پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکتری

مهندسی عمران – مهندسی زلزله

بررسی توزیع غیر همگن فشار آب حفره ای در مصالح مخلوط رس – سنگ دانه

جواد جلیلی

اساتید راهنما: دکتر محمد کاظم جعفری – دکتر علی شفیعی

استاد مشاور: دکتر محسن کمالیان

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

پدر و مادرم، به پاس قدردانی از زحمات و حمایت‌های بی دریغشان،
و همسرم، که در سختی‌های فراوان به انجام رسانیدن این پژوهش همواره در کنارم بود.

تشکر و قدردانی

انجام این پژوهش به دلیل دشواری آن نیازمند همکاری بسیاری از عزیزان بود که بدین وسیله از آنان قدردانی می‌شود:

از استاد محترم راهنما جناب آقای پروفسور جعفری که در فراز و نشیب‌های فراوان مسیر انجام تحقیق فراتر از یک استاد که همچون پدری دلسوز همواره با تمام امکانات موجود در صدد زدودن موانع و کمک به پیشبرد رساله بودند؛

از استاد محترم راهنما جناب آقای دکتر شفیعی، و استاد محترم مشاور جناب آقای دکتر کمالیان که همواره با جدیت و صمیمیت از بذل عنایت به این پروژه تحقیقاتی دریغ نورزیدند، و جناب آقای دکتر عسکری به عنوان ریاست محترم پژوهشکده و جناب آقای دکتر داوودی به عنوان ریاست محترم آزمایشگاه ژئوتکنیک پژوهشگاه که همواره همکاری صمیمانه ای داشتند و از مشاوره های ایشان بهره فراوان برده شد؛

از استاد محترم جناب آقای پروفسور Koseki که در ایام فرصت مطالعاتی راهنمایی تحقیق را در دانشگاه توکیو بر عهده داشتند و همچنین در پایان دوره سه عدد از سنسورهای مینیاتوری مورد نیاز تحقیق را به همراه راهنمایی‌های فنی لازم برای راه اندازی آن‌ها به پروژه تحقیقاتی هدیه دادند؛

از همکاران محترم پروفسور Koseki در آزمایشگاه ژئوتکنیک موسسه تحقیقات صنعتی دانشگاه توکیو، خصوصاً محقق محترم مهندس Sato که در طراحی، ساخت و راه اندازی تجهیزات مورد نیاز این پژوهش همکاری صمیمانه ای داشتند، و همچنین جناب آقای دکتر Chiaro که در حین انجام آزمایشات همواره از کمک و راهنمایی‌های ایشان بهره برده شد؛

از جناب آقای اسحاق روبن که با راه اندازی مجموعه ارزشمند صنایع مکانیک خاک ایران بسیاری از احتیاجات دستگاهی مورد نیاز محققین دانشگاهی کشور، و من جمله ملزومات مورد نیاز آمایشات این رساله در داخل کشور را فراهم نمودند؛

از پرسنل محترم آزمایشگاه ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله آقایان آزادمنش، هادوی، شیرازیان، یوسفی و خصوصاً مهندس عسگری که آزمایشات انجام شده در پژوهشگاه بدون راهنمایی و همکاری ایشان میسر نمی‌شد، و همچنین آقایان مهندس پروازه و مهندس حسینی که در آماده سازی سنسورها همکاری شایانی نمودند؛

و در آخر از دوستان محترم جناب آقای دکتر موسوی قادیکلایی و دکتر حسنی پور، و مهندس فدایی که همواره از راهنمایی‌ها و کمک‌های آنان بهره برده‌ام.

موفقیت و سربلندی همه این عزیزان را از خداوند متعال خواستارم.

چکیده

رساله حاضر تحقیقی پیرامون توزیع فشار آب حفره ای در مصالح مخلوط رس-سنگ دانه اشباع و اثر سنگ دانه‌ها بر این توزیع می‌باشد. در ابتدا مرور مختصر و جامعی از ادبیات فنی در زمینه مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی این مصالح صورت پذیرفته است. در ادامه آزمایشات متعددی با بهره بردن از تجهیزات پیشرفته جهت اندازه گیری فشار آب حفره ای درون نمونه صورت پذیرفته‌اند. این آزمایشات به صورت کیفی بیانگر ایجاد ناهمگنی در توزیع فشار آب حفره ای در اثر حضور دانه‌ها در مصالح رسی می‌باشند. در آزمایشات صورت گرفته، قرار گرفتن دانه‌ها در کنار سنسور های درون نمونه ای منجر به افزایش فشار آب حفره ای اندازه گیری شده توسط این سنسورها در مقایسه با نمونه های خالص رسی می‌باشند. تجربیات آزمایشگاهی این رساله حاکی از وجود محدودیت‌های فنی فراوان برای اندازه گیری دقیق این ناهمگنی به صورت کمی می‌باشد.

در ادامه تحقیق تحلیل‌های عددی دو و سه بعدی جامعی بر روی رفتار این مصالح در بارگذاری‌های مونوتونیک و سیکلی صورت پذیرفته است که به روشنی اثر وجود دانه‌ها را در ایجاد ناهمگنی در توزیع فشار آب حفره ای نشان می‌دهد. در تحلیل‌های سه بعدی صورت گرفته ، فضای محصور بین دانه های قرار گرفته در امتداد بارگذاری (مسیر فشار)، فضای محصور بین دانه های قرار گرفته عمود بر امتداد بارگذاری (مسیر کشش) و فضای دور از دانه‌ها (نقاط آزاد) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تحلیل‌های دو بعدی نیز نشان داد که در مسیر فشار، فشار آب حفره ای بیش از نقاط آزاد، و در مسیر کشش، فشار آب حفره ای کمتر از نقاط آزاد می‌باشند. این تفاوت فشار آب حفره ای با گذشت زمان به سمت تعادل پیش می‌رود که سرعت این بازتوزیع به نفوذپذیری مصالح و فرکانس بارگذاری بستگی دارد.

تحلیل‌های متعدد صورت گرفته در این مطالعه شامل محدوده وسیعی از مقادیر نفـــوذپذیری مصالح ($k = 3*10^{-8}$ m/s تـا $k = 3*10^{-12}$ m/s) و دامنه کرنش تناوبی (۰٫۰۱٪ تا ۱٫۵٪) در فرکانس‌های متنوع (۰٫۱ تا ۲ هرتز) بارگذاری می‌باشد. این تحلیل‌ها بیانگر آنند که هر چند در محدوده وسیعی از مقادیر پارامترهای فوق، فشار آب حفره ای اضافی ایجاد شده یا اندک است و یا در چند ثانیه بازتوزیع می‌شود، اما در فرکانس‌های بالای بارگذاری و نفوذپذیری‌های اندک مصالح رسی (مقادیر کمتر از 10^{-10} m/s)، افزایش فشار آب حفره ای در مسیر فشار نسبت به نقاط آزاد قابل توجه است و بازتوزیع آن در زمان نسبتاً طولانی (تا چند دقیقه) رخ می‌دهد. در چنین شرایطی در نظر گرفتن توزیع غیر همگن فشار آب حفره ای در بررسی پایداری ابنیه خاکی حاوی مخلوط رس - سنگ دانه ضروری است که بایستی بر اساس بررسی‌های تحلیلی تکمیلی و قضاوت مهندسی صورت پذیرد.

واژه های کلیدی

مصالح مخلوط، فشار آب حفره ای، ناهمگنی، آزمایش برش پیچشی تناوبی، آزمایش سه محوری تناوبی، تحلیل عددی محیط متخلخل اشباع

فهرست عناوین

عنوان **شماره صفحه**

۱- فصل اول: اهداف و ساختار رساله ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲-هدف و روش کار در این تحقیق ۳
۱-۳-ساختار رساله حاضر ۴
۲- فصل دوم: مرور ادبیات فنی ۶
۲-۱-مرور آزمایشات انجام شده بر روی مصالح مخلوط ۷
۲-۱-۱- آزمایشات با بارگذاری مونوتونیک و سیکلی ۷
۲-۱-۲- درصد کنترل کننده ۱۰
۲-۱-۳- نمونه همگن معادل ۱۲
۲-۱-۴- تخلخل موثر ۱۳
۲-۱-۵- جمع بندی آزمایشات ۱۵
۲-۲-کارهای تحلیلی بر روی مصالح مخلوط ۲۷
۲-۲-۱- مدل تغییرات فشار آب حفره ای ۲۹
۲-۲-۲- همگن سازی ۳۰
۲-۲-۲-۱- تئوری مخلوط (mixture theory) ۳۰
۲-۲-۲-۲- تحلیل مصالح مرکب (composite materials) ۳۶
۲-۲-۲-۳- همگن سازی بر مبنای مقیاس ذرات رسی ۳۸
۲-۲-۳- محاسبات عددی اجزاء محدود (Finite Element) ۳۸
۲-۲-۴- جمع بندی بررسی‌های تحلیلی ۴۹
۳- فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی ۵۱
۳-۱-مقدمه ۵۲
۳-۲-آزمایشات برش پیچشی ۵۳
۳-۲-۱- وضعیت توزیع تنش و کرنش در نمونه استوانه ای توخالی (تئوری) ۵۳
۳-۲-۱-۱- مؤلفه های تنش ۵۳
۳-۲-۱-۲- مؤلفه های کرنش ۵۸
۳-۲-۱-۳- اثر نفوذ غشاء ۶۰

۳-۲-۱-۳-۱)روش چند نمونه ای ۶۱
۳-۲-۱-۳-۲)روش تک نمونه ای ۶۱
۳-۲-۲- آزمایشات انجام شده ۶۱
۳-۲-۲-۱- دستگاه مورد استفاده ۶۲
۳-۲-۲-۲- تراکم نمونه ۶۵
۳-۲-۲-۳- مصالح مورد استفاده ۶۹
۳-۲-۲-۴- مراحل انجام آزمایش ۶۹
۳-۲-۲-۵- بررسی نتایج آزمایشات ۷۱
۳-۲-۲-۵-۱)نمونه های ماسه ای ۷۱
۳-۲-۲-۵-۲)نمونه سیلتی ۷۴
۳-۲-۲-۵-۳)نمونه رسی ۷۸
۳-۲-۳- بحث در مورد نتایج آزمایشات برش پیچشی ۸۲
۳-۳-آزمایشات سه محوری ۸۳
۳-۳-۱- تجهیزات مورد استفاده ۸۳
۳-۳-۱-۱- دستگاه سه محوری دینامیکی ۸۴
۳-۳-۱-۲- سنسور مینیاتوری اندازه گیری فشار آب حفره ای ۸۵
۳-۳-۱-۳- تجهیزات مورد نیاز برای ساخت نمونه ۸۷
۳-۳-۲- مصالح مصرفی ۸۸
۳-۳-۲-۱- ماسه ۸۸
۳-۳-۲-۲- کائولینیت زنوز ۸۸
۳-۳-۲-۲-۱)طبقه بندی کائولینیت زنوز ۸۹
۳-۳-۲-۲-۲)آزمایش تراکم استاندارد ۹۰
۳-۳-۲-۲-۳)آزمایش تحکیم ۹۱
۳-۳-۲-۲-۴)آزمایش تعیین نفوذپذیری ۹۲
۳-۳-۲-۳- مصالح سرامیکی ۹۳
۳-۳-۲-۴- مخلوط رس - سرامیک ۹۳
۳-۳-۲-۴-۱)آزمایش تراکم ۹۳

۳-۳-۲-۴-۲)آزمایش تحکیم ۹۴
۳-۳-۳- آزمایشات سه محوری استاتیکی ۹۵
۳-۳-۳-۱- نحوه آماده سازی نمونه های آزمایش استاتیکی ۹۶
۳-۳-۳-۲- اشباع و تحکیم نمونه‌ها..... ۹۷
۳-۳-۳-۳- بارگذاری نمونه‌ها..... ۱۰۰
۳-۳-۳-۳-۱)آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده ۱۰۱
۳-۳-۳-۳-۲)آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده ۱۰۳
۳-۳-۴- آزمایش‌های سه محوری تناوبی ۱۰۴
۳-۳-۴-۱- ارزیابی عملکرد سنسور با نمونه های ماسه ای ۱۰۵
۳-۳-۴-۲- نحوه ساخت نمونه های رس خالص و مخلوط ۱۰۷
۳-۳-۴-۳- اشباع و تحکیم نمونه‌ها..... ۱۰۷
۳-۳-۴-۴- بارگذاری تناوبی ۱۰۹
۳-۳-۴-۴-۱)دامنه کرنش اعمالی ۱۰۹
۳-۳-۴-۴-۲)فرکانس بارگذاری..... ۱۱۰
۳-۳-۴-۵- انواع نمونه های مورد آزمایش ۱۱۲
۳-۳-۴-۵-۱)رس خالص ۱۱۲
۳-۳-۴-۵-۲)نمونه حاوی لایه ای از مصالح مخلوط پیرامون سنسور ۱۱۴
۳-۳-۴-۵-۳)مصالح مخلوط..... ۱۱۹
۳-۳-۴-۵-۴)نمونه حاوی دانه های اطراف سنسور ۱۲۳
۳-۳-۵- جمع بندی و نتیجه گیری از آزمایشات..... ۱۳۰
۴- فصل چهارم: تحلیل عددی ۱۳۲
۴-۱-مقدمه ۱۳۳
۴-۲-نرم افزار مورد استفاده ۱۳۳
۴-۲-۱- نحوه ساخت هندسه و المان بندی..... ۱۳۳
۴-۲-۲- نحوه محاسبه فشار آب حفره ای ۱۳۵
۴-۲-۲-۱- تحلیل پلاستیک مصالح در حالت زهکشی نشده ۱۳۵
۴-۲-۲-۲- تحلیل coupled محیط دو فازه ۱۳۶

۴-۲-۳- مدل‌های رفتاری مورد استفاده ۱۳۶
۴-۲-۳-۱- مدل رفتاری Hardening Soil (HS) ۱۳۷
۴-۲-۳-۲- مدل رفتاری UBC3D ۱۴۰
۴-۲-۳-۳- مدل رفتاری الاستیک ۱۴۳
۴-۳-تحلیل‌های سه بعدی ۱۴۴
۴-۳-۱- تحلیل الاستیک ۱۴۴
۴-۳-۲- مدل رفتاری HS ۱۴۷
۴-۳-۲-۱- اثر فاصله دانه‌ها بر رفتار مصالح محصور بین آن‌ها ۱۵۰
۴-۳-۲-۲- اثر آرایش دانه‌ها بر رفتار مصالح پیرامونی ۱۵۲
۴-۳-۳- مدل رفتاری UBC3D ۱۵۷
۴-۴-تحلیل‌های دو بعدی دارای تقارن محوری (Axisymmetric) ۱۶۰
۴-۴-۱- هندسه مدل‌های تحلیل شده ۱۶۱
۴-۴-۱-۱- المان‌های حد فاصل ۱۶۲
۴-۴-۱-۲- ابعاد مش بندی ۱۶۵
۴-۴-۲- تحلیل‌های انجام شده و نتایج آن‌ها ۱۶۷
۴-۴-۲-۱- اثر دانه‌ها بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۶۷
۴-۴-۲-۲- اثر فاصله دانه‌ها بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۶۸
۴-۴-۲-۳- اثر نفوذپذیری مصالح/ فرکانس بارگذاری بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۷۲
۴-۴-۲-۴- اثر ابعاد دانه‌ها بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۷۶
۴-۴-۲-۵- اثر دامنه کرنش اعمالی بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۷۸
۴-۴-۲-۶- اثر فشار همه جانبه تحکیمی بر توزیع فشار آب حفره ای ۱۸۱
۴-۴-۳- تخمین میزان افزایش فشار آب حفره ای در اثر حضور دانه‌ها ۱۸۲
۴-۵-تحلیل‌های دو بعدی کرنش صفحه ای (Plane Strain) ۱۸۷
۴-۶-جمع بندی و نتیجه گیری از تحلیل‌های عددی ۱۹۵
۵- فصل پنجم: جمع بندی و نتیجه گیری ۱۹۷
۵-۱-مطالعات آزمایشگاهی ۱۹۸
۵-۲-مطالعات تحلیلی و عددی ۲۰۰
۵-۳-زمینه های ادامه تحقیق ۲۰۲

فهرست مراجع..... ۲۰۴

فهرست اشکال

عنوان **شماره صفحه**

شکل (۲-۱): تغییر بافت مصالح مخلوط در درصدهای مختلف ریزدانه و درشت دانه [۸] ۱۰
شکل (۲-۲): رسیدن تخلخل به یک مقدار مینیمم با تغییر درصد درشت دانه و ریزدانه در تمامی نسبت‌های درشت‌ترین قطر به کوچک‌ترین قطر (۲ تا ∞) [۹] ۱۲
شکل (۲-۳): نواحی دور از دانه و نزدیک به آن در درصد دانه محدود [۱۲] ۱۳
شکل (۲-۴): رابطه مقاومت برشی زهکشی نشده با تخلخل دانه ای و تخلخل دانه ای معادل [۱۳] ۱۴
شکل (۲-۵): تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده با تخلخل و تخلخل مؤثر (EVR)[۱۴] ۱۵
شکل (۲-۶): افزایش نسبت فشار آب حفره ای به تنش پیرامونی اولیه در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده تحت بارگذاری مونوتونیک با افزایش درصد درشت دانه (K :رس کائولن،G و S :شن و ماسه و عدد بین آن‌ها: درصد حجمی رس)[۱۵] ۱۷
شکل (۲-۷): پل‌های رسی [۱۵] ۱۸
شکل (۲-۸): کرنش مؤثر [۱۵] ۱۸
شکل (۲-۹): افزایش نسبت فشار آب حفره ای به تنش پیرامونی اولیه در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده تحت بارگذاری مونوتونیک با افزایش درصد درشت دانه (با احتساب کرنش مؤثر) (K :رس کائولن،G و S :شن و ماسه و عدد بین آن‌ها: درصد حجمی رس) [۱۵] ۲۰
شکل (۲-۱۰): افزایش نسبت فشار آب حفره ای پسماند در انتهای سیکل به تنش پیرامونی اولیه در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده سیکلی با افزایش درصد درشت دانه شنی (K :رس کائولن،G و S :شن و ماسه و عدد بین آن‌ها: درصد حجمی رس) [۱۵] ۲۱
شکل (۲-۱۱): افزایش نسبت فشار آب حفره ای پسماند در انتهای سیکل به تنش پیرامونی اولیه در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده سیکلی با افزایش درصد درشت دانه ماسه ای (K :رس کائولن،G و S :شن و ماسه و عدد بین آن‌ها: درصد حجمی رس) [۱۵] ۲۲
شکل (۲-۱۲): افزایش نسبت فشار آب حفره ای پسماند در انتهای سیکل به تنش پیرامونی اولیه در آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده سیکلی با افزایش درصد درشت دانه (با احتساب کرنش مؤثر) (K :رس کائولن،G و S :شن و ماسه و عدد بین آن‌ها: درصد حجمی رس) [۱۵] ۲۳
شکل (۲-۱۳): مسیر تنش برای نمونه های (a) رس خالص، (b) ٪۶۰ رس و شن،(c) ٪۴۰ رس و شن در آزمایش سه محوری سیکلی زهکشی نشده کنترل کرنش با دامنه ٪۱/۵ [۱۵] ۲۴
شکل (۲-۱۴): بررسی تأثیر ابعاد دانه‌ها بر افزایش فشار آب حفره ای در مصالح مخلوط با مقایسه مخلوط رس و شن و رس و ماسه در یک درصد حجمی رس (٪۴۰ و ٪۶۰)[۱۵] ۲۵
شکل (۲-۱۵): شمای کیفی تشکیل پل‌های رسی در نمونه های مخلوط رس و ماسه (راست) و شن و ماسه (چپ)، تفاوت تراکم در پل‌های رسی و رس‌های دورتر در عکس میانی و انتهایی [۱۵] ۲۶
شکل (۲-۱۶): مقیاس‌های میکرو، مزو و ماکرو در خاک رس غیر اشباع [۱۶] ۲۷
شکل (۲-۱۷): شمای تحلیل چند مقیاسی [۱۷] ۲۸

شکل (۲-۱۸): ضریب اختلاط [۱۸] ۳۱
شکل (۲-۱۹): مقایسه تغییرات تخلخل مصالح مخلوط با درصد ریزدانه از روابط تئوری مخلوط و آزمایش [۱۸] ۳۲
شکل (۲-۲۰): در نظر گرفتن رفتار اجزاء مخلوط همچون دو فنر موازی یا سری [۱۹] ۳۳
شکل (۲-۲۱): مقایسه نتایج آزمایش بر روی مصالح مخلوط و نتایج حاصل از همگن سازی برای عدد مدول سختی [۱۹] ۳۴
شکل (۲-۲۲): مقایسه نتایج آزمایش بر روی مصالح مخلوط و نتایج حاصل از همگن سازی برای عدد مدول بالک[۱۹] ۳۴
شکل (۲-۲۳): نحوه شرکت اجزاء مخلوط در واکنش به بار وارده [۹] ۳۵
شکل (۲-۲۴):المان مکعبی مورد تحلیل و دانه های کروی درون آن، (a): توزیع دانه‌ها در نمونه، (b): مش بندی دانه‌ها [۲۲] ۳۹
شکل (۲-۲۵): نتیجه تحلیل پس از یک سیکل بارگذاری فشار و کشش بر روی المان مصالح مرکب، (a):نرخ کرنش ۰,۰۰۱/sec، (b): نرخ کرنش 0.000001/sec [۲۲] ۳۹
شکل (۲-۲۶):کرنش پلاستیک ایجاد شده پس از یک سیکل بارگذاری فشار و کشش بر روی المان مصالح مرکب [۲۲] ۴۰
شکل (۲-۲۷): المان مش بندی شده در تحلیل عددی با برنامه CRISP [۱۱] ۴۱
شکل (۲-۲۸): نتایج آزمایش سه محوری زهکشی نشده بر روی مخلوط رس عادی تحکیم یافته [۱۱] ۴۲
شکل (۲-۲۹): نتایج تحلیل مبتنی بر همگن سازی بر روی مخلوط رس عادی تحکیم یافته و ماسه [۱۱] ۴۳
شکل (۲-۳۰): نتایج تحلیل عددی المان محدود بر روی مخلوط رس عادی تحکیم یافته و ماسه [۱۱] ۴۴
شکل (۲-۳۱): مدل مورد استفاده در روابط همگن سازی [۲۶] ۴۵
شکل (۲-۳۲): مدل مورد استفاده در تحلیل المان محدود حاوی تمامی دانه‌ها (۲۰۰۰ عدد در این مدل) [۲۶] ۴۶
شکل (۲-۳۳): نتایج تحلیل عددی و همگن سازی بر روی مخلوط ماسه و ماسه سنگ (مدل ۱)[۲۶] ۴۷
شکل (۲-۳۴): نتایج تحلیل عددی و همگن سازی بر روی مخلوط ماسه و سنگ آهک (مدل ۲) [۲۶] ۴۷
شکل (۲-۳۵): نتایج تحلیل عددی بر روی مخلوط ماسه و دانه‌ها با سختی‌های متفاوت [۲۶] ۴۸
شکل (۲-۳۶): الف) دانه های کروی شن در میان مصالح ماسه ای در یک المان حجمی، ب) نتایج تحلیل بر روی المان حجمی تحت بار فشاری - مقادیر کرنش بیشینه در ماسه سست و شن [۲۷] ۴۸
شکل (۲-۳۷): تأثیر نوع دانه‌ها _شنی و رسی_ بر روی رفتار مصالح مخلوط در بستر پی [۲۷] ۴۹
شکل (۳-۱): مؤلفه های تنش و کرنش نمونه استوانه ای توخالی در دستگاه برش پیچشی ۵۳
شکل (۳-۲): کرنش‌های شعاعی و محیطی المانی از خاک ۵۸
شکل (۳-۳): شماتیک اثر نفوذ غشاء ۶۰
شکل (۳-۴): دستگاه برش پیچشی مورد استفاده در این تحقیق [۳۴] ۶۲
شکل (۳-۵): موتورهای کنترل کننده دستگاه برش پیچشی [۳۴] ۶۳
شکل (۳-۶): موقعیت کرنش سنج‌های اندازه گیری بار محوری و پیچشی (Loadcell) واقع در زیر کلاهک بارگذاری و بالای Top cap نمونه ۶۴

شکل (۳-۷): موقعیت Gap sensor (GS) ها و Potentiometer (POT) ها بر روی نمونه [۳۵] ۶۴
شکل (۳-۸): سیستم ترازوی دقیق برای اندازه گیری تغییرات حجمی نمونه [۳۶] ۶۴
شکل (۳-۹): الف) سنسورهای مورد استفاده درون نمونه ، ب) موقعیت سنسورها و همچنین دانه های اطراف سنسور فوقانی در نمونه ۶۵
شکل (۳-۱۰): الف) چکش توخالی جهت تراکم نمونه برش پیچشی (اشاره به محل عبور لوله محافظ سنسورها از چکش در دایره قرمز) ب) امتداد لوله محافظ سنسورها تا روی لایه خاک کوبیده شده.....۶۶
شکل (۳-۱۱): تراکم نمونه با چکش توخالی به روش ضربه بر انتهای چکش ۶۷
شکل (۳-۱۲): الف و ب: تراکم استاتیکی نمونه ۶۸
شکل (۳-۱۳): تراکم به کمک چکش با ابعاد کوچک، جهت اعمال توأمان کوبش و هم زدن حین تراکم.....۶۸
شکل (۳-۱۴): اشباع تحت خلأ دوگانه : ۱) منبع آب تحت خلأ ۱۰۰ کیلو پاسکال و وصل به پایین نمونه، ۲) محفظه وصل به خلأ ۷۰ کیلو پاسکال و ۳) منبع زهکشی تحت خلأ ۱۰۰ کیلو پاسکال و وصل به بالای نمونه ۷۰
شکل (۳-۱۵): نمونه ماسه ای، سنسور فوقانی محصور میان دانه‌ها..... ۷۱
شکل (۳-۱۶): مقادیر متداول فشار آب حفره ای در نمونه های ماسه ای: تفاوت ناچیز در فشار آب حفره ای اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۲
شکل (۳-۱۷): مقادیر متداول فشار آب حفره ای ماندگار در انتهای سیکل تراز شده به فشار همه جانبه اولیه در نمونه های ماسه ای: تفاوت ناچیز در فشار آب حفره ای اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۲
شکل (۳-۱۸): مقادیر متداول دامنه نوسان فشار آب حفره ای تراز شده به فشار همه جانبه اولیه در نمونه های ماسه ای: تفاوت ناچیز در دامنه نوسان فشار آب حفره ای اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه..... ۷۳
شکل (۳-۱۹): نمونه مخلوط ۴۰٪ حجمی دانه سرامیکی و ۶۰٪ ماسه در حین ساخت ۷۳
شکل (۳-۲۰): مقدار فشار آب حفره ای در نمونه ماسه مخلوط: تفاوت ناچیز در فشار آب حفره ای اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۴
شکل (۳-۲۱): منحنی تراکم استاندارد مصالح سیلتی ۷۵
شکل (۳-۲۲): نمونه سیلتی و موقعیت سنسور فوقانی و چینش متقارن دانه‌ها ۷۵
شکل (۳-۲۳): پاسخ متداول آزمایشات بر روی نمونه های سیلتی: تفاوت ناچیز در فشار آب حفره ای اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۶
شکل (۳-۲۴): پاسخ متداول آزمایشات بر روی نمونه های سیلتی: تفاوت ناچیز در فشار آب حفره ای تراز شده به تنش موثر اولیه همه جانبه اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۷
شکل (۳-۲۵): پاسخ متداول آزمایشات بر روی نمونه های سیلتی: تفاوت ناچیز در دانه نوسان فشار آب حفره ای تراز شده به تنش موثر اولیه همه جانبه اندازه گیری شده در ترازهای مختلف نمونه ۷۷
شکل (۳-۲۶): منحنی تراکم استاندارد مصالح رسی ۷۸
شکل (۳-۲۷): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی با زمان در نمونه رسی متراکم شده تا ۹۵٪ چگالی خشک بیشینه..... ۷۹
شکل (۳-۲۸): نمونه رسی متراکم شده تا ۱۰۰٪ چگالی خشک بیشینه..... ۷۹
شکل (۳-۲۹): فشار آب حفره ای ماندگار تراز شده به تنش پیرامونی موثر اولیه در نمونه رسی متراکم شده تا ۱۰۰٪ چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{SA} = 0.75\%, f = 0.03$ Hz)..... ۸۰

شکل (۳-۳۰): میزان نوسان فشار آب حفره ای تراز شده به تنش پیرامونی موثر اولیه در نمونه رسی متراکم شده تا ۱۰۰٪ چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{SA} = 0.75\%, f = 0.03$ Hz) ۸۱
شکل (۳-۳۱): فشار آب حفره ای ماندگار تراز شده به تنش پیرامونی موثر اولیه در نمونه رسی متراکم شده تا ۱۰۰٪ چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{SA} = 0.4\%, f = 0.05$ Hz) ۸۱
شکل (۳-۳۲): میزان نوسان فشار آب حفره ای تراز شده به تنش پیرامونی موثر اولیه در نمونه رسی متراکم شده تا ۱۰۰٪ چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{SA} = 0.4\%, f = 0.05$ Hz) ۸۲
شکل (۳-۳۳): شماتیک مجموعه دستگاه‌های سه محوری دینامیکی (و ستون تشدید) مورد استفاده ۸۴
شکل (۳-۳۴): سنسور مینیاتوری اندازه گیری فشار آب حفره ای در حالت اولیه به قطر ۶ میلی متر و ضخامت ۰,۶ میلی متر (ضخامت سیم‌های انتهایی ۰,۱ میلی متر) ۸۶
شکل (۳-۳۵): قرار دادن سنگ تخلخل بر روی محفظه حاوی سنسور جهت اندازه گیری فشار آب و عدم امکان نفوذ خاک ۸۶
شکل (۳-۳۶): قرار دادن پدستال (و ضد اصطکاک و فیلتر مربوط به انتهای نمونه) همراه با سنسور در سلول دستگاه سه محوری دینامیکی ۸۷
شکل (۳-۳۷): چکش مورد استفاده برای تراکم با قابلیت حرکت پیرامون سنسور ۸۷
شکل (۳-۳۸): منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و مقایسه آن با برخی ماسه های مشهور [۳۸] ۸۸
شکل (۳-۳۹): منحنی دانه بندی هیدرومتری کائولینیت زنوز ۹۰
شکل (۳-۴۰): منحنی تراکم استاندارد کائولینیت زنوز ۹۱
شکل (۳-۴۱): منحنی تحکیم استاندارد مصالح رس خالص ۹۲
شکل (۳-۴۲): منحنی تراکم مصالح مخلوط ۶۰٪ رس - ۴۰٪ سرامیک ۹۳
شکل (۳-۴۳): منحنی تحکیم استاندارد مصالح مخلوط رس- سرامیک ۹۴
شکل (۳-۴۴): نمونه تحکیم مصالح مخلوط ۶۰٪ رس –۴۰٪ سرامیک: الف) قبل تراکم، ب) بعد تراکم در قالب تحکیم ۹۵
شکل (۳-۴۵): الف: ضد اصطکاک مورد استفاده در دو انتهای نمونه سه محوری، ب) نمونه سه محوری به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر به همراه ضد اصطکاک و کاغذ صافی در دو انتها ۹۶
شکل (۳-۴۶):تغییر شکل نمونه سه محوری پس از اعمال ۲۱٪ کرنش محوری ۹۷
شکل (۳-۴۷): نمونه ساخته و ترمیم شده جهت انجام آزمایش سه محوری استاتیک ۹۷
شکل (۳-۴۸): تغییرات حجم با کرنش محوری در آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی مصالح خالص و مخلوط ۴۰٪ دانه ۱۰۲
شکل (۳-۴۹): تغییرات تنش تفاضلی محوری با کرنش محوری در آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی مصالح خالص و مخلوط ۴۰٪ دانه ۱۰۲
شکل (۳-۵۰): تغییرات فشار آب حفره ای در بالا و پایین نمونه های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده در مصالح خالص و مخلوط ۴۰٪دانه ۱۰۳
شکل (۳-۵۱): تغییرات تنش تفاضلی محوری با کرنش محوری در آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی مصالح خالص و مخلوط ۴۰٪ دانه ۱۰۴
شکل (۳-۵۲): ابعاد محفظه سنسور درون نمونه ای در آزمایشات سه محوری سیکلی (بر حسب میلی‌متر) ۱۰۴

شکل (۳-۵۳): سنسور افقی در نمونه ماسه ای جهت کنترل عملکرد ۱۰۵
شکل (۳-۵۴): تغییرات فشار آب حفره ای با زمان در نمونه ماسه ای (سنسور قائم) با فرکانس ۰,۱ هرتز و دامنه کرنش ۰,۱٪.....۱۰۵
شکل (۳-۵۵): تغییرات فشار آب حفره ای با زمان در نمونه ماسه ای (سنسور قائم) با فرکانس ۱ هرتز و دامنه کرنش ۱٪.....۱۰۶
شکل (۳-۵۶): تغییرات فشار آب حفره ای با زمان در نمونه ماسه ای (سنسور افقی) با فرکانس ۲ هرتز و دامنه کرنش ۰,۰۲٪.....۱۰۶
شکل (۳-۵۷): مقدار تک دامنه (۱٪ یا ۱,۵٪) از پالس سینوسی کرنش محوری ۱۱۰
شکل (۳-۵۸): تغییرات دامنه نوسان فشار آب حفره ای تراز شده به تنش تحکیمی اولیه با تعداد سیکل در فرکانس‌های مختلف در بالا، وسط و پایین نمونه.....۱۱۱
شکل (۳-۵۹): تراز میانی نمونه خالص رسی در حین ساخت، حاوی سنسور درون نمونه.....۱۱۳
شکل (۳-۶۰): روند تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در سیکل‌ها با تعداد سیکل در نمونه های رسی خالص با پس فشار ۲۰۰ کیلو پاسکال و دامنه کرنش ۱٪.....۱۱۳
شکل (۳-۶۱): روند تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در سیکل‌ها با تعداد سیکل در نمونه های رسی خالص با پس فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال و دامنه کرنش ۱,۵٪.....۱۱۴
شکل (۳-۶۲): لایه میانی نمونه میان-مخلوط در حین ساخت، حاوی سنسور درون نمونه ۱۱۴
شکل (۳-۶۳): نمونه میان مخلوط پس از ساخت، متشکل از رس خالص در یک سوم اول و آخر و مخلوط ۴۰٪ سرامیک – ۶۰٪ در یک سوم میانی ۱۱۵
شکل (۳-۶۴): شباهت مکانیسم توزیع تنش و کرنش در نمونه های رسی خالص و نمونه حاوی رس مخلوط در لایه میانی به فنرهای سری.....۱۱۵
شکل (۳-۶۵): تغییرات فشار آب منفذی بیشینه در طی سیکل در بالا، وسط و پایین نمونه های خالص و نمونه حاوی لایه مخلوط در بارگذاری با کرنش ۱٪.....۱۱۷
شکل (۳-۶۶): تغییرات فشار آب منفذی بیشینه در طی سیکل در بالا، وسط و پایین نمونه های خالص و نمونه حاوی لایه مخلوط در بارگذاری با کرنش ۱٪ - تکرارپذیری.....۱۱۸
شکل (۳-۶۷): تغییرات فشار آب منفذی ماندگار در انتهای سیکل در بالا، وسط و پایین نمونه های خالص و مخلوط در بارگذاری با کرنش ۱,۵٪.....۱۲۰
شکل (۳-۶۸): تغییرات فشار آب حفره ای با زمان در بالا، وسط و پایین نمونه خالص رسی در بارگذاری با دامنه کرنش ۱,۵٪ و فرکانس ۰,۰۰۵ هرتز.....۱۲۱
شکل (۳-۶۹): تغییرات فشار آب منفذی بیشینه در هر سیکل در بالا، وسط و پایین نمونه های خالص و مخلوط در بارگذاری با کرنش ۱,۵٪.....۱۲۲
شکل (۳-۷۰): نمونه دانه– سنسور قائم ۱ در حین ساخت: وضعیت سنسور و دانه های اطراف آن پس از تراکم لایه پیرامون سنسور (دانه‌ها به قطر ۹ میلی‌متر و با فاصله اولیه ۵ میلی‌متر قبل از تراکم).....۱۲۳
شکل (۳-۷۱): نمونه دانه– سنسور قائم ۳ در حین ساخت: وضعیت سنسور و دانه های اطراف آن پیش از تراکم لایه پیرامون سنسور (دانه‌ها به قطر ۹ میلی‌متر و با فاصله اولیه ۵ میلی‌متر قبل از تراکم).....۱۲۴
شکل (۳-۷۲): موقعیت سنسور و دانه‌ها در نمونه دانه – سنسور قائم ۳ پس از آزمایش ۱۲۴

شکل (۳-۷۳): اثر قرار دادن سنگ دانه پیرامون سنسور قائم در آزمایش سنسور قائم ۲ در مقایسه با رفتار رس‌های خالص در شرایط مشابه ۱۲۵
شکل (۳-۷۴): تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در هر سیکل در نمونه خالص رسی ۱۲ و نمونه دانه – سنسور قائم ۳ با دامنه کرنش ۱٫۵٪ و فرکانس ۰٫۰۰۵ هرتز ۱۲۶
شکل (۳-۷۵): نمونه دانه – سنسور افقی: الف) موقعیت سنسور افقی، ب) دانه در بالای وجه اندازه گیر سنسور (قبل از تراکم)، ج) لایه متراکم شده حاوی دانه در بالای سنسور ۱۲۷
شکل (۳-۷۶): نمونه دانه – سنسور افقی پس از آزمایش، با لایه ای به ضخامت حدود ۲ میلی‌متر بین دانه و وجه اندازه گیر سنسور ۱۲۸
شکل (۳-۷۷): تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در هر سیکل در نمونه خالص رسی با سنسور افقی (آزمایش ۱۸) و نمونه دانه – سنسور افقی ۱ (آزمایش ۲۲) با دامنه کرنش ۱٫۵٪ و فرکانس ۰٫۰۰۵ هرتز ۱۲۹
شکل (۳-۷۸): تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در هر سیکل در نمونه خالص رسی با سنسور افقی (آزمایش ۱۸) و نمونه دانه – سنسور افقی ۲ (آزمایش ۲۳) با دامنه کرنش ۱٫۵٪ و فرکانس ۰٫۰۰۵ هرتز ۱۲۹
شکل (۴-۱): المان‌های مورد استفاده در نرم افزار PLAXIS : الف) المان سه بعدی هرم چهار وجهی ۱۰ گرهی ، ب) المان دو بعدی مثلثی ۱۵ و ۶ گرهی [۵۱] ۱۳۴
شکل (۴-۲): مدل‌های الف) تقارن محوری، و ب) کرنش صفحه ای [۵۱] ۱۳۴
شکل (۴-۳):مدل دو بعدی دارای تقارن محوری از نمونه سه محوری در PLAXIS2D: شرایط مرز بسته تحکیمی در پیرامون نمونه، حول محور تقارن ۱۳۶
شکل (۴-۴): تغیرات تنش انحرافی با کرنش محوری در مدل HS [۵۱] ۱۳۷
شکل (۴-۵): سطح سیلان الف) دوبعدی و ب) سه بعدی مدل HS [۵۱] ۱۳۸
شکل (۴-۶): تغییرات تنش تفاضلی با کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونوتونیک و شبیه سازی آن در PLAXIS با مدل رفتاری HS ۱۳۹
شکل (۴-۷): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی با کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونوتونیک و شبیه سازی آن در PLAXIS با مدل رفتاری HS ۱۴۰
شکل (۴-۸): تغییرات تنش تفاضلی با کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونوتونیک و شبیه سازی آن در PLAXIS با مدل رفتاری UBC3D ۱۴۲
شکل (۴-۹): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی با کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونوتونیک و شبیه سازی آن در PLAXIS با مدل رفتاری UBC3D ۱۴۲
شکل (۴-۱۰): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی ماندگار در انتهای سیکل (U_{res}) با کرنش محوری در آزمایش سه محوری زهکشی نشده سیکلی و شبیه سازی آن در PLAXIS با مدل رفتاری UBC3D ۱۴۳
شکل (۴-۱۱): نمونه های سه محوری حاوی دانه های صلب در حالت قرارگیری: الف) قائم، ب) افقی با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) در هر دو حالت، به همراه موقعیت مقاطع میانی نمونه‌ها، انتخاب شده جهت بررسی نتایج تحلیل‌ها ۱۴۵
شکل (۴-۱۲): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه الاستیک پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۵
شکل (۴-۱۳): توزیع تنش متوسط (p) در مقطع میانی نمونه الاستیک پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم (کیلو پاسکال) با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۶

شکل (۴-۱۴): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه الاستیک پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت افقی با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۶
شکل (۴-۱۵): توزیع تنش متوسط (p) در مقطع میانی نمونه الاستیک پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت افقی (کیلو پاسکال) با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۷
شکل (۴-۱۶): الف): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه خالص رسی با مدل HS ۱۴۸
شکل (۴-۱۷): توزیع تنش متوسط (p) در مقطع میانی نمونه خالص رسی با مدل HS ۱۴۸
شکل (۴-۱۸): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۹
شکل (۴-۱۹): توزیع تنش متوسط (p) در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم (کیلو پاسکال) با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۴۹
شکل (۴-۲۰): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت افقی با فاصله ۵ میلی‌متر (شعاع دانه‌ها) ۱۵۰
شکل (۴-۲۱): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم با فاصله ۱۰ میلی‌متر (۲ برابر شعاع دانه‌ها) ۱۵۱
شکل (۴-۲۲): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها به صورت قائم با فاصله ۱۵ میلی‌متر (۳ برابر شعاع دانه‌ها) ۱۵۱
شکل (۴-۲۳): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با فاصله قائم ۵ میلی‌متر و افقی ۱۰ میلی‌متر ۱۵۲
شکل (۴-۲۴): توزیع کرنش حجمی در مقطع افقی در تراز میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با فاصله قائم ۵ میلی‌متر و افقی ۱۰ میلی‌متر ۱۵۳
شکل (۴-۲۵): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم ۱۵۳
شکل (۴-۲۶): توزیع تنش در راستای Y (مشخص شده در شکل) در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم (کیلو پاسکال) ۱۵۴
شکل (۴-۲۷): توزیع تنش در راستای Z (مشخص شده در شکل) در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم (کیلو پاسکال) ۱۵۴
شکل (۴-۲۸-الف): مدل حاوی ۸ دانه به شکل نامنظم، ب): مقطع میانی انتخابی برای بررسی نتایج ۱۵۵
شکل (۴-۲۹): توزیع کرنش حجمی در مقطع میانی نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم ۱۵۵
شکل (۴-۳۰): توزیع کرنش حجمی در مقطع افقی در انتهای نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم ۱۵۶
شکل (۴-۳۱): توزیع کرنش حجمی در مقطع افقی در بالای نمونه با مدل HS پس از بارگذاری محوری در حالت قرارگیری دانه‌ها با آرایش نامنظم ۱۵۶
شکل (۴-۳۲): موقعیت نقاط انتخاب شده برای بررسی تغییرات کرنش حجمی حین بارگذاری سیکلی بر روی مصالح با مدل UBC3D و دانه های افقی با فاصله ۵ میلی‌متر ۱۵۷

شکل (۴-۳۳): موقعیت نقاط انتخاب شده برای بررسی تغییرات کرنش حجمی حین بارگذاری سیکلی بر روی مصالح با مدل UBC3D و دانه های قائم با فاصله ۵ میلی‌متر ۱۵۸
شکل (۴-۳۴): تغییرات کرنش حجمی طی گام‌های محاسباتی در ۱۰ سیکل بارگذاری بر روی مصالح با مدل UBC3D و دانه های افقی و قائم با فاصله ۵ میلی‌متر ۱۵۹
شکل (۴-۳۵): نمونه های ساخته شده در محیط دو و سه بعدی جهت مقایسه نتایج: الف) نمونه دو بعدی دارای تقارن محوری ، ب) نمونه سه بعدی تحت بارگذاری، ج) موقعیت سه دانه کروی در میانه نمونه سه بعدی در موقعیت‌های مشابه با نمونه دو بعدی..... ۱۶۰
شکل (۴-۳۶): توزیع کرنش حجمی در الف) نمونه دو بعدی و ب) مقطع میانی نمونه سه بعدی..... ۱۶۱
شکل (۴-۳۷): مدل هندسی دو بعدی مورد تحلیل حاوی دو دانه کروی شکل در میانه نمونه..... ۱۶۲
شکل (۴-۳۸): المان‌های چهارگوش حد فاصل (Interface) در نرم افزار PLAXIS در مجاور : الف) المان مثلثی ۱۵ گرهی و ب) المان مثلثی ۶ گرهی ۱۶۳
شکل (۴-۳۹): مدل هندسی دو بعدی الف) بدون المان‌های حد فاصل و ب) دارای المان‌های حد فاصل پیرامون دانه‌ها ۱۶۴
شکل (۴-۴۰): توزیع فشار آب حفره ای اضافی در پیک فشاری سیکل سوم بارگذاری با کرنش محوری ۱,۵٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در : الف) نمونه بدون المان حد فاصل و ب) نمونه حاوی المان حد فاصل (کیلو پاسکال)..... ۱۶۵
شکل (۴-۴۱): مش بندی با المان الف) ۶ گرهی و ب) ۱۵ گرهی ۱۶۶
شکل (۴-۴۲): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل سوم بارگذاری با کرنش محوری ۱,۵٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه مدل شده با : الف)المان ۶ گرهی و ب)ا المان ۱۵ گرهی..... ۱۶۶
شکل (۴-۴۳): موقعیت نقاط ذخیره داده‌ها در یک نمونه از تحلیل‌ها ۱۶۷
شکل (۴-۴۴): تغییرات فشار آب حفره ای با زمان حین اعمال بار در نقطه آزاد و مسیر فشار در بارگذاری با دامنه کرنش ۰,۱٪ و فرکانس ۲ هرتز بر روی مصالح با نفوذپذیری $3*10^{-11}$ m/s ۱۶۸
شکل (۴-۴۵): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل اول بارگذاری با کرنش محوری ۰,۱٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه حاوی دانه با فاصله : الف) ۵ میلی‌متر، ب)۱۰ میلی‌متر و ج) ۲۰ میلی‌متر..... ۱۶۹
شکل (۴-۴۶): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل سوم بارگذاری با کرنش محوری ۰,۱٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه حاوی دانه با فاصله : الف) ۵ میلی‌متر، ب)۱۰ میلی‌متر و ج) ۲۰ میلی‌متر..... ۱۷۰
شکل (۴-۴۷): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل پانزدهم بارگذاری با کرنش محوری ۰,۱٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه حاوی دانه با فاصله : الف) ۵ میلی‌متر، ب)۱۰ میلی‌متر و ج) ۲۰ میلی‌متر..... ۱۷۱
شکل (۴-۴۸): تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه در ناحیه بین دانه‌ها (تراز میانی مسیر فشار) طی سیکل‌های بارگذاری بر روی نمونه های حاوی دانه های با فاصله های متفاوت در فرکانس ۰,۱ هرتز و نفوذپذیری $3*10^{-11}$ m/s ۱۷۲

شکل (۴-۴۹): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل اول بارگذاری با کرنش محوری ۰,۱٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و فرکانس ۲ هرتز در مقطع میانی نمونه با نفوذپذیری مصالح : الف) $3*10^{-8}$ m/s، ب)$3*10^{-9}$ m/s، ج)$3*10^{-10}$ m/s و د)$3*10^{-11}$ m/s.....۱۷۳
شکل (۴-۵۰): تغییرات فشار آب حفره ای در نقطه آزاد و مسیر فشار در نمونه حاوی دانه با شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر تحت تنش تحکیمی ۳۰۰ کیلو پاسکال و دامنه کرنش ۰,۱٪ با نفوذپذیری : الف)$3*10^{-8}$ m/s ، ب)$3*10^{-9}$ m/s ، ج)$3*10^{-10}$ m/s و د)$3*10^{-11}$ m/s.....۱۷۴
شکل (۴-۵۱): بازتوزیع فشار آب حفره ای ایجاد شده در اثر بارگذاری مونوتونیک ۱,۵٪ اعمال شده طی ۰,۱۲۵ ثانیه، برای نفوذپذیری‌های مختلف (بر حسب m/s) ۱۷۵
شکل (۴-۵۲): بازتوزیع کامل فشار آب حفره ای ایجاد شده در اثر بارگذاری مونوتونیک ۱,۵٪ اعمال شده طی ۰,۱۲۵ ثانیه، برای نفوذپذیری‌های $3*10^{-10}$ m/s تا $3*10^{-12}$ m/s.....۱۷۶
شکل (۴-۵۳): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل اول بارگذاری با کرنش محوری ۱,۵٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه حاوی دانه با: الف)شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر، ب)شعاع ۱۰ و فاصله ۵ میلی‌متر و ج)شعاع ۱۰ و فاصله ۱۰ میلی‌متر ۱۷۷
شکل (۴-۵۴): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل دهم بارگذاری با کرنش محوری ۱,۵٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال در نمونه حاوی دانه با: الف)شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر، ب)شعاع ۱۰ و فاصله ۵ میلی‌متر و ج)شعاع ۱۰ و فاصله ۱۰ میلی‌متر.....۱۷۸
شکل (۴-۵۵): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل اول بارگذاری در ناحیه پیرامون دانه های به شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر تحت تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و کرنش محوری: الف)۰,۱٪، ب)۰,۲۵٪ ، ج)۰,۷۵٪ و د) ۱,۵٪ با فرکانس ۲ هرتز ۱۷۹
شکل (۴-۵۶): توزیع فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در پیک فشاری سیکل دهم بارگذاری در نمونه حاوی دانه با شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر تحت تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و کرنش محوری: الف)۰,۱٪، ب)۰,۲۵٪ ، ج)۰,۷۵٪ و د) ۱,۵٪ با فرکانس ۲ هرتز ۱۸۰
شکل (۴-۵۷): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) با زمان بر روی نمونه حاوی دانه با شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر تحت تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال و کرنش محوری ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ با فرکانس ۲ هرتز و نفوذپذیری $3*10^{-11}$ m/s.....۱۸۱
شکل (۴-۵۸): تغییرات فشار آب حفره ای اضافی (بر حسب کیلو پاسکال) در۱۰ سیکل بارگذاری بر روی نمونه حاوی دانه با شعاع و فاصله ۵ میلی‌متر تحت کرنش محوری۱,۵٪ و تنش همه جانبه ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال ۱۸۲
شکل (۴-۵۹): تغییرات میزان افزایش نسبت فشار آب حفره ای به تنش موثر پیرامونی در مسیر فشار با تغییر فاصله دانه‌ها (d)برای سطوح کرنش ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ و نفوذپذیری $3*10^{-9}$ m/s و فرکانس ۰,۱ هرتز.....۱۸۵
شکل (۴-۶۰): تغییرات میزان افزایش نسبت فشار آب حفره ای به تنش موثر پیرامونی با تغییر فاصله دانه‌ها (d)برای سطوح کرنش ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ و نفوذپذیری $3*10^{-10}$ m/s و فرکانس ۰,۱ هرتز ۱۸۵
شکل (۴-۶۱): تغییرات میزان افزایش نسبت فشار آب حفره ای به تنش موثر پیرامونی با تغییر فاصله دانه‌ها (d)برای سطوح کرنش ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ و نفوذپذیری $3*10^{-11}$ m/s و فرکانس ۰,۱ هرتز ۱۸۵

شکل (۴-۶۲): تغییرات میزان افزایش فشار آب حفره ای در مسیر فشار نسبت به نقاط آزاد مجاور با تغییر فاصله دانه‌ها (d)برای سطوح کرنش ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ و نفوذپذیری $3*10^{-10}$ m/s و فرکانس ۰,۱ هرتز ۱۸۶
شکل (۴-۶۳): تغییرات میزان افزایش فشار آب حفره ای در مسیر فشار نسبت به نقاط آزاد مجاور با تغییر فاصله دانه‌ها (d)برای سطوح کرنش ۰,۱٪، ۰,۲۵٪، ۰,۷۵٪ و ۱,۵٪ و نفوذپذیری $3*10^{-11}$ m/s و فرکانس ۰,۱ هرتز ۱۸۶
شکل (۴-۶۴): تغییرات فشار آب حفره ای بیشینه تراز شده به تنش موثر پیرامونی در ناحیه محصور بین ۲ دانه قائم در نمونه حاوی دانه در آزمایشگاه با دامنه کرنش ۱,۵٪ و فرکانس ۰,۰۰۵ هرتز، و مسیر فشار در نمونه حاوی دانه، مدل شده در تحلیل عددی با هندسه و شرایط بارگذاری یکسان با آزمایشگاه ۱۸۷
شکل (۴-۶۵): هندسه مورد تحلیل کرنش صفحه ای به همراه موقعیت نقاط ذخیره داده‌ها برای رسم نمودار ... ۱۸۸
شکل (۴-۶۶): توزیع فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، پس از اعمال کرنش قائم ۵٪ طی ۰,۱۲۵ ثانیه ۱۸۹
شکل (۴-۶۷): تغییرات فشار آب حفره ای در نقاط مختلف نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-9}$ m/s، پس از اعمال کرنش قائم ۰,۳٪ ۱۸۹
شکل (۴-۶۸): تغییرات فشار آب حفره ای در نقاط مختلف نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-10}$ m/s، پس از اعمال کرنش قائم ۰,۳٪ ۱۹۰
شکل (۴-۶۹): تغییرات فشار آب حفره ای در نقاط مختلف نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، پس از اعمال کرنش قائم ۰,۳٪ ۱۹۰
شکل (۴-۷۰): توزیع فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، در بیشینه کرنش اعمالی در سیکل پنجم بارگذاری با دامنه ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۱
شکل (۴-۷۱): توزیع فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، در بیشینه کرنش اعمالی در سیکل دهم بارگذاری با دامنه ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۱
شکل (۴-۷۲): تغییرات فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) با زمان در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-9}$ m/s، تحت بارگذاری با دامنه کرنش ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۲
شکل (۴-۷۳): تغییرات فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) با زمان در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، تحت بارگذاری با دامنه کرنش ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۳
شکل (۴-۷۴): توزیع فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، در بیشینه کرنش اعمالی در سیکل اول بارگذاری با دامنه ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۴
شکل (۴-۷۵): توزیع فشار آب حفره ای (بر حسب کیلو پاسکال) در نمونه مخلوط تحت تنش موثر پیرامونی ۳۰۰ کیلو پاسکال با نفوذپذیری مصالح $3*10^{-11}$ m/s، در بیشینه کرنش اعمالی در سیکل پنجم بارگذاری با دامنه ۵٪ و فرکانس ۱ هرتز ۱۹۴