

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

تعیین مقاومت فشاری نمونه بتنی با استفاده از پردازش تصویر و روش اجزای

محدود

نگارنده: محمود خرمانی

اساتید راهنما:

دکتر وحید رضا کلات جاری

دکتر ایمان آقایان

استاد مشاور

دکتر علیرضا احمدی فرد

شهریور ماه ۹۷

ب

تقدیم

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس میکران و در کمال افتخار و اتنان تقدیم می نمایم به

والدینی که بودشان تاج افتخاری است بر سرم

و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند

دستم را گرفتند و راه رفتن را در وادی این زندگی پر از فراز و نشیب آموختند، همچنین

برادرانم که وجودشان مایه دلگرمی من است.

تشکر و قدردانی

حال که به لطف و رحمت لایتناهی حضرت حق، مراحل این پایان‌نامه رو به اتمام نهاده، بر خود لازم دانسته تا از همه دوستانی که در پیشبرد اهداف این پایان‌نامه اینجانب را مساعدت و یاری نموده‌اند، سپاس و قدردانی به‌عمل آورم.

ابتدا بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و پشتیبانی بی‌دریغ استاد محترم، جناب آقای دکتر وحید-رضا کلات‌جاری که راهنمایی این تحقیق را بر عهده داشته و از هر گونه راهنمایی و مساعدت مضایقه نکردند، تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم. بی‌شک بدون حمایت و پشتیبانی ایشان انجام این تحقیق مقدور نمی‌بود.

همچنین از جناب آقای دکتر ایمان آقایان که به عنوان استاد راهنما، نقشی ارزنده و مکمل در انجام این پایان‌نامه داشتند سپاس‌گزاری کرده و موفقیت ایشان در مراحل زندگی را از خداوند متعال مسألت دارم.

همچنین از جناب آقای دکتر علیرضا احمدی‌فرد ریاست محترم دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود که به عنوان استاد مشاور نقشی مؤثر و ارزشمند در انجام این تحقیق داشتند تشکر و قدردانی ویژه‌ای دارم. بی‌شک بهره‌گیری از تخصص بالای ایشان در علم پردازش تصویر انجام این تحقیق را ممکن ساخته است.

از جناب آقای دکتر احمد احمدی ریاست محترم دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود به جهت مساعدت‌هایشان در طی دوره کارشناسی ارشد قدردانی می‌نمایم.

در انتها از آقایان دکترسید هادی قادری، دکتر محمد یکرنگ‌نیا، دکتر پوریا اکبرزاده مسئول آزمایشگاه تحقیقاتی مکانیک محاسباتی، آقای مهندس منصور جامعی، آقای مهندس زیاری مسئول آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده معدن، آقای مهندس غلامعلی‌نژاد، همچنین از آقای حسینی، سوپر

وايزر بخش راديولوژی بیمارستان قلب شهيد رجایی تهران و ديگر دوستانی که صبورانه در طول مدت انجام اين تحقيق به اشکال مختلف ما را ياری رساندند تشکر و قدردانی می‌نمایم. در پایان این اثر را به تمام متخصصین و محققين این سرزمین تقدیم می‌کنم و امیدوارم که این مطالعه کمکی باشد به پیشرفت‌های آتی علمی و فرهنگی کشور عزیزمان ایران.

تعهدنامه

اینجانب محمود خرمانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " تعیین مقاومت فشاری نمونه بتنی با استفاده از پردازش تصویر و روش اجزای محدود " تحت راهنمایی آقای دکتر وحید رضا کلات جاری و آقای دکتر ایمان آقاییان متعهد می‌شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

بتن ماده‌ای است که در سازه‌ها به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص مهندسی و عملکرد بتن، هم به ویژگی ساختاری و هم به خواص ترکیبات آن بستگی دارد که معمولاً در آزمایشگاه ارزیابی می‌گردد. طراحی و تحلیل سازه‌های بتنی عمدتاً بر اساس این فرض است که بتن را می‌توان به عنوان یک ماده‌ی همگن در نظر گرفت در حالی که این ماده یک کامپوزیت ناهمگن متشکل از سنگ‌دانه‌ها، خمیر سیمان و حفرات هوا و ناحیه انتقالی رابط (آی‌تی‌زد)^۱ است. در این مطالعه مدل‌های اجزای محدود دوبعدی و سه‌بعدی مزومقیاس نمونه‌های بتن در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از پردازش تصاویر سی‌تی اسکن تهیه شده است تا قادر باشد با تعریف مشخصات مکانیکی هر یک از مصالح تشکیل‌دهنده بتن، ریزساختار آن مدل تشکیل و به صورت عددی خواص مکانیکی آن ارزیابی گردد. به این ترتیب می‌توان مدل‌های عددی بتن را تهیه و بجای عملیات آزمایشگاهی، خواص آن را به صورت عددی تعیین نمود. یک کد در نرم‌افزار متلب برای پردازش تصاویر نمونه‌های بتنی نوشته شده است. تصاویر به وسیله دستگاه سی‌تی اسکن بیمارستان قلب شهید رجایی تهران تهیه گردیده است. چارچوبی کلی از توموگرافی محاسباتی کمیتی (کیوسی‌تی)^۲ برای ساختن تصویر سه‌بعدی از نمونه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف این تحقیق ایجاد روشی نوین برای تعیین مقاومت فشاری بتن واقعی به صورت عددی است. در این پژوهش مدل‌های المان محدود برای دو نوع نمونه مکعبی و یک نمونه استوانه‌ای بتنی با استفاده از تصاویر سی‌تی اسکن و همچنین استفاده از مدل ترکیبی خسارت-پلاستیک بتن (سی دی پی)^۳ در نرم‌افزار آباکوس ایجاد گردید که با استفاده از این مدل می‌توان الگوهای شکست و ترک بتن در فشار و کشش را نیز مورد ارزیابی قرار داد.

کلید واژه‌ها: پردازش تصویر، نمونه بتن، سی‌تی اسکن، نرم افزار متلب، نرم افزار آباکوس، سی دی پی

^۱ Interfacial Transition Zone

^۲ Quantitative Computed Tomography

^۳ Concrete Damage Plasticity

فصل اول: کلیات تحقیق..... ۱

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۱-۲- ضرورت و اهمیت تحقیق..... ۴
- ۱-۳- هدف تحقیق..... ۴
- ۱-۴- نوآوری تحقیق..... ۵
- ۱-۵- ساختار تحقیق..... ۵
- فصل اول..... ۵

فصل دوم: مروری بر سوابق تحقیق..... ۷

- ۱-۲- مقدمه..... ۸
- ۲-۲- پیشینه تحقیق..... ۸
- ۳-۲- پردازش تصویر در بتن..... ۹

فصل سوم: آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی مواد- آماده‌سازی نمونه‌ها..... ۱۵

- ۱-۳- مقدمه..... ۱۶
- ۲-۳- مصالح مورد استفاده و ساخت نمونه‌های بتن..... ۱۶
- ۳-۳- ملات ماسه سیمان..... ۲۲
- ۴-۳- نمونه‌های سنگ (مغزه‌گیری)..... ۲۵
- ۵-۳- طراحی و پیاده‌سازی استاندارد ASTM C469 جهت تعیین خصوصیات مصالح ملات..... ۲۸
- ۳-۵-۱- مشخصات و دقت تغییر مکان سنج یا LVDT (CDP-50)..... ۳۰
- ۳-۵-۲- تعیین منحنی تنش کرنش و مدول الاستیسیته ملات نوع اول ($W/C = 0.35$)..... ۳۴
- مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم به‌دست آمده و میانگین آنها برای نمونه‌های ملات نوع اول در جدول (۳-۳) آورده شده است..... ۳۶
- ۳-۵-۳- تعیین منحنی تنش کرنش و مدول الاستیسیته ملات نوع دوم ($W/C = 0.31$)..... ۳۷
- ۶-۳- پیاده‌سازی استاندارد ASTM C469 جهت تعیین مدول الاستیسیته مصالح سنگی..... ۳۹
- ۷-۳- نتایج حاصل از نمونه‌های بتن مورد آزمایش..... ۴۵
- ۳-۷-۳- نمونه استوانه‌ای..... ۵۱

فصل چهارم : پردازش تصویر..... ۵۵

۴-۱- مقدمه..... ۵۶

۴-۲- تصاویر و عکس ها..... ۵۶

۴-۳- مفاهیم پایه در پردازش تصویر دیجیتال..... ۵۷

۴-۴- تصویر رقومی..... ۵۷

۴-۵- توموگرافی محاسباتی (سی تی)-اسکن..... ۵۹

فصل پنجم: پردازش تصویر و مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس..... ۶۷

۵-۱- تهیه تصاویر سی تی اسکن از نمونه ها..... ۶۸

۵-۲- پردازش تصاویر به دست آمده از نمونه ها..... ۷۲

۵-۳- مدل سازی اجزای محدود دوبعدی..... ۷۴

۵-۴- برهم نهی تصاویر دوبعدی به دست آمده از سی تی اسکن..... ۷۶

۵-۵- مدل ترکیبی خسارت پلاستیک بتن..... ۷۹

۵-۶- مدل سازی اجزای محدود سه بعدی..... ۸۵

۵-۶-۱- مدل اجزای محدود نمونه مکعبی نوع اول (135x135Pixels-100x100mm²)..... ۸۵

۵-۶-۲- مدل اجزای محدود نمونه مکعبی نوع دوم (142x142Pixels-100x100mm²)..... ۸۶

۵-۶-۳- مدل سازی اجزای محدود نمونه استوانه ای (100x200mm²-100x100Pixels)..... ۸۷

۵-۶-۴- مدل سازی اجزای محدود نمونه استوانه ای (200x200x400Pixels-100x200mm²)..... ۸۹

۵-۷- مدل عددی حفره های هوا..... ۹۱

فصل ششم : نتایج حاصل از مدل های عددی..... ۹۳

۶-۶- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایشگاه..... ۹۴

۶-۶-۱- مطالعات آماری مدل دوبعدی نمونه مکعبی نوع اول..... ۹۴

۶-۶-۲- میانگین و انحراف معیار داده ها..... ۹۷

۶-۶-۳- ضریب پراکندگی..... ۹۹

۶-۶-۴- نتایج تحلیل اجزای محدود دوبعدی نمونه مکعبی نوع دوم..... ۱۰۰

۶-۶-۵- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود سه بعدی نمونه ها..... ۱۰۲

شکل (۶-۱۵) منحنی تنش - کرنش به دست آمده از نمونه بتن استوانه ای (200x200x400Pixels)..... ۱۰۸

۶-۶-۶- بررسی خرابی فشاری و خرابی کششی نمونه ها..... ۱۱۰

شکل (۶-۲۷) الگوی شکست در نمونه بتن استوانه ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z ۱۱۵

شکل (۶-۲۸) الگوی ترک در نمونه بتن استوانه ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z ۱۱۵

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۷

۱-۷ - نتیجه گیری ۱۱۸

۲-۷ - پیشنهادات ۱۱۹

پیوست ها ۱۱۷

پیوست ۱: منحنی های تنش - کرنش به دست آمده از کرنش سنج ها ۱۲۱

شکل (۱) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه ای شماره (۱) ۱۲۱

شکل (۲) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه ای شماره (۲) ۱۲۱

شکل (۳) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه ای شماره (۳) ۱۲۲

پیوست ۲: داده های ثبت شده در دیتا لاگر و کامپیوتر برای نمونه های ملات نوع اول ۱۲۳

پیوست ۳: داده های ثبت شده در دیتا لاگر و کامپیوتر برای نمونه های ملات نوع دوم ۱۳۳

پیوست ۴: داده های به دست آمده از ستاپ ASTM برای نمونه های مغزه سنگ ۱۳۷

پیوست ۵: داده های به دست آمده از ستاپ ASTM برای نمونه های بتن استوانه ای ۱۶۰

پیوست ۶: کد تبدیل تصاویر ۱۶ بیتی به ۸ بیتی و برش تصویر ۱۶۲

پیوست ۷: کد مربوط به برش تصویر ۱۶۲

پیوست ۸: کد مربوط به برهم نهی تصاویر و نمایش آن ۱۶۲

پیوست ۹: کد تعیین محدوده فازها و اختصاص برجسب به هر فاز ۱۷۰

پیوست ۱۰: کد مربوط به جدا نمودن شماره پیکسل های تصویر بتن با مقطع دایره (استوانه) ۱۷۲

منابع ۱۷۴

فهرست جداول

جدول (۱-۳)	جدول مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ شاهرود.....	۱۸
جدول (۲-۳)	طرح اختلاط بتن.....	۱۹
جدول (۳-۳)	مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های ملات نوع اول ($W/C = 0/35$).....	۳۶
جدول (۴-۳)	مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های ملات نوع دوم ($W/C = 0/31$).....	۳۸
جدول (۵-۳)	مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های مغزه سنگ آهک.....	۴۳
جدول (۶-۳)	مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های مغزه ماسه سنگ.....	۴۳
جدول (۷-۳)	میانگین خصوصیات مصالح به دست آمده از آزمایشگاه.....	۴۴
جدول (۸-۳)	نیروهای به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۶ نمونه مکعبی نوع اول.....	۴۶
جدول (۹-۳)	نیروها و مقاومت‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه مکعبی نوع اول.....	۴۸
جدول (۱۰-۳)	نیروها و مقاومت‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه مکعبی نوع دوم.....	۵۰
جدول (۱۱-۳)	نیروها و مقاومت‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه استوانه‌ای بتن.....	۵۳
جدول (۱-۵)	تنظیمات استفاده شده برای سی‌تی اسکن نمونه مکعبی اول.....	۶۹
جدول (۲-۵)	تنظیمات استفاده شده برای سی‌تی اسکن نمونه مکعبی و استوانه (نوع دوم).....	۷۰
جدول (۳-۵)	درصد مواد موجود در برش‌های تصاویر بتن.....	۷۳
جدول (۴-۵)	درصد کلی مواد موجود در برش‌های تصاویر بتن.....	۷۸
جدول (۵-۵)	خصوصیات مکانیکی ملات.....	۷۹
جدول (۶-۵)	خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها.....	۷۹
جدول (۷-۵)	خصوصیات مربوط به مدل خسارت پلاستیک بتن.....	۸۰
جدول (۱-۶)	مقادیر حداکثر مقاومت فشاری.....	۹۸
جدول (۲-۶)	میانگین و انحراف معیار مقاومت فشاری برش‌های سی‌تی اسکن.....	۹۸
جدول (۳-۶)	حداکثر نیروهای به‌دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰.....	۱۰۱
جدول (۴-۶)	مقایسه نیروهای به‌دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه مکعبی نوع دوم.....	۱۰۱
جدول (۵-۶)	نتایج حداکثر نیروی فشاری به‌دست آمده از آزمایشگاه و مدل عددی.....	۱۰۸
جدول (۶-۶)	نتایج مقاومت فشاری به‌دست آمده از آزمایشگاه و مدل عددی.....	۱۰۹

فهرست اشکال

- شکل (۱-۳) معدن ده‌ملا واقع در ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان شاهرود..... ۱۶
- شکل (۲-۳) سنگ‌دانه‌های با شکل طبیعی و دست‌نخورده..... ۱۷
- شکل (۳-۳) (الف) منحنی دانه بندی مصالح و (ب) سنگدانه‌ها و ماسه‌ی کاملاً شسته شده قبل از عمل اختلاط..... ۱۸
- شکل (۴-۳) (الف) مصالح مورد استفاده و (ب) میکسر..... ۲۰
- شکل (۵-۳) نمونه ۲۸ روزه به ابعاد (۱۰۰×۱۰۰ mm)..... ۲۰
- شکل (۶-۳) نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه بتن سری اول، با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵..... ۲۱
- شکل (۷-۳) نمونه‌های مکعبی بتن سری دوم به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰mm با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱..... ۲۱
- شکل (۸-۳) نمونه‌های استوانه‌ای بتن به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰mm با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱..... ۲۲
- شکل (۹-۳) ساخت ملات مطابق با استاندارد ASTM C 305..... ۲۳
- شکل (۱۰-۳) نمونه‌های ملات استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰mm سری اول کپینگ شده (w/c=۰/۳۵)..... ۲۴
- شکل (۱۱-۳) نمونه‌های ملات استوانه‌ای سری دوم (نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۱)..... ۲۴
- شکل (۱۲-۳) سنگ‌های مادر استخراج شده از بستر رودخانه، انباشته شده در پایین دست معدن..... ۲۵
- شکل (۱۳-۳) سنگ تیره ماسه سنگ و سنگ روشن سنگ آهک..... ۲۵
- شکل (۱۴-۳) تهیه تعداد ۵ مغزه از دو نمونه سنگ مادر با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر در آزمایشگاه مکانیک سنگ..... ۲۶
- شکل (۱۵-۳) مغزه‌های به‌دست آمده (سمت راست ماسه سنگ و سمت چپ سنگ آهک)..... ۲۶
- شکل (۱۶-۳) استفاده از دستگاه برش برای صاف نمودن دو سر نمونه‌های مغزه‌ی سنگ..... ۲۷
- شکل (۱۷-۳) نمونه‌های مغزه‌ی سنگ‌ها پس از برش دو سر آن‌ها..... ۲۷
- شکل (۱۸-۳) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها جهت به‌دست آوردن تغییر مکان نمونه‌های ملات ۱۰۰×۲۰۰mm -..... ۲۸
- (بر حسب میلی‌متر)..... ۲۸
- شکل (۱۹-۳) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰mm..... ۲۹
- شکل (۲۰-۳) ستاپ LVDT و حلقه‌ها بر روی نمونه ملات ۱۰۰×۲۰۰ mm مطابق با استاندارد ASTM C 469-02..... ۲۹
- شکل (۲۱-۳) اندازه‌های تغییر مکان سنج (CDP-50)..... ۳۰
- شکل (۲۲-۳) دقت تغییر مکان سنج (CDP-50)..... ۳۰
- شکل (۲۳-۳) کرنش سنج با مشخصه PFL-20-11 و اتصال پایه‌های آن به سیم دیتا با لحیم کاری..... ۳۱
- شکل (۲۴-۳) کنترل مقاومت پایه‌ها در محل اتصال به سیم دیتا برای مقاومت ۱۲۰ اهم و مهار سیم دیتا با چسب بر روی نمونه..... ۳۱
- شکل (۲۵-۳) نمونه ملات همراه با دو LVDT و دو کرنش‌سنج تحت فشار با دستگاه جک یونیورسال ۳۰۰ تن..... ۳۲

- شکل (۳-۲۶) دستگاه دیتا لاگر TDS-150 در حال ثبت داده‌های تغییر مکان و کرنش ۳۲
- شکل (۳-۲۷) پیاده‌سازی ستاپ آزمایش فشاری با دستگاه دیتا لاگر و ثبت داده‌ها در کامپیوتر ۳۳
- شکل (۳-۲۸) نمونه ملات ماسه سیمان شکسته شده با دستگاه جک یونیورسال ۳۰۰ تن ۳۴
- شکل (۳-۲۹) منحنی تنش-کرنش ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ ۳۵
- شکل (۳-۳۰) آزمایش فشاری جهت تعیین منحنی تنش - کرنش و مدول الاستیسیته برای ملات نوع دوم ۳۷
- شکل (۳-۳۱) منحنی تنش - کرنش ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ ۳۸
- شکل (۳-۳۲) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها جهت به‌دست آوردن تغییر مکان نمونه‌های مغزه سنگ به قطر ۵۴mm ۳۹
- شکل (۳-۳۳) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای نمونه‌های مغزه سنگ به قطر ۵۴mm ۴۰
- شکل (۳-۳۴) ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای مغزه به قطر ۵۴mm مطابق با استاندارد ASTM ۴۰
- شکل (۳-۳۵) نمونه مغزه سنگ آهک (1b) پس از شکست تحت فشار ۴۱
- شکل (۳-۳۶) نمونه مغزه ماسه سنگ (4a) تحت آزمایش فشاری با جک یونیورسال و ستاپ ASTM ۴۱
- شکل (۳-۳۷) منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های سنگ آهک ۴۲
- شکل (۳-۳۸) منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های ماسه سنگ ۴۲
- شکل (۳-۳۹) - (الف) نمونه قبل از بارگذاری و (ب) نمونه پس از بارگذاری ۴۵
- شکل (۳-۴۰) نیروی به‌دست آمده از نمونه تحت فشار (۵۰۰ kN) ۴۶
- شکل (۳-۴۱) (الف) نمونه شکسته شده تحت نیروی فشاری محوری در جهت y ۴۶
- شکل (۳-۴۲) شکست نمونه مکعبی نوع اول زیر جک یونیورسال ۳۰۰ تن ۴۷
- شکل (۳-۴۳) نمونه‌های مکعبی نوع اول با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ پس از شکست ۴۷
- شکل (۳-۴۴) منحنی نیرو - جابجایی نمونه‌های بتن مکعبی نوع اول ۴۸
- شکل (۳-۴۵) شکست نمونه مکعبی (سی تی اسکن شده) با جک یونیورسال ۳۰۰ تن ۴۹
- شکل (۳-۴۶) نمایی از پیشرفت ترک در یک وجه نمونه مکعبی نوع دوم (اسکن شده) ۴۹
- شکل (۳-۴۷) منحنی نیرو - جابجایی نمونه‌های بتن مکعبی نوع دوم با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ ۵۰
- شکل (۳-۴۸) نمونه بتن استوانه‌ای به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰mm تحت آزمایش فشاری جهت تعیین منحنی تنش - کرنش و مدول الاستیسیته دقیق بتن ۵۱
- شکل (۳-۴۹) نمونه استوانه‌ای C₁ (اسکن شده) پس از شکست با جک یونیورسال ۳۰۰ تن ۵۱
- داده‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن در جدول پیوست ۵ درج شده است ۵۲
- شکل (۳-۵۰) منحنی نیرو - جابجایی نمونه بتن استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰mm² ۵۲
- شکل (۳-۵۱) منحنی تنش - کرنش نمونه بتن استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰mm² ۵۲

- شکل (۴-۱) تصویر به عنوان یک تابع..... ۵۸
- شکل (۴-۲) علوم مرتبط با پردازش تصویر..... ۵۸
- شکل (۴-۳) یک برش تصویر بتن همراه با شماره پیکسل‌های نشان‌دهنده آن..... ۵۹
- شکل (۴-۴) مدل تضعیف اشعه ایکس وقتی که از یک ماده با چگالی $\mu(x)$ عبور می‌نماید..... ۶۰
- شکل (۴-۵) مدل ریاضی تضعیف اشعه ایکس زمانی که از میان یک سری از اشیاء عبور می‌کند..... ۶۲
- شکل (۴-۶) ترکیب چرخش منبع اشعه ایکس و آشکارسازها باعث ایجاد یک سی تی اسکن اسپیرال می‌گردد (گنزالز و همکاران، ۲۰۰۹)..... ۶۴
- شکل (۴-۷) (الف) نمونه مکعبی بتنی، (ب) مدل کیوسی تی پردازش شده..... ۶۵
- شکل (۵-۱) نمونه‌های انتخاب شده برای سی تی اسکن - (الف) نمونه مکعبی نوع اول ($w/c=0.35$)، (ب) نمونه مکعبی نوع دوم ($w/c=0.31$) و (ج) نمونه استوانه‌ای ($w/c=0.31$)..... ۶۸
- شکل (۵-۲) نمونه بتن مکعبی نوع اول در دستگاه سی تی اسکن بیمارستان قلب شهید رجایی تهران..... ۶۹
- شکل (۵-۳) نمونه بتن مکعبی سری دوم و نمونه استوانه‌ای در دستگاه سی تی اسکن بیمارستان قلب تهران..... ۷۰
- شکل (۵-۴) (الف) تصویر اولیه ۵۱۲×۵۱۲ pixels نشان‌دهنده نگه‌دارنده نمونه در دستگاه سی تی اسکن و قسمت‌های اضافی سیاه‌رنگ و (ب) تصویر ۱۳۵×۱۳۵ pixels قسمت مورد مطالعه (بتن)..... ۷۱
- شکل (۵-۵) تصویر بتن همراه با شماره پیکسل‌های نشان‌دهنده آن..... ۷۲
- شکل (۵-۶) هیستوگرام برش شماره ۴۰ نمونه بتن (تعیین محدوده شدت روشنایی فازها)..... ۷۳
- شکل (۵-۷) نمونه برش‌های تصویر سی تی اسکن..... ۷۴
- شکل (۵-۸) مدل المان محدود غیرهمگن برش شماره ۴۰ نمونه بتن (نمایش فازهای چهارگانه در Abaqus)..... ۷۵
- شکل (۵-۹) مقایسه (الف) تصویر سی تی اسکن مقطع مرکزی نمونه و (ب) مدل متناظر در آباکوس..... ۷۵
- شکل (۵-۱۰) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (۱۳۵×۱۳۵×۱۲۰ Pixels)..... ۷۶
- شکل (۵-۱۱) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (۱۴۲×۱۴۲×۱۴۲ Pixels)..... ۷۷
- شکل (۵-۱۲) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (۱۰۰×۱۰۰×۲۰۰ Pixels)..... ۷۷
- شکل (۵-۱۳) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels)..... ۷۸
- شکل (۵-۱۴) تعریف خصوصیات پلاستیک یک نمونه ملات در فایل متنی (.inp) آباکوس..... ۸۰
- شکل (۵-۱۵) تعریف منحنی تنش-کرنش نمونه ملات استوانه‌ای در فازهای فشاری و کششی در فایل متنی (.inp)..... ۸۱
- شکل (۵-۱۶) تعریف کرنش غیرالاستیک در حالت فشاری..... ۸۲
- شکل (۵-۱۷) تعریف خسارت فشاری ملات نمونه استوانه‌ای در فایل متنی (.inp)..... ۸۳
- شکل (۵-۱۸) تعریف کرنش ترک‌خوردگی در حالت کششی..... ۸۴
- شکل (۵-۱۹) تعریف خسارت کششی ملات نمونه استوانه‌ای در فایل متنی (.inp)..... ۸۴

- شکل (۵-۲۰) (الف) تصویر سه‌بعدی برهم‌نهی شده نمونه مکعبی نوع اول و (ب) مدل اجزای محدود آن در آباکوس ۸۵
- شکل (۵-۲۱) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه مکعبی (مش $0.74 \times 0.74 \times 0.74 \text{ mm}^3$) ۸۶
- شکل (۵-۲۲) (الف) تصویر سه‌بعدی برهم‌نهی شده نمونه مکعبی نوع دوم و (ب) مدل اجزای محدود آن در آباکوس ۸۶
- شکل (۵-۲۳) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه مکعبی (مش $0.7 \times 0.7 \times 0.7 \text{ mm}^3$) ۸۷
- شکل (۵-۲۴) مدل سه‌بعدی اجزای محدود نمونه بتن استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس (ابعاد مش $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$) ۸۸
- شکل (۵-۲۵) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (مش $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$) ۸۸
- شکل (۵-۲۶) مدل سه‌بعدی اجزای محدود نمونه بتن استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$) ۸۹
- شکل (۵-۲۷) برش سه‌بعدی وسط مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای در جهت Z (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$) ۸۹
- شکل (۵-۲۸) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای در جهات X و Y (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$) ۹۰
- شکل (۵-۲۹) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود بتن مکعبی نوع اول (۱۳۵×۱۳۵Pixels) ۹۱
- شکل (۵-۳۰) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود بتن مکعبی نوع دوم (۱۴۲×۱۴۲Pixels) ۹۱
- شکل (۵-۳۱) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (۱۰۰×۱۰۰pixels) ۹۲
- شکل (۵-۳۲) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰pixels) ۹۲
- شکل (۶-۱) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت X ۹۴
- شکل (۶-۲) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت Y ۹۵
- شکل (۶-۳) منحنی‌های نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت X برای ۶ ۹۶
- برش نمونه دوبعدی ۹۶
- شکل (۶-۴) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت Y برای ۶ برش ۹۷
- نمونه دوبعدی ۹۷
- شکل (۶-۵) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰ در جهت X ۱۰۰
- شکل (۶-۶) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰ در جهت Y ۱۰۱
- شکل (۶-۷) منحنی نیرو - جابجایی به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه مکعبی نوع اول ۱۰۳
- شکل (۶-۸) منحنی نیرو - جابجایی به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه مکعبی نوع دوم ۱۰۴
- شکل (۶-۹) منحنی نیرو - جابجایی به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه استوانه‌ای ۱۰۴
- شکل (۶-۱۰) منحنی تنش - کرنش به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه استوانه‌ای ۱۰۵
- شکل (۶-۱۱) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به‌دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاه برای بتن مکعبی نوع اول ۱۰۵
- شکل (۶-۱۲) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به‌دست آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه (بتن مکعبی نوع دوم) ۱۰۶

- شکل (۱۳-۶) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به‌دست‌آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه‌ی استوانه‌ای..... ۱۰۷
- شکل (۱۴-۶) مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش به‌دست آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه استوانه‌ای..... ۱۰۷
- شکل (۱۵-۶) منحنی تنش - کرنش به‌دست آمده از نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels)..... ۱۰۸
- شکل (۱۶-۶) نمای خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۰
- شکل (۱۷-۶) خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۰
- شکل (۱۸-۶) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۱
- شکل (۱۹-۶) الگوی ترک در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۱
- شکل (۲۰-۶) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۲
- شکل (۲۱-۶) الگوی ترک برای بارگذاری در جهت X..... ۱۱۲
- شکل (۲۲-۶) نمای خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۳
- شکل (۲۳-۶) خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۳
- شکل (۲۴-۶) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۳
- شکل (۲۵-۶) الگوی ترک برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۴
- شکل (۲۶-۶) مقایسه الگوی ترک مدل عددی و نمونه شکسته شده در آزمایشگاه..... ۱۱۴
- شکل (۲۷-۶) الگوی شکست در نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۵
- شکل (۲۸-۶) الگوی ترک در نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z..... ۱۱۵

فصل اول:

کلیات تحقیق

این مطالعه گامی در جهت ارائه توانمندی نرم‌افزارهای قدرتمند متلب و آباکوس در علوم پردازش تصویر و اجزای محدود است. شاید این جمله را شنیده باشید که چشم شترمرغ از مغزش بزرگ‌تر است! در حدود ۹۰ درصد اطلاعات محیط اطرافمان را از طریق حس بینایی دریافت می‌کنیم. این روزها حضور رایانه‌ها در همه‌جا حس می‌شود. فروشگاه‌ها، مدارس، دانشگاه‌ها، سازمان‌ها و شرکت‌های خصوصی و دولتی و بسیاری جاهای دیگر. تأثیرات مختلف این حضور نیز همه‌روزه قابل‌رویت است. صورت‌حساب‌های منظم کامپیوتری، آگهی‌های جذاب تلویزیونی، بازی‌ها و سرگرمی‌های خانگی و خیلی موارد دیگر. تقریباً همه روزه شاهد ظهور زمینه‌های کاربردی جدیدی برای علم پردازش تصاویر رقومی هستیم. نقطه‌ی آغازین این علم، اکتشافات فضایی است که با هدایت محققین و تکنیسین‌های موسسه‌ی ملی هوا و فضای آمریکا (ناسا) انجام گرفت. این علم به‌سرعت به ابزاری برای تفسیر عکس‌ها در سازمان‌های جاسوسی دنیا تبدیل گردید.

از دیگر سو، دیگر علوم نیز از تأثیرات ناخواسته‌ی این علم مصون نماندند. زمین‌شناسان با استفاده از این علم تصاویر با اطلاعات بسیار مفیدی از سطح زمین به‌دست می‌آورند؛ در این تصاویر می‌توان جابجایی‌های پوسته‌ی زمین را به‌راحتی تشخیص داد. تصاویر چند طیفی (چند تصویر از یک منطقه که با بسامدهای مختلف، از یک منطقه اخذ شده‌اند) را می‌توان در اکتشافات نفت و معادن بکار برد، همچنین تصاویر کف اقیانوس‌ها را می‌توان با استفاده از سنجنده‌های رادار فضایی به‌دست آورد و نقشه‌های آن را به‌دست آورد، نقشه‌های هواشناسی را نیز می‌توان از این مقوله دانست. درحالی‌که متخصصان علوم زمینی و نقشه‌برداری از تصاویر رقومی برای کشف و تهیه‌ی نقشه از منابع طبیعی استفاده می‌کنند، برنامه ریزان و طراحان از روش‌هایی مشابه برای منظورهای دیگر سود می‌برند.

با استفاده از GIS مسئولین دولتی می‌توانند پیشرفت‌های پروژه‌های عمرانی را با استفاده از عکس‌های هوایی پیگیری کنند؛ می‌توان منطقه‌ی تحت پوشش مرکز تلفن حوادث اضطراری را روی نقشه‌های مراکز جمعیتی قرار داد و همچنین می‌توان از کاربردهای علم پردازش تصاویر در پزشکی،

پردازش اسناد و مدارک، کاربردهای صنعتی و رباتیک (دید ماشینی)، نشر و چاپ، صنعت سرگرمی و سینما، کاربردهای تجاری و حتی کاربردهای خانگی نظیر استفاده از دوربین‌های رقومی، نمابر و تلویزیون و دیگر کاربردها نام برد.

اخیراً مدل‌سازی اجزای محدود بتن با استفاده از پردازش تصاویر سی‌تی اسکن مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به هزینه‌های بالا برای بازسازی سالانه و ترمیم زیرساخت بتن، پیش‌بینی پاسخ یک سازه بتنی به شرایط واقعی به یک نگرانی عمده برای کارفرمایان و محققان تبدیل شده است. این پیش‌بینی می‌تواند طرح‌های ترجیحی برای کاهش هزینه‌ی بازسازی، زمان و درنهایت افزایش قابلیت اطمینان و دوام چنین ساختارهایی را فراهم سازد. بنابراین، پیش‌بینی عمر سازه‌های بتنی به یک نگرانی عمده در یک طراحی پایدار تبدیل شده است. رفتار زیرساخت بتن به شدت متأثر از درصد سنگ‌دانه‌ها و حفره‌ی هوا و توزیع آن‌ها در بتن است. اندازه‌گیری این دو مؤلفه برای اهداف کنترل کیفیت در ساختمان‌های در حال ساخت و همچنین ساختمان‌های قدیمی‌تر استفاده شده است. با این حال، صرف زمان و وابستگی به کارکنان برای انجام دقیق، این اندازه‌گیری را دشوار ساخته است.

بیشتر مدل‌های موجود بتن با در نظر گرفتن آن به‌عنوان یک ماده‌ی همگن گسترش داده شده است. درحالی‌که در مقیاس مزو، بتن یک ماده ناهمگن متشکل از سنگ‌دانه‌ها، خمیر سیمان، حفرات هوا و ناحیه انتقالی بین آن‌ها است، در واقع برای پیش‌بینی رفتار بتن با توجه به عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن باید ریزساختارها نیز در مدل در نظر گرفته شود. یکی از روش‌هایی که به‌عنوان یک تکنیک غیرمخرب برای تجسم ویژگی‌های فضای داخلی مواد مختلف از جمله بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، سی‌تی اسکن است. در این مطالعه از کیوسی‌تی برای ساخت تصاویر سه‌بعدی از نمونه‌های بتنی استفاده شده است.

در این روش، ساختارهای مزومقیاس به‌دقت شبیه‌سازی می‌گردد. تصاویر دوبعدی تولیدشده توسط این روش تغییرات تراکم در طول مقطع عرضی شی را نمایش می‌دهد. در طول روند تصویربرداری، شدت پرتوهای اشعه ایکس عبوری از میان نمونه‌ی بتن با توجه به اختلاف چگالی اجزاء تغییر کرده و

مواد متراکم‌تر موجب ایجاد میرایی بیشتر پرتوها نسبت به مواد با تراکم کمتر می‌شود. اجرای سریع و بی‌نیازی از کارکنان، همچنین قابلیت معاینه درون سازه و آسیب‌های احتمالی این روش را بسیار مناسب و قابل اجرا برای کنترل کیفیت و ضمانت کیفیت و همچنین بحث‌ها و تحقیقات جدلی ساخته است.

۱-۲- ضرورت و اهمیت تحقیق

تعیین مقاومت فشاری بتن در آزمایشگاه، اولین و مهم‌ترین پارامتری است که جهت طراحی سازه های بتن آرمه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقام طراحی با اتخاذ طرح اختلاط بتن، مقاومت فشاری موردنظر حاصل می‌شود. در حالت کنترل نیز با کرگیری و آزمایش نمونه در آزمایشگاه صحت اجرا و کسب مقاومت مورد نظر، تعیین می‌شود. تمام مراحل فوق مستلزم صرف وقت و هزینه است و گاهی عدم انطباق شرایط آزمایشگاهی با آنچه اجرا می‌شود حاصل می‌گردد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های عددی (FEM^1) سعی می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پیش‌بینی گردد. بدین منظور می‌بایست نخست مدل عددی بتن شامل سنگ‌دانه، ماتریس سیمان و ... به‌صورت هندسی ایجاد گردد و سپس با دانستن خصوصیات مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده‌ی بتن، پیش‌بینی عددی حاصل گردد.

۱-۳- هدف تحقیق

هدف این تحقیق ایجاد روشی نوین برای تعیین مقاومت فشاری بتن واقعی به‌صورت عددی است. در واقع هدف ما استفاده از دستگاه سی‌تی‌اسکن و پردازش تصویر برای ایجاد هندسه دقیق بتن و سپس انجام آزمایش‌های لازم بر روی مواد تشکیل‌دهنده‌ی بتن (سنگدانه و ملات ماسه‌سیمان) برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی مصالح و ایجاد مدل عددی نزدیک به نمونه واقعی برای تعیین مقاومت فشاری بتن است.

¹ Finite Element Method

۴-۱- نوآوری تحقیق

- تعیین مقاومت فشاری بتن واقعی که تمامی ریزساختار آن به صورت غیرهمگن با استفاده از روش پردازش تصویر و دستگاه سی تی اسکن نشان داده شده است.

- مدل سازی بتن مزو^۱ مقیاس با ابعاد بزرگ و نزدیک به استاندارد با دیدگاه پیش بینی و تعیین مقاومت فشاری بتن و همچنین استفاده از دو نوع سنگدانه متفاوت و طبیعی و دست نخورده برای اولین بار در مدل هایی که تاکنون انجام شده به همراه خصوصیات مکانیکی هر یک از آنها.

- استفاده از نسبت های آب به سیمان متفاوت در نمونه ها و تهیه تصاویر سی تی اسکن با تنظیم دستگاه در دو حالت متفاوت (عکس برداری از مغز و ریه) و کسب تصاویر با ضخامت های برش متفاوت و در نهایت مقایسه نتایج حاصل عددی و آزمایشگاهی برای این حالات مختلف.

۵-۱- ساختار تحقیق

پایان نامه حاضر در ۷ فصل به ترتیب ذیل تهیه شده است:

فصل اول: کلیات تحقیق

در این فصل، به ضرورت تحقیق، اهمیت تحقیق و اهدافی که موضوع تحقیق دارد، پرداخته شده است.

فصل دوم: مروری بر سوابق تحقیق

در این بخش مطالعات پیشین انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ Meso

فصل سوم: آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی مواد-آماده‌سازی نمونه‌ها

در این فصل نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها آزمایش‌های لازم برای تعیین مدول الاستیسیته آن‌ها و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.

فصل چهارم: پردازش تصویر

در این فصل به تصاویر و عکس‌ها و مفاهیم پایه در پردازش تصویر دیجیتال، علوم مرتبط با پردازش تصویر، تعریف توموگرافی محاسباتی (سی‌تی)-اسکن پرداخته شده است.

فصل پنجم: پردازش تصویر و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس

در این بخش به کاربرد دستگاه سی‌تی اسکن و توانمندی نرم‌افزار متلب در پردازش تصاویر پرداخته شده است. همچنین نحوه مدل‌سازی بتن واقعی در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است.

فصل ششم: نتایج حاصل از مدل‌های عددی

کلیه نتایج حاصل از مدل‌های عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در این بخش ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

فصل دوم:

مروری بر سوابق تحقیق

۲-۱- مقدمه

تکنیک‌های زیادی از پردازش تصاویر دیجیتال در سال ۱۹۶۰ برای تصاویر ماهواره‌ای و پزشکی گسترش یافت. با این حال با توجه به هزینه‌ی زیاد پردازش تصاویر دیجیتال، از آن برای سایر صنایع استفاده نگردید تا سال ۱۹۹۰ که کامپیوترهای شخصی با هزینه کم و دوربین‌های دیجیتال تولید شدند. همچنین از آن زمان به بعد تکنیک‌های پردازش تصاویر دیجیتال در مهندسی عمران به خوبی به کار گرفته شدند. قابلیت خودکار شناسایی اشکال، اشیاء و مواد از محتوای تصویر از طریق روش‌های مستقیم (بر پایه محتوا) و روش‌های غیرمستقیم، توسعه‌ی ابزارهای مهندسی عمران را ممکن ساخته است. این ابزارها از داده‌های تصویر برای دستیابی به طراحی، ساخت‌وساز و تعمیر و نگهداری پروژه‌های ساختمانی استفاده می‌نماید.

۲-۲- پیشینه تحقیق

هالیستر و کیکوچی [۱] در سال ۱۹۹۳ تئوری همگن‌سازی و تصویربرداری دیجیتال را به عنوان پایه‌ای برای مطالعه اصول طراحی و مکانیک بافت استخوان ارائه نمودند. کلر و همکارانش [۲] در سال ۱۹۹۳ برای تشخیص حرکت چرخ‌ها، ترادا و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۷ برای مدل‌سازی جهت تجزیه و تحلیل همگن مواد کامپوزیت، ابدل قادر و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۳ برای تشخیص سطح ترک در روسازی‌ها با استفاده از کیوسی تی (سی تی اسکن)، آیدلیک و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۲ برای شناسایی ساختار داخلی بتن آسفالتی و لین و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۴ برای پیدا کردن ملات‌های آسیب‌دیده بر اثر آتش‌سوزی از رنگ تصاویر و شدت روشنایی آن‌ها استفاده نمودند. تعیین توزیع کرنش در آزمایش‌های کششی توسط آیدلیک و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۳، ارزیابی خستگی در ترکیبات آسفالت توسط هارتمن و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۴، بررسی ویژگی‌های مزوساختار و مزومکانیکی ترکیب خاک - سنگ با استفاده از تصاویر دیجیتال، تعداد دیگری از این مطالعات است. یو و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۸ خصوصیات مزوساختار و مزومکانیکی مخلوط خاک - سنگ را با روش اجزای محدود بر اساس پردازش تصویر دیجیتال بررسی نمودند. یانگ و همکاران

[۱۰] در سال ۲۰۰۸ یک روش کارآمد برای تبدیل داده‌های تصویر سه‌بعدی به مدل‌های بسیار دقیق محاسباتی را ارائه نمودند. یو و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۹ شبیه‌سازی مدول دینامیکی بتن آسفالتی را با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس بررسی کردند. از پردازش تصاویر برای مشخص نمودن ریزساختارها و خصوصیات موادی مانند سنگ، خاک و فسیل‌ها در زمین‌شناسی، فلزات و آلیاژها، مخلوط‌های آسفالت، سیمان و بتن استفاده شده است [۱۵-۱۲]. دای و نیبور [۱۶] در سال ۲۰۰۹ یک روش نیمه‌خودکار برای ساخت مش‌های شش‌وجهی مهره بدن انسان با استفاده از تصاویر سی‌تی اسکن ارائه نمودند. هوانگ و مینگلی [۱۷] در سال ۲۰۱۳ بازسازی مدل‌های اجزای محدود میکرو ساختار مواد ناهمگن را بر اساس توپوگرافی اشعه ایکس تصاویر مورد مطالعه قرار دادند.

گارسیا و میگوآل [۱۸] در سال ۲۰۱۳ تقسیم‌بندی ریزساختار تصاویر سه‌بعدی نمونه آسفالت را با استفاده از نرم‌افزار متلب مورد مطالعه قرار دادند. وو و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی چندمقیاسی نفوذ کلرید در مواد سیمانی را مطالعه نمودند. لیو و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۵ مدل پیش‌بینی برای مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ فرسوده شده در اثر یخ‌زدگی را ارائه کردند. مدل-سازی غیرخطی خرابی و شکست مواد با ریزساختارهای واقعی، پیچیده و مطالعات محدودی وجود دارد. برای مثال مصطفوی و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۳ بازشدگی ترک و پروسه شکست در مورد گرافیت پلی گرانولار را بررسی کردند.

۳-۲- پردازش تصویر در بتن

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، سی‌تی اسکن و پردازش تصویر، برای مطالعه بتن مورد استفاده قرار گرفته است. اسکریونر و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۰۴ آی‌تی‌زد بین خمیر سیمان و مصالح بتن را با میکروسکوپ الکترونی بررسی کردند. پژوهش غیرمخربی توسط کالیسکان [۲۳] در سال ۲۰۰۷ با هدف بررسی تأثیر تخلخل بر مقاومت فشاری در قسمت‌های مختلف ستون بتن حاوی دوده سیلیس^۱ گزارش شده است. چنگ و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۰۸ تنش پسماند در مواد بتنی پیش‌تنیده را با

^۱ Fly Ash

استفاده از پردازش تصویر بررسی کردند. مدل سازی در مقیاس مزو توسط لوپز و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۰۸ با در نظر گرفتن فازهای مختلف، آسیب های پیچیده و سیر تکاملی آن تا شکست و همچنین روابط خواص فیزیکی بین فازهای چندگانه انجام شد که پاسخ های ماکرو مکانیکی را در آزمایش برزلی مورد مطالعه قرار دادند. یک مدل چندمقیاسی سه بعدی از خواص مکانیکی مواد پایه سیمانی توسط برنارد و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد شده است. این مدل به حساب تغییرات احتمالی در میکرو ساختار می پردازد. دو ابزار عددی شامل مدل شیمیایی مواد پایه سیمانی و مدل المان محدود برای پیش بینی رفتار مکانیکی ترکیب شده است. با این حال، این تحقیق تنها یک مکعب ۵ میلی متری از ملات شامل ذرات ماسه کوچک در خمیر سیمان در مقیاس مزو را برای تعیین رفتار مکانیکی آن و مدول های یانگ در نظر گرفته است.

تحلیل تأثیر تغییر دما در ریزساختار بتن با مقاومت بالا با استفاده از سی تی اسکن توسط هنری و همکارانش انجام شده است [۲۷]. سوزوکی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۰ کاربرد انتشار آکوستیک و توموگرافی محاسباتی اشعه ایکس برای ارزیابی خرابی بتن پس از یخ زدگی را مورد مطالعه قرار دادند که در این مطالعه از دیواره ی یک کانال مغزه گیری شد. هو و چن [۲۹] در سال ۲۰۱۰ مدل سه بعدی ساختار مزو مقیاس بتن با سنگ دانه چندوجهی را ارائه نمودند. فن و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۰ کاهش مقاومت بتن را با شبیه سازی آن تحت اثر باران اسیدی بررسی نمودند.

در مطالعه دیگری آساهینا و همکارانش [۳۱] در سال ۲۰۱۱ با شبیه سازی مدل هایی برای بتن، با استفاده از ملات و منجوق های شیشه ای کروی به عنوان سنگ دانه، بارهای پیک را به دست آورده و الگوهای ترک به دست آمده را با نتایج سی تی اسکن تطبیق دادند. ارزار و فرکوئین [۳۲] در سال ۲۰۱۱ آزمایش و مدل سازی مزوسکوپی آزمایش های دینامیکی بتن را مورد مطالعه قرار دادند. لنزن و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۲ منافذ ملات را با استفاده از روش میکروسی تی مورد بررسی قرار دادند که در این مطالعه، ساختار ملات از نظر تخلخل و قطر معادل منافذ مورد مطالعه قرار گرفت. آن ها

نشان دادند ماهیت ملات اجازه تقسیم‌بندی دقیق را می‌دهد به گونه‌ای که هوا به وضوح از اجزای جامد به دلیل چگالی کم آن متمایز شده است.

مشخصات تخلخل نمونه‌های بتن از پردازش تصاویر سی‌تی اسکن توسط ماناهیلو و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۲ به دست آمده است. بسیگیت و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۲ مقاومت فشاری بتن را با روش پردازش تصویر مورد ارزیابی قرار دادند که در این مطالعه با ایجاد برش در طول نمونه شش تصویر دوبعدی توسط دوربین دیجیتال تهیه گردید.

در مطالعه دیگری، مکانیسم آسیب بتن در آزمایش بارگذاری هیدرو استاتیک و سه‌محوری با استفاده از روش سی‌تی اسکن توسط پوینارد [۳۶] و همکاران در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه توسط استفاده از فشار بالای بار سه‌محوری به دنبال سی‌تی اسکن انجام شد و تصاویر اسکن شده قبل از بارگذاری اولیه و بعد از هر چرخه مقایسه گردید. تجزیه و تحلیل تصاویر نشان داد که تحت بارگذاری هیدرواستاتیک بالا، آسیب قابل توجهی در مقیاس مزوسکوپی در خمیر سیمان رخ داده است. در فشار پایین‌تر، بارگذاری برشی یک مکانیزم شکست موضعی را ایجاد نموده است که با کشیدن بر روی یک سطح شیب‌دار مشخص شده است، درحالی‌که در فشار بالاتر، کرنش و حالت خرابی بسیار همگن‌تر با شکست موضعی بعد از باربرداری بوده است. در این تحقیق، مشخص شد که مکانیسم آسیب در بتن تا حد زیادی تحت تأثیر شکل سنگ‌دانه‌ها نیست. گرچه این مشاهدات مخالف یافته‌های گربوسزی [۳۷] در سال ۲۰۰۲ بوده است. دلیل اصلی این فرضیه توسط گربوسزی این است که مصالح با اشکال مختلف مشخصات مختلفی از آبی‌زد تولید می‌کنند که به‌طور مستقیم با خرابی در بتن مرتبط می‌باشد. باید تأکید کرد که در این مطالعات، تصاویر به صورت دستی پردازش شده است. معایب پردازش تصویر دستی که توسط راس [۳۸] در سال ۲۰۱۱ ذکر شده است می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

- روش دستی یک فرایند زمان‌بر است.

- نتایج متفاوتی به احتمال زیاد در زمان‌های مختلف، توسط افراد مختلف، به دست می‌آید.
- خطاهای آستانه‌ی دستی احتمالاً موجب ایجاد مشکلات بعدی در تجزیه و تحلیل تصویر می‌گردد.

در مطالعه دیگری مدل‌سازی نفوذ کلرید در بتن توسط رزمجو [۳۹] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از تصاویر سی‌تی اسکن و تحلیل اجزای محدود انجام شده است. یانگ و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۱۳ ویژگی‌های تکامل شکست سه‌بعدی در بتن را با استفاده از روش سی‌تی اشعه ایکس (ایکس - ری سی‌تی)^۱ و مدل‌سازی مزومقیاس آن مورد بررسی قرار دادند. رن و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۱۳ مدل‌سازی شکست مزومقیاس بتن را بر اساس تصاویر سی‌تی اشعه ایکس دوبعدی بررسی کردند. گجوسکی و گربوسکی [۴۲] در سال ۲۰۱۴ کالیبراسیون پارامترهای بتن را بر اساس ارتباط تصویر دیجیتال و تجزیه و تحلیل معکوس بررسی کردند. سانگ [۴۳] در سال ۲۰۱۴ تجزیه و تحلیل خودکار تنش در تصویر دوبعدی بتن را با به‌کارگیری المان‌های کوادتری^۲ در مرزهای کوچک بین فازها ارائه نموده است.

دو و همکاران [۴۴] در سال ۲۰۱۴ شبیه‌سازی سه‌بعدی اشکال سنگ‌دانه در بتن و کاربردهای آن را مورد بررسی قرار دادند. دوآرته و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۱۵ خصوصیات مکانیکی بتن لاستیکی^۳ را با استفاده از پردازش تصویر و روش اجزای محدود توسعه یافته^۴ مورد بررسی قرار دادند. نیتکا و همکاران [۴۶] در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی شکست بتن در فاز سنگ‌دانه را با استفاده از FEM و DEM^۵ بر اساس تصاویر میکروسی‌تی از ساختار داخلی آن مورد مطالعه قرار دادند. مازوکو و همکاران [۴۷] در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی مزومقیاس بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی را ارائه نمودند. هوانگ و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۱۵ مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل شکست سه‌بعدی بتن را بر اساس

^۱ X-ray CT

^۲ Quadtree

^۳ Rubberized Concrete

^۴ Extended Finite Element

^۵ Discrete Element Method

تصاویر سی تی شده با اشعه ایکس با استفاده از مدل خسارت پلاستیک بررسی کردند. باری و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۱۵ تجزیه و تحلیل عددی خزش را بر روی نمونه‌های سه‌بعدی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این مطالعه رفتار ویسکو الاستیک بتن مزومقیاس با آی تی زد به صورت آماری و عددی بررسی شده است.

هوانگ و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۶ تجزیه و تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی شکست بتن بر اساس تصاویر سی تی اسکن و شبیه‌سازی مونت کارلو را مورد مطالعه قرار دادند. گنگسا و همکاران [۵۱] در سال ۲۰۱۶ به بررسی سه‌بعدی تخلخل و اتصال منافذ مرتبط با خرابی در آی تی زد پرداختند. بر اساس آخرین مطالعات انجام‌شده، شاهد تمرکز مطالعات بر روی ارزیابی خرابی و پیشرفت ترک در نمونه‌های بتن هستیم و از طرفی به دلیل زمان‌بر بودن پردازش مدل‌های سه‌بعدی، از سائز نمونه‌های کوچک استفاده شده است.

به هر حال مدل‌سازی اجزای محدود بتن ناهمگن باید قادر به ارائه رفتار واقعی‌تری نسبت به مدل‌های همگن گردد و در حوزه تعیین مقاومت فشاری بتن مطالعات محدودی انجام شده است. از دیدگاه استفاده از روش پردازش تصویر برای تعیین مقاومت فشاری و در واقع تبدیل شدن به یک روش متداول در تعیین مقاومت فشاری برای اهداف کنترل کیفیت تقریباً هیچ مطالعه‌ای برای نمونه‌های استاندارد بتن و مقایسه آن با نمونه‌های آزمایشگاهی و بررسی نمونه‌های با هندسه و نسبت‌های آب به سیمان متفاوت انجام نشده است.

همچنین در مطالعات سه‌بعدی گذشته برای فاز سنگ‌دانه فقط یک نوع سنگ تعریف شده که از واقعیت بتن‌های کارگاهی به‌دور است. در این تحقیق مدل پیشرفته‌تر المان محدود نمونه‌های بتن با مصالح سنگی به‌شکل طبیعی و دست‌نخورده و در مقیاس مزو، بر اساس تصاویر سی تی اسکن ارائه شده است. برای اعتبارسنجی مدل‌ها، مقدار حداکثر نیروهای به‌دست آمده از تحلیل المان محدود با

مقدار نیروی به‌دست آمده در آزمایشگاه مقایسه گردیده است. مدل‌سازی و تحلیل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

فصل سوم:

آزمایش‌های تعیین

خصوصیات مکانیکی

مواد – آماده‌سازی نمونه -

ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل مصالح مورد استفاده، ساخت نمونه‌های بتن و طرح اختلاط به کار رفته در آن و همچنین آزمایش‌های لازم برای تعیین منحنی‌های تنش-کرنش و مدول الاستیسیته در آزمایشگاه ارائه شده است. نتایج آزمایشات صورت گرفته و منحنی‌های تنش-کرنش و مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد آزمایش ارائه می‌گردد.

۳-۲- مصالح مورد استفاده و ساخت نمونه‌های بتن

در این تحقیق جهت ساخت بتن از مصالح سنگ و ماسه حاصل از بچینگ^۱ معدن ده‌ملا نشان داده شده در شکل (۳-۱) واقع در شهرستان شاهرود استفاده شده است.



شکل (۳-۱) معدن ده‌ملا واقع در ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان شاهرود

سنگ‌دانه‌ها که شامل دو نوع سنگ‌دانه متفاوت (ماسه سنگ و سنگ آهک) با اشکال طبیعی و دست- نخورده می‌باشد که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

^۱ Batching

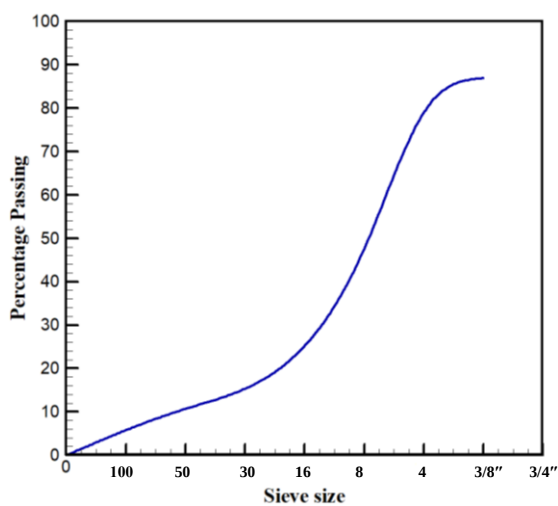


شکل (۳-۲) سنگ‌دانه‌های با شکل طبیعی و دست نخورده

ماسه مورد استفاده در ساخت ملات، برای نمونه‌های نوع اول و دوم به ترتیب عبوری از الک‌های شماره ۴ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. پس از الک نمودن مصالح، منحنی دانه‌بندی تعیین گردید که در شکل (۳-۳) (الف) نشان داده شده است. برای به دست آوردن بتن با کیفیت مناسب، همان‌طور که در شکل (۳-۳) (ب) نشان داده شده است مصالح کاملاً شسته شده و پس از آن سطح خارجی آن‌ها خشک (SSD^1) گردید.



(ب)



(الف)

¹ Saturated Surface Dry

شکل (۳-۳) (الف) منحنی دانه بندی مصالح و (ب) سنگ‌دانه‌ها و ماسه‌ی کاملاً شسته شده قبل از عمل اختلاط در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدشده توسط کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است. مشخصات سیمان در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳) جدول مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ شاهرود

CHEMICAL SPECIFICATION					
NO.	Component	Result	Factory standard	ISIRI 389	Test Method
1	SiO ₂ (%)	21.17	—	—	1692
2	Al ₂ O ₃ (%)	4.45	—	—	
3	Fe ₂ O ₃ (%)	3.94	—	—	
4	CaO(%)	63.65	—	—	
5	MgO(%)	1.56	Max 2.5	Max 5	
6	SO ₃ (%)	2.57	Max 2.9	Max 3	
7	Na ₂ O(%)	0.34	—	—	1695
8	K ₂ O(%)	0.54	—	—	
9	L.O.I(%)	2.45	Max 2.5	Max 3	1692
10	IR(%)	0.38	Max0.07	Max0.75	
11	F.CaO(%)	1.57	—	—	
12	C ₃ S(%)	55.4	—	—	
13	C ₂ S(%)	18.9	—	—	
14	C ₃ A (%)	5.1	—	—	

در جدول (۲-۳) مقادیر طرح اختلاط بتن مطابق با آیین‌نامه ACI-211-89 [۵۲] مشخص شده است.

جدول (۲-۳) طرح اختلاط بتن

مصالح	kg/m ³
شن بادامی (حداکثر ۲۰ mm)	۶۲۸/۴۴
شن نخودی (حداکثر ۱۰ mm)	۳۱۴/۲۲
ماسه	۸۹۱/۶۱
سیمان	۳۴۳/۴۴
آب	۱۲۲
نسبت آب به سیمان	۰/۳۵

در شکل (۴-۳) مصالح آماده‌شده و میکسر برای ساخت مخلوط بتن نشان داده شده است. ابتدا سنگ دانه‌ها و ماسه در میکسر نشان داده شده در شکل (۴-۳) (ب) ریخته شده و سپس سیمان و آب اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه عمل اختلاط انجام شده است. نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ و عدد اسلامپ cm ۸ فرض گردید.



(ب)



(الف)

شکل (۳-۴) (الف) مصالح مورد استفاده و (ب) میکسر

قالب‌ریزی بتن مطابق با آیین‌نامه BS [۵۳] در دو لایه به ضخامت ۵ cm و تعداد ۲۵ ضربه تمپینگ راد^۱ انجام شده است. ابعاد نمونه ۱۰۰×۱۰۰mm و حداکثر بعد سنگ‌دانه‌های به کار رفته در آن ۲۰mm است. در شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶) نمونه‌های ۲۸ روزه به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰mm نشان داده شده است.



شکل (۳-۵) نمونه ۲۸ روزه به ابعاد (۱۰۰×۱۰۰ mm)

^۱ Tamping Rod



شکل (۳-۶) نمونه‌های مکعبی ۲۸ روزه بتن سری اول، با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

به همین ترتیب نمونه‌های مکعبی سری دوم و نمونه‌های استوانه‌ای نیز با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ ساخته شد که در شکل‌های (۳-۷) و (۳-۸) نشان داده شده است.



شکل (۳-۷) نمونه‌های مکعبی بتن سری دوم به ابعاد $100 \times 100 \text{ mm}$ با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱



شکل (۳-۸) نمونه‌های استوانه‌ای بتن به ابعاد $100 \times 200 \text{ mm}$ با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱

۳-۳- ملات ماسه سیمان

در این تحقیق دو نوع ملات با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۳۱ به ترتیب برای نمونه مکعبی نوع اول و نمونه‌های سری دوم (مکعبی نوع دوم و استوانه) ساخته شده است. ساخت ملات ماسه سیمان مطابق با استاندارد ASTM C 305-06 انجام شده است [۵۴].



شکل (۳-۹) ساخت ملات مطابق با استاندارد ASTM C ۳۰۵

مطابق با طرح اختلاط نمونه بتن مکعبی نوع اول، تعداد شش نمونه ۲۸ روزه ملات به ابعاد $100 \times 200 \text{ mm}$ ساخته شده است که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. حداکثر اندازه ماسه به کار رفته در ملات زیر الک ۴ در نظر گرفته شده است.

نمونه‌ها پس از کپینگ^۱ از دو طرف و اطمینان از صاف بودن سطوح بالا و پایین آن مورد آزمایش قرار گرفته است.

^۱ Capping



شکل (۱۰-۳) نمونه‌های ملات استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}$ سری اول کپینگ شده ($w/c=0.35$)

برای نمونه‌های بتن سری دوم (مکعب دوم و استوانه)، تعداد سه نمونه ۲۸ روزه ملات استوانه‌ای به ابعاد $100 \times 200 \text{ mm}$ استفاده شده است. حداکثر اندازه ماسه به کار رفته در ملات نیز زیر الک ۲۰ در نظر گرفته شده است. سطح بالایی نمونه‌های استوانه‌ای توسط دستگاه برش کاملاً صاف شده و پس از رنگ نمودن همان‌طور که در شکل (۱۱-۳) نشان داده شده است، جهت انجام آزمایش آماده گردید.



شکل (۱۱-۳) نمونه‌های ملات استوانه‌ای سری دوم (نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۱)

۳-۴- نمونه‌های سنگ (مغزه‌گیری)

در این مطالعه برای به‌دست آوردن نمونه‌های مغزه^۱ از هر دو نوع سنگ به‌کار رفته در نمونه‌ها، قطعاتی از سنگ مادر از قسمت پایین دست معدن ده‌ملا که در شکل (۳-۱۲) و (۳-۱۳) نشان داده شده است، به آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن منتقل گردید و از هر سنگ تعداد ۵ عدد مغزه به قطر ۵۴mm تهیه گردید که در شکل‌های (۳-۱۴) و (۳-۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۲) سنگ‌های مادر استخراج شده از بستر رودخانه، انباشته‌شده در پایین دست معدن



شکل (۳-۱۳) سنگ تیره ماسه سنگ و سنگ روشن سنگ آهک



شکل (۳-۱۴) تهیه تعداد ۵ مغزه از دو نمونه سنگ مادر با استفاده از دستگاه مغزه گیر در آزمایشگاه مکانیک سنگ



شکل (۳-۱۵) مغزه‌های به دست آمده (سمت راست ماسه سنگ و سمت چپ سنگ آهک)

پس از مغزه گیری، با استفاده از دستگاه برش مختص مغزه سنگ آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه، نشان داده شده در شکل (۳-۱۶) دو سر نمونه‌ها کاملاً صاف گردید.



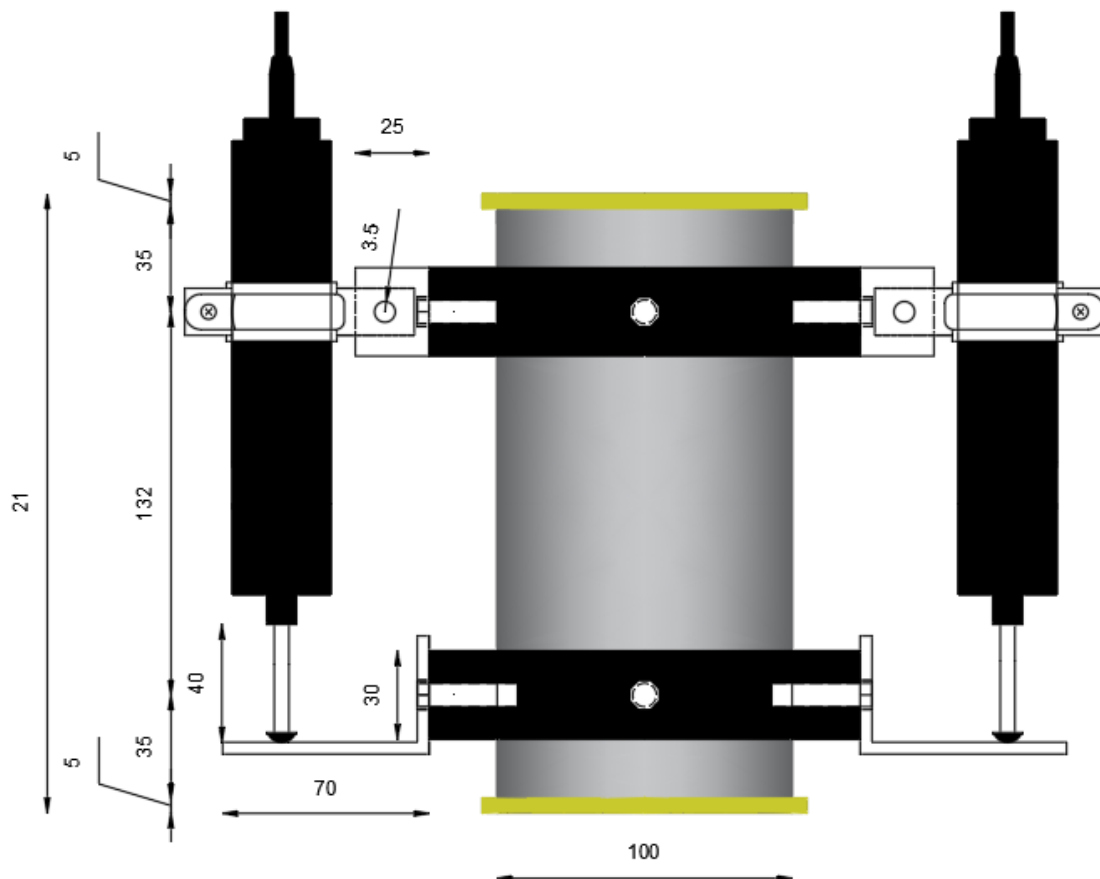
شکل (۳-۱۶) استفاده از دستگاه برش برای صاف نمودن دو سر نمونه‌های مغزه‌ی سنگ



شکل (۳-۱۷) نمونه‌های مغزه‌ی سنگ‌ها پس از برش دو سر آنها

سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه سازه دانشگاه منتقل شد تا منحنی تنش-کرنش و مدول الاستیسیته دقیق را برای آنها به دست آوریم.

۳-۵- طراحی و پیاده‌سازی استاندارد ASTM C469 جهت تعیین خصوصیات مصالح ملات
 برای تعیین منحنی تنش-کرنش و مدول الاستیسیته ملات در آزمایشگاه از استاندارد ASTM C
 ۴۶۹-۰۲ [۵۵] استفاده شده است. ستاپ^۱ LVDT و حلقه^۲ برای نمونه $100 \times 200 \text{ mm}$ همان‌طور که
 در شکل‌های (۳-۱۸) تا (۳-۲۰) مشاهده می‌گردد در آزمایشگاه طراحی و پیاده‌سازی گردید.

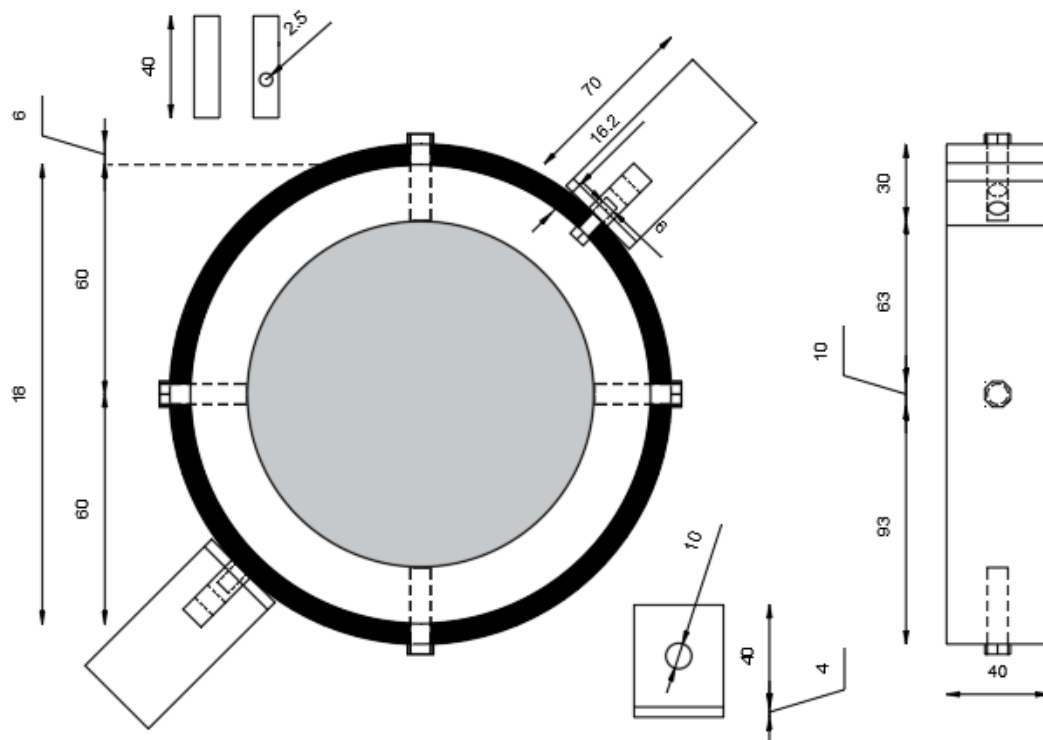


شکل (۳-۱۸) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها جهت به‌دست آوردن تغییر مکان نمونه‌های ملات $100 \times 200 \text{ mm}$ -

(بر حسب میلی‌متر)

^۱ Linear Variable Differential Transformer

^۲ Yoke



شکل (۳-۱۹) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ mm

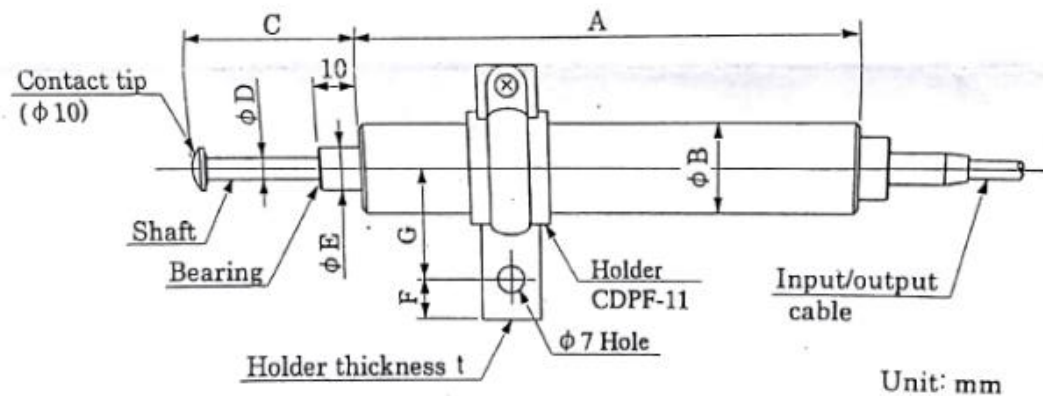


شکل (۳-۲۰) ستاپ LVDT و حلقه‌ها بر روی نمونه ملات ۱۰۰×۲۰۰ mm مطابق با استاندارد ASTM C ۴۶۹-۰۲

۳-۵-۱- مشخصات و دقت تغییر مکان سنچ یا LVDT (CDP-50)

در این مطالعه از LVDT مدل CDP50 با دقت $\pm 0.05\text{mm}$ استفاده گردید که در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است.

DIMENSIONS



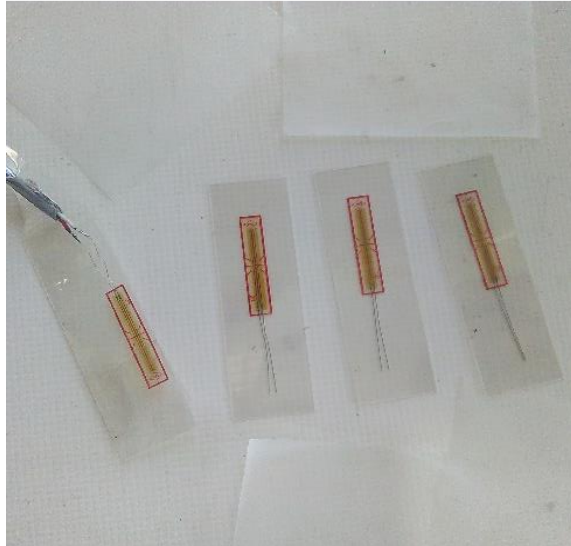
Type	A	B	C	D	E	F	G	t	Weight (g)
CDP-5	99	20.5	20	5	10	10	28	5	90
CDP-10	99	20.5	24	5	10	10	28	5	90
CDP-25	114	20.5	40	5	10	10	28	5	100
CDP-50	154	33.5	65	5	10	10	35	5	270
CDP-100	274	41	118	6	12	11	36	8	580

شکل (۳-۲۱) اندازه‌های تغییر مکان سنچ (CDP-50)

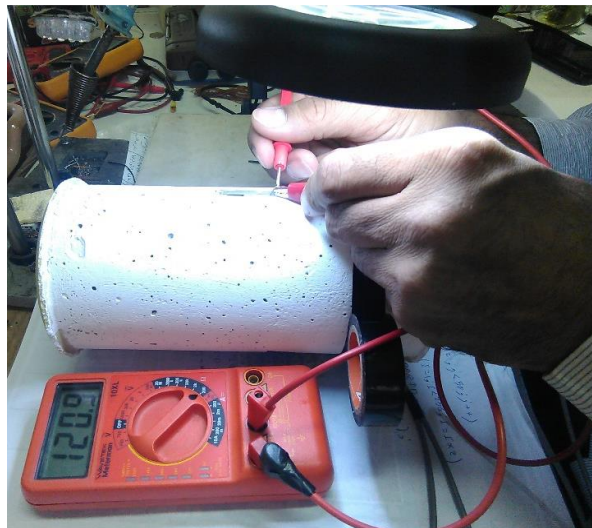
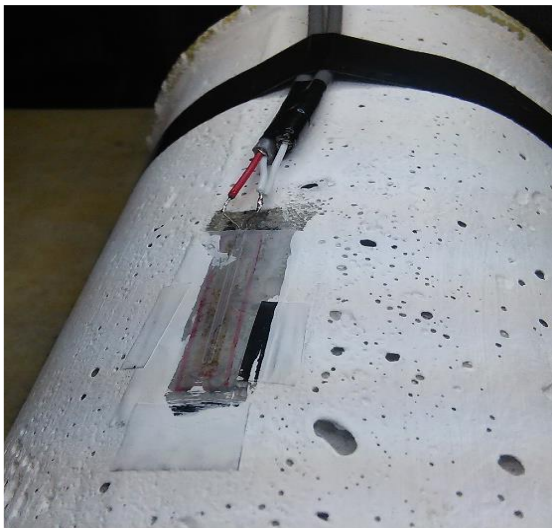


شکل (۳-۲۲) دقت تغییر مکان سنچ (CDP-50)

در این مطالعه برای تعیین کرنش دقیق ملات از کرنش سنج با مشخصه PFL-20-11 نیز استفاده شده است. مشخصات و نحوه نصب کرنش سنج‌ها بر روی نمونه‌ها در شکل‌های (۳-۲۳) و (۳-۲۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۳) کرنش سنج با مشخصه PFL-20-11 و اتصال پایه‌های آن به سیم دیتا با لحیم کاری



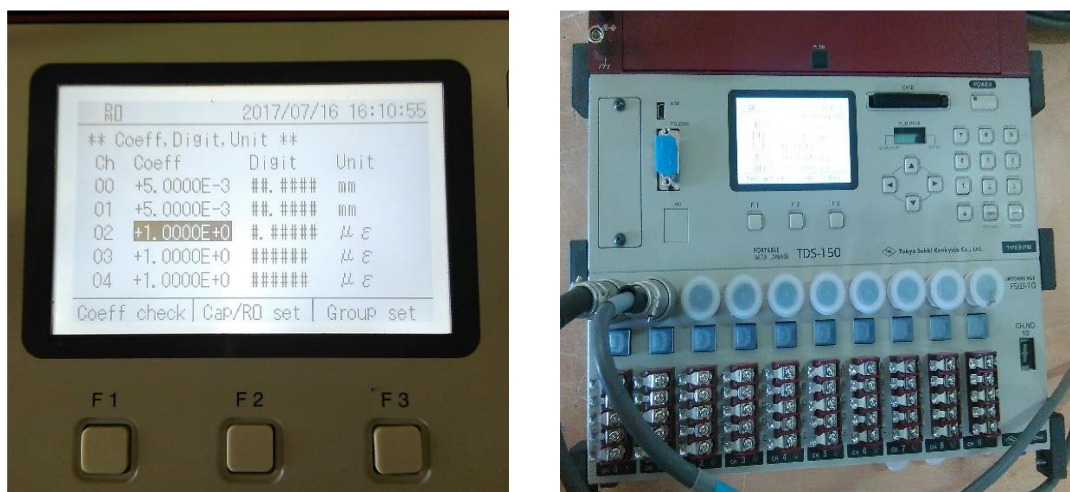
شکل (۳-۲۴) کنترل مقاومت پایه‌ها در محل اتصال به سیم دیتا برای مقاومت ۱۲۰ اهم و مهار سیم دیتا با چسب بر روی نمونه

بر روی سه تا از نمونه‌های ملات هم از LVDT و هم از کرنش سنج استفاده گردید. در شکل (۳-۲۵) استفاده همزمان از دو LVDT و دو کرنش سنج بر روی یکی از نمونه‌های ملات نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۵) نمونه ملات همراه با دو LVDT و دو کرنش‌سنج تحت فشار با دستگاه جک یونیورسال ۳۰۰ تن

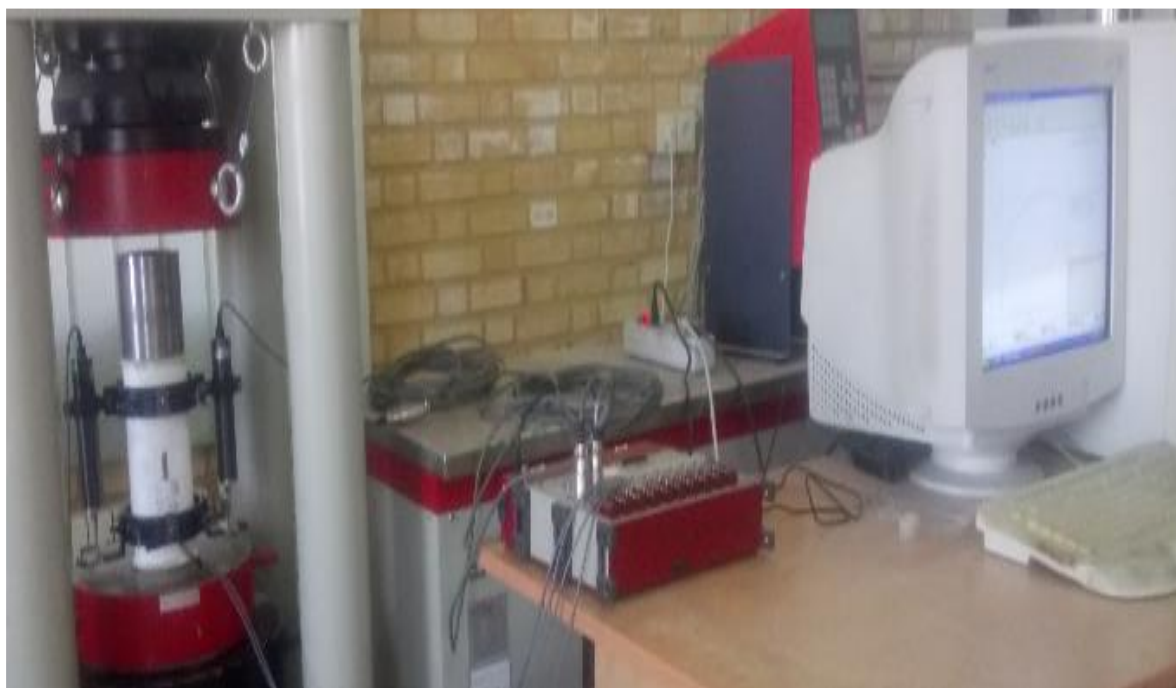
برای ثبت و ذخیره‌سازی داده‌های تغییر مکان و کرنش از دستگاه دیتا لاگر^۱ مدل TDS 150 نشان داده شده در شکل (۳-۲۶) استفاده شده است. در این دستگاه نرخ ثبت داده‌های تغییر مکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها ۱ HZ می‌باشد.



شکل (۳-۲۶) دستگاه دیتا لاگر TDS-150 در حال ثبت داده‌های تغییر مکان و کرنش

^۱ Data Logger

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس ASTM C39 [۵۶] انجام شده است. برای بارگذاری نمونه‌ها، جک هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار بصورت کنترل تغییر مکان، مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها برای نمونه‌های ملات و بتن ۱ میلی متر بر دقیقه می‌باشد. در شکل (۳-۲۷) ستاپ آزمایش مقاومت فشاری با جک هیدرولیکی و تعیین مدول الاستیسیته ملات نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۷) پیاده‌سازی ستاپ آزمایش فشاری با دستگاه دیتا لاگر و ثبت داده‌ها در کامپیوتر

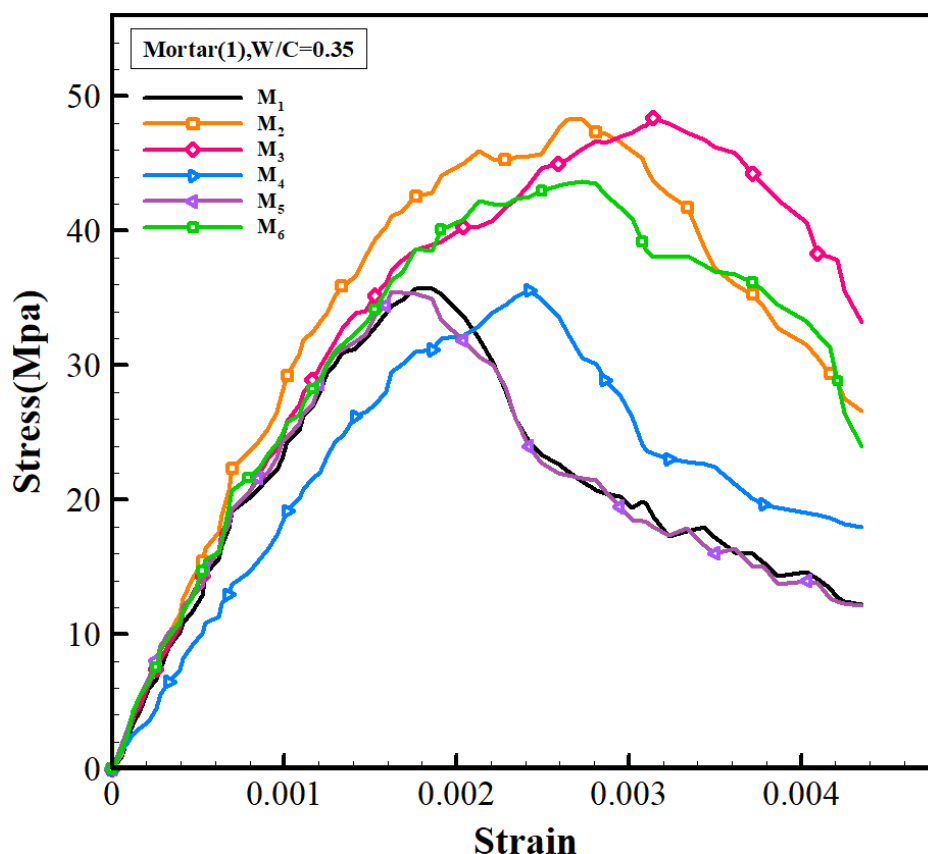
۳-۵-۲- تعیین منحنی تنش کرنش و مدول الاستیسیته ملات نوع اول ($W/C = 0/35$)

در این مطالعه از دستگاه جک هیدرولیکی تونی تکنیک با ظرفیت ۳۰۰ Ton استفاده شده است. پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری و پیاده‌سازی ستاپ ASTM بر روی شش نمونه ملات ماسه - سیمان نوع اول با استفاده از داده‌های حاصل، منحنی‌های تنش-کرنش به‌دست آمده است.

در شکل (۳-۲۸) یک نمونه ملات پس از شکست نشان داده شده است. داده‌های ثبت شده در کامپیوتر و دیتا لاگر برای نمونه‌های ملات نوع اول (M_1 تا M_6) با نسبت آب به سیمان $0/35$ در جداول پیوست ۱ آورده شده است. همچنین در شکل (۳-۲۹) منحنی‌های تنش - کرنش به‌دست آمده از آزمایش نشان داده شده است. در این مطالعه داده‌های به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها منطقی تر بوده و از آن‌ها برای تعیین منحنی تنش - کرنش و مدول الاستیسیته استفاده شد و از داده‌های به‌دست آمده از کرنش‌سنج‌ها استفاده نگردید. منحنی تنش - کرنش به دست آمده از کرنش سنج‌ها در پیوست ۱ آورده شده است.



شکل (۳-۲۸) نمونه ملات ماسه سیمان شکسته شده با دستگاه جک یونیورسال ۳۰۰ تن



شکل (۳-۲۹) منحنی تنش-کرنش ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

با توجه به تعریف مدول سکانتی مطابق با ASTM C469، در واقع فرمول (۳-۱) شیب خط بین دو نقطه متناظر با تنش‌های S_1 و S_2 که مدول الاستیسیته بتن و یا همان مدول سکانتی منحنی تنش - کرنش می‌باشد را محاسبه می‌کند.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.00005)} \quad (۳-۱)$$

بعد از اینکه نمونه‌ها داخل حلقه قرار گرفت، بارگذاری آغاز گردیده و در حین افزایش میزان بار، بار اعمالی و کرنش طولی در دو حالت زیر قرائت می‌گردد :

الف) موقعی که کرنش به مقدار ۰/۰۰۰۰۵۰ برسد ($\epsilon_1 = ۰/۰۰۰۰۵۰$)

ب) موقعی که بار به ۴۰ درصد بار نهایی برسد (ϵ_2)

یاد آور می گردد تنش از نسبت بار نهایی به سطح مقطع و کرنش از نسبت مقدار تغییر شکل بر طول مؤثر آزمایش به دست می آید.

$$E = \text{مدول الاستیسیته}$$

$$S_2 = \text{تنش متناظر با } 40 \text{ درصد بار نهایی}$$

$$S_1 = \text{تنش متناظر با کرنش طولی } \epsilon_1 = 0.000050$$

$$\epsilon_2 = \text{کرنش متناظر با تنش } S_2$$

با توجه به فرمول (۳-۱) مدول الاستیسیته ملات نوع اول M_2 به صورت زیر به دست آمده است :

$$E = \frac{(18.92 - 1.048790527)}{(0.00056419 - 0.00005)} = 34756 \text{ (MPa)}$$

مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم به دست آمده و میانگین آن ها برای نمونه های ملات نوع اول در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول (۳-۳) مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه های ملات نوع اول ($w/c = 0.35$)

نمونه	$E \text{ (MPa)}$	$f'_c \text{ (MPa)}$
M_1	۲۳۲۷۲	۳۵/۷۴
M_2	۳۴۷۵۶	۴۸/۲۸
M_3	۲۳۲۵۶	۴۸/۳۶
M_4	۱۸۰۶۵	۳۵/۵۷
M_5	۲۵۲۴۸	۳۵/۵
M_6	۲۶۶۶۳	۴۳/۶۲
Average	۲۵۲۱۰	۴۱/۱۷

در این مطالعه برای مدل‌سازی فاز ملات نمونه بتنی نوع اول در نرم افزار آباکوس از منحنی رفتاری و مدول الاستیسیته نمونه M_2 استفاده شده است.

۳-۵-۳- تعیین منحنی تنش کرنش و مدول الاستیسیته ملات نوع دوم ($W/C = 0/31$)

همانند حالت قبل آزمایش بر روی سه نمونه ملات با نسبت آب به سیمان $0/31$ انجام شد. در شکل (۳-۳۰) نمونه ملات M_3 پس از شکست نشان داده شده است. داده های به دست آمده از ستاپ آزمایش در جداول پیوست ۲ و منحنی‌های تنش - کرنش به دست آمده از آزمایش در شکل (۳-۳۱) نشان داده شده است.

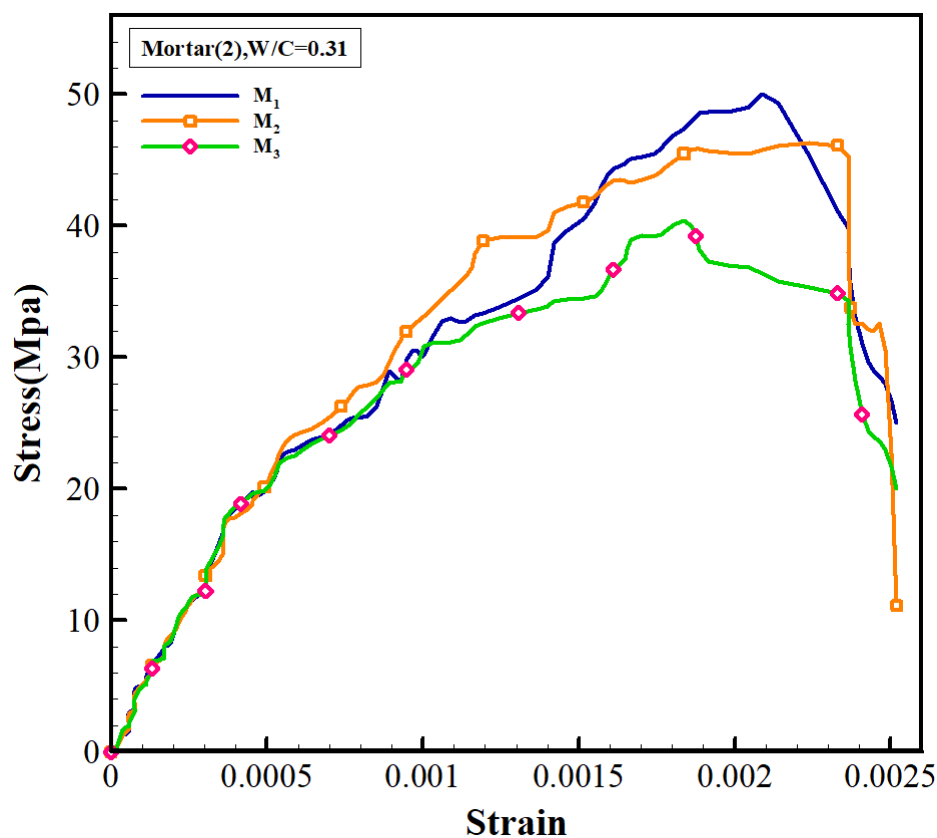


شکل (۳-۳۰) آزمایش فشاری جهت تعیین منحنی تنش - کرنش و مدول الاستیسیته برای ملات نوع دوم

با توجه به فرمول (۳-۱) مدول الاستیسیته ملات نوع دوم M_1 به صورت زیر به دست آمده است :

$$E = \frac{(19.7783 - 1.348341071)}{(0.000455 - 0.000050)} = 45506 \text{ (MPa)}$$

مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم به دست آمده برای نمونه‌های ملات نوع دوم در جدول (۳-۴) آورده شده است.



شکل (۳-۳) منحنی تنش - کرنش ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱

جدول (۴-۳) مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های ملات نوع دوم ($w/c = 0.31$)

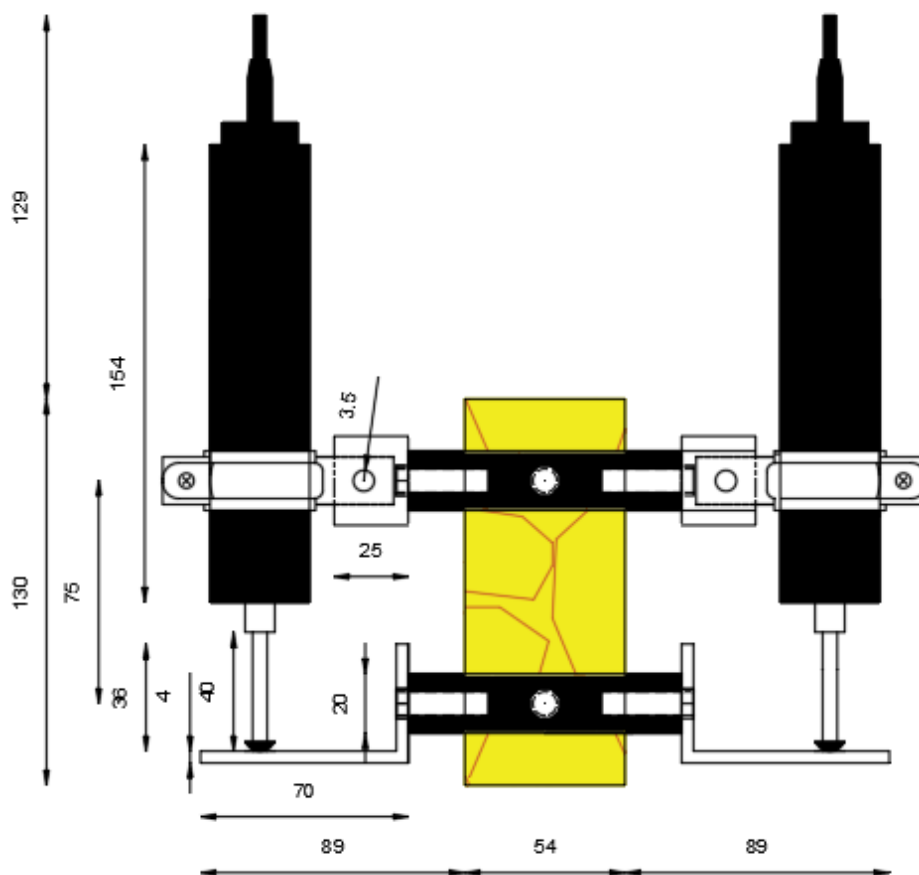
نمونه	$E (MPa)$	$f'_c (MPa)$
M ₁	۴۵۵۰۶	۴۹/۳۲
M ₂	۴۵۱۶۴	۴۶/۱۲
M ₃	۴۶۲۴۹	۴۰/۳۸
Average	۴۵۶۳۹	۴۵/۲۷

لازم به ذکر است که در این مطالعه برای مدل‌سازی فاز ملات نمونه بتنی نوع دوم و نمونه‌های بتن

استوانه‌ای در نرم افزار آباکوس از منحنی رفتاری و مدول الاستیسیته نمونه M₁ استفاده شده است.

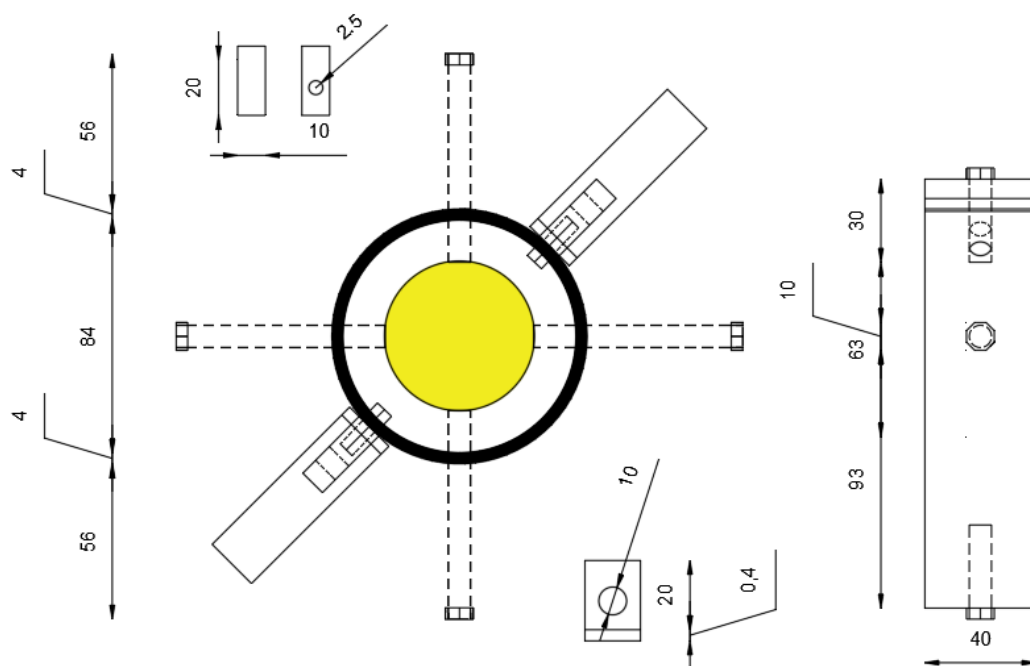
۳-۶- پیاده‌سازی استاندارد ASTM C469 جهت تعیین مدول الاستیسیته مصالح سنگی

برای تعیین مدول الاستیسیته مغزه‌ها نیز متناسب با ستاپ ASTM حلقه‌های مورد نیاز همان‌طور که در شکل‌های (۳-۳۲) تا (۳-۳۴) نشان داده شده است، طراحی و LVDT ها بر روی آن‌ها نصب گردید. فاصله‌ی مرکز تا مرکز حلقه‌ها ۷۵mm در نظر گرفته شده است.

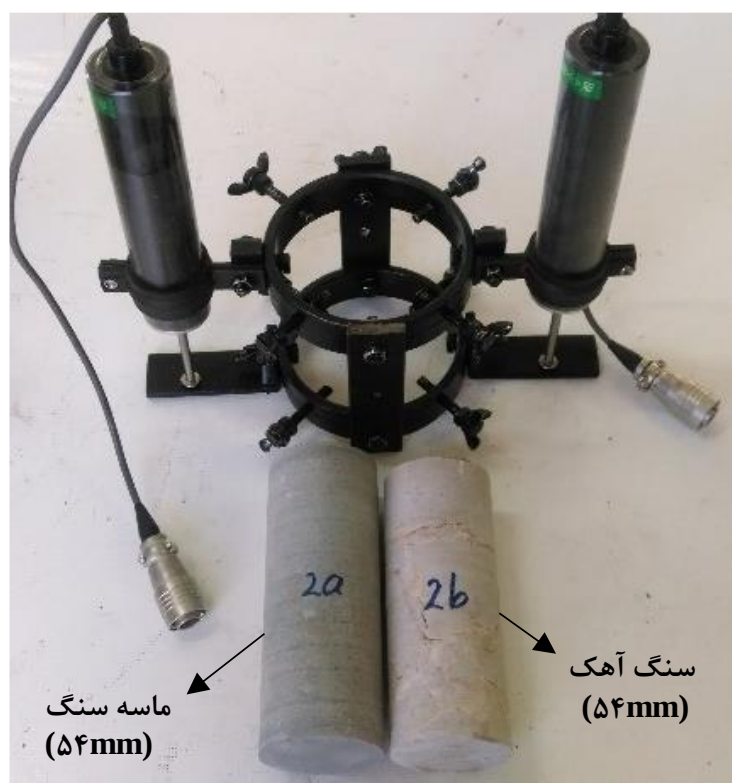


شکل (۳-۳۲) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها جهت به‌دست آوردن تغییر مکان نمونه‌های مغزه سنگ به قطر ۵۴mm

(بر حسب میلی‌متر)



شکل (۳-۳) ابعاد ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای نمونه‌های مغزه سنگ به قطر ۵۴mm



شکل (۳-۴) ستاپ LVDT و حلقه‌ها برای مغزه به قطر ۵۴mm مطابق با استاندارد ASTM

۳-۶-۱- تعیین منحنی تنش کرنش و مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها

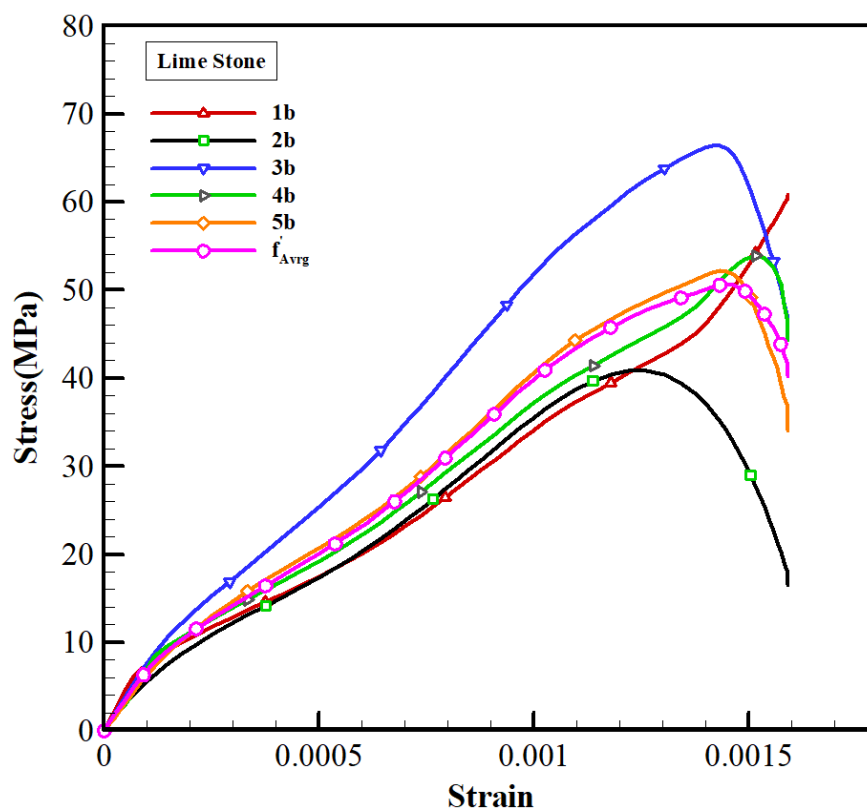
همان‌طور که در شکل‌های (۳-۳۵) و (۳-۳۶) نشان داده شده است، آزمایش مشابه بر روی دو نوع نمونه مغزه سنگ (از جنس سنگدانه‌ها) صورت پذیرفت. داده‌های به‌دست آمده از ستاپ آزمایش در جداول پیوست ۳ درج شده است. با استفاده از داده‌های حاصل، منحنی‌های تنش - کرنش و میانگین آن‌ها ترسیم گردید. در این مطالعه برای تعریف خصوصیات مصالح سنگدانه‌ها از منحنی رفتاری میانگین نمونه‌ها استفاده شده است که در شکل (۳-۳۷) و (۳-۳۸) نشان داده شده است.



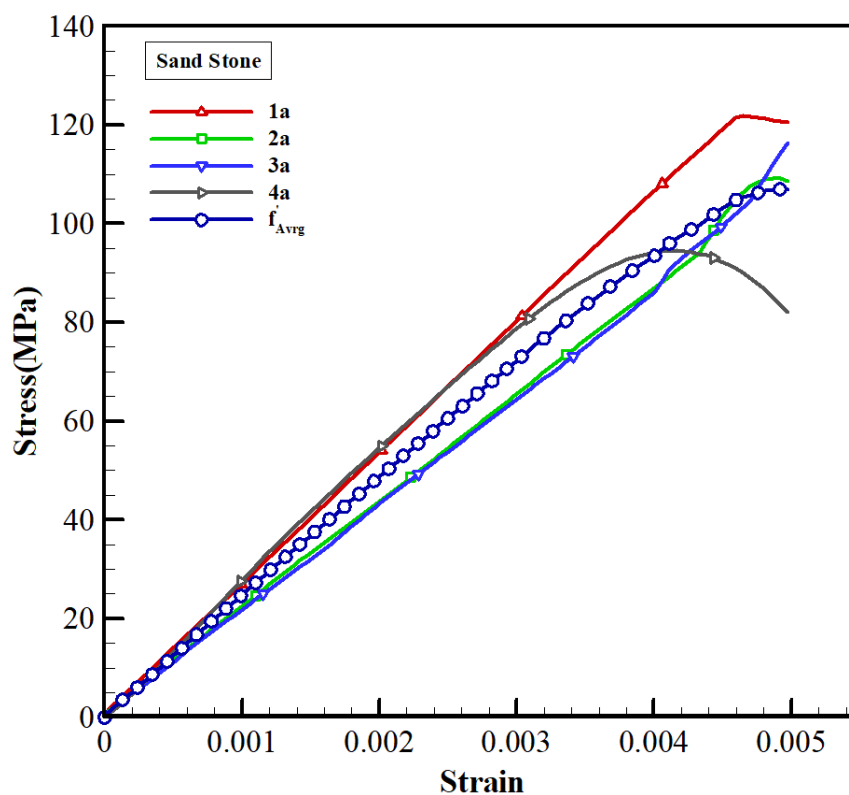
شکل (۳-۳۵) نمونه مغزه سنگ آهک (1b) پس از شکست تحت فشار



شکل (۳-۳۶) نمونه مغزه ماسه سنگ (4a) تحت آزمایش فشاری با جک یونیورسال و ستاپ ASTM



شکل (۳-۳۷) منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های سنگ آهک



شکل (۳-۳۸) منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های ماسه سنگ

مقادیر مدول الاستیسیته به دست آمده برای نمونه‌های مغزه سنگ آهک و همچنین میانگین آن‌ها در جدول (۵-۳) آورده شده است. نحوه تعیین مدول الاستیسیته نمونه سنگ آهک 1b با استفاده از فرمول (۱-۳) به صورت زیر می‌باشد؛

$$E = \frac{(24.42677 - 4.838364444)}{(0.000736575 - 0.000050)} = 28530 \text{ (MPa)}$$

جدول (۵-۳) مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های مغزه سنگ آهک

نمونه	$E \text{ (MPa)}$	$f'_c \text{ (MPa)}$
1b	۲۸۵۳۰	۶۰/۸۸
2b	۳۲۱۴۸	۴۰/۸۵
3b	۴۷۰۱۳	۶۶/۴۲
4b	۳۵۱۴۷	۵۳/۹
5b	۳۸۹۰۶	۵۲/۱۸
Average	۳۶۳۴۹	۵۴/۸

مقادیر مدول الاستیسیته به دست آمده برای نمونه‌های مغزه ماسه سنگ و همچنین میانگین آن‌ها در جدول (۶-۳) آورده شده است.

جدول (۶-۳) مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌های مغزه ماسه سنگ

نمونه	$E \text{ (MPa)}$	$f'_c \text{ (MPa)}$
1a	۲۶۵۵۹	۱۲۱/۸۳
2a	۲۱۶۵۱	۱۰۹/۲۵
3a	۲۱۵۱۰	۱۱۶/۳۸
4a	۲۷۹۶۹	۹۴/۵
Average	۲۴۴۲۲	۱۱۰/۵

نحوه تعیین مدول الاستیسیته نمونه سنگ آهک 4a با استفاده از فرمول (۱-۳) به صورت زیر می‌باشد؛

$$E = \frac{(38.13 - 1.238202667)}{(0.001369 - 0.000050)} = 27969 \text{ (MPa)}$$

مقاومت کششی مصالح ملات و سنگ نیز مطابق راهنمای نرم افزار آباکوس نسخه ۲-۶/۱۴، ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن در نظر گرفته شد. نسبت پواسون در هر دو فاز سنگ دانه و ملات ۰/۲ فرض شد. مقادیر میانگین خصوصیات مصالح به دست آمده در آزمایشگاه در جدول (۷-۳) نشان داده شده است.

جدول (۷-۳) میانگین خصوصیات مصالح به دست آمده از آزمایشگاه

نمونه	چگالی (Ton/mm ³)	مدول الاستیسیته (MPa×۱۰۰۰)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی ۱۰ درصد مقاومت فشاری (MPa)
ملات ماسه سیمان نوع اول (W/C=۰/۳۵)	۲/۴×۱۰ ^{-۹}	۲۵۲۱۰	۴۱/۱۷	۴/۱۱
ملات ماسه سیمان نوع دوم (W/C=۰/۳۱)	۲/۳۶×۱۰ ^{-۹}	۴۵۶۳۹	۴۵/۲۷	۴/۵۲
سنگ آهک	۲/۵۸×۱۰ ^{-۹}	۳۶۳۴۹	۵۴/۸	۵/۴۸
ماسه سنگ	۲/۶۵×۱۰ ^{-۹}	۲۴۴۲۲	۱۱۰/۵	۱۱/۰۵

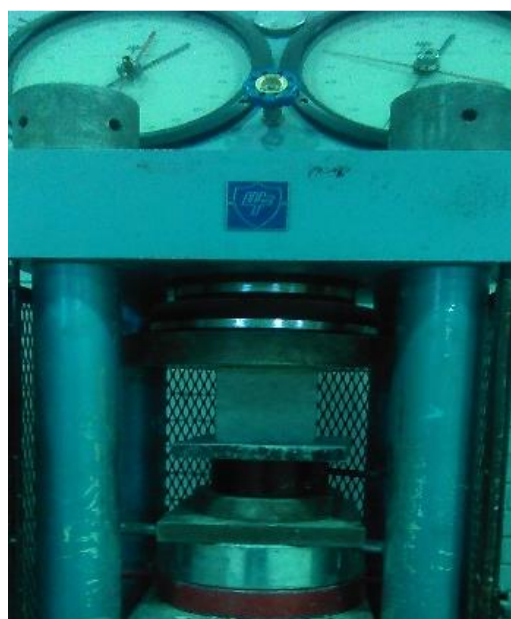
۷-۳- نتایج حاصل از نمونه‌های بتن مورد آزمایش

۱-۷-۳- نمونه‌های مکعبی نوع اول

در این مطالعه ۱۰ نمونه مکعبی از نوع اول با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ ساخته شد که آزمایش فشاری برای ۶ عدد از آن‌ها با دستگاه جک ۲۰۰ تن نشان داده شده در شکل (۳-۳۹) موجود در آزمایشگاه تکنولوژی بتن انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه سی‌تی اسکن شده نوع اول نیز با جک ۲۰۰ تن شکسته شد که عدد ۵۰۰ kN برای آن به دست آمد که در شکل (۳-۴۰) نشان داده شده است. نتایج حداکثر نیروی به‌دست آمده از ۶ نمونه شکسته شده با جک ۲۰۰ تن در جدول (۳-۸) درج شده است.



(ب)

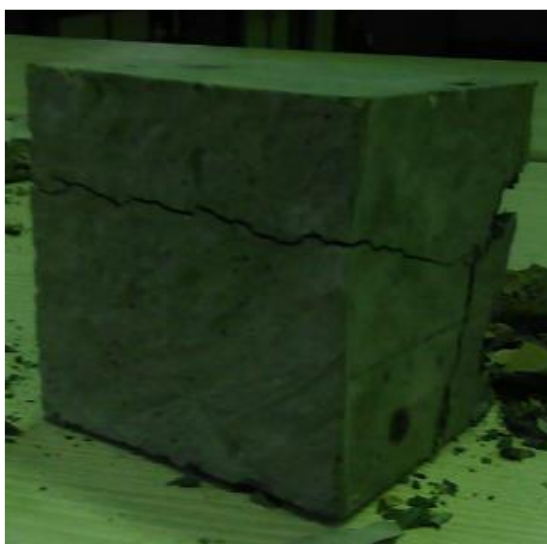


(الف)

شکل (۳-۳۹) - (الف) نمونه قبل از بارگذاری و (ب) نمونه پس از بارگذاری



شکل (۳-۴) نیروی به دست آمده از نمونه تحت فشار (۵۰۰ kN)



شکل (۳-۴۱) (الف) نمونه شکسته شده تحت نیروی فشاری محوری در جهت y

جدول (۳-۸) نیروهای به دست آمده از آزمایش فشاری برای ۶ نمونه مکعبی نوع اول

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶ (سی تی شده)
نیرو (kN)	۵۱۵	۵۱۶	۵۳۰	۵۹۰	۵۲۰	۵۰۰

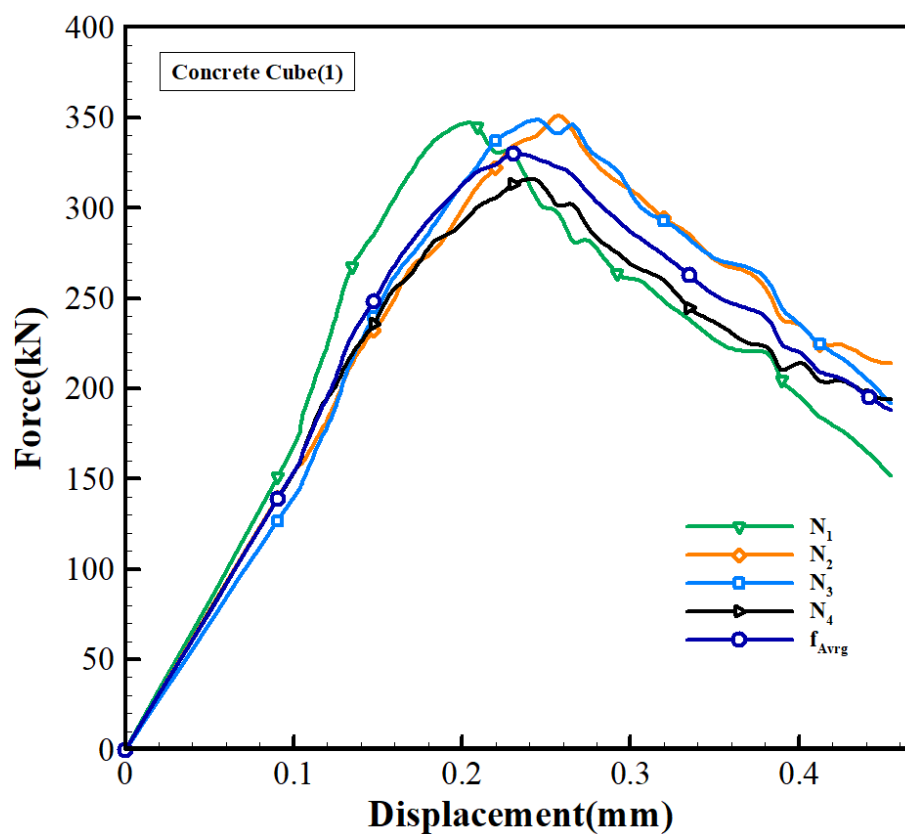
برای به دست آوردن منحنی‌های تنش- کرنش بتن نوع اول و مقایسه نتایج آن با مدل عددی تعداد ۴ نمونه دیگر با دستگاه جک هیدرولیکی ۳۰۰ تن آزمایش گردید. منحنی‌های به دست آمده از این ۴ نمونه در شکل (۴۴-۳) نشان داده شده است.



شکل (۴۲-۳) شکست نمونه مکعبی نوع اول زیر جک یونیورسال ۳۰۰ تن



شکل (۴۳-۳) نمونه‌های مکعبی نوع اول با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ پس از شکست



شکل (۳-۴۴) منحنی نیرو - جابجایی نمونه‌های بتن مکعبی نوع اول

مقادیر نیرو و مقاومت فشاری تعداد ۴ نمونه دیگر از مکعبی نوع اول به ابعاد $100 \times 100 \text{ mm}^2$ در جدول (۳-۹) آورده شده است.

جدول (۳-۹) نیروها و مقاومت‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه مکعبی بتن نوع اول

نمونه	۱	۲	۳	۴	میانگین
نیرو (kN)	۳۴۴/۸۵	۳۵۱/۱۸	۳۴۸/۶۵	۳۱۴/۴۲	۳۳۹/۷۷
مقاومت فشاری (MPa)	۳۴/۴۸	۳۵/۱۱	۳۴/۸۶	۳۱/۴۴	۳۳/۹۷

۳-۷-۲- نمونه مکعبی نوع دوم

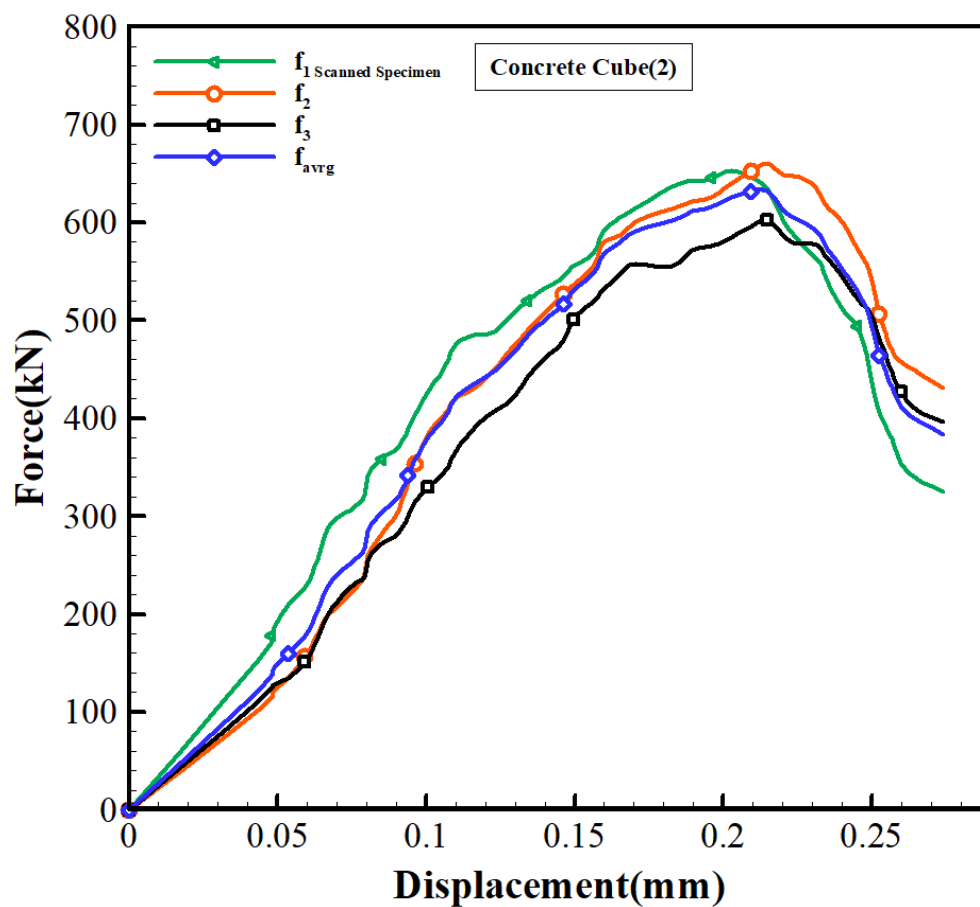
در شکل‌های (۳-۴۵) تا (۳-۴۷) نتایج به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای نمونه مکعبی نوع دوم نشان داده شده است.



شکل (۳-۴۵) شکست نمونه مکعبی (سی تی اسکن شده) با جک یونیورسال ۳۰۰ تن



شکل (۳-۴۶) نمایی از پیشرفت ترک در یک وجه نمونه مکعبی نوع دوم (اسکن شده)



شکل (۳-۴۷) منحنی نیرو - جابجایی نمونه‌های بتن مکعبی نوع دوم با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱

مقادیر نیرو و مقاومت فشاری به‌دست آمده برای نمونه بتن مکعبی نوع دوم به ابعاد $100 \times 100 \text{ mm}^2$ در جدول (۳-۱۰) آورده شده است.

جدول (۳-۱۰) نیروها و مقاومت‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه مکعبی بتن نوع دوم

نمونه	۱	۲	۳	میانگین
نیرو (kN)	۶۵۳	۶۶۰/۲۵	۶۰۲/۴	۶۳۸/۵۵
مقاومت فشاری (MPa)	۶۵/۳	۶۶	۶۰/۲	۶۳/۸۵

۳-۷-۳- نمونه استوانه‌ای

همان‌طور که در شکل‌های (۳-۴۸) و (۳-۴۹) مشاهده می‌گردد. آزمایش مقاومت فشاری جهت تعیین منحنی تنش - کرنش برای نمونه استوانه‌ای مطابق با ستاپ ASTM پیاده‌سازی گردید. منحنی‌های نیرو - جابجایی و تنش - کرنش دقیق به دست آمده در شکل‌های (۳-۵۰) و (۳-۵۱) نشان داده شده است.

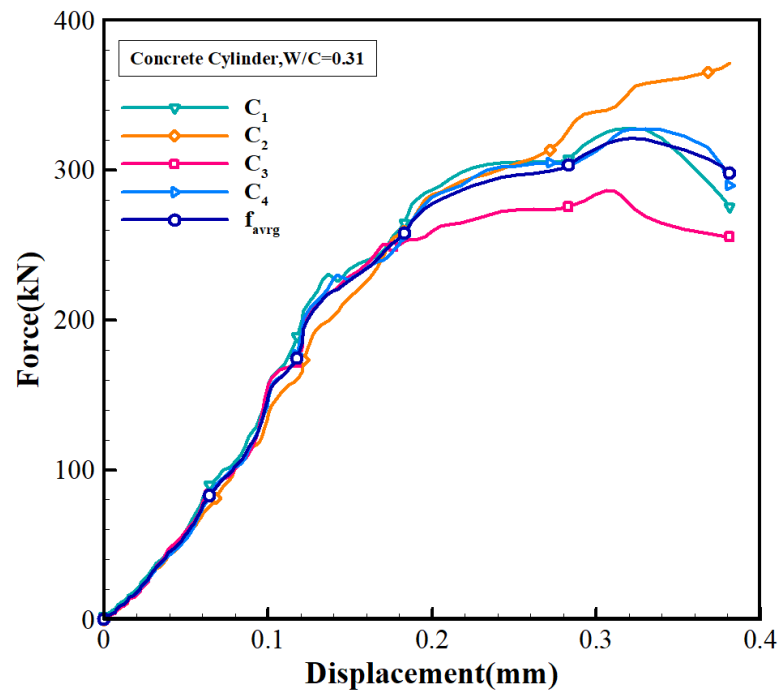


شکل (۳-۴۸) نمونه بتن استوانه‌ای به ابعاد 100×200 mm تحت آزمایش فشاری جهت تعیین منحنی تنش - کرنش و مدول الاستیسیته دقیق بتن

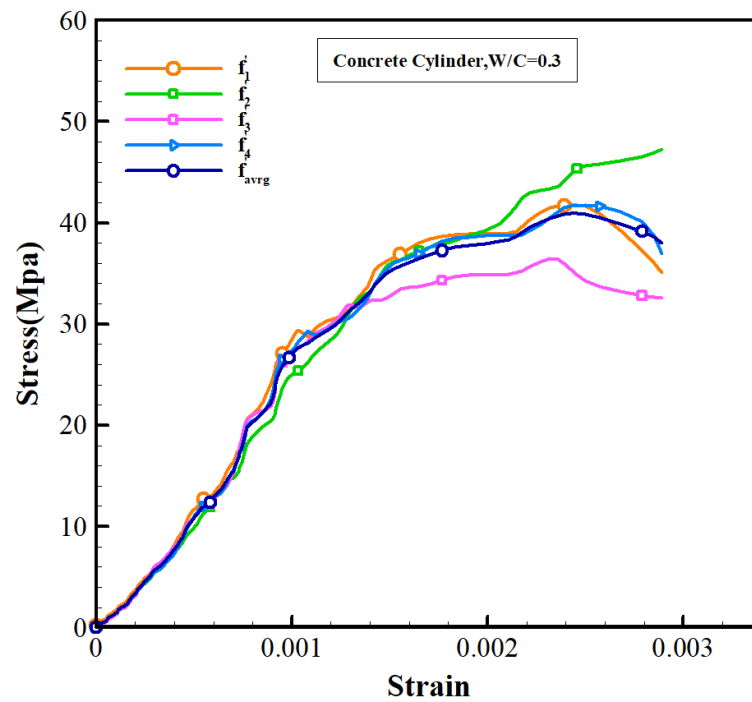


شکل (۳-۴۹) نمونه استوانه‌ای C1 (اسکن شده) پس از شکست با جک یونیورسال ۳۰۰ تن

داده‌های به‌دست آمده از آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن در جدول پیوست ۵ درج شده است.



شکل (۳-۵) منحنی نیرو - جابجایی نمونه بتن استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}^2$



شکل (۳-۵۱) منحنی تنش - کرنش نمونه بتن استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}^2$

مقادیر نیرو و مقاومت فشاری به دست آمده برای نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد $100 \times 200 \text{ mm}^2$ در جدول (۱۱-۳) آورده شده است.

جدول (۱۱-۳) نیروها و مقاومت‌های به دست آمده از آزمایش فشاری برای ۴ نمونه استوانه‌ای بتن

نمونه	۱	۲	۳	۴	میانگین
نیرو (kN)	۳۲۷/۵۵	۳۷۱/۲۵	۲۸۶/۶۱	۳۲۶/۹۳	۳۲۸
مقاومت فشاری (MPa)	۴۱/۷۲	۴۷/۳	۳۶/۵۱	۴۱/۶۴	۴۱/۸

فصل چهارم :

پردازش تصویر

۴-۱- مقدمه

در این فصل به تصاویر و عکس‌ها و مفاهیم پایه در پردازش تصویر دیجیتال، علوم مرتبط با علم پردازش تصویر، تعریف توموگرافی محاسباتی (سی‌تی) - اسکن پرداخته شده است.

۴-۲- تصاویر و عکس‌ها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد انسان موجودی است که با دستگاه بینایی‌اش شناخته می‌شود. ما با تکیه بر قدرت بینایی خود، جهان اطراف خود را احساس می‌کنیم. همچنین می‌دانیم که ما تنها اشیاء را برای شناسایی و طبقه‌بندی آن‌ها نگاه نمی‌کنیم، بلکه می‌توانیم اختلاف بین اشیاء را درک کرده و یک حس کلی را در مورد ناهمواری اشیاء با نگاه چشمی سریع به‌دست آوریم. مهارت‌های بینایی بسیار با ارزشی در انسان وجود دارد؛ مثلاً در یک لحظه می‌توانیم یک چهره را تشخیص دهیم؛ اختلاف بین رنگ‌های مختلف را بفهمیم و همچنین می‌توانیم مقادیر بزرگی از اطلاعات بصری را سریع پردازش کنیم.

توجه داریم که جهان در یک حرکت ثابت است. در برخی حالات از خیره شدن به یک شیء پس از مدتی می‌توان به حرکت کردن آن پی برد. حتی سازه‌های عظیم نظیر ساختمان‌ها و کوه‌ها بسته به ساعات روز (روز یا شب) مقدار نور آفتاب (ابری یا آفتابی) و یا سایه‌های مختلفی که از آن‌ها تولید می‌شود در ظاهر خود دچار تغییر می‌شوند.

ما در این تحقیق با تک تصاویر دوبعدی سروکار خواهیم داشت که با برهم‌نهی آن‌ها به تصاویر سه‌بعدی تبدیل می‌گردد. تصاویر موردنظر ما تصاویر لایه به لایه از بتن است که دارای نمایه‌ای از ریز-ساختار بتن است و یک تصویربرداری از نوع پزشکی است.

۳-۴- مفاهیم پایه در پردازش تصویر دیجیتال

پردازش تصاویر به شکل زیر درگیر تغییر ماهیت یک تصویر است:

۱- بهبود اطلاعات تصویری برای تفسیر بصری

۲- ارائه یک تصویر با جزئیات مناسب برای تعبیر توسط ماشین‌های خودکار (نظیر کامپیوتر)

لازم است بدانیم که دو مورد فوق دو هدف مجزا را در پیش می‌گیرند، اما از درجه اهمیت برابری در پردازش رویه‌ای برخوردارند. این را نیز باید توجه داشت، بهبود بصری تصویر که در مورد اول قابل دستیابی است؛ ممکن است بدترین شیوه برای برآوردن خواسته‌ی دوم ما باشد. تصویری برای انسان جالب‌تر و مناسب‌تر است که دارای لبه‌های تیز بوده، واضح و دارای جزئیات بیشتر می‌باشد. درحالی‌که ماشین تصویری را ترجیح می‌دهد که ساده‌تر و با جزئیات کمتری باشد.

مثال‌هایی از مورد اول شامل موارد زیر است:

بارزسازی لبه، حذف نویز از تصویر، از بین بردن تاری تصویر، یافتن لبه‌های تصویر، حذف جزئیات یک تصویر

۴-۴- تصویر رقومی

فرض کنید تصویری تهیه کرده‌ایم که به آن عکس^۱ گفته می‌شود، با فرض سیاه و سفید بودن تصویر (یعنی تعداد زیادی سایه‌های خاکستری) و فارغ از رنگ، می‌توان این تصویر را یک تابع دوبعدی در نظر گرفت که مقدار تابع در هر نقطه روشنایی تصویر را بیان می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۴-۱) می‌بینیم، می‌پذیریم که در چنین تصویری مقادیر روشنایی، دارای مقادیر حقیقی در فاصله‌ی (صفر) سیاه و (یک) سفید هستند. بازه‌های مربوط به x و y کاملاً به تصویر وابسته‌اند و تنها می‌توانند مقادیر حقیقی بین مینیمم و ماکسیمم معین شده را داشته باشند.

^۱ Image



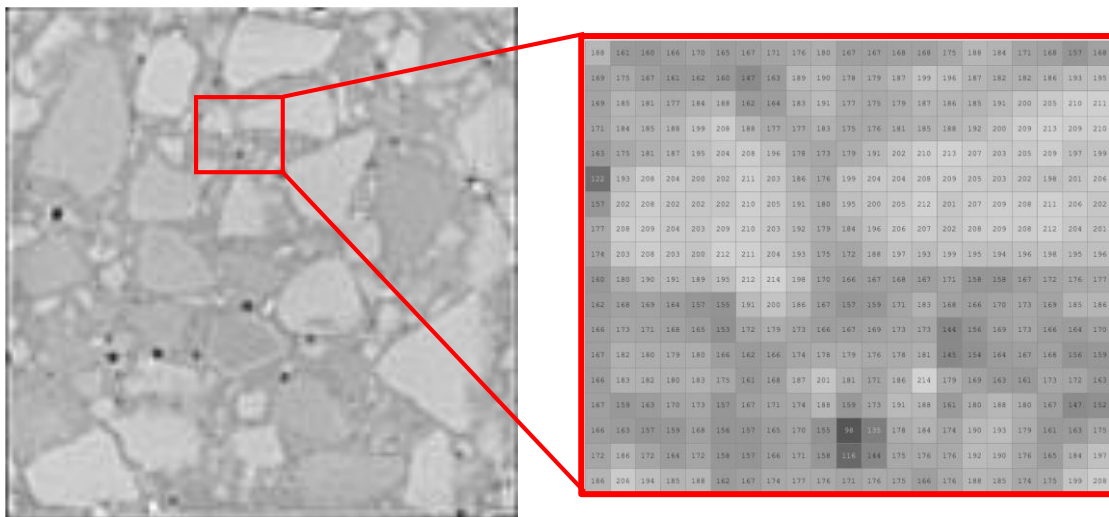
شکل (۴-۱) تصویر به عنوان یک تابع

تصاویر توسط انواع دستگاه‌های فیزیکی، از جمله دوربین‌های فیلم‌برداری، اسکنرها، دستگاه‌های اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی، رادار و سونوگرافی تولید می‌گردد که می‌توان از آن‌ها برای انواع اهداف از جمله: سرگرمی، تصویربرداری پزشکی، کسب و کار و صنعت، نظامی، مدنی، امنیتی و تحلیلی علمی استفاده نمود. شکل (۴-۲).



شکل (۴-۲) علوم مرتبط با پردازش تصویر

پردازش تصویر دیجیتال، تجزیه و تحلیل مبتنی بر کامپیوتر و اصلاح تصاویر دیجیتال برای استخراج اطلاعات موردنظر است. دیجیتالی شدن تصویر فرایندی است که فرم تصویری را به داده‌های عددی تبدیل می‌نماید. همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است، یک تصویر دیجیتال مجموعه‌ای از اعداد است که نشان دهنده‌ی تصویری دوبعدی است که هم در مختصات فضایی و هم در شدت روشنایی گسسته شده است. تصویر به مناطق کوچک به نام عناصر تصویر، یا همان پیکسل^۱ تقسیم می‌شود.



شکل (۳-۴) یک برش تصویر بتن همراه با شماره پیکسل‌های نشان‌دهنده آن

۴-۵- توموگرافی محاسباتی (سی‌تی)-اسکن

کلمه "توموگرافی" از تاموس^۲ (برش) یونانی و گرافین^۳ (برای نوشتن) مشتق شده است. هدف از سی‌تی به‌دست آوردن یک تصویر سه‌بعدی از داخل یک شیء است که از برهم‌نهی^۴ یک سری تصویر دوبعدی گرفته شده از طول شیء حاصل شده است. روش سی‌تی توسط یک مهندس انگلیسی به‌نام سر گادفری هاندسفیلد و دکتر آلن کورماک در اوایل سال ۱۹۷۰ گسترش داده شد. (رانگیان ۲۰۰۵)

[۵۷]. سی‌تی اسکن، به ما اجازه می‌دهد داخل یک بدن را بدون آسیب وارد نمودن به آن نگاه کنیم.

^۱ Pixel

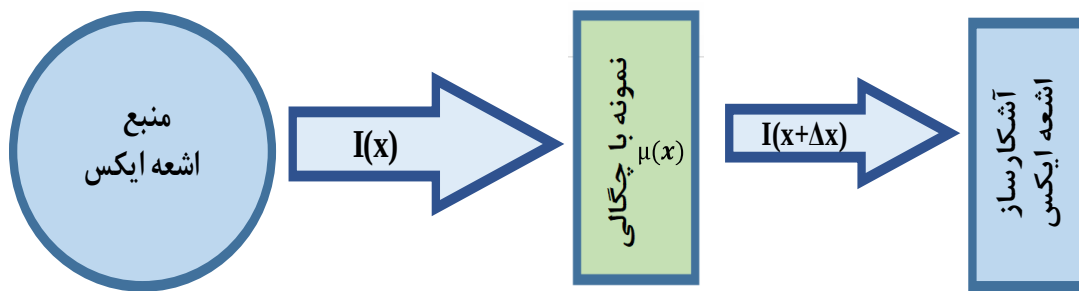
^۲ Tomos (Slice)

^۳ Graphin (to Write)

^۴ Stacking

پیشرفت فناوری کامپیوتر، سی تی اسکنرها را به طور چشم گیری بهبود داده است. این پیشرفت ها منجر به تصویربرداری سریع تر و دستیابی به تصاویر با وضوح بالاتر می گردد. کامپیوترها به اجزای جدایی ناپذیر دستگاه های تصویربرداری مدرن تبدیل شده و در حال انجام انواع وظایف از اکتساب داده ها می باشند و تولید تصویر برای نشان دادن و تجزیه و تحلیل آن، بر اساس این توانایی است.

اندازه گیری های رادیوگرافی اشعه ایکس بر این مفهوم استوار است که وقتی اشعه ی ایکس از میان یک ماده عبور می کند، کمی از شدت آن کاسته می شود و این پرتوهای تضعیف شده با استفاده از یک آشکارساز اشعه ایکس دریافت می شود. مقدار اشعه ایکس ضعیف شده، وابسته به چگالی مواد است که از میان آن ها می گذرد.



شکل (۴-۴) مدل تضعیف اشعه ایکس وقتی که از یک ماده با چگالی $\mu(x)$ عبور می نماید

در این مدل ساده، تضعیف کلی یک پرتو اشعه ایکس تک رنگ می تواند محاسبه شود. شدت تابش که متناسب با تعداد فوتون است، پس از عبور از یک فاصله Δx از میان یک شیء با چگالی $\mu(x)$ عبارتست از:

$$I(x + \Delta x) = I(x) - \mu(x)I(x)\Delta x \quad (۱-۴)$$

با مرتب سازی معادله (۳-۱)، معادله (۳-۲) به دست می آید.

$$\frac{I(x+\Delta x)-I(x)}{\Delta x} = -\mu(x)I(x) \quad (۲-۴)$$

با حد گرفتن از معادله (۲-۴) بطوریکه Δx به سمت صفر میل کند، تابع دیفرانسیلی معادله (۳-۴) حاصل

می‌شود:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = \frac{dI}{dx} = -\mu(x)I(x) \quad (۳-۴)$$

چنانچه ماده در طول Δx همگن فرض شود، می‌توان ضریب ثابت میرایی درکل طول نفوذ را ثابت فرض نمود. این امر منجر به یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی و همگن با ضرایب ثابت خواهد شد. به این ترتیب داریم:

$$\frac{dI}{I(x)} = -\mu(x)dx \quad (۴-۴)$$

با انتگرال گیری از طرفین معادله داریم:

$$\int \frac{dI}{I(x)} = -\mu \int dx \Rightarrow \ln|I| = -\mu x + C \quad (۵-۴)$$

به همین ترتیب داریم:

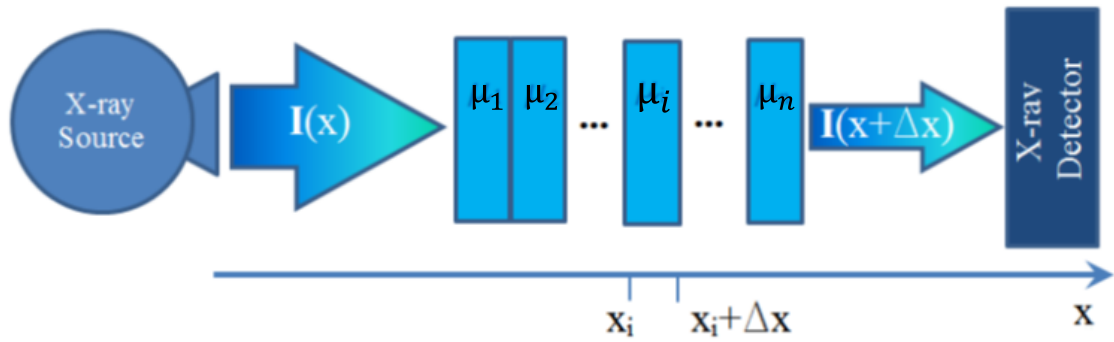
$$I(x) = e^{-\mu x + C} \quad (۶-۴)$$

با شرایط اولیه $I(0) = I_0$ ، از حل ویژه معادله دیفرانسیل (۳-۴) قانون تضعیف بیر^۱ به دست می‌آید.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (۷-۴)$$

همان‌طور که در شکل (۵-۴) نشان داده شده است، کاهش شدت عبوری از میان اشیاء را بدون حل یک معادله دیفرانسیل می‌توان برآورد نمود.

^۱ Beer



شکل (۵-۴) مدل ریاضی تضعیف اشعه ایکس زمانی که از میان یک سری از اشیاء عبور می‌کند

در این مدل، زمانی که یک اشعه ایکس با شدت I_i از میان شیء $i + 1$ به ضخامت Δx عبور می‌نماید، شدت آن به I_{i+1} کاهش خواهد یافت و ضریب تضعیف اشعه، μ_{i+1} به دست می‌آید.

$$I_{i+1} = I_i - \mu_{i+1} I_i \Delta x = I_i (1 - \mu_{i+1} \Delta x) \quad (۸-۴)$$

در نتیجه، معادله تضعیف کلی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_n = I_0 (1 - \mu_1 \Delta x) (1 - \mu_2 \Delta x) \dots (1 - \mu_i \Delta x) \dots (1 - \mu_n \Delta x) \quad (۹-۴)$$

اگر تفکیک شیء بسیار خوب باشد، به عنوان مثال Δx کوچک انتخاب شده باشد، ترم‌های ضرایب در پرانتزها می‌توانند به عنوان بسط تیلور تابع نمایی تفسیر شوند. برای مقدار کوچک ε داریم:

$$e^{-\varepsilon} \approx 1 - \varepsilon \quad (۱۰-۴)$$

لذا معادله (۱۱-۳) در معادله (۹-۳) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$I_n \approx I_0 e^{-\mu_1 \Delta x} e^{-\mu_2 \Delta x} \dots e^{-\mu_i \Delta x} \dots e^{-\mu_n \Delta x} \quad (۱۱-۴)$$

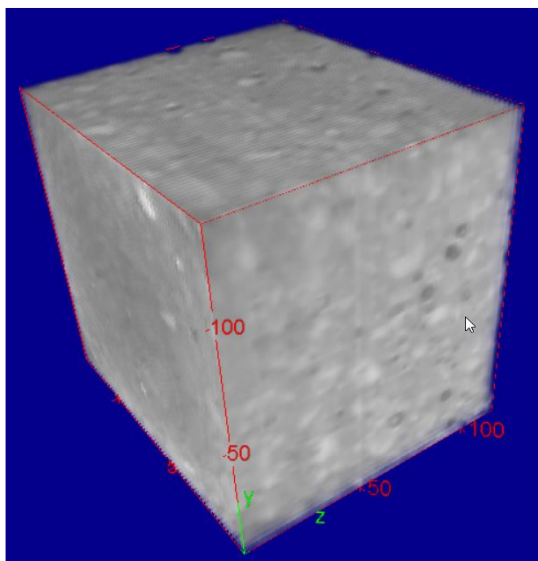
چنانچه در حد $\varepsilon \rightarrow 0$ میل کند، معادله دقیق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_n = I_0 e^{-\sum_{i=1}^n \mu_i \Delta x} \rightarrow I_0 e^{-\int \mu(x) dx} \quad (۱۲-۴)$$

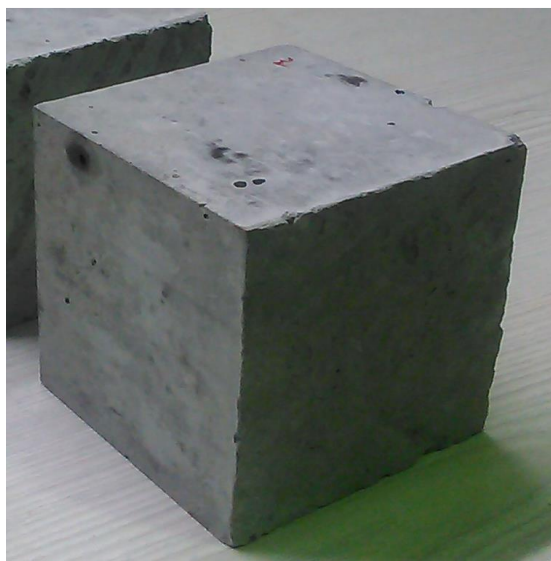
بر اساس قانون بیر، ضریب تضعیف اشعه ایکس، μ ، با توجه به چگالی و یا عدد اتمی بالای شیء بیشتر می شود.

یک دستگاه سی تی اسکنر یک سری از پرتوهای اشعه ایکس را به سمت شیء ساطع می گرداند و تمام اطلاعات به دست آمده از جسم به یک کامپیوتر منتقل می شود و باعث ایجاد تصویر سه بعدی، بخش مورد بررسی و نمایش آن در صفحه نمایش می گردد. امروزه با استفاده از سی تی اسپیرال دقت و سرعت سی تی اسکن بهبود یافته است. در این سیستم، پرتو اشعه ایکس در طول اسکن در یک مسیر مارپیچ به کار گرفته می شود و داده های پیوسته بدون شکاف بین تصاویر جمع آوری می گردد. در رادیولوژی دیجیتال سه بعدی ضریب تضعیف اشعه ایکس در هر قسمت از حجم مورد بررسی با یک شماره بیان می گردد که شماره سی تی نامیده می شود. شماره های سی تی به سطوح خاکستری و یا به سایه های خاکستری مرتبط است. توجه به این نکته مهم است که داده های خروجی بایستی توسط الگوریتم های بازسازی پردازش گردد که هدف همان تبدیل داده ها به مقاطع معنی دار تصویر است.

در تصویربرداری پزشکی و صنعتی از یک نوار حسگر نصب شده در یک پیکره ی حلقوی برای به دست آوردن مقاطع و یا برش های تصاویر اشیاء سه بعدی استفاده می گردد، همان طور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل (۷-۴) (الف) نمونه مکعبی بتنی، (ب) مدل کیوسیتی پردازش شده

فصل پنجم:

پردازش تصویر و

مدل سازی عددی در

نرم افزار آباکوس

۱-۵-تهیه تصاویر سی تی اسکن از نمونه‌ها

نمونه‌های ۲۸ روزه که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است، جهت تهیه تصاویر سی تی اسکن از آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود به بیمارستان قلب شهید رجایی تهران منتقل گردید.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل (۱-۵) نمونه‌های انتخاب شده برای سی تی اسکن - (الف) نمونه مکعبی نوع اول ($w/c=0.35$)، (ب) نمونه مکعبی نوع دوم ($w/c=0.31$) و (ج) نمونه استوانه‌ای ($w/c=0.31$)

در این تحقیق تصاویر بتن با استفاده از دستگاه سی تی اسکن نشان داده شده در شکل‌های (۲-۵) و (۳-۵) مستقر در بیمارستان قلب شهید رجایی تهران مدل multi slice 128 dual source 256 slice Spiral تهیه شده است. در نمونه مکعبی نوع اول با نسبت آب به سیمان 0.35 از سی تی انژیوگرافی مغز به روش اسپیرال استفاده شده است. پارامترهای اشعه ایکس در 140 keV و 400 mA تنظیم شده است. همچنین پارامترهایی مانند حالت اسکن^۱، اثر جرم^۲، زمان چرخش^۳ و ضخامت برش^۴ برای تهیه تصاویر سی تی اسکن مورد نیاز می‌باشند که مقادیر این پارامترها در جدول (۱-۵) برای نمونه مکعبی نوع اول درج شده است.

^۱ Scan Mode

^۲ Mass Effect

^۳ Rotation Time

^۴ Slice Thickness



شکل (۵-۲) نمونه بتن مکعبی نوع اول در دستگاه سی تی اسکن بیمارستان قلب شهید رجایی تهران

برای هر برش تصویر کلی، ۵۱۲ Pixel در هر دو جهت و ضخامت برش ۱mm با هم پوشانی ۰/۲mm در مجموع تعداد ۱۲۰ برش در طول نمونه به دست آمده است. ابعاد قسمت مورد مطالعه (بتن) تصویر، ۱۳۵×۱۳۵pixels برای نمونه مکعبی نوع اول به دست آمده است.

جدول (۵-۱) تنظیمات استفاده شده برای سی تی اسکن نمونه مکعبی اول

سی تی اسکن مغز به روش اسپیرال	
ضخامت برش	۱mm
حالت اسکن	۱ pitch
اثر جرم	۴۰۰mA
زمان چرخش	۱sec

برای نمونه‌های سری دوم با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ نیز دستگاه سی تی اسکن برای حالت سی تی اسکن ریه و مدیاستن^۱ مطابق با جدول (۵-۲) و پارامترهای اشعه ایکس در ۱۴۰ keV و ۴۰۰ mA تنظیم گردید. در این حالت نیز ابعاد کلی هر برش دوبعدی تصویر ۵۱۲×۵۱۲ pixels به دست آمد با این تفاوت که ابعاد بتن مفید در هر برش دوبعدی ۴۰۰×۴۰۰ pixels به دست آمده است. همچنین تعداد ۱۵۸ برش تصویر برای نمونه مکعبی نوع دوم و ۴۰۰ برش برای نمونه استوانه‌ای در طول آن‌ها به دست آمده است.

جدول (۵-۲) تنظیمات استفاده شده برای سی تی اسکن نمونه مکعبی و استوانه (نوع دوم)

سی تی اسکن ریه و مدیاستن به روش اسپیرال	
ضخامت برش	۰/۶ mm
حالت اسکن	۱ pitch
اثر جرم	۴۰۰ mA
زمان چرخش	۱ sec



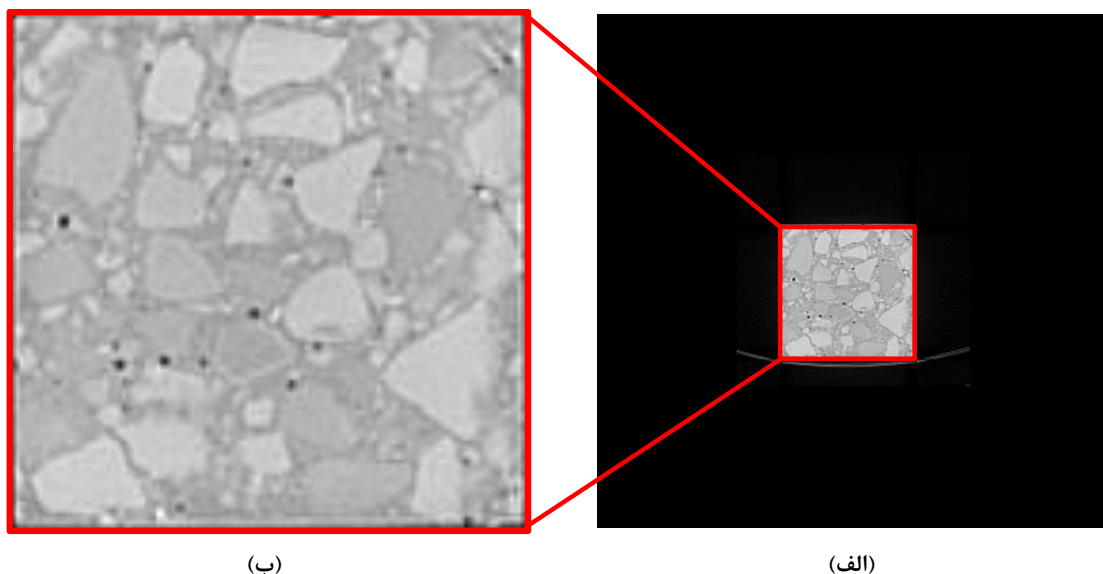
شکل (۵-۳) نمونه بتن مکعبی سری دوم و نمونه استوانه‌ای در دستگاه سی تی اسکن بیمارستان قلب شهید رجایی

تهران

^۱ Mediasten

نمونه‌ها در زمانی کمتر از ۱۰ ثانیه اسکن شدند، کل زمان صرف شده از بدو ورود به اتاق سی تی و تهیه تصویر کمتر از ۵ دقیقه می‌باشد. در این مطالعه تصاویر به دست آمده از دستگاه سی تی اسکنر با فرمت تصویربرداری پزشکی دایکام ذخیره شده است. برای خواندن اطلاعات تصاویر از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۵b استفاده شده است. با استفاده از یک کد متلب که در پیوست ۶ آورده شده است، تصاویر اولیه ۱۶ بیتی به ۸ بیتی با فرمت TIFF تبدیل گردید. سایر کدهای نوشته شده با استفاده از متلب برای پردازش تصاویر و برهم‌نهی آن‌ها در پیوست‌های ۷ تا ۱۰ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴-۵) (الف) مشاهده می‌گردد، با استفاده از یک کد متلب قسمت‌های اضافی تصویر از اطراف قسمت مورد مطالعه (بتن)، حذف شده است و در شکل (۴-۱۴) (ب) تصویر مفید بتن به ابعاد 135×135 pixels به دست آمده است.



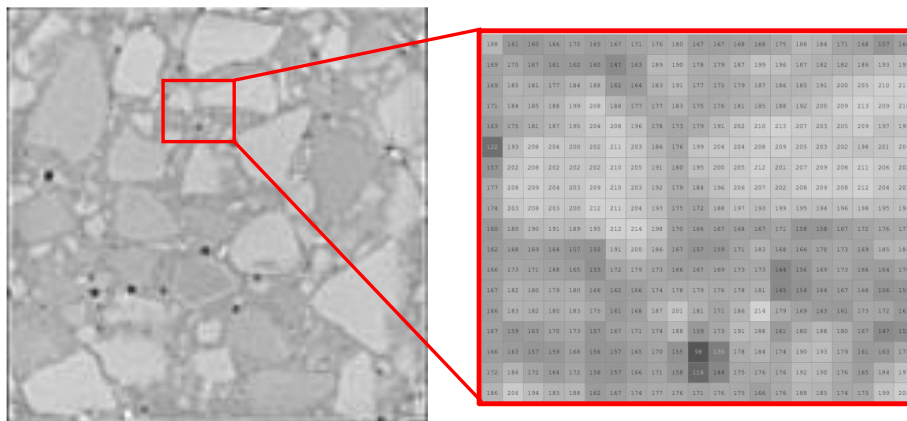
شکل (۴-۵) (الف) تصویر اولیه 512×512 pixels نشان‌دهنده نگه‌دارنده نمونه در دستگاه سی تی اسکن و قسمت‌های اضافی سیاه‌رنگ و (ب) تصویر 135×135 pixels قسمت مورد مطالعه (بتن)

برای نمونه‌های مکعبی نوع دوم نیز مجدداً در کد متلب با در نظر گرفتن تعداد پیکسل‌های تصویر قسمت مورد مطالعه (بتن) که این بار ابعاد آن 400×400 pixels بوده است، تغییرات لازم اعمال شد. در نمونه استوانه‌ای نیز از آنجایی که مبنای شکل‌گیری یک تصویر، ماتریس مربعی است و ذخیره-سازی شماره شدت پیکسل‌ها به ترتیب شماره سطر و ستون آن‌ها می‌باشد، برای استخراج شماره

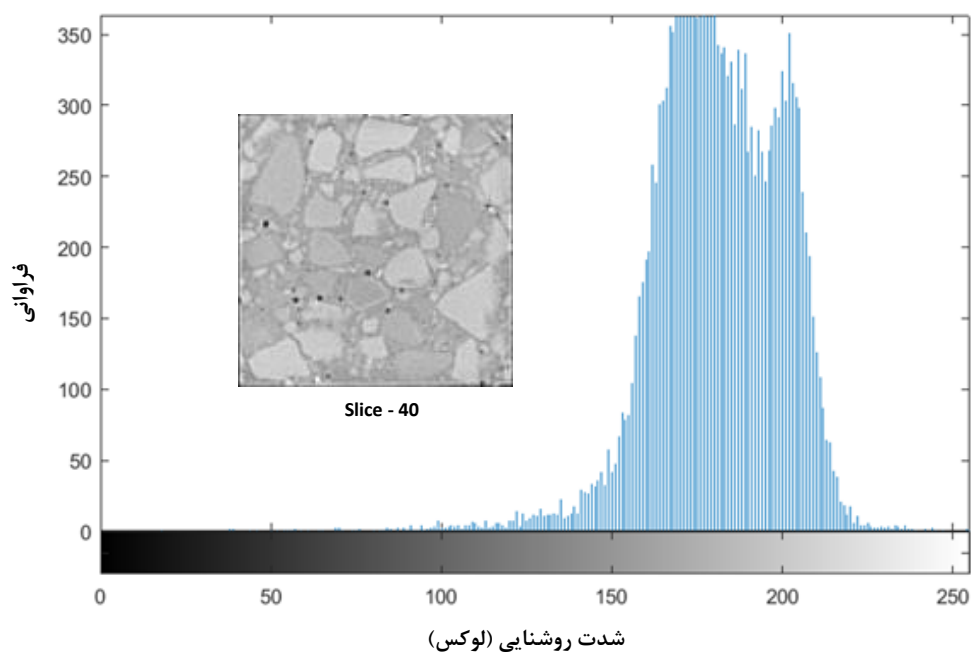
شدت‌های منطقه مورد مطالعه (بتن با مقطع دایره) در کد متلب تغییرات لازم برای حذف پیکسل‌های سیاه رنگ (با شدت روشنایی صفر) از اطراف تصویر بتن اعمال گردید.

۵-۲- پردازش تصاویر به‌دست آمده از نمونه‌ها

جداسازی فازهای بتن از یکدیگر بر اساس محدوده‌ی شدت روشنایی صورت می‌پذیرد. بازه شدت روشنایی برای تصاویر ۸ بیتی از ۰ تا ۲۵۵ می‌باشد. در شکل (۵-۵) تصویر قسمتی از مقطع بتن نشان داده شده است. برای تعیین محدوده‌ی مناسب شدت روشنایی هر فاز، از هیستوگرام تصویر استفاده شده است. با بررسی هیستوگرام تصاویر بتن و همچنین بررسی‌های چشمی انجام شده، محدوده‌ی شدت روشنایی مناسب فازها شامل حفره‌ها، ملات ماسه‌سیمان و سنگ‌دانه‌ها (ماسه سنگ و سنگ آهک) به ترتیب از شماره ۰ تا ۲۵۵ اختصاص داده شده است. اعداد شدت روشنایی مرکز محدوده فازهای حفره هوا، ملات، سنگ آهک و ماسه سنگ به ترتیب ۰، ۱۵۵، ۱۷۷ و ۱۹۰ تعیین گردید. در شکل (۵-۶) هیستوگرام مربوط به برش تصویر شماره ۴۰ نمونه بتن نشان داده شده است. ماسه‌سنگ به دلیل داشتن چگالی بالاتر نسبت به سنگ آهک و ملات ماسه سیمان، با شدت روشنایی بیشتری در تصویر دیده می‌شود.



شکل (۵-۵) تصویر بتن همراه با شماره پیکسل‌های نشان‌دهنده آن



شکل (۵-۶) هیستوگرام برش شماره ۴۰ نمونه بتن (تعیین محدوده شدت روشنایی فازها)

با تعیین محدوده شدت روشنایی مناسب برای هر یک از فازها در نرم‌افزار متلب، در کد مربوطه که در پیوست ۹ آورده شده است، فرایند جداسازی و ذخیره نمودن مجموعه پیکسل‌های هر فاز در فایل‌های جداگانه با اختصاص دادن برچسب شماره ۱ به حفره‌ها، برچسب شماره ۲ به ملات ماسه‌سیمان، برچسب شماره ۳ به ماسه سنگ و برچسب شماره ۴ به سنگ آهک انجام گردید.

در جدول (۵-۳) درصد حجمی مواد موجود در تصاویر به‌دست آمده از ۵ برش نمونه بتن مکعبی نوع اول درج شده است.

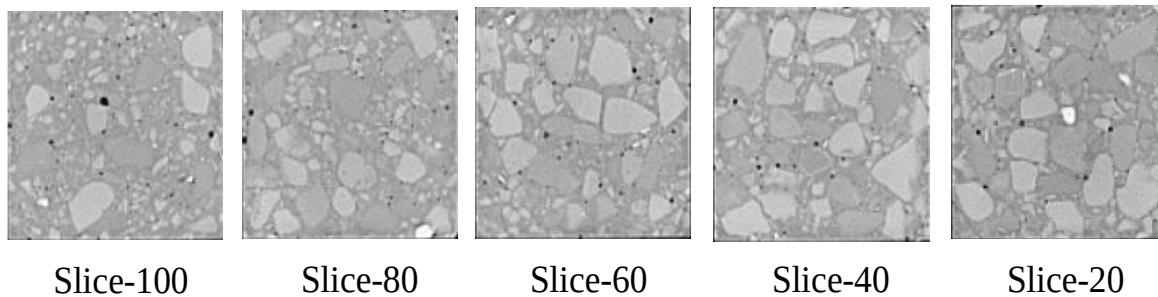
جدول (۵-۳) درصد مواد موجود در برش‌های تصاویر بتن

شماره مقطع تصویر	حفره هوا (درصد)	ملات ماسه سیمان (درصد)	سنگ‌دانه نوع اول - سنگ آهک (درصد)	سنگ‌دانه نوع دوم - ماسه سنگ (درصد)
۲۰	۰/۱۵	۲۵/۷۶	۴۰/۲۴	۳۳/۸۳
۴۰	۰/۱۶	۱۹/۲۵	۳۶/۳۴	۴۴/۲۴
۶۰	۰/۳۵	۲۹/۷۱	۳۴/۳۷	۳۵/۵۶
۸۰	۰/۴۷	۳۹/۷۷	۳۶/۳۱	۲۳/۴۳
۱۰۰	۰/۸۶	۴۳/۸۲	۳۳/۴۶	۲۱/۸۵

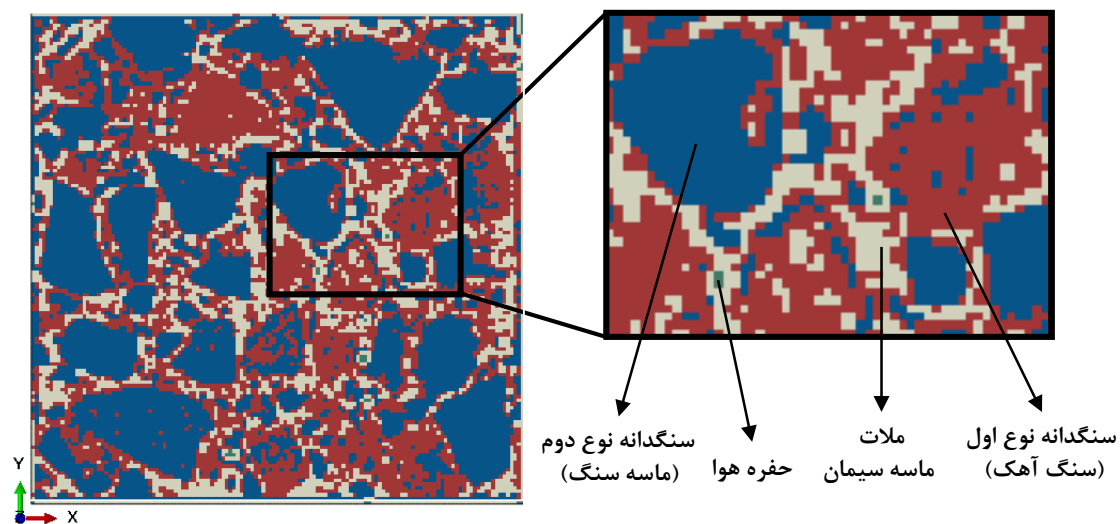
۵-۳- مدل سازی اجزای محدود دوبعدی

در این مطالعه در ابتدا مدل دوبعدی اجزای محدود مقاطع با نرم افزار آباکوس ساخته شده است. این نرم افزار قادر به مدل سازی داده های ورودی توسط یک فایل متنی (اینپوت فایل آباکوس) است. با استفاده از یک کد متلب که به این منظور نوشته شده است، شماره المان ها و شماره شدت هر یک از پیکسل های تصویر در هر فاز مشخص شده است. در فایل متنی به ترتیب هندسه مدل، مش بندی المان محدود، نوع و شماره المان ها تعریف شده است و همچنین خصوصیات مصالح به هر یک از فازها به صورت جداگانه اختصاص یافته است.

از المان CPE4R برای مش بندی اجزای محدود دوبعدی استفاده شده است. مدل اجزای محدود نمونه نوع اول (135×135pixels) از 18496 گره و 18225 المان تشکیل شده است. در شکل (۵-۷) به ترتیب تصویرهای سی تی اسکن برش های به شماره 20، 40، 60، 80 و 100 نشان داده شده است. در شکل (۵-۸) نیز مدل اجزای محدود و فازهای چهارگانه برای برش شماره 40 به عنوان نمونه نشان داده شده است.

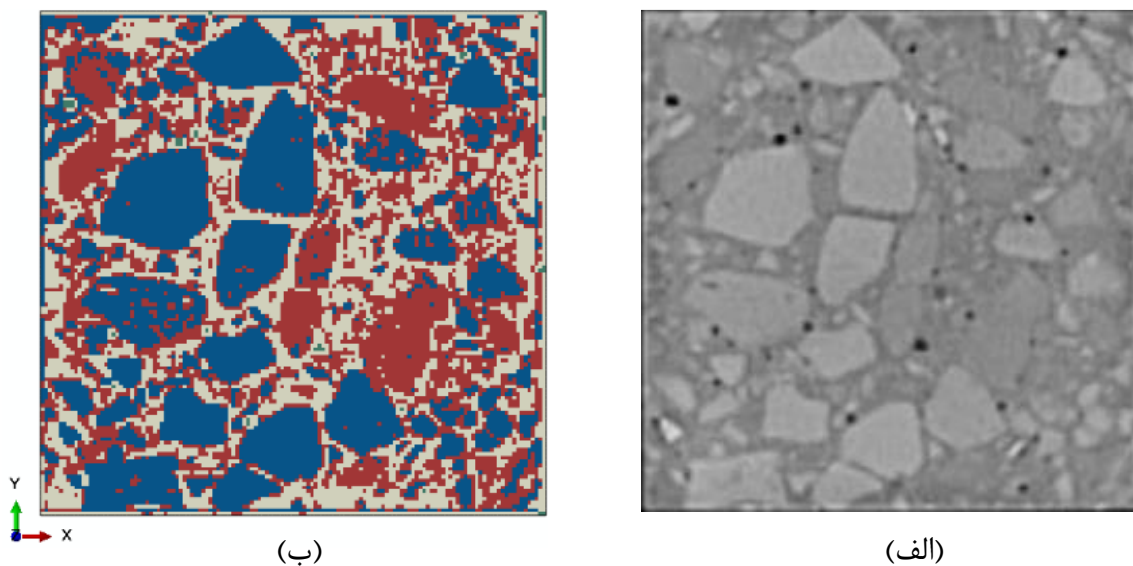


شکل (۵-۷) نمونه برش های تصویر سی تی اسکن



شکل (۸-۵) مدل المان محدود غیرهمگن برش شماره ۴۰ نمونه بتن (نمایش فازهای چهارگانه در Abaqus)

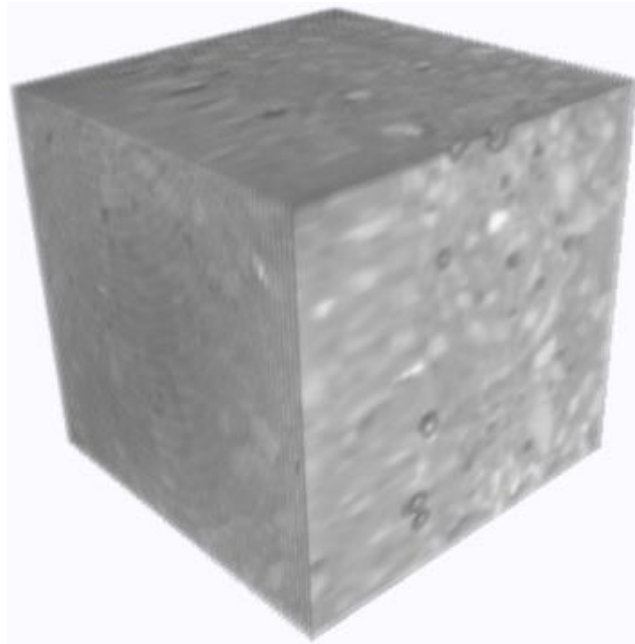
در شکل (۹-۵) (الف) و (ب) به ترتیب تصویر سی تی اسکن مقطع مرکزی نمونه مکعبی نوع اول و مدل اجزای محدود آن نشان داده شده است.



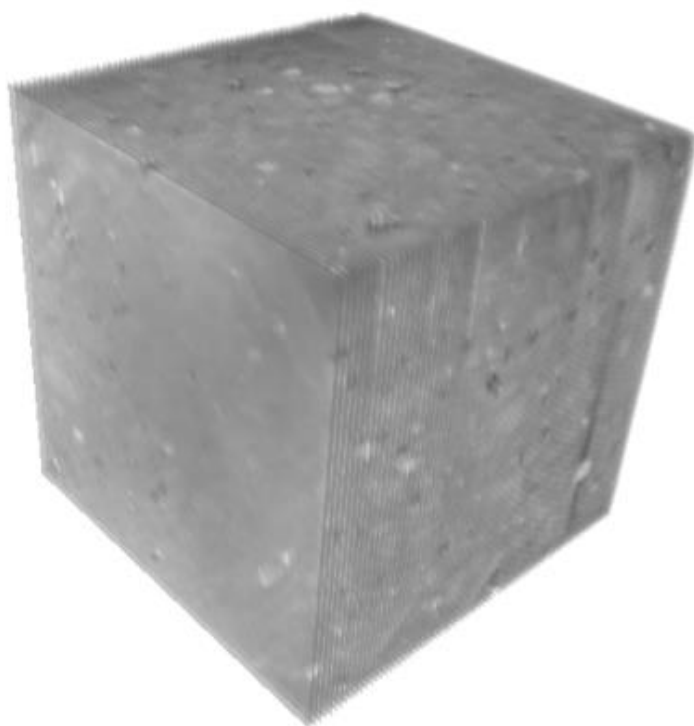
شکل (۹-۵) مقایسه (الف) تصویر سی تی اسکن مقطع مرکزی نمونه و (ب) مدل متناظر در آباکوس

۵-۴- برهم نهی تصاویر دوبعدی به دست آمده از سی تی اسکن

مدل‌های سه‌بعدی کیوسی تی بتن با استفاده از یک کد متلب و روش برهم نهی نمودن برش‌های دوبعدی به دست آمد که در شکل‌های (۵-۱۰) تا (۵-۱۳) نشان داده شده است. با استفاده از این مدل‌ها، درصد حجمی فازهای تشکیل‌دهنده نمونه‌های بتن در جدول (۲-۶) آورده شده است.



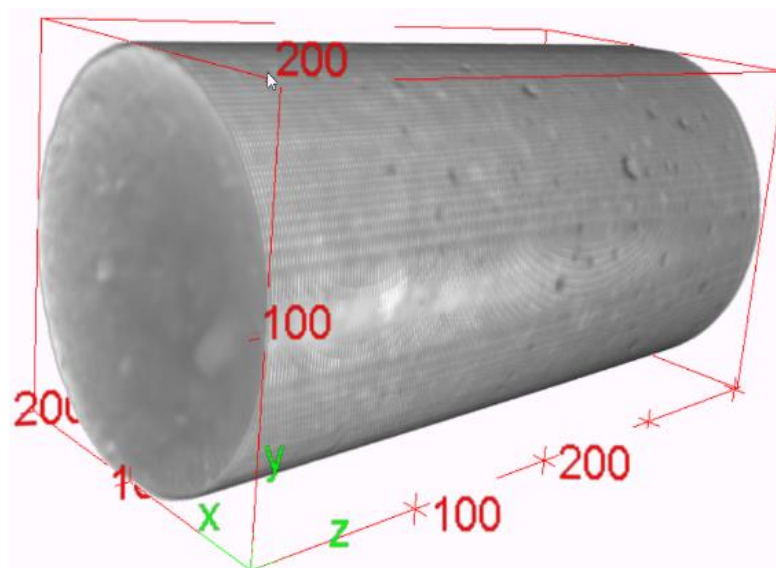
شکل (۵-۱۰) مدل سه‌بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (120×135×135 Pixels)



شکل (۵-۱۱) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (142×142×142Pixels)



شکل (۵-۱۲) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (100×100×200Pixels)



شکل (۵-۱۳) مدل سه بعدی حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر سی تی اسکن (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰Pixels)

جدول (۵-۴) درصد کلی مواد موجود در برش‌های تصاویر بتن

نمونه	حفره هوا (درصد)	ملات ماسه سیمان (درصد)	سنگ‌دانه نوع اول- سنگ آهک (درصد)	سنگ‌دانه نوع دوم- ماسه سنگ (درصد)
مکعبی نوع اول (۱۳۵×۱۳۵pixels)	۱	۳۵	۳۳	۲۹
مکعبی نوع دوم (۱۴۲×۱۴۲pixels)	۱/۷	۲۱	۵۳	۲۴
استوانه (۱۰۰×۱۰۰pixels)	۲/۷	۲۹	۳۳	۳۵
استوانه (۲۰۰×۲۰۰pixels)	۲/۲	۳۶	۲۹	۳۲

۵-۵- مدل ترکیبی خسارت پلاستیک بتن

در این مطالعه از مدل ترکیبی خسارت پلاستیک بتن که پرکاربردترین مدل رفتاری برای شبیه‌سازی خرابی و رفتار شکست بتن است، استفاده شده است. با نگاهی به مقالات معتبر که برای شبیه‌سازی رفتار بتن از نرم‌افزار آباکوس استفاده کرده‌اند، متوجه می‌شویم که تقریباً تمامی آن‌ها این مدل را بکار گرفته‌اند. لازم به ذکر است مدل خسارت پلاستیک تعمیم یافته معیار شکست دراکر-پراگر [۵۹] است برای مدل‌سازی رفتار خطی و غیر خطی بتن استفاده شده است.

خصوصیات مکانیکی ملات و سنگ مطابق جداول (۵-۵) و (۶-۵) از داده‌های آزمایشگاه به‌دست آمده است. پارامترهایی نظیر زاویه اتساع^۱، پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک^۲، نسبت مقاومت فشاری دومحوره بتن به مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب K_c و پارامتر ویسکوزیته^۳ برای استفاده از مدل خسارت پلاستیک بتن در نرم‌افزار آباکوس مورد نیاز می‌باشد که برای فازهای ملات و سنگ، مطابق جدول (۷-۵) در نظر گرفته شده است [۶۰].

جدول (۵-۵) خصوصیات مکانیکی ملات

نمونه	ν	$E (MPa)$	$f'_c (MPa)$
نوع اول ($W/C=0.35$)	۰/۲	۳۴۷۵۶	۴۸/۲۸
نوع دوم ($W/C=0.31$)	۰/۲	۴۵۵۰۶	۴۹/۳۲

جدول (۶-۵) خصوصیات مکانیکی سنگ‌دانه‌ها

نمونه	ν	$E (MPa)$	$f'_c (MPa)$
سنگ آهک	۰/۲	۳۶۳۴۹	۵۴/۸
ماسه‌سنگ	۰/۲	۲۴۴۲۲	۱۱۰/۵

^۱ Dialation Angle

^۲ Eccentricity

^۳ Viscosity parameter

جدول (۷-۵) خصوصیات مربوط به مدل خسارت پلاستیک بتن

Dilation Angle	Eccentricity	f_{b0}/f_{c0}	K_c	Viscosity parameter
۳۲	۰/۱	۱/۱۲	۰/۶۷	۰

همان‌طور که در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است، در فایل متنی مربوط به آباکوس، پس از معرفی مواد ملات و اختصاص چگالی و مدول الاستیسیته با دستور Concrete Damaged Plasticity* مقادیر پارامترهای مذکور همراه با یک کاما وارد می‌گردد.

```

42 *****
43 *material, Name=Mat2Mortar
44 *Density
45 2400.e-12,
46 *Elastic
47 22837.5, 0.2
48 *Concrete Damaged Plasticity
49 32., 0.1, 1.12, 0.67, 0.

```

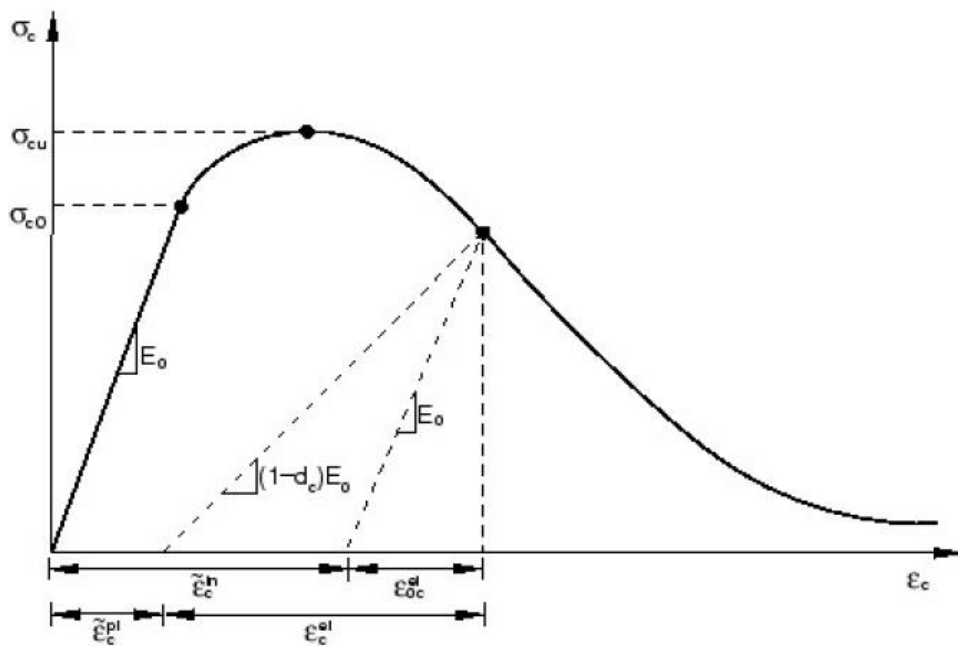
شکل (۵-۱۴) تعریف خصوصیات پلاستیک یک نمونه ملات در فایل متنی (.inp). آباکوس

در ادامه برای تعریف منحنی رفتار تک‌محوره مصالح بتن از نتایج آزمایشگاه استفاده گردید، ترجیح بر این است که منحنی رفتاری مصالح بتن را تا حدود ۴۰٪ مقاومت خود در فاز الاستیک تعریف کنیم. به عبارت دیگر منحنی به دست آمده از مدل رفتاری را از محلی که تنش فشاری ۶۰٪ مقاومت فشاری مصالح بتن است تعریف می‌نماییم. علت انتخاب ۴۰٪ مقاومت فشاری، توصیه ASTM به منظور تعیین مدول الاستیسیته مؤثر بتن می‌باشد [۶۱]. بنابراین تا قبل از ایجاد این تنش در بتن، رفتار آن را با تقریب خوبی می‌توان نه تنها خطی، بلکه الاستیک فرض نمود. همچنین در این مطالعه مقاومت کششی ۱۰٪ مقاومت فشاری مصالح در نظر گرفته شده است [۶۲]. تعریف منحنی رفتاری ملات نمونه استوانه‌ای در فازهای فشاری و کششی در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است.

3494139	*Concrete Compression Hardening	
3494140	24.8741,	0.
3494141	25.5107,	3.78788e-05
3494142	26.1473,	5.68182e-05
3494143	26.784,	0.000113636
3494144	27.6752,	0.000170455
3494145	29.0758,	0.000208333
3494146	30.349,	0.000246212
3494147	38.4978,	0.000359848
3494148	39.1344,	0.000454545
3494149	40.6623,	0.000473485
3494150	41.5535,	0.000568182
3494151	42.9541,	0.000625
3494152	44.3547,	0.000662879
3494153	44.7366,	0.000700758
3494154	45.1186,	0.000719697
3494155	45.5006,	0.000795455
3494156	46.3918,	0.000833333
3494157	47.4104,	0.000890152
3494158	48.3017,	0.00092803
3494159	48.6837,	0.000965909
3494160	49.0656,	0.00109849
3494161	49.3203,	0.00119318
3494162	41.1744,	0.00138258
3494163	39.4476,	0.00142045
3494164	38.193,	0.00159091
3494165	37.2196,	0.00170455
3494166	30.9856,	0.00189394
3494167	26.5293,	0.00193182
3494168	*Concrete Tension Stiffening	
3494169	4.93203,	0.
3494170	0.0493203,	0.000894119

شکل (۵-۱۵) تعریف منحنی تنش-کرنش نمونه ملات استوانه‌ای در فازهای فشاری و کششی در فایل متنی (.inp).

از جمله پارامترهای دیگری که برای تعریف رفتار فشاری و کششی در مدل خسارت پلاستیک نیاز می‌باشند، کرنش غیر الاستیک ($\tilde{\epsilon}_c^{in}$) و پارامتر خرابی (d_c) در حالت فشاری و کرنش ترک‌خوردگی ($\tilde{\epsilon}_t^{ck}$) و پارامتر خرابی (d_t) در حالت کششی هستند که می‌توان آن‌ها را با توجه به شکل‌های (۵-۱۶) و (۵-۱۸) و روابط (۵-۱) تا (۵-۹) تعیین نمود. کرنش غیرالاستیک در حالت فشاری از رابطه (۵-۱) به‌دست می‌آید:



شکل (۱۶-۵) تعریف کرنش غیرالاستیک در حالت فشاری

$$\tilde{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (۱-۵)$$

$$\epsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (۲-۵)$$

$$\tilde{\epsilon}_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (۳-۵)$$

در روابط فوق ϵ_{0c}^{el} بیانگر کرنش الاستیک مصالح آسیب‌نندیده در حالت فشاری است. همچنین مقادیر ϵ_c و σ_c از منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از آزمایش فشاری تک محوری مصالح این مطالعه به‌دست آمده است. برای اطمینان از صحت نمودار تنش-کرنش فشاری بتن، کرنش پلاستیک که از رابطه (۴-۵) محاسبه می‌شود، نباید مقدار منفی یا نزولی داشته باشد:

$$\tilde{\epsilon}_c^{pl} = \tilde{\epsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \frac{\sigma_c}{E} \quad (4-5)$$

پارامتر خرابی فشاری (d_c) را می‌توان از نسبت تنش در شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش به مقاومت فشاری بتن [۶۳]، مطابق رابطه (۴-۵) به‌دست آورد:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (5-5)$$

این مقدار برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب‌دیده برابر با ۱ است
 $(0 \leq d_c \leq 1)$.

*Concrete Compression Damage	
0.,	0.
0.,	0.00119318
0.165164,	0.00138258
0.200175,	0.00142045
0.225613,	0.00159091
0.245349,	0.00170455

شکل (۱۷-۵) تعریف خسارت فشاری ملات نمونه استوانه‌ای در فایل متنی (.inp).

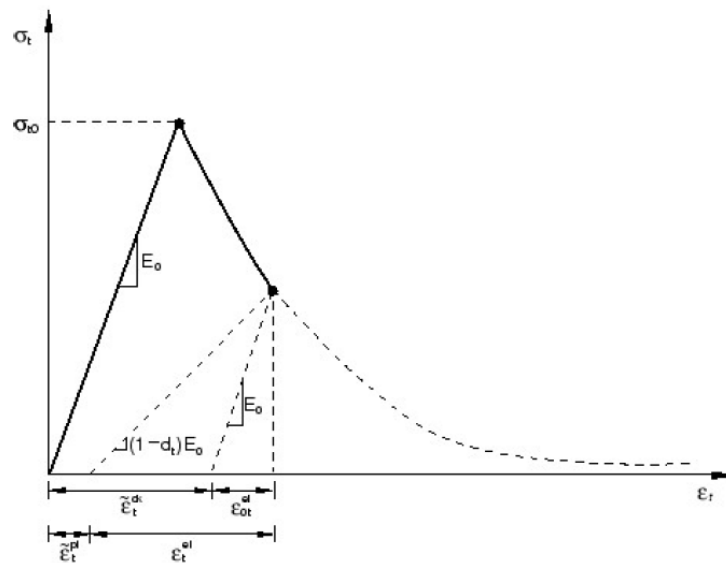
کرنش ترک خوردگی در حالت کششی نیز از رابطه (۶-۵) به‌دست می‌آید:

$$\tilde{\epsilon}_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_{0t}^{el} \quad (6-5)$$

$$\epsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (7-5)$$

در روابط فوق ϵ_{0t}^{el} بیانگر کرنش الاستیک مصالح آسیب‌دیده در حالت کششی می‌باشد، برای اطمینان از صحت نمودار تنش-کرنش کششی بتن، کرنش پلاستیک که از رابطه (۸-۵) محاسبه می‌شود، نباید مقدار منفی و یا نزولی داشته باشد:

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \tilde{\epsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{1-d_t} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (8-5)$$



شکل (۵-۱۸) تعریف کرنش ترک خوردگی در حالت کششی

پارامتر خرابی کششی (d_t) را می‌توان از نسبت تنش در شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش به مقاومت کششی بتن مطابق رابطه (۵-۹) به دست آورد:

(۵-۹)

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}}$$

این مقدار نیز برای مصالح کاملاً سالم برابر صفر و برای مصالح کاملاً آسیب دیده برابر با ۱ است
 $(0 \leq d_t \leq 1)$.

```
*Concrete Tension Damage
0., 0.
0.99, 0.000592439
```

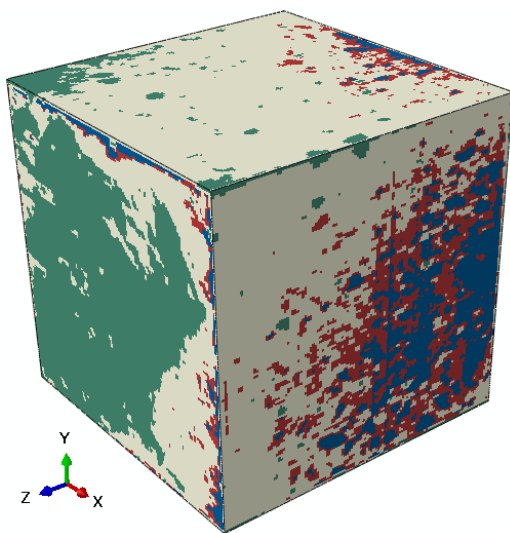
شکل (۵-۱۹) تعریف خسارت کششی ملات نمونه استوانه‌ای در فایل متنی (.inp)

۵-۶- مدل سازی اجزای محدود سه بعدی

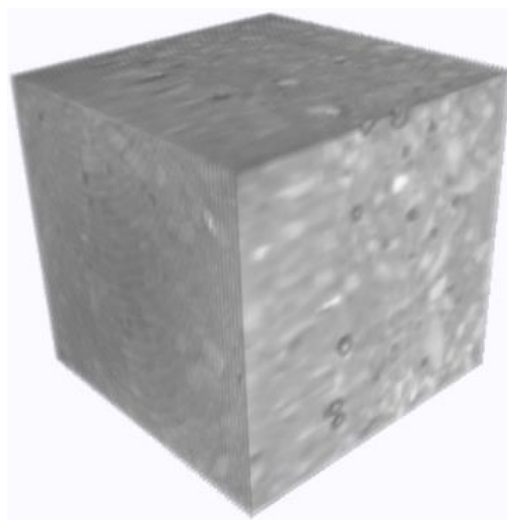
در این مطالعه مدل های سه بعدی اجزای محدود برای تعیین مقاومت فشاری دو نمونه مکعب $100 \times 100 \text{ mm}^2$ و یک نمونه استوانه ای $100 \times 200 \text{ mm}^2$ با نرم افزار آباکوس ساخته شده است.

۵-۶-۱- مدل اجزای محدود نمونه مکعبی نوع اول ($100 \times 100 \text{ mm}^2 - 135 \times 135 \text{ Pixels}$)

در مدل های سه بعدی نیز همانند مدل دوبعدی شماره المان ها و شماره شدت هر یک از پیکسل های تصویر در هر فاز و لایه به لایه مشخص شده است. در فایل ورودی آباکوس به ترتیب هندسه مدل، مش بندی المان محدود، نوع و شماره المان ها تعریف شده است و همچنین خصوصیات مصالح به هر یک از فازها به صورت جداگانه اختصاص یافته است. ابعاد مدل $135 \times 135 \times 120 \text{ pixels}$ ، و از المان C3D8R به ضخامت 0.74 mm برای مش بندی اجزای محدود استفاده شده است. مدل اجزای محدود به دست آمده در شکل (۵-۲۰) (ب) نشان داده شده است.

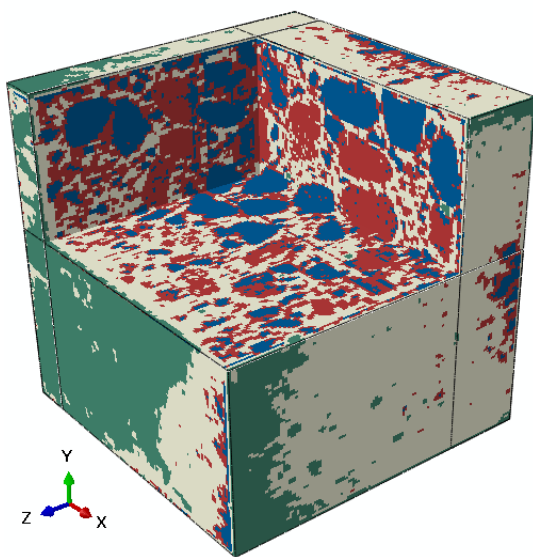


(ب)



(الف)

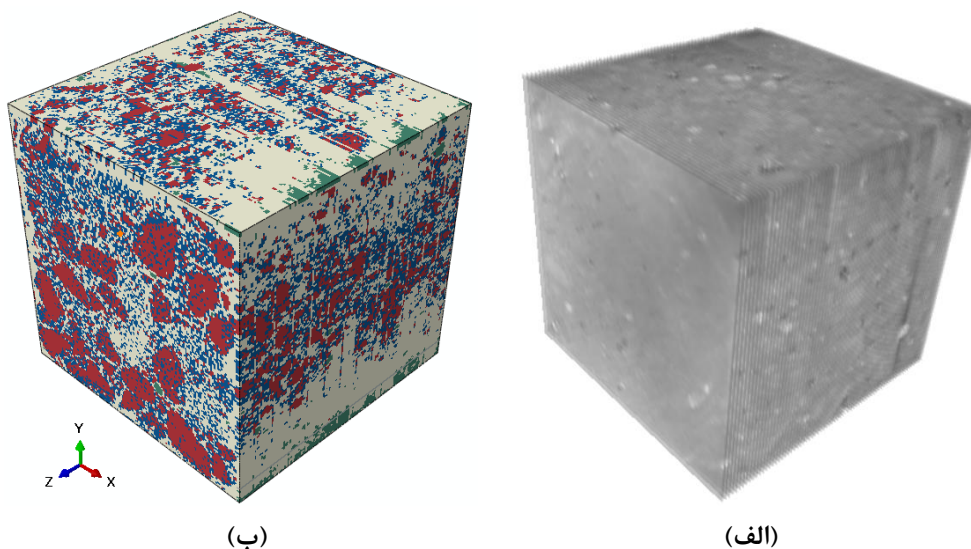
شکل (۵-۲۰) (الف) تصویر سه بعدی برهم نهی شده نمونه مکعبی نوع اول و (ب) مدل اجزای محدود آن در آباکوس



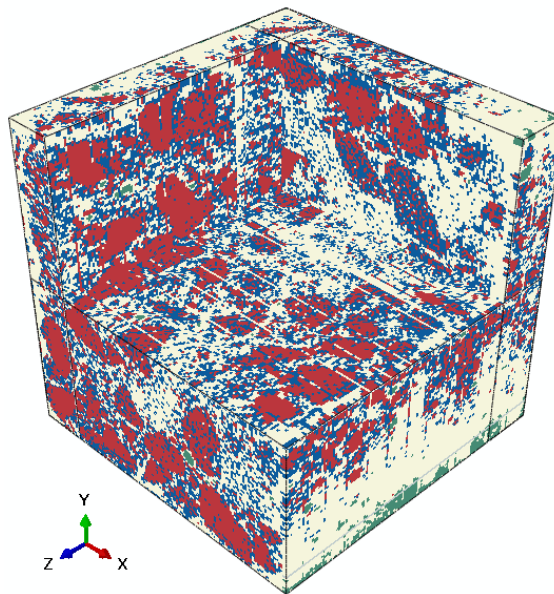
شکل (۵-۲۱) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه مکعبی ($0.74 \times 0.74 \times 0.74 \text{ mm}^3$)

۵-۶-۲- مدل اجزای محدود نمونه مکعبی نوع دوم ($100 \times 100 \text{ mm}^2 - 142 \times 142 \text{ Pixels}$)

برای نمونه مکعبی سری دوم نیز همانند نمونه مکعبی سری اول با استفاده از کد متلب برش‌های تصاویر دوبعدی به سه‌بعدی تبدیل‌شده و سپس با نوشتن فایل `.inp` آباکوس مدل‌سازی انجام شده است. مدل حاصل از برهم‌نهی برش‌های تصویر و مدل اجزای محدود در شکل زیر نشان (۵-۲۲) داده شده است.



شکل (۵-۲۲) (الف) تصویر سه‌بعدی برهم‌نهی شده نمونه مکعبی نوع دوم و (ب) مدل اجزای محدود آن در آباکوس

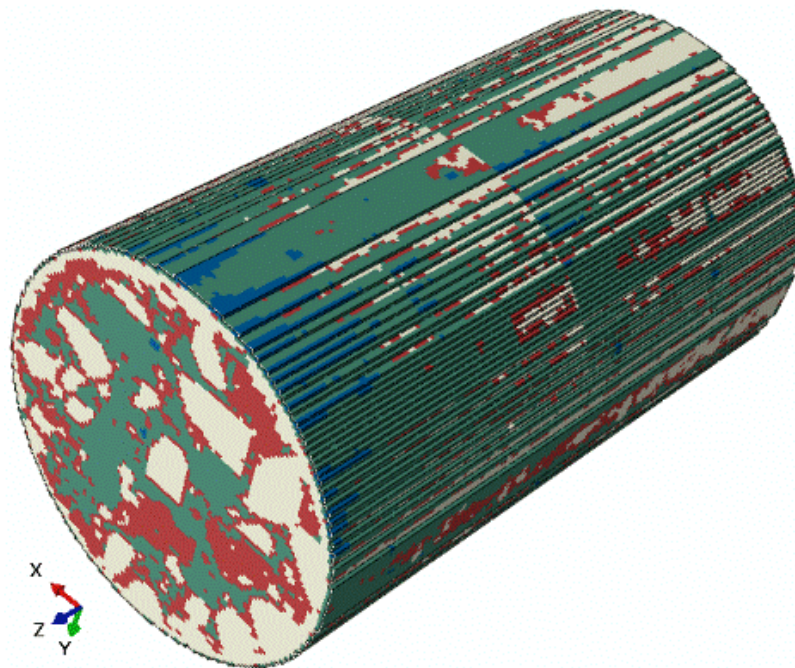


شکل (۲۳-۵) برش سه بعدی مدل اجزای محدود نمونه مکعبی (مش $0.7 \times 0.7 \times 0.7 \text{ mm}^3$)

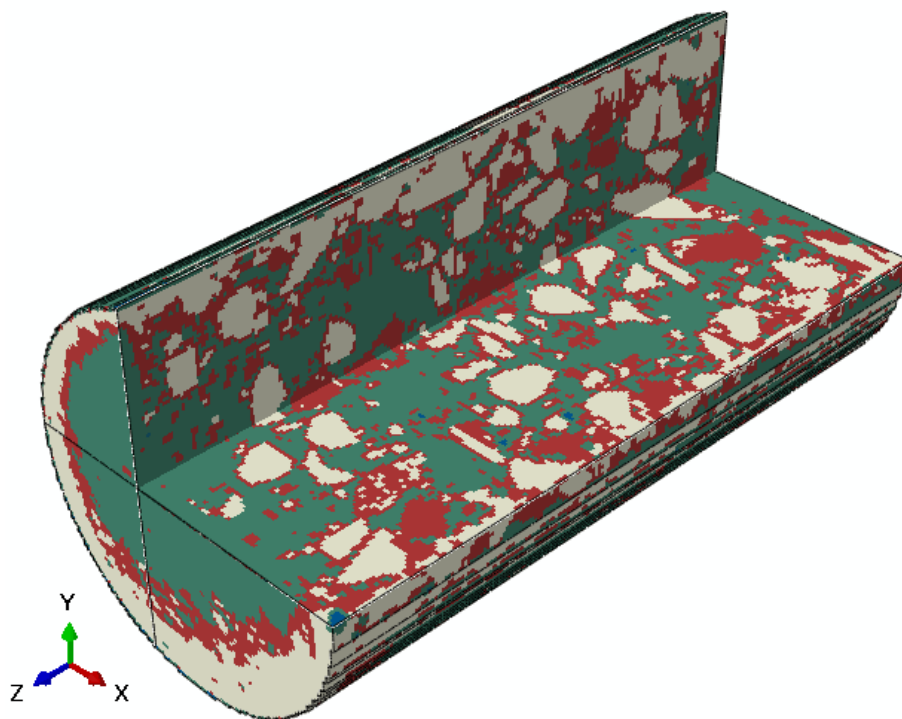
۵-۶-۳- مدل سازی اجزای محدود نمونه استوانه ای ($100 \times 200 \text{ mm}^2 - 100 \times 100 \text{ Pixels}$)

برای تهیه مدل استوانه ای بتن با استفاده از یک کد متلب تصاویر اولیه اصلاح شد تا هندسه مربعی تصاویر به دایره تبدیل گردد و از طرفی کلیه نودها و المان های لازم برای فراخوانی در نرم افزار آباکوس با استفاده از کد دیگری در متلب و با پسوند .inp تولید گردید.

تعداد کل المان ها و نودهای تولید شده برای ایجاد مدل سه بعدی اجزای محدود به ترتیب 1572000 میلیون و 6288000 میلیون می باشد. مدل اجزای محدود نمونه بتن استوانه ای، برش سه بعدی و حفره های هوای موجود در آن به ترتیب در شکل های (۲۴-۵) و (۲۵-۵) نشان داده شده است.

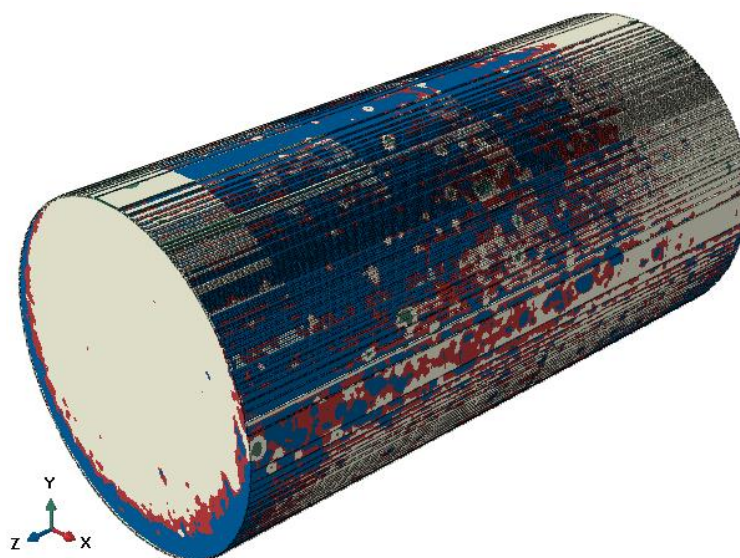


شکل (۵-۲۴) مدل سه‌بعدی اجزای محدود نمونه بتن استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس (ابعاد مش $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$)

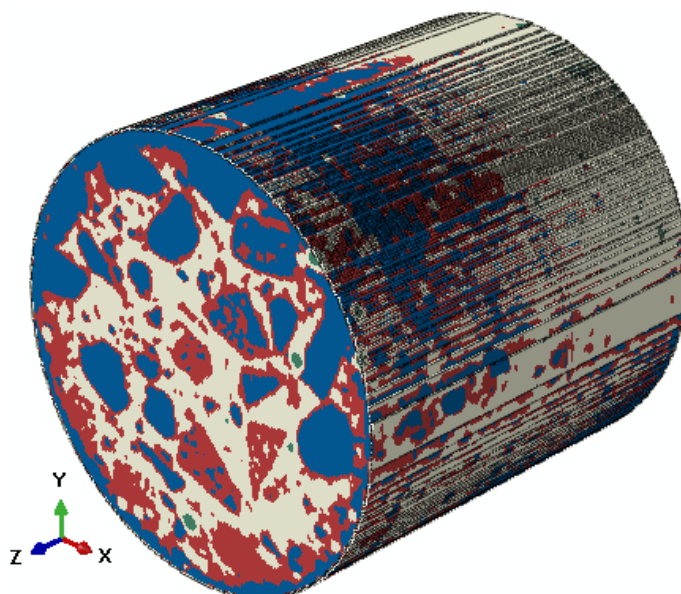


شکل (۵-۲۵) برش سه‌بعدی مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (مش $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$)

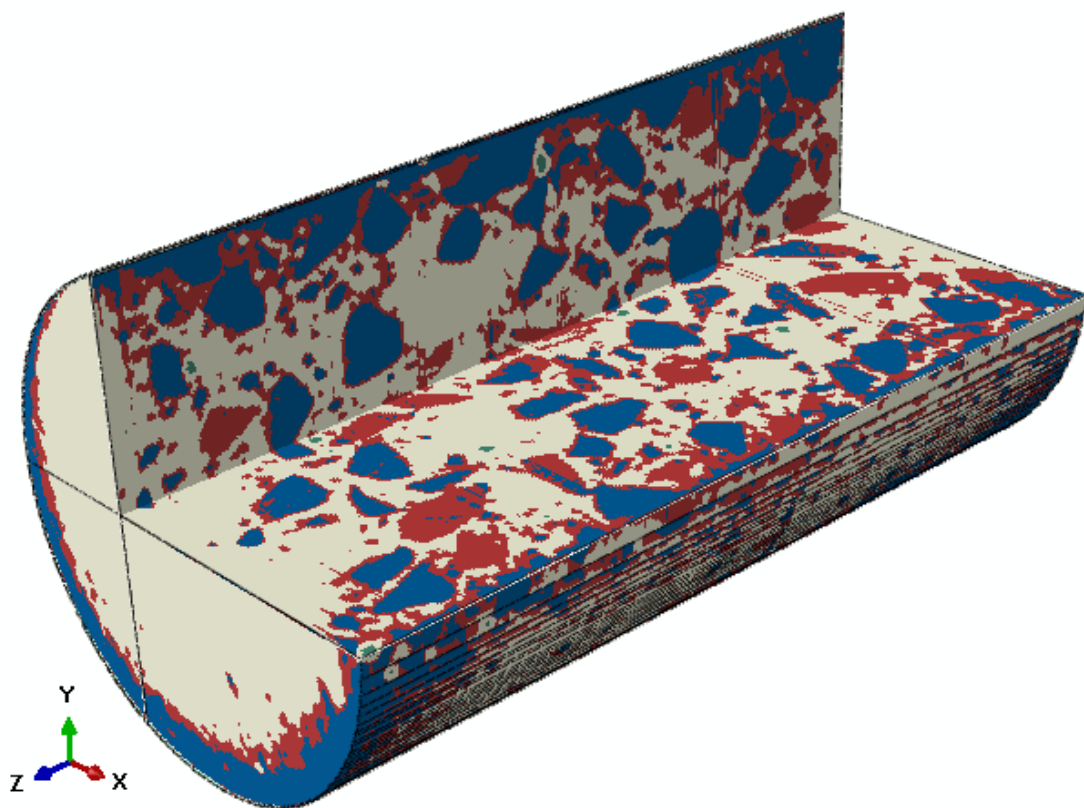
۵-۶-۴-مدل سازی اجزای محدود نمونه استوانه‌ای ($100 \times 200 \text{ mm}^2 - 200 \times 200 \times 400 \text{ Pixels}$)
 مدل اجزای محدود برای نمونه استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}$ با ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ در
 شکل نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۶) مدل سه‌بعدی اجزای محدود نمونه بتن استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$)

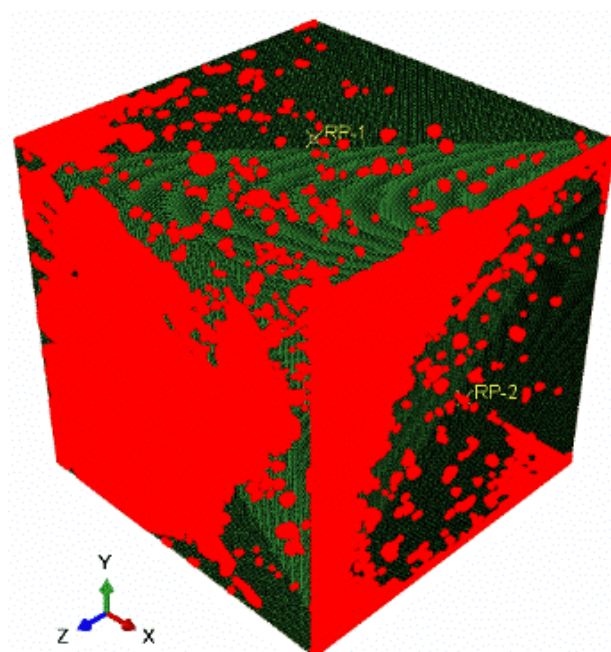


شکل (۵-۲۷) برش سه‌بعدی وسط مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای در جهت Z (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$)

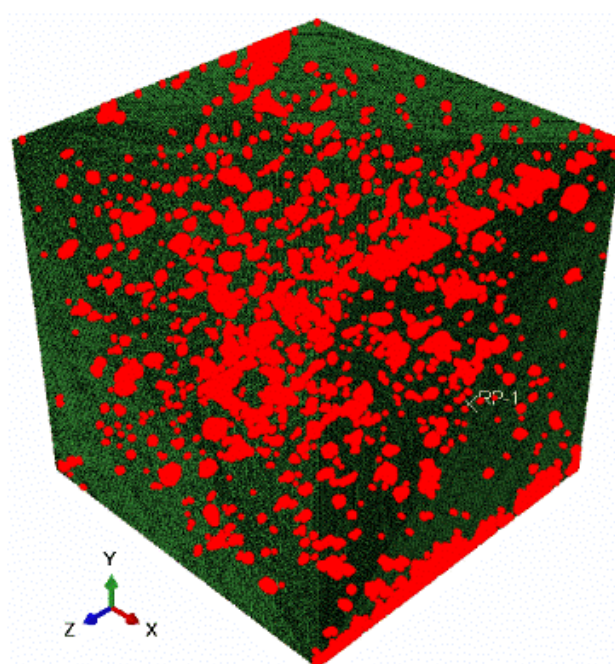


شکل (۵-۲۸) برش سه بعدی مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای در جهات X و Y (ابعاد مش $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$)

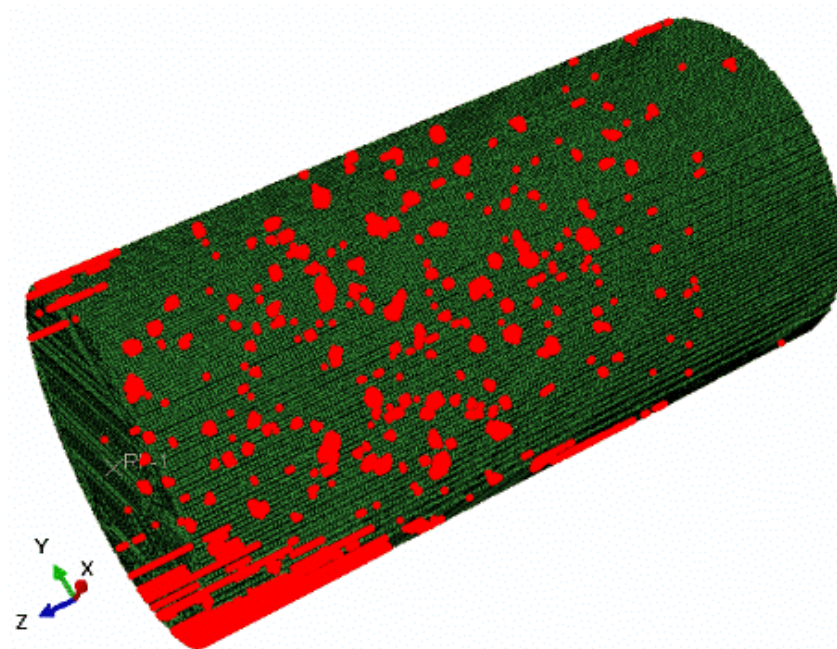
۵-۷- مدل عددی حفره‌های هوا



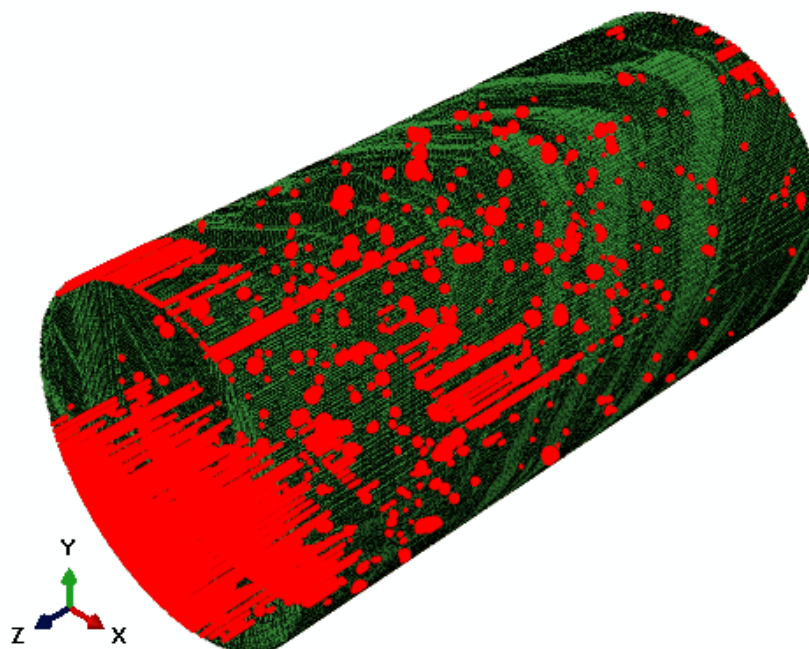
شکل (۵-۲۹) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود بتن مکعبی نوع اول (135x135Pixels)



شکل (۵-۳۰) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود بتن مکعبی نوع دوم (142x142Pixels)



شکل (۵-۳۱) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (۱۰۰×۱۰۰pixels)



شکل (۵-۳۲) حفره‌های هوای موجود در مدل اجزای محدود نمونه استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰pixels)

فصل ششم :

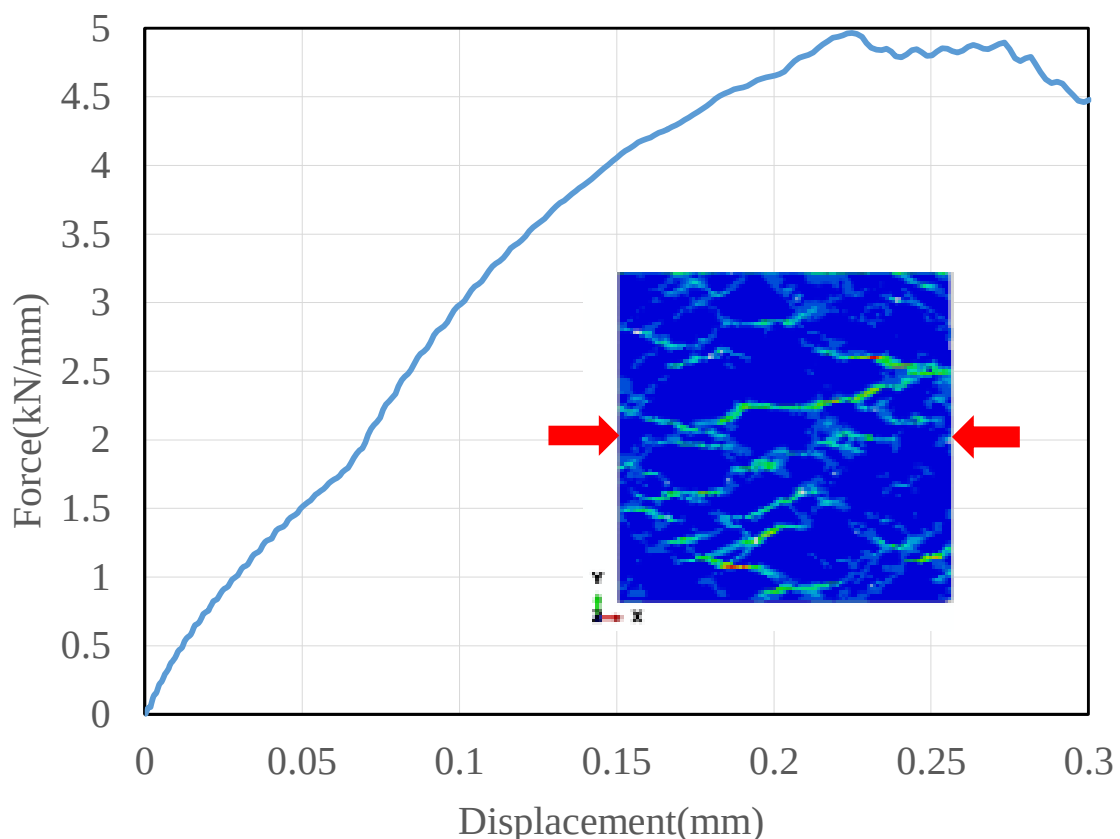
نتایج حاصل از مدل‌های

عددی

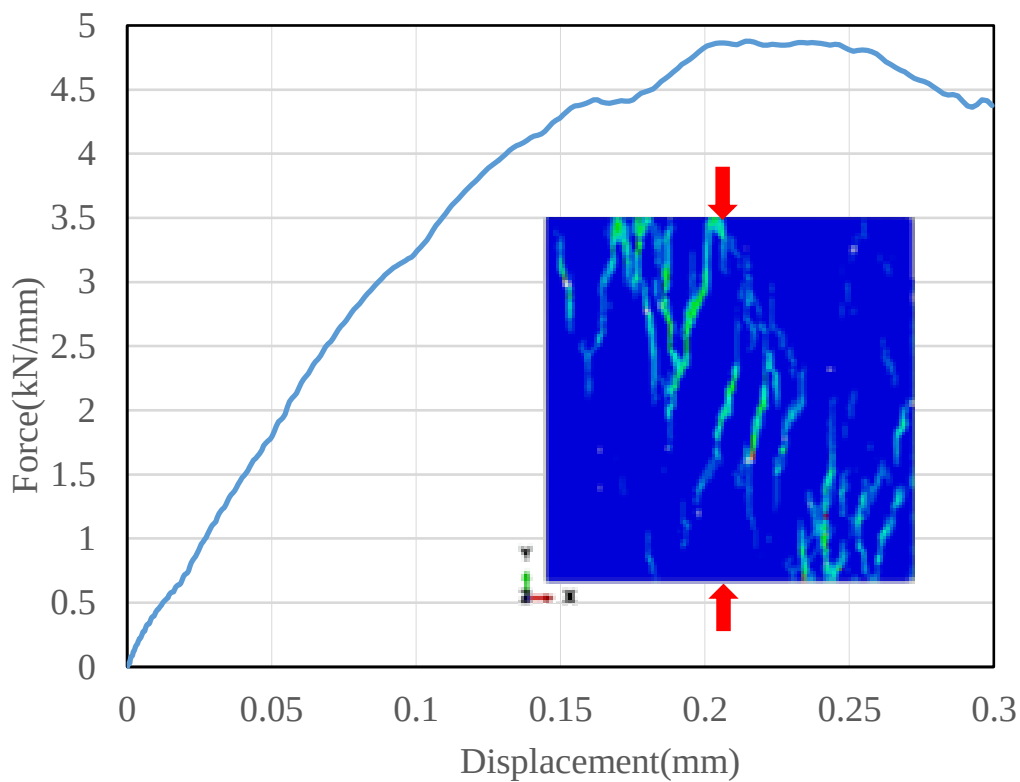
۶-۶- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایشگاه

۶-۶-۱- مطالعات آماری مدل دوبعدی نمونه مکعبی نوع اول

آزمایش مقاومت فشاری برای مدل اجزای محدود برش تصویر وسط نمونه مکعبی نوع اول شبیه-سازی شده است که در آن بار به صورت جابجایی‌های عمودی به همه گره‌های قسمت بالای نمونه اعمال شده و از اثر مفصلی فک بالای جک یونیورسال صرف نظر شده است درحالی‌که قسمت پایین نمونه ثابت و تغییر شکل جانبی اجازه داده شده است. از حل گر صریح دینامیکی آباکوس برای تحلیل مدل استفاده شده است. به منظور بررسی اثر توزیع فازها، بارگذاری در دو جهت x و y انجام شده است. منحنی‌های نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت-های x و y به ترتیب در شکل‌های (۶-۱۹) و (۶-۲۰) نشان داده شده است. نیروی حداکثر در جهت x و y به ترتیب 497 kN و 488 kN با حداکثر اختلاف $1/8$ درصد به دست آمده است.

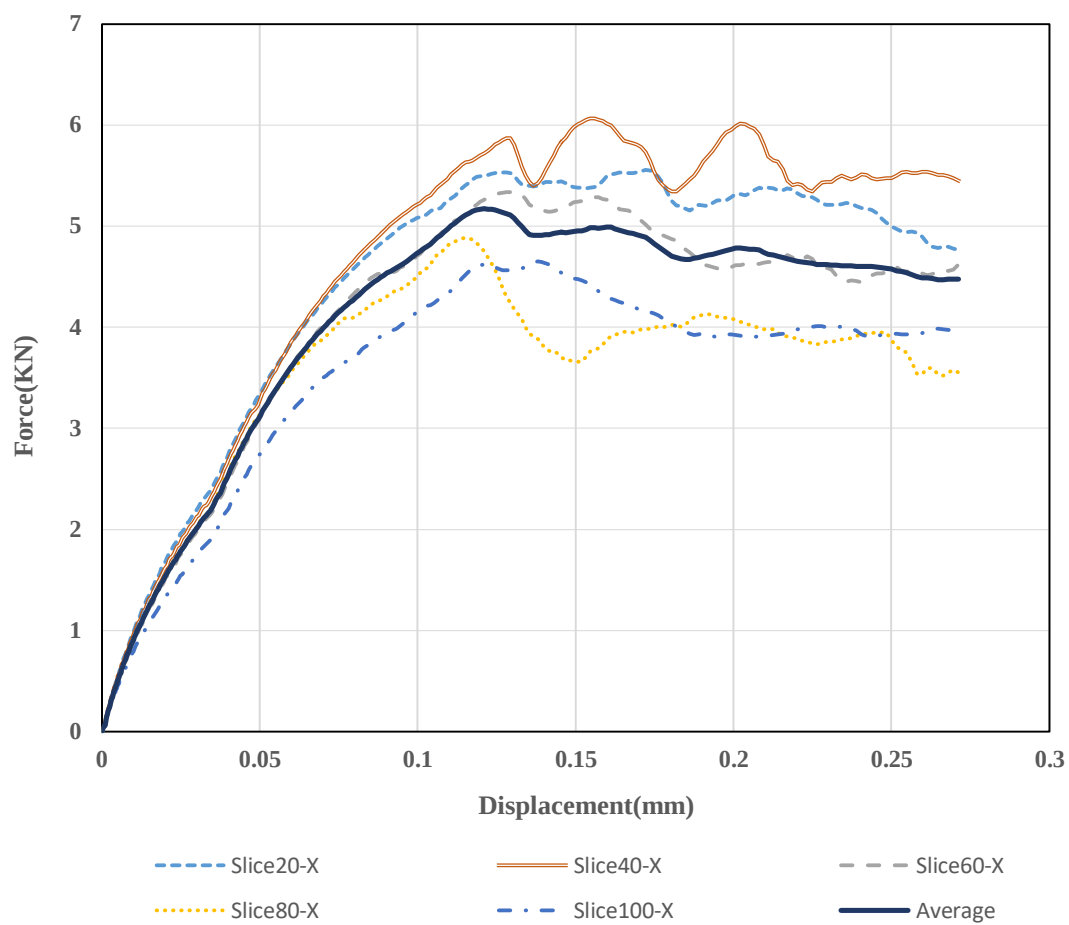


شکل (۶-۱) منحنی نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت x

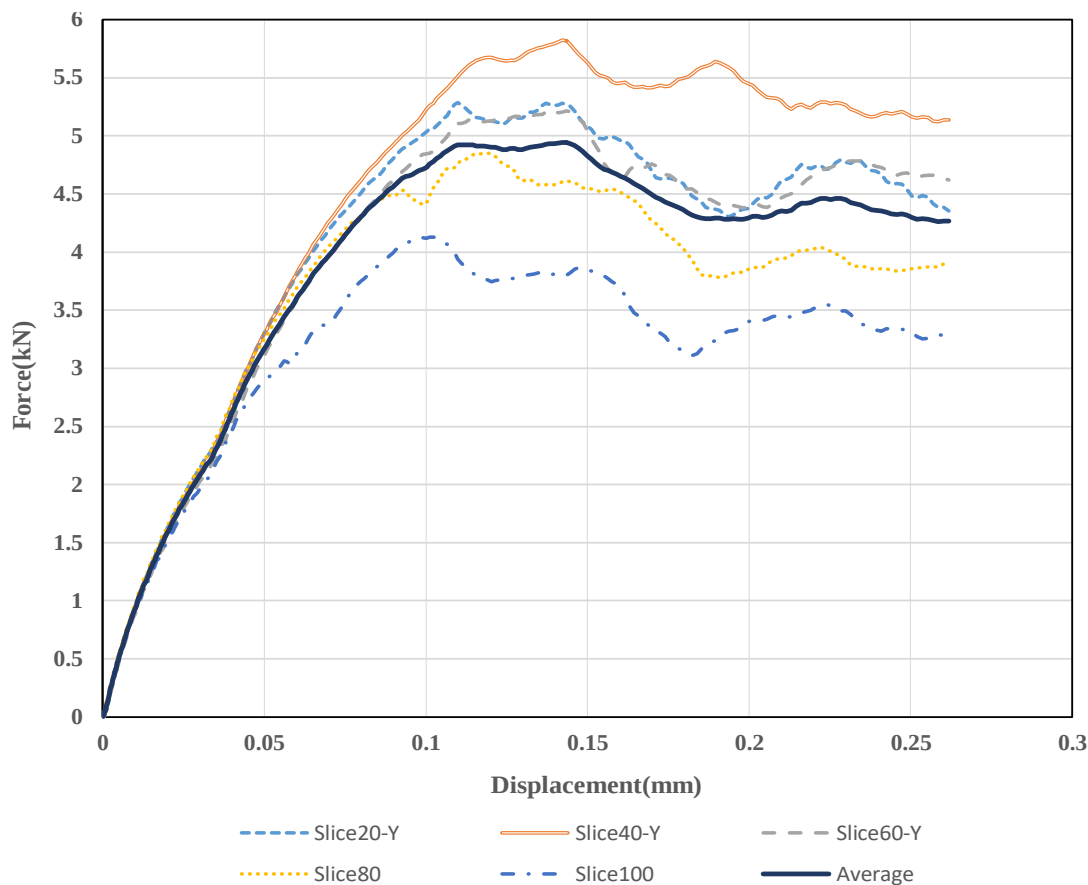


شکل (۲-۶) منحنی نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت y

همچنین در مدل سازی عددی صورت پذیرفته بر روی ۶ برش حاصل از تصاویر سی تی اسکن، مقادیر حاصل برای منحنی نیرو - تغییر مکان به ترتیب در اشکال (۳-۶) و (۴-۶) در جهات x و y نشان داده شده است.



شکل (۳-۶) منحنی‌های نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت X برای ۶ برش نمونه دوبعدی



شکل (۴-۶) منحنی نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت Y برای ۶ برش تصویر

۲-۶-۶- میانگین و انحراف معیار داده‌ها

میانگین یا امید ریاضی یک متغیر تصادفی، مبنایی برای سنجش گرایش مرکزی یک متغیر تصادفی است. بنابراین مقادیر نزدیک به میانگین یا امید ریاضی، محتمل‌ترین حوادثی هستند که ممکن است اتفاق بیفتند. همچنین توسط کمیت انحراف معیار (استاندارد) می‌توان راجع به پراکندگی داده‌ها در اطراف مقدار میانگین قضاوت نمود. در جدول (۱-۶) مقادیر مقاومت فشاری برش‌های سی-تی اسکن حاصل از مدل اجزای محدود در جهات X و Y درج شده است.

جدول (۱-۶) مقادیر حداکثر مقاومت فشاری

شماره برش تصویر	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
مقاومت فشاری ماکزیمم در جهت X (MPa)	۵۰/۲	۵۵/۵	۵۱/۷	۶۰/۷	۵۳/۵	۵۲/۸	۵۱/۸	۴۸/۸	۴۲/۹	۴۶/۵
مقاومت فشاری ماکزیمم در جهت y (MPa)	۴۳/۸	۵۲/۸	۴۹/۴	۵۸/۲	۵۱/۴	۵۲/۲	۵۲/۲	۴۸/۵	۴۰/۸	۴۱/۳

بر اساس روابط (۱) و (۲) مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌ها، در جدول (۲-۶) نشان داده شده است.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (۱-۶)$$

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (۲-۶)$$

جدول (۲-۶) میانگین و انحراف معیار مقاومت فشاری برش‌های سی‌تی اسکن

مقاومت فشاری میانگین در جهت X (Mpa)	مقاومت فشاری میانگین در جهت Y (Mpa)	انحراف معیار در جهت X (درصد)	انحراف معیار در جهت Y (درصد)
۵۱/۴۴	۴۹	۴/۸۸	۵/۵۷

ملاحظه می‌شود در حالت مدل‌سازی دوبعدی نتایج حاصل از بارگذاری در جهات x و y اختلاف آنچنانی ندارد و پراکندگی نتایج کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

۳-۶-۶- ضریب پراکندگی

از تقسیم انحراف معیار نمونه بر میانگین نمونه، ضریب پراکندگی برای مقاومت فشاری برش‌های سی‌تی اسکن به دست می‌آید.

$$V = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

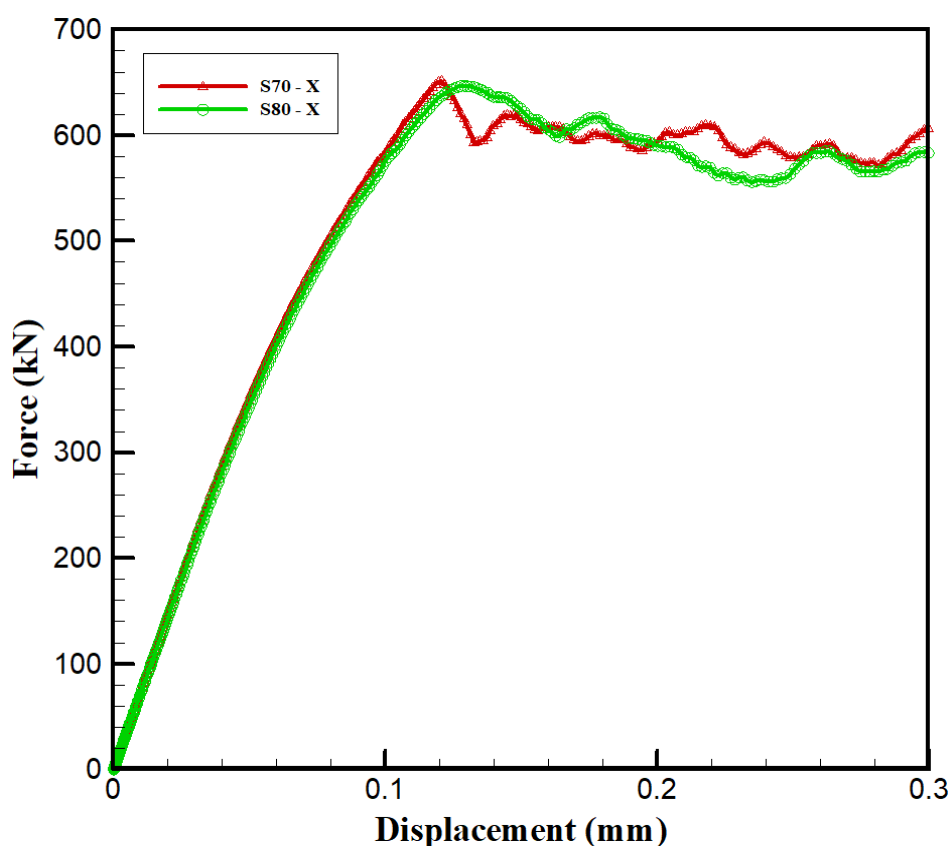
$$V_x = \frac{S_{f_{c_x}}}{\bar{f}_{c_x}} = 4/88 / 0/51 = 9$$

$$V_y = \frac{S_{f_{c_y}}}{\bar{f}_{c_y}} = 5/57 / 0/49 = 11$$

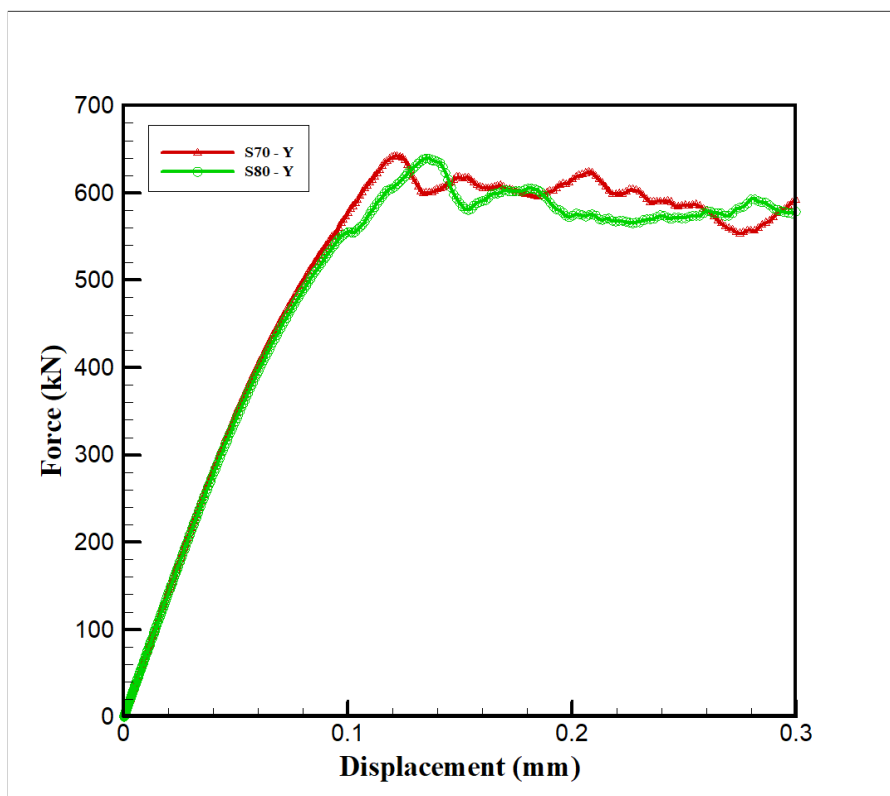
ملاحظه می‌شود ضریب پراکندگی حدود ۱۰٪ می‌باشد.

۴-۶-۶- نتایج تحلیل اجزای محدود دوبعدی نمونه مکعبی نوع دوم

در مدل‌سازی عددی صورت پذیرفته بر روی برش‌های ۷۰ و ۸۰ حاصل از تصاویر سی‌تی اسکن در نمونه مکعبی نوع دوم مقادیر حاصل برای منحنی نیرو - تغییر مکان به ترتیب در اشکال ۹ و ۱۰ در جهات X و Y نشان داده شده است. در جدول (۳-۶) مقادیر حداکثر نیروهای برش‌های ۷۰ و ۸۰ حاصل از مدل دوبعدی اجزای محدود در جهات X و Y با مقدار نیروی به‌دست آمده از آزمایشگاه مقایسه شده است.



شکل (۵-۶) منحنی نیرو - تغییر مکان به‌دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰ در جهت X



شکل (۶-۶) منحنی نیرو - تغییر مکان به دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰ در جهت y

جدول (۳-۶) حداکثر نیروهای به دست آمده از مدل عددی برش‌های تصویر ۷۰ و ۸۰

شماره برش تصویر	۷۰	۸۰
حداکثر نیروی فشاری در جهت x (kN)	۶۴۸	۶۴۶
حداکثر نیروی فشاری در جهت y (kN)	۶۴۲	۶۳۹

جدول (۴-۶) مقایسه نیروهای به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه مکعبی نوع دوم

نمونه	نیرو (kN)		
	آزمایشگاهی	میانگین مدل عددی برش های تصویر ۷۰ و ۸۰	اختلاف (%)
مکعبی نوع دوم (۱۰۰×۱۰۰ mm)	۶۵۳	۶۴۳	۱/۵

ملاحظه می‌شود در حالت مدل‌سازی دوبعدی نتایج حاصل از بارگذاری در جهات x و y اختلاف آنچنانی ندارد و اختلاف نیروی به‌دست آمده از مدل برش‌های مرکزی نمونه با نیروی به‌دست آمده آزمایشگاه ۱/۵٪ است.

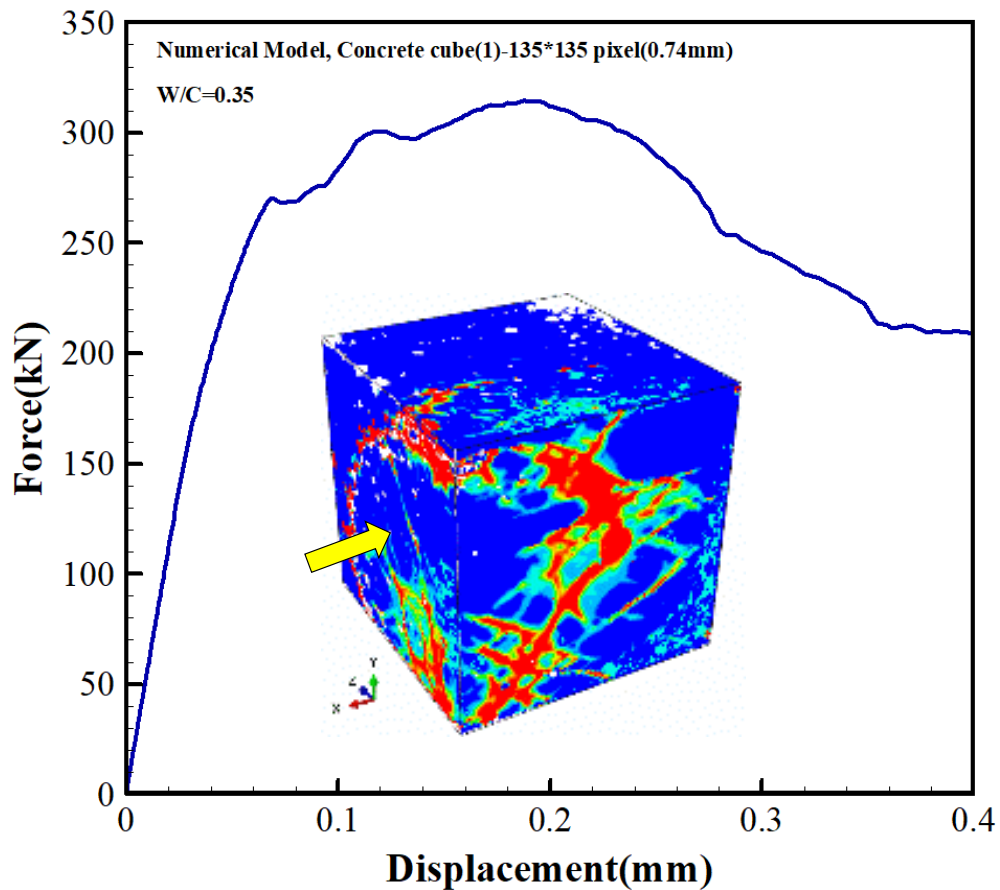
۶-۶-۵- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی نمونه‌ها

آزمایش مقاومت فشاری برای مدل اجزای محدود نمونه مکعبی نوع اول، مکعبی نوع دوم و استوانه شبیه‌سازی شده است که در آن بار به‌صورت جابجایی‌های عمودی به همه گره‌های قسمت بالای نمونه اعمال شده است درحالی‌که قسمت پایین نمونه ثابت و تغییر شکل جانبی اجازه داده شده است. از حل گر صریح دینامیکی آباکوس برای تحلیل مدل استفاده شده است.

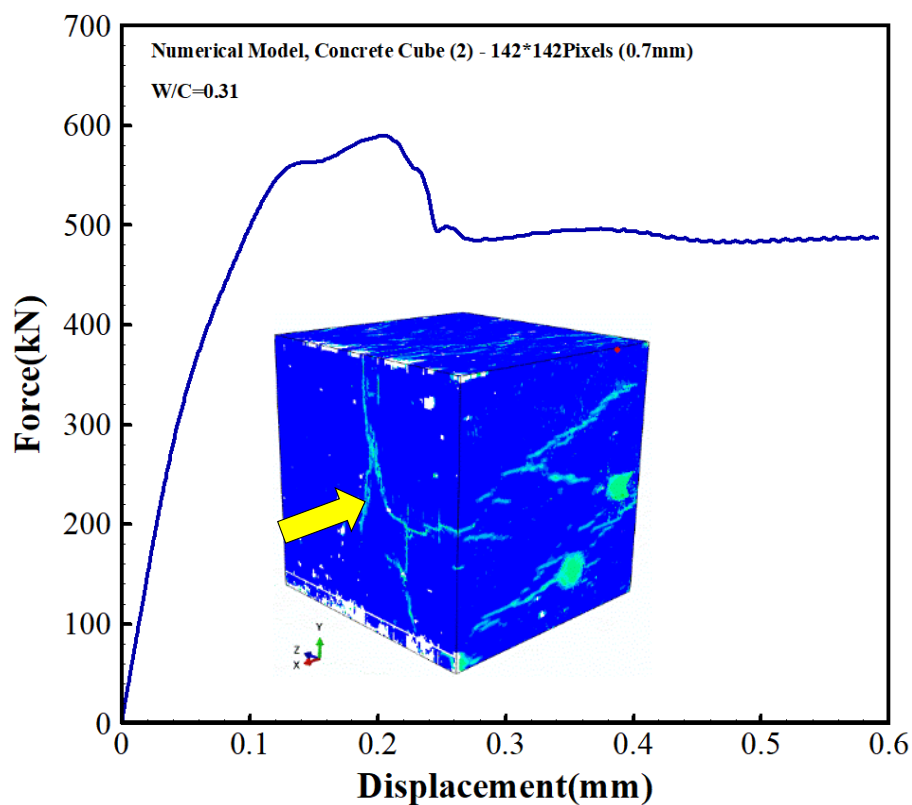
بارگذاری برای نمونه‌های مکعبی در جهت x و برای نمونه استوانه‌ای در جهت z انجام شده است. منحنی‌های به‌دست آمده از تحلیل المان محدود برای بارگذاری در جهت‌های مربوطه به ترتیب در شکل‌های (۶-۲۳) تا (۶-۲۶) نشان داده شده است. نیروی حداکثر در جهت x برای نمونه‌های مکعبی نوع اول و دوم به ترتیب برابر با $314/45 \text{ kN}$ و $589/36 \text{ kN}$ به دست آمده است. نیروی حداکثر در جهت z برای نمونه استوانه‌ای برابر با $353/76 \text{ kN}$ به دست آمده است. به این ترتیب مقاومت فشاری در نمونه مکعبی نوع اول برابر $31/44 \text{ MPa}$ و برای نمونه مکعبی نوع دوم و استوانه‌ای به ترتیب برابر $58/93 \text{ MPa}$ و 45 MPa به دست آمده است.

همچنین منحنی‌های نیرو - جابجایی و تنش - کرنش نمونه سی‌تی اسکن شده، میانگین نمونه‌ها در آزمایشگاه، منحنی‌های مربوط به مدل‌های عددی بر اساس آباکوس و همچنین مقایسه بین آن‌ها در شکل‌های (۶-۷) تا (۶-۱۵) نشان داده شده است. از طرفی مقادیر نیرو و مقاومت فشاری به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی به ترتیب در جداول (۶-۵) و (۶-۶) مقایسه شده است. اختلاف مقاومت فشاری مدل عددی با مقادیر مقاومت نمونه آزمایشگاهی که سی‌تی اسکن شده و میانگین نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی نوع اول به ترتیب برابر $8/8\%$ و $7/45\%$ ، اختلاف مقاومت

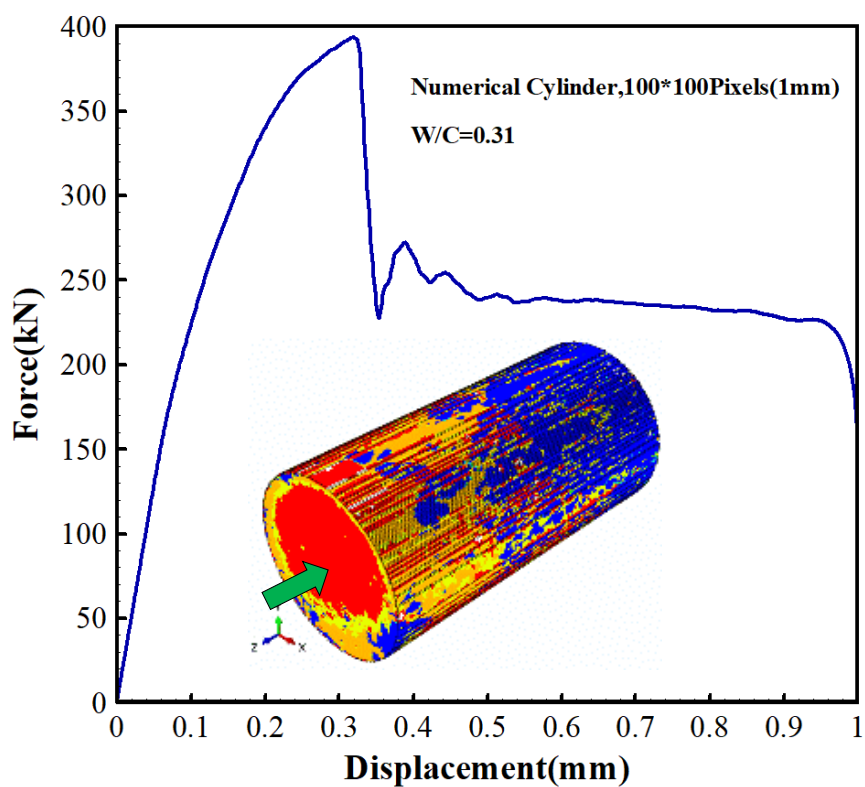
فشاری مدل عددی با مقادیر مقاومت فشاری نمونه آزمایشگاهی که سی‌تی اسکن شده و میانگین نمونه‌های آزمایشگاهی مکعبی نوع دوم به ترتیب برابر $9/7\%$ و $7/7\%$ و این مقادیر برای نمونه استوانه-ای به ترتیب برابر 8% و $7/6\%$ مطابق با جداول ذکر شده به‌دست آمده است.



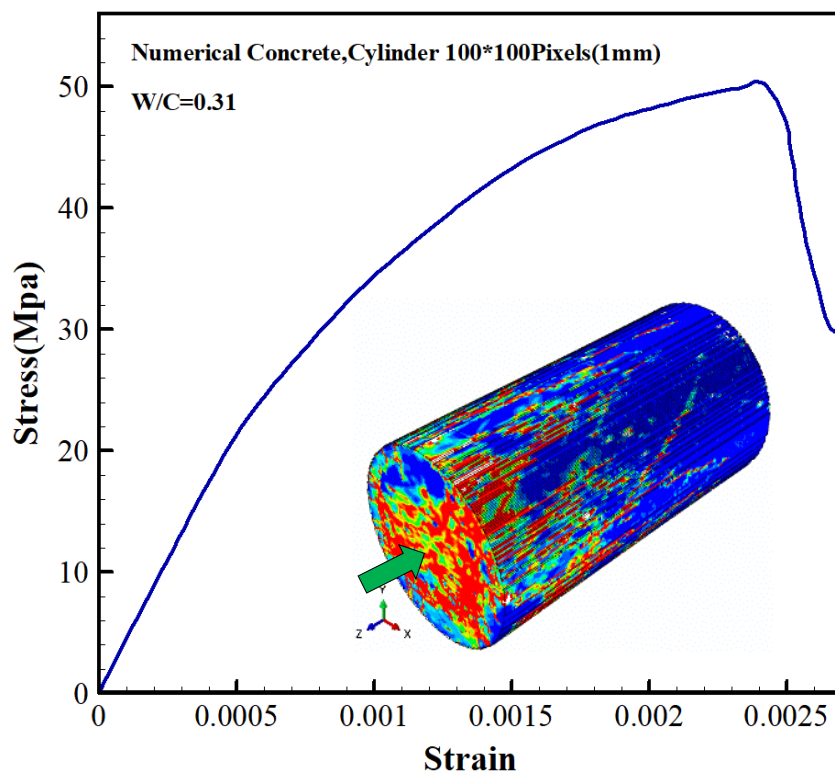
شکل (۶-۷) منحنی نیرو – جابجایی به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه مکعبی نوع اول



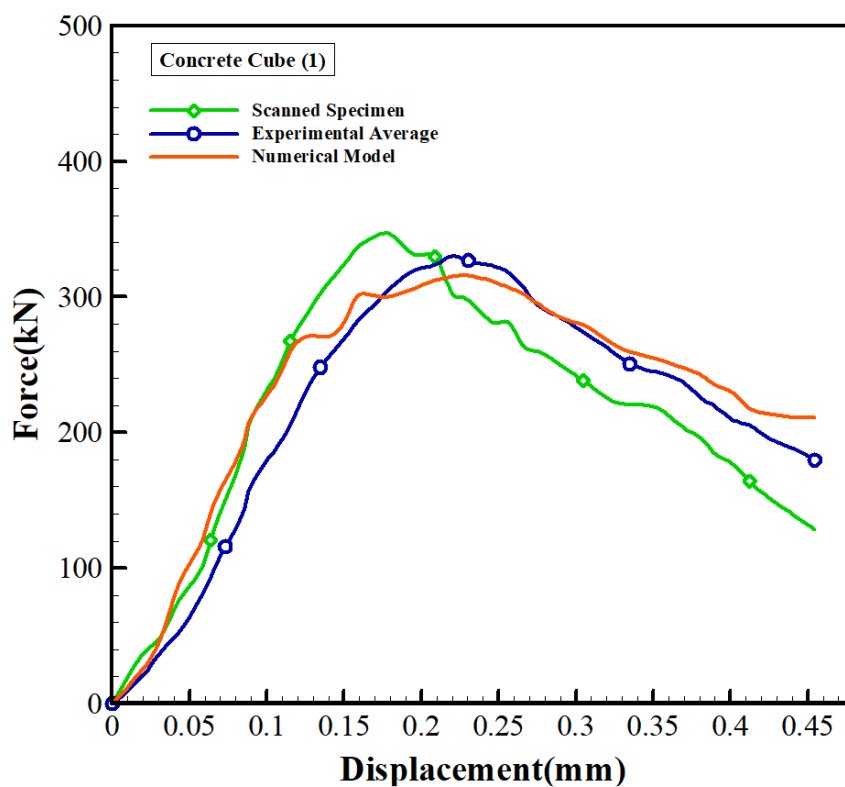
شکل (۸-۶) منحنی نیرو - جابجایی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه مکعبی نوع دوم



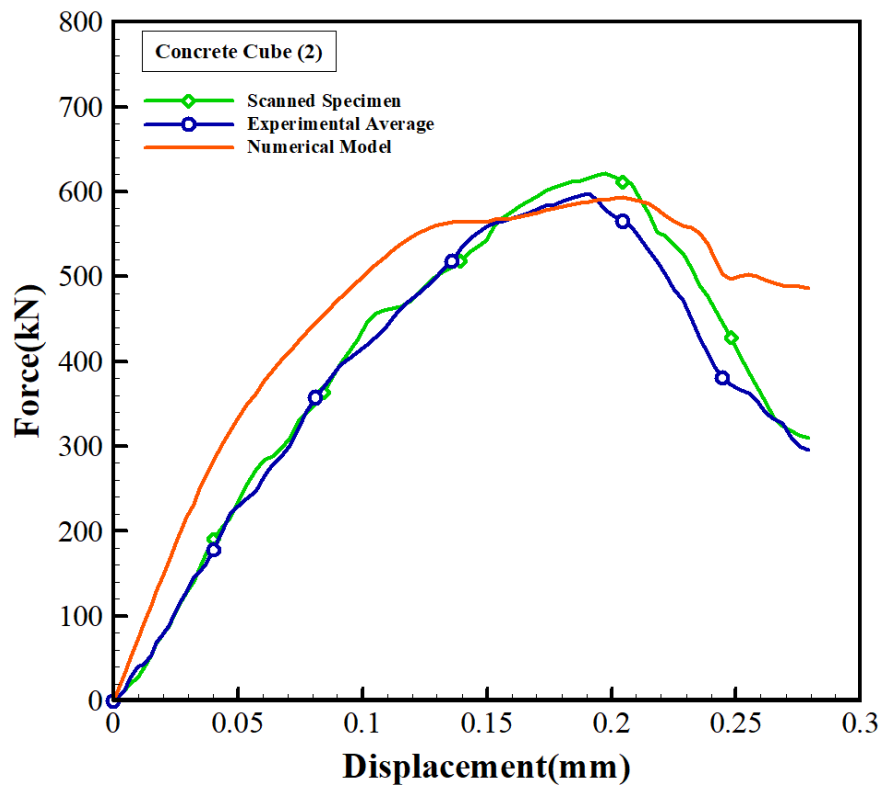
شکل (۹-۶) منحنی نیرو - جابجایی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه استوانه‌ای



شکل (۶-۱۰) منحنی تنش - کرنش به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای نمونه استوانه‌ای

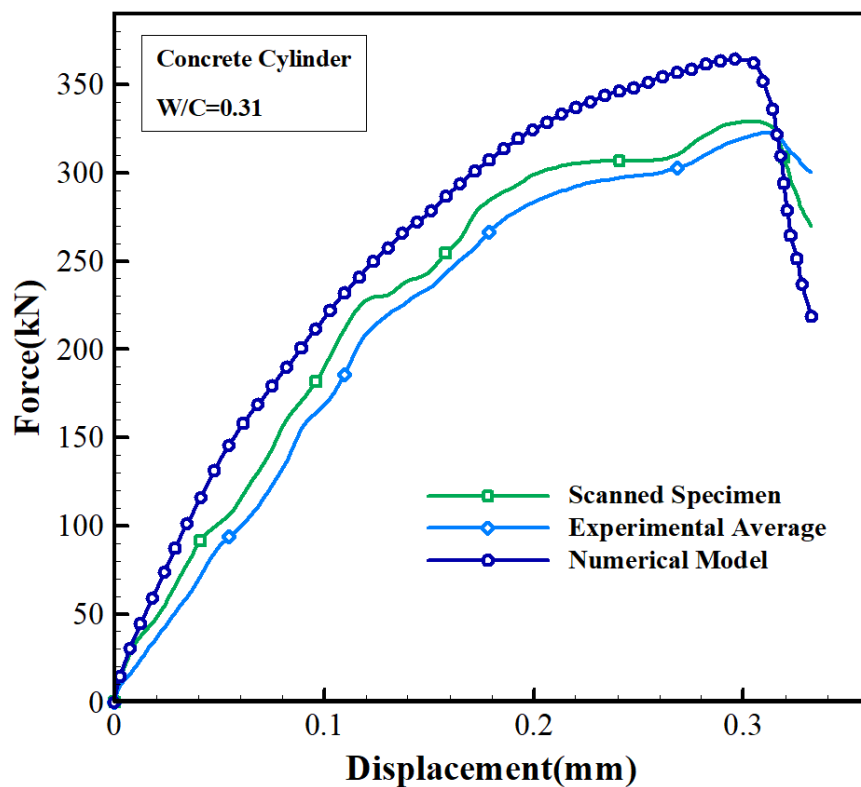


شکل (۶-۱۱) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاه برای بتن مکعبی نوع اول



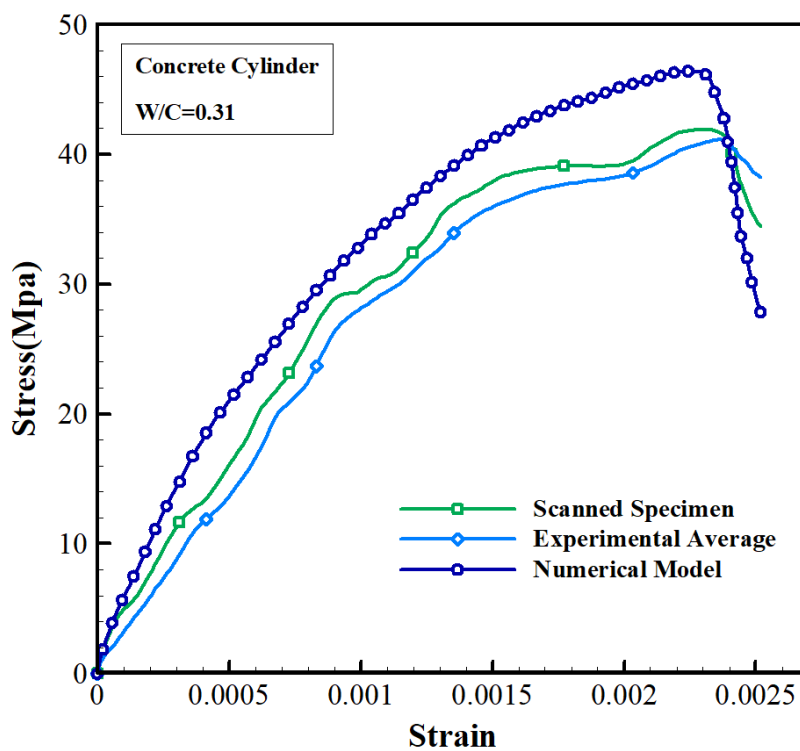
شکل (۶-۱۲) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به دست آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه (بتن مکعبی نوع

دوم)

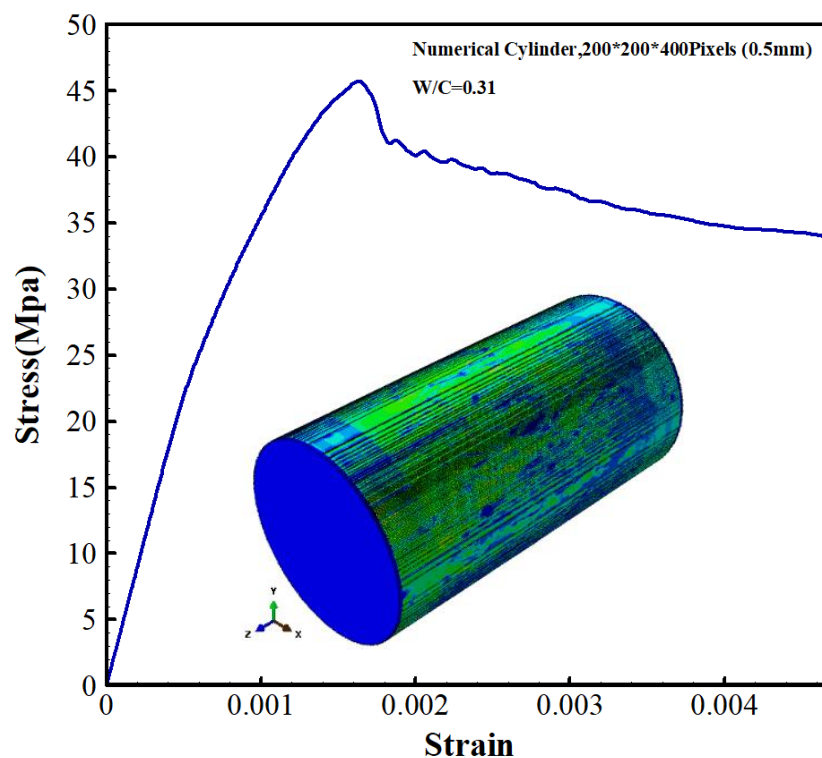


شکل (۶-۱۳) مقایسه منحنی‌های نیرو - جابجایی به‌دست‌آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه‌ی

استوانه‌ای



شکل (۶-۱۴) مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش به‌دست‌آمده از تحلیل مدل عددی و آزمایشگاه برای نمونه استوانه‌ای



شکل (۶-۱۵) منحنی تنش - کرنش به دست آمده از نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰Pixels)

جدول (۶-۵) نتایج حداکثر نیروی فشاری به دست آمده از آزمایشگاه و مدل عددی

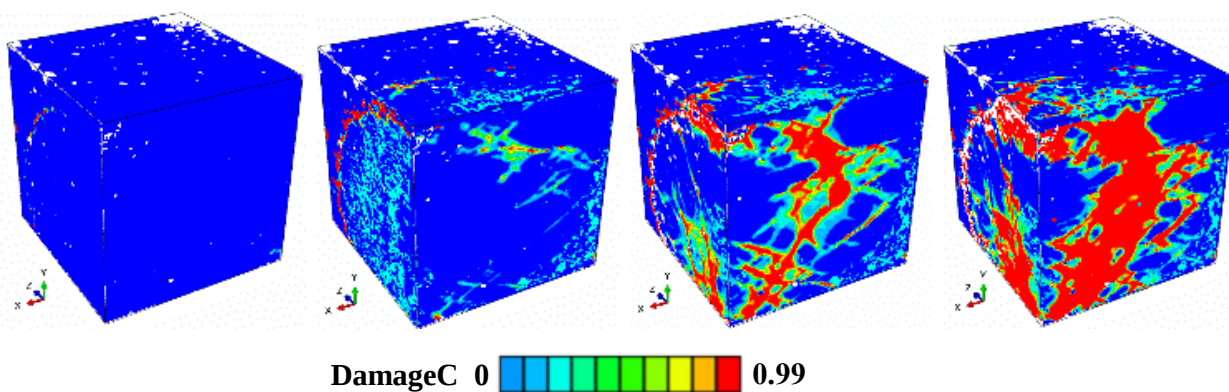
نیرو (kN)					نمونه
اختلاف مدل عددی با میانگین نمونه‌ها (%)	اختلاف مدل عددی با نمونه اسکن شده (%)	مدل عددی	آزمایشگاهی		
			میانگین	اسکن شده	
۷/۴۵	۸/۸	۳۱۴/۴۵	۳۳۹/۷۷	۳۴۴/۸۵	مکعبی نوع اول (۱۰۰×۱۰۰mm)
۷/۷	۹/۷	۵۸۹/۳۶	۶۳۸/۵۵	۶۵۳	مکعبی نوع دوم (۱۰۰×۱۰۰mm)
۷/۸۵	۸	۳۵۳/۷۶	۳۲۸	۳۲۷/۵۵	استوانه (۱۰۰×۲۰۰mm)

جدول (۶-۶) نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایشگاه و مدل عددی

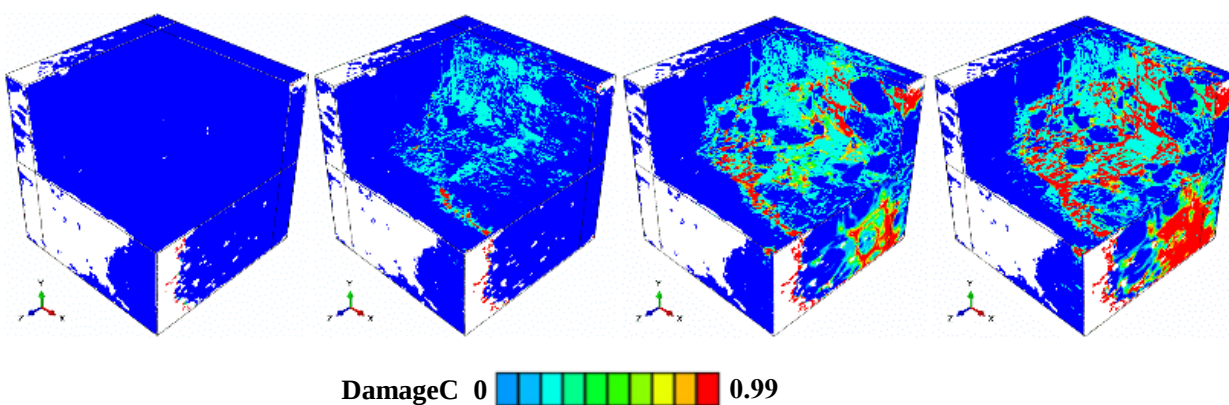
مقاومت فشاری (MPa)					نمونه
اختلاف مدل عددی با میانگین نمونه‌ها (%)	اختلاف مدل عددی با نمونه اسکن شده (%)	مدل عددی	آزمایشگاهی		
			میانگین	اسکن شده	
۷/۴۵	۸/۸	۳۱/۴۴	۳۳/۹۷	۳۴/۴۸	مکعبی نوع اول (۱۰۰×۱۰۰mm)
۷/۷	۹/۷	۵۸/۹۳	۶۳/۸۵	۶۵/۳	مکعبی نوع دوم (۱۰۰×۱۰۰mm)
۷/۶	۸	۴۵	۴۱/۸	۴۱/۷	استوانه‌ای (۱۰۰×۲۰۰mm)

۶-۶-۶- بررسی خرابی فشاری و خرابی کششی نمونه‌ها

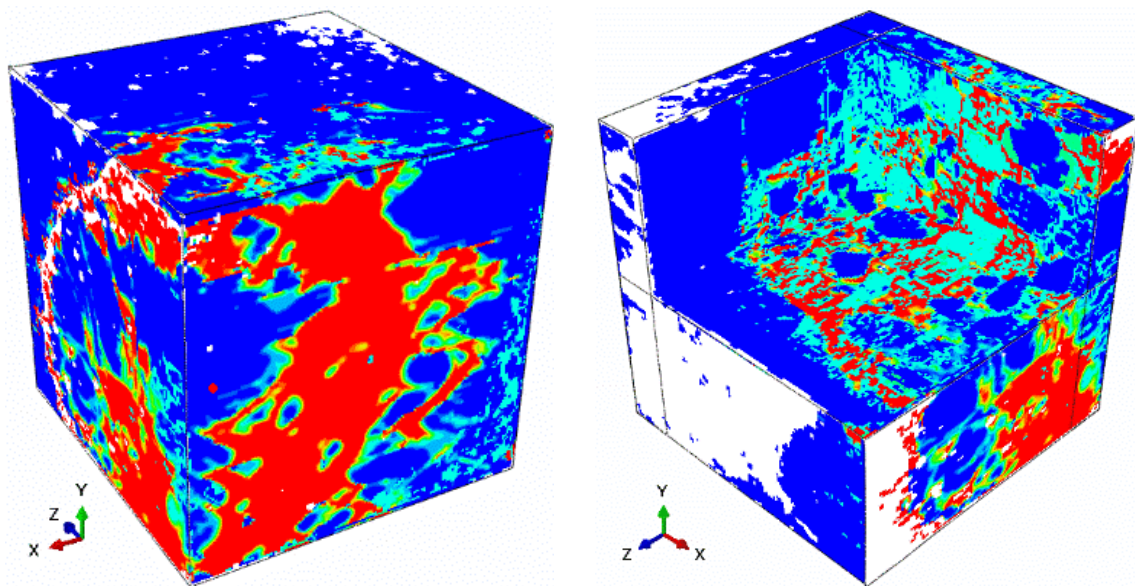
۶-۶-۶-۱- خرابی فشاری (Damage C) در نمونه مکعبی نوع اول



شکل (۶-۱۶) نمای خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X

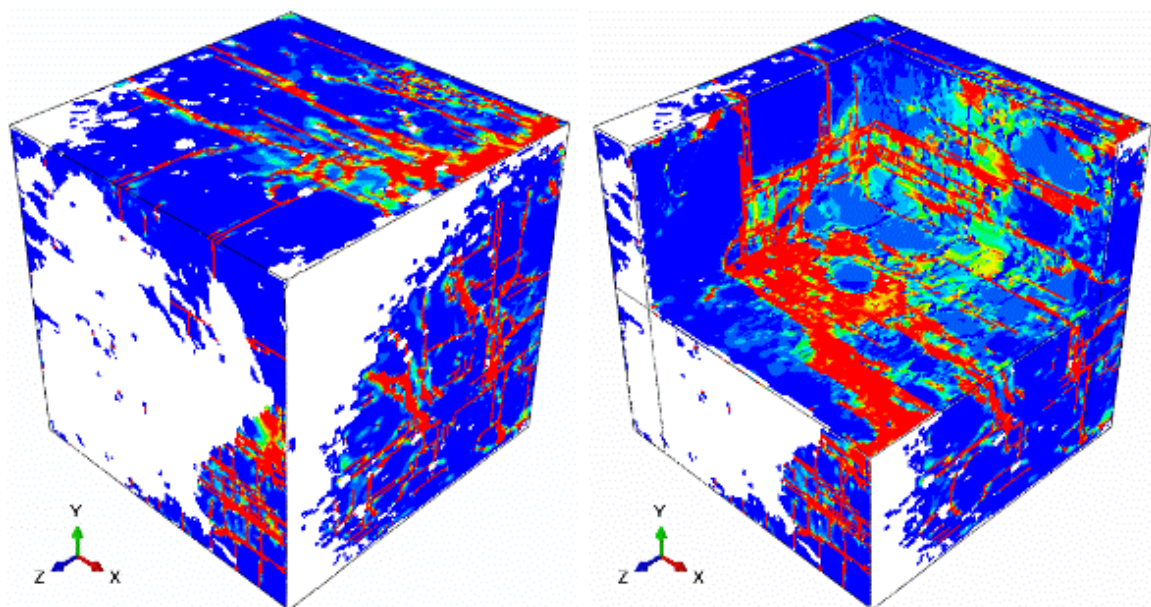


شکل (۶-۱۷) خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X



شکل (۶-۱۸) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت X

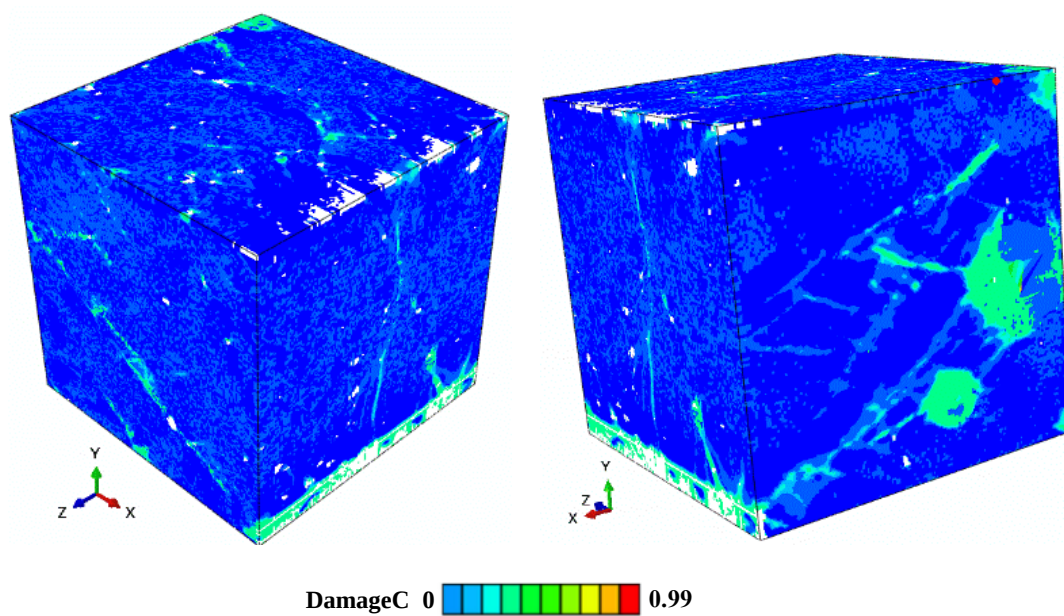
۶-۶-۶-۲- خرابی کششی (Damage T) در نمونه مکعبی نوع اول



DamageT 0  0.99

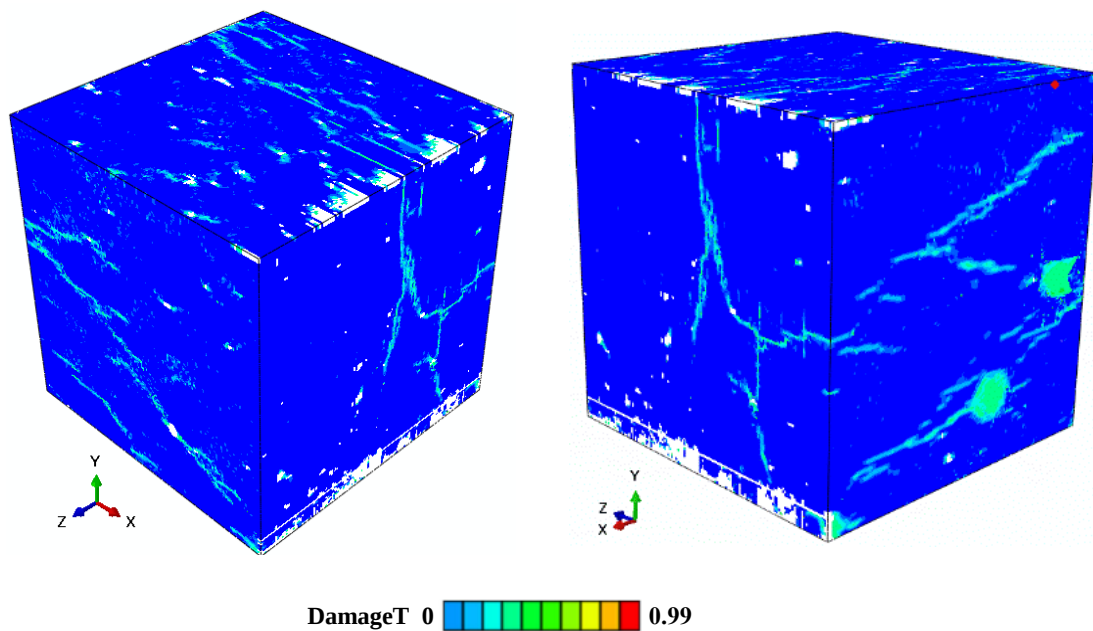
شکل (۶-۱۹) الگوی ترک در نمونه مکعبی نوع اول برای بارگذاری در جهت X

۳-۶-۶-۶- خرابی فشاری (Damage C) در نمونه مکعبی نوع دوم



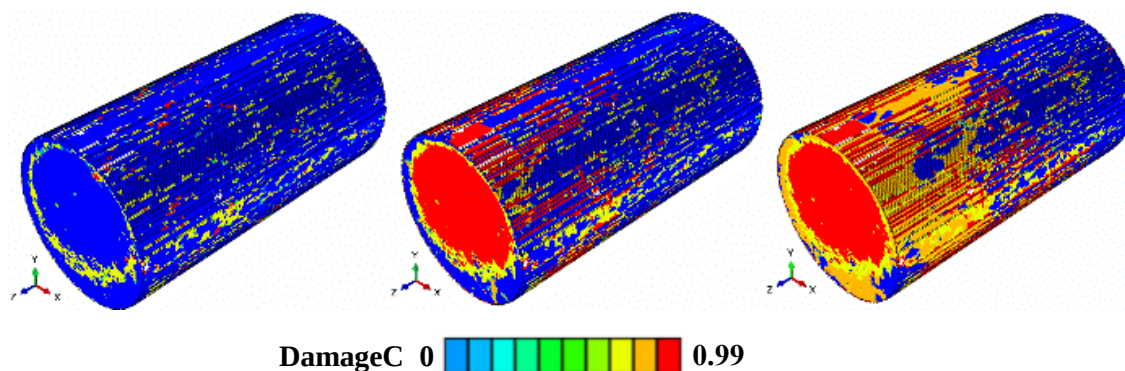
شکل (۲۰-۶) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت X

۴-۶-۶-۶- خرابی کششی (Damage T) در نمونه مکعبی نوع دوم

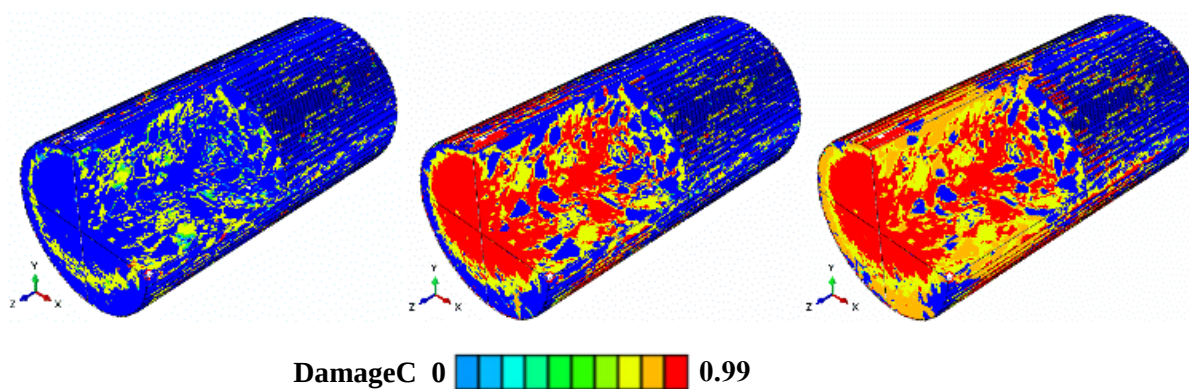


شکل (۲۱-۶) الگوی ترک برای بارگذاری در جهت X

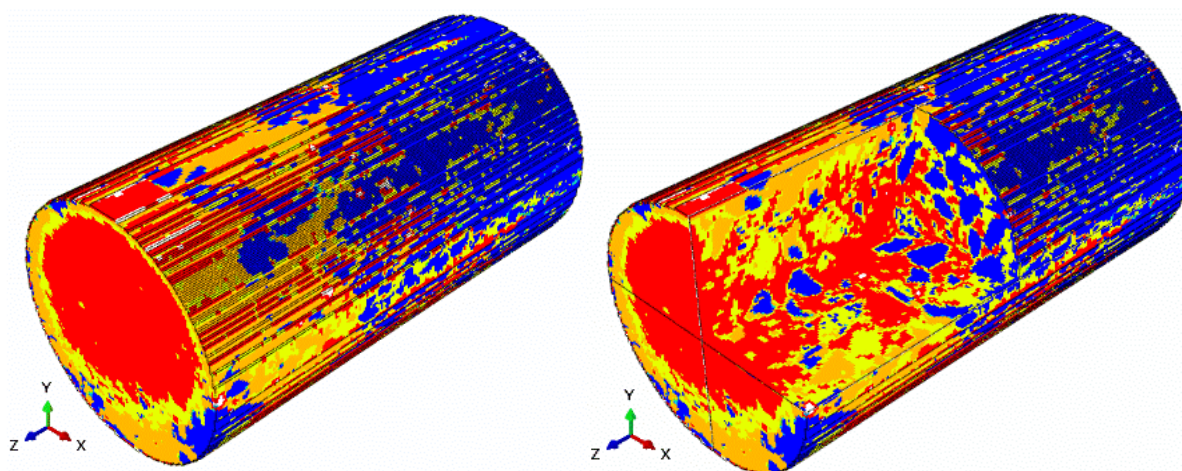
۵-۶-۶-۶- خرابی فشاری (Damage C) نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت z



شکل (۶-۲۲) نمای خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت z

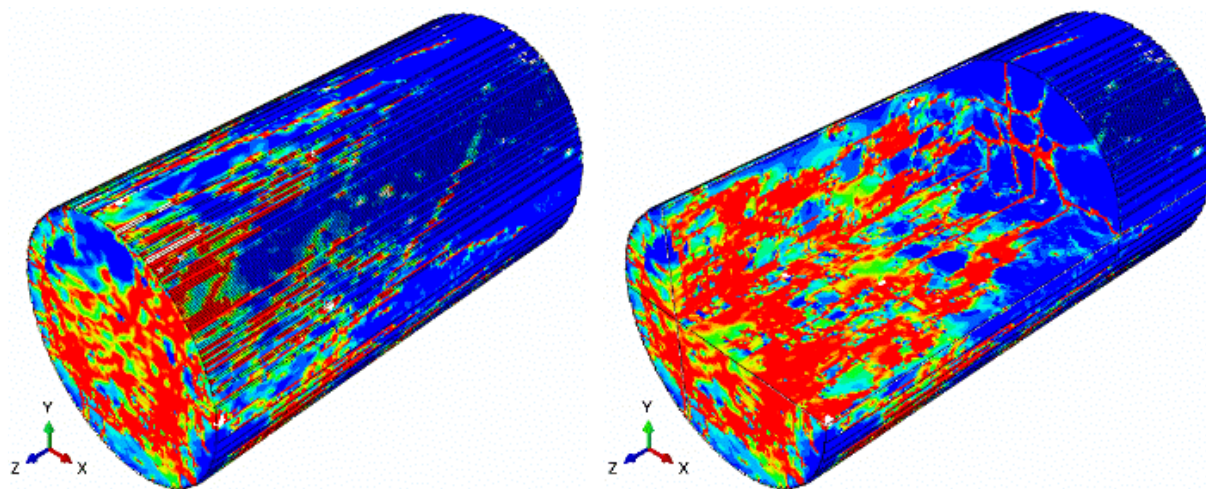


شکل (۶-۲۳) خرابی اولیه و پیشرفت آن در نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت z



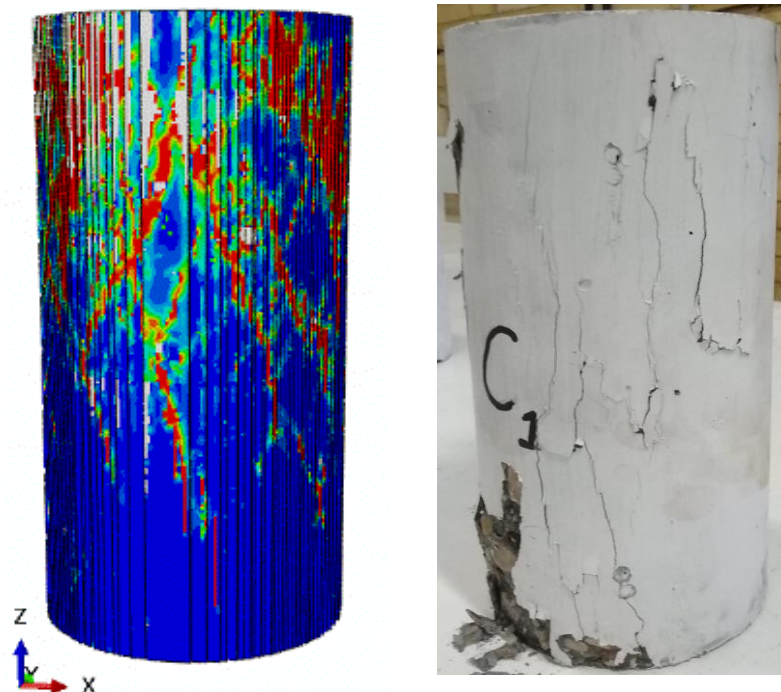
شکل (۶-۲۴) الگوی شکست برای بارگذاری در جهت z

۶-۶-۶-۶- خرابی کششی (Damage T) نمونه استوانه‌ای برای بارگذاری در جهت Z



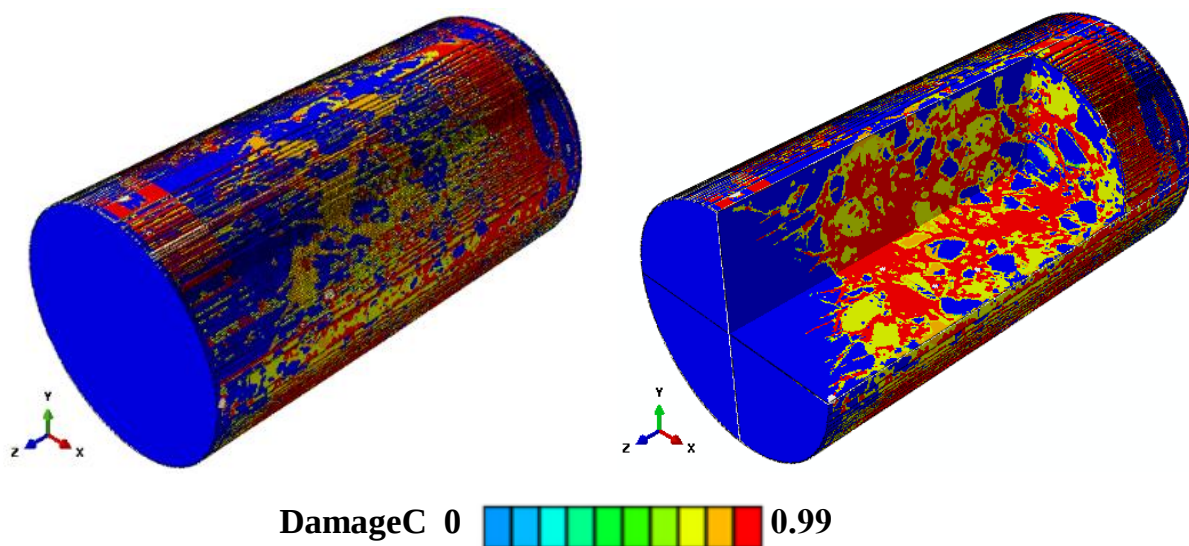
DamageT 0 0.99

شکل (۶-۲۵) الگوی ترک برای بارگذاری در جهت Z

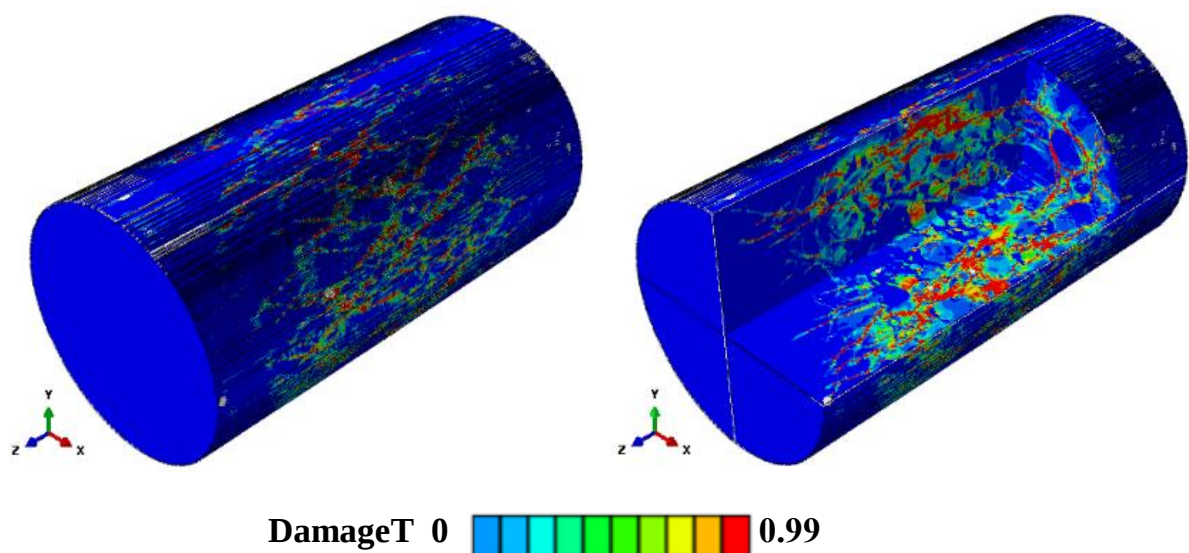


شکل (۶-۲۶) مقایسه الگوی ترک مدل عددی و نمونه شکسته شده در آزمایشگاه

۶-۶-۷- الگوی شکست و ترک در مدل نمونه استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰pixels-0.5mm)



شکل (۶-۲۷) الگوی شکست در نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z



شکل (۶-۲۸) الگوی ترک در نمونه بتن استوانه‌ای (۲۰۰×۲۰۰×۴۰۰ Pixels) برای بارگذاری در جهت Z

فصل هفتم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا نمونه‌های بتن آماده شد، سپس سی‌تی اسکن انجام پذیرفت و پس از ذخیره سازی داده‌های تصاویر، پردازش‌های لازم بر روی آن‌ها صورت گرفت و در نهایت تحلیل المان محدود انجام شد.

بر اساس نتایج حاصل از داده‌های آماری ۱۰ برش دوبعدی سی‌تی اسکن ملاحظه می‌شود که با پراکندگی نسبتاً کم (ضریب پراکندگی حدود ۱۰٪) مواجه هستیم و کسب مقاومت فشاری از نمونه دوبعدی زیاد وابسته به محل برش نیست. ضمناً نتایج مقاومت فشاری، وابستگی زیادی به جهت اعمال بار در راستاهای x و y ندارد. همچنین نتایج دوبعدی نشان می‌دهد که با اعمال بار در محیط دوبعدی المان محدود، می‌توان به نتایج نزدیک به آزمایشگاه دست یافت.

نتایج سه‌بعدی نشان می‌دهد که استفاده از پردازش تصاویر در به دست آوردن هندسه دقیق بتن غیر همگن کاملاً موفقیت آمیز است و با اعمال بار در محیط سه‌بعدی المان محدود، می‌توان به نتایج نزدیک به آزمایشگاه دست یافت. بر اساس نتایج حاصل از سه مدل عددی ملاحظه می‌شود که اختلاف نیروها و مقاومت فشاری آن‌ها با نتایج به دست آمده از آزمایشگاه نسبتاً کم است.

به این ترتیب می‌توان امیدوار بود که با توجه به سرعت بالای نسل‌های جدید سیستم‌های کامپیوتری و همچنین کیفیت تصاویر حاصل از دستگاه‌های سی‌تی اسکن، بتوان از این روش برای اهداف کنترل غیر مخرب کیفیت و ضمانت کیفیت در تکنولوژی بتن و صنعت ساختمان استفاده نمود.

۷-۲- پیشنهادات

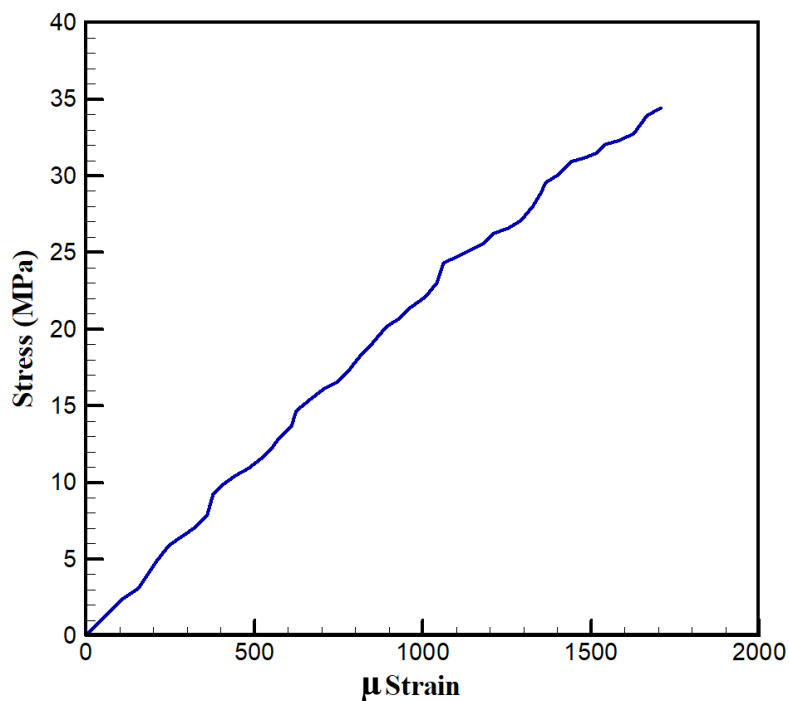
- در این مطالعه اثر توزیع و اندازه و شکل سنگدانه بر روی مقاومت فشاری به صورت آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود آن نیاز به بررسی دارد.
- در صورت امکان از شدت‌های بالاتری برای اشعه ایکس برای دستیابی به تصاویر با رزولوشن بالاتر استفاده شود.
- در مدل اجزای محدود یکی از موضوعات تعداد المان‌ها و گره‌ها است. رویکرد دیگر کاهش تعداد المان‌ها بدون تغییر در نتایج تحلیل است که نیاز به مطالعه دارد.
- در این مطالعه نمونه‌های مکعبی $100 \times 100 \text{ mm}^2$ و استوانه‌ای $100 \times 200 \text{ mm}^2$ بررسی شده است، در مطالعات بعدی بهتر است از نمونه‌های استاندارد برای تعیین مقاومت فشاری استفاده گردد.
- مقایسه نتایج مزو مقیاس سایر نمونه‌های بتنی (از قبیل تیر، ستون و غیره) در آزمایشگاه با مدل‌های عددی
- در این مطالعه از اثر ناحیه انتقالی (ITZ) صرف نظر شده است، رویکرد دیگر بررسی اثر این ناحیه بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن می‌باشد
- در این مطالعه دو نوع فاز سنگدانه تعریف شده است در مطالعات بعدی می‌توان از انواع دیگر سنگدانه استفاده نمود.
- در این مطالعه از بتن معمولی استفاده شده است، رویکرد دیگر استفاده از بتن پر مقاومت، بتن مسلح و غیره و بررسی نتایج حاصل از آزمایشگاه با مدل اجزای محدود است.

- در این مطالعه در تعریف خسارت فشاری و کششی برای فازهای ملات و سنگدانه از مدل CDP استفاده شده است که می‌توان از مدل‌های رفتاری دیگری برای فاز سنگدانه استفاده نموده و نتایج مقایسه گردد.

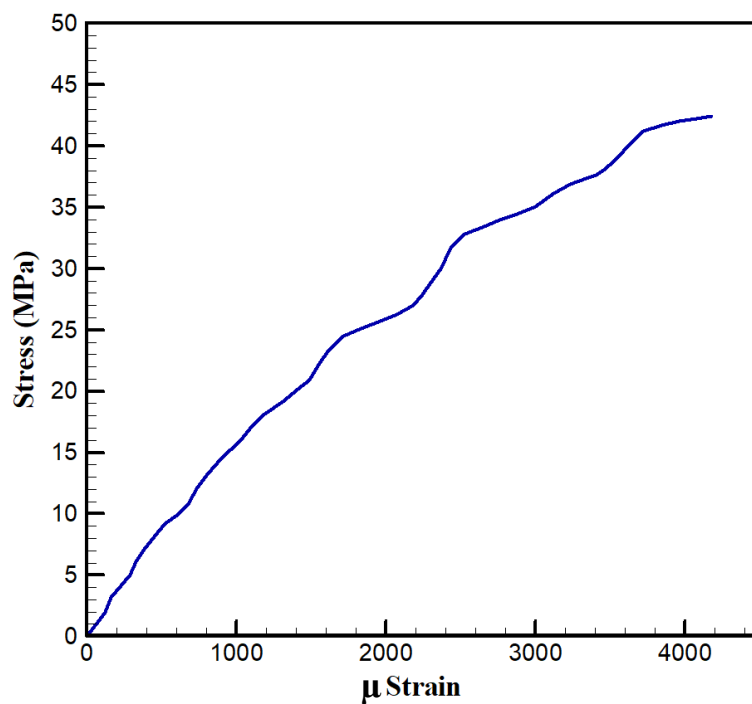
- در این مطالعه برای دستیابی به تصویر سه‌بعدی بتن از روش برهم‌نهی تصاویر دوبعدی استفاده شده که منجر به تولید پیکسل‌های حجمی نشده است، در مطالعات بعدی می‌توان مدل سه‌بعدی بر پایه این نوع از پیکسل‌ها مورد بررسی قرار گیرد و نتایج مقایسه شوند.

پیوست‌ها

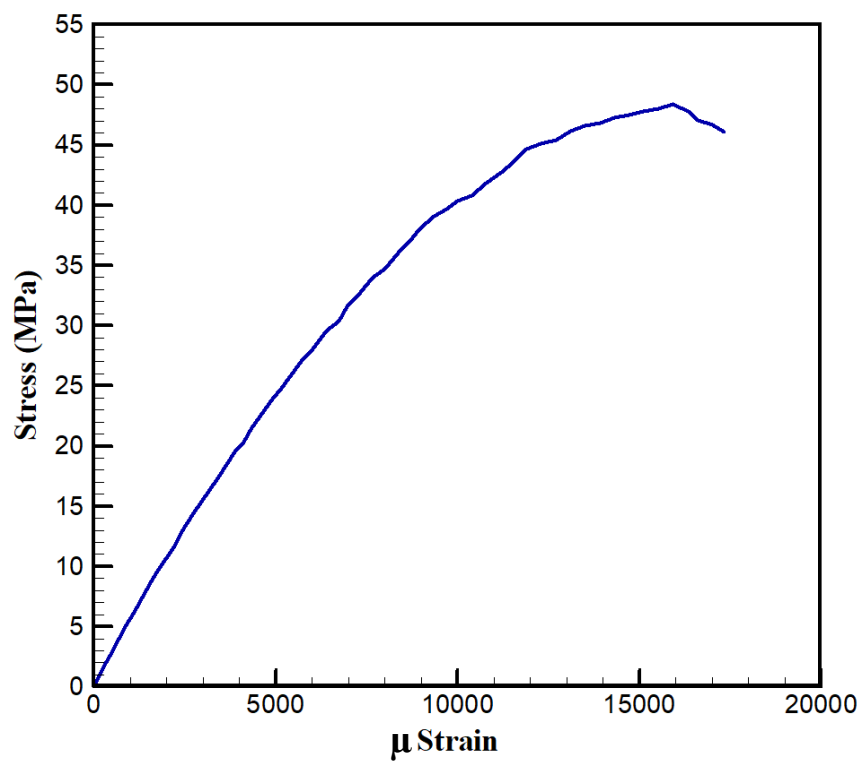
پیوست ۱: منحنی‌های تنش - کرنش به‌دست آمده از کرنش سنج‌ها



شکل (۱) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه‌ای شماره (۱)



شکل (۲) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه‌ای شماره (۲)



شکل (۳) منحنی تنش - کرنش نمونه ملات استوانه‌ای شماره (۳)

پیوست ۲: داده‌های ثبت شده در دیتا لاگر و کامپیوتر برای نمونه‌های ملات نوع اول

نتایج به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها برای ملات M_1 ($W/C=0.35$)

LVDT-01	LVDT-02	ST Gage-01	ST Gage-02
L1 (mm)	L2 (mm)	μStrain	μStrain
0.005	0	28.17	159.62
0.01	0.005	56.34	197.18
0.005	0.005	14.08	89.2
0.005	0	14.08	65.73
0	0	9.39	32.86
0	0	4.69	-4.69
0	0	0	-46.95
0	0	-14.08	-112.68
0	0	-23.47	-159.62
0	0	-28.17	-197.18
0	-0.005	-37.56	-258.22
0	-0.005	-56.34	-333.33
0	-0.005	-75.12	-403.76
-0.005	-0.01	-98.59	-492.96
-0.005	-0.01	-126.76	-582.16
-0.005	-0.01	-169.01	-690.14
-0.005	-0.015	-215.96	-802.82
-0.005	-0.02	-244.13	-873.24
-0.005	-0.02	-286.38	-985.92
-0.01	-0.025	-328.64	-1079.81
-0.01	-0.025	-380.28	-1197.18
-0.01	-0.03	-446.01	-1314.55
-0.01	-0.035	-516.43	-1460.09
-0.01	-0.045	-619.72	-1671.36
-0.015	-0.045	-718.31	-1821.6
-0.015	-0.05	-774.65	-1910.8
-0.015	-0.055	-840.38	-2009.39
-0.015	-0.055	-906.1	-2131.46
-0.02	-0.065	-1032.86	-2319.25
-0.02	-0.07	-1206.57	-2558.69
-0.025	-0.075	-1328.64	-2723
-0.03	-0.08	-1408.45	-2821.6
-0.03	-0.08	-1488.26	-2924.88
-0.03	-0.085	-1615.02	-3107.98
-0.035	-0.095	-1779.34	-3309.86
-0.04	-0.1	-1934.27	-3507.04

-0.04	-0.105	-2061.03	-3666.67
-0.045	-0.11	-2225.35	-3877.93
-0.05	-0.115	-2347.42	-4023.47
-0.055	-0.12	-2450.7	-4145.54
-0.055	-0.125	-2568.07	-4309.86
-0.06	-0.13	-2732.39	-4497.65
-0.065	-0.14	-2934.27	-4751.17
-0.07	-0.145	-3084.51	-4929.57
-0.07	-0.15	-3253.52	-5126.76
-0.075	-0.155	-3370.89	-5253.52
-0.08	-0.16	-3478.87	-5417.84
-0.085	-0.165	-3723	-5713.61
-0.09	-0.175	-3920.19	-5948.36
-0.09	-0.18	-4000	-6079.81
-0.095	-0.185	-4183.1	-6342.72
-0.1	-0.19	-4305.16	-6544.6
-0.1	-0.195	-4403.75	-6737.09
-0.105	-0.2	-4553.99	-6995.3
-0.11	-0.21	-4821.59	-7413.14
-0.115	-0.22	-5056.34	-7732.39
-0.115	-0.23	-5215.96	-7934.27
-0.12	-0.235	-5413.14	-8140.84
-0.12	-0.245	-5553.99	-8328.63
-0.125	-0.25	-5718.31	-8516.43
-0.125	-0.26	-5859.15	-8676.05
-0.125	-0.27	-6065.73	-8924.88
-0.13	-0.28	-6323.94	-9225.35
-0.13	-0.29	-6474.18	-9431.92
-0.125	-0.305	-6699.53	-9793.42
-0.125	-0.325	-6990.61	-169.01
-0.115	-0.34	-7300.47	-502.34
-0.105	-0.36	-7450.7	-497.65
-0.075	-0.385	-7455.4	-9558.68
-0.055	-0.385	-7084.5	-8624.41
-0.045	-0.39	-6976.52	-8347.41
-0.045	-0.39	-6615.02	-7854.46
-0.055	-0.34	-6272.3	-7436.62
-0.06	-0.335	-6286.38	-7319.25
-0.06	-0.33	-6328.64	-7300.47
-0.06	-0.33	-6389.67	-7234.74
-0.06	-0.325	-6422.54	-7244.13
-0.06	-0.33	-6568.07	-7192.49
-0.055	-0.335	-6666.66	-7220.66
-0.055	-0.335	-6807.51	-7215.96
-0.055	-0.34	-6906.1	-7262.91

نتایج به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها برای ملات M_2 ($W/C=0.35$)

LVDT-01	LVDT-02	ST Gage-01	ST Gage-02
L1 (mm)	L2 (mm)	μStrain	μStrain
0	0	-18.78	-4.69
0	0	-14.08	-4.69
0	0	-14.08	-4.69
0	0	-32.86	-28.17
0	-0.005	-140.84	-117.37
0	-0.005	-154.93	-131.46
0	-0.005	-164.32	-140.84
0	-0.01	-169.01	-145.54
0	-0.01	-178.4	-154.93
0	-0.01	-192.49	-164.32
0	-0.01	-201.88	-178.4
0	-0.01	-215.96	-192.49
0	-0.015	-225.35	-201.88
0	-0.015	-239.44	-215.96
0.005	-0.015	-258.22	-234.74
0.005	-0.02	-277	-248.83
0.005	-0.015	-291.08	-262.91
0.005	-0.02	-309.86	-277
0.005	-0.02	-323.94	-295.77
0.005	-0.02	-347.42	-319.25
0.005	-0.025	-375.59	-347.42
0.005	-0.025	-408.45	-370.89
0.005	-0.03	-446.01	-408.45
0.01	-0.03	-492.96	-460.09
0.01	-0.035	-535.21	-502.35
0.01	-0.04	-586.85	-553.99
0.01	-0.045	-629.11	-596.24
0.015	-0.045	-676.06	-643.19
0.015	-0.05	-723	-690.14
0.015	-0.05	-774.65	-746.48
0.015	-0.055	-830.99	-802.82
0.015	-0.06	-896.71	-877.93
0.02	-0.065	-990.61	-971.83
0.02	-0.07	-1084.51	-1065.73
0.02	-0.075	-1183.1	-1164.32
0.02	-0.08	-1277	-1286.38
0.02	-0.085	-1408.45	-1427.23
0.02	-0.095	-1539.91	-1577.46
0.02	-0.1	-1643.19	-1685.45

0.02	-0.105	-1732.39	-1788.73
0.02	-0.105	-1830.99	-1906.1
0.02	-0.11	-1971.83	-2070.42
0.02	-0.12	-2178.4	-2295.77
0.015	-0.125	-2323.94	-2464.79
0.015	-0.13	-2464.79	-2629.11
0.015	-0.14	-2610.33	-2784.04
0.01	-0.145	-2859.15	-3079.81
0.005	-0.155	-3032.86	-3234.74
0.005	-0.16	-3211.27	-3431.92
0	-0.165	-3399.06	-3633.8
-0.005	-0.17	-3558.69	-3816.9
-0.01	-0.175	-3751.17	-4014.08
-0.015	-0.18	-3929.58	-4220.66
-0.02	-0.19	-4225.35	-4516.43
-0.025	-0.2	-4521.13	-4845.07
-0.03	-0.205	-4746.48	-5061.03
-0.035	-0.21	-4877.93	-5201.88
-0.035	-0.215	-5023.47	-5356.8
-0.04	-0.22	-5187.79	-5525.82
-0.045	-0.225	-5338.03	-5704.22
-0.05	-0.23	-5525.82	-5887.32
-0.055	-0.24	-5835.68	-6239.43
-0.06	-0.245	-6117.37	-6539.91
-0.07	-0.26	-6521.13	-6957.75
-0.075	-0.27	-6840.38	-7272.3
-0.085	-0.275	-7032.86	-7483.57
-0.085	-0.28	-7267.61	-7718.31
-0.095	-0.285	-7469.48	-7967.14
-0.1	-0.295	-7816.9	-8300.47
-0.105	-0.3	-8009.39	-8492.95
-0.11	-0.31	-8192.48	-8699.53
-0.115	-0.315	-8366.2	-8906.1
-0.12	-0.325	-8774.65	-9347.41
-0.13	-0.335	-9150.23	-9746.48
-0.14	-0.345	-9469.48	-70.42
-0.145	-0.35	-9704.22	-338.02
-0.15	-0.36	-9929.58	-572.77
-0.155	-0.365	-136.15	-807.51
-0.16	-0.375	-460.09	-1150.23
-0.165	-0.385	-676.05	-1422.53
-0.175	-0.395	-1075.12	-1830.98
-0.185	-0.405	-1492.95	-2300.47
-0.195	-0.42	-1976.52	-2784.03
-0.2	-0.43	-2140.84	-2962.44

نتایج به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها و کرنش سنج‌ها برای ملات M_3 ($W/C=0.35$)

LVDT-01	LVDT-02	ST Gage-01	ST Gage-02
L1 (mm)	L2 (mm)	μ Strain	μ Strain
0	0	4.7	-42.3
0	-0.005	4.7	-42.3
0	0	9.4	-37.6
0	0	9.4	-42.3
0.005	-0.005	0	-164.3
-0.005	0	0	-333.3
-0.005	-0.005	4.7	-361.5
-0.005	-0.005	4.7	-385
-0.005	0	9.4	-413.1
-0.005	0	9.4	-441.3
-0.005	0	14.1	-469.5
-0.01	0	14.1	-507
-0.01	-0.005	14.1	-544.6
-0.01	0	14.1	-586.9
-0.01	-0.005	14.1	-633.8
-0.01	-0.005	14.1	-685.4
-0.015	0	14.1	-737.1
-0.015	-0.005	9.4	-788.7
-0.015	0	9.4	-831
-0.02	0	9.4	-877.9
-0.02	-0.005	0	-929.6
-0.02	-0.005	-4.7	-1014.1
-0.025	0	-9.4	-1089.2
-0.025	-0.005	-28.2	-1183.1
-0.03	-0.005	-42.3	-1295.8
-0.03	-0.005	-61	-1385
-0.035	-0.005	-79.8	-1488.3
-0.04	-0.005	-108	-1600.9
-0.04	-0.005	-131.5	-1699.5
-0.045	-0.005	-173.7	-1835.7
-0.05	-0.01	-230	-1981.2
-0.055	-0.01	-291.1	-2140.8
-0.06	-0.01	-370.9	-2323.9
-0.065	-0.015	-446	-2478.9
-0.065	-0.015	-502.3	-2586.9
-0.07	-0.015	-554	-2690.1
-0.075	-0.02	-615	-2793.4
-0.075	-0.02	-671.4	-2901.4
-0.08	-0.02	-755.9	-3042.3

-0.085	-0.025	-859.2	-3220.7
-0.09	-0.03	-1009.4	-3446
-0.095	-0.035	-1183.1	-3713.6
-0.105	-0.045	-1417.8	-3995.3
-0.11	-0.055	-1600.9	-4159.6
-0.115	-0.055	-1713.6	-4286.4
-0.12	-0.06	-1868.5	-4488.3
-0.125	-0.07	-2056.3	-4704.2
-0.13	-0.075	-2187.8	-4859.2
-0.135	-0.08	-2366.2	-5084.5
-0.145	-0.085	-2493	-5230
-0.15	-0.095	-2666.7	-5455.4
-0.16	-0.1	-2906.1	-5755.9
-0.17	-0.115	-3206.6	-6098.6
-0.18	-0.12	-3417.8	-6291.1
-0.185	-0.13	-3563.4	-6464.8
-0.19	-0.135	-3727.7	-6624.4
-0.195	-0.14	-3957.7	-6901.4
-0.205	-0.145	-4211.3	-7126.8
-0.21	-0.155	-4427.2	-7361.5
-0.215	-0.16	-4629.1	-7596.2
-0.23	-0.17	-4901.4	-7849.8
-0.23	-0.175	-5009.4	-7985.9
-0.235	-0.18	-5173.7	-8183.1
-0.245	-0.19	-5441.3	-8450.7
-0.255	-0.205	-5793.4	-8854.5
-0.265	-0.21	-6084.5	-9122.1
-0.275	-0.215	-6220.7	-9281.7
-0.28	-0.22	-6399.1	-9493
-0.285	-0.23	-6596.2	-9718.3
-0.295	-0.24	-6901.4	-10046.9
-0.315	-0.255	-7356.8	-10586.9
-0.33	-0.265	-7718.3	-10924.9
-0.34	-0.27	-7910.8	-11164.3
-0.345	-0.28	-8248.8	-11530.5
-0.36	-0.285	-8394.4	-11694.8
-0.36	-0.29	-8511.7	-11849.8
-0.37	-0.295	-8713.6	-12103.3
-0.375	-0.3	-8910.8	-12323.9
-0.38	-0.305	-9103.3	-12563.4
-0.395	-0.315	-9328.6	-12835.7
-0.405	-0.32	-9619.7	-13183.1
-0.42	-0.335	-10065.7	-13694.8
-0.43	-0.345	-10333.3	-14061
-0.44	-0.35	-10586.9	-14399.1

نتایج به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها برای نمونه‌های ملات M_4 و M_5 و M_6 ($W/C=0.35$)

LVDT- M_4		LVDT- M_5		LVDT- M_6	
L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)
0	0	0	0	0.005	-0.005
0	0	0	0	0.005	-0.025
0	0	0	-0.005	0.01	-0.03
0	0	0	-0.005	0.005	-0.035
0	-0.005	0	-0.005	0.01	-0.035
0	-0.005	0	-0.01	0.01	-0.035
0	-0.01	-0.005	-0.005	0.01	-0.04
0	-0.01	-0.005	-0.01	0.01	-0.04
0	-0.01	-0.005	-0.01	0.015	-0.045
0.005	-0.015	-0.005	-0.01	0.01	-0.045
0	-0.02	-0.005	-0.01	0.015	-0.05
0	-0.02	-0.005	-0.01	0.015	-0.055
0	-0.025	-0.005	-0.01	0.02	-0.055
0	-0.025	-0.01	-0.015	0.02	-0.06
0	-0.03	-0.01	-0.015	0.02	-0.065
0	-0.035	-0.01	-0.015	0.02	-0.065
0	-0.035	-0.01	-0.02	0.025	-0.07
0	-0.04	-0.015	-0.02	0.025	-0.075
0	-0.045	-0.015	-0.02	0.03	-0.08
-0.005	-0.05	-0.015	-0.025	0.03	-0.085
-0.005	-0.05	-0.02	-0.025	0.03	-0.09
-0.005	-0.055	-0.02	-0.03	0.03	-0.095
-0.005	-0.065	-0.02	-0.03	0.035	-0.105
-0.005	-0.065	-0.025	-0.035	0.035	-0.11
-0.01	-0.075	-0.03	-0.035	0.035	-0.12
-0.01	-0.08	-0.03	-0.04	0.04	-0.13
-0.015	-0.09	-0.035	-0.045	0.04	-0.135
-0.01	-0.095	-0.04	-0.045	0.04	-0.145
-0.015	-0.095	-0.04	-0.05	0.045	-0.155
-0.015	-0.1	-0.04	-0.055	0.045	-0.165
-0.015	-0.11	-0.045	-0.055	0.045	-0.175
-0.02	-0.115	-0.05	-0.065	0.045	-0.185
-0.02	-0.12	-0.055	-0.07	0.045	-0.19
-0.02	-0.13	-0.06	-0.075	0.045	-0.2
-0.025	-0.14	-0.065	-0.075	0.045	-0.21
-0.025	-0.145	-0.065	-0.08	0.05	-0.22
-0.03	-0.15	-0.07	-0.085	0.05	-0.23
-0.03	-0.16	-0.07	-0.085	0.05	-0.235
-0.035	-0.165	-0.075	-0.09	0.045	-0.24
-0.035	-0.17	-0.08	-0.095	0.045	-0.245

-0.035	-0.18	-0.085	-0.1	0.045	-0.255
-0.04	-0.185	-0.09	-0.11	0.04	-0.265
-0.04	-0.19	-0.1	-0.115	0.035	-0.275
-0.04	-0.195	-0.105	-0.12	0.03	-0.285
-0.045	-0.2	-0.11	-0.125	0.03	-0.29
-0.045	-0.21	-0.115	-0.13	0.025	-0.295
-0.05	-0.22	-0.12	-0.135	0.02	-0.31
-0.05	-0.225	-0.125	-0.14	0.02	-0.315
-0.055	-0.23	-0.13	-0.15	0.015	-0.325
-0.055	-0.235	-0.135	-0.15	0.01	-0.33
-0.06	-0.25	-0.135	-0.155	0.01	-0.34
-0.06	-0.26	-0.145	-0.165	0	-0.345
-0.065	-0.27	-0.15	-0.17	0	-0.355
-0.065	-0.28	-0.16	-0.18	-0.01	-0.365
-0.07	-0.295	-0.165	-0.185	-0.015	-0.375
-0.07	-0.3	-0.17	-0.19	-0.015	-0.38
-0.07	-0.305	-0.175	-0.195	-0.02	-0.39
-0.07	-0.31	-0.18	-0.2	-0.025	-0.395
-0.075	-0.315	-0.18	-0.205	-0.03	-0.4
-0.075	-0.325	-0.19	-0.215	-0.035	-0.41
-0.08	-0.34	-0.195	-0.225	-0.04	-0.425
-0.08	-0.35	-0.205	-0.235	-0.045	-0.435
-0.085	-0.36	-0.21	-0.24	-0.05	-0.445
-0.085	-0.37	-0.215	-0.24	-0.055	-0.45
-0.085	-0.38	-0.215	-0.245	-0.06	-0.47
-0.09	-0.39	-0.22	-0.25	-0.065	-0.475
-0.09	-0.395	-0.225	-0.255	-0.065	-0.485
-0.09	-0.405	-0.23	-0.26	-0.07	-0.495
-0.095	-0.415	-0.23	-0.265	-0.075	-0.51
-0.095	-0.43	-0.245	-0.28	-0.08	-0.525
-0.095	-0.445	-0.25	-0.29	-0.08	-0.54
-0.1	-0.45	-0.255	-0.3	-0.085	-0.555
-0.1	-0.465	-0.26	-0.305	-0.085	-0.565
-0.095	-0.475	-0.265	-0.31	-0.085	-0.575
-0.095	-0.485	-0.265	-0.315	-0.09	-0.59
-0.095	-0.49	-0.27	-0.325	-0.09	-0.6
-0.095	-0.505	-0.275	-0.335	-0.09	-0.61
-0.095	-0.52	-0.275	-0.34	-0.095	-0.63
-0.09	-0.535	-0.275	-0.345	-0.095	-0.64
-0.09	-0.55	-0.275	-0.36	-0.095	-0.66
-0.085	-0.56	-0.28	-0.37	-0.1	-0.68
-0.085	-0.575	-0.275	-0.385	-0.095	-0.7
-0.08	-0.59	-0.275	-0.39	-0.09	-0.725
-0.07	-0.6	-0.275	-0.395	-0.08	-0.745
-0.07	-0.61	-0.325	-0.45	-0.065	-0.765

مقادیر نیروهای به‌دست آمده از آزمایش فشاری برای نمونه‌های ملات نوع اول ($W/C=0.35$)

F1 (N)	F2 (N)	F3 (N)	F4 (N)	F5 (N)	F6 (N)
566	929.7258	2530	11986.72	12154.5	11700
3000	5801.527	7330	13259.28	13430.22	13300
5150	6361.832	7910	14332.4	14500.18	14300
7720	6808.176	8400	15348.55	15747.41	15600
11000	7238.692	8920	16697.08	17137.09	17000
15200	7757.845	9550	18178.56	18691.38	18200
17900	8194.692	10300	19830.98	20339.06	19300
20700	8754.997	11000	21439.09	22103.07	20600
24300	9324.798	11800	23135.83	23620.16	22100
27100	10018.06	12800	25168.12	25130.14	23500
31800	10699.44	13800	27542.29	26858.53	25100
35700	11494.79	15100	30201.37	28748.38	26700
40800	12297.26	16300	33116.85	30799.66	28700
48300	13075.99	17500	36336.23	32642.02	30300
52600	13674.28	18500	40191.88	35788.59	32200
55500	14604.96	19600	43202.33	39645.82	34000
59000	15583.12	21000	45111.17	43040.89	36600
64200	16858.84	22800	47509.08	46079.83	39200
72500	18280.18	24700	51350.49	49270.72	42600
81200	19918.35	27000	56469.21	53040.9	45300
84900	21974.39	29900	60584.44	56469.21	48400
88400	23873.72	32500	65548.04	61838	51300
92400	26257.39	34900	69850.04	67608.82	55800
101000	28218.46	38000	74294.49	71388.51	61800
107000	30312.48	40800	79688.61	76331.53	68200
115000	32493.55	44200	86801.63	81341.03	71900
121000	34804.41	48600	94432.22	85552.81	75200
128000	37140.6	52800	97792.46	90682.61	81400
132000	40217.52	58300	100135	95681.03	88700
136000	43921.23	63400	104702.9	103173.9	95300
143000	47947.83	66900	111208.1	111325.2	100000
150000	52169.11	69900	115662.1	119607.9	104000
158000	56437.87	73200	124674.4	123914.7	112000
164000	62102.64	76400	131759	127350.1	120000
170000	68052.32	80700	139802.6	131635.5	127000
173000	72319.5	85900	147238.5	136450.3	134000
181000	76409.41	93400	150663.7	141526.3	138000
191000	80953.57	102000	158093.3	146744.7	144000
194000	86323.95	112000	164873.9	155206.3	149000
198000	95279.32	118000	170666.9	163477.9	154000
206000	101167.3	122000	175614.7	174052.5	164000
208000	106798.8	128000	179479.8	183392.4	174000

212000	112753.2	136000	183436.8	187745.1	182000
220000	121487	141000	186887.2	193003.1	187000
232000	129795	147000	193107.6	198444.7	193000
236000	136083.4	152000	201398.2	206668.8	201000
243000	143826.4	159000	208340.3	213800.8	207000
245000	149239.5	168000	217590	216194	214000
251000	156058.1	180000	218910.1	220189	219000
253000	162715.3	187000	222205.4	227697.7	225000
258000	173432.3	191000	232126.3	237764.2	233000
266000	184106.6	196000	241426.7	246934.8	239000
270000	192319.6	203000	246849.3	250809.4	249000
273000	195776.4	211000	251379.2	256426.7	256000
277000	200730.5	218000	260377.3	258990.8	259000
279000	205640.3	223000	266564.4	264443.5	262000
278000	209790.4	233000	268520.8	269527.4	268000
275000	216784.7	234000	271103.8	275405.8	271000
253000	226497.4	238000	273098.2	284969	280000
240000	235778.1	247000	276735.4	291065.9	290000
236000	247919.6	257000	283876.9	299114.3	296000
205000	257952.8	266000	293468.6	296830.4	298000
189000	262186.8	267000	300135.2	297460.3	302000
185000	268144.4	271000	301569.2	300885.5	315000
183000	273342.2	277000	304092.2	301455.3	313000
180000	283446.7	285000	310315.7	305102	314000
178000	288609.8	298000	312784.8	308796.2	319000
176000	291958.9	306000	317889.3	319480	327000
174000	295175.1	308000	320572.1	329878.9	332000
173000	307071.3	316000	326523.4	330480.3	343000
173000	316314.8	317000	331208.4	329119.1	341000
175000	323722.2	317000	334627.2	331588.3	341000
177000	326571.2	321000	337191.3	330163.8	342000
178000	330369.8	325000	337784.8	333550.9	344000
180000	332933.9	328000	339470.5	337381.3	345000
180000	341259.4	332000	340895	336146.7	346000
182000	343190.4	339000	341718.1	333962.4	349000
184000	352497.1	350000	344630.4	337191.3	352000
186000	358859.9	353000	350391.7	337919.4	353000
189000	368040	355000	349916.9	334247.3	354000
188000	363608.3	356000	347257.8	327742.1	353000
190000	362516.1	361000	343506.6	321854.2	348000
196000	364368	366000	347210.3	303905.4	339000
197000	364937.8	365000	335197	208691.6	326000
198000	366267.3	368000	329356.5	202914.5	319000
202000	371110.6	371000	326080.2	205633.7	319000
206000	380417.4	371000	322439.8	207536.2	316000

پیوست ۳: داده‌های ثبت شده در دیتا لاگر و کامپیوتر برای نمونه‌های ملات نوع دوم

جدول (۳-۸) نتایج به‌دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها برای نمونه ملات نوع دوم ($W/C=0.31$)

LVDT- M1		LVDT - M2		LVDT - M3	
L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L1 (mm)	L1 (mm)	L1 (mm)
0	0	-0.015	0.035	-0.005	0
0	0	-0.015	0.035	-0.005	0
-0.005	0	-0.015	0.03	-0.005	0
-0.005	0	-0.01	0.03	-0.005	0
-0.005	0	-0.01	0.03	-0.005	-0.005
-0.005	0	-0.01	0.03	0	-0.005
-0.01	0	-0.01	0.025	-0.005	-0.005
-0.01	0	-0.01	0.02	-0.005	-0.005
-0.01	0	-0.01	0.02	-0.005	-0.005
-0.015	0	-0.005	0.02	0	-0.005
-0.015	0	-0.005	0.015	-0.005	-0.01
-0.015	0	-0.005	0.01	-0.005	-0.01
-0.02	0	-0.005	0.01	-0.005	-0.005
-0.02	0	-0.005	0.005	-0.005	-0.01
-0.02	0	0	0.005	-0.005	-0.01
-0.025	0	0	0	-0.005	-0.01
-0.03	0	0	-0.005	-0.01	-0.01
-0.03	0	0	-0.01	-0.01	-0.01
-0.035	0	0	-0.01	-0.01	-0.015
-0.035	0	0.005	-0.015	-0.01	-0.015
-0.04	-0.005	0.005	-0.02	-0.01	-0.015
-0.04	-0.005	0.005	-0.03	-0.01	-0.015
-0.045	-0.005	0.01	-0.03	-0.015	-0.02
-0.05	-0.005	0.01	-0.035	-0.015	-0.015
-0.055	-0.005	0.01	-0.04	-0.01	-0.02
-0.06	-0.005	0.01	-0.05	-0.015	-0.02
-0.065	-0.005	0.01	-0.055	-0.015	-0.02
-0.07	-0.01	0.01	-0.06	-0.015	-0.025
-0.07	-0.01	0.01	-0.06	-0.015	-0.02
-0.075	-0.01	0.01	-0.065	-0.02	-0.02
-0.08	-0.015	0.01	-0.07	-0.025	-0.025
-0.08	-0.015	0.01	-0.075	-0.025	-0.02
-0.085	-0.015	0.01	-0.085	-0.025	-0.02
-0.09	-0.02	0.01	-0.09	-0.03	-0.025
-0.095	-0.025	0.01	-0.09	-0.03	-0.025
-0.095	-0.025	0.01	-0.1	-0.03	-0.02
-0.1	-0.03	0.01	-0.105	-0.035	-0.02

-0.105	-0.03	0.005	-0.105	-0.035	-0.025
-0.105	-0.035	0.005	-0.115	-0.04	-0.02
-0.11	-0.035	0	-0.115	-0.045	-0.025
-0.115	-0.04	-0.005	-0.12	-0.05	-0.025
-0.12	-0.05	-0.005	-0.13	-0.055	-0.025
-0.13	-0.055	-0.015	-0.14	-0.055	-0.025
-0.135	-0.06	-0.015	-0.14	-0.055	-0.025
-0.14	-0.065	-0.02	-0.145	-0.06	-0.025
-0.145	-0.065	-0.085	-0.075	-0.06	-0.025
-0.15	-0.075	-0.095	-0.07	-0.065	-0.025
-0.155	-0.08	-0.105	-0.07	-0.07	-0.025
-0.16	-0.085	-0.11	-0.07	-0.07	-0.025
-0.165	-0.085	-0.115	-0.07	-0.07	-0.025
-0.17	-0.09	-0.12	-0.075	-0.075	-0.025
-0.175	-0.09	-0.13	-0.075	-0.08	-0.03
-0.18	-0.1	-0.135	-0.075	-0.085	-0.03
-0.19	-0.105	-0.145	-0.075	-0.085	-0.03
-0.195	-0.11	-0.155	-0.075	-0.09	-0.03
-0.2	-0.115	-0.16	-0.07	-0.095	-0.03
-0.205	-0.135	-0.165	-0.07	-0.105	-0.03
-0.105	-0.155	-0.17	-0.07	-0.11	-0.03
-0.105	-0.16	-0.185	-0.07	-0.11	-0.03
-0.11	-0.17	-0.2	-0.07	-0.08	-0.04
-0.12	-0.18	-0.21	-0.07	-0.07	-0.05
-0.12	-0.185	-0.22	-0.075	-0.07	-0.055
-0.12	-0.19	-0.225	-0.07	-0.07	-0.06
-0.125	-0.195	-0.25	-0.065	-0.075	-0.06
-0.13	-0.2	-0.27	-0.055	-0.08	-0.065
-0.135	-0.205	-0.27	-0.02	-0.085	-0.065
-0.135	-0.21	-0.285	-0.015	-0.08	-0.065
-0.145	-0.225	-0.3	-0.015	-0.085	-0.07
-0.145	-0.23	-0.315	-0.01	-0.095	-0.075
-0.155	-0.245	-0.325	-0.01	-0.1	-0.075
-0.165	-0.25	-0.33	-0.01	-0.1	-0.08
-0.17	-0.255	-0.34	-0.01	-0.115	-0.075
-0.175	-0.26	-0.34	-0.015	-0.12	-0.08
-0.175	-0.265	-0.34	-0.02	-0.12	-0.08
-0.185	-0.275	-0.34	-0.025	-0.125	-0.085
-0.19	-0.28	-0.34	-0.035	-0.135	-0.085
-0.195	-0.29	-0.35	-0.035	-0.15	-0.085
-0.2	-0.295	-0.355	-0.04	-0.155	-0.085
-0.205	-0.3	-0.36	-0.045	-0.16	-0.085
-0.23	-0.31	-0.36	-0.045	-0.17	-0.085
-0.255	-0.31	-0.365	-0.045	-0.185	-0.085
-0.27	-0.315	-0.375	-0.055	-0.195	-0.09

جدول (۹-۳) مقادیر نیروهای به‌دست آمده از آزمایش فشاری ملات نوع دوم ($W/C=0.31$)

Force (N)		
M ₁	M ₂	M ₃
8680	9960	7860
10400	11400	9820
11200	12400	10300
12300	13700	11000
13400	14900	11700
14500	16100	12500
15800	17600	13500
17300	19200	14700
18700	20800	16000
20500	22700	17200
22400	24400	18500
24300	26600	20000
26300	29000	21100
28300	32200	22600
29800	34500	23800
32100	37200	24600
35000	39800	25400
39100	43000	26500
42600	46100	27500
45600	49400	28800
47100	53200	30100
48500	58000	31700
50000	62000	33700
53700	65100	36200
58500	69400	38100
64300	74200	39300
69100	79200	40800
74100	82000	43300
80000	84000	45600
83200	87000	46300
85900	91500	48100
90100	97000	50100
95700	104000	52300
102000	109000	54800
109000	114000	57600
114000	120000	59500
117000	127000	62400
122000	132000	64000
129000	139000	65900
131000	145000	69600
134000	150000	71400

140000	159000	73900
151000	174000	76700
165000	179000	79800
169000	182000	84300
177000	188000	87500
184000	190000	89400
189000	198000	91100
198000	206000	92700
204000	213000	96200
209000	222000	101000
214000	229000	104000
219000	233000	106000
226000	240000	109000
237000	246000	113000
247000	254000	116000
254000	258000	123000
257000	261000	125000
255000	272000	127000
265000	286000	133000
271000	291000	136000
284000	297000	141000
290000	300000	143000
294000	308000	143000
299000	317000	138000
305000	321000	144000
311000	310000	149000
316000	320000	151000
328000	329000	156000
335000	334000	162000
346000	337000	162000
357000	342000	164000
360000	345000	168000
363000	347000	176000
366000	351000	182000
373000	362000	185000
381000	368000	187000
388000	375000	188000
391000	381000	192000
394000	381000	197000
396000	380000	200000
363000	384000	202000
371000	389000	205000
376000	397000	210000
380000	400000	219000
385000	399000	228000

پیوست ۴: داده‌های به‌دست آمده از ستاپ ASTM برای نمونه‌های مغزه سنگ

جدول (۳-۱۰) مقادیر تنش محاسبه شده برای نمونه‌های مغزه سنگ آهک

1b	2b	3b	4b	5b
3.84507	3.72989	3.3795	3.29657	3.54951
5.44022	4.28208	3.51219	3.86258	3.93515
4.85282	4.32493	3.41889	3.87917	3.97454
6.40657	4.3664	3.41267	3.931	4.00564
8.02572	4.40786	3.41889	3.96936	4.03881
7.07536	4.44311	3.41267	4.00426	4.07199
8.39112	4.4597	3.41682	4.03363	4.0941
9.82569	4.46073	3.42304	4.04711	4.08857
8.64437	4.49494	3.4417	4.0554	4.12175
10.2137	4.4908	3.44585	4.09687	4.15285
12.1041	4.52812	3.46658	4.10723	4.19017
12.7269	4.57235	3.48939	4.13004	4.23163
14.0679	4.60414	3.51634	4.16736	4.26273
12.4641	4.62763	3.52878	4.19846	4.28139
15.4497	4.67947	3.56817	4.23785	4.32079
16.2411	4.7116	3.59651	4.23509	4.37469
16.583	4.74236	3.62623	4.28761	4.41201
18.0642	4.77484	3.65041	4.27517	4.44657
18.3491	4.8018	3.66769	4.34152	4.47836
20.645	4.82668	3.69464	4.38022	4.49909
20.8733	4.88749	3.74233	4.37469	4.53226
24.3057	4.9179	3.76306	4.41927	4.56129
22.6199	4.96973	3.77965	4.44518	4.56129
24.6668	5.01189	3.80038	4.47421	4.57787
22.6969	5.04022	3.83978	4.49494	4.58617
25.7194	5.06303	3.85498	4.51568	4.63386
27.9481	5.11279	3.88401	4.55299	4.64215
26.965	5.15011	3.89921	4.59446	4.65805
27.8609	5.17084	3.92271	4.60607	4.67118
28.7403	5.18328	3.92064	4.64007	4.68154
31.5776	5.25792	3.9393	4.69398	4.69813
32.1111	5.2828	3.96832	4.69813	4.70781
6.40657	6.83157	4.88749	6.41069	5.90618
8.02572	6.85438	4.89509	6.4715	5.98358

7.07536	6.90275	4.91376	6.49776	6.04993
8.39112	6.95804	4.91376	6.53716	6.08172
9.82569	7.00642	4.93449	6.60281	6.14115
8.64437	7.02439	4.95937	6.66777	6.21026
10.2137	7.09488	4.9801	6.69265	6.28421
12.1041	7.1861	4.99669	6.73412	6.33812
12.7269	7.23794	5.01742	6.78803	6.38166
14.0679	7.28148	5.0423	6.81429	6.41898
12.4641	7.32985	5.08169	6.8523	6.4563
15.4497	7.39067	5.11279	6.86128	6.49776
16.2411	7.43075	5.12938	6.8917	6.53923
16.583	7.48052	5.14182	6.93731	6.58484
18.0642	7.57381	5.1667	6.98914	6.58899
18.3491	7.62772	5.18605	7.023	6.61801
20.645	7.70443	5.21369	7.08244	6.64013
20.8733	7.75972	5.2289	7.09073	6.67192
24.3057	7.83712	5.28971	7.1322	6.70509
22.6199	7.83712	5.30353	7.16952	6.7393
24.6668	7.88688	5.35053	7.16537	6.78388
22.6969	7.99884	5.3844	7.19993	6.80047
	8.01958	5.42379	7.23586	6.8212
	8.06933	5.45489	7.26904	6.85023
	8.10251	5.49014	7.30843	6.88133
	8.17507	5.5399	7.31361	6.92694
	8.22898	5.58274	7.32502	6.97048
	8.28911	5.63112	7.35404	7.02231
	8.34302	5.68088	7.37478	7.04512
	8.39277	5.70991	7.41831	7.08659
	8.44945	5.74308	7.44008	7.12805
	8.47778	5.7804	7.4971	7.16537
	8.58766	5.81357	7.53442	7.1861
	8.58766	5.82809	7.58833	7.20684
	8.61254	5.85504	7.61459	7.26904
	8.72243	5.88323	7.64224	7.29806
	8.82402	5.90273	7.69199	7.33123
	8.84199	5.94005	7.77493	7.381
	8.89244	5.97943	7.82883	7.43075
	11.6686	7.45425	10.1579	9.15575
	11.7764	7.48881	10.2505	9.20551

	11.8428	7.49917	10.3085	9.22521
	11.934	7.52474	10.3749	9.30088
	12.0003	7.5593	10.38	9.36308
	12.0729	7.56068	10.4972	9.43357
	12.1427	7.58211	10.5532	9.44602
	12.2305	7.61736	10.6672	9.50407
	12.2809	7.66711	10.7812	9.54139
	12.386	7.66711	10.8683	9.55936
	12.5311	7.72724	10.9512	9.60151
	12.6422	7.777	11.0383	9.63814
	12.6942	7.81777	11.1088	9.69482
	12.7654	7.85924	11.2166	9.74872
	12.8228	7.90762	11.2954	9.79641
	12.9845	7.95841	11.3887	9.86483
	13.0246	8.00714	11.4799	9.898
	13.0743	8.03616	11.594	9.93946
	13.178	8.09422	11.7018	9.98922
	13.2671	8.11495	11.764	10.1053
	13.2927	8.18544	11.8656	10.18
	13.4226	8.22483	11.9257	10.2173
	13.5222	8.25801	12.0149	10.2961
	13.632	8.29947	12.1372	10.3718
	13.7184	8.34716	12.1938	10.4412
	13.7544	8.40314	12.2809	10.5158
	13.8912	8.45774	12.3265	10.5822
	13.9886	8.52339	12.4084	10.6541
	14.0571	8.60425	12.4993	10.7584
	14.1379	8.6395	12.5905	10.8448
	14.1835	8.69341	12.7032	10.9181
	14.2727	8.78048	12.7737	10.9775
	14.3307	8.86549	12.8573	11.0487
	14.3764	8.92976	12.9347	11.1226
	14.4344	9.01269	13.0785	11.1814
	14.5277	9.08111	13.1386	11.2664
	14.5464	9.1599	13.2194	11.3521
	14.621	9.22624	13.3169	11.4074
	14.6445	9.28983	13.3908	11.5442
	17.9217	11.594	16.5761	14.0778
	17.9984	11.6562	16.6611	14.2174

	18.0834	11.7225	16.7804	14.2395
	18.1954	11.7743	16.9079	14.3121
	18.2452	11.8303	17.1152	14.3618
	18.3571	11.8925	17.2458	14.3888
	18.4649	11.9464	17.4117	14.4386
	18.5499	12.0003	17.5278	14.5547
	18.6225	12.0736	17.6522	14.592
	18.7158	12.1496	17.8471	14.6625
	18.7897	12.1983	17.986	14.7288
	18.8754	12.2782	18.0959	14.733
	19.004	12.3514	18.241	14.7938
	19.1533	12.4119	18.3944	14.8947
	19.1699	12.5145	18.5313	14.9797
	19.3509	12.6348	18.693	15.0813
	19.456	12.7094	18.7821	15.1787
	19.626	12.7965	18.9107	15.2596
	19.6923	12.8449	18.9404	15.3467
	19.8582	12.8684	19.033	15.4234
	19.8775	12.9126	19.098	15.525
	19.9453	12.9976	19.1209	15.5685
	20.0904	13.1033	19.1602	15.6369
	20.1381	13.1572	19.2175	15.7095
	20.306	13.2464	19.3191	15.7613
	20.3309	13.3086	19.4	15.7779
	20.4657	13.406	19.4456	15.8277
	20.6778	13.4489	19.5541	15.8878
	20.8492	13.5304	19.6122	15.977
	21.1105	13.5719	19.7172	16.0806
	21.4049	13.6839	19.8319	16.1677
	21.5956	13.7119	19.8941	16.234
	21.8631	13.7544	19.9411	16.3045
	22.087	13.8401	20.0241	16.3916
	22.2093	13.9016	20.0517	16.5437
	22.2425	13.9617	19.966	16.6487
	22.2135	14.0902	19.8333	16.7372
	22.2038	14.1773	19.9536	16.8187
	22.2176	14.2271	20.0738	16.968
	26.3104	18.1691	25.6241	20.841
	26.3166	18.268	25.7402	20.9695

	26.4368	18.3198	25.7671	21.0358
	26.6296	18.4857	25.8128	21.1437
	26.7665	18.5962	25.9883	21.2929
	27.0484	18.7365	26.074	21.4546
	27.2143	18.8215	26.0864	21.521
	27.3118	18.9314	26.1445	21.5542
	27.4216	19.0434	26.2295	21.6267
	27.4673	19.1325	26.3587	21.7034
	27.6684	19.2549	26.5239	21.7967
	27.9027	19.409	26.6117	21.8776
	28.0457	19.5306	26.7167	21.9647
	28.1556	19.6495	26.7388	22.031
	28.3339	19.7766	26.8453	22.1969
	28.4117	19.8831	26.9883	22.3856
	28.5993	20.0683	27.1542	22.5328
	28.7341	20.2812	27.3263	22.6364
	28.9642	20.3848	27.376	22.736
	29.1777	20.5438	27.4147	22.8548
	29.3871	20.6461	27.546	22.8396
	29.5364	20.8492	27.6186	22.9972
	29.8253	21.0027	27.7306	23.1734
	30.1418	21.1312	27.7928	23.3621
	30.5047	21.2929	27.9296	23.4879
	30.8136	21.4851	27.979	23.7021
	31.0886	21.579	28.0436	23.8991
	31.3278	21.7325	28.1763	24.1002
	31.6346	21.9979	28.2496	24.2515
	31.8731	22.2439	28.3028	24.3573
	32.0949	22.4623	28.4334	24.4527
	32.2566	22.606	28.3982	24.4091
	32.4225	22.7443	28.4362	24.461
	32.5552	22.8811	28.5786	24.5584
	32.634	23.0387	28.7112	24.5978
	32.6118	23.1485	28.7714	24.7015
	32.7501	23.3289	28.8066	24.7854
	32.8869	23.4347	28.9697	24.9254
	32.8827	23.5694	29.0264	25.0539
	36.6313	28.8343	34.0093	29.6401
	36.6824	28.8491	34.1419	29.7127

	36.7557	29.0865	34.2028	29.7894
	36.9257	29.1508	34.3175	29.9013
	36.9257	29.2752	34.446	30.1211
	37.0708	29.4701	34.4488	30.2123
	37.2326	29.7251	34.5829	30.251
	37.451	29.9822	34.6202	30.2773
	37.697	30.1729	34.7861	30.2745
	37.8145	30.3049	34.9091	30.3036
	37.9527	30.3298	34.9664	30.5295
	38.0391	30.3782	35.2215	30.7348
	38.1738	30.5689	35.4433	30.9753
	38.1448	30.7058	35.5698	31.0437
	38.2236	30.7472	35.6859	31.2407
	38.29	30.9007	35.7799	31.4273
	38.4047	31.1232	35.858	31.6498
	38.5968	31.2835	36.0985	31.8502
	38.7419	31.5019	36.2567	32.0617
	38.9451	31.6263	36.4502	32.4349
	39.0726	31.6567	36.6811	32.6215
	39.3142	31.777	36.9941	32.7376
	39.4247	31.9975	37.0874	32.7708
	39.6279	32.2027	37.1102	32.945
	39.7392	32.4584	37.2132	33.1025
	39.9735	32.634	37.3238	33.3016
	40.1394	32.7653	37.4067	33.5047
	40.299	32.9543	37.3196	33.7929
	40.5084	33.1578	37.529	33.9401
	40.6577	33.3803	37.5995	34.106
	40.7904	33.4522	37.6265	34.2719
	40.9106	33.5794	37.6991	34.54
	41.0834	33.625	37.7896	34.699
	41.2465	33.8434	37.9651	35.0141
	41.4227	33.9381	38.1075	35.2961
	41.6156	34.0839	38.3991	35.7232
	41.6446	34.2138	38.63	36.0715
	41.8664	34.4087	38.8394	36.3742
	42.174	34.4792	38.9147	36.8262
	45.3641	41.2921	45.3351	42.1505
	45.5051	41.5015	45.3918	42.2977

	45.5714	41.6777	45.4885	42.4546
	45.371	41.827	45.6295	42.5527
	45.0842	42.0147	45.9073	42.7282
	45.0262	42.2583	46.1436	42.8471
	44.9411	42.5091	46.2874	42.8955
	45.0987	42.6688	46.3137	43.071
	45.0137	42.854	46.2971	43.4214
	45.0987	43.0772	46.3158	43.7718
	45.1153	43.1415	46.3012	44.0275
	45.0075	43.411	46.3697	44.2196
	45.2065	43.4802	46.4692	44.5348
	45.1982	43.7124	46.6026	44.8333
	45.2701	43.9902	46.7491	45.3434
	45.3081	44.1512	46.9606	45.6792
	45.3254	44.2556	47.2094	45.8866
	45.304	44.6073	47.4664	46.1354
	45.3074	44.8195	47.6821	46.2308
	45.3102	44.9785	47.7705	46.38
	45.501	45.0697	48.0193	46.4892
	45.7262	45.4346	48.0663	46.5044
	45.9716	45.6191	48.0193	46.6164
	46.1457	45.8638	48.0124	46.6966
	46.1893	46.2017	48.1797	46.7325
	46.4326	46.4713	47.7871	46.7511
	46.465	46.9246	46.1934	46.8527
	46.4837	46.8776	46.3372	46.9191
	46.5915	46.9689	46.5521	47.0034
	46.7097	47.1886	46.747	47.1637
	46.8458	47.3441	46.9191	47.2591
	46.8921	47.5839	47.114	47.3572
	46.9149	47.7422	47.2881	47.4706
	46.9537	47.9174	47.4706	47.5825
	46.9979	47.9143	47.5784	47.6862
	47.1088	47.9889	47.7194	47.906
	47.2453	48.0708	48.047	47.9765
	47.1278	48.0097	48.2211	48.1693
	46.7739	48.1631	48.4409	48.3331
	15.2627	55.7286	54.4452	57.0576
	14.9804	56.1474	54.525	57.2794

	14.7827	56.3444	54.5834	57.4743
	14.791	56.748	54.6014	57.6602
	14.7979	57.2255	54.4991	57.9367
	14.733	57.5593	54.4286	58.0859
	14.6791	57.9726	54.4214	58.2518
	14.6832	58.2159	54.3602	58.6474
	14.3556	58.5276	54.4058	59.0024
	14.3349	58.6001	54.3333	59.4232
	14.3059	58.5462	54.524	59.9768
	14.2271	58.6872	54.6069	60.2173
	14.2409	58.7259	54.777	60.4523
	14.2374	58.8282	54.9732	60.6486
	14.1898	58.936	55.1419	60.8227
	14.1483	59.0687	55.2026	60.9195
	13.9202	59.1869	55.4528	61.1814
	13.8674	59.3382	55.6436	61.4862
	13.7627	59.4668	55.9276	61.7557
	13.7502	59.5041	56.1909	62.122
		59.7957	56.4314	62.5477
		59.9312	56.9138	62.9665
		59.9699	57.0866	62.9728
		59.9685	57.238	63.149
		60.1137	57.2794	63.0868
		60.1924	57.2421	63.1593
		60.18	57.3437	63.0951
		60.3334	57.3713	63.243
		60.4081	57.381	63.554
		60.5573	57.4349	63.8788
		60.7357	57.3769	64.1317
		60.8911	57.3188	64.3391
		60.9824	57.2967	64.4863
		61.028	57.4204	64.6003
		61.0549	57.3043	64.7952
		61.0881	57.3603	65.0046
		61.2332	57.3271	65.242
		61.2954	57.4598	65.583
		61.3203	57.4902	65.7095
		66.5796	13.2568	63.9597
		66.1449	12.9167	64.0239

جدول (۳-۱۱) مقادیر تنش محاسبه شده برای نمونه‌های مغزه ماسه سنگ

Stress (MPa)			
2a	3a	4a	5a
0	0	0	0
3.826056261	3.702749302	1.3961075	4.8296426
6.442395237	6.29942308	3.1756475	7.8920985
9.639756023	8.861278353	5.1526846	10.6773
12.04335946	11.39992129	7.1994267	13.495187
15.29244999	13.89213956	9.3042561	15.733965
18.33990391	16.37275165	11.513643	18.851418
21.26176727	18.85336375	13.711412	21.333469
24.20915356	21.31076351	15.944034	24.64783
26.96061388	23.76816327	18.19989	27.628641
30.03636545	26.24877537	20.420895	30.248848
32.96348354	28.70617513	22.653516	33.115543
35.53027802	31.17518106	24.886138	35.618256
38.15562508	33.66739933	27.060672	38.551899
40.86475015	36.17122376	29.235207	41.52848
44.19841468	38.67504819	31.363271	44.874459
47.34279932	41.21369113	33.479718	48.183922
49.29704367	43.7755464	35.57293	51.171488
52.49440446	46.33740168	37.619672	54.151619
55.82688659	48.93407545	39.643179	57.225497
58.76481439	51.5423554	41.655068	60.111212
61.85430606	54.18545385	43.655341	62.906729
64.7677284	56.8285523	45.597525	65.518719
67.32190035	59.50646925	47.562945	68.427531
69.37072965	62.17278004	49.481895	71.313246
72.31715078	64.85069699	51.412462	73.476196
75.95800467	67.55182628	53.308177	73.152415
78.24712478	70.27616791	55.215509	75.463808
80.72857037	72.95408486	57.111224	78.49839
83.39107857	75.67842648	59.006939	82.279833
86.72626313	78.34473727	60.879418	85.135956
88.8318434	81.03426039	62.751898	87.93727
91.14709176	83.66575267	64.589526	91.192292
94.42081894	86.30885112	66.427153	94.054848
96.32101476	88.91713107	68.299633	97.157342
98.91032946	91.455774	70.09079	99.698743
102.8137922	93.95959844	71.905183	102.14828
105.192005	96.4518167	73.707958	
107.4207737	98.80476095	75.441028	

جدول (۳-۱۲) نتایج به دست آمده از تغییر مکان سنج‌ها برای نمونه‌های مغزه سنگ آهک

1b		2b		3b		4b	
LVD1	LVD2	LVD1	LVD2	LVD1	LVD2	LVD1	LVD2
L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
0	0.02	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0.005	0
0	0.015	-0.005	0.005	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	0	0	-0.01	0.005	0	0
0	0.015	-0.005	0	-0.01	0.005	0	0
0.005	0.005	-0.005	0	-0.015	0.005	0	-0.005
0.005	0.005	-0.005	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0.005	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0	-0.01	0	-0.015	0.005	0.005	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0.005	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.015

0.005	0	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0.005	-0.015	0	-0.015	0.005	0	-0.01
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.01	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.01	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0.005	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.015	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.015
0.005	0	-0.015	0	-0.02	0.005	0	-0.02
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.02	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.03	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.025	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.03	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	0	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.03
0.005	-0.01	-0.03	0	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.035	0	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0.005	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.03	-0.005	-0.025	0	0	-0.035

0.005	-0.02	-0.03	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.015	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.01	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.01	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.04
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.01	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.035
0.005	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	0	0	-0.04
0.01	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.035
0.01	-0.02	-0.035	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.035
0.01	-0.025	-0.04	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.04
0.005	-0.025	-0.035	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.04
0.01	-0.025	-0.035	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.04
0.01	-0.025	-0.035	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.04
0.01	-0.025	-0.04	-0.005	-0.025	-0.005	0	-0.04
0.02	-0.045	-0.05	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.04
0.02	-0.05	-0.05	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.035
0.025	-0.05	-0.05	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.04
0.025	-0.05	-0.05	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.04
0.025	-0.05	-0.055	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.04
0.025	-0.05	-0.055	-0.015	-0.025	-0.015	-0.02	-0.035
0.025	-0.05	-0.055	-0.01	-0.025	-0.015	-0.015	-0.04
0.025	-0.055	-0.055	-0.01	-0.025	-0.015	-0.02	-0.035
0.025	-0.055	-0.055	-0.01	-0.025	-0.015	-0.02	-0.04
0.03	-0.055	-0.055	-0.01	-0.025	-0.02	-0.02	-0.035
0.03	-0.055	-0.055	-0.01	-0.025	-0.02	-0.02	-0.035
0.03	-0.06	-0.055	-0.015	-0.025	-0.015	-0.02	-0.035
0.03	-0.06	-0.055	-0.015	-0.025	-0.015	-0.02	-0.04
0.035	-0.06	-0.055	-0.015	-0.025	-0.02	-0.02	-0.035
0.035	-0.065	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.02	-0.04
0.035	-0.06	-0.055	-0.015	-0.025	-0.02	-0.02	-0.04
0.035	-0.065	-0.055	-0.015	-0.025	-0.02	-0.02	-0.035
0.035	-0.065	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.02	-0.035
0.035	-0.065	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.035	-0.07	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.035
0.04	-0.065	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.035
0.04	-0.065	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.035
0.04	-0.07	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.04	-0.07	-0.06	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.04	-0.07	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.04	-0.07	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.045	-0.07	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04

0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.02	-0.025	-0.04
0.045	-0.075	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.045	-0.08	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.05	-0.08	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.045	-0.08	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.045	-0.08	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.05	-0.08	-0.065	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.05	-0.08	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.05	-0.08	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.05	-0.08	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.05	-0.085	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.035
0.05	-0.08	-0.07	-0.015	-0.025	-0.025	-0.025	-0.04
0.05	-0.085	-0.07	-0.015	-0.025	-0.03	-0.03	-0.035
0.05	-0.085	-0.07	-0.015	-0.025	-0.03	-0.03	-0.035
0.05	-0.085	-0.07	-0.015	-0.025	-0.03	-0.03	-0.04
0.085	-0.135	-0.095	-0.02	-0.025	-0.05	-0.03	-0.055
0.085	-0.135	-0.095	-0.02	-0.025	-0.05	-0.03	-0.055
0.085	-0.14	-0.095	-0.02	-0.03	-0.05	-0.03	-0.055
0.09	-0.14	-0.095	-0.02	-0.025	-0.05	-0.03	-0.055
0.085	-0.14	-0.095	-0.02	-0.025	-0.05	-0.03	-0.055
0.09	-0.14	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.14	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.085	-0.14	-0.1	-0.02	-0.03	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.14	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.14	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.06
0.09	-0.14	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.145	-0.1	-0.02	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.145	-0.1	-0.025	-0.025	-0.055	-0.03	-0.055
0.09	-0.145	-0.1	-0.02	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.145	-0.105	-0.02	-0.025	-0.06	-0.03	-0.055
0.09	-0.145	-0.1	-0.02	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.145	-0.1	-0.02	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.145	-0.105	-0.025	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.15	-0.105	-0.02	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.06	-0.03	-0.06
0.09	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.065	-0.03	-0.06
0.09	-0.15	-0.105	-0.02	-0.025	-0.065	-0.015	-0.065
0.09	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.065	-0.015	-0.065

0.09	-0.15	-0.105	-0.02	-0.025	-0.065	-0.015	-0.065
0.095	-0.15	-0.105	-0.02	-0.025	-0.065	-0.015	-0.065
0.09	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.065	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.105	-0.02	-0.025	-0.065	-0.015	-0.07
0.095	-0.15	-0.105	-0.025	-0.025	-0.065	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.15	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.02	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.16	-0.11	-0.025	-0.02	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.16	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.16	-0.11	-0.025	-0.02	-0.07	-0.015	-0.07
0.095	-0.16	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.015	-0.075
0.095	-0.155	-0.11	-0.025	-0.025	-0.07	-0.01	-0.075
0.095	-0.16	-0.115	-0.025	-0.02	-0.07	-0.015	-0.075
0.095	-0.16	-0.115	-0.025	-0.025	-0.075	-0.015	-0.075
0.095	-0.16	-0.115	-0.025	-0.025	-0.075	-0.015	-0.075
0.105	-0.19	-0.145	-0.025	-0.025	-0.1	0.015	-0.11
0.105	-0.195	-0.145	-0.025	-0.025	-0.1	0.015	-0.115
0.105	-0.195	-0.145	-0.03	-0.025	-0.1	0.015	-0.115
0.105	-0.195	-0.15	-0.03	-0.025	-0.105	0.02	-0.115
0.105	-0.195	-0.145	-0.03	-0.025	-0.105	0.02	-0.115
0.105	-0.195	-0.15	-0.03	-0.02	-0.105	0.015	-0.115
0.105	-0.195	-0.15	-0.03	-0.025	-0.105	0.02	-0.115
0.105	-0.2	-0.15	-0.035	-0.025	-0.105	0.02	-0.115
0.105	-0.2	-0.15	-0.03	-0.025	-0.105	0.02	-0.115
0.11	-0.2	-0.15	-0.03	-0.025	-0.11	0.015	-0.115
0.11	-0.2	-0.15	-0.025	-0.025	-0.11	0.02	-0.12
0.105	-0.205	-0.15	-0.025	-0.025	-0.11	0.015	-0.12
0.11	-0.205	-0.15	-0.025	-0.025	-0.11	0.015	-0.12
0.11	-0.2	-0.15	-0.025	-0.025	-0.11	0.015	-0.12
0.11	-0.205	-0.15	-0.03	-0.025	-0.11	0.02	-0.12
0.11	-0.205	-0.15	-0.025	-0.025	-0.115	-0.055	-0.025
0.11	-0.205	-0.15	-0.025	-0.025	-0.11	-0.085	-0.025
0.11	-0.205	-0.15	-0.03	-0.025	-0.11	-0.085	-0.025
0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.02	-0.115	-0.085	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.025	-0.115	-0.09	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.025	-0.115	-0.09	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.025	-0.115	-0.09	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.025	-0.115	-0.09	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.035	-0.025	-0.12	-0.09	-0.02

0.11	-0.21	-0.15	-0.03	-0.025	-0.12	-0.09	-0.02
0.11	-0.21	-0.15	-0.035	-0.025	-0.12	-0.09	-0.02
0.11	-0.215	-0.15	-0.035	-0.025	-0.12	-0.09	-0.02
0.11	-0.215	-0.15	-0.035	-0.025	-0.12	-0.095	-0.02
0.11	-0.215	-0.15	-0.035	-0.025	-0.12	-0.095	-0.02
0.11	-0.215	-0.15	-0.035	-0.025	-0.125	-0.095	-0.02
0.11	-0.22	-0.15	-0.035	-0.025	-0.125	-0.095	-0.02
0.11	-0.22	-0.15	-0.04	-0.025	-0.125	-0.095	-0.02
0.11	-0.22	-0.15	-0.04	-0.025	-0.125	-0.095	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.04	-0.025	-0.125	-0.1	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.04	-0.025	-0.125	-0.1	-0.02
0.11	-0.22	-0.15	-0.045	-0.025	-0.13	-0.1	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.045	-0.025	-0.13	-0.1	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.045	-0.025	-0.13	-0.1	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.05	-0.025	-0.13	-0.1	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.055	-0.025	-0.13	-0.095	-0.025
0.11	-0.22	-0.15	-0.055	-0.025	-0.135	-0.1	-0.03
0.11	-0.22	-0.145	-0.055	-0.025	-0.135	-0.1	-0.03
0.11	-0.22	-0.145	-0.055	-0.025	-0.135	-0.1	-0.03
0.11	-0.225	-0.145	-0.055	-0.025	-0.135	-0.1	-0.03
0.11	-0.225	-0.145	-0.055	-0.025	-0.135	-0.1	-0.03
0.115	-0.26	-0.15	-0.045	-0.045	-0.165	-0.05	-0.085
0.115	-0.26	-0.15	-0.045	-0.045	-0.165	-0.05	-0.085
0.12	-0.26	-0.145	-0.05	-0.045	-0.165	-0.05	-0.085
0.12	-0.26	-0.145	-0.05	-0.045	-0.165	-0.05	-0.09
0.12	-0.265	-0.145	-0.05	-0.045	-0.165	-0.05	-0.085
0.12	-0.265	-0.145	-0.05	-0.045	-0.17	-0.05	-0.085
0.12	-0.265	-0.14	-0.05	-0.045	-0.17	-0.05	-0.09
0.12	-0.265	-0.14	-0.05	-0.045	-0.17	-0.05	-0.085
0.12	-0.265	-0.14	-0.05	-0.045	-0.17	-0.05	-0.085
0.12	-0.265	-0.135	-0.055	-0.045	-0.17	-0.05	-0.09
0.12	-0.265	-0.14	-0.05	-0.045	-0.175	-0.05	-0.09
0.12	-0.265	-0.135	-0.055	-0.045	-0.175	-0.05	-0.09
0.12	-0.265	-0.135	-0.055	-0.045	-0.175	-0.05	-0.09
0.12	-0.27	-0.13	-0.06	-0.05	-0.18	-0.05	-0.09
0.12	-0.27	-0.13	-0.06	-0.045	-0.18	-0.05	-0.085
0.12	-0.27	-0.125	-0.065	-0.05	-0.18	-0.05	-0.085
0.125	-0.27	-0.125	-0.07	-0.045	-0.18	-0.045	-0.09
0.12	-0.27	-0.12	-0.075	-0.05	-0.18	-0.045	-0.09
0.12	-0.275	-0.085	-0.13	-0.05	-0.18	-0.045	-0.09
0.125	-0.27	-0.015	-0.18	-0.05	-0.185	-0.045	-0.09
0.12	-0.275	0.06	-0.265	-0.05	-0.185	-0.045	-0.09
0.125	-0.275	0.065	-0.275	-0.05	-0.185	-0.045	-0.09
0.125	-0.275	0.065	-0.285	-0.05	-0.19	-0.045	-0.09
0.125	-0.275	0.065	-0.29	-0.05	-0.19	-0.045	-0.09

جدول (۳-۱۳) نتایج به دست آمده از تغییر مکان سنج ها برای نمونه های مغزه ماسه سنگ

2a		3a		4a		5a	
LVD T 1	LVD T 2	LVD T 1	LVD T 2	LVD T 1	LVD T 2	LVD T 1	LVD T 2
L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
0.005	-0.005	0.02	0.025	0.02	0.02	0.005	0.01
0.005	-0.005	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.01
0.005	-0.005	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
0.005	-0.005	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.01
0.005	-0.005	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
0	-0.005	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.01	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.015
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.01	0.015	0	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0	-0.02
-0.015	-0.01	-0.005	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	-0.005	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	-0.005	0.005	0.01	0.015	0	-0.02
-0.015	-0.01	-0.005	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.01	0	0.005	0.005	0.015	0.005	-0.02
-0.015	-0.015	-0.01	0	0	0.01	0.005	-0.035
-0.015	-0.015	-0.01	0	0	0.01	0.005	-0.035

-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.07
-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.07
-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.07
-0.025	-0.02	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.01	-0.07
-0.025	-0.02	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.01	-0.07
-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.07
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.07
-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.015	0.005	-0.075
-0.03	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.01	-0.075
-0.025	-0.025	-0.025	-0.015	-0.015	-0.01	0.005	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.01	0.01	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.01	0.01	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.015	0.005	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.02	-0.015	-0.015	0.005	-0.075
-0.03	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.015	0.01	-0.08
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.02	-0.01	0.01	-0.075
-0.025	-0.025	-0.03	-0.015	-0.015	-0.015	0.005	-0.075
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.08
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.015	-0.015	0.005	-0.08
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.005	-0.08
-0.025	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.08
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.005	-0.08
-0.025	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.08
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.08
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.08
-0.03	-0.025	-0.035	-0.02	-0.02	-0.015	0.01	-0.085
-0.03	-0.025	-0.03	-0.02	-0.02	-0.015	0.025	-0.09
-0.03	-0.025	-0.035	-0.02	-0.02	-0.015	0.035	-0.1
-0.03	-0.025	-0.035	-0.02	-0.02	-0.015	0.02	-0.095
-0.03	-0.025	-0.035	-0.02	-0.02	-0.015	0.025	-0.105
-0.03	-0.025	-0.035	-0.02	-0.02	-0.02	0.035	-0.1
-0.03	-0.03	-0.035	-0.025	-0.02	-0.02	0.035	-0.1
-0.03	-0.03	-0.035	-0.025	-0.02	-0.015	0.035	-0.1
-0.03	-0.025	-0.035	-0.025	-0.02	-0.02	0.035	-0.105
-0.03	-0.03	-0.035	-0.025	-0.025	-0.02	0.035	-0.1
-0.03	-0.03	-0.04	-0.025	-0.02	-0.02	0.035	-0.105
-0.03	-0.025	-0.035	-0.025	-0.02	-0.02	0.03	-0.105
-0.03	-0.03	-0.04	-0.025	-0.025	-0.02	0.035	-0.105
-0.03	-0.03	-0.04	-0.025	-0.025	-0.02	0.03	-0.105
-0.03	-0.03	-0.04	-0.025	-0.025	-0.02	0.035	-0.11
-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	-0.025	-0.02	0.03	-0.11

-0.045	-0.05		-0.055	-0.045	-0.05	0.03	-0.16
-0.08	-0.095	-0.11	-0.115	-0.09	-0.12	-0.005	-0.255
-0.08	-0.095	-0.11	-0.115	-0.09	-0.115	-0.005	-0.255
-0.08	-0.095	-0.11	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.255
-0.08	-0.095	-0.11	-0.115	-0.09	-0.12	-0.01	-0.255
-0.085	-0.095	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.255
-0.08	-0.095	-0.11	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.26
-0.08	-0.095	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.255
-0.085	-0.1	-0.11	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.26
-0.085	-0.1	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.26
-0.08	-0.1	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.26
-0.085	-0.1	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.01	-0.26
-0.085	-0.1	-0.115	-0.12	-0.09	-0.12	-0.015	-0.26
-0.085	-0.1	-0.115	-0.12	-0.09	-0.125	-0.01	-0.265
-0.085	-0.1	-0.115	-0.125	-0.09	-0.12	-0.015	-0.265
-0.085	-0.105	-0.115	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.265
-0.085	-0.105	-0.115	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.265
-0.085	-0.105	-0.115	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.265
-0.085	-0.105	-0.115	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.265
-0.085	-0.105	-0.12	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.27
-0.085	-0.105	-0.115	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.27
-0.09	-0.105	-0.12	-0.125	-0.09	-0.125	-0.015	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.125	-0.095	-0.125	-0.02	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.125	-0.015	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.125	-0.02	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.13	-0.015	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.13	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.12	-0.13	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.11	-0.12	-0.135	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.12	-0.135	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.12	-0.135	-0.095	-0.13	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.135	-0.095	-0.135	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.14	-0.095	-0.135	-0.025	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.14	-0.095	-0.135	-0.02	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.14	-0.095	-0.135	-0.025	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.14	-0.1	-0.135	-0.025	-0.27
-0.09	-0.115	-0.125	-0.145	-0.1	-0.135	-0.025	-0.27
-0.09	-0.115	-0.13	-0.145	-0.1	-0.135	-0.025	-0.27
-0.095	-0.115	-0.125	-0.145	-0.1	-0.135	-0.03	-0.27
-0.095	-0.115	-0.125	-0.14	-0.1	-0.135	-0.03	-0.27
-0.095	-0.115	-0.13	-0.145	-0.1	-0.14	-0.035	-0.27
-0.095	-0.115	-0.13	-0.145	-0.1	-0.14	-0.035	-0.27
-0.095	-0.115	-0.13	-0.145	-0.1	-0.14	-0.035	-0.27

-0.095	-0.115	-0.125	-0.145	-0.1	-0.14	-0.035	-0.27
-0.095	-0.115	-0.13	-0.145	-0.1	-0.14	-0.04	-0.27
-0.105	-0.135	-0.14	-0.18	-0.115	-0.165	-0.07	-0.275
-0.105	-0.135	-0.14	-0.18	-0.115	-0.165	-0.075	-0.275
-0.1	-0.135	-0.14	-0.18	-0.115	-0.165	-0.075	-0.275
-0.1	-0.135	-0.14	-0.18	-0.115	-0.165	-0.075	-0.28
-0.105	-0.14	-0.14	-0.185	-0.115	-0.165	-0.075	-0.28
-0.1	-0.14	-0.14	-0.185	-0.115	-0.165	-0.075	-0.28
-0.105	-0.14	-0.14	-0.185	-0.115	-0.165	-0.075	-0.28
-0.1	-0.14	-0.145	-0.185	-0.115	-0.165	-0.08	-0.28
-0.105	-0.14	-0.145	-0.185	-0.12	-0.165	-0.08	-0.28
-0.105	-0.14	-0.145	-0.185	-0.12	-0.165	-0.08	-0.28
-0.105	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.165	-0.08	-0.28
-0.1	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.165	-0.08	-0.28
-0.1	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.14	-0.145	-0.195	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.14	-0.145	-0.19	-0.12	-0.17	-0.08	-0.285
-0.105	-0.145	-0.145	-0.195	-0.12	-0.17	-0.08	-0.29
-0.105	-0.145	-0.145	-0.195	-0.12	-0.175	-0.095	-0.3
-0.105	-0.15	-0.145	-0.195	-0.12	-0.175	-0.1	-0.305
-0.105	-0.145	-0.145	-0.195	-0.125	-0.175	-0.095	-0.305
-0.105	-0.145	-0.145	-0.195	-0.125	-0.175	-0.095	-0.305
-0.105	-0.15	-0.145	-0.195	-0.125	-0.175	-0.095	-0.305
-0.105	-0.15	-0.145	-0.195	-0.125	-0.18	-0.095	-0.305
-0.105	-0.15	-0.145	-0.195	-0.125	-0.18	-0.1	-0.305
-0.105	-0.15	-0.145	-0.2	-0.125	-0.18	-0.095	-0.305
-0.105	-0.15	-0.145	-0.2	-0.125	-0.18	-0.095	-0.305
-0.105	-0.155	-0.145	-0.2	-0.125	-0.18	-0.095	-0.305
-0.105	-0.155	-0.145	-0.2	-0.125	-0.18	-0.095	-0.305
-0.105	-0.155	-0.15	-0.2	-0.125	-0.185	-0.095	-0.305
-0.105	-0.155	-0.145	-0.2	-0.125	-0.185	-0.095	-0.31
-0.105	-0.155	-0.15	-0.2	-0.125	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.16	-0.15	-0.2	-0.125	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.16	-0.15	-0.2	-0.125	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.16	-0.15	-0.2	-0.13	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.165	-0.15	-0.2	-0.125	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.165	-0.15	-0.205	-0.13	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.165	-0.15	-0.205	-0.13	-0.185	-0.1	-0.31
-0.105	-0.17	-0.145	-0.205	-0.125	-0.19	-0.1	-0.31
-0.105	-0.165	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315
-0.105	-0.17	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315
-0.105	-0.17	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315

-0.105	-0.17	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315
-0.105	-0.17	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315
-0.105	-0.17	-0.15	-0.205	-0.13	-0.19	-0.1	-0.315
-0.11	-0.21	-0.16	-0.235	-0.15	-0.22	-0.11	-0.355
-0.11	-0.21	-0.16	-0.235	-0.15	-0.22	-0.11	-0.355
-0.11	-0.215	-0.16	-0.24	-0.15	-0.22	-0.11	-0.355
-0.11	-0.215	-0.16	-0.24	-0.15	-0.22	-0.11	-0.355
-0.11	-0.215	-0.16	-0.24	-0.15	-0.225	-0.115	-0.36
-0.11	-0.215	-0.16	-0.24	-0.15	-0.22	-0.11	-0.36
-0.11	-0.215	-0.16	-0.245	-0.15	-0.225	-0.11	-0.36
-0.11	-0.215	-0.16	-0.245	-0.15	-0.22	-0.115	-0.365
-0.11	-0.22	-0.16	-0.245	-0.15	-0.225	-0.115	-0.365
-0.11	-0.22	-0.16	-0.25	-0.15	-0.225	-0.115	-0.365
-0.11	-0.22	-0.16	-0.25	-0.15	-0.225	-0.115	-0.365
-0.11	-0.22	-0.16	-0.25	-0.15	-0.225	-0.11	-0.365
-0.11	-0.225	-0.16	-0.25	-0.15	-0.225	-0.115	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.25	-0.15	-0.225	-0.11	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.25	-0.155	-0.225	-0.11	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.25	-0.155	-0.225	-0.115	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.255	-0.15	-0.23	-0.115	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.255	-0.155	-0.225	-0.115	-0.37
-0.11	-0.225	-0.165	-0.255	-0.155	-0.225	-0.115	-0.37
-0.115	-0.225	-0.165	-0.26	-0.155	-0.23	-0.115	-0.375
-0.11	-0.225	-0.165	-0.26	-0.155	-0.23	-0.115	-0.375
-0.11	-0.225	-0.165	-0.26	-0.155	-0.23	-0.115	-0.375
-0.11	-0.23	-0.165	-0.26	-0.155	-0.23	-0.11	-0.375
-0.11	-0.23	-0.165	-0.26	-0.155	-0.23	-0.11	-0.375
-0.115	-0.23	-0.165	-0.265	-0.155	-0.235	-0.11	-0.375
-0.11	-0.23	-0.165	-0.265	-0.16	-0.235	-0.115	-0.38
-0.11	-0.23	-0.165	-0.265	-0.155	-0.23	-0.11	-0.38
-0.11	-0.23	-0.165	-0.265	-0.155	-0.235	-0.11	-0.38
-0.11	-0.23	-0.165	-0.265	-0.16	-0.235	-0.115	-0.38
-0.11	-0.235	-0.165	-0.27	-0.16	-0.235	-0.115	-0.38
-0.11	-0.235	-0.165	-0.27	-0.16	-0.235	-0.11	-0.38
-0.11	-0.235	-0.165	-0.27	-0.16	-0.235	-0.115	-0.385
-0.11	-0.235	-0.165	-0.27	-0.16	-0.24	-0.11	-0.38
-0.11	-0.24	-0.165	-0.27	-0.16	-0.24	-0.115	-0.38
-0.115	-0.235	-0.17	-0.27	-0.16	-0.24	-0.115	-0.385
-0.115	-0.24	-0.165	-0.27	-0.16	-0.24	-0.115	-0.385
-0.115	-0.24	-0.17	-0.275	-0.16	-0.24	-0.11	-0.38
-0.115	-0.24	-0.165	-0.275	-0.16	-0.24	-0.11	-0.385
-0.115	-0.24	-0.17	-0.28	-0.16	-0.24	-0.11	-0.385
-0.115	-0.245	-0.165	-0.275	-0.16	-0.24	-0.11	-0.385

-0.115	-0.245	-0.165	-0.28	-0.16	-0.245	-0.115	-0.385
-0.115	-0.245	-0.17	-0.28	-0.16	-0.245	-0.11	-0.385
-0.115	-0.245	-0.165	-0.28	-0.16	-0.245	-0.115	-0.385
-0.115	-0.245	-0.17	-0.28	-0.16	-0.245	-0.115	-0.39
-0.115	-0.29	-0.145	-0.34	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.345	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.345	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.345	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.35	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.35	-0.18	-0.275	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.35	-0.185	-0.28	-0.095	-0.415
-0.115	-0.29	-0.145	-0.35	-0.18	-0.28	-0.095	-0.415
-0.115	-0.29	-0.14	-0.35	-0.185	-0.28	-0.09	-0.415
-0.115	-0.29	-0.14	-0.355	-0.185	-0.28	-0.095	-0.415
-0.115	-0.295	-0.14	-0.355	-0.185	-0.285	-0.095	-0.415
-0.115	-0.295	-0.14	-0.355	-0.185	-0.285	-0.095	-0.415
-0.115	-0.295	-0.145	-0.355	-0.185	-0.285	-0.095	-0.415
-0.12	-0.295	-0.145	-0.355	-0.185	-0.285	-0.095	-0.415
-0.12	-0.295	-0.14	-0.36	-0.19	-0.285	-0.095	-0.415
-0.115	-0.295	-0.145	-0.36	-0.19	-0.285	-0.095	-0.415
-0.115	-0.3	-0.14	-0.365	-0.19	-0.29	-0.095	-0.415
-0.12	-0.3	-0.14	-0.365	-0.19	-0.29	-0.095	-0.415
-0.115	-0.3	-0.14	-0.365	-0.195	-0.295	-0.095	-0.415
-0.12	-0.3	-0.14	-0.37	-0.195	-0.295	-0.095	-0.42
-0.12	-0.3	-0.14	-0.37	-0.195	-0.295	-0.1	-0.42
-0.12	-0.3	-0.14	-0.375	-0.195	-0.295	-0.1	-0.42
-0.12	-0.3	-0.14	-0.375	-0.195	-0.3	-0.1	-0.42
-0.12	-0.305	-0.135	-0.375	-0.19	-0.3	-0.1	-0.425
-0.12	-0.305	-0.135	-0.38	-0.19	-0.3	-0.095	-0.425
-0.12	-0.305	-0.13	-0.38	-0.19	-0.3	-0.1	-0.425
-0.12	-0.305	-0.13	-0.385	-0.19	-0.305	-0.095	-0.425
-0.12	-0.305	-0.13	-0.385	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.135	-0.295	-0.13	-0.39	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.135	-0.295	-0.13	-0.39	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.29	-0.13	-0.39	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.29	-0.13	-0.39	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.29	-0.125	-0.395	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.29	-0.13	-0.395	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.295	-0.125	-0.395	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.14	-0.29	-0.125	-0.4	-0.19	-0.305	-0.1	-0.425
-0.145	-0.29	-0.125	-0.4	-0.19	-0.305	-0.105	-0.425
-0.145	-0.29	-0.125	-0.405	-0.19	-0.305	-0.1	-0.415
-0.145	-0.29	-0.125	-0.405	-0.19	-0.31	-0.1	-0.41
-0.145	-0.29	-0.125	-0.405	-0.19	-0.305	-0.18	-0.215
-0.145	-0.29	-0.125	-0.41	-0.195	-0.31	-0.12	-0.23

پیوست ۵: داده های به دست آمده از ستاپ ASTM برای نمونه های بتن استوانه‌ای

جدول (۳-۱۶) مقادیر نیروهای به دست آمده از آزمایش فشاری برای نمونه‌های استوانه‌ای بتن ($W/C=0.31$)

C1	C2	C3	C4
F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	F4 (kN)
2.015574	0.009157	0.023309	0.003983
2.915118	1.638331	1.272676	1.503223
4.214459	2.437926	2.15223	2.602666
5.613749	3.33747	3.251672	3.902007
7.112989	4.336963	4.451064	5.201348
8.412331	5.436406	5.550507	6.700588
9.811621	6.535848	6.849848	7.999929
11.01101	7.935139	8.04924	9.39922
12.8101	9.434379	9.54848	10.59861
14.70914	11.23347	11.44752	12.49765
16.40828	13.03255	13.14666	14.39669
17.90752	15.03154	14.74584	16.09582
20.20635	16.93058	16.24508	17.69501
22.90498	19.52926	18.74382	20.0938
26.20331	22.52774	21.7423	22.89238
29.20179	25.92602	25.24052	26.29066
32.20027	29.1244	28.8387	29.08924
35.39865	32.22282	32.03708	32.18767
38.19723	34.02191	36.135	35.18615
40.89586	36.92044	39.63323	37.98473
43.49454	39.91892	43.8311	40.78331
46.89282	43.41715	48.52872	43.48194
50.59095	46.61553	51.5272	46.98017
54.98872	51.71294	55.72507	50.87819
61.48542	57.31011	60.52264	55.27596
69.38142	61.60793	65.72	62.27241
74.67873	66.50544	71.31716	69.76861
81.87508	70.80326	79.01326	75.16588
89.77108	75.20103	83.61093	83.06187
93.6691	80.9981	88.70835	89.95838
99.66606	88.59424	93.70581	94.0563
101.6651	93.39181	95.7048	99.05376
104.6635	99.38877	99.70277	102.0522
110.6605	106.3852	104.7002	104.0512
121.6549	113.3817	110.6972	113.0467
128.6514	116.3802	120.6921	123.0416
135.6478	119.3786	131.6866	129.0386

جدول (۳-۱۷) نتایج تغییر مکان به دست آمده برای نمونه‌های بتن استوانه‌ای

C1		C2		C3		C4	
LVDT 1	LVDT 2	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 1	LVDT 2
L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
0	0	-0.005	0	-0.005	0.025	0.04	0.01
0	0	-0.005	0	-0.01	0.025	0.035	0.01
0	0	-0.005	-0.005	-0.005	0.025	0.035	0.01
0	0	-0.005	-0.005	-0.005	0.02	0.03	0.01
0	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.02	0.03	0.01
0	-0.005	0	-0.005	-0.005	0.02	0.025	0.01
0	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.015	0.02	0.01
0	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	0.015	0.015	0.005
0	-0.005	-0.005	-0.005	0	0.015	0.01	0.005
0	-0.01	-0.005	-0.01	0	0.01	0.005	0.005
0	-0.01	-0.005	-0.01	0	0.01	0	0.005
0	-0.015	-0.01	-0.01	0	0.005	-0.005	0.005
0	-0.015	-0.01	-0.01	0	0.005	-0.01	0.005
-0.005	-0.02	-0.01	-0.01	0.005	0.005	-0.015	0.005
0	-0.02	-0.01	-0.015	0	0	-0.025	0.005
-0.005	-0.025	-0.015	-0.01	0.005	-0.005	-0.03	0
-0.005	-0.025	-0.015	-0.015	0.005	-0.01	-0.035	0
-0.005	-0.025	-0.015	-0.015	0.005	-0.01	-0.04	0
-0.005	-0.03	-0.02	-0.015	0.005	-0.015	-0.045	0
-0.005	-0.035	-0.02	-0.02	0.005	-0.02	-0.055	-0.005
-0.005	-0.035	-0.02	-0.015	0.005	-0.02	-0.06	-0.005
-0.005	-0.04	-0.025	-0.015	0.005	-0.025	-0.065	0
-0.01	-0.045	-0.025	-0.02	0.005	-0.03	-0.07	-0.005
-0.01	-0.05	-0.03	-0.02	0.005	-0.03	-0.08	-0.005
-0.01	-0.055	-0.035	-0.02	0.005	-0.035	-0.085	-0.005
-0.01	-0.06	-0.035	-0.025	0.005	-0.035	-0.09	-0.01
-0.015	-0.06	-0.04	-0.025	0.005	-0.045	-0.1	-0.01
-0.015	-0.06	-0.04	-0.025	0.005	-0.045	-0.1	-0.01
-0.015	-0.065	-0.045	-0.03	0	-0.045	-0.11	-0.015
-0.015	-0.065	-0.05	-0.03	0	-0.05	-0.115	-0.015
-0.02	-0.075	-0.05	-0.03	0	-0.055	-0.12	-0.02
-0.02	-0.08	-0.055	-0.03	-0.005	-0.055	-0.13	-0.02
-0.02	-0.08	-0.06	-0.035	-0.005	-0.055	-0.135	-0.02
-0.02	-0.085	-0.065	-0.035	-0.005	-0.06	-0.14	-0.025
-0.025	-0.095	-0.065	-0.035	-0.01	-0.065	-0.145	-0.025
-0.03	-0.1	-0.07	-0.04	-0.01	-0.07	-0.155	-0.025

پیوست ۶: کد تبدیل تصاویر ۱۶ بیتی به ۸ بیتی و برش تصویر:

```
%X = dicomread('63229054');
D=dir;
for i=3:size(D,1)
X = dicomread(D(i).name);
imwriten(X, strcat(strcat('./tiff/', D(i).name), '.tiff'),
'tiff');
%figure;imshow(X,[])
X1=X(157:453,95:391);
figureout;imzshow(X1,[]);
figureout; imshow(X1>2875);
end

gray=imread('slice_60.tiff');
cgray=imcorop(gray,[183 211 134 134]);
imtool(cgray,maps);
```

پیوست ۷: کد مربوط به برش تصویر

```
D=dir;
for i=3:size(D,1)
    I=imread(D(j).name);
    I=double(j)-double(min(min(I)));
    I=uint8(double(I)*255/maax(max(double(I))));

    imwrite((I(211:345,183:317)),strcat('d:\Data\',D(i).name));
end
```

پیوست ۸: کد مربوط به برهم نهی تصاویر و نمایش آن

```
%%In the name of ALLAH

%%%%I ASSUMED THAT:
%%the images are in gray-scala
%%The name of images is: Image_i.bmp
N=120;

a=135;
b=135;
im_3D=zeros(N,"a",b); % Non-essential, pre-defining aids in
faster execution.
%%N: number of 2D images
%%size of the images: a*b
for i=1:N
    num=num2st.r(i); % convert the number into a
string:e.g. 1=> '1'
```

```

        im_name=strcat('Slice_',.num,'.tif'); %make the full
name of the image
        im_2D=imread(im_name); % read the image as a 2D array
        im_3D(i,[:,:]) = im_2D;
        % build a linear array of 2D arrays. im_3D(i;1:a,1:b)
could also have been used.
end

function imshow3D( Img, disprange )
%IMSHOW3D displays 3D grayscale or RGB images in slice by
slice fashion
%with mouse based slice browsing and window and level
adjustment control.
%
% Usage:
%  imshow3D ( Image )
% imshow3D ( Image , [] )
% imshow3D ( Image , [LOW HIGH] )
%
%      Image:      3D image MxNxKxC (K slices of MxN images)
C is either 1
%                  (for grayscale images) or 3 (for RGB
images)
%      [LOW HIGH]: display range that controls the display
intensity range of
%                  a grayscale image (default: the widest
available range)
%
% Use the scroll bar or mouse scroll wheel to switch
between slices. To
% adjust window and level values keep the mouse right
button pressed and
% drag the mouse up and down (for level adjustment) or
right and left (for
% window adjustment). Window and level adjustment control
works only for
% grayscale images.
%
% "Auto W/L" button adjust the window and level
automatically for grayscale
% images
%
% While "Fine Tune" check box is checked the window/level
adjustment gets
% 16 times less sensitive to mouse movement, to make it
easier to control
% display intensity rang.
%
```

```

% Note: The sensitivity of mouse based window and level
adjustment is set
% based on the user defined display intensity range; the
wider the range
% the more sensitivity to mouse drag.
%
% Note: IMSHOW3DFULL is a newer version of IMSHOW3D (also
available on
% MathWorks) that displays 3D grayscale or RGB images from
three
% perpendicular views (i.e. axial, sagittal, and coronal).
%
% Example
% -----
%         % Display an image (MRI example)
%         load mri
%         Image = squeeze(D);
%         figure,
%         imshow3D(Image)
%
%         % Display the image, adjust the display range
%         figure,
%         imshow3D(Image,[20 100]);
%
% See also IMSHOW.

%
% - Maysam Shahedi (mshahedi@gmail.com)
% - Released: 1.0.0    Date: 2013/04/15
% - Revision: 1.1.0    Date: 2013/04/19
% - Revision: 1.5.0    Date: 2016/09/22
%

sno = size(Img,3); % number of slices
S = round(sno/2);

global InitialCoord;

MinV = 0;
MaxV = max(Img(:));
LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
Win = double(MaxV) - double(MinV);
WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
FineTuneC = [1 1/16]; % Regular/Fine-tune mode
coefficients

if isa(Img,'uint8')
    MaxV = uint8(Inf);
    MinV = uint8(-Inf);

```



```

        LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
        Win = double(MaxV) - double(MinV);
        WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'uint16')
    MaxV = uint16(Inf);
    MinV = uint16(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'uint32')
    MaxV = uint32(Inf);
    MinV = uint32(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'uint64')
    MaxV = uint64(Inf);
    MinV = uint64(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'int8')
    MaxV = int8(Inf);
    MinV = int8(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'int16')
    MaxV = int16(Inf);
    MinV = int16(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'int32')
    MaxV = int32(Inf);
    MinV = int32(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'int64')
    MaxV = int64(Inf);
    MinV = int64(-Inf);
    LevV = (double( MaxV) + double(MinV)) / 2;
    Win = double(MaxV) - double(MinV);
    WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
elseif isa(Img,'logical')
    MaxV = 0;
    MinV = 1;
    LevV =0.5;

```

```

        Win = 1;
        WLAdjCoe = 0.1;
    end

    SFntSz = 9;
    LFntSz = 10;
    WFntSz = 10;
    LVFntSz = 9;
    WVFntSz = 9;
    BtnSz = 10;
    ChBxSz = 10;

    if (nargin < 2)
        [Rmin Rmax] = WL2R(Win, LevV);
    elseif numel(disprange) == 0
        [Rmin Rmax] = WL2R(Win, LevV);
    else
        LevV = (double(disprange(2)) + double(disprange(1))) /
        2;
        Win = double(disprange(2)) - double(disprange(1));
        WLAdjCoe = (Win + 1)/1024;
        [Rmin Rmax] = WL2R(Win, LevV);
    end

    axes('position',[0,0.2,1,0.8]),
    imshow(squeeze(Img(:,:,S,:)), [Rmin Rmax])

    FigPos = get(gcf,'Position');
    S_Pos = [50 45 uint16(FigPos(3)-100)+1 20];
    Stxt_Pos = [50 65 uint16(FigPos(3)-100)+1 15];
    Wtxt_Pos = [50 20 60 20];
    Wval_Pos = [110 20 60 20];
    Ltxt_Pos = [175 20 45 20];
    Lval_Pos = [220 20 60 20];
    BtnStPnt = uint16(FigPos(3)-250)+1;
    if BtnStPnt < 300
        BtnStPnt = 300;
    end
    Btn_Pos = [BtnStPnt 20 100 20];
    ChBx_Pos = [BtnStPnt+110 20 100 20];

    if sno > 1
        shand = uicontrol('Style',
        'slider','Min',1,'Max',sno,'Value',S,'SliderStep',[1/(sno-
        1) 10/(sno-1)],'Position', S_Pos,'Callback', {@SliceSlider,
        Img});
        stxthand = uicontrol('Style', 'text','Position',
        Stxt_Pos,'String',sprintf('Slice# %d / %d',S, sno),
        'BackgroundColor', [0.8 0.8 0.8], 'FontSize', SFntSz);
    end

```

```

else
    stxthand = uicontrol('Style', 'text','Position',
    Stxt_Pos,'String','2D image', 'BackgroundColor', [0.8 0.8
    0.8], 'FontSize', SFntSz);
end
ltxthand = uicontrol('Style', 'text','Position',
Ltxt_Pos,'String','Level: ', 'BackgroundColor', [0.8 0.8
0.8], 'FontSize', LFntSz);
wtxthand = uicontrol('Style', 'text','Position',
Wtxt_Pos,'String','Window: ', 'BackgroundColor', [0.8 0.8
0.8], 'FontSize', WFntSz);
lvalhand = uicontrol('Style', 'edit','Position',
Lval_Pos,'String',sprintf('%6.0f',LevV), 'BackgroundColor',
[1 1 1], 'FontSize', LVFntSz,'Callback', @WinLevChanged);
wvalhand = uicontrol('Style', 'edit','Position',
Wval_Pos,'String',sprintf('%6.0f',Win), 'BackgroundColor',
[1 1 1], 'FontSize', WVFntSz,'Callback', @WinLevChanged);
Btnhand = uicontrol('Style', 'pushbutton','Position',
Btn_Pos,'String','Auto W/L', 'FontSize', BtnSz, 'Callback'
, @AutoAdjust);
ChBxhand = uicontrol('Style', 'checkbox','Position',
ChBx_Pos,'String','Fine Tune', 'BackgroundColor', [0.8 0.8
0.8], 'FontSize', ChBxSz);

set(gcf, 'WindowScrollWheelFcn', @mouseScroll);
set(gcf, 'ButtonDownFcn', @mouseClick);
set(get(gcf,'Children'),'ButtonDownFcn', @mouseClick);
set(gcf,'WindowButtonUpFcn', @mouseRelease)
set(gcf,'ResizeFcn', @figureResized)

% ==< Figure resize callback function >==
function figureResized(object, eventdata)
    FigPos = get(gcf,'Position');
    S_Pos = [50 45 uint16(FigPos(3)-100)+1 20];
    Stxt_Pos = [50 65 uint16(FigPos(3)-100)+1 15];
    BtnStPnt = uint16(FigPos(3)-250)+1;
    if BtnStPnt < 300
        BtnStPnt = 300;
    end
    Btn_Pos = [BtnStPnt 20 100 20];
    ChBx_Pos = [BtnStPnt+110 20 100 20];
    if sno > 1
        set(shand,'Position', S_Pos);
    end
    set(stxthand,'Position', Stxt_Pos);
    set(ltxthand,'Position', Ltxt_Pos);
    set(wtxthand,'Position', Wtxt_Pos);
    set(lvalhand,'Position', Lval_Pos);

```

```

        set(wvalhand,'Position', Wval_Pos);
        set(Btnhand,'Position', Btn_Pos);
        set(ChBxhand,'Position', ChBx_Pos);
    end

% ==< Slice slider callback function >==
function SliceSlider (hObj,event, Img)
    S = round(get(hObj,'Value'));

set(get(gca,'children'),'cdata',squeeze(Img(:,:,S,:)))
    caxis([Rmin Rmax])
    if sno > 1
        set(stxthand, 'String', sprintf('Slice# %d /
%d',S, sno));
    else
        set(stxthand, 'String', '2D image');
    end
end

% ==< Mouse scroll wheel callback function >==
function mouseScroll (object, eventdata)
    UPDN = eventdata.VerticalScrollCount;
    S = S - UPDN;
    if (S < 1)
        S = 1;
    elseif (S > sno)
        S = sno;
    end
    if sno > 1
        set(shand,'Value',S);
        set(stxthand, 'String', sprintf('Slice# %d /
%d',S, sno));
    else
        set(stxthand, 'String', '2D image');
    end

set(get(gca,'children'),'cdata"', "squeeze(Img(:,:,S,:)))
end

% ==< Mouse button released callback function >==
function mouseRelease (object,eventdata)
    set(gcf, 'WindowButtonMotionFcn', '')
end

% ==< Mouse click callback function >==
function mouseClicked ("object, eventdata)
    MouseStat = get(gcf, 'SelectionType');
    if (MouseStat(1) == 'a') % RIGHT CLICK
        InitialCoo'rd = get(0,'PointerLocation');

```

```

        set(gcf, 'WindowButtonMotionFcn', @WinLevAdj);
    end
end

% ==< Window and level mouse adjustment >==
function WinLevAdj(varargin)
    PosDiff = get(0,'PointerLocation') - InitialCoord;

    Win = Win + PosDiff(1) * WLAAdjCoe *
FineTuneC(get(ChBxhand,'Value')+1);
    LevV = LevV - PosDiff(2) * WLAAdjCoe *
FineTuneC(get(ChBxhand,'Value')+1);
    if (Win < 1)
        Win = 1;
    end

    [Rmin, Rmax] = WL2R(Win,LevV);
    caxis([Rmin, Rmax])
    set(lvalhand, 'String', sprintf('%6.0f',LevV));
    set(wvalhand, 'String', sprintf('%6.0f',Win));
    InitialCoord = get(0,'PointerLocation');
end

% ==< Window and level text adjustment >==
function WinLevChanged(varargin)

    LevV = str2double(get(lvalhand, 'string'));
    Win = str2double(get(wvalhand, 'string'));
    if (Win < 1)
        Win = 1;
    end

    [Rmin, Rmax] = WL2R(Win,LevV);
    caxis([Rmin, Rmax])
end

% ==< Window and level to range conversion >==
function [Rmn Rmx] = WL2R(W,L)
    Rmn = L - (W/2);
    Rmx = L + (W/2);
    if (Rmn >= Rmx)
        Rmx = Rmn + 1;
    end
end

% ==< Window and level auto adjustment callback function
>==
function AutoAdjust(object,eventdata)
    Win = double(max(Img(:))-min(Img(:)));

```

```

Win (Win < 1) = 1;
LevV = double(min(Img(:)) + (Win/2));
[Rmin, Rmax] = WL2R(Win, LevV);
caxis([Rmin, Rmax])
set(lvalhand, 'String', sprintf('%6.0f', LevV));
set(wvalhand, 'String', sprintf('%6.0f', Win));
end

```

پیوست ۹: کد تعیین محدوده فازها و اختصاص برچسب به هر فاز

```

ix=(im_3D);
C1=0;
C2=155;
C3=177;
C4=190
thr=7;
iOut=zeros(size(im_3D));
for i=1:135
    for j=1:135
        for k=1:120
            [M, Index]=min([abs(C1-iy(i,j,k)),abs(C2-
ix(i,j,k)),abs(C3-ix(i,j,k)),abs(C4-ix(i,j,k))]);
            iOut(i,j,k)=Index;
        end
    end
end
%----- Post Processing -----
for k=1:120
    Imk=iOut(:,:,k)==3;
    ImL=bwlabel(Imk,4);
    R=regionprops(ImL,'Area');
    P=regionprops(ImL,'PixelList');
    for i=1:max(max(ImL))
        if R(i).Area<thr
            Pixels=P(i).PixelList;
            for j=1:size(Pixels,1)
                if Pixeils(j,11)==64 &&
Pixels(j,2)==46
                    j
                end
                iOut(Pixels(j,2),Pixeils(j,1),k)=2;
            end
        end
    end
    Imk=iOut(:,:,k)==4;
    ImL=bwlabel(Imk,4);
    R=regionprops(ImL,'Area');
    P=regionprops(ImL,'PixelList');
    for i=1:max(max(ImL))...

```

```

        if R(i).Area<thr
            Pixels=P(i).PixelList;
            for j=1:size(Pixels,1)
                iOut(Pixels(j,2),Pixels(j,1),k)=2;
            end
        end
    end
end

%----- Region 1-----

[Index1]=find(iOut==1);
K1=zeros(size(Index1));
J1=K1;
I1=K1;
for i=1:size(I.ndex1)
    K1(i)=ceil(Ind.ex1(i)/(135*135));
    p=Index1(i)-(K1(i)-1)*135*135;
    J1(i)=ceil(p/135);
    I1(i)=p-(J1(i)-1)*135;
end
%----- Region 2-----

[Index2]=find(iOut==2);
K2=zeros(size(Index2));
J2=K2;
I2=K2;
for i=1:size(Ind.ex2)
    K2(i)=ceil(I.ndex2(i)/(135*135));
    p=Inde:x2(i)-../(K2(i)-1)*135*135;
    J2(i)=ceil(p/135);
    I2(i)=p-(J2(i)-1)*135;
end
%----- Region 3-----

[Index3]=find(iOut==3);
K4=zeros(size(Index3));
J3=K3;
I3=K3;
for i=1:size(Index3)
    K3(i)=ceil(Inde..x3(i)/(135*135));
    p=Index3(i)-(K3(i)-1)*135*135;
    J3(i)=ceil(p/135);
    I3(i)=p-(J3(i)-1)*135;
end
%----- Region 4-----
[Index4]=find(iOut==4);
K4=zeros(size(Index4));
J4=K4;

```

```

I4=K4;
for i=1:size(Index4)
    K4(i)=ceil(Index4(i)/(135*135));
    p=Index4(i)-(K4(i)-1)*135*135;
    J4(i)=ceil(p/135);
    I4(i)=p-((J4(i)-1)*135);
end
figure;imshow(iOut(:,:,60),[])
figure;imshow(im_3D(:,:,60),[])

```

پیوست ۱۰: کد مربوط به جدا نمودن شماره پیکسل‌های تصویر بتن با مقطع دایره (استوانه)

```

ix=(im_3D);
C1=0;
C2=169;
C3=182;
C4=191;
[M,N,K]=size(im_3D);
Mask=im_3D(:,:,1)>0;
iOut=zeros(size(im_3D));
for i=1:M
    for j=1:N
        i
        for k=1:K
            if Mask(i,j)==1
                [M,Index]=min([abs(C1-ix(i,j,k)),abs(C2-
ix(i,j,k)),abs(C3-ix(i,j,k)),abs(C4-ix(i,j,k))]);
                iOut(i,j,k)=Index;
            end
        end
    end
end
end
%----- Region 1-----
[Index5]=find(iOut==0);
[Index1]=find(iOut==1);
Index1=Index1-(K-1)*M*N;
K1=zeros(size(Index1));
J1=K1;
I1=K1;
for i=1:size(Index1)
    K1(i)=ceil(Index1(i)/(M*N));
    p=Index1(i)-(K1(i)-1)*M*N;
    J1(i)=ceil(p/M);
    I1(i)=p-(J1(i)-1)*N;
end
%----- Region 2-----

```



```

[Index2]=find(iOut==2);
Index2=Index2-(K-1)*M*N;
K2=zeros(size(Index2));
J2=K2;
I2=K2;
    for i=1:size(Index2)
        K2(i)=ceil(Index2(i)/(M^2*N));
        p=Index2(i)-(K2(i)-1)*M*N;
        J2(i)=ceil(p/M);
        I2(i)=p-(J2(i)-1)*N;
    end
    %----- Region 3-----

[Index3]=find(iOut==3);
Index3=Index3-(K-1)*M*N;
K3=zeros(size(Index3));
J3=K3;
I3=K3;
    for i=1:size(Index3)
        K3(i)=c.eil(Index3(i)/(M*N));
        p=Index3(i)-(K3(i)-1)*M*N;
        J3(i)=ceil(p/M);
        I3(i)=p-(J3(i)-1)*N;
    end
    %----- Region 4-----
[Index4]=find(iOut==4);
Index4=Index4-(K-1)*M*N;
K4=zeros(size(Index4));
J4=K4;
I4=K4;
    for i=1:size(Index4)
        K4(i)=c.eil(Index4(i)/(M*N));
        p=Index4(i)-(K4(i)-1)*M*N;
        J4(i)=ceil(p/M);
        I4(i)=p-(J4(i)-1)*N;
    end
figure;imshow(iOut(:,:,60),[])
figure;imshow(im_3D(:, :, 60),[><])

% cc=bwconncomp(x,26);
% nupix=cellfun(@numel,cc.PixelIdxList);
f_name='index1.inp';
f_id=fopen(f_name,'wt');
fprintf(f_id,'\t%6i,\n',Index1(:,1));
%
f_name='index2.inp';
f_id=fopen(f_name,'wt');
fprintf(f_id,'\t%6i,\n',Index2(:,1));

```

- [1] Hollister, S. J., & Kikuchi, N. (1994). Homogenization theory and digital imaging: a basis for studying the mechanics and design principles of bone tissue. *Biotechnology and bioengineering*, 43(7), 586-596.
- [2] Koller, D., Daniilidis, K., & Nagel, H. H. (1993). Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes. *International Journal of Computer Vision*, 10(3), 257-281.
- [3] Terada, K., Miura, T., & Kikuchi, N. (1997). Digital image-based modeling applied to the homogenization analysis of composite materials. *Computational Mechanics*, 20(4), 331-346.
- [4] Abdel-Qader, I., Abudayyeh, O., & Kelly, M. E. (2003). Analysis of edge-detection techniques for crack identification in bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(4), 255-263.
- [5] Aydilek, A. H., Oguz, S. H., & Edil, T. B. (2002). Digital image analysis to determine pore opening size distribution of nonwoven geotextiles. *Journal of Computing in Civil engineering*, 16(4), 280-290.
- [6] Lin, D. F., Wang, H. Y., & Luo, H. L. (2004). Assessment of fire-damaged mortar using digital image process. *Journal of materials in civil engineering*, 16(4), 383-386.
- [7] Aydilek, A. H., Guler, M., & Edil, T. B. (2004). Use of image analysis in determination of strain distribution during geosynthetic tensile testing. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), 65-74.
- [8] Hartman, A. M., & Gilchrist, M. D. (2004). Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis. *Journal of materials in civil engineering*, 16(1), 60-68.
- [9] Xu, W. J., Yue, Z. Q., & Hu, R. L. (2008). Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(5), 749-762.
- [10] Young, P. G., Beresford-West, T. B. H., Coward, S. R. L., Notarberardino, B., Walker, B., & Abdul-Aziz, A. (2008). An efficient approach to converting three-dimensional image data into highly accurate computational models. *Philosophical*

Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 366(1878), 3155-3173.

[11] You, Z., Adhikari, S., and Kutay, M. E. (2009). "Dynamic modulus simulation of the asphalt concrete using the x-ray computed tomography images." *Mater. Struct.*, 42, 617-630.

[12] Meyer, D., Man, H.K., van Mier, J.G., (2009). Fracture of foamed cementitious materials: a combined experimental and numerical study. In: *IUTASymposium on Mechanical Properties of Cellular Materials*. Springer, Netherlands, pp. 115–123.

[13] Wang, L.B., Frost, J.D., Voyjadjis, G.Z., 2003. Quantification of damage parameters using X-ray tomography images. *Mech. Mater.* 35, 777–790.

[14] Landis, E.N., Bolander, J.E., 2009. Explicit representation of physical processes in concrete fracture. *J. Phys. D Appl. Phys.* 42, 214002 (17 pp).

[15] de Wolski, S.C., Bolander, J.E., Landis, E.N., 2014. An in-situ X-ray microtomography study of split cylinder fracture in cement-based materials. *Exp. Mech.* 54 (7), 1227–1235.

[16] Dai, Y., & Niebur, G. L. (2009). A semi-automated method for hexahedral mesh construction of human vertebrae from CT scans. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 12(5), 599-606.

[17] Huang, M., & Li, Y. M. (2013). X-ray tomography image-based reconstruction of microstructural finite element mesh models for heterogeneous materials. *Computational Materials Science*, 67, 63-72.

[18] Artiaga García-Miguel, J. (2013). Microstructural segmentation of 3D images of asphalt specimen using Matlab engine.

[19] Wu, T., Lorenzis, L. D., & Carrara, P. (2015). Multiscale Modeling of Chloride Diffusion in Cementitious Materials. In *CONCREEP 10* (pp. 487-496).

[20] Liu, Q., Huang, S., Kang, Y., & Liu, X. (2015). A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze–thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 96-107.

[21] Mostafavi, M., Baimpas, N., Tarleton, E., Atwood, R. C., McDonald, S. A., Korsunsky, A. M., & Marrow, T. J. (2013). Three-dimensional crack observation, quantification and simulation in a quasi-brittle material. *Acta Materialia*, 61(16), 6276-6289.

- [22] Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface science*, 12(4), 411-421.
- [23] Caliskan, S. (2007). Examining concrete cores by non-destructive techniques. In *4th middle east NDT conference and exhibition. Kingdom of Bahrain*.
- [24] Chang, C. W., Chen, P. H., & Lien, H. S. (2009). Evaluation of residual stress in pre-stressed concrete material by digital image processing photoelastic coating and hole drilling method. *Measurement*, 42(4), 552-558.
- [25] Lopes, C. M., Carol, I., & Aguado, A. (2008). Meso-structural study of concrete fracture using interface elements. II: compression, biaxial and Brazilian test. *Materials and structures*, 41(3), 601-620.
- [26] Bernard, F., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2008). 3D multi-scale modelling of mechanical behaviour of sound and leached mortar. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 449-458.
- [27] Henry, M., Darma, I. S., & Sugiyama, T. (2014). Analysis of the effect of heating and re-curing on the microstructure of high-strength concrete using X-ray CT. *Construction and building materials*, 67, 37-46.
- [28] Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M., & Ohtsu, M. (2010). Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2347-2352.
- [29] Hu, L., & Chen, S. (2010). A 3-D computational model of mesoscale structure of concrete with polyhedron aggregate. In *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments* (pp. 3470-3480).
- [30] Fan, Y. F., Hu, Z. Q., Zhang, Y. Z., & Liu, J. L. (2010). Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1975-1983.
- [31] Asahina, D., Landis, E. N., & Bolander, J. E. (2011). Modeling of phase interfaces during pre-critical crack growth in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(9), 966-977.
- [32] Erzar, B., & Forquin, P. (2011). Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete. *Mechanics of Materials*, 43(9), 505-527.

- [33] Lanzón, M., Cnudde, V., De Kock, T., & Dewanckele, J. (2012). X-ray microtomography (μ -CT) to evaluate microstructure of mortars containing low density additions. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 993-1000.
- [34] Manahiloh, K. N., Muhunthan, B., Kayhanian, M., & Gebremariam, S. Y. (2012). X-ray computed tomography and nondestructive evaluation of clogging in porous concrete field samples. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(8), 1103-1109.
- [35] Başıyigit, C., Comak, B., Kılınçarslan, Ş., & Üncü, İ. S. (2012). Assessment of concrete compressive strength by image processing technique. *Construction and Building Materials*, 37, 526-532.
- [36] Poinard, C., Piotrowska, E., Malecot, Y., Daudeville, L., & Landis, E. N. (2012). Compression triaxial behavior of concrete: the role of the mesostructure by analysis of X-ray tomographic images. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), s115-s136.
- [37] Garboczi, E. J. (2002). Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete. *Cement and concrete research*, 32(10), 1621-1638.
- [38] Russ, J. C. (2011). "The image processing handbook." Boca Raton, Taylor & Francis.
- [39] Razmjoo, A. (2013). Application of image processing and finite element analysis in modeling chloride diffusion in concrete.
- [40] Yang, Z. J., Ren, W. Y., Mostafavi, M. A. H. M. O. U. D., Mcdonald, S. A., & Marrow, T. J. (2013). Characterisation of 3D fracture evolution in concrete using in-situ X-ray computed tomography testing and digital volume correlation. In *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures* (pp. 1-7). Toledo, Spain CIMNE.
- [41] Ren, W. Y., Yang, Z. J., & Withers, P. (2013). Meso-scale fracture modelling of concrete based on X-ray computed tomography images. In *The 5th Asia-Pacific congress on computational mechanics (APCOM)*. Singapore.
- [42] Gajewski, T., & Garbowski, T. (2014). Calibration of concrete parameters based on digital image correlation and inverse analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(1), 170-180.

- [43] Saputra, A., Talebi, H., Tran, D., Birk, C., & Song, C. (2017). Automatic image-based stress analysis by the scaled boundary finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 109(5), 697-738.
- [44] Du, C., Sun, L., Jiang, S., & Ying, Z. (2011). Numerical simulation of aggregate shapes of three-dimensional concrete and its applications. *Journal of Aerospace Engineering*, 26(3), 515-527.
- [45] Duarte, A. P. C., Silva, B. A., Silvestre, N., de Brito, J., & Júlio, E. (2015). Mechanical characterization of rubberized concrete using an image-processing/XFEM coupled procedure. *Composites Part B: Engineering*, 78, 214-226.
- [46] Nitka, M., & Teichman, J. (2015). Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on X-ray μ CT images of internal structure. *Engineering fracture mechanics*, 147, 13-35.
- [47] Mazzucco, G., Xotta, G., Pomaro, B., Majorana, C. E., Faleschini, F., & Pellegrino, C. (2015). Mesoscale modelling of concrete with recycled aggregates. In *CONCREEP 10* (pp. 853-863).
- [48] Huang, Y., Yang, Z., Ren, W., Liu, G., & Zhang, C. (2015). 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model. *International Journal of Solids and Structures*, 67, 340-352.
- [49] Bary, B., Bourcier, C., & Helfer, T. (2015). Numerical analysis of concrete creep on mesoscopic 3D specimens. In *CONCREEP 10* (pp. 1090-1098).
- [50] Huang, Y. J., Yang, Z. J., Chen, X. W., & Liu, G. H. (2016). Monte Carlo simulations of meso-scale dynamic compressive behavior of concrete based on X-ray computed tomography images. *International Journal of Impact Engineering*, 97, 102-115.
- [51] Gangsa, C., Flanders, L. S., & Landis, E. N. (2015). A 3D investigation of ITZ porosity and pore connectivity relevant to damage and transport properties. In *CONCREEP 10* (pp. 408-413).
- [52] ACI Committee 211 (1991) ,Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.89).
- [53] BS 1881 : Part 108: 1983, Method for making test cubes from fresh concrete.
- [54] ASTM C305 – 06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

- [55] ASTM C469 – 02 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- [56] ASTM C39 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure¹
- [57] Rangayyan, R. M. (2005). "The Biomedical Image Analysis."
- [58] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2009). Digital image processing using Matlab” Gatesmark Publishing.
- [59] Drucker D. C. and Prager W. (1952), Soil mechanics and plastic analysis for limit design, Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
- [60] Huang, Y., Yang, Z., Ren, W., Liu, G., & Zhang, C. (2015). 3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model. *International Journal of Solids and Structures*, 67, 340-352.
- [61] ASTM C469 / C469M - 10 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- [62] Abaqus 6.14 Documentation.
- [63] Kmiecik, P. and M. Kamiński (2011). "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration."Archives of Civil and Mechanical Engineering 11(3): 623-636.

Abstract

Concrete is a material that is widely used in structures. The Engineering and performance properties of concrete depends on both The structural features And the properties of its components that usually assessment in the laboratory. Design and analysis of concrete structures mainly based on the assumption that the concrete can be considered as a homogeneous material, While it is a heterogeneous composite consisting of aggregate, cement paste and air Voids and Interfacial transition zone (ITZ). In this study the 2D and 3D meso scale finite element model of concrete specimen in Abaqus using CT scan image processing is developed To be able by defining mechanical properties of concrete constituent materials, to determine microstructure of models and mechanical properties numerically. Thus we can reduce large volumes of laboratory operations and determine properties of concrete numerically. A Matlab code for processing three dimensional tomographic X-ray images (X-ray) concrete samples written. The Images has been prepared by using a CT scanner at the shahid Rajaei Tehran Heart Center. A general framework of quantitative computational tomography (QCT) to build a three dimensional Image of the concrete samples is used. The aim of this study is develop a new method to determine the actual concrete compressive strength numerically. In this study, finite element models for two types of cubic and cylindrical concrete samples using CT scan images and also concrete damage plasticity(CDP) combination model was created in Abaqus. And also by using this model the Failure and crack patterns of concrete in compression and tension can be evaluate

Keywords: Image processing, Concrete specimen, CT Scan, Matlab Software, Abaqus, CDP



Shahrood University of Technology

Faculty of civil engineering

MSc Thesis in Structural Engineering

**Determination of compressive strength of concrete specimen
using image processing and FEM**

By: Mahmood khormani

Supervisor:

Dr. Vahidreza Kalatjary

Dr. Iman Aghayan

Advisor:

Dr. Alireza Ahmadifard

September 2018