

اندازه‌گیری کرنش موضعی در نمونه سه محوری خاک به روش پردازش دیجیتال تصاویر

علی کمک‌پناه^{۱*}، نادر ولی‌نژاد^۲

۱- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

a-panah@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۴)

چکیده- اندازه‌گیری کرنش‌های موضعی در آزمایش سه محوری خاک یکی از مسائلی است که نظر محققان را به خود جلب کرده و دستیابی به روشی که در عین سادگی دقت بالایی داشته باشد همواره مد نظر بوده است. در این تحقیق پس از بررسی نقاط ضعف و قوت ابزار مکانیکی ساخته شده برای این منظور، از پردازش دیجیتال تصاویر برای اندازه‌گیری کرنش‌های موضعی استفاده شد. این روش، بویژه برای خاک‌های دانه‌ای بسیار دقیق بوده و می‌تواند جابه‌جایی ذرات خاک را با دقت حدود ۰/۱ میکرون اندازه‌گیری نماید. تعدادی آزمایش سه‌محوری زهکشی شده بر روی خاک ماسه‌ای در شرایط تراکم نسبی و فشارهای همه جانبه مختلف انجام شد و کرنش‌های موضعی و کل، اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نحوه گسیختگی تمام نمونه‌ها یکسان و خمره‌ای است، ضمن اینکه بیشترین اختلاف کرنش‌های موضعی و کل، در بالای نمونه روی می‌دهد.

کلید واژگان: آزمایش سه‌محوری خاک، توزیع کرنش، ماسه، روش پردازش تصاویر.

۱- مقدمه

در آزمایش‌های سه محوری متداول، اندازه‌گیری تغییر شکل محوری، همواره از خارج از سلول سه محوری انجام می‌شود، که این موجب به‌وجود آمدن خطاهایی در محاسبه کرنش‌ها می‌شود. این خطاها اساساً به دو دلیل است [۱]:

اول: خود دستگاه دارای خطا است و لودسل، سنگ‌های متخلخل، صفحات لغزنده انتهایی و کاغذهای صافی، همه تحت فشار محوری فشرده می‌شوند.

دوم: از آنجاکه ارتباط بین دو انتهای نمونه و ابزار محاطی کاملاً صاف و تراز نیست، خطاهای نشیمنگاهی

رخ می‌دهد (دارامولا ۱۹۸۷، بورلند و سیمز ۱۹۸۲ و فیلیو ۱۹۸۵).

اگر چه اولین نوع خطا را با احتیاط منطقی، اصلاحات و کالیبراسیون دقیق و بالا بردن سختی دستگاه، تا حد زیادی می‌توان از بین برد (اتکینسون و اوانز ۱۹۸۲)، اما از نوع دوم خطا بسختی می‌توان جلوگیری کرد، زیرا میزان این خطا به روش آماده‌سازی انتهای نمونه بستگی دارد [۲، ۳].

بنابراین تنها روش دستیابی به اندازه‌گیری دقیق کرنش محوری، انجام اندازه‌گیری جزیی از دو انتها و ترجیحاً ۱/۳ میانی نمونه است [۴]. محققان قبلی روش‌های متعددی را برای اندازه‌گیری کرنش محوری پیشنهاد کرده‌اند (دارامولا

ثابت بوده و در مدت آزمایش محل آن تغییر نمی‌کند (بصورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است) [۶]. در تمام آزمایشها از غشای لاستیکی نازک با ضخامت 0.25 mm استفاده شده تا به‌توان ذرات درون غشا را بسادگی مشاهده کرد و حرکت آنها را در حین آزمایش بررسی نمود. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات، شبکه‌ای مربعی و رنگی با ابعاد $10 \times 10 \text{ mm}$ [۷]، بر روی غشا چاپ شد. از یک خط‌کش برای افزایش دقت اندازه‌گیری استفاده شده که بر روی میله‌های داخل سلول سه‌محوری در کنار نمونه با چسب نصب شده است.

۴- کاربرد پردازش تصاویر در اندازه‌گیری کرنشهای موضعی

پردازش تصاویر یکی از روشهای جدید و بسیار قدرتمند در علم الکترونیک است. این روش پیش از این نیز در مطالعات متعددی در زمینه‌های مختلف، بسیار مؤثر بوده است [۸]. در این تحقیق پس از بررسی روشهای مختلف برای اندازه‌گیری کرنشهای موضعی در آزمایش سه‌محوری خاک، روش پردازش دیجیتال تصاویر برای این کار انتخاب شد. زیرا علاوه بر سادگی اجرای آن، نسبت به روشهای دیگر دقت بسیار خوبی نیز دارد. (حدود یک صدم روشهای مکانیکی) [۹].

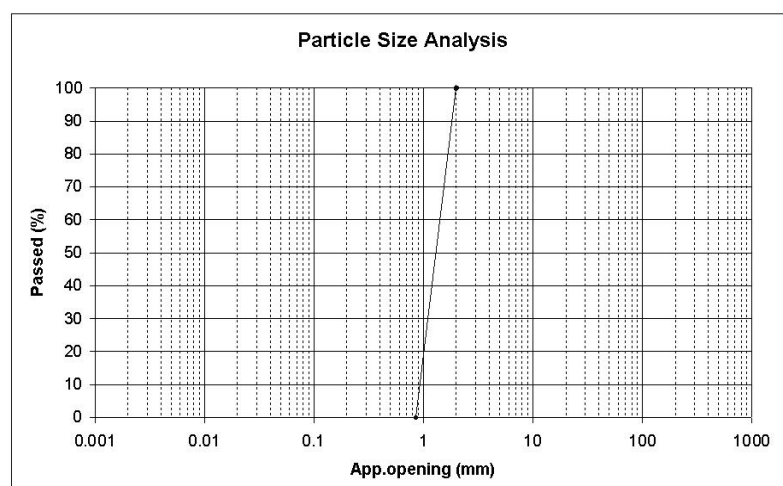
۱۹۷۸، براون، آستین و آوری ۱۹۸۰ و بورلند و سیمز (۱۹۸۲) اما ابزار آنها گران و استفاده از آن بسیار مشکل است [۵،۶]. از میان این روشها می‌توان به استفاده از گیج‌های انتهایی نمونه و کرنش‌سنج‌هایی که بر روی غشا نصب می‌شوند، اشاره کرد.

۲- مواد و روش آزمایش

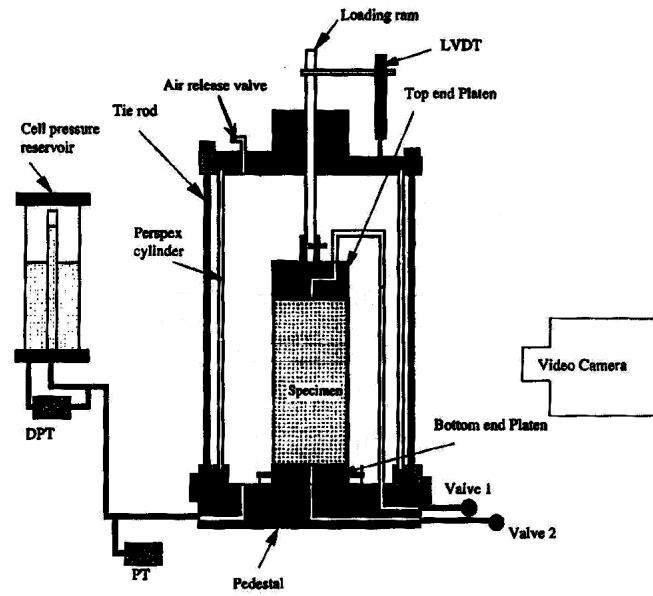
در این تحقیق از خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت- که نمودار آن به‌صورت شکل ۱ است- استفاده شد. وزن مخصوص دانه‌های خاک برابر 2.72 است. آزمایشها بر روی خاک ماسه‌ای با دو تراکم نسبی 65% و 85% و در شرایط فشار همه‌جانبه 30 KPa ، 100 ، 200 ، 300 و 500 انجام شد. ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش ثابت و برابر $50 \times 100 \text{ mm}$ است. سرعت بارگذاری دستگاه در تمام آزمایشها ثابت و برابر 0.26 میلیمتر در دقیقه است.

۳- نحوه اندازه‌گیری و ثبت تغییر شکلها

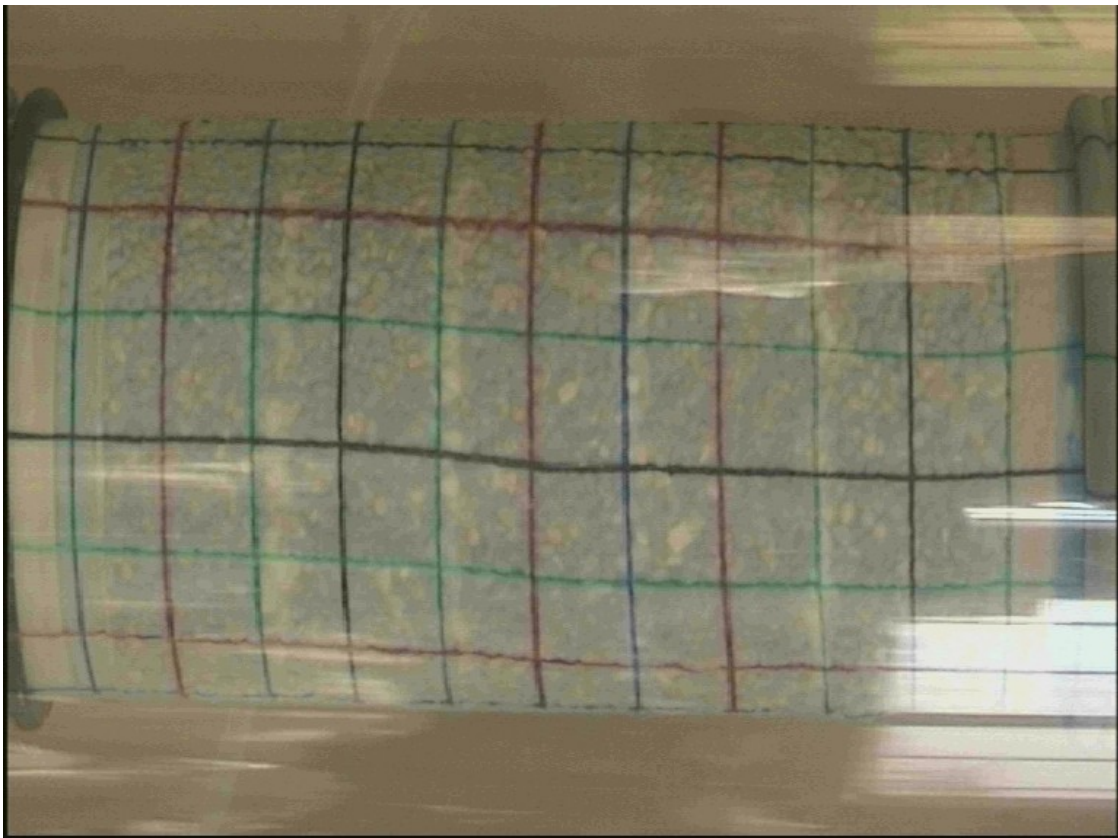
برای اندازه‌گیری کرنش کلی از گیج ساعتی با دقت 0.1 mm و برای اندازه‌گیری کرنشهای موضعی از دستگاه دوربین فیلمبرداری دیجیتال استفاده شده است. دوربین بر روی سه‌پایه و با فاصله مشخصی از نمونه



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در آزمایشها



شکل ۲ الف- طرحواره نحوه تصویربرداری از نمونه



شکل ۲ ب- نمونه‌ای از عکسهای استفاده شده در تحلیل‌های کامپیوتری

عکس توسط نرم افزارهای GIS، مرحله تحلیل این مختصات فرا می‌رسد. لازم است ذکر شود که این نقاط مشخصه ترجیحاً مراکز و گوشه‌های تیز ذرات ماسه انتخاب شد. برای اطمینان از دقت اندازه‌گیری، مختصات نقاط اتصال شبکه مربعی نیز در نرم افزارهای GIS محاسبه و تغییر شکلهای به دست آمده از دو روش، با یکدیگر مقایسه و سپس این تغییر شکلهای به کرنش تبدیل شدند. بدین صورت که اختلاف مختصات نقاط در جهت X و Y (عرضی و طولی)، بر مقادیر عرض و طول نمونه در عکس مربوط به لحظه صفر تقسیم و کرنش موضعی در جهت طولی و عرضی محاسبه شد. به منظور تعیین تحلیل نقاط روی هر عکس و تبدیل آن به کرنش، به دلیل حجم بالای نقاط، نرم افزاری به زبان ویژوال بیسیک نوشته شد تا مختصات نقاط را به عنوان ورودی دریافت کند و کرنشهای موضعی را به عنوان خروجی باز گرداند.

نمودارهای برداری کرنش، بیانگر حرکت ذرات نمونه است. بدین ترتیب که نیمه تحتانی نمونه با حرکت روبه بالای میز دستگاه، دارای حرکت انتقالی به سمت بالا بوده و ذرات واقع در نیمه فوقانی، بر اثر این حرکت فشرده می‌شوند.

نمودارهای مقایسه‌ای بیشینه کرنش موضعی و کرنش کلی برحسب زمان ترسیم و مشخص شد که کرنشهای موضعی همواره با کرنشهای کل اختلاف دارند. این اختلاف در آزمایش M3 شکل ۳-ج به حداکثر مقدار خود رسید، مخصوصاً بعد از دقیقه هشتم آزمایش این اختلاف شدت یافت (کرنش کلی برابر ۰.۲٪ و کرنش موضعی برابر ۰.۴/۶٪). علت این اختلاف عدم انطباق کپ فوقانی با سطح بالای نمونه است. در آزمایشهای دیگر به دلیل رعایت شدن این مسئله، انطباق خوبی بین کرنش موضعی و کل مشاهده می‌شود؛ همانطور که در شکلهای ۴-الف تا ۴-ط قابل مشاهده است. منحنی کرنش موضعی نیز به همین دلیل همواره بالای کرنش کل قرار گرفته است.

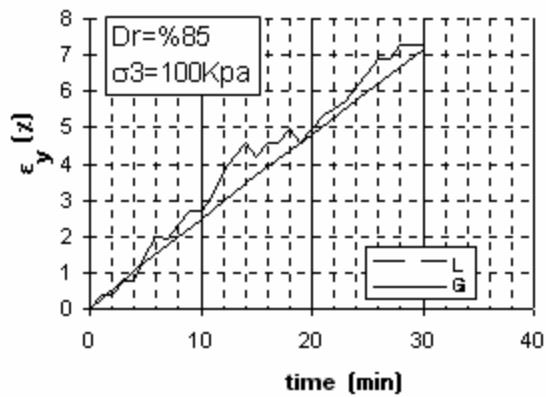
در این روش برای اندازه‌گیری کرنشهای موضعی، از تغییر شکل نمونه در حین بارگذاری تصویربرداری شد. برای این منظور از دوربین دیجیتال سونی TRV 140E - که بر روی یک سه پایه با فاصله مشخصی از نمونه ثابت شده بود- استفاده شد. کل مراحل فرایند بارگذاری نمونه برای هر آزمایش بر روی فیلم جداگانه‌ای ضبط شد. سپس این فیلمها توسط کارت گرافیکی حرفه‌ای ATI ALL IN WONDER با ظرفیت حافظه ۳۲ مگابایت به روی دیسک سخت منتقل شد. این کار توسط نرم افزار ATI Capture انجام شد. مرحله بعدی تهیه عکس از لحظات مختلف فیلم است. برای فواصل یک دقیقه‌ای از آزمایش، یک عکس تهیه شد و این عکسها با فرمت TIFF با دقت ۱۸۰۰ X ۱۳۵۰ ذخیره و کار تهیه عکس و ذخیره کردن آن توسط نرم افزار Adobe Primier انجام شد.

پس از ذخیره شدن عکسها، مرحله تحلیل فرا می‌رسد. بدین منظور باید به تمام نقاط هر عکس، یک مختصات نسبت داده شود و هر یک به طور جداگانه در یک فایل ذخیره شوند. این کار توسط نرم افزار GIS انجام شد. روش کار بدین صورت بود که ابتدا عکسها را در نرم افزار Arc View فراخوانی کرده و نقاط مشخصه هر عکس- که به عنوان نماینده آن عکس در تحلیل انتخاب می‌شوند- در یک لایه تعریف و ذخیره می‌شوند. سپس این لایه در نرم افزار Arc Info فراخوانی و مشخصات نقاط درون هر لایه، شامل شماره و مشخصات نقاط، شناسایی و در فایل با پسوند dbf ذخیره می‌شوند. اکنون با داشتن شماره و مختصات نقاط مشخصه مربوط به هر عکس در دقیقه مربوط می‌توان این مختصات را مقایسه کرده و کرنشهای طولی و عرضی را به دست آورد.

۵- اندازه‌گیری تغییر شکلهای موضعی

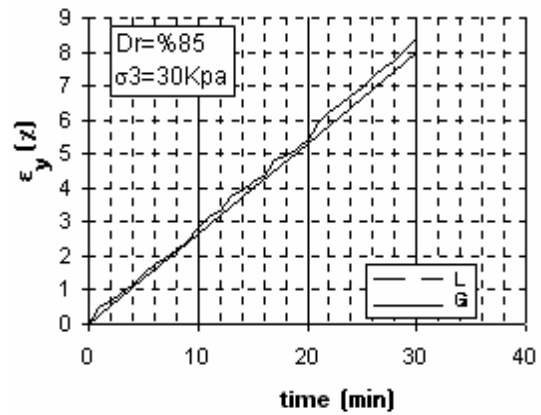
پس از دیجیتایز کردن مختصات نقاط مشخصه هر

Test No.M2



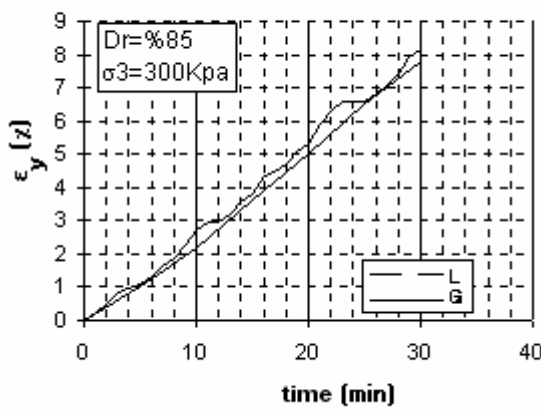
(ب)

Test No.M1



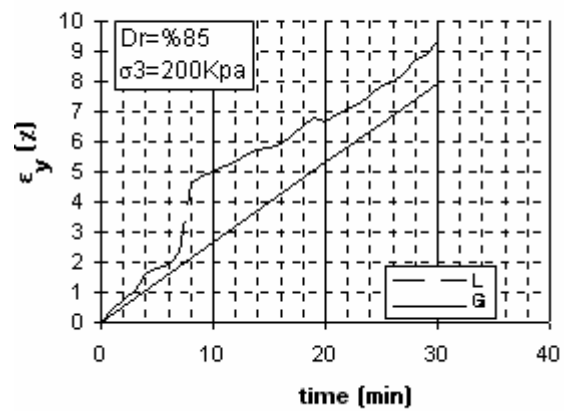
(الف)

Test No.M4



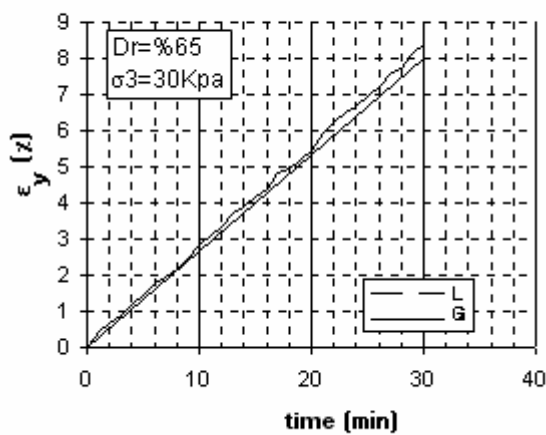
(د)

Test No.M3



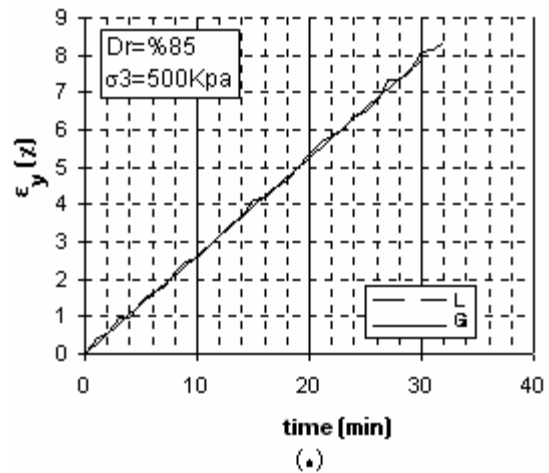
(ج)

Test No.M6

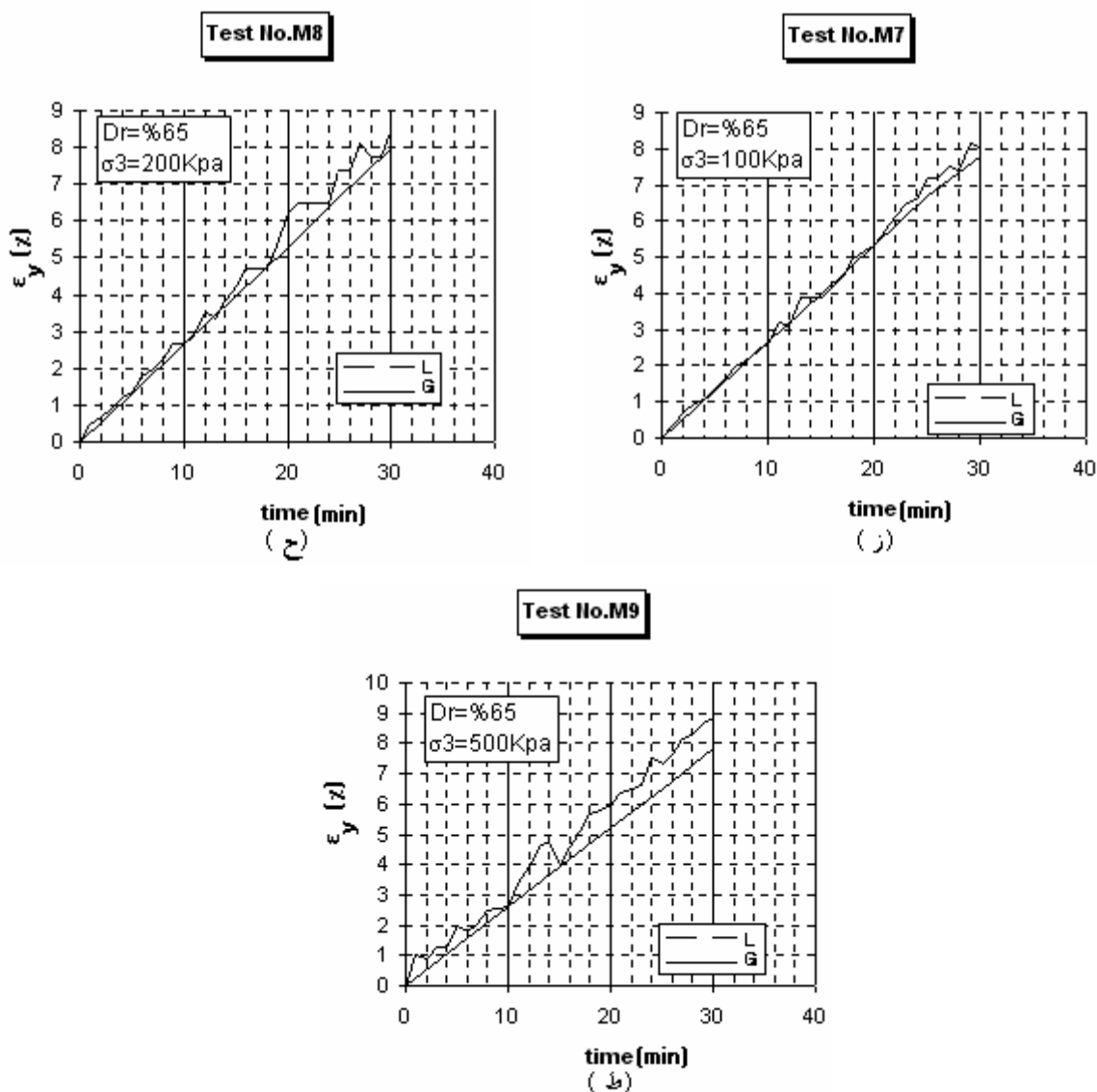


(و)

Test No.M5



(هـ)



شکل ۳ نمودارهای کرنش طولی موضعی و کل در طول بارگذاری

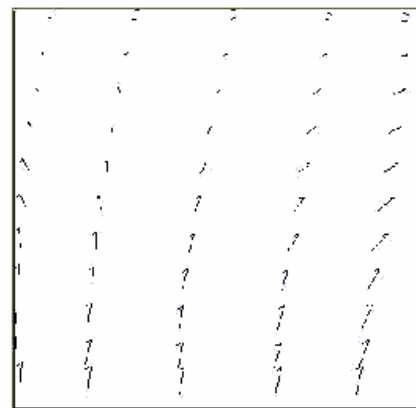
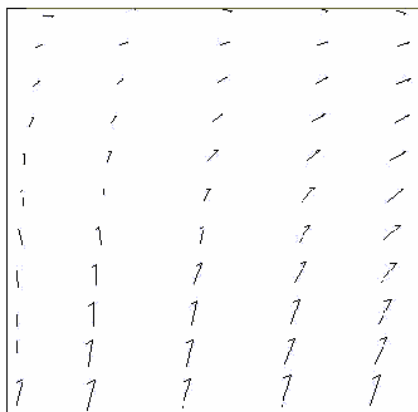
۶- اثر تراکم نسبی "Dr" بر روی تغییر شکلهای موضعی

آزمایشهایی بر روی نمونه‌های با تراکم نسبی ۶۵٪ و ۸۵٪ انجام شد. تراکم نسبی ۶۵٪ معرف نمونه‌های با تراکم متوسط و تراکم نسبی ۸۵٪ بیانگر نمونه‌های با تراکم زیاد است. در نمونه‌های با شرایط یکسان و تراکمهای نسبی متفاوت، کرنشهای موضعی اندازه‌گیری و نحوه گسیختگی

نمودارهای برداری کرنش درحین بارگذاری نشان داد که شکل نمونه در تمام آزمایشها به صورت خمراهی است و مشاهدات عینی نیز این مسأله را تأیید می‌کند. همچنین نمودارهای برداری کرنشهای موضعی در طول بارگذاری ترسیم شد که بیانگر این است که کرنش نیمه فوقانی با کرنش کل برابر بوده و کرنش موضعی نقاطی که در بالاترین سطح نمونه قرار گرفته‌اند از کرنش کل بیشتر است که این اختلاف از حدود دقیقه ۱۰ تا ۱۵ (در محدوده کرنش کلی ۲ تا ۴ درصد چشمگیر است).

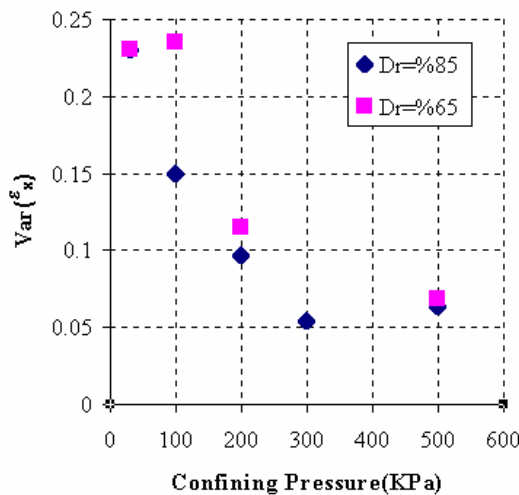
شکل‌های ۵- الف و ۵- ب نمودارهای واریانس بیشینه تغییر کرنش طولی و عرضی را در طول آزمایش در شرایط فشار همه جانبه یکسان و تراکم نسبی متفاوت نشان می‌دهند؛ که در این شرایط نیز مقادیر بسیار نزدیک به هم بوده و فقط در آزمایش‌های دارای فشار همه جانبه KPa 100، اختلاف واریانس در آنها چشمگیر است.

نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که تمرکز کرنش‌های موضعی و نحوه گسیختگی نمونه‌ها در اثر تغییر تراکم نسبی تغییر نمی‌کند. نمودارهای برداری کرنش ذرات بیانگر نحوه گسیختگی و مقدار و جهت کرنش‌های موضعی در نمونه‌ها است که نسبت به تغییر تراکم نسبی، حساسیت نشان نمی‌دهد (شکل ۴).

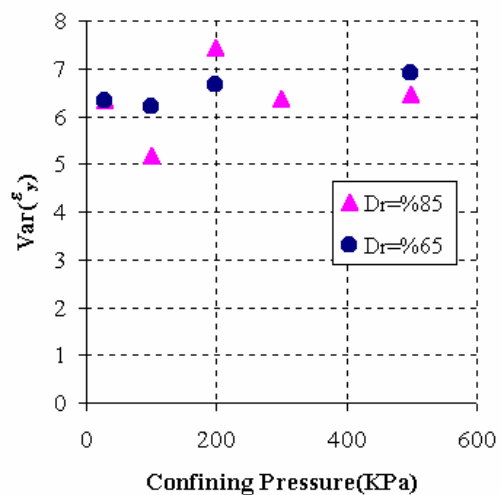


الف- آزمایش M5 دارای $\sigma_3=500 \text{ Kpa}$, $Dr=85\%$ ب- آزمایش M9 دارای $\sigma_3=500 \text{ KPa}$, $Dr=65\%$

شکل ۴ نمودارهای برداری کرنش نمونه‌های M5 و M9 دارای تراکم نسبی ۶۵٪ و ۸۵٪ و فشار جانبی ۵۰۰ کیلو پاسکال



(ب)



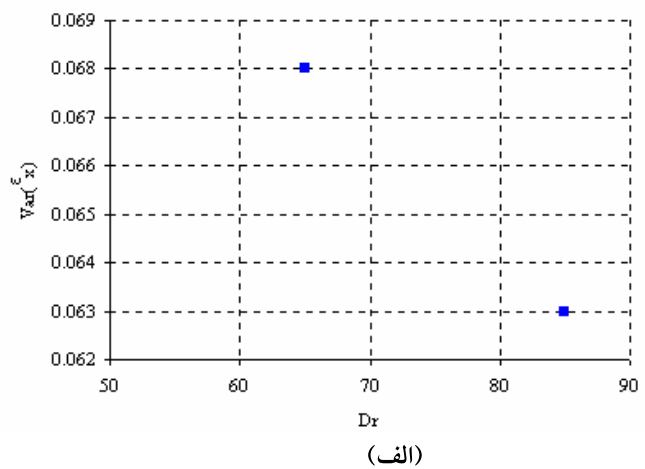
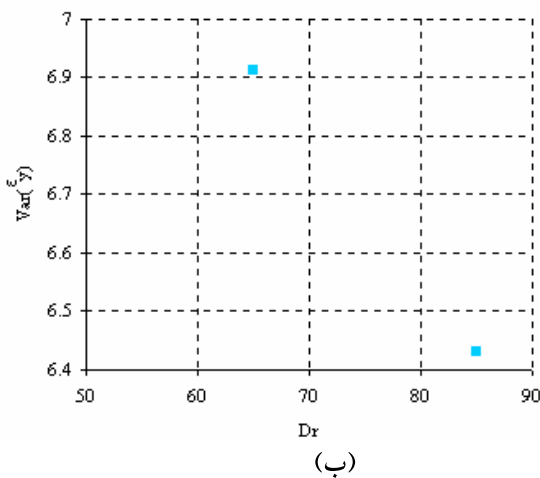
(الف)

شکل ۵ نمودارهای واریانس تغییر کرنش طولی و عرضی در شرایط فشار جانبی یکسان و تراکم نسبی متفاوت

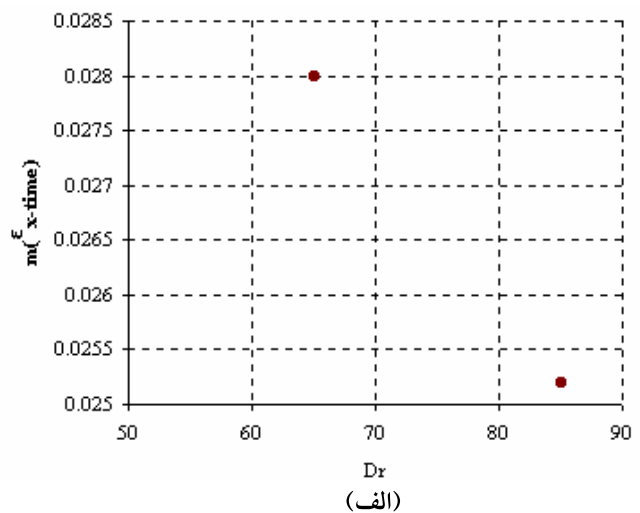
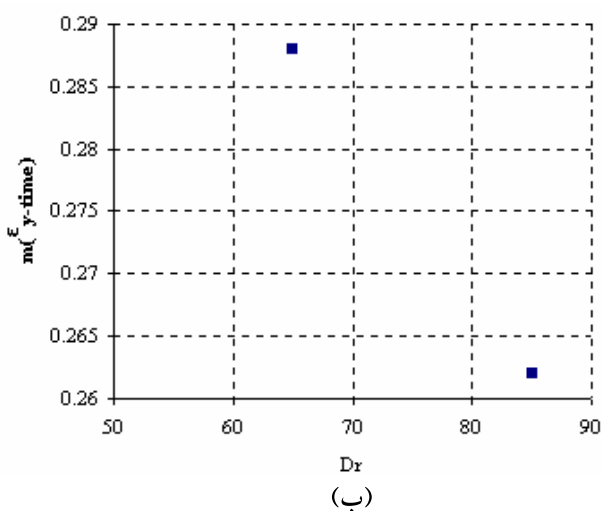
می‌یابد؛ یعنی در یک زمان معین، در نمونه دارای تراکم نسبی بیشتر دامنه تغییرات کرنش طولی و عرضی، کمتر از نمونه با تراکم نسبی کمتر است.

به بیان دیگر، افزایش تراکم نسبی، از آشفته‌گی کرنش در نمونه جلوگیری کرده است که این، نتیجه قبلی را تأیید می‌کند. نمودارهای کرنش بیشینه در طول و عرض نمونه- که در شکل‌های ۸- الف و ۸- ب نشان داده شده- بیانگر این حقیقت است که افزایش تراکم نسبی، با مقدار بیشینه کرنش در طول و عرض نمونه نسبت عکس دارد.

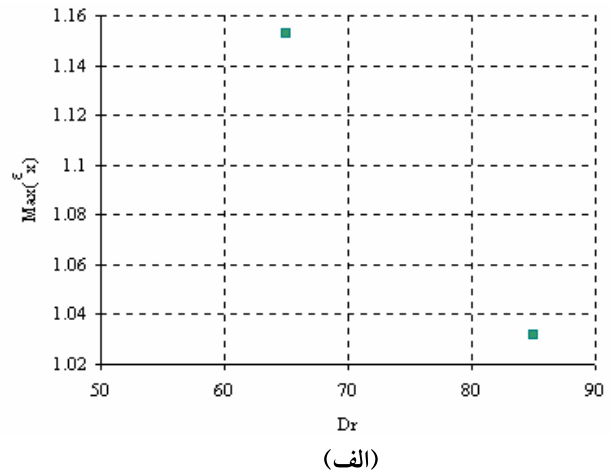
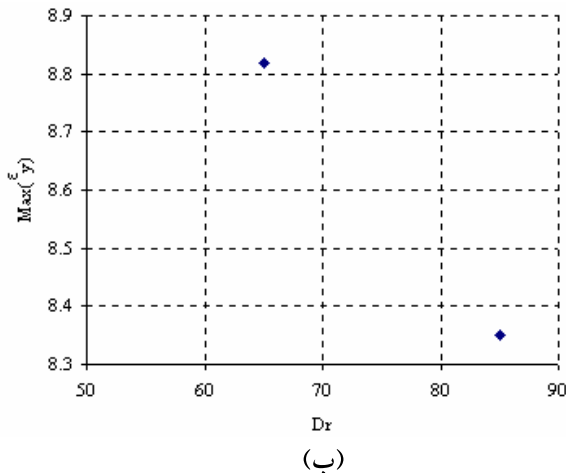
همانطور که در شکل‌های ۶- الف و ۶- ب مشاهده می‌شود واریانس بیشینه کرنش‌های طولی و عرضی با افزایش تراکم نسبی کاهش یافته است که بیانگر تاثیر مثبت تراکم نسبی بر کاهش آشفته‌گی کرنش‌های موضعی در طول و عرض نمونه است. همچنین با دقت در شکل‌های ۷- الف و ۷- ب - که نشان‌دهنده تغییرات شیب خط برازش نمودارهای کرنش موضعی طولی و عرضی نسبت به زمان در برابر تراکم نسبی است- دیده می‌شود که شیب خط برازش، با افزایش تراکم نسبی کاهش



شکل ۶ نمودارهای واریانس بیشینه کرنش در عرض و طول نمونه در برابر تراکم نسبی در شرایط فشار همه‌جانبه یکسان



شکل ۷ نمودارهای تغییرات شیب خط برازش نمودارهای کرنش موضعی عرضی و طولی نسبت به زمان در برابر تراکم نسبی در شرایط فشار همه‌جانبه یکسان



شکل ۸ نمودارهای کرنش بیشینه در عرض و طول نمونه در برابر تراکم نسبی در شرایط فشار همه‌جانبه یکسان

بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که نحوه گسیختگی و تمرکز کرنشهای موضعی نسبت به تغییر فشار همه جانبی حساسیت نداشته و همواره رفتار یکسان دارند.

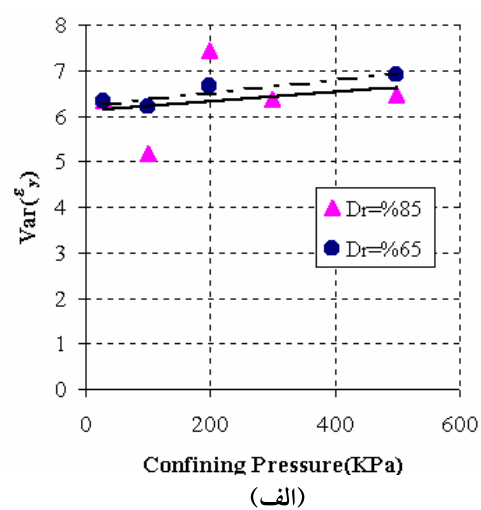
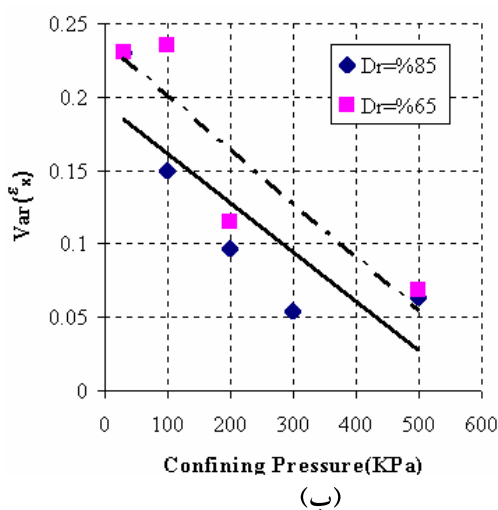
شکلهای ۹-الف و ۹-ب بیانگر نمودارهای تغییرات واریانس بیشینه کرنشهای طولی و عرضی در طول آزمایش در شرایط تراکم نسبی یکسان و فشار همه جانبی متغیر است.

۷- اثر فشار همه جانبی بر روی شکست

نمونه‌ها و توزیع کرنش در نمونه

یکی دیگر از پارامترهایی که در این تحقیق اثر آن بر کرنشهای موضعی بررسی شد، فشار همه جانبی اولیه است.

آزمایشهایی در فشارهای همه جانبی ۳۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ انجام شد و اثر فشار همه جانبی بر نحوه گسیختگی و تمرکز کرنشهای موضعی مورد



شکل ۹ نمودارهای تغییرات واریانس بیشینه کرنشهای طولی و عرضی در طول آزمایش در شرایط تراکم نسبی یکسان و فشار همه جانبی متغیر

- ۳- تغییر فشار همه جانبه آزمایش موجب تغییر نحوه گسیختگی و تمرکز کرنش‌های موضعی نمی‌شود.
- تغییر تراکم نسبی، موجب تغییر نحوه گسیختگی و تمرکز کرنش‌های موضعی نمی‌شود. افزایش فشار همه جانبه از آشفته‌گی کرنش‌های موضعی عرضی به شدت جلوگیری می‌کند.
- ۴- افزایش فشار همه جانبه، تأثیر کمی بر آشفته‌گی کرنش‌های طولی نمونه در طول آزمایش دارد.
- ۵- افزایش تراکم نسبی نمونه ماسه‌ای، موجب کاهش آشفته‌گی کرنش‌های موضعی در طول و عرض نمونه می‌شود.
- ۶- کرنش بیشینه جانبی، بر اثر افزایش تراکم نسبی کاهش می‌یابد.
- ۷- کرنش بیشینه طولی، بر اثر افزایش تراکم نسبی کاهش می‌یابد.

۹- منابع

- [1] Burland J.B, and Symes, M. (1982): "A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus", *Geotechnique* 32, No. 1, pp 62-65.
- [۲] یثربی، سید شهاب الدین. "بررسی اثر میزان و شکل ریزدانه‌ها بر رفتار حالت پایدار خاک‌های ماسه‌ای اشباع به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی در این خاک‌ها"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۷۶.
- [3] K.H. Head (1998): "Manual of soil laboratory testing", Vo 13: Effective stress tests, John Wiley & Sons. EL. Ruwayih, A.A. (1976): "Design manufacture and performance of a lateral strain device", *Geotechnique* 26, No.1, pp 215-216.
- [4] Bishop & Henkel (1982): "The measurement of soil properties in triaxial test".
- [5] Antonio E. Abrantes, Jerry A. Yammamuro, "Image Processing of strains

همانطور که در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب مشاهده می‌شود، واریانس کرنش‌های عرضی با افزایش فشار همه جانبه با شیب زیادی کاهش می‌یابد. این بدان معنا است که افزایش فشار همه جانبه، از پراکندگی کرنش‌های جانبی ماکزیمم شدت جلوگیری می‌کند یا به بیان دیگر افزایش فشار همه جانبه، موجب کاهش آشفته‌گی کرنش‌های موضعی جانبی می‌شود. در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب این مسأله برای کرنش‌های طولی به‌طور عکس به‌وقوع می‌پیوندد بدین ترتیب که واریانس بیشینه کرنش‌های طولی در طول آزمایش بر اثر افزایش فشار همه جانبه، افزایش کمی دارد، یعنی افزایش فشار جانبی، تأثیر کمی بر پراکندگی بیشینه کرنش‌های موضعی طولی دارد و می‌توان گفت که افزایش فشار همه جانبه، کمی این آشفته‌گی کرنش در طول نمونه را تشدید می‌کند.

۸- نتایج

از پردازش دیجیتال تصاویر به دو روش برای اندازه‌گیری کرنش‌های موضعی استفاده شد. یکی اندازه‌گیری کرنش ذرات ماسه از روی جابه‌جایی مراکز و گوشه‌های تیز ذرات ماسه و دوم اندازه‌گیری کرنش از روی جابه‌جائیهای رئوس شبکه مربعی چاپ شده بر روی غشای لاستیکی نمونه. پس از اندازه‌گیری کرنش‌های موضعی سعی شد این کرنش‌ها را در شرایط مختلف آزمایش - از جمله تغییر فشار همه جانبه و تراکم نسبی - با یکدیگر مقایسه کنیم. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- ۱- پردازش دیجیتال تصاویر روش بسیار قدرتمندی در اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل‌های موضعی در مصالح دانه‌ای است.
- ۲- تغییر شکل‌های موضعی را می‌توان با دقت بسیار خوبی از روی غشای لاستیکی نمونه اندازه‌گیری کرد و این کار را می‌توان به‌آسانی با چاپ کردن یک شبکه مربعی بر روی نمونه انجام داد.

- civil engineering , July 2001, pp 232-238.
- [8] Khalid A. Alshibli, Stain Sture,: "Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital imaging techniques", Journal of Computing in Civil Engineering, April 1999, pp 103-109.
- [9] Khalid A.Alshibli, Stein Sture,: "Shear Band Formation in Plane Strain Experiments of Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, June 2000, pp 495-503.
- for high strain rate experiments:, www.ce.utexas.edu/em2000/papers/aabrante.Pdf.
- [6] Clayton, C.R.I, and Khartush, S.A.(1986): "A new device for measuring local axial strains on triaxial specimen", Geotechnique 36, No. 4, pp 593-597.
- [7] Khalid A. Alshibli, Hany A. EL-Saidany.: "Quantifying of Void Ratio in Granular Mateials using Voronoi Tesselation", Journal of computing in