

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای علیرضا نادی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی تجربی و عددی رفتار دینامیکی سنگ ها در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن - مکانیک سنگ پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کامران گشتاسبی گوهرریزی	دانشیار	
استاد راهنمای دوم	دکتر رضا نقدآبادی	استاد	
استاد ناظر	دکتر مرتضی احمدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالهادی قزوینیان	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد فاروق حسینی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مرتضی احمدی	دانشیار	

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 فعالیت های 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 نگارنده در رشته مهندسی معدن - گرایش مکانیک سنگ است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر کامران گشتاسبی و راهنمای دوم جناب آقای دکتر رضا نقدآبادی، 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 رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه 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، تامین نماید.

ماده ۶- اینجانب علیرضا نادی دانشجوی رشته مهندسی معدن - گرایش مکانیک سنگ مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.



نام و نام خانوادگی: علیرضا نادی

تاریخ و امضا: ۱۳۹۲/۱۲/۱۹

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت

مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم‌الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.



نام و نام خانوادگی: علیرضا نادی

تاریخ و امضا: ۱۳۹۲/۱۲/۱۹



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی معدن
گروه مکانیک سنگ

پایان نامه دوره ی کارشناسی ارشد

بررسی تجربی و عددی رفتار دینامیکی سنگها

دانشجو:

علیرضا نادی

اساتید راهنما:

دکتر کامران گشتاسبی

دکتر رضا نقدآبادی

زمستان ۱۳۹۲

تقدیم بہ

پر بہترین کنجہای کیتی

یگانہ آموزگار عشق، فداکاری و محبت، مادرم.

یگانہ آموزگار کوشش، ایستادگی و مودت، پدرم.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می دانم که از تمامی کسانی که در راه کسب علم و معرفت چراغ راهمای بنده بوده اند، مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام نمایم:

از اساتید راهمهای کراتقدر خودم جناب آقایان دکتر کامران کتاشی و دکتر رضا تقدآبادی که در طول مدت پژوهش پایان نامه از راهمهای بی بدیشان

استفاده نمودم،

از اساتید محترم گروه جناب آقایان دکتر مرتضی احمدی و دکتر عبدالهادی قزوینیان که در طول مدت تحصیل درس علم و زندگی را به من آموختند

از جناب آقای مهندس فرهادی شمانی که در طول مدت پایان نامه از آموخته های گرانمایان بهره بردم،

از جناب آقایان مهندس اشرفی و مهندس پوراسدیان دانشجوین محترم دانشگاه صنعتی شریف که در پیشبرد این تحقیق از هیچ گلی دریغ نمودند

از جناب آقای دکتر حمیدنجاتی، دوست عزیز و گرامی ام که در طول مدت تحصیل همواره از راهمهای گرانمایان بهره بردم،

و از تمامی دوستان هم دوره خودم که همواره مشوق و پشتیبان بنده بودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

دینامیک سنگ به عنوان شاخه‌ای از علم مکانیک سنگ با رفتار مکانیکی سنگها در نرخهای بارگذاری بالا در ارتباط است. با توجه به اینکه در مهندسی سنگ، مسائل بسیاری از قبیل زمین‌لرزه، انفجار و نفوذ پرتابه‌ها در ارتباط با نرخهای بارگذاری بالا می‌باشند، لذا مطالعه دینامیک سنگ از اهمیت فوق‌العاده زیادی برخوردار می‌باشد. اگرچه مطالعه جامع رفتار دینامیکی سنگها مستلزم شناخت دقیق پارامترهای محیطی اطراف سازه می‌باشد. در تحقیق حاضر، با استفاده از آزمایش میله فشاری هایپکینسون به عنوان شناخته‌شده‌ترین و مرسوم‌ترین ابزار تعیین رفتار دینامیکی مواد در نرخهای کرنش بالا، سعی بر آن شده است تا با انتخاب انواع مناسب سنگ شامل ماسه سنگ و سنگ آهک، تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل نرخ بارگذاری، رطوبت و جنس سنگ بر رفتار دینامیکی سنگها در نرخهای بارگذاری بالا مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین به منظور تحلیل بهتر مسأله، شبیه‌سازی عددی توسط نرم افزار $LS - DYNA$ نیز انجام شده است. نتایج تجربی نشان داده است که با افزایش نرخ کرنش تا مقدار $150 s^{-1}$ ، مقدار مقاومت دینامیکی ماسه سنگ و سنگ آهک به ترتیب به میزان $100 MPa$ ($62/5$) و $105 MPa$ ($87/5$) بیشتر از مقاومت شبه‌استاتیکی آنها به دست آمده است. همچنین در حالت اشباع نسبت به حالت رطوبت طبیعی، مقاومت دینامیکی ماسه سنگ در نرخ کرنش $150 s^{-1}$ به میزان $137 MPa$ (52) کاهش داشته است درحالیکه مقاومت دینامیکی سنگ آهک در نرخ کرنش $135 s^{-1}$ به میزان $15 MPa$ (1) افزایش داشته است. در نهایت با مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی نتیجه گرفته شده است که ناهمگنی سنگ از یک طرف و اینرسی ناشی از افزایش ناگهانی فشار داخلی سنگ از طرف دیگر، مهمترین عوامل مؤثر بر افزایش مقاومت دینامیکی سنگ در نرخهای کرنش بالا بوده به طوری که این تأثیر با افزایش نرخ کرنش شدت پیدا می‌کند.

کلیدواژه: دینامیک سنگ، آزمایش میله فشاری هایپکینسون، نرخ کرنش، رطوبت، تعادل دینامیکی،

شبیه‌سازی عددی، مقاومت دینامیکی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ث	فهرست علائم و نشانه‌ها.....
ج	فهرست جدول‌ها.....
ح	فهرست شکل‌ها.....
۱	فصل ۱- کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- اهداف تحقیق.....
۳	۳-۱- ساختار پایان‌نامه.....
۴	فصل ۲- مروری بر مطالعات انجام شده.....
۵	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- آزمایش‌های دینامیکی بر روی سنگ.....
۱۲	۳-۲- اثر نرخ کرنش بر مقاومت توده‌سنگ.....
۱۴	۴-۲- معیارهای شکست دینامیکی سنگ.....
۱۵	۵-۲- مدلسازی عددی شکست دینامیکی سنگ.....
۱۵	۲-۵-۱- روش‌های عددی پیوسته.....
۱۶	۲-۵-۲- روش‌های عددی ناپیوسته.....
۱۷	۲-۵-۳- روش‌های عددی ترکیبی.....
۱۸	۶-۲- آزمایش میله فشاری هاپکینسون در سنگ.....
۱۸	۲-۶-۱- مشخصات شماتیک دستگاه <i>SHPB</i>

- ۲-۶-۲- تکنیک های مورد استفاده در آزمایش *SHPB* به منظور آزمایش مواد ترد..... ۲۲
- ۱-۲-۶-۲- میله ضربه زن مخصوص..... ۲۲
- ۲-۲-۶-۲- تکنیک شکل دهنده گی موج..... ۲۳
- ۳-۶-۲- فرآیندهای آماده سازی در آزمایش های پکینسون..... ۲۶
- ۱-۳-۶-۲- آماده سازی نمونه ۲۶
- ۲-۳-۶-۲- آماده سازی دستگاه ۲۷
- ۳-۳-۶-۲- کالیبراسیون دستگاه..... ۲۷
- ۴-۶-۲- مراحل انجام آزمایش..... ۲۹
- ۵-۶-۲- پردازش داده ها و به دست آوردن پارامترهای مربوط به تغییر شکل نمونه..... ۳۰
- ۱-۵-۶-۲- ثبت امواج ۳۱
- ۲-۵-۶-۲- جابه جا کردن موج و کالیبراسیون..... ۳۱
- ۶-۶-۲- پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش *SHPB* حاصل از شرایط نمونه و محیط آزمایش..... ۳۳

فصل ۳- مواد و روش انجام آزمایش..... ۴۲

- ۱-۳- مقدمه ۴۳
- ۲-۳- مشخصات دستگاه های پکینسون مورد استفاده در تحقیق..... ۴۳
- ۳-۳- نمونه سنگهای انتخاب شده در تحقیق..... ۴۶
- ۱-۳-۳- ساختار کانی شناسی نمونه سنگ های مورد استفاده در تحقیق..... ۴۶
- ۴-۳- فرآیند آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایشهای مقدماتی و آزمایشهای اصلی..... ۴۷
- ۱-۴-۳- ساخت و آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایشهای مقدماتی..... ۴۷
- ۲-۴-۳- ساخت و آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایشهای اصلی..... ۴۸
- ۵-۳- آزمایشهای انجام شده به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه ها..... ۵۱
- ۶-۳- آزمایشهای انجام شده به منظور تعیین پارامترهای مکانیکی نمونه ها در شرایط شبه
- استاتیک..... ۵۲
- ۷-۳- آزمایشهای انجام شده به منظور تخمین حافظه تنش سنگ (اثر کایزر)..... ۵۴

۸-۳- آزمایش اولتراسونیک به منظور تعیین سرعت موج طولی در نمونه‌ها.....۵۷

فصل ۴- شبیه‌سازی عددی.....۶۰

۴-۱- مقدمه۶۱

۴-۲- انتخاب نرم افزار مورد نیاز در تحقیق.....۶۱

فصل ۵- نتایج حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی.....۷۰

۵-۱- مقدمه۷۱

۵-۲- نتایج آزمایشگاهی.....۷۱

۵-۲-۱- ماسه سنگ در حالت رطوبت طبیعی.....۷۱

۵-۲-۲- ماسه سنگ در حالت اشباع.....۷۸

۵-۲-۳- سنگ آهک در حالت رطوبت طبیعی.....۸۲

۵-۲-۴- سنگ آهک در حالت اشباع.....۸۷

۵-۳- نتایج شبیه‌سازی عددی.....۹۱

۵-۳-۱- ماسه سنگ در حالت رطوبت طبیعی.....۹۲

۵-۳-۲- ماسه سنگ در حالت اشباع.....۹۷

۵-۳-۳- سنگ آهک در حالت رطوبت طبیعی.....۹۹

۵-۳-۴- سنگ آهک در حالت اشباع.....۱۰۲

فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....۱۰۵

۶-۱- مقدمه۱۰۶

۶-۲- نتیجه‌گیری.....۱۰۶

۶-۳- پیشنهادها.....۱۰۸

مراجع.....۱۰۹

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
میله فشاری هاپکینسون	<i>SHPB</i>
موج ورودی	<i>In</i>
موج برگشتی	<i>Re</i>
موج عبوری	<i>Tr</i>
تنش	σ
کرنش	ε
نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}$
ضریب افزایش دینامیکی	<i>DIF</i>
سرعت موج طولی در میله‌ها	C_e
مقاومت تک‌محوری شبه‌استاتیکی	σ_c
مقاومت تک‌محوری دینامیکی	σ_d
زاویه اصطکاک داخلی	φ
طول نمونه	L_s
مدول یانگ میله‌ها	E_e
سطح مقطع میله‌ها	A_e
سطح مقطع نمونه	A_s
چگالی میله‌ها	ρ_e

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

-
- جدول ۱-۲- آزمایش‌های تعیین مقاومت دینامیکی و دستگاه‌های مربوطه..... ۹
- جدول ۲-۲- روش‌های عددی مرتبط با مسائل دینامیک سنگ..... ۱۷
- جدول ۱-۳- تعداد نمونه‌های تهیه شده از دو جنس ماسه سنگ و سنگ آهک در سه نسبت منظر به منظور انجام آزمایش هاپکینسون..... ۵۰
- جدول ۲-۳- نتایج به دست آمده برای خصوصیات فیزیکی ماسه سنگ با استفاده از فرآیند خشک و اشباع کردن..... ۵۱
- جدول ۳-۳- نتایج به دست آمده برای خصوصیات فیزیکی سنگ آهک با استفاده از فرآیند خشک و اشباع کردن..... ۵۱
- جدول ۴-۳- نتایج حاصل از انجام آزمایش تک‌محوری و برزیلین برای نمونه‌های ماسه سنگ..... ۵۳
- جدول ۵-۳- نتایج حاصل از انجام آزمایش تک‌محوری و برزیلین برای نمونه‌های سنگ آهک..... ۵۳
- جدول ۱-۴- پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل ماده ماسه سنگ در دو حالت رطوبت.. ۶۵
- جدول ۲-۴- پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل ماده مربوط به سنگ آهک در دو حالت رطوبت..... ۶۵
- جدول ۳-۴- پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته شده برای مدل ماده مربوط به میله‌های دستگاه..... ۶۵
- جدول ۴-۴- پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته شده در مدل ماده مربوط به شکل دهنده موج..... ۶۶
- جدول ۵-۴- مشخصات مش‌بندی مربوط به قسمت‌های مختلف دستگاه هاپکینسون..... ۶۶

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

-
- شکل ۱-۲- تفاوت شکست سنگ در دو حالت الف) بارگذاری دینامیکی ب) بارگذاری استاتیکی..... ۵
- شکل ۲-۲- رئوس مسائل مرتبط با دینامیک سنگ در سازه‌های تونل و مغار..... ۷
- شکل ۳-۲- شماتیک سیستم قدیمی آزمایش *SHPB* به همراه نمودار مکان-زمان مربوط به انتشار موج تنش در آزمایش..... ۱۹
- شکل ۴-۲- امواج ورودی، برگشتی و عبوری ثبت شده در سیستم معمولی *SHPB*..... ۲۱
- شکل ۵-۲- شماتیک یک میله ضربه‌زن مخصوص به همراه موج نیمه‌سینوسی تولید شده حین برخورد آن با میله ورودی موج..... ۲۳
- شکل ۶-۲- امواج تنشی ثبت شده در آزمایش *SHPB* در دو حالت با و بدون استفاده از شکل‌دهنده موج..... ۲۴
- شکل ۷-۲- شماتیک کلی سیستم *SHPB*..... ۲۵
- شکل ۸-۲- طرحواره کالیبراسیون سیستم *SHPB*..... ۲۸
- شکل ۹-۲- امواج ورودی، برگشتی و عبوری از آزمایش هاپکینسون همراه با نیروی نامتعادل در نمونه.. ۳۲
- شکل ۱۰-۲- امواج ورودی، عبوری و برگشتی در آزمایش *SHPB*..... ۳۷
- شکل ۱۱-۲- نمودار مربوط به تغییر مقاومت دینامیکی بر حسب نرخ کرنش در سه شرایط سطح تماس مختلف شامل به هم قفل شده، خشک و روانسازی شده..... ۳۸
- شکل ۱۲-۲- نمونه‌های بازیابی شده پس از انجام آزمایش *SHPB* الف) سطح تماس قفل شده ب) سطح تماس خشک ج) سطح تماس روانکاری شده..... ۴۰
- شکل ۱-۳- نمایی از دستگاه هاپکینسون مورد استفاده در این تحقیق..... ۴۴
- شکل ۲-۳- نمایی از نمونه مورد آزمایش در دستگاه هاپکینسون..... ۴۴
- شکل ۳-۳- نمایی از نوسان سنج و منبع تغذیه مورد استفاده در آزمایش هاپکینسون..... ۴۵

- شکل ۳-۴- مقاطع نازک نمونه سنگ‌های مورد آزمایش در زیر میکروسکوپ الف) سنگ آهک ب) ماسه سنگ ۴۷
- شکل ۳-۵- مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه شامل الف) مغزه‌گیری ب) برش ج) ساب د) صیقل ۴۹
- شکل ۳-۶- نمونه‌های تهیه شده در سه نسبت منظر برای انجام آزمایش هاپکینسون الف) سنگ آهک ب) ماسه سنگ ۵۰
- شکل ۳-۷- الف) دسیکاتور ب) آون به منظور انجام فرآیند خشک و اشباع کردن نمونه ۵۲
- شکل ۳-۸- دستگاه **HEICO** مورد استفاده برای انجام آزمایش تک محوری و برزیلین ۵۳
- شکل ۳-۹- منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمایش تک محوری برای الف) سنگ آهک و ب) ماسه سنگ ۵۴
- شکل ۳-۱۰- نمایی از انجام آزمایش آکوستیک با استفاده از دستگاه بارگذاری خود کنترل ۵۵
- شکل ۳-۱۱- نمودار الف) شمارش تجمعی **AE** و ب) تنش موجود در ماسه سنگ بر حسب زمان ۵۶
- شکل ۳-۱۲- نمودار الف) شمارش تجمعی **AE** و ب) تنش موجود در سنگ آهک بر حسب زمان ۵۶
- شکل ۳-۱۳- دستگاه اولتراسونیک به منظور تعیین سرعت موج طولی در نمونه سنگ‌ها ۵۷
- شکل ۳-۱۴- نمودار مربوط به سرعت موج طولی اندازه‌گیری شده با آزمایش اولتراسونیک بر حسب شماره نمونه برای نمونه‌های ماسه سنگ در سه نسبت منظر ۵۸
- شکل ۳-۱۵- نمودار مربوط به سرعت موج طولی اندازه‌گیری شده با آزمایش اولتراسونیک بر حسب شماره نمونه برای نمونه‌های سنگ آهک در سه نسبت منظر ۵۸
- شکل ۴-۱- تصویری از مدل ساخته شده آزمایش هاپکینسون به منظور تحلیل در نرم‌افزار **LS - DYNA** ۶۸
- شکل ۵-۱- نتایج حاصل از انجام آزمایش هاپکینسون بر روی نمونه‌های ماسه سنگ در رطوبت طبیعی و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش- کرنش دینامیکی ۷۳

شکل ۵-۲- نتایج حاصل از انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های ماسه سنگ در رطوبت طبیعی و نسبت منظر ۲ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۷۴

شکل ۵-۳- الف) منحنی تنش-کرنش دینامیکی و ب) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان برای ماسه سنگ در حالت رطوبت طبیعی و در دو نسبت منظر ۱ $(V = 23 \text{ m/s})$ و ۲ $(V = 24 \text{ m/s})$ ۷۷

شکل ۵-۴- نتایج حاصل از انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های ماسه سنگ در حالت اشباع و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۷۹

شکل ۵-۵- الف) منحنی تنش-کرنش دینامیکی و ب) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان برای نمونه های ماسه سنگ در حالت رطوبت طبیعی و با نسبت منظر ۲..... ۸۱

شکل ۵-۶- الف) منحنی تنش-کرنش دینامیکی و ب) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان برای نمونه های ماسه سنگ در حالت اشباع و با نسبت منظر ۱..... ۸۱

شکل ۵-۷- نتایج حاصل از انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های سنگ آهک در رطوبت طبیعی و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۸۴

شکل ۵-۸- نتایج حاصل از انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های سنگ آهک در رطوبت طبیعی و نسبت منظر ۲ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۸۶

شکل ۵-۹- نتایج حاصل از انجام آزمایش هایپکینسون بر روی نمونه های سنگ آهک در حالت اشباع و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۸۸

شکل ۵-۱۰- نمایی از پدیده انحلال فشاری بین سطوح تماس دانه های سنگ آهک در فشارهای بالا و در حضور آب..... ۸۹

شکل ۵-۱۱- نمودار تعادل دینامیکی نیروها برای نمونه‌های سنگ آهک در دو حالت الف) طبیعی و ب)

اشباع در سرعت‌های مختلف ضربه..... ۹۱

شکل ۵-۱۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هاپکینسون بر روی نمونه‌های ماسه سنگ در حالت رطوبت

طبیعی و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د)

منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی.

..... ۹۳

شکل ۵-۱۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هاپکینسون بر روی نمونه‌های ماسه سنگ در حالت رطوبت

طبیعی و نسبت منظر ۲ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د)

منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی.

..... ۹۴

شکل ۵-۱۴- نمودار مقادیر *DIF* بر حسب سرعت ضربه برای نمونه‌های ماسه سنگ در رطوبت طبیعی و

نسبت منظر الف) ۱ و ب) ۲ حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی..... ۹۵

شکل ۵-۱۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هاپکینسون بر روی نمونه‌های ماسه سنگ در حالت اشباع

و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ

کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۹۸

شکل ۵-۱۶- نمودار مقادیر *DIF* بر حسب سرعت ضربه برای نمونه‌های ماسه سنگ اشباع و نسبت منظر ۱

حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی..... ۹۹

شکل ۵-۱۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هاپکینسون بر روی نمونه‌های سنگ آهک در حالت رطوبت

طبیعی و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د)

منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی.

..... ۱۰۰

شکل ۵-۱۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هاپکینسون بر روی نمونه‌های سنگ آهک در حالت رطوبت

طبیعی و نسبت منظر ۲ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د)

منحنی نرخ کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی.

۱۰۱

شکل ۵-۱۹- نمودار مقادیر *DIF* بر حسب سرعت ضربه برای نمونه‌های سنگ آهک در حالت رطوبت طبیعی

و نسبت منظر الف) ۱ و ب) ۲ حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی..... ۱۰۲

شکل ۵-۲۰- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی هایپکینسون بر روی نمونه‌های سنگ آهک در حالت اشباع

و نسبت منظر ۱ الف) منحنی موج ورودی ب) منحنی موج برگشتی ج) منحنی موج عبوری د) منحنی نرخ

کرنش بر حسب زمان ه) منحنی تعادل دینامیکی نیروها ی) منحنی تنش-کرنش دینامیکی..... ۱۰۳

شکل ۵-۲۱- نمودار مقادیر *DIF* بر حسب سرعت ضربه برای نمونه‌های سنگ آهک در حالت اشباع و نسبت

منظر ۱ حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی..... ۱۰۴

فصل ۱- کلیات

اندازه‌گیری دقیق پارامترهای دینامیکی سنگ همواره به عنوان یک ضرورت مهندسی برای بسیاری از زمینه‌های مرتبط با مهندسی سنگ و ژئوفیزیک مطرح بوده است و گستره وسیعی از مسائل مهندسی از قبیل حفاری، استخراج، انفجار سنگ، انفجار، زمین لرزه و نفوذ پرتابه‌ها را شامل می‌شود. در این گونه مسائل، مواد سنگی تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفته به گونه‌ای که این بارگذاریها محدوده وسیعی از نرخهای بارگذاری را شامل می‌شوند. بنابراین، تعیین دقیق مقاومت دینامیکی و خصوصیات چقرمگی سنگها در محدوده وسیعی از نرخهای بارگذاری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن این نکته که در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط شبه‌استاتیکی، تأثیر عوامل موثر بر رفتار مکانیکی سنگ شدت می‌یابد، لذا به منظور تعیین و شناسایی دقیق رفتار دینامیکی سنگها در نرخهای کرنش بالا لازم است که عوامل موثر به صورت دقیق‌تر و جامع‌تر مورد بررسی قرار گیرند. از آنجایی که رفتار دینامیکی سنگ علاوه بر میزان نرخ بارگذاری اعمالی و جنس سنگ به عوامل مختلف محیطی نیز وابسته می‌باشد، لذا به منظور بررسی جامع رفتار دینامیکی سنگها لازم است عوامل فوق به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرند [۱].

۱-۲- اهداف تحقیق

تحقیقات بسیاری انجام شده است تا نسبت به رفتار مکانیکی سنگها در شرایط بارگذاری دینامیکی در گستره وسیعی از نرخهای بارگذاری شناخت حاصل گردد، اما با این وجود شناخت و بررسی تأثیر عامل رطوبت به عنوان یکی از مهمترین عوامل محیطی بر رفتار دینامیکی سنگها با در نظر گرفتن میزان نرخ بارگذاری و جنس سنگ به صورت بسیار محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است تا رفتار دینامیکی انواع مختلف سنگ در نرخهای بارگذاری بالا با در نظر گرفتن عامل رطوبت به عنوان یکی از مهمترین عوامل محیطی مورد بررسی قرار گیرد تا نسبت به رفتار دینامیکی سنگها شناختی جامع حاصل گردد. بدین منظور از آزمایش‌های پاپکینسون که به عنوان مرسوم‌ترین و پرکاربردترین تکنیک در تعیین رفتار دینامیکی مواد در نرخهای کرنش بالا شناخته می‌شود،