکل (4a) منحنی تنش-کرنش تمامی ۴۵ آزمایش صورت پذیرفته (سری‌های A تا F) در فضای تنش انحرافی به کرنش محوری نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های (4b) و (4c) به ترتیب، مسیر آزمایش نمونه‌های زهکشی نشده (سری‌های A، C و D) و نمونه‌های زهکشی شده (سری‌های B، E و F) تحت شرایط تحکیم یافته همسان و ناهمسان در فضای فشار آب حفره‌ای و تغییرات کرنش حجمی در مقابل کرنش محوری رسم شده‌اند. در ضمن می‌توان آزمایش‌ها را به ۶ سری به شرح ذیل تقسیم‌بندی کرد:

سری A: آزمایش‌های سه محوری به صورت تحکیم یافته همسان و زهکشی نشده (ICU)، شامل ۱۵ آزمون تحت تنش مؤثر متوسط اولیه  $40$  الی  $410$  کیلوپاسکال و تراکم نسبی اولیه  $5$  الی  $55$  درصد.

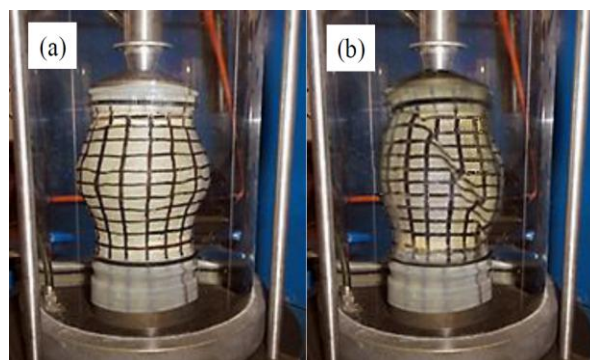
سری B: آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته همسان و زهکشی شده (ICD)، شامل ۱۰ آزمون تحت تنش مؤثرهای متوسط اولیه و تراکم نسبی‌های اولیه‌ای همانند سری A می‌باشد.

سری C: آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی نشده (ACU) که شامل ۶ آزمون می‌باشد. برای ایجاد

مکان محوری ۳۵ میلیمتر نرسد ادامه می‌یابد. برای آزمایش‌های تحکیم یافته ناهمسان، بارگذاری محوری بعد از مرحله تحکیم، توسط جک فوقانی با نرخ کم و در شرایط زهکشی شده به نمونه اعمال می‌شود.

مثالی از رفتار نمونه‌های منقبض و منبسط شونده تحت آزمایش سه محوری استاتیکی در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این شکل نمونه‌ای که رفتار انقباضی دارد (نمونه‌ی a) بعد از بارگذاری شکل خمراهی به خود گرفته و اثری از باند برشی در آن دیده نمی‌شود. درحالی‌که در نمونه‌ی b که مربوط به یک نمونه با رفتار اتساعی است یک باند برشی مشخص تشکیل شده است.

سری رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهند تا در نهایت گسیخته شوند. همچنین برای حالت تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی نشده با پارامتر برشی ۰/۴ یعنی سری D، تمامی ۶ نمونه رفتاری اتساعی را از خود نشان می‌دهند. برای آزمایش‌های زهکشی شده (سری‌های B، E و F)، مسیر تنش برای کلیه نمونه‌ها از ابتدا مسیری با شیب ۱ به ۳ را در فضای  $q-p'$  طی کرده تا اینکه به خط حالت پایدار برسند. همانگونه که در شکل (4e) مشاهده می‌شود برای آزمایش‌های تحکیم یافته ناهمسان زهکشی شده و زهکشی نشده، هنگامی‌که پارامتر برشی ( $\alpha$ ) در یک تنش مؤثر متوسط اولیه یکسان افزایش یابد، تنش مؤثر همه‌جانبه متوسط و تنش انحرافی نمونه‌ها افزایش می‌یابند. نتایج اولیه آزمایش‌ها نشان از آن دارد که ماسه تمیز بابلسر می‌تواند کلیه حالات ممکن روانگرایی شامل: روانگرایی کامل، روانگرایی محدود و حالت اتساع را تجربه نماید.

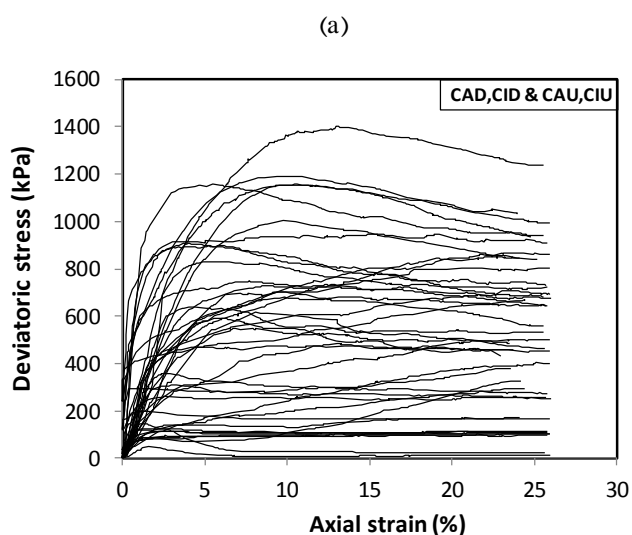


شکل (۳): رفتار نمونه‌های (a) منقبض شونده و (b) منبسط شونده تحت آزمایش سه محوری استاتیکی فشاری

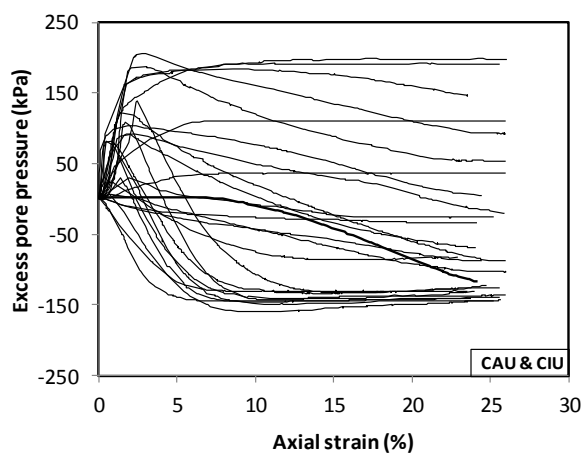
### ۳- نتایج اولیه

برای نمونه C27 مسیر تنش در ابتدا از خود رفتاری منقبض شونده نشان داده تا اینکه در کرنش‌های بزرگ‌تر، مسیر تنش برگشته و رفتاری منبسط شونده از خود نشان می‌دهد. سپس در امتداد مسیر خط حالت پایدار (SSL) حرکت کرده و به آن می‌رسد. این نوع رفتار که شامل انتقالی از حالت منقبض شونده به حالت منبسط شونده می‌باشد را روانگرایی محدود می‌نامند. نوع سوم رفتار که در نمونه C31 دیده می‌شود شامل رفتاری است که نمونه رفتاری کاملاً اتساعی در اثر برش از خود نشان می‌دهد. در این حالت همواره فشار آب حفره‌ای منفی بوده که در شکل (4b) نشان داده شده است.

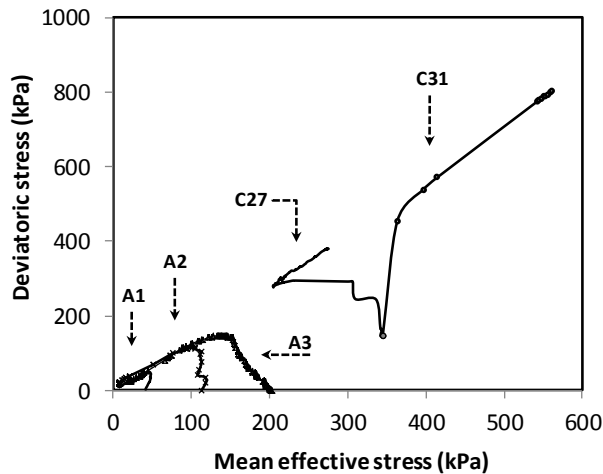
از میان آزمایش‌های تحکیم یافته ناهمسان و زهکشی نشده، (سری C) نمونه C27 که دارای تراکم نسبی ۱۹/۸۳ درصد، فشار همه‌جانبه ۳۴۰ کیلوپاسکال و پارامتر برشی ۰/۲ می‌باشد رفتار روانگرایی محدود شونده را تجربه کرده و ۵ آزمایش دیگر این



(a)



(b)



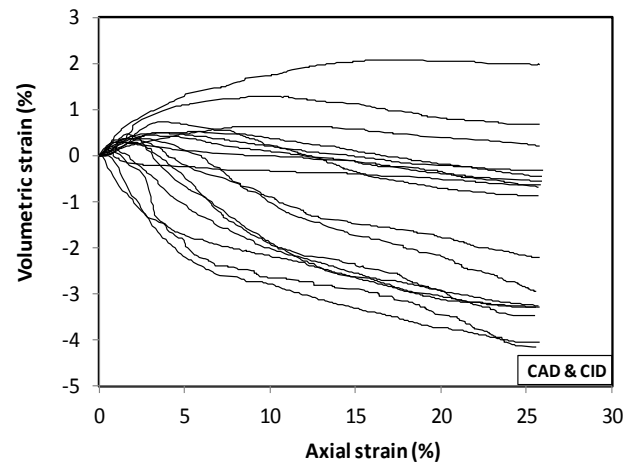
شکل (۴): (a) نتایج آزمایش‌های انجام‌شده (سری‌های A الی F) (b) مسیر آزمایش‌های زهکشی نشده به صورت تحکیم یافته همسان و ناهمسان (سری‌های A، C و D) (c) مسیر آزمایش‌های زهکشی شده به صورت تحکیم یافته همسان و ناهمسان (سری‌های B، E و F) (d) مسیرهای تنش مؤثر برای آزمایش‌های تحکیم یافته همسان (سری‌های A و B) (e) مسیرهای تنش مؤثر برای آزمایش‌های تحکیم یافته ناهمسان (سری‌های C، D، E و F) (f) مسیرهای تنش مؤثر برای آزمایش‌های A1 تا A3، C27 و C31

#### ۴- خط حالت پایدار

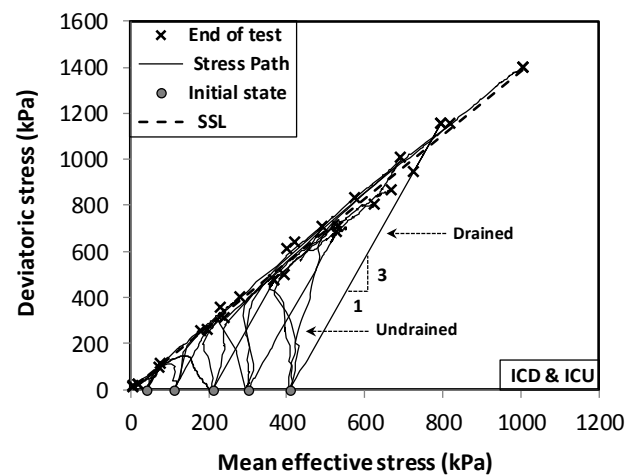
بین و جفریز [۵] نشان دادند که حالت بحرانی به تنهایی مرجع مناسبی برای بیان حالت ماسه نیست. زیرا تعیین حالت بحرانی برای ماسه در آزمایشگاه بسیار مشکل است. بنابراین به یک مرجع یکتا، قابل اندازه‌گیری و تکرارپذیر برای بیان رفتار ماسه نیاز است که حالت پایدار این نیازمندی را ارضا می‌کند.

برای خاک‌ها، هنگامی که سطح کرنش به اندازه کافی بزرگ شود، نمونه‌های خاک تحت برش تمایل به رسیدن به حالتی را دارند که در آن حالت تحت تنش‌های برشی و نرمال ثابت، تغییر شکل ادامه می‌یابد. دیده شده است که همبستگی خوبی بین نسبت تخلخل و تنش اصلی مؤثر همه‌جانبه متوسط وجود دارد که می‌تواند خط حالت پایدار را تعریف نماید. رفتار خاک را می‌توان باینسان حالت تنش همه‌جانبه مؤثر و تعریف موقعیت این نقطه در ارتباط با خط حالت پایدار بدست آورد. بنابراین، خط حالت پایدار (SSL) را می‌توان به صورت مکان هندسی تمامی نقاطی در صفحه تنش-نسبت تخلخل تعریف نمود که خاک تحت شرایط تنش مؤثر و نسبت تخلخل ثابت، تغییر شکل دائمی می‌دهد.

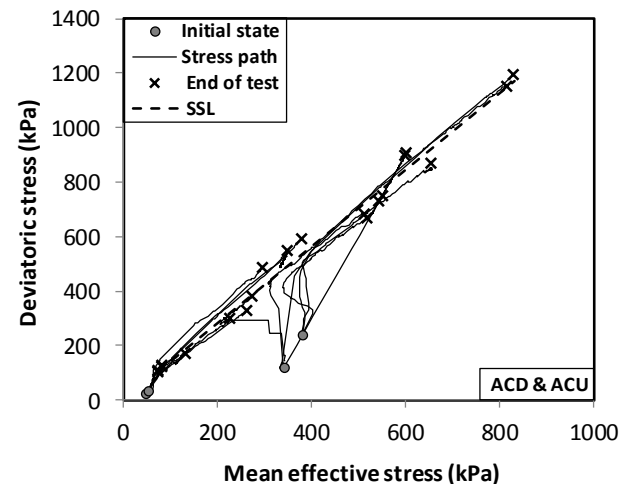
مفهوم حالت پایدار و خط حالت پایدار (SSL) توسط کاسترو [۱]، کاسترو و پولوس [۳]، پولوس [۴] و کاساگراند [۸] بیان شد. نتایج تمامی آزمایش‌های انجام‌شده روی ماسه تمیز بابلسر



(d)



(e)



(f)

۶-۱- پارامتر حالت ( $\psi$ )

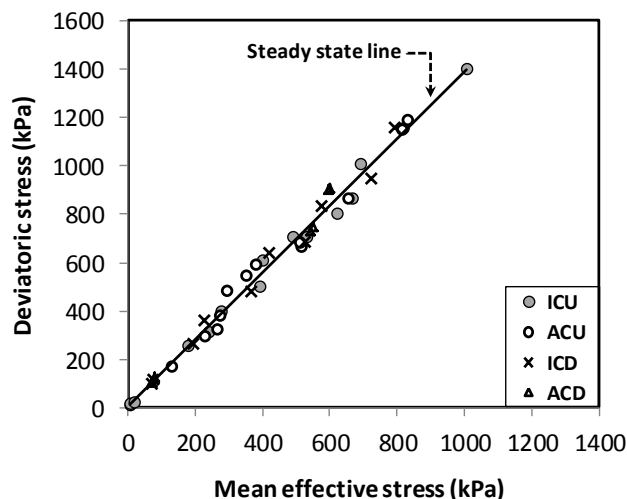
رفتار خاک را می‌توان با توجه به موقعیت دقیق حالت تراکم-تنش خاک در ارتباط با خط حالت پایدار بیان نمود. بنابراین، می‌توان گفت که رفتار ماسه نه تنها به تراکم نسبی ربط دارد بلکه به توصیفی از سطح تنش نیز بستگی داشته و تعریف می‌گردد. بین و جفریز [۵] نتیجه گرفتند که وضعیت دقیق ماسه بایبان هر دو پارامتر نسبت تخلخل اولیه ( $e_0$ ) و تنش مؤثر متوسط اولیه ( $p'_0$ ) بیان می‌شود. از این رو، ترکیبات مختلفی از  $e_0$  و  $p'_0$  می‌تواند تمامی حالات ممکن برای رفتار ماسه را فراهم سازد. پارامتر حالت ( $\psi$ ) به صورت تفاضل بین نسبت تخلخل کنونی خاک و نسبت تخلخل روی خط حالت پایدار (SSL) در یک تنش همه‌جانبه مؤثر متوسط یکسان تعریف می‌گردد و از رابطه (۲) قابل بیان است:

$$\psi = e - e_{cs} = (e_{max} - e_{min})(D_{r,cs} - D_r) \quad (2)$$

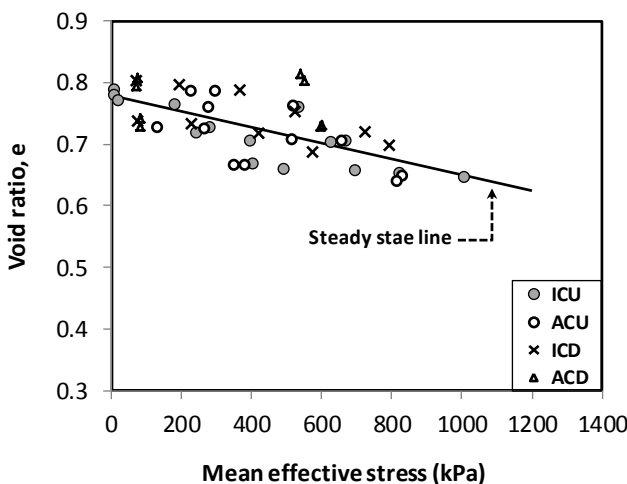
که در آن  $e$  برابر است با نسبت تخلخل خاک و  $e_{cs}$  نسبت تخلخل خاک روی خط حالت بحرانی که در یک تنش مؤثر متوسط یکسان قابل حصول است. همچنین  $e_{min}$  و  $e_{max}$  مقادیر حداکثر و حداقل نسبت تخلخل،  $D_{r,cs}$  تراکم نسبی روی خط حالت بحرانی در همان تنش مؤثر و  $D_r$  تراکم نسبی می‌باشد. از پارامتر حالت می‌توان به‌عنوان توصیف‌کننده‌ای مناسب برای رفتار خاک‌های درشت‌دانه در سطح وسیعی از تراکم و تنش‌های اولیه مختلف استفاده نمود. برای درک بهتر تأثیر پارامتر حالت،  $\eta$  (نسبت تنش انحرافی در لحظه گسیختگی به تنش مؤثر متوسط در همان لحظه  $q_f/p'_f$  و  $r_{ff}$  نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی به تنش همه‌جانبه مؤثر اولیه) در مقابل پارامتر حالت رسم شده است. شکل (6a) نشان‌دهنده نتایج بدست آمده از نمونه‌های A1 الی A15 در فضای  $\eta-\psi$  است. براین اساس، ۵ نمونه دارای پارامتر حالت ( $\psi$ ) مثبت بوده که نشان‌دهنده رفتار منقبض شونده یا حالت روانگرایی در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین، مابقی نمونه‌های سری A دارای مقدار پارامتر حالت منفی بوده و در نتیجه رفتاری منبسط شونده از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، تمامی آزمایش‌ها دارای  $\eta$  بزرگ‌تر از یک ( $\eta > 1$ ) هستند که این بدان معنی است که تنش انحرافی در لحظه گسیختگی بزرگ‌تر از تنش مؤثر متوسط در لحظه گسیختگی است. همچنین شکل (6b) نشان می‌دهد که برای ۶ نمونه،  $r_{ff}$  در لحظه گسیختگی مقداری بزرگ‌تر از صفر است ( $r_{ff} > 0$ )، که می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بررسی استعداد روانگرایی در نظر گرفته شود.

در فضای  $q-p'$  و  $e-p'$  در شکل‌های (5a) و (5b) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، نمونه‌های خاک تحت شرایط مختلفی از قبیل تنش، تراکم اولیه و همچنین مسیرهای تنش متفاوت با استفاده از حالات تحکیم یافته همسان و ناهمسان و زهکشی شده یا نشده در نهایت دارای یک خط حالت پایدار واحد و یکتا می‌باشند.

(a)



(b)



شکل (۵): خط حالت پایدار برای تمامی نمونه‌ها در فضای  $q-p'$  (a) و  $e-p'$  (b)

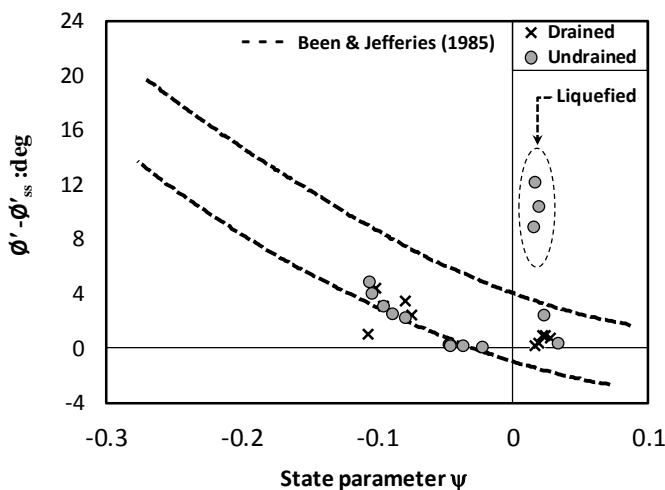
## ۶- استعداد روانگرایی

در این مطالعه از سه شاخص برای درک استعداد روانگرایی ماسه بابلر از قبیل: پارامتر حالت ( $\psi$ )، شاخص پارامتر حالت نسبی ( $r_{ff}$ ) و نرخ فشار جانبی خاک در حالت گسیختگی ( $k_f$ ) استفاده شده است.

ز د:

$$\phi' - \phi'_{cs} = 3[I_D(10 - \ln p') - 1] \quad (3)$$

که  $\phi'$  و  $\phi'_{cs}$  به ترتیب زوایای اصطکاک ماکزیمم و بحرانی مقاومت برشی برحسب درجه است که در محدوده بین  $12 < \phi' - \phi'_{cs}$  در لحظه گسیختگی هستند. برای آزمایش‌های تحکیم یافته همسان و زهکشی شده (ICD) و زهکشی نشده (ICU) مورد بررسی (سری‌های A و B)، مقادیر  $\phi'$  به صورت زاویه اصطکاک داخلی در لحظه گسیختگی محاسبه شده است. مقادیر  $\phi'_{ss}$  نیز از تخمین زاویه اصطکاک داخلی در لحظه‌ای که مسیر تنش به خط حالت پایدار می‌رسد، بدست می‌آید. همانگونه که در شکل (7) نشان داده شده است، مقادیر  $\phi' - \phi'_{cs}$  برای سری‌های A و B در محدوده‌ای بین صفر الی 12 درجه قرار دارد. همچنین شکل اخیر دو مرز بالایی و پایینی را که توسط بین و جفریز [5] برای 6 نوع مختلف ماسه تمیز و ماسه‌لای دار گزارش شده است را نشان می‌دهد. اگرچه اکثریت داده‌های آزمایش‌ها مربوط به مقادیر  $\phi' - \phi'_{cs}$  دارای مقادیر کمتر از 5 درجه می‌باشند و بین محدوده ترسیم شده توسط بین و جفریز [5] قرار می‌گیرد، اما مشاهده شده است که سه نمونه روانگرا خارج از محدوده بقیه نمونه‌ها هستند. این موضوع که در نمونه‌های روانگرا، ممکن است  $\phi'$  مقادیر ناصحیحی را به همراه داشته باشد توسط بین و جفریز [5] تأکید شده است.

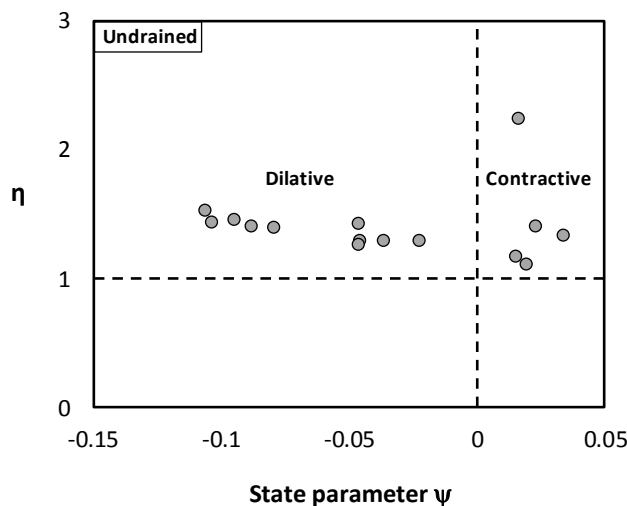


شکل (7): تفاوت بین زوایای اصطکاک حالت پایدار و بیک در مقابل پارامتر حالت برای نمونه‌های با شرایط همسان زهکشی شده و زهکشی نشده

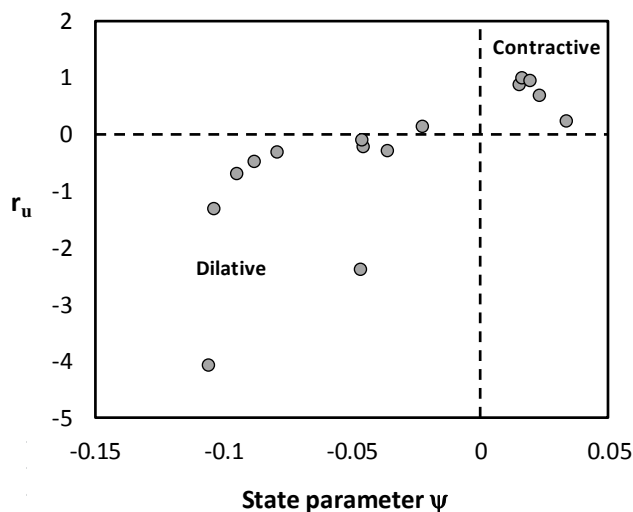
۶-۲- شاخص پارامتر حالت نسبی ( $\xi_R$ )

از آنجایی که تخمین پارامتر حالت در کارهای عملی مشکل

(a)



(b)

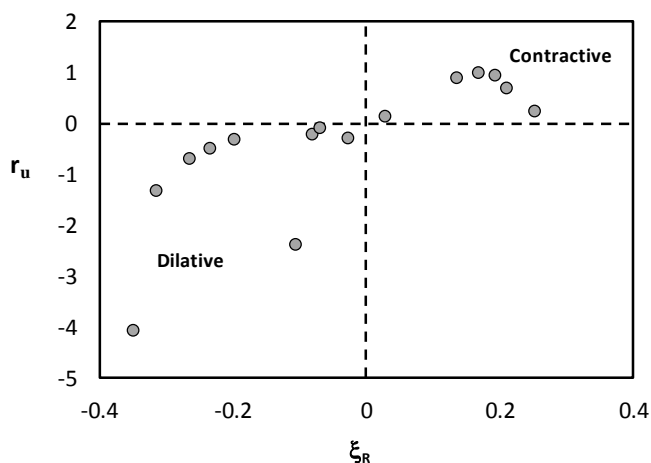


شکل (6): نتایج آزمایش‌های نمونه‌های تحکیم یافته همسان زهکشی نشده (a) نسبت تنش انحرافی به تنش مؤثر متوسط در لحظه گسیختگی در مقابل پارامتر حالت و (b) نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در لحظه گسیختگی در مقابل پارامتر حالت

از مقایسه بین شکل‌های (6a) و (6b) می‌توان فهمید که ترکیب از  $r_u$  و  $\psi$  می‌تواند درک بهتری از استعداد روانگرایی را فراهم سازد چراکه رفتار منقبض شونده و منبسط شونده به ترتیب با ارتباط با مقادیر مثبت ( $\psi > 0$  و  $r_u > 0$ ) و منفی ( $\psi < 0$  و  $r_u < 0$ ) هستند.

مقاومت‌های ماکزیمم در ماسه، وابسته به تراکم اولیه و سطح تنش است. تأثیر ترکیب سطح تنش و تراکم روی مقاومت خاک‌ها توسط بولتون [9] و بین و جفریز [5] مطالعه و گزارش شده است. بولتون [9] پیشنهاد داده است که تفاوت بین زوایای ماکزیمم و بحرانی مقاومت برشی را می‌توان از رابطه (3) تخمین





شکل (۸): نسبت فشار آب حفره ای اضافی در مقابل شاخص پارامتر حالت نسبی برای آزمایش‌های زهکشی نشده

همانند پارامتر حالت  $(\psi)$  در شکل (6b)، پارامتر حالت اصلاح شده نتایج اجرایی مناسب‌تری را ارائه می‌دهد زیرا رفتار منبسط شونده و منقبض شونده در ارتباط با به ترتیب مقادیر مثبت-مثبت و منفی-منفی  $r_u$  و  $\xi_R$  است. از مقایسه پارامتر حالت و شاخص پارامتر حالت نسبی در ارتباط با ۱۵ آزمایش زهکشی نشده و همسان، می‌توان دریافت که پارامتر حالت به نسبت دارای خطایی معادل ۶/۶۷ درصد در بیان بروز استعداد روانگرایی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین شکل اخیر مشخص می‌نماید که شاخص پارامتر حالت نسبی را می‌توان به‌عنوان شاخصی استفاده نمود که قابلیت‌های موردنیاز را برآورده ساخته و تخمین ساده‌تری از رفتار خاک در اختیار گذارد.

### ۶-۳- نسبت فشار جانبی در لحظه گسیختگی ( $k_f$ )

$K_f$  به صورت نسبت تنش همه‌جانبه مؤثر اولیه به تنش محوری مؤثر در لحظه گسیختگی ( $k_f = \sigma'_{3c}/\sigma'_{1f}$ ) تعریف شده است. شکل (۹) مقادیر نسبت  $k_f$  در مقابل زاویه اصطکاک در لحظه گسیختگی ( $\phi'$ ) در شرایط (ICD) و (ICU) را نشان می‌دهد. همچنین دیده می‌شود که داده‌های  $k_f - \phi'$  برای این نمونه‌ها بین دو منحنی نزولی واقع شده است. نمونه‌های روانگرا، دارای بیشترین مقدار در نرخ  $k_f$  بوده و حداقل مقدار در  $\phi'$  را در مقایسه با بقیه نمونه‌ها دارند. این افزایش در میزان نرخ  $k_f$  برای نمونه‌های روانگرا، به علت کاهش تنش محوری در لحظه گسیختگی می‌باشد که منجر به افزایش نرخ  $k_f$  گردیده است. اگرچه سه نمونه روانگرا خود را از دیگر نمونه‌ها جدا کرده‌اند ولی نمی‌توان به یک جمع‌بندی کلی در خصوص بیان استعداد روانگرایی مرتبط با این نمودار برای ماسه بابلسر دست‌یافت.

است از پارامتر دیگری با عنوان شاخص پارامتر حالت نسبی استفاده می‌شود. بولتون [۹] پارامتری را به نام شاخص تراکم نسبی  $I_R$  به‌عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری پتانسیل اتساع پذیری خاک‌های دانه‌ای معرفی نمود. کنراد [۱۰] با استفاده از شاخص تراکم نسبی  $I_R$  و ساده سازی کردن پارامتر حالت  $(\psi)$  با در نظر گرفتن  $e_{max} - e_{min}$  برای پیشنهاد شاخص پارامتر حالت نسبی ( $\xi_R$ ) به‌عنوان پارامتری مفید و مناسب‌تری از پارامتر حالت  $(\psi)$  در محل به‌صورت رابطه (۴) استفاده کردند:

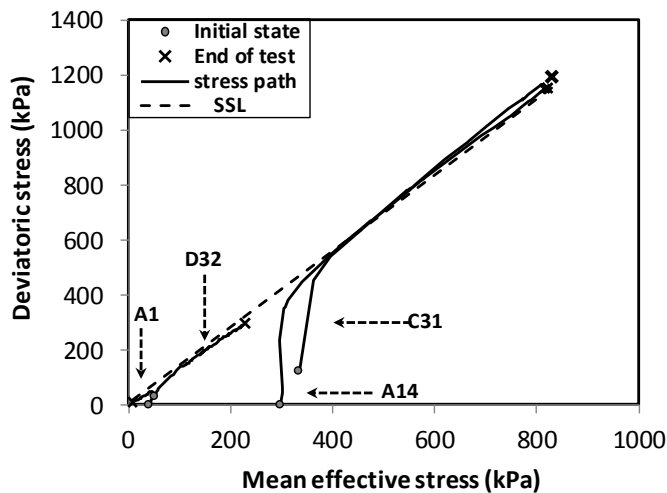
$$\xi_R = \frac{1}{Q - \ln\left(\frac{100p'}{pa}\right)} - Dr \quad (4)$$

$$p' = (1 + 2k_0)\sigma'_{v0}/3$$

که در رابطه بالا  $p'$  فشار همه‌جانبه مؤثر متوسط اولیه،  $Pa$  فشار اتمسفر،  $k_0$  فشار جانبی زمین در حالت سکون،  $\sigma'_{v0}$  تنش مؤثر قائم اولیه و  $Q$  یک مقدار تجربی بوده که به کانی و میزان خردشوندگی خاک بستگی دارد. برای اغلب ماسه‌های سیلیسی  $Q$  عددی حدود ۱۰ پیشنهاد شده است [۱۱]. جعفریان و همکاران [۱۲] شاخص پارامتر حالت نسبی را برای اصلاح نتایج آزمایش‌های سه محوری دوره‌ای برای کاربرد در محل اعمال کردند.

با جایگذاری نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی شده و زهکشی نشده ماسه بابلسر در رابطه اخیر، مقدار  $Q$  برای این نوع ماسه برابر با ۸/۲۸ می‌باشد درحالی‌که  $(\xi_R)$  بین ۰/۲۵ الی ۰/۳۵ - متغیر است. براین اساس، تراکم نسبی و تنش همه‌جانبه مؤثر متوسط به ترتیب بین ۸/۴۸ الی ۶۵ درصد و ۴۰ الی ۴۱۰ کیلوپاسکال بوده است. شکل (۸) فشار آب حفره‌ای اضافی در لحظه گسیختگی در مقابل شاخص پارامتر حالت نسبی برای سری A در شرایط (ICU) را نشان می‌دهد.

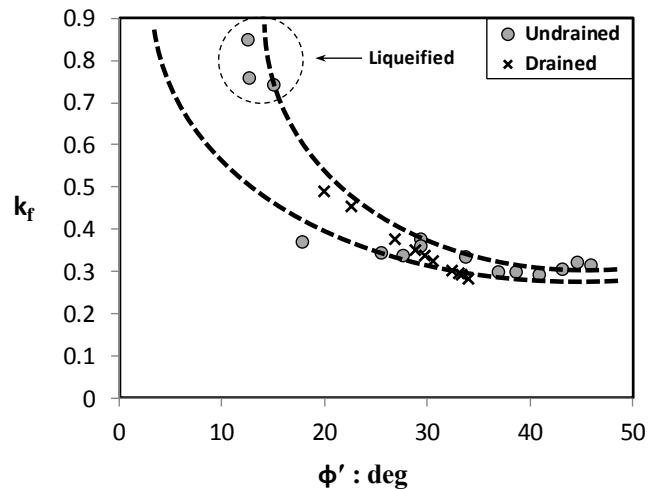
جدول (۱) آمده است. بنابراین، مشاهده می‌شود که باربرشی اولیه بطور قابل‌ملاحظه‌ای روی مسیرهای تنش و رفتار ماسه تأثیرگذار است. در حقیقت، مطالعه نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزایش تنش برشی اولیه باعث افزایش تنش‌های مؤثر متوسط و تنش‌های انحرافی در لحظه گسیختگی می‌شود. باین‌حال تمامی نمونه‌های همسان و ناهمسان به سمت خط حالت پایدار حرکت می‌کنند.



شکل (۱۰): مقایسه بین مسیرهای تنش مؤثر برای نمونه‌های تحکیم یافته همسان و ناهمسان

برای نمونه‌های همسان و ناهمسان، تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی در لحظه گسیختگی به فشار همه‌جانبه مؤثر اولیه ( $r_{II}$ ) در مقابل زاویه اصطکاک در لحظه گسیختگی ( $\phi'$ ) در شکل (۱۱) رسم شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، دو ناحیه بر اساس نوع تحکیم اولیه‌شان برای این نوع ماسه قابل‌تمایز می‌باشد. نمونه‌های با مقادیر مثبت ( $r_{II}$ ) که مشخص‌کننده رفتار خاک به صورت گسیختگی جریانی یا احتمالاً گسیختگی جریانی محدود شونده هستند که این حالت در آزمایش‌های مربوط به حالت تحکیم یافته همسان رخ می‌دهند. در هر صورت، ناهمسان بودن نمونه نشان‌دهنده گسیختگی جریانی محدود شونده با مقدار خیلی کم ( $r_{II}$ )، (شکل ۱۱) است. ناحیه پایینی شکل (۱۱) که از آزمایش‌های ناهمسان بدست آمده است نشان‌دهنده تمایل کم نمونه‌های ناهمسان به روانگرایی جریانی است.



شکل (۹): فشار جانبی زمین در لحظه گسیختگی در مقابل زاویه اصطکاک در همان لحظه گسیختگی برای نمونه‌های تحکیم یافته همسان تحت شرایط زهکشی و زهکشی نشده

#### ۷- تأثیر بار ناهمسان

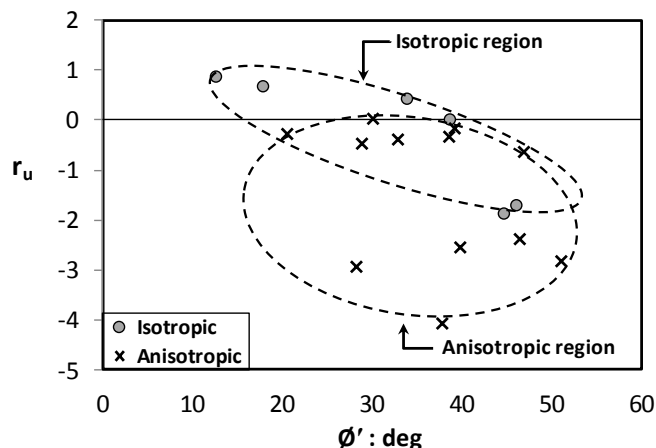
شکل (۱۰) مسیرهای تنش مؤثر دو نمونه سست A1 و D32 و دو نمونه متراکم A14 و C31 را در فضای  $q-p'$  نشان می‌دهد. مسیر تنش برای نمونه‌ی روانگرایی A1 از تنش مؤثر متوسط ۴۰ کیلوپاسکال شروع می‌شود، درحالی‌که تراکم نسبی پس از تحکیم این نمونه ۸/۴۸ درصد بوده است. هنگامی‌که باربرشی محوری اولیه در شرایط زهکشی شده برای فراهم کردن تحکیم ناهمسان به نمونه اعمال می‌شود، نمونه رفتاری متفاوت نشان می‌دهد. برای مثال نمونه D32 که تحت شرایط تحکیم یافته ناهمسان با پارامتر برشی ۰/۴ (کیلوگرم ۶/۲۸ = باربرشی اولیه) می‌باشد رفتاری منبسط شونده از خود نشان می‌دهد درحالی‌که تراکم نسبی آن تقریباً برابر نمونه A1 است. براین‌اساس، مقاومت برشی نمونه D32 افزایش چشمگیری (۹۶/۷۵ درصد) داشته درحالی‌که تنش انحرافی اولیه آن از نمونه A1 افزایش خیلی بیشتری ندارد (تنش انحرافی اولیه برابر صفر برای نمونه A1 و ۳۲ کیلوپاسکال برای نمونه D32 می‌باشد). از این‌رو، اگرچه تنش مؤثر متوسط اولیه  $p'_0 = 50/66$  کیلوپاسکال) بزرگ‌تر از نمونه A1 ( $p'_0 = 40$  کیلوپاسکال) است، خاک رفتاری منبسط شونده در شرایط تحکیم یافته ناهمسان داشته است. به‌هرحال، بر طبق مفهوم پارامتر حالت، می‌توان انتظار داشت که خاک با افزایش تنش مؤثر در یک تراکم نسبی ثابت رفتاری منقبض شونده تری از خود نشان می‌دهد. رفتاری مشابه برای نمونه‌های متراکم A14 و C31 اتفاق می‌افتد اما با این تفاوت که اختلاف نقطه شروع مسیر تنش در دو نمونه اخیر بسیار قابل‌ملاحظه‌تر از نمونه‌های سست است. جزئیات نمونه‌های A14 و C31 در

گسیخته می‌شوند بزرگ‌تر است و علامت تغییر فشار آب حفره‌ای همانند جهت حرکت نمونه به‌سوی خط حالت بحرانی می‌باشد. برای ماسه تمیز بابلسر تحت شرایط برشی زهکشی نشده، نرخ فشار آب حفره‌ای در مقابل  $p'_u/p'_f$  برای شرایط (ICU) و (ACU) در شکل (12b) نشان داده شده است. علامت مثبت  $(\delta u/p'_f)/\delta \varepsilon_s$  مشخص‌کننده رفتار منقبض شونده بوده و برعکس. همانند آزمایش‌های زهکشی شده، همانگونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود نمونه‌های همسان دارای مقادیر مثبت و صفر هستند درحالی‌که اکثریت داده‌های ناهمسان مقادیری منفی دارند.

#### ۸- نتیجه‌گیری

این مقاله نتایج مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های سه محوری استاتیکی زهکشی شده و نشده برای نمونه‌های تحکیم یافته همسان و ناهمسان ماسه تمیز بابلسر که در گستره وسیعی از سواحل دریای مازندران گسترده شده است را ارائه می‌دهد. آزمایش‌ها، در سطوح مختلفی از تراکم نسبی  $8/48$  تا  $68/12$  درصد و با تنش‌های همه‌جانبه مؤثر اولیه  $40$  الی  $410$  کیلوپاسکال اختصاص داده شده است. نتایج در چارچوب مفهوم پارامتر حالت و استعداد روانگرایی برای این نوع ماسه تحلیل شده و نتایج به شرح ذیل جمع‌بندی شده است:

- ۱- ماسه بابلسر می‌تواند تمامی رفتارهای ممکن روانگرایی خاک از قبیل: روانگرایی کامل، روانگرایی محدود شونده و حالت منبسط شونده را تجربه کند.
- ۲- تحلیل نتایج حاکی از آن است که رفتار ماسه از حالت منبسط شونده به حالت منقبض شونده به علت افزایش تنش مؤثر همسان اولیه متغیر است.
- ۳- پارامتر حالت و شاخص پارامتر حالت نسبی می‌تواند بیان‌کننده استعداد ماسه در منبسط یا منقبض شونده بودن آن در لحظه گسیختگی در طول بارگذاری به‌صورت زهکشی شده یا نشده باشد. این درحالیست که پارامتر حالت نسبت به شاخص پارامتر حالت نسبی خطای  $6/67$  درصد در ارزیابی استعداد روانگرایی از خود نشان می‌دهد.
- ۴- پارامتر حالت و مقاومت روانگرایی استاتیکی باهم متناسب هستند به‌گونه‌ای که نمونه‌های روانگرایی A1، A2 و A3 در مقایسه کمی و کیفی نسبت به نمونه‌های غیر روانگرایی A11، A12 و A13 به‌طور میانگین افزایش پارامتر حالت حدود  $6$  الی  $8$  برابر را دارند. در حقیقت، استعداد روانگرایی با افزایش پارامتر حالت کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱): تغییرات نسبت فشار حفره‌ای اضافی در لحظه گسیختگی در مقابل زاویه اصطکاک در همان لحظه برای نمونه‌های تحکیم یافته همسان و ناهمسان

برای آزمایش‌های زهکشی شده، پاری [۱۳] نرخ تغییر حجم در لحظه گسیختگی را در مقابل نرخ  $p'_u/p'_f$  که تنش مؤثر متوسط روی خط حالت پایدار در یک حجم ویژه یکسان و  $p'_f$  تنش مؤثر متوسط در لحظه گسیختگی می‌باشد را ارزیابی کرد. نرخ تغییر حجم، بیان‌کننده نرخ تغییرات کرنش حجمی  $\delta \varepsilon_v$  به تغییرات کرنش محوری  $\delta \varepsilon_a$  است. درواقع، نرخ تغییر حجم توصیف‌کننده نرخ حرکت به سمت خط حالت پایدار در لحظه گسیختگی است. همچنین یک همبستگی واضحی بین  $\delta \varepsilon_v/\delta \varepsilon_a$  و  $p'_u/p'_f$  برقرار می‌باشد. پاری [۱۳] مشخص کرد که نرخ حرکت به سمت خط حالت پایدار با افزایش فاصله بین حالت گسیختگی و حالت نهایی، در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برای ماسه بابلسر تحت شرایط تحکیم یافته همسان و ناهمسان زهکشی شده (سری‌های B، E و F) مقادیر  $-\delta \varepsilon_v/\delta \varepsilon_a$  در مقابل  $p'_u/p'_f$  در شکل (12a) نشان داده شده است. برای شرایط (ICD)، خط رسم شده برای نمونه‌های همسان در  $p'_u = 0/97 p'_f$  (نقطه H) در حالت گسیختگی نرخ تغییر حجم برابر صفر می‌باشد. بنابراین نمونه‌هایی که دارای مقادیر مثبت  $-\delta \varepsilon_v/\delta \varepsilon_a$  هستند نشان‌دهنده رفتار منبسط شونده در لحظه گسیختگی می‌باشند و برعکس. مقایسه بین علامت و مقدار  $-\delta \varepsilon_v/\delta \varepsilon_a$  برای دو شرایط مختلف تنش اولیه مشخص می‌نماید که نمونه‌های تحکیم یافته ناهمسان گرایش بیشتری به حالت منبسط شونده دارند. همچنین برای آزمایش‌های زهکشی نشده، پاری [۱۳] نرخ تغییر فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی  $(\delta u/p'_f)/\delta \varepsilon_s$  را در مقابل  $p'_u/p'_f$  آزمایش کرد. نرخ تغییرات فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی برای نمونه‌هایی که در فاصله دورتری از خط حالت بحرانی

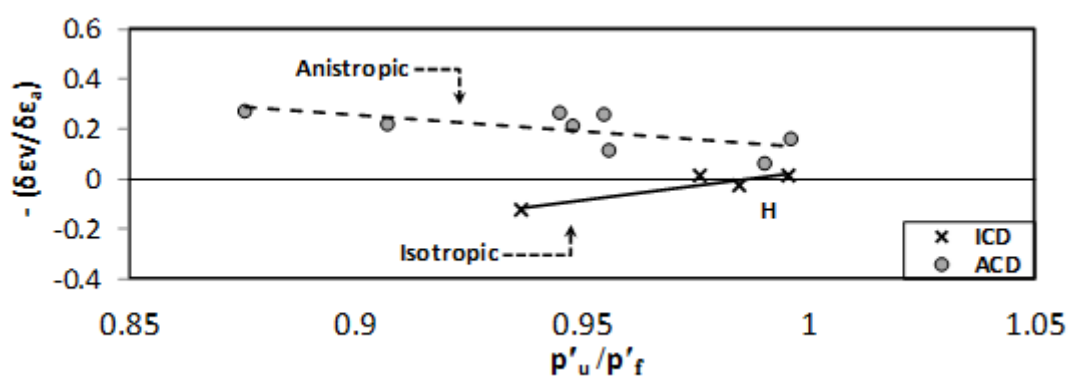
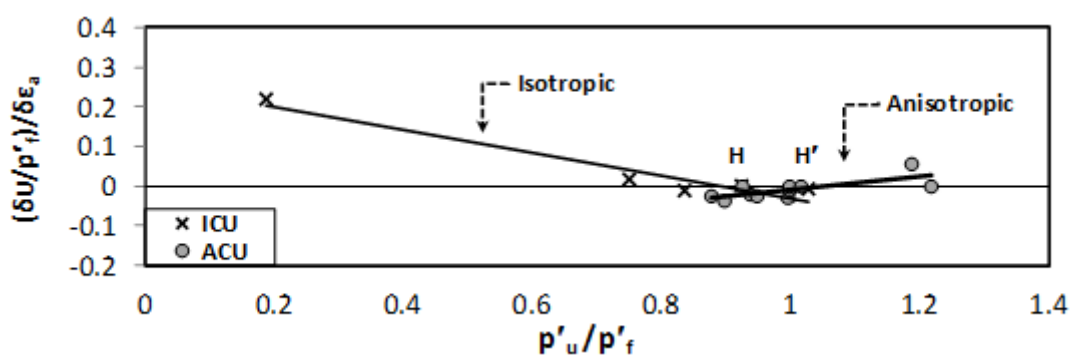
$k_0$ : فشار جانبی خاک در حالت سکون  
 $k_f$ : فشار جانبی خاک در حالت گسیختگی  
 $I_R$ : شاخص تراکم نسبی  
 $P'$ : تنش مؤثر متوسط اصلی  
 $P'_0$ : تنش مؤثر متوسط همه‌جانبه اولیه  
 $P_a$ : فشار اتمسفر  
 $q$ : تنش انحرافی  
 $Q$ : یک مقدار تجربی که وابسته به نوع کانی و خردشوندگی خاک است  
 $\tau_u$ : نسبت فشار آب حفره‌ای اضافی  
 $\sigma'_0$ : فشار همه‌جانبه مؤثر اولیه  
 $\sigma'_1$ : تنش مؤثر اصلی بزرگ‌تر  
 $\sigma'_{1f}$ : تنش مؤثر اصلی بزرگ‌تر در لحظه گسیختگی  
 $\sigma'_3$ : تنش مؤثر اصلی کوچک‌تر  
 $\psi$ : پارامتر حالت  
 $\xi_R$ : شاخص پارامتر حالت نسبی  
 $\alpha$ : پارامتر برشی  
 $\phi'_{ss}$ : زاویه اصطکاک بر روی خط حالت پایدار  
 $\phi'_{cs}$ : زاویه اصطکاک بر روی خط حالت بحرانی  
 $\delta\varepsilon_s$ : نمو کرنش برشی  
 $\delta u$ : نمو فشار آب حفره‌ای  
 $\eta$ : نسبت تنش انحرافی در لحظه گسیختگی به تنش مؤثر متوسط در همان لحظه  
 $\sigma'_{v0}$ : تنش مؤثر قائم اولیه  
 $P_a$ : فشار اتمسفر  
 $\delta\varepsilon_v$ : نمو کرنش حجمی  
 $\delta\varepsilon_a$ : نمو کرنش محوری

۵- مشاهده شده است که برش زهکشی شده اولیه روی مسیر تنش و از این رو روی رفتار ماسه تأثیرگذار است. ضمناً، خط حالت پایدار برای نمونه‌های تحکیم یافته همسان و ناهمسان یکسان و یکتا می‌باشد.

۶- مطابق نتایج بدست آمده از تحقیق اخیر روی ماسه بابلسر، وجود باربرشی اولیه که مربوط به شرایط تنش ناهمسان می‌باشد ممکن است رفتار ماسه را از حالت منقبض شونده به رفتاری منبسط شونده تغییر دهد، به نحوی که با مقایسه دو نمونه با تراکم نسبی یکسان، مقاومت برشی نمونه ناهمسان D32 که تحت باربرشی اولیه ۰/۴ قرار دارد نسبت به نمونه روانگرای و همسان A1 افزایشی معادل ۹۶/۷۵ درصد را تجربه می‌کند. از این رو، نهشته‌های ماسه‌ای که در زیر پی ساختمان‌ها قرار دارند و میزان قابل توجهی تنش برشی اولیه را تحمل می‌کنند ممکن است تمایل قابل ملاحظه‌ای به رفتار منبسط شونده داشته و استعداد کمتری به روانگرایی که نوعی گسیختگی می‌باشد، را از خود نشان دهند.

#### ۹- ضمایم

$B$ : پارامتر فشار آب حفره‌ای اسکمپتون  
 $D_r$ : تراکم نسبی قبل از تحکیم نمونه  
 $(D_r)_c$ : تراکم نسبی بعد از تحکیم نمونه  
 $(D_r)_{cr}$ : تراکم نسبی بحرانی  
 $D_{r,cs}$ : تراکم نسبی بروی خط حالت بحرانی  
 $e$ : نسبت تخلخل  
 $e_{ss}$ : نسبت تخلخل روی خط حالت پایدار  
 $e_{cs}$ : نسبت تخلخل روی خط حالت بحرانی  
 $e_{max}$ : نسبت تخلخل ماکزیمم  
 $e_{min}$ : نسبت تخلخل ماکزیمم  
 $G_s$ : چگالی ویژه



شکل (۱۲): (a) نرخ تغییر حجم در زمان گسیختگی در آزمایش زهکشی نشده برای شرایط همسان و ناهمسان (b) نرخ تغییرات فشار منفذی در آزمایش های زهکشی نشده برای شرایط همسان و ناهمسان

جدول (۲): خلاصه ای از نتایج آزمایش های سه محوری استاتیکی انجام شده در این مطالعه

شماره	سری	نوع تحکیم	$(D_r)_c$ (درصد)	پس فشار (درصد)	B value (درصد)	$(D_r)_{cr}$ (درصد)	$P'_0$ (کیلو پاسکال)	$\alpha (\tau/\sigma'_{3c})$
1	A	CIU	8.48	48	>97		40	0
2	A	CIU	11.77	49	>98		110	0
3	A	CIU	15.07	58	>95		210	0
4	A	CIU	18.37	51	>97		300	0
5	A	CIU	20.2	54	100		410	0
6	A	CIU	33	42	>95		40	0
7	A	CIU	36.54	50	>95		110	0
8	A	CIU	41.49	51	>98		210	0
9	A	CIU	42	53	>97		300	0
10	A	CIU	42.55	53	>96		410	0
11	A	CIU	56.87	81	>98		40	0
12	A	CIU	59.77	52	100		110	0
13	A	CIU	61.3	53	>96		210	0
14	A	CIU	62.73	52	>98		300	0
15	A	CIU	65.05	53	>96		410	0
16	B	CID	7.93	52	>96	3.33	40	0
17	B	CID	10.52	47	>95	5.6	110	0
18	B	CID	13.61	45	>98	9.74	210	0
19	B	CID	18.37	44	100	13.95	300	0
20	B	CID	22.47	45	>97	36.51	410	0
21	B	CID	57.39	52	>95	29.11	40	0
22	B	CID	58.44	43	>95	31.63	110	0
23	B	CID	61.3	51	>98	37.78	210	0
24	B	CID	64.44	44	>95	49.76	300	0
25	B	CID	64.95	47	100	45.15	410	0
26	C	CAU	9.39	41	>97		45.34	0.2
27	C	CAU	19.83	53	100		340	0.2
28	C	CAU	34.06	51	>98		45.34	0.2
29	C	CAU	40.25	43	>95		340	0.2
30	C	CAU	57.21	51	>96		45.34	0.2
31	C	CAU	64.03	52	100		340	0.2
32	D	CAU	9.03	52	>97		50.66	0.4
33	D	CAU	18.91	54	>96		380	0.4
34	D	CAU	33.36	51	>96		50.66	0.4
35	D	CAU	42.2	43	>98		380	0.4
36	D	CAU	57.04	44	>95		50.66	0.4
37	D	CAU	68.12	48	>97		380	0.4
38	E	CAD	7.45	44	>97	8.95	45.34	0.2
39	E	CAD	17.78	46	>96	11.59	340	0.2
40	E	CAD	57.21	47	100	29.91	45.34	0.2
41	E	CAD	63.48	48	>97	41.31	340	0.2
42	F	CAD	7.67	74	>96	4.46	50.66	0.4
43	F	CAD	17.63	75	>96	15.4	380	0.4
44	F	CAD	57.32	40	>98	35.11	50.66	0.4
45	F	CAD	63.79	77	>98	42.14	380	0.4

- ۱۰- مراجع
- Casagrande, A.; "Liquefaction and cyclic deformation of sands", a critical review. Proc. 5<sup>th</sup> Pan American Conf. Soil Mech, Fdn, Engng, Buenos Aires, Vol. 5, pp. 80-133, 1975. [۸]
- Bolton, M. D.; "The strength and dilatancy of sands", Geotechnique, Vol. 36, pp. 65-78, 1986. [۹]
- Konrad. JM.; "Interpretation of flat plate dilatometer tests in sands in terms of the state parameter", Geotechnique, Vol. 38, pp. 263-77, 1988. [۱۰]
- Boulanger. RW.; "High overburden stress effects in liquefaction analyses", J. Geotech. Geoenviron. Eng, ASCE, Vol. 129, pp. 71-82, 2003. [۱۱]
- Jafarian, Y.; Sadeghi, A.; Vakili, R., Baziar, M.H.; "Probabilistic correlation between laboratory and field liquefaction potentials using relative state parameter index ( $\xi_R$ )", Soil Dyn, Earthq, Eng, Vol. 30, pp. 1061-1072, 2010. [۱۲]
- Parry, R. H. G.; "Discussion", Geotechnique, Vol. 8, pp. 183-186, 1958. [۱۳]
- Castro, G.; "Liquefaction of sand", PhD thesis. Division of Engineering and applied Physics, Harvard University, 1969. [۱]
- Della, N.; Arab, A.; Belkhatir, M.; "Static liquefaction of sandy soil: An experimental investigation into the effects of saturation and initial state", Acta Mech, Vol. 218, pp. 175-186, 2011. [۲]
- Castro, G.; Poulos, S. J.; "Factors affecting liquefaction and cyclic mobility", J. Geotech. Engng Div. Am. Soc, Civ. Engrs, Vol. 103, pp. 501-516, 1977. [۳]
- Poulos, S. J.; "The steady state of deformation", J. Geotech. Engng Div. Am. Soc. Civ. Engrs, Vol. 107, GT5, pp. 553-562, 1981. [۴]
- Been, K.; Jefferies, M.G.; "A state parameter for sands", Geotechnique, , Vol. 35, pp. 99-112, 1985. [۵]
- Jafarian, Y.; Ghorbani, A.; Salamatpoor, S.; "Experimental study on shear resistance of Babolsar sand under anisotropic consolidation", 3<sup>rd</sup> International conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical engineering, Cyprus, 2012. [۶]
- Bobei, D. C.; Wanatowski, D.; "Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines", Can Geotech. J. Vol. 46, pp. 281-295, 2009. [۷]