

# بررسی رفتار ماسه‌ها تحت بارگذاری دوره‌ای

فریدون رضایی\*

پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۳

## چکیده

بررسی رفتار ماسه‌های تحت اثر بارهای مونوتون و چرخه‌ای استاتیکی یا دینامیکی، نظر ژئوتکنسین‌ها را به خود معطوف داشته است. این مقاله نتایج حاصل از بارگذاری چرخه‌ای در ماسه‌های سست و متراکم سیلیسی و کربنات‌دار را با استفاده از جعبه برش مستقیم تغییر یافته، نشان می‌دهد. نیمه زیرین جعبه برش با جابه‌جایی ورق فلزی پوشیده شده از دانه‌های شن و ماسه در سطح آن تغییر یافته است. متغیرهای مختلف همچون نوع ماسه، چگالی، شرایط حدواسط، تعداد و نوع چرخه بارگذاری برای بررسی رفتار خاک-خاک و خاک-سازه تحت شرایط بارگذاری مونوتون و بارگذاری چرخه‌ای مطالعه شدند. نتایج نشان داد که دو نوع ماسه آزمایش شده، در آغاز بارگذاری رفتار انقباضی و در ادامه رفتار انبساطی پیدا می‌کنند. نیروهای برشی و عادی در طی آزمایش کاهش می‌یابند که مقدار کاهش برای ماسه کربنات‌دار بیشتر از ماسه سیلیسی است. کاهش نیروهای برشی و عادی با کاهش تراکم ماسه افزایش یافته است. این رفتار کاهش نیروها در آزمایش با حجم ثابت تحت بارگذاری چرخه‌ای، شبیه به پدیده روانگرایی است و این نتایج می‌تواند در حل مشکلات ارزیابی روانگرایی، کارگشا باشد.

**کلیدواژه‌ها:** بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای، پدیده روانگرایی، رفتار انقباضی و انبساطی، دستگاه برش مستقیم اصلاح شده.

\*نویسنده مسئول: فریدون رضایی

E-mail: rezaie.f@ries.ac.ir

## ۱- مقدمه

با توجه به گستردگی خسارات ناشی از مخاطرات طبیعی مانند پدیده روانگرایی، لازم است، مطالعات گسترده‌ای در این زمینه صورت گیرد، تا بتوان تأثیر بارهای گوناگون را که باعث تشدید پدیده روانگرایی می‌شود، مشخص کرد. بنابراین، می‌توان برای پیشگیری و یا کاهش خسارات وارده، اقدامات لازم را صورت داد. تاکنون، مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های Mohkam (1983) در آزمایش‌های خاک-خاک مونوتون و چرخه‌ای با دستگاه سه محوری بر روی ماسه هوستون کوارتزی، اشاره کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در آزمایش بر روی خاک شل در حالت زهکشی شده و یا زهکشی نشده، رفتار ماسه در ابتدای آزمایش، انقباض و در پایان حالت اتساع است. مقدار اتساع بستگی به مقدار نیروی قائم اولیه و یا فشار در برگیرنده دارد. همچنین نتایج پژوهش‌ها (Golightly & Hyde, 1989)، در آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی ماسه آهک‌دار نشان می‌دهد، که رفتار خاک بستگی شدید به فشار در برگیرنده دارد. برای فشارهای در برگیرنده ضعیف ( $P_c < 50 \text{ kPa}$ )، ماسه یک رفتار اتساعی قوی از خود نشان می‌دهد و نمونه آشکار آن با یک اوج (پیک) مشخص می‌شود. با افزایش فشار، رفتار اتساعی کم و با فشارهای ( $P_c > 300 \text{ kPa}$ )، رفتار خاک انقباضی می‌شود و اوج مشاهده نمی‌شود.

پژوهش در زمینه بارگذاری چرخه‌ای و مونوتون، در منطقه حدواسط میان خاک و سازه در حد ناچیز انجام گرفته است (Desai et al., 2005; Pradhan & Desai, 2006; Jewel & Worth, 1987). در این پژوهش، در حد امکان سعی شده است یک بانک اطلاعاتی قوی در زمینه‌های تئوریک و آزمایشگاهی، ایجاد شود. آزمایش‌های گوناگون بر روی متغیرهای مختلفی همچون نوع ماسه، چگالی خاک، نوع سطح سازه، شرایط تحمیل شده در جهت عمودی، نوع بارگذاری عمودی و شکل و تعداد چرخه‌های بارگذاری بر روی این سطح مشترک انجام پذیرفت.

## ۲- نوع خاک‌های مورد مطالعه

آزمایش‌ها بر روی دو نوع خاک ماسه کوارتزی هوستون و ماسه آهکی کیو، انجام شده است (شکل ۱). ماسه هوستون، با دانه‌بندی متوسط، کوارتزیک، یکنواخت، صاف، سخت و مقاوم در برابر شکست اما ماسه کیو، با دانه‌بندی متوسط، نوک تیز،

غیریکنواخت، با مقدار زیادی کربنات کلسیم و کمی مقاوم در برابر شکست است. برای تعیین متغیرهای زاویه اصطکاک داخلی و مقدار چسبندگی، اقدام به حفر گمانه به روش حفاری ماشینی، برای تهیه نمونه‌های دست خورده و دست‌نخورده شده است.

## ۳- نتایج آزمایش‌های خاک و سازه با دستگاه برش مستقیم

حدود ۵۰ آزمایش برای بررسی و درک تأثیر اصلی متغیرهای گوناگون مانند نوع ماسه (کوارتزی هوستون و یا آهکی کیو)، چگالی خاک (سست یا متراکم)، نوع سطح سازه (صاف یا زبر)، شرایط تحمیل شده در جهت عمودی (تنش یا حجم ثابت)، نوع بارگذاری عمودی (مونوتون یا چرخه‌ای)، شکل و تعداد چرخه‌های بارگذاری، بر روی این سطح مشترک انجام شد (جدول ۱). سطح زیر سازه با چسباندن ماسه بر روی قطعه فولادی (جایگزین بخش زیرین جعبه برش) (شکل ۲) ایجاد شد (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

## ۴- بارگذاری مونوتون

با توجه به نتایج آزمایش در روی ماسه هوستون متراکم در حالت زهکشی نشده و با نیروی قائم اولیه 100, 300 kPa (شکل ۳) مشاهده می‌شود که تنش عادی در ابتدای آزمایش کاهش می‌یابد و سپس با افزایش (از تغییر مکان برشی حدود ۰/۳ میلی‌متر) به نقطه اوج در تغییر مکان برشی حدود ۴ میلی‌متر می‌رسد (Rezaie, 2002).

شکل ۳- d، تحول تنش عادی در آزمایش زهکشی نشده را با تحول کرنش عادی در آزمایش زهکشی شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، تحول تنش عادی (کاهش و افزایش)، با تحول کرنش عادی (رفتار انقباضی و اتساعی)، کاملاً همخوانی دارد. آنچه درباره تحول تنش برشی می‌توان گفت این است که در ابتدای بارگذاری، افزایش سریع نیروی برشی تا رسیدن به نقطه اوج (در تغییر مکان برشی حدود ۴ میلی‌متر) دیده می‌شود. همچنین، بیشینه تنش برشی، تابع نیروی قائم اولیه است. بلوکه کردن کرنش عادی، باعث افزایش مقاومت برشی (در اثر رفتار اتساعی ماسه متراکم) و در نتیجه، افزایش تنش عادی می‌شود. شکل ۳- c، تحولات و دگرگونی صفحه تنش را نشان می‌دهد؛ تنش برشی به سرعت افزایش می‌یابد تا به یک سطح حدی برسد و مماس با این سطح حدی افزایش می‌یابد (سطح حدی

گسیختگی). سپس مماس بر سطح حدی دیگری، کاهش می‌یابد (سطح حدی ثابت) (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

در نتایج آزمایش بر روی ماسه هوستون شل در حالت زهکشی نشده و با نیروی قائم اولیه 100,200,300 kPa (شکل ۴) مشاهده می‌شود که تنش عادی در تمام طول آزمایش کاهش می‌یابد و این به دلیل رفتار انقباضی در سطح مشترک است. با تنش برشی در ابتدای بارگذاری، به سرعت تا رسیدن به نقطه اوج افزایش و سپس به علت کاهش تنش عادی، کاهش می‌یابد. شکل ۴- c، تحولات و دگرگونی صفحه تنش را نشان می‌دهد، تنش برشی به سرعت افزایش می‌یابد تا به یک سطح حدی برسد، سپس مماس با این سطح حدی کاهش می‌یابد (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

آزمایش در حالت زهکشی نشده با تنش برشی کنترل شده میان  $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$  بر روی ماسه آهک‌دار با چگالی متراکم و شل، در محدوده پیش از رسیدن به نقطه اوج در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، این نوع بارگذاری باعث کاهش سختی در چرخه‌های اولیه می‌شود. رفتار انقباضی ماسه در طول بارگذاری نیروهای عادی و برشی کاهش می‌دهد که این کاهش در چرخه‌های اولیه آشکارا و با سرعت بیشتری انجام می‌شود و درجه سرعت کاهش در چگالی شل، آشکارتر و همچنین، نسبت این کاهش در مقایسه آن با خاک‌های ماسه هوستون، بیشتر است (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

## ۶- نتیجه‌گیری

از بررسی رفتار استاتیک چرخه‌ای در ماسه‌ها در آزمایشگاه، به وسیله دستگاه برش مستقیم اصلاح شده برای انواع آزمایش‌های خاک- خاک و خاک- سازه در حالت حجم ثابت (شبه پدیده روانگرایی)، نتایج قابل قبولی به دست می‌آید.

- نوع ماسه، چگالی خاک، شکل و تعداد چرخه‌های بارگذاری، تأثیر زیادی بر رفتار استاتیکی چرخه‌ای دارند.

- درجه سرعت کاهش نیروی عادی و برشی در ماسه آهک‌دار در مقایسه آن با خاک‌های ماسه کوارتزی بیشتر است.

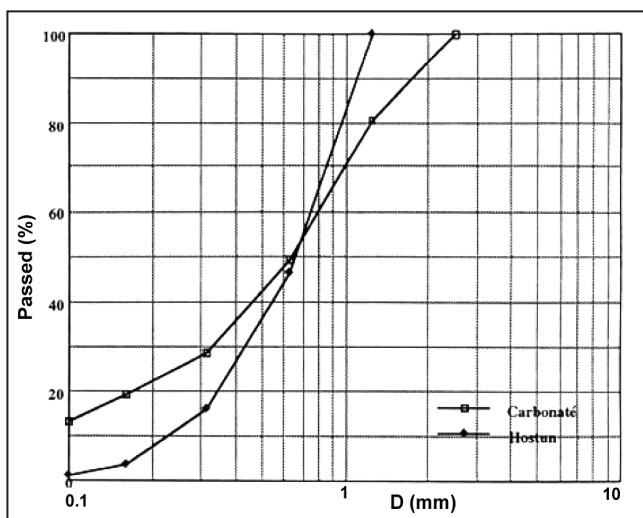
- درجه سرعت کاهش نیروی عادی و برشی در ماسه با چگالی شل، آشکارتر از مقدار آن در ماسه با چگالی متراکم است.

- در هر تغییر نیرو، رفتار انقباضی باعث کاهش بسیار زیاد در نیروهای عادی و برشی می‌شود و درجه انقباض با افزایش چرخه‌ها، کاهش می‌یابد.

- کاهش نیروی عادی با افزایش فشار آب منفذی متناسب و در پایان با از میان رفتن تمامی نیروی عادی و بیشینه شدن فشار آب منفذی همراه است.

## سپاسگزاری

این پروژه در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه علوم و تکنولوژی لیل یک فرانسه (Lille 1-France) و پژوهشکده علوم زمین انجام یافته است. در اینجا از زحمات جناب آقای پروفیسور شهرور، رییس دانشکده مکانیک شهر لیل فرانسه تشکر می‌کنیم.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد آزمایش.

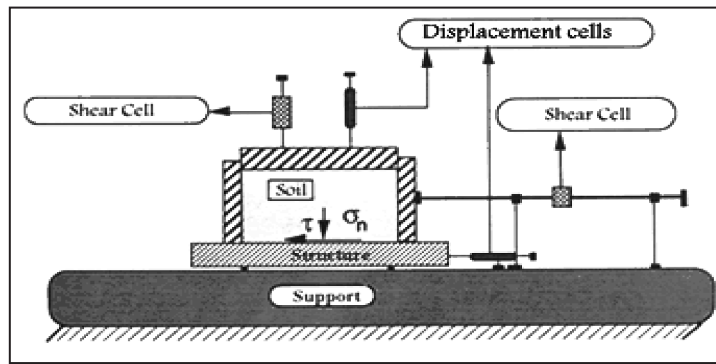
## ۵- بارگذاری چرخه‌ای

نتایج آزمایش‌ها بر روی ماسه آهک‌دار و ماسه هوستون کوارتزی با نیروی قائم اولیه 100 kPa نمایش داده می‌شود (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

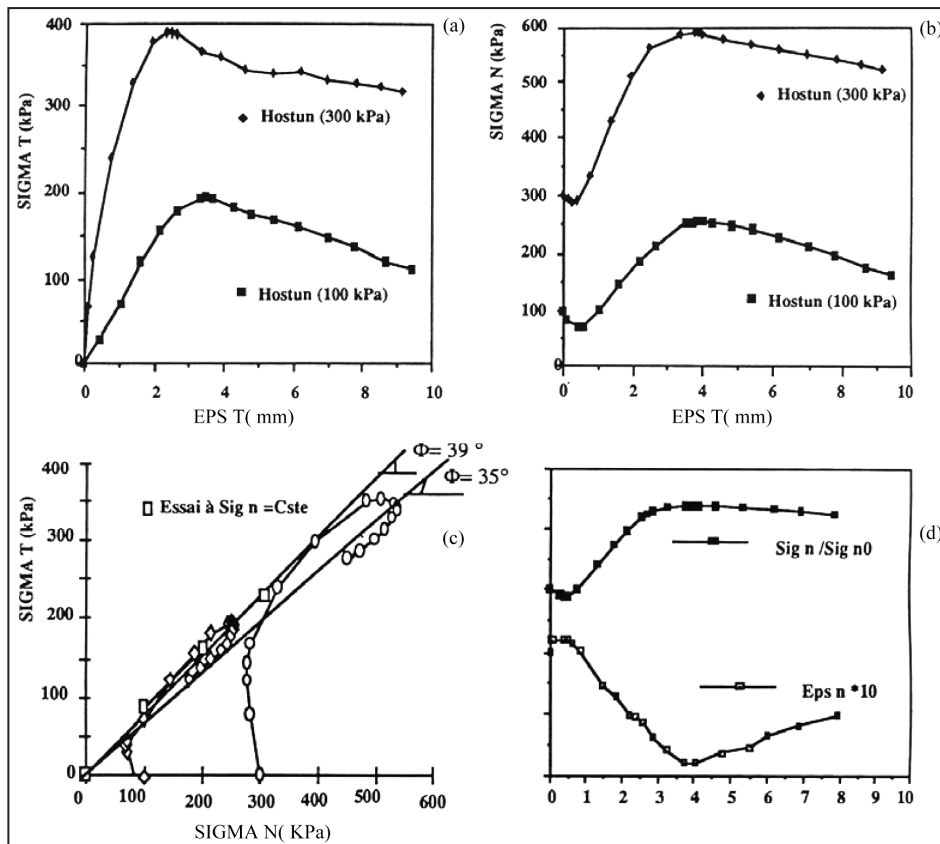
آزمایش در حال زهکشی شده بر روی ماسه هوستون متراکم با تغییر مکان برشی کنترل شده میان  $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$  و در محدوده پیش از رسیدن به نقطه اوج در شکل ۵ نشان داده شده است. بارگذاری چرخه‌ای باعث کاهش نیروی برش متحرک در طول دوره بارگذاری می‌شود. این کاهش پس از ۲۰ چرخه، به حدود ۶kPa می‌رسد. این پدیده را می‌توان، نرم‌شوندگی چرخه‌ای نامید. همچنین می‌توان اشاره کرد که چرخه‌های بارگذاری به تدریج از چرخه دوم شروع به بسته شدن می‌کنند. آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده میان  $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$  بر روی ماسه هوستون متراکم در شکل ۶ نشان داده شده است. بارگذاری چرخه‌ای در تغییر جهت بارگذاری، باعث کاهش نیروی عادی می‌شود. این پدیده رفتار انقباضی ماسه را در هر چرخه به خوبی بیان می‌کند. این کاهش نیروی عادی باعث کاهش تنش برشی می‌شود که این کاهش برای چرخه‌های اولیه بسیار محسوس است (شبه پدیده روانگرایی).

آزمایش در حالت زهکشی شده با تغییر مکان برشی کنترل شده میان  $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$  بر روی ماسه هوستون کوارتزی با چگالی شل، در محدوده پیش از رسیدن به نقطه اوج در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس این شکل، تنش برشی متحرک در طول بارگذاری چرخه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش در چرخه‌های اولیه سرعت زیادی دارد و این افزایش در چرخه‌های آخری (چرخه بیستم) ثابت می‌شود. این حالت پدیده سخت‌شوندگی چرخه‌ای در سطح مشترک را بیان می‌کند. در مورد تغییر مکان قائم می‌توان چنین بیان کرد که بارگذاری چرخه‌ای یک رفتار انقباضی را در طول بارگذاری شامل می‌شود. اما اگر یک دوره چرخه را مورد بررسی قرار دهیم خواهیم دید که در ابتدای بارگذاری، رفتار انقباضی است و سپس انبساطی می‌شود که این رفتار با حالت چرخه‌ای خاک با خاک تفاوت دارد. زیرا در رفتار خاک- خاک و در تمام طول دوره چرخه، رفتار انقباضی است. همچنین باید اضافه کرد، که درجه انقباض با افزایش چرخه‌ها کاهش می‌یابد (Rezaie, 1994; Rezaie & Shahrour, 1997; Rezaie, 2002).

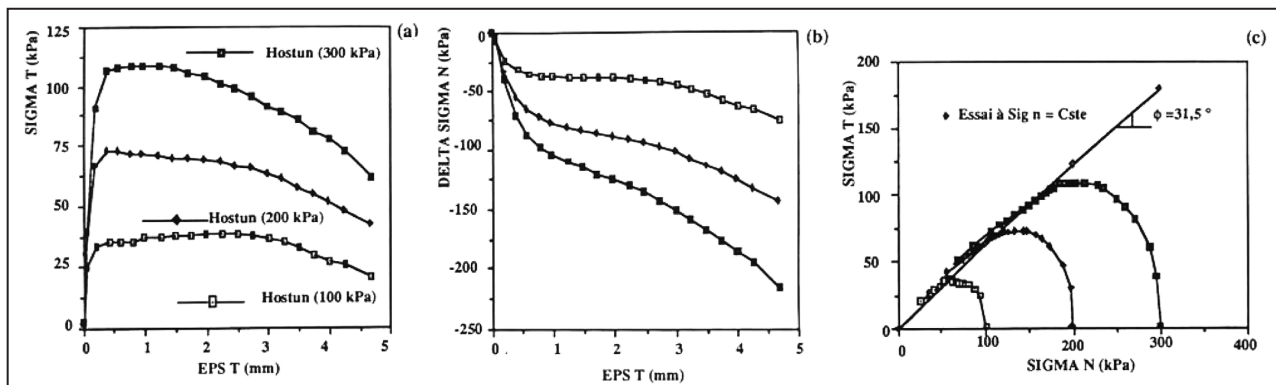
آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده میان  $-1\text{mm} \leq \gamma \leq +1\text{mm}$  بر روی ماسه هوستون کوارتزی با چگالی شل، در محدوده پیش از رسیدن به نقطه اوج در شکل ۸ نشان داده شده است. نیروی عادی در طول بارگذاری چرخه‌ای، با افزایش تعداد چرخه‌ها کاهش می‌یابد. در هر تغییر نیرو، رفتار انقباضی، باعث کاهش بسیار زیاد در نیروهای عادی و برشی می‌شود. این کاهش در چرخه‌های اولیه با سرعت زیادی همراه است و در پایان باعث از میان رفتن مقاومت برشی و نیروی عادی، در چرخه‌های آخری می‌شود (شبه پدیده روانگرایی).



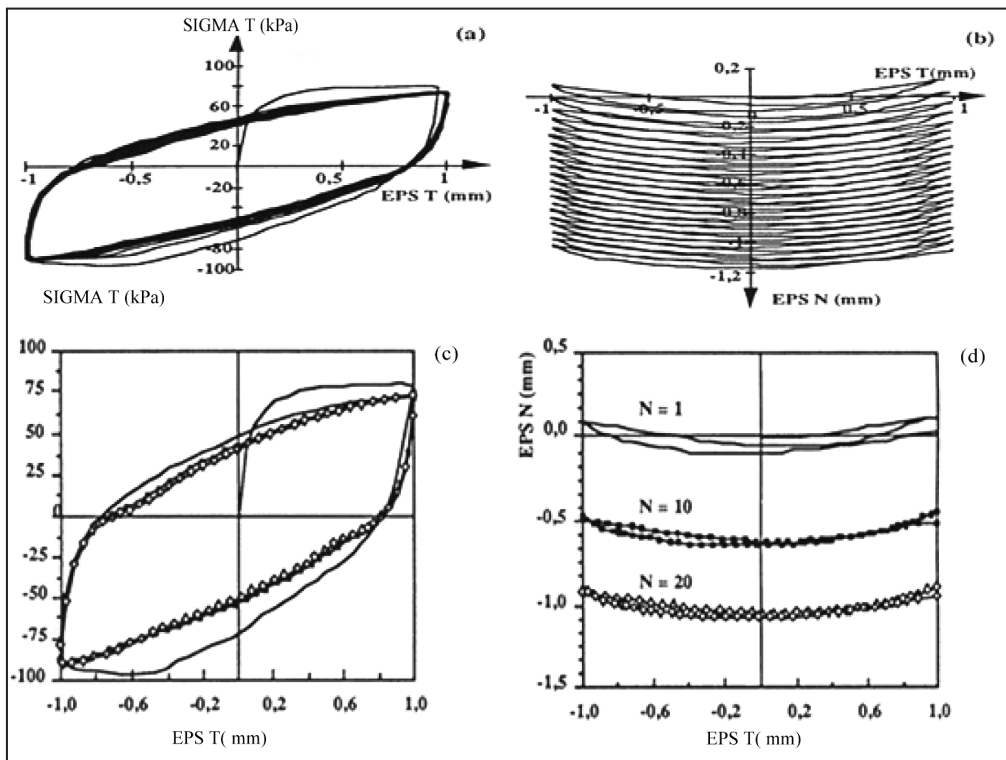
شکل ۲- نمای دستگاه برش مستقیم اصلاح شده.



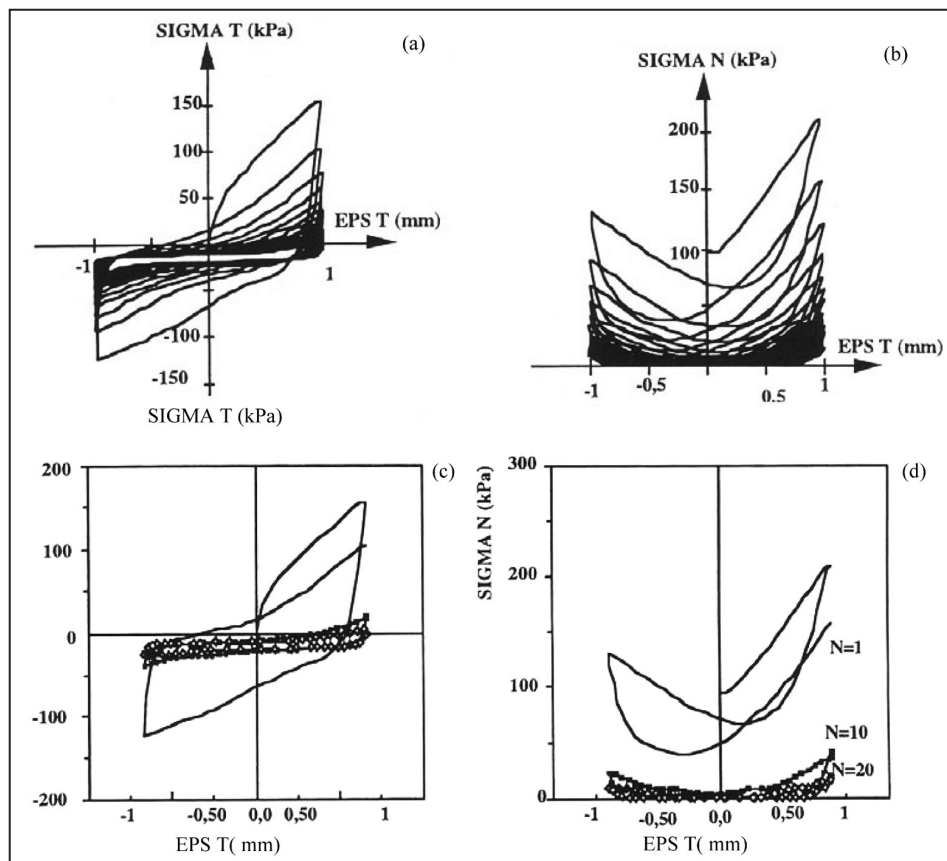
شکل ۳- نتایج آزمایش در روی ماسه هوستون متراکم در حالت زهکشی نشده. (a و b) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی، (c) تحولات نیروهای برشی و عادی در دواير موهر و (d) همخوانی جابه‌جایی و نیروی عادی در آزمایش‌های فشار و حجم ثابت.



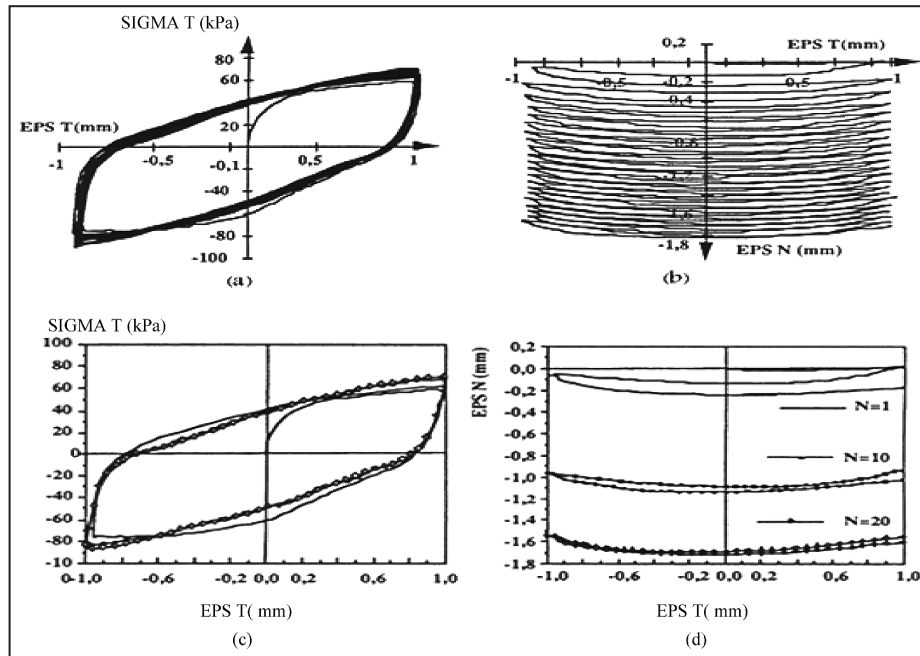
شکل ۴- نتایج آزمایش در روی ماسه هوستون شل در حالت زهکشی نشده. (a و b) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی و (c) تحولات نیروهای برشی و عادی در دواير موهر.



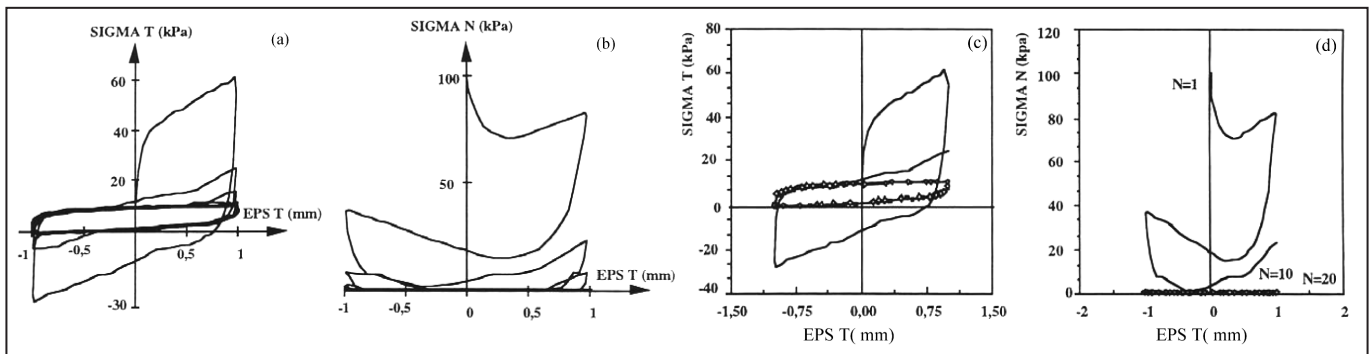
شکل ۵- نتایج آزمایش در حالت زهکشی شده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه هوستون متراکم. (a و b) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی در طی آزمایش و (c و d) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی: چرخه‌های ۱۰ و ۲۰.



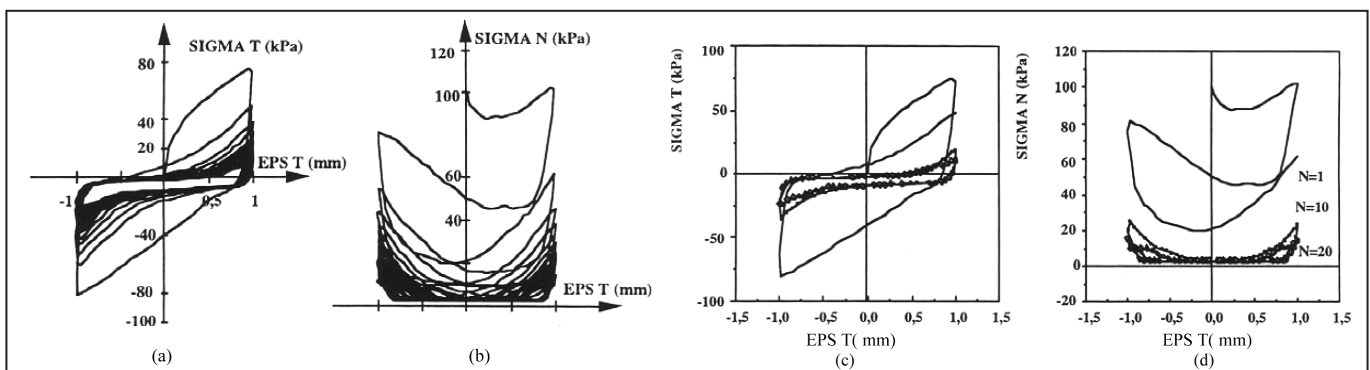
شکل ۶- نتایج آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه هوستون متراکم. (a و b) تحولات نیروهای برشی و عادی در طی آزمایش و (c و d) تحولات نیروهای برشی و عادی: چرخه‌های ۱۰ و ۲۰.



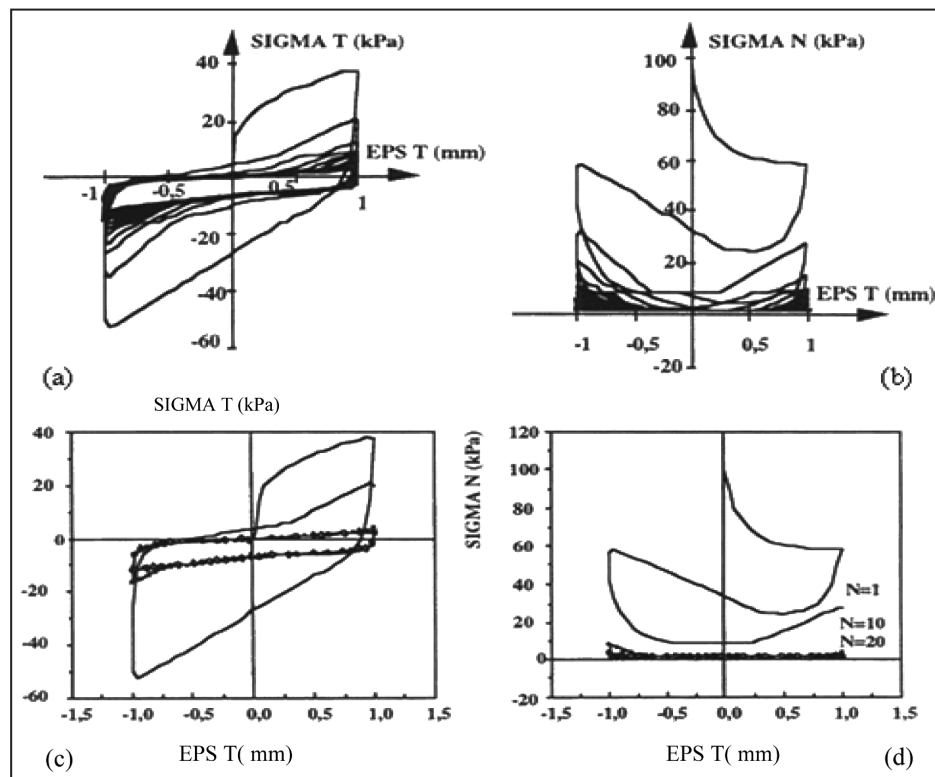
شکل ۷- نتایج آزمایش در حالت زهکشی شده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه هوستون شل. (a و b) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی در طی آزمایش و (c و d) تحولات نیروی برشی و جابه‌جایی عادی: چرخه‌های ۱۰ و ۲۰.



شکل ۸- نتایج آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه هوستون شل. (a و b) تحولات نیروهای برشی و عادی در طی آزمایش و (c و d) تحولات نیروهای برشی و عادی در چرخه‌های ۱۰ و ۲۰.



شکل ۹- نتایج آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه کیو متراکم. (a و b) تحولات نیروهای برشی و عادی در طی آزمایش و (c و d) تحولات نیروهای برشی و عادی در چرخه‌های ۱۰ و ۲۰.



شکل ۱۰- نتایج آزمایش در حالت زهکشی نشده با تغییر مکان برشی کنترل شده بر روی ماسه کیو شل. a و b تحولات نیروهای برشی و عادی در طی آزمایش و c و d تحولات نیروهای برشی و عادی: چرخه‌های ۱ و ۱۰ و ۲۰.

جدول ۱- شرایط آزمایش در دستگاه برش مستقیم.

نوع ماسه	شکل بارگذاری	شرایط بارگذاری در جهت عمودی	نوع آزمایش
کوارتزی هوستون - آهکی کیو	تنش کنترل شده	تنش ثابت	مونوتون
	کرنش کنترل شده	حجم ثابت	چرخه‌ای
	تنش کنترل شده	تنش ثابت	

## References

- Desai, Ch. S., Pradhan, Sh. K. & Cohen, D., 2005- Cyclic Testing and Constitutive Modeling of Saturated Sand-Concrete Interfaces Using the Disturbed State Concept, 026, international journal of Geomechanics
- Golightly, C. R. & Hyde, A. F. L., 1989- Some fundamental properties of carbonate sands"- Eng. For Calcareous sediments-Vol. No. 1pp. 69-78., 1989.
- Jewell, R. A. & Worth, C. P., 1987- Direct shear tests on reinforced sand. Geotechnique ,37(1), 53-68.
- Mohkam, M., 1983- Contribution a l'etude experimentale et theorique du comportement des sables sous chargements cycliques. These Docteur Ingenieur, Universite de Grenoble.
- Pradhan, Sh. K., Desai, Ch. S. & ASCE, F., 2006- DSC model for soil and interface including liquefaction and prediction of centrifuge test- Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering- Rezaie F. and Shahrour I., (1997)- "An Elastoplastic Constitutive Relation for the Soil-Structure Interface under Cyclic loadings". Computer and Geotechnics – vol.21, No. 1,pp. 21-39.(English).
- Rezaie, F. & Shahrour, I., 1997- "An Elastoplastic Constitutive Relation for the Soil-Structure Interface under Cyclic loadings". Computer and Geotechnics – vol.21, No. 1,pp. 21-39.(English).
- Rezaie, F., 1994 - "Laboratory study and modelisation soil-structure interface behaviour under monotonic and cyclic loadings « thesis of doctortate. Lille -France.
- Rezaie, F., 2002- Geotechnical Repport of Tehran Plain." Study of Soil-Structure Interaction"- South Tehran Azad University. (Persian).