

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دکتری زمین شناسی (مهندسی)

مطالعه رفتار سنگهای درزه دار تحت بارگذاری های تناوبی

ارائه کننده:

کامبد امینی حسینی

استاد راهنما:

دکتر محمد کاظم جعفری

اساتید مشاور:

دکتر حسین جلالی

دکتر علی ارومیه ای

دکتر فردریک پوله

۱۴۲۷۴۹



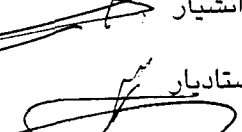
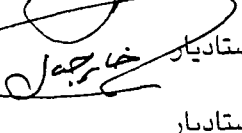

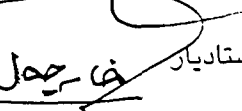


تابستان ۱۳۸۱

تأییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

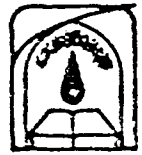
اعضای هیئت داوران نسخه نهایی رساله خانم/ آقای کامبد امینی حسینی

تحت عنوان: بررسی رفتار سنگهای درزه دار تحت بارگذاری سایکلک

را از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجه دکتری مورد تایید قرار دادند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیأت داوران
	استادیار	آقای دکتر محمدکاظم جعفری	۱- استاد راهنما
	دانشیار	آقای دکتر حسین جلالی	۲- استاد مشاور
	دانشیار	آقای دکتر علی ارومیه ای	۳- استاد مشاور
	استادیار	آقای دکتر محمدرضا نیکو دل	۴- استاد ناظر
	استادیار	آقای دکتر ماشاء... خامه چیان	۵- استاد ناظر
	استادیار	آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان	۶- استاد ناظر
	استادیار	آقای دکتر کاظم نجم	۷- استاد ناظر
	استادیار	آقای دکتر ماشاء... خامه چیان	۸- نماینده تحصیلات تکمیلی

کتابخانه و مرکز اسناد
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تهران



بسمه تعالی

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

- ماده ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.
- ماده ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:
کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته زمین شناسی مهندسی است که در سال ۱۳۸۱ در دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر محمد کاظم هضری، مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر حسین دبالی و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر علی ارویج ای از آن دفاع شده است.
- ماده ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.
- ماده ۴ در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیبه کند.
- ماده ۵ دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.
- ماده ۶ اینجانب کاظم ابراهیمی دانشجوی رشته زمین شناسی مهندسی مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: کاظم ابراهیمی

تاریخ و امضا: ۸۱ / ۴ / ۲۲

تقدیم به سرسبز دشت بی انتهای مهر،

به تلالو بی دریغ ایثار

به روح پاک مادرم

که دوری از او در سرزمین غربت

سعادت وداع آخر را نصیبم نساخت

و جاودان دردی به یادگار بر دل غمدیده ام بنشانند

... و نثار شیبهای خاموش پدرم

و همسر صبورم

تشکر و قدردانی:

سعی نابرده درین راه بجایی نرسی مزد اگر می طلبی طاعت استاد ببر
حافظ شیرازی

هر چند که نمی توان به نحو شایسته ای، در قالب چند سطر از زحمات کسانی که در انجام این کار تحقیقاتی مرا یاری داده اند، قدردانی نمایم، ولی به رسم جاری بر خود واجب می بینم تا ذکر نامی از این عزیزان ارائه نمایم، باشد که مقبول افتد.

ابتدا لازم است که از آقای دکتر محمد کاظم جعفری که زحمت راهنمایی مرا در این رساله بعهدہ داشتند، تشکر و قدردانی نمایم. شروع این تحقیق به ماهها قبل از تصویب موضوع پایان نامه بر می گردد و در طول این مدت که قریب به سه سال از آغاز آن گذشته است، ایشان همواره با راهنمایی های خود امکان پیشرفت در موضوعات مورد تحقیق را فراهم آورده اند و هیچگاه از همکاری و مساعدت های لازم در تمامی زمینه های علمی و یا پشتیبانی های مالی و فنی دریغ نفرمودند. حتی در زمان طی دوره تحقیقاتی خارج از کشور، ارتباط مستقیم ایشان با کار تحقیقاتی بطور مداوم با سفر به فرانسه جهت نظارت و هدایت تحقیق و یا از طریق پست الکترونیکی برقرار بوده است و نقطه نظرات ایشان در کار تحقیقاتی همیشه راه گشا بوده است.

آقایان دکتر حسین جلالی و دکتر علی ارومیه ای که زحمت مشاوره این کار تحقیقاتی را بعهدہ داشتند در طول تحقیق همواره با نقطه نظرات خود مرا در جهت انجام این کار تحقیقاتی یاری نمودند. همچنین بسیاری از راهکارهای مورد استفاده در این تحقیق چه قبل از تصویب و چه بعد از تصویب پروپوزال بنا به پیشنهادات این عزیزان انجام شده است.

آقای دکتر فردریک پوله (Frederic Pellet) به عنوان استاد مشاور خارجی ضمن ارائه نقطه نظرات کارشناسی، امکان انجام بخش زیادی از آزمایشات این کار تحقیقاتی را در آزمایشگاه 3S فرانسه فراهم نمودند. شاید بدون حمایت و همکاری ایشان امکان انجام این کار تحقیقاتی با این مقیاس فراهم نمی گردید.

آقای پروفیسور بولون (Marc Boulon) به عنوان یکی از اساتید برجسته در زمینه مطالعه رفتار سنگهای درزه دار، در طون اقامت در فرانسه همواره با نقطه نظرات خود راه گشای تحقیق بوده اند. ایشان همچنین امکان انجام آزمایشات مورد نظر را با دستگاه BCR 3D که توسط خود ایشان طراحی شده است، فراهم نمودند.

آقایان دکتر ماتیه (Mathier) و موتیه (Mottier) در آزمایشگاه LMR سوئیس امکان انجام برخی از آزمایشات سه محوری را در لوزان فراهم آوردند و ضمن فراهم نمودن امکانات لازم برای این آزمایشات همواره بر آزمایشات و نتایج آن نظارت داشتند.

از آقایان دکتر کاظم نجم، دکتر عبدالهادی قزوینیان، دکتر ماشا... خامه‌چیان و دکتر محمدرضا نیکودل که ضمن قبول زحمت داوری این کار تحقیقاتی نقطه نظرات ارزشمند خود را چه قبل و چه بعد از دفاع ارائه نمودند نیز کمال تشکر را دارم.

همچنین لازم است از پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، دانشگاه ژوزف فوریه فرانسه، دانشگاه پلی تکنیک فدرال لوزان سوئیس به خاطر زمینه سازی های لازم برای انجام این کار تحقیقاتی تقدیر و تشکر نمایم.

از خداوند بزرگ توفیق روز افزون این عزیزان را مسئلت دارم.

چکیده:

ارزیابی اثر زلزله ها روی فضاهای زیرزمینی یکی از جدیدترین مباحثی است که در علوم زمین شناسی مهندسی و مکانیک و دینامیک سنگ مطرح می باشد. هر چند فضاهای زیر زمینی نسبت به سازه های ساخته شده در سطح زمین از مقاومت بیشتری در برابر زلزله ها برخوردارند ولی چنانچه در توده سنگهای درزه دار احداث گردند امکان آسیب پذیری آنها در برابر زلزله بسیار زیاد خواهد بود. نگاهی به آمار خسارات ناشی از زلزله در فضاهای زیرزمینی در توده سنگهای درزه دار نشان دهنده این واقعیت می باشد.

برای مطالعه رفتار توده سنگهای درزه دار تحت بارگذاری های لرزه ای ابتدا باید رفتار لرزه ای سطوح درزه منفرد مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق آزمایشاتی روی نمونه های دارای یک سطح درزه منفرد انجام پذیرفته است تا رفتار این نمونه ها تحت جابجایی های تناوبی محدود و بزرگ که می تواند در اثر زلزله های کوچک و بزرگ ایجاد شوند، مشابه سازی گردد. بدین منظور نمونه هایی با سطح درزه دندان اره ای و مدلی از سطح درزه واقعی با استفاده از قالبهای سیلیکونی و مصالحی مخصوص آماده گردیدند و تحت آزمایشات سه محوری و برش مستقیم تناوبی قرار داده شدند.

در بخش اول بیش از ۵۰ نمونه مصنوعی دارای سطح درزه دندان اره ای تحت آزمایشات سه محوری با دامنه جابجایی محدود قرار داده شدند و تغییرات مقاومت برشی با فشار همه جانبه، سرعت بارگذاری، تعداد و فرکانس سیکلهای بارگذاری محدود و دامنه سیکلهای بارگذاری مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج این آزمایشات نشان می دهند که افزایش سرعت برش، تعداد سیکل و فرکانس آن و همچنین دامنه بارگذاری تناوبی می تواند باعث کاهش مقاومت برشی به نسبتهای مختلفی گردد.

در بخش دوم با استفاده از دستگاه برش BCR 3D بیش از ۳۰ نمونه درزه دندان اره ای و واقعی مورد آزمایش جابجایی برشی قرار داده شدند و نحوه تغییرات زبری و مقاومت برشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این آزمایشات نشان می دهند که روند تغییرات زبری در جابجایی های تناوبی طی سیکلهای مختلف متفاوت است و به همین ترتیب مقاومت برشی نیز در بارگذاری های تناوبی مقدار ثابتی نیست. همچنین مشاهده شده است که در اثر جابجایی های تناوبی امکان تغییر رفتار برشی نمونه های درزه دار پس از تجربه چند سیکل جابجایی وجود دارد.

کلمات کلیدی: مقاومت برشی، مصالح مصنوعی، بارگذاری تناوبی، فشار همه جانبه، سرعت برش، تعداد سیکل و فرکانس، زاویه انبساط، کاهش زبری، سایش.

فهرست مطالب:

- فصل اول: مقدمه برنامه تحقیقات و فصل بندی ۱
- ۱- مقدمه ۲
- ۲- پارامترهای مورد مطالعه در تحقیقات ۳
- ۳- فصل بندی ۶
-
- فصل دوم: بررسی رفتار لرزه ای فضاهای زیرزمینی و توده سنگهای درزه دار در نواحی لرزه خیز ۷
- ۱- مقدمه ۸
- ۲- صدمات ناشی از زلزله در تونل ها و فضاهای زیرزمینی ۸
- ۳- اثر زلزله بر پایداری فضاهای زیرزمینی در سنگهای درزه دار ۱۴
- ۳-۱- بررسی رفتار مکانیکی توده سنگهای درزه دار تحت بارهای دینامیکی ۱۵
- ۳-۲- اثر بارگذاری های کوچک تکراری روی پایداری فضاهای زیرزمینی ۱۶
- ۳-۳- روشهای تحلیل رفتار سطوح درزه تحت بارگذاریهای دینامیکی و تناوبی ۱۷
-
- فصل سوم: روش انجام آزمایشات سه محوری و برش مستقیم تناوبی ۱۹
- ۱- مقدمه ۲۰
- ۲- انتخاب شکل درزه ۲۰
- ۳- نمونه سازی ۲۵
- ۳-۱- تهیه سطوح درزه و قالب گیری آنها برای نمونه سازی ۲۷
- ۳-۲- مصالح مورد استفاده ۳۰
- ۳-۳- روش تهیه و آماده سازی نمونه ها ۳۴
- ۳-۳-۱- نمونه های استوانه ای ۳۴
- ۳-۳-۲- نمونه های مکعبی ۳۵
- ۴- وسایل مورد استفاده جهت انجام آزمایشات ۳۷
- ۴-۱- دستگاههای مربوط به انجام آزمایشات سه محوری ۳۷
- ۴-۱-۱- دستگاه بارگذاری سه محوری در فرانسه ۳۷
- ۴-۱-۲- دستگاه بارگذاری سه محوری در سوئیس ۴۲

۴۷	سیستم انجام آزمایشات برش مستقیم تناوبی
۵۴	فصل چهارم: بررسی رفتار نمونه های درزه دار تحت جابجایی های نرمال و برشی محدود
۵۵	۱- مقدمه
۵۶	۲- رابطه عمق با تنش برجا
۵۷	۳- اثر فشار همه جانبه و بار نرمال بر مقاومت برشی
۵۸	۳-۱- اثر تنش جانبی در مقاومت برشی در آزمایش سه محوری
۵۸	۳-۲- نتایج برخی از آزمایشات
۶۰	۴- اثر سرعت جابجایی در مقاومت برشی
۶۰	۴-۱- روش انجام آزمایش
۶۰	۴-۲- نتایج برخی از آزمایشات
۶۲	۵- اثر تاریخچه بارگذاری های تناوبی در مقاومت برشی
۶۴	۵-۱- آزمایشات بررسی اثر تعداد سیکل در مقاومت برشی
۶۴	۵-۱-۱- برخی از نتایج حاصل از آزمایشات
۶۸	۵-۲- آزمایشات بررسی اثر فرکانس در مقاومت برشی
۶۹	۵-۲-۱- نحوه انجام آزمایش
۷۰	۵-۲-۲- نتایج آزمایش
۷۰	۶- اثر دامنه سیکل های بارگذاری در مقاومت برشی استاتیکی
۷۰	۶-۱- نحوه انجام آزمایش
۷۳	۶-۲- نتایج آزمایش
۷۷	۷- پاسخ سیستم سنگ - درزه به بارهای نرمال محدود
۸۶	۸- کنترل نتایج و تصحیح پارامترهای ایجاد کننده خطا
۸۶	۸-۱- بررسی اثر مقاومت ممبران در مقادیر مقاومت برشی
۸۶	۸-۲- بررسی تاثیر اصطکاک جدار داخلی سلول آزمایش با جدار بیرونی پیستون
۸۷	۸-۳- تکرار پذیری نتایج آزمایش
۸۹	فصل پنجم: بررسی رفتار نمونه های درزه دار تحت جابجایی های برشی زیاد
۹۰	۱- مقدمه
۹۱	۲- رفتار درزه های سنگی در آزمایشات برش مستقیم استاتیکی

۹۱	۱-۲- نمودارهای تنش برشی - جابجایی برشی در آزمایشات برش مستقیم
۹۴	۲-۲- آزمایشات استاتیکی روی مدل‌های درزه
۹۴	۱-۲-۲- آزمایشات استاتیکی روی نمونه های دندان اره ای
۹۶	۲-۲-۲- آزمایشات استاتیکی روی نمونه های درزه واقعی
۹۷	۳-۲- آزمایشات اعمال یک سیکل بارگذاری روی مدل‌های درزه
۹۷	۱-۳-۲- اعمال بار تناوبی روی نمونه های دندان اره ای
۱۰۳	۲-۳-۲- اعمال بار تناوبی روی نمونه های درزه واقعی
۱۰۶	۲-۳-۳- برخی از نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده
۱۱۱	۴-۲- آزمایشات برش تناوبی روی مدل‌های درزه
۱۱۲	۱-۴-۲- رفتار نمونه های دندان اره ای تحت بارگذاری های برشی تناوبی
۱۲۰	۲-۴-۲- رفتار نمونه های درزه واقعی تحت بارگذاری های برشی تناوبی
۱۲۵	فصل ششم: تحلیل نتایج آزمایشات تعیین مقاومت برشی تناوبی
۱۲۶	۱- مقدمه
۱۲۷	۲- تحلیل نتایج آزمایشات سه محوری
۱۲۸	۱-۲- بررسی نحوه تغییرات مقاومت برشی نمونه های دندان اره ای با فشار همه جانبه
۱۳۱	۲-۲- تفسیر نتایج تغییرات مقاومت برشی با سرعت جابجایی
۱۳۳	۳-۲- تفسیر نتایج تغییرات مقاومت برشی با تعداد سیکل و فرکانس
۱۳۹	۴-۲- تفسیر نتایج تغییرات مقاومت برشی با دامنه ارتعاش
۱۴۱	۳- بررسی نتایج حاصل از آزمایشات برش مستقیم
۱۴۳	۱-۳- تفسیر نتایج آزمایشات برش انجام شده روی نمونه های دندان اره ای
۱۴۳	۱-۱-۳- تحلیل نتایج آزمایشات برش تحت تنش نرمال کم
۱۵۱	۲-۱-۳- تحلیل نتایج آزمایشات برش تحت تنش نرمال بالا
۱۵۸	۳-۱-۳- تحلیل نتایج آزمایشات برش تحت تنش نرمال حد واسط
۱۶۳	۲-۳- تفسیر نتایج آزمایشات برش روی نمونه های درزه واقعی
۱۶۳	۱-۲-۳- تحلیل نتایج آزمایشات برش تحت تنش نرمال کم
۱۶۹	۲-۲-۳- تحلیل نتایج آزمایشات برش تحت تنش نرمال حد واسط
۱۷۴	۴- مدل ریاضی حاصل از نتایج آزمایشات برش در سطوح مختلف جابجایی
۱۷۴	۱-۴- مدل ریاضی جهت جابجایی های محدود استاتیکی و تناوبی

۱۷۸	۲-۴- مدل ریاضی جهت جابجایی های تناوبی بزرگ
۱۹۰	۳-۴- جمع بندی
۱۹۲	۵- استفاده از نرم افزار UDEC جهت مدل سازی نتایج
۱۹۲	۵-۱- مدل سازی نمونه دندان اره ای استوانه ای با برنامه UDEC
۱۹۵	۵-۲- مدل سازی نمونه برش مستقیم با برنامه UDEC
۱۹۸	۵-۳- مقایسه نتایج مدل سازی با مقادیر واقعی
۱۹۹	فصل هفتم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۲۰۰	۱- نتیجه گیری
۲۰۱	۲- پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق حاضر
۲۰۳	فهرست مراجع
۲۱۱	ضمیمه ۱ : برخی از معیارهای تعیین مقاومت برشی
۲۳۴	ضمیمه ۲ : مختصری در مورد نرم افزار UDEC

فهرست جداول:

- ۱-۲ - صدمات وارده به تونلهای مختلف بر اثر زلزله های ۱۹۲۳ تا ۱۹۹۳ ژاپن ۱۰
- ۱-۳ - عملکردهای اصلی دستگاه BCR 3D ۵۱
- ۱-۴ - مقادیر سختی نرمال مماسی و سختی نرمال متقاطع برای برخی از نمونه های درزه دار ۸۵
- ۲-۴ - برخی از نتایج حاصل از تکرار آزمایشات سه محوری ۸۸
- ۱-۵ - کاهش نسبت $\tau_{III} / \sigma_{III}$ با افزایش تنش نرمال در نمونه های دندان اره ای ۹۶
- ۲-۵ - کاهش نسبت $\tau_{III} / \sigma_{III}$ با افزایش تنش نرمال در نمونه های مدل سطح درزه واقعی ۹۷
- ۳-۵ - مقادیر برخی از پارامترهای محاسبه شده در آزمایشات اعمال یک سیکل جابجایی برشی ۹۹
- ۴-۵ - برخی از مقادیر پارامترهای محاسبه شده با استفاده از نتایج آزمایشات روی مدل درزه واقعی ۱۰۳
- ۱-۶ - تغییر مقادیر کاهش زبری و زاویه زبری در بارگذاری تناوبی تحت تنش نرمال ۱/۲ مگاپاسکال ۱۴۴
- ۲-۶ - مقایسه مقادیر اندازه گیری شده تنش برشی با مقادیر پیش بینی شده با معیار پاتون ۱۴۸
- ۳-۶ - مقادیر کاهش زبری و تغییرات زاویه انبساطی اندازه گیری شده تحت تنش نرمال ۶/۵ مگاپاسکال ۱۵۲
- ۴-۶ - مقایسه مقادیر مقاومت برشی تحت تنش نرمال ۶/۵ مگاپاسکال با معیار توسعه داده شده پاتون ۱۵۵
- ۵-۶ - مقادیر کاهش زبری و زاویه زبری در طول بارگذاری تناوبی تحت تنش نرمال ۴/۲ مگاپاسکال ۱۵۸
- ۶-۶ - مقایسه مقادیر آزمایش برش تحت تنش نرمال ۴/۲ مگاپاسکال با برخی از معیارها ۱۶۱
- ۷-۶ - مقادیر کاهش زبری و سایر پارامترها در مدل درزه واقعی تحت تنش نرمال ۱/۲ مگاپاسکال ۱۶۵
- ۸-۶ - مقایسه مقادیر مقاومت برشی اندازه گیری شده با برخی معیارها در تنش نرمال ۱/۲ مگاپاسکال ۱۶۷
- ۹-۶ - مقادیر کاهش زبری و سایر پارامترها در مدل درزه واقعی در تنش نرمال ۴/۲ مگاپاسکال ۱۷۰
- ۱۰-۶ - مقایسه مقادیر آزمایش برش تحت تنش نرمال ۴/۲ مگاپاسکال با معیار توسعه داده شده پاتون ۱۷۲

فهرست شکلها:

- ۱-۲ - بیشینه شتاب و بیشینه سرعت لرزه ای در سطح و ارتباط آن با صدمات تونلها ۱۲
- ۲-۲ - رابطه بین سطوح صدمات در تونل با فاصله تا گسل و بزرگا ۱۲
- ۲-۳ - دامنه های مختلف مطالعاتی اثر بارهای دینامیکی روی رفتار توده سنگهای درزه دار ۱۶
- ۱-۳ - نمایی شماتیک از ابعاد هندسی نمونه دندان اره ای مورد استفاده در آزمایشات سه محوری ۲۱
- ۲-۳ - نمایی شماتیک از ابعاد هندسی نمونه دندان اره ای مورد استفاده در آزمایشات برش مستقیم ۲۲
- ۳-۳ - نمایی از نمونه درزه گرانیتی که سطح آن جهت مدل سازی درزه واقعی بکار رفته است ۲۳
- ۳-۴ - سطح درزه واقعی که توسط سیستم اسکنر لیزری تهیه شده است ۲۴
- ۳-۵ - دستگاه اسکن لیزری سطح درزه در آزمایشگاه 3S فرانسه ۲۴
- ۳-۶ - طبقه بندی ساده مصالح مناسب برای مدل سازی سنگها ۲۶
- ۳-۷ - سیلیکون مورد استفاده جهت قالب سازی نمونه های درزه دار ۲۸
- ۳-۸ - قالب پی وی سی و قطعات منشوری شکل سیلیکونی برای مشابه سازی نمونه های مصنوعی ۲۸
- ۳-۹ - قالب سیلیکونی دندان اره ای در داخل بدنه فلزی مربوطه جهت آزمایش برش مستقیم تناوبی ۲۹
- ۳-۱۰ - نمونه درزه واقعی در داخل سلول آزمایش و قالب سیلیکونی تهیه شده از روی سطح درزه واقعی ۲۹
- ۳-۱۱ - دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری تک محوری ۳۱
- ۳-۱۲ - برخی از نمونه های آزمایش شده جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی ۳۱
- ۳-۱۳ - نتیجه آزمایش سه محوری روی نمونه بدون درزه ۳۲
- ۳-۱۴ - نمونه بتنی تهیه شده با استفاده از منشور سیلیکونی ۳۴
- ۳-۱۵ - دستگاه سنگ زنی قسمتهای فوقانی و تحتانی نمونه و دستگاه سنجش زاویه انحراف سطح نمونه ۳۵
- ۳-۱۶ - برخی از نمونه های تهیه شده جهت انجام آزمایشات برش مستقیم تناوبی ۳۶
- ۳-۱۷ - قطعات سلول آزمایش سه محوری بوهرلر مورد استفاده در آزمایشگاه 3S فرانسه ۳۸
- ۳-۱۸ - نمونه پوشانده شده با ممبران روی قطعه پایه و سلول آماده برای انجام آزمایش ۳۸
- ۳-۱۹ - جک هیدرولیکی مورد استفاده جهت بارگذاری محوری روی نمونه و پانل کنترل در گرونوبل ۴۰
- ۳-۲۰ - سیستم تولید فشار همه جانبه جهت آزمایشات سه محوری در آزمایشگاه 3S ۴۱
- ۳-۲۱ - نمایی از کامپیوترها و سیستمهای پردازشگر داده ها در آزمایشگاه 3S ۴۲
- ۳-۲۲ - قطعات مختلف سلول آزمایش در نوزان ۴۳

- ۳-۲۳- نمایی از جک هیدرولیکی اعمال بار محوری در آزمایشگاه LMR ۴۴
- ۳-۲۴- نمایی از دستگاه اعمال تنش همه جانبه در آزمایشگاه LMR ۴۵
- ۳-۲۵- سیستمهای کنترل در آزمایشگاه LMR ۴۶
- ۳-۲۶- مکانیسم بارگذاری در دستگاههای رایج برش مستقیم دو بعدی ۴۸
- ۳-۲۷- مکانیسم جابجایی برشی دو طرفه در دستگاه BCR 3D ۴۸
- ۳-۲۸- سلول آزمایش برش مستقیم مورد استفاده جهت نمونه های دندان اره ای ۵۱
- ۳-۲۹- نمایی از قسمت های اصلی دستگاه آزمایش برش مستقیم BCR 3D ۵۲
- ۳-۳۰- کامپیوترهای برنامه ریزی، کنترل و پردازش داده ها در سیستم BCR 3D ۵۳
- ۴-۱- نمودار تنش برشی در برابر جابجایی برشی تحت فشارهای همه جانبه مختلف ۵۹
- ۴-۲- نمایی از یکی از نمونه های دندان اره ای بعد از آزمایش ۵۹
- ۴-۳- اثر تغییرات سرعت جابجایی محوری روی مقاومت برشی نمونه های درزه دار دندان اره ای ۶۱
- ۴-۴- انواع تغییرشکلهای ناشی از ارتعاش زمین در هنگام زلزله ۶۳
- ۴-۵- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای آزمایش سه محوری پس از ۲۵ سیکل بارگذاری ۶۵
- ۴-۶- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای آزمایش سه محوری پس از ۱۰۰ سیکل بارگذاری ۶۶
- ۴-۷- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای آزمایش سه محوری پس از ۵۰۰ سیکل بارگذاری ۶۷
- ۴-۸- نمودار تغییرات مقاومت برشی برای آزمایش تناوبی - استاتیکی تحت فرکانس ۰/۲ هرتز ۷۱
- ۴-۹- نمودار تغییرات مقاومت برشی برای آزمایش تناوبی - استاتیکی تحت فرکانس ۰/۵ هرتز ۷۲
- ۴-۱۰- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای دامنه حدود ۰/۵ مگاپاسکال ۷۴
- ۴-۱۱- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای دامنه حدود ۱/۸ مگاپاسکال ۷۵
- ۴-۱۲- ایجاد شکستگی به واسطه ناخالصی در سطح یکی از نمونه های دندان اره ای ۷۶
- ۴-۱۳- تراکم نرمال در یک نمونه درزه مصنوعی گراندیوریتی ۷۸
- ۴-۱۴- نحوه قرار گیری اجزای دستگاه BCR 3D برای آزمایش اثر بارهای نرمال ۸۰
- ۴-۱۵- نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال برای یک سیکل بارگذاری روی نمونه دندان اره ای ۸۱
- ۴-۱۶- نمودارهای تغییرات جابجایی نرمال تحت تنشهای نرمال تناوبی ۸۳
- ۴-۱۷- نمودار تنش نرمال در برابر جابجایی نرمال برای نمونه قالب گیری شده از درزه واقعی ۸۴
- ۴-۱۸- اثر اصطکاک بین جدار داخلی سلول آزمایش با جدار بیرونی پیستون در آزمایشات سه محوری ۸۷
- ۵-۱- برخی از حالات جابجایی برشی با تنشهای نرمال ثابت یا متغیر ۹۰