

Investigating the behavior of concrete specimens in meso scale with Abaqus software

Ali ChamanLaleh ¹, Freydoon Khosravi ^{*2}, Mostafa Amini ¹

- 1- Researcher of Imam Hossein University, Faculty of Engineering and Passive Defense
2- Assistant Professor of Imam Hossein University, Faculty of Engineering and Passive Defense

ABSTRACT

The design and analysis of concrete structures is mainly based on the assumption that concrete can be considered as a homogeneous material. While this material is a heterogeneous composite consisting of aggregates, cement paste and air cavities. Analysis mechanical behavior of cracking concrete with assumption of homogeneity matter results unrealistic output. With today's computers and the importance of the accuracy of the results, a meso scale model is used in this research. In this paper, double-phase concrete consisting of aggregate and mortar models with single-phase are compared. It is tried to create a concrete model of a finite element in Abaqus software, for the concrete specimen to be able to determine the mechanical properties of concrete constituents. In this way, it is possible to reduce the volume of laboratory operations and determine the properties of the concrete in numerical order.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 July 2019
Revise Date: 13 September 2020
Accept Date: 27 December 2020

Keywords:

Concrete
Heterogeneous Material
Mesoscale
Aggregate and Mortar
Abacus Software

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.195259.1905>

*Corresponding author: Freydoon Khosravi
Email address: mfayyaz@ihu.ac.ir

مطالعه پارامترهای موثر در شبیه سازی میان مقیاس بتن

علی چمن لاله^۱، محمد فیاض^{۲*}، مصطفی امینی مزرعه^۳

۱- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین ع، دانشکده مهندسی و پدافند غیرعامل

۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین ع، دانشکده مهندسی و پدافند غیرعامل

۳- مربی دانشگاه جامع امام حسین ع، دانشکده مهندسی و پدافند غیرعامل

چکیده

طراحی و تحلیل سازه های بتنی عمدتاً با فرض اینکه بتن را می توان به عنوان یک ماده ی همگن در نظر گرفت انجام می شود. این درحالی است که بتن یک کامپوزیت ناهمگن، متشکل از سنگدانه ها، خمیر سیمان و حفرات هوا است. در بررسی رفتار مکانیکی بتن و تحلیل ترک، فرض همگن بودن ماده منجر به نتایج غیر واقعی می شود لذا با توجه به توان کامپیوترهای امروزی و اهمیت دقت نتایج، در این تحقیق از مدل میان مقیاس استفاده می شود. جهت مدلسازی رفتار غیرخطی بتن در نرم افزارهای اجزا محدود از مدل های مختلفی نظیر شکست ترد^۱، ترک پخشی^۲ و پلاستیک آسیب دیده بتن^۳ استفاده می شود. در این پژوهش سعی شده با بررسی پارامترهای ورودی سطح تسلیم مدل پلاستیک آسیب دیده بتن در نرم افزار آباکوس نتایج خروجی حاصل از مدلسازی را به نتایج واقعی نزدیک تر کرد. ۴۱ تحلیل هدف دار برای بررسی تاثیر پنج پارامتر ورودی سطح تسلیم مدل پلاستیک آسیب دیده بتن بر روی مدل تیر شکاف دار (Natched Beam) انجام شد که نتایج حساسیت زیاد مدل نسبت به پارامتر ویسکوالاستیک در خروجی نیروها را بیشتر از سایر پارامترها نشان می دهد. در این پژوهش بتن شامل دو فاز سنگدانه و ملات در نرم افزار اجزای محدود آباکوس^۴ مدل شده است. به منظور انجام مدلسازی سنگدانه ها در میان مقیاس، نمونه های تصادفی به صورت کروی و بیضوی در نرم افزار متلب^۵ تولید شده و با کنترل عدم تداخل سنگدانه ها در کنار یکدیگر به صورت تصادفی درون مرزهای قالب چیده شده اند. نتایج حاصل از مدلسازی ناهمگن با سنگدانه های کروی و بیضوی با مدلسازی همگن بتن مقایسه شده است. همچنین سه نمونه مکعبی بتنی در آزمایشگاه ساخته شده و با نتایج حاصل از مدلسازی دو فاز بتن مقایسه شده است. مقاومت فشاری حداکثر هر دو مدل همگن و ناهمگن برابر بوده اما شیب نمودارها در ناحیه پلاستیک متفاوت است.

کلمات کلیدی: بتن، ناهمگن، میان مقیاس، توزیع سنگدانه، ملات، آباکوس

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.195259.1905
۱۳۹۸/۰۴/۳۱	۱۳۹۹/۰۶/۲۳	۱۳۹۹/۱۰/۰۷	۱۳۹۹/۱۰/۰۷	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	10.22065/jsce.2020.195259.1905
*نویسنده مسئول:		محمد فیاض			
پست الکترونیکی:		m.fayyaz@modares.ac.ir			

¹ Brittle crack concrete model

² Smeared crack concrete model

³ Concrete Damage Plasticity model (CDP)

⁴ ABAQUS

⁵ MATLAB

۱- مقدمه

بدیهی است که مدل شکست ترد رفتار واقعی بتن را نشان نمی‌دهد. با توجه به اینکه مدل ترک پخشی در نرم‌افزار آباکوس تنها جهت اعمال بارهای یکنوا طراحی شده و قادر به تحلیل بارهای نوسانی و دینامیکی نیست و نظر به حساس نبودن این روش نسبت به تغییرات نرخ کرنش که برای بارهای دینامیکی نظیر انفجار اهمیت زیادی دارد می‌توان به این نتیجه رسید که جهت تحلیل بارهای دینامیکی تنها مدل پلاستیک آسیب دیده CDP بیان‌گر مدل مناسبی از رفتار غیرخطی بتن می‌باشد. لذا در ادامه به آنالیز حساسیت این مدل رفتاری غیرخطی بتن که بیشترین کاربرد را دارد می‌پردازیم.

مدلسازی برای تحلیل و طراحی بتن که یک ماده ناهمگن است در مقیاس‌های مختلف ماکروسکوپی، میکروسکوپی و یا مزوسکوپی (میان مقیاس) انجام می‌شود. در بررسی ماکروسکوپی که رایج‌ترین شیوه مدلسازی بتن است تمامی بتن به صورت تک‌فاز شامل خمیرسیمان مدلسازی می‌شود. در مقیاس میکروسکوپی هریک از فازها با عناصر تشکیل‌دهنده آن‌ها نظیر کریستال‌های سیمان و سنگدانه‌ها مدلسازی می‌شوند. به دلیل افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات و نیاز به کامپیوترهایی با ظرفیت‌های خیلی بالا، این نوع مدلسازی فقط برای موارد خاص انجام می‌گردد. در مدل میان‌مقیاس، بتن به عنوان یک ماده ناهمگن سه فازه مشتمل بر سنگدانه، خمیرسیمان و ناحیه انتقال (ITZ)^۶ یا دو فازه مشتمل بر سنگدانه و خمیر سیمان در نظر گرفته می‌شود. مدلسازی و تحلیل بتن در میان مقیاس می‌تواند صفات بتن غیرمسلح را به خوبی نشان دهد. در این پژوهش از مدلسازی بتن در میان مقیاس شامل خمیر سیمان و سنگدانه‌هایی که به صورت تصادفی تولید و در نمونه توزیع شده‌اند استفاده شده است. سه نمونه بتنی در آزمایشگاه تولید و مطابق با نوع دانه‌بندی، طرح اختلاط و مقاومت فشاری طرح، سنگدانه‌ها در نرم‌افزار متلب^۷ تولید و در ابعاد نمونه‌ها توزیع شده‌اند. سپس در نرم‌افزار آباکوس^۸ پس از مدلسازی، اختصاص خواص مواد و بارگذاری، تحلیل صورت گرفته است.

از روش‌هایی که به دلیل هزینه کمتر و هم‌چنین نتایج مناسب بسیار مورد استفاده محققین قرار گرفته است، مدلسازی رایانه‌ای میان مقیاس بتن بر اساس روش تصادفی با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود می‌باشد. در این روش که به نام روش مدلسازی عددی بتن نیز شناخته می‌شود ابتدا با استفاده از یک سری الگوریتم‌های برنامه نویسی شده ساختار داخلی بتن شبیه‌سازی شده و سپس وارد نرم‌افزارهای تحلیلی می‌شود تا بتوان بر روی آن تحقیق کرد.

در سال ۲۰۰۶ هافنر و همکاران [۱] به بررسی بتن در مقیاس مزو (میان مقیاس) پرداختند. در این پژوهش به صورت متمرکز به بررسی ویژگی‌های الاستیک بتن در مقیاس مزو پرداخته شد. هافنر و همکاران با استفاده از روش المان محدود چند محوره موفق به مدلسازی بتن دوفازی با سنگدانه‌هایی با مشخصات هندسی پیچیده شدند که این تحقیق فقط نتایج را به صورت دوبعدی در ناحیه‌ی الاستیک خطی ارائه می‌داد. نتایج نشان دادند که نحوه‌ی توزیع، حجم و قطر ماکزیمم سنگدانه‌ها به صورت مستقیم بر مقاومت فشاری تأثیرگذار است و این با نتایج آزمایشگاهی کاملاً تطابق دارد. اما از نقطه نظر دیگر، این ویژگی‌های سنگدانه بر مشخصات مکانیکی کلی تأثیر کمی دارد. این ابزار مدلسازی سه بعدی هم‌چنین در تولید ترک‌های سطحی بتن و هم‌چنین از دست رفتن تدریجی سختی مواد با دقت بالایی موفق عمل می‌کند.

در همان سال یک مدل المان محدود سه بعدی از بتن با توزیع تصادفی سنگدانه‌های کروی و با مشخصات الاستیک خطی برای سنگدانه‌ها و یک مدل خسارت الاستیک ایزوتروپیک برای ملات توسط ریگرز و مفتاح ارائه شد [۲]. در این پژوهش مدول الاستیسیته‌ی

⁶ Interfacial Transition Zone

⁷ MATLAB

⁸ ABAQUS

مؤثر نمونه‌ها با حجم‌های مختلف سنگدانه محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در نهایت نیز پاسخ آزمایش تک‌محوری نمونه‌ها در هر دو ناحیه سخت‌شدگی و نرم‌شدگی محاسبه شده و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه گردیدند.

ونگ و همکاران [۳] به توسعه و اعتبار سنجی یک ابزار محاسباتی سه بعدی برای تشریح رفتار بتن در مقیاس مزو پرداختند. در این تحقیق یک مدل سه بعدی دوفازی با سنگدانه‌های گرد مدفون در ملات در نظر گرفته شده است و توجه ویژه‌ای به چگونگی قرارگیری سنگدانه‌ها در بتن شده است. اعتبارسنجی هم به وسیله‌ی نتایج آزمایشگاهی که از آزمایش‌های فشاری، خمشی سه نقطه‌ای و آزمایش شکست برزیلی به دست آمده بودند انجام گردید. تمامی نتایج موجود و مدلسازی عددی برای مطالعه‌ی واکنش‌های قلیایی سیلیسی استفاده شده است، این سری واکنش‌ها در بتن از معروف‌ترین تخریب‌های شیمیایی سازه‌هایی مانند سدها، روسازی‌ها و پل‌ها می‌باشند. در مقیاس مزو این واکنش‌ها به وسیله‌ی تورم اسکلت دانه‌بندی مشخص می‌شوند.

در این پژوهش نشان داده شد که در مقیاس مزو بهتر است پارامترهای مشخص کننده‌ی بتن از نتایج آزمایشگاهی مختص بتن مشخص شوند و در صورتی که نتایج به منظور تعمیم به مقیاس ماکرو باشند می‌توان از نتایج آزمایشگاهی ملات به تنهایی هم بهره برد.

نتایج نشان دادند که نحوه‌ی توزیع، حجم و قطر ماکزیمم سنگدانه‌ها به صورت مستقیم بر مقاومت فشاری تأثیرگذار است و این با نتایج آزمایشگاهی کاملاً تطابق دارد. اما از نقطه نظر دیگر این ویژگی‌های سنگدانه‌ها بر مشخصات مکانیکی کلی تأثیر کمی دارند. هم‌چنین این ابزار مدلسازی سه بعدی در تولید ترک‌های سطحی بتن و همچنین از دست رفتن تدریجی سختی مواد با دقت بالایی موفق عمل می‌کند.

بتن به عنوان یک ماده ناهمگن شامل ویژگی‌های متنوع مزوسکوپی مانند دانه‌های ریز و درشت، خمیر سیمان، مناطق سطوح تماس (ITZ)، حفره‌ها و میکرو ترک‌ها می‌باشد. در مدل‌های سه فازی علاوه بر در نظر گرفتن سنگدانه‌ها و ملات سیمان مناطق تماس بین سنگدانه‌ها و ملات یا همان ITZ نیز مدنظر قرار گرفته شده‌اند.

در مدل‌های سه بعدی حجم ITZ به نسبت ملات یا سنگدانه‌ها بسیار کم است. این مورد در مدل‌های دوبعدی نیز صدق می‌کند و مساحت این مناطق نسبت به مساحت ملات و یا سنگدانه‌های مدل بسیار اندک است. همچنین با مدلسازی فاز ITZ حجم محاسبات مدلسازی عددی بسیار بالاتر می‌رود و نیاز به سیستم‌های کامپیوتری قوی‌تر بسیار احساس می‌شود.

بزرگ‌ترین مزیت مدلسازی ITZ به دست آوردن قابلیت بررسی جزئی تغییرات محلی در اطراف سنگدانه‌ها می‌باشد. در مقابل مدلسازی این فاز در بتن نیازمند نرم‌افزارهای دارای فضای CAD بسیار قوی و هم‌چنین روش دقیق محاسبه‌ی آزمایشگاهی داده‌های ITZ در کنار قابلیت توانایی کدهای مش‌بندی بسیار بالا برای مش‌بندی مناطق ITZ می‌باشد.

مدلسازی سه فازی بتن، در صورتی که هدف نهایی بررسی رفتار غیرخطی بتن باشد، بسیار مورد توجه بوده است و محققانی همچون وانگ و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۹ و کابالرو و لویز [۵] در سال ۲۰۰۶ در پژوهش‌های خود به بررسی ویژگی‌های مختلف مکانیکی بتن در حالت سه فازی پرداخته‌اند.

در همین راستا به منظور بررسی تأثیر نفوذ کلرید در بتن بر طول عمر بتن و نوع طراحی بتن در این محیط‌ها یک روش عددی گسترش داده شده که بر اساس تأثیر شکل سنگدانه‌ها ضریب پخش کلرید در بتن را پیش‌بینی می‌کند. در این مرجع به منظور کاهش المان‌ها، یک مدل عددی از سنگدانه‌ی متقارن سه فازی شامل سنگدانه‌ها و ملات ماسه و سیمان و همچنین ITZ در نظر گرفته شده است و سپس نتایج حاصل به صورت تحلیلی ضریب پخش کلرید در بتن را پیش‌بینی کرده است. در این مرجع با توجه به شکل سنگدانه‌های بتن

یک روش عددی گسترش داده شده است که تأثیر آن بر ضریب پخش کلرید در بتن را با خطای متوسط کمتر از ۷٪ پیش بینی کرده است [۶].

دست یابی به شکل دقیق سنگدانه‌ها در بتن‌های موجود و چگونگی شکل و حالت فاز ITZ در ملات سیمان، بدون آزمایش‌های مخرب امکان پذیر نمی‌باشد. از آنجایی که تأثیر شکل سنگدانه‌ها بر خصوصیات مکانیکی بتن از طریق نتایج آزمایشگاهی از قبل مشخص شده است در نتیجه سؤال مورد بحث این می‌باشد که در مورد بتن‌های موجود خصوصیات ظاهری سنگدانه‌ها به چه شکل محاسبه شود.

تحقیق‌های آزمایشگاهی بسیاری در بررسی نقش سنگدانه‌ها بر خواص مکانیکی بتن انجام گرفته است. برای مثال در سال ۲۰۱۳ پاتل و همکارانش [۲۲] دو نمونه دانه‌بندی شده از سنگدانه‌های شن با ویژگی‌های ظاهری متفاوت را در ۲۵ نمونه مکعبی بتن مورد آزمایش قرار دادند و به بررسی تأثیر ویژگی‌های ظاهری دانه‌های شن بر روی مقاومت فشاری بتن پرداختند.

ویتمان [۸] چهار سطح برای مطالعه ی بتن در نظر گرفت. بزرگ مقیاس، میان مقیاس، ریز مقیاس و نانو مقیاس. مدل‌های میان مقیاس به دلیل انطباق بهتر نتایج با واقعیت و همچنین هزینه کمتری محاسباتی در مقایسه با مدل‌های ریز مقیاس و نانو مقیاس، برای بررسی بتن در چنین شرایطی بسیار ایده‌آل هستند و در سال‌های اخیر به کرات مورد استفاده‌ی دانشمندان قرار گرفته‌اند.

در مدل‌های بتن میان مقیاس فرض می‌شود که این ماده از سه جزء اصلی سیمان، سنگدانه و ناحیه‌ی انتقال (ITZ) یا دو جزء اصلی سیمان و سنگدانه ساخته شده است. ناحیه انتقال جزئی از خمیر سیمان است که در اطراف سنگدانه‌ها قرار می‌گیرد و شامل آب بیشتری نسبت به سایر نقاط است.

در ساخت مدل‌های میان مقیاس اولین قدم ساخت هندسه آن می‌باشد. می‌توان به وسیله اعمال تکنیک‌هایی مانند مقطع‌نگاری رایانه‌ای با استفاده از اشعه ایکس و یا آزمون انتشار امواج صوتی بر روی یک نمونه آزمایشگاهی، هندسه دقیق فضای درونی نمونه را به دست آورد و سپس برای تحلیل و بررسی‌های بیشتر به نرم افزارهای تحلیلی وارد کرد [۹].

مدلسازی عددی بتن از سال‌های پیش بسیار مورد استفاده محققین قرار گرفته است. این روش می‌تواند به صورت مدلسازی دوبعدی نظیر مدلسازی‌های ارائه شده در مقالات مراجع [۱۰،۶،۱۱،۱۲] و یا سه بعدی در مراجع [۱۵،۱۴،۱۳،۵،۸] مورد استفاده قرار - گیرد.

در پژوهش‌های انجام شده گاهی بتن را ماده‌ای دو فازه در نظر می‌گیرند و از تأثیر بخش ITZ صرف نظر می‌کنند [۱۰،۵] و در مقالاتی نیز ITZ به عنوان بخشی از ساختار مدلسازی شده است [۱۵،۱۴،۱۱،۴].

هم‌چنین اشکال مختلف سنگدانه‌ها شامل کروی، بیضیگون و چندوجهی در پژوهش‌های مختلف بررسی شده و تأثیر وجود هر کدام در بتن با بقیه مقایسه شده است [۱۵،۱۰،۴].

با توجه به اینکه آگاهی از چگونگی رفتار نمونه‌های بتنی متفاوت تحت بارهای دینامیک و استاتیک نیازمند انجام آزمایش‌های گوناگون و صرف هزینه و وقت زیاد است می‌توان با انجام چند نمونه آزمایش و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از مدلسازی، از تأثیر پارامترهای شبیه سازی و صحت نتایج اطمینان یافت و بتوان این نتایج را برای سایر نمونه‌های بتنی تعمیم داد. به دلیل در نظر گیری متغیرهای طرح اختلاط بتن در شبیه سازی میان مقیاس امکان بررسی پارامترهای شبیه سازی در انواع نمونه‌های بتنی در این تحقیق فراهم گردید که پیشتر کمتر مورد توجه بوده است. به طور کلی هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای موثر در رفتار انواع طرح اختلاط بتن‌ها در یک آزمایشگاه عددی است که نتایج آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مورد صحت سنجی واقع شده است.

۲- بررسی مدل رفتاری بتن در نرم‌افزار آباکوس

برای مدل‌سازی و انجام تحلیل‌ها در این تحقیق، از نرم‌افزار آباکوس که یک نرم‌افزار برای تحلیل المان محدود و مهندسی به کمک کامپیوتر است استفاده شده است. جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن و آسیب دیدگی آن در این نرم‌افزار، سه مدل شکست ترد^۹، مدل ترک پخشی^{۱۰} و مدل پلاستیک آسیب دیده^{۱۱} وجود دارد. با توجه به اینکه مدل شکست ترد رفتار واقعی بتن را نشان نمی‌دهد یعنی وارد فاز غیرخطی منحنی تنش کرنش بتن نمی‌شود و با توجه به اینکه مدل ترک پخشی در نرم‌افزار آباکوس تنها جهت اعمال بارهای یکنواخت طراحی شده و قادر به تحلیل بارهای نوسانی و دینامیکی نیست و نظر به حساس نبودن این روش نسبت به تغییرات نرخ کرنش که برای بارهای دینامیکی نظیر انفجار اهمیت زیادی دارد می‌توان به این نتیجه رسید که جهت تحلیل بارهای دینامیکی تنها مدل پلاستیک آسیب دیده بیان‌گر مدل مناسبی از رفتار غیرخطی بتن می‌باشد.

۲-۱ بررسی پارامترهای سطح تسلیم در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن

مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، تعمیم یافته‌ی معیار شکست دراگر - پراگر می‌باشد. این معیار یک سطح شکست مخروطی دارد و یکی از تئوری‌های قوی در مدل‌سازی شکست بتن مسلح می‌باشد [۱۶]. این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیر خطی بتن را بیان می‌کند. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی را دارد و شامل فرضیات زیر می‌باشد:

- ۱- قابلیت مدل‌سازی بتن در انواع مختلف سیستم‌های سازه‌ای مانند: المان تیر، خرپایی، پوسته و سه بعدی.
- ۲- قابلیت کاربرد در بتن مسلح و غیر مسلح.
- ۳- قابلیت استفاده تحت بارگذاری‌های یکنواخت، نوسانی و دینامیکی.
- ۴- در نظر گرفتن حساسیت نمونه به نرخ کرنش.
- ۵- در نظر گرفتن تاثیرات بازیابی سختی الاستیک در بارگذاری‌های دوره‌ای. قابلیت استفاده از ویسکوالاستیک در معادلات اساسی برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم‌شوندگی منحنی تنش کرنش بتن

• زاویه اتساع (Ψ): زاویه‌ی اتساع کرنش پلاستیک، بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می‌نماید. هنگامی که $\Psi=0$ باشد، ماده هیچ گونه تغییر حجم کرنشی ندارد. در حقیقت زاویه اتساع رابطه‌ی بین حجم و کرنش برشی را بیان می‌کند. برای بتن مسلح زاویه‌ی اتساع بین ۲۰ تا ۴۰ خواهد بود. هر چه مقدار این زاویه کوچکتر باشد رفتار مصالح تردتر و هر چه این زاویه بزرگتر باشد ماده از خود رفتاری شکل‌پذیر نشان می‌دهد.

• پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک: عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن می‌باشد. مقدار پیش فرض آن ۰٫۱ است. وقتی که این عدد صفر باشد، در واقع شکل مریدین تبدیل به یک خط راست می‌شود (معیار دراگر پراگر کلاسیک) [۱۶].

⁹ Brittle crack concrete model

¹⁰ Smeared crack concrete model

¹¹ Concrete Damage Plasticity model (CDP)

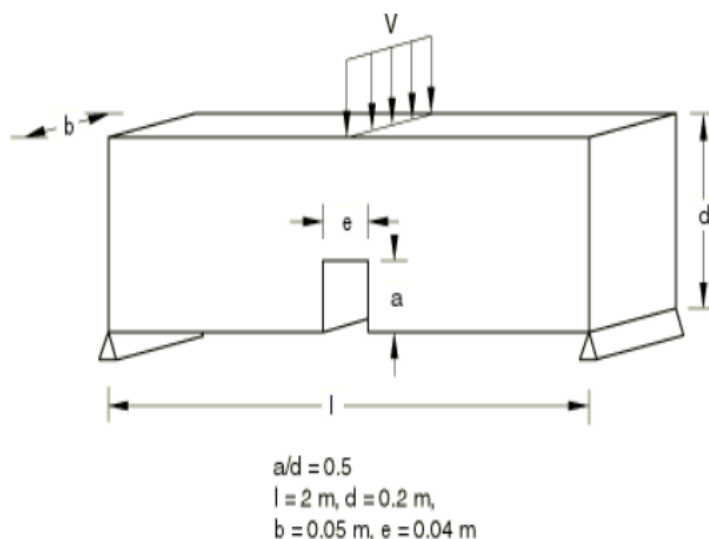
• پارامتر نسبت مقاومت فشاری دو محوره به تک محوره: این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان می‌کند. در برخی مقالات علمی این نسبت را $1,17$ در نظر گرفته‌اند [۴]. اغلب منابع مقدار $1,16$ و $1,25$ را وابسته به مقاومت بتن و درجه ی محصور-شدگی معرفی کرده‌اند.

• پارامتر KC: طبق اصلاح صورت پذیرفته در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن، لزومی بر دایروی بودن صفحه‌ی دوپاتوریک وجود ندارد و می‌تواند شکل دیگری نیز داشته باشد. شکل این صفحه با یک ضریب تعیین می‌شود. این ضریب مقداری بیش از $0,5$ دارد و وقتی مساوی یک باشد شکل دایره و یا همان معیار دراگر پراگر بدست می‌آید. این پارامتر از لحاظ فیزیکی، نسبت فاصله بین محور هیدرواستاتیک با مریدین فشاری و مریدین کششی می‌باشد. در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن مقدار پیش فرض مطابق شکل ۲، ضریب $0,667$ می‌باشد که براساس آزمایش‌های فشاری سه محوره و تحلیل‌های عددی پیشنهاد شده است.

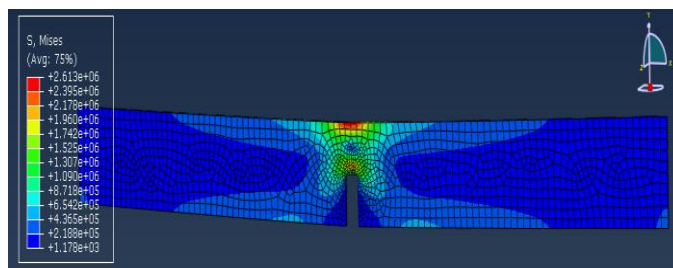
• پارامتر ویسکوالاستیک (μ): برای همگرایی بهتر گام‌های تحلیل در مدل CDP، پارامتر ویسکوالاستیک تعریف شده است که مقدار دقیق آن با تحلیل‌های متوالی بدست می‌آید. پارامتر ویسکوالاستیک کوچکترین عدد مثبتی است که باعث همگرایی بهتر تحلیل می‌شود. این پارامتر امکان خروج تدریجی از سطح پتانسیل پلاستیک را در شرایط ناهمگرایی‌های جزئی تحلیل فراهم می‌سازد [۱۶].

۲-۲ مدل‌سازی

به منظور بررسی پارامترهای سطح تسلیم مدل CDP، یک تیر شکافدار (Notched Beam) مطابق مثال حل شده با ابعاد مشخص (شکل ۳) در نرم افزار آباکوس مدل شده و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. با تغییر پارامترهای مدل CDP، 40 حالت مختلف برای بررسی تاثیر پارامترها صورت گرفته است.



شکل ۳ - هندسه و ابعاد تیر شکاف دار [۱۸]



شکل ۴- مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس

جدول ۱- مشخصات پارامترهای ورودی مدل ۴۱

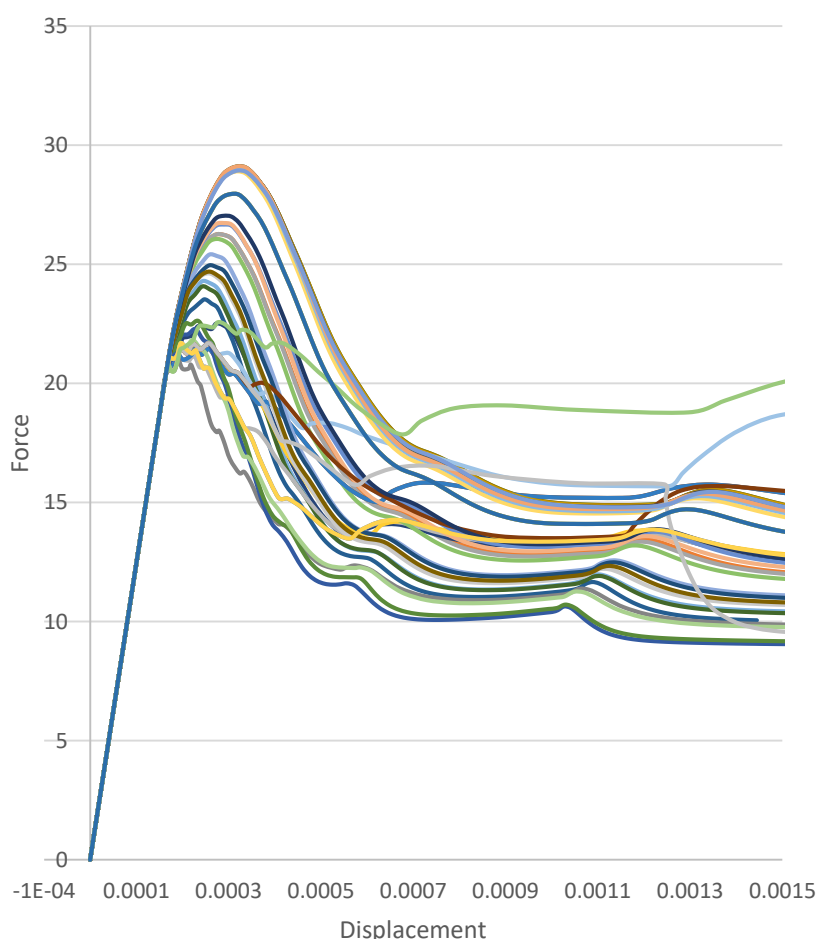
Name	fbo/fc	K	EC	degree	viscosity
Refrence	1.16	0.66	0.1	38	0.01
1	1.16	0.71	0.11	20	0.0066
2	1.16	0.5	0.11	30	0.0067
3	1.16	0.5	0.09	20	0.0088
4	1.16	1	0.09	35	0.001
5	1.16	1	0.11	20	0.01
6	1.16	0.5	0.096	20	0.0038
7	1.16	0.5	0.09	20	0.001
8	1.16	1	0.09	27	0.01
9	1.16	0.85	0.094	20	0.01
10	1.16	0.5	0.11	40	0.001
11	1.16	0.5	0.09	40	0.0046
12	1.16	0.5	0.09	32	0.01
13	1.16	0.82	0.09	26	0.0042
14	1.16	0.5	0.1	33	0.001
15	1.16	1	0.095	25	0.001
16	1.16	1	0.1	20	0.0071
17	1.16	1	0.098	31	0.0063
18	1.16	0.5	0.11	20	0.001
19	1.16	0.57	0.11	40	0.01
20	1.16	0.64	0.091	29	0.001
21	1.16	0.62	0.1	24	0.01
22	1.16	1	0.1	40	0.0024
23	1.16	1	0.09	20	0.002
24	1.16	0.72	0.11	32	0.001
25	1.16	1	0.09	40	0.0071
26	1.16	1	0.11	34	0.0048
27	1.16	0.75	0.1	40	0.0097
28	1.16	0.83	0.11	40	0.0055
29	1.16	1	0.11	40	0.001
30	1.16	0.5	0.098	30	0.0053
31	1.16	0.76	0.1	20	0.001
32	1.16	0.87	0.11	31	0.01
33	1.16	0.75	0.1	29	0.0049
34	1.16	0.65	0.095	36	0.0075

35	1.16	1	0.1	40	0.01
36	1.16	0.5	0.099	40	0.01
37	1.16	0.75	0.09	40	0.01
38	1.16	1	0.11	20	0.001
39	1.16	1	0.09	35	0.001
40	1.16	0.5	0.11	20	0.01
41	1.16	0.66	0.091	40	0.001

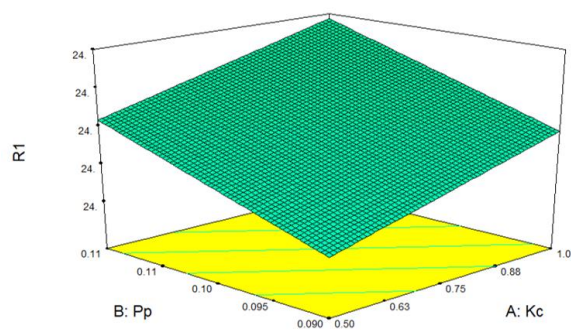
۲-۳ تحلیل و نتیجه گیری

شکل (۵) حدود تغییرات نیرو و جابه جایی ۴۱ مدل رفتاری گوناگون بتن با تغییر هدفمند پارامترهای ورودی را نشان می دهد.

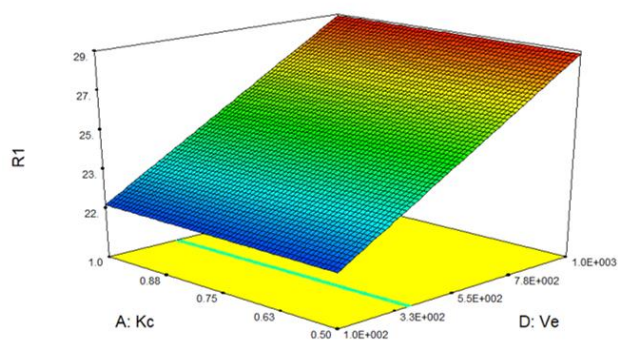
با مقایسه نتایج بدست آمده برای چهار پارامتر خروجی نیروی حداکثر (R1)، جابه جایی متناظر با نیروی حداکثر (R2)، نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر (R3) و سطح زیر نمودار نیرو - جابه جایی (R4) نتایج زیر حاصل گردید. در این نمودارها زاویه اتساع (Ψ) با نماد A، پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک با نماد Pp، پارامتر Kc با نماد Kc و پارامتر ویسکوالاستیک با نماد Ve نشان داده شده است.



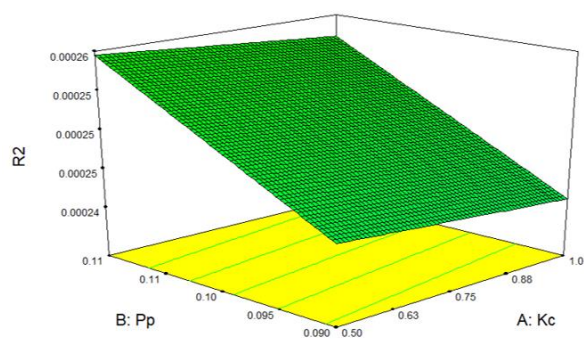
شکل ۵ - مقایسه حدود تغییرات نیرو و جابه جایی



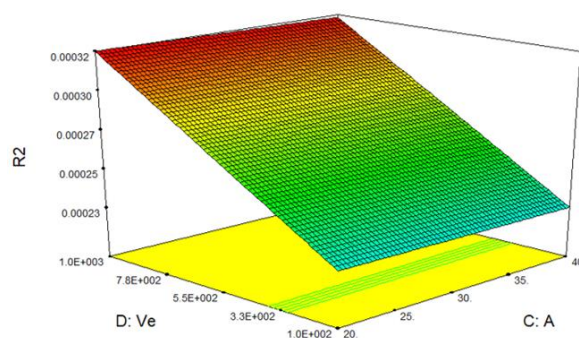
شکل ۶- کاهش نیروی حداکثر با کاهش مقدار خروج از مرکزیت پلاستیک Pp و کاهش ضریب Kc



شکل ۷- افزایش نیروی حداکثر با افزایش پارامتر ویسکوالاستیک Ve

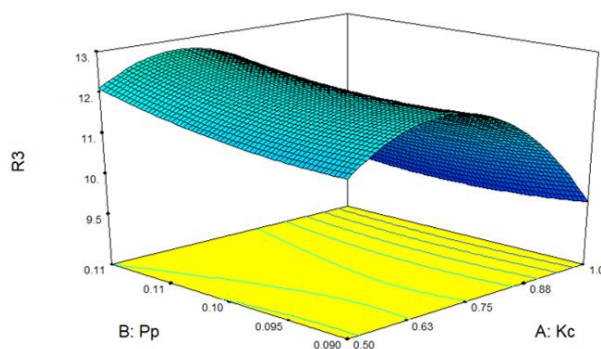


شکل ۸- کاهش مقدار جابه جایی متناظر با نیروی حداکثر با کاهش مقدار خروج از مرکزیت پلاستیک Pp و افزایش ضریب Kc

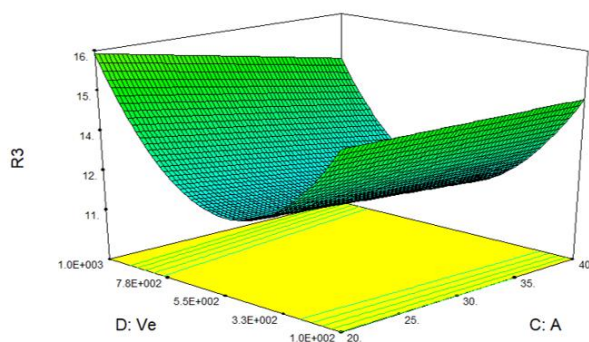


شکل ۹- کاهش مقدار جابه جایی متناظر با نیروی حداکثر با کاهش پارامتر ویسکوالاستیک

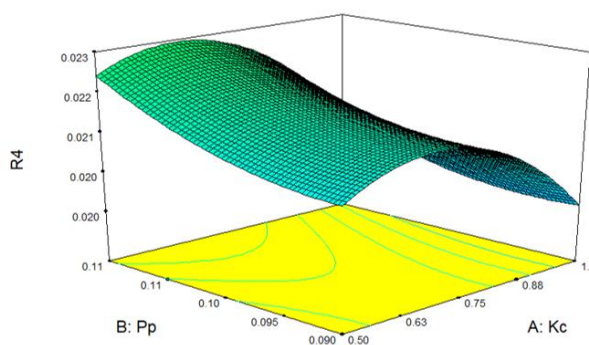
با توجه به شکل شماره ۵ و افزایش یا کاهش ناگهانی مقدار نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر در برخی از مدل‌ها به دلیل ناهمگرا شدن تحلیل و لذا ناپایداری مدل در انتهای تحلیل، نمی‌توان نتایج دقیقی از مقایسه پارامترهای ورودی با دو پارامتر خروجی نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر و سطح زیر نمودار نیرو- جابه جایی گرفت. در شکل شماره ۱۰ و ۱۱ دو نمونه از نمودارهای مربوط به نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر و در شکل شماره ۱۲ و ۱۳ دو نمونه از نمودارهای مربوط به سطح زیر نمودار نیرو- جابه جایی نشان داده شده است.



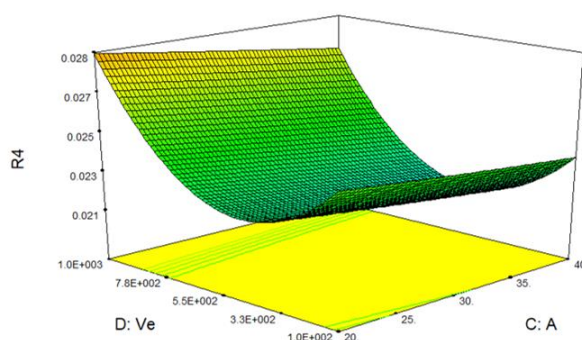
شکل ۱۰- تاثیر تغییر مقدار خروج از مرکزیت پلاستیک Pp و ضریب Kc با نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر



شکل ۱۱- تاثیر تغییر مقدار زاویه اتساع A و پارامتر ویسکوالاستی Ve با نیروی متناظر با جابه جایی حداکثر



شکل ۱۲- تاثیر تغییر مقدار خروج از مرکزیت پلاستیک Pp و ضریب Kc با سطح زیر نمودار نیرو- جابه جایی



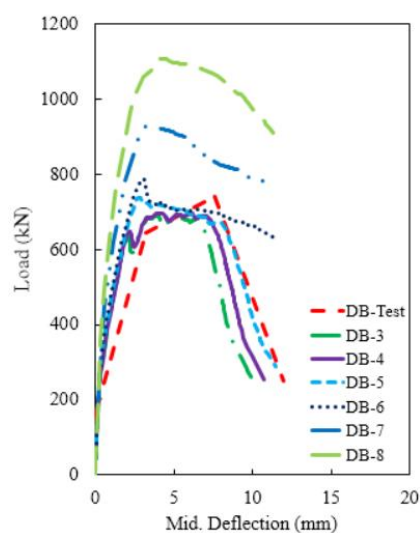
شکل ۱۳- تاثیر تغییر مقدار زاویه اتساع A و پارامتر ویسکوالاستی Ve با سطح زیر نمودار نیرو - جابه جایی

۲-۴ صحت سنجی نتایج

مطابق نتایج حاصل از آزمایش های دمیر ۱۲ و همکاران [۱۹] در تحلیل با مدل رفتاری غیرخطی بتن، CDP در نرم افزار آباکوس، نیروی حداکثر با افزایش پارامتر ویسکوالاستیک افزایش می یابد.

Name of Model	μ	Total no. of iteration	Convergence %	f_u (kN)
DB-Test	-	-	-	740
DB-1	0	n/a	6	n/a
DB-2	0.00001	n/a	14	n/a
DB-3	0.00005	605	100	692
DB-4	0.00010	508	100	697
DB-5	0.00050	444	100	738
DB-6	0.00100	341	100	786
DB-7	0.00500	305	100	929
DB-8	0.01000	278	100	1109

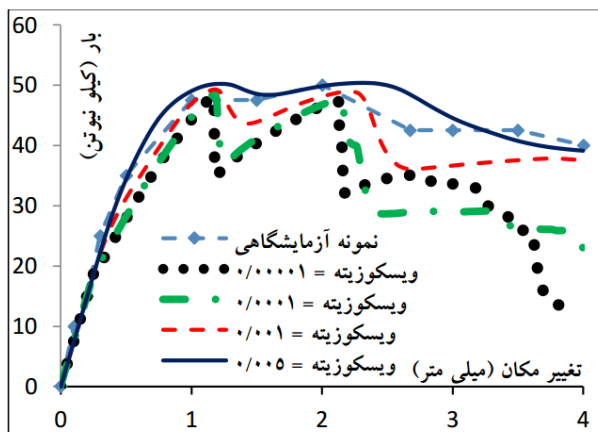
شکل ۱۴- نتایج نمونه های آزمایشگاهی دمیر و همکاران [۱۹]



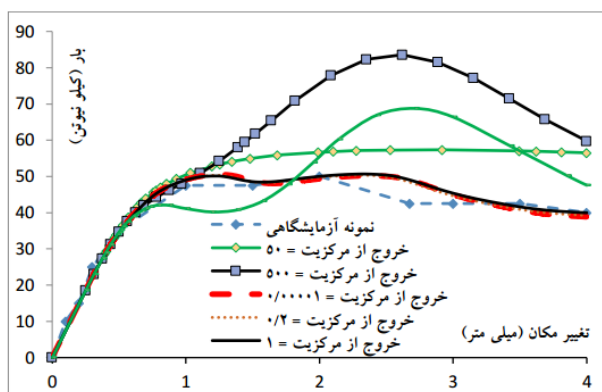
شکل ۱۵- منحنی نیرو - جابه جایی [۱۹]

¹² Aydin Demir

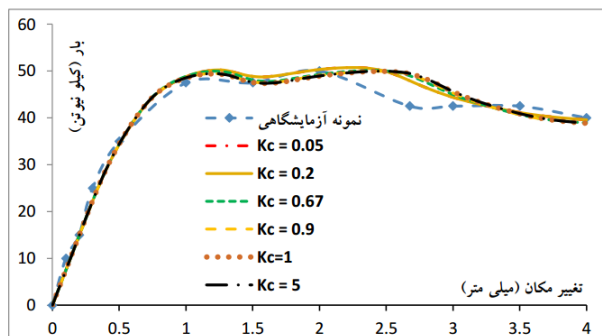
طبق نتایج حاصل از آزمایش‌های کریمی و همکاران [۲۰] در تحلیل با مدل رفتاری غیرخطی بتن، CDP در نرم‌افزار آباکوس، افزایش یا کاهش نیروی حداکثر و جابه‌جایی متناظر با آن با تغییر پارامترهای مختلف مقدار خروج از مرکزیت Kc و ویسکوالاستیک با نتایج حاصل از مدل‌سازی مطابقت دارد.



شکل ۱۶- اثر پارامتر ویسکوالاستیک بر منحنی بار - تغییر مکان [۲۰]



شکل ۱۷- اثر پارامتر خروج از مرکزیت بر منحنی بار - تغییر مکان [۲۰]

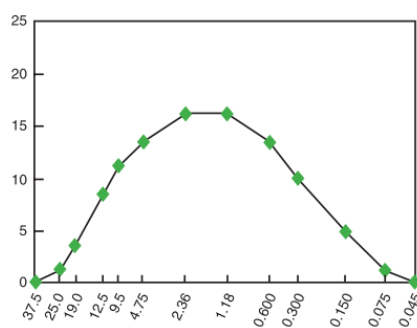


شکل ۱۸- اثر پارامتر ضریب Kc بر منحنی بار - تغییر مکان [۲۰]

۳- تولید و توزیع هوشمندانه سنگدانه‌ها

۳-۱ تولید سنگدانه متناسب با میزان مانده روی الک

با توجه به اینکه بتن یک ماده ناهمگن چند فازه شامل ملات و سنگدانه است مدلسازی در مقیاس ماکرو و میکرو در نظر گرفتن آن با خطا مواجه است. برای مدلسازی به صورت دو فاز ابتدا سنگدانه‌ها به صورت تصادفی در نمونه بتنی تولید و توزیع می‌شوند سپس سایر فضای نمونه با ملات پر می‌شود. ابتدا مدلسازی نمونه مکعبی بتن با سنگدانه کروی صورت پذیرفت. نکته مهم تولید تصادفی سنگدانه در نمونه، تقریب و نزدیک‌سازی اندازه‌های تعریف شده استاندارد مانده روی الک با میزان سنگدانه تولید شده با هر اندازه است. این درصدهای وزنی بر طبق منحنی‌های فولر ۱۳ باید به برنامه به صورت ورودی داده شوند و پس از آن میزان سنگدانه تولید شده با هر یک از وزن‌های مانده روی الک کنترل گردد. در برنامه به منظور تولید سنگدانه از منحنی‌های بهینه توصیه شده در مقاله کسماتکا و کرکهوف استفاده شده است [۱۶]. در شکل ۱۹، نمودار درصد بهینه مانده روی هر الک نشان داده شده است.



شکل ۱۹: منحنی دانه‌بندی بهینه ارائه شده

لازم به ذکر است که بتن تولید شده با فرض بزرگترین سنگدانه کوچکتر از ۲۵ میلیمتر ساخته شده است. به منظور قابل حصول کردن محاسبات، میزان حجم شش الک اول ابتدا برای سنگدانه‌ها محاسبه شده است. به منظور تولید کاملاً تصادفی سنگدانه‌ها از روابط ارائه شده در پژوهش اونگر و اکارت استفاده شده است [۲۱].

$$d_{eqv} = \frac{d_{min}d_{max}}{\sqrt[3]{Xd_{min}^3 + (1-X)d_{max}^3}} \quad 0 < X < 1 \quad (1)$$

در رابطه (۱) d_{min} و d_{max} به ترتیب اندازه قطر بالا و پایین بازه سنگدانه تولید شده هستند و X یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ است. d_{eqv} قطر تصادفی سنگدانه در بازه دو الک انتخابی است. تولید سنگدانه با قطر تصادفی، تا زمان رسیدن به میزان حجم سنگدانه مطلوب ادامه دارد. میزان حجم در نظر گرفته شده برای توقف تولید تصادفی مابین هر دو الک، از ۹۵ درصد شروع می‌شود و هرچه شماره الک ریزتر می‌شود این نسبت به ۱۰۰ درصد نزدیکتر می‌شود.

در واقعیت سنگدانه‌ها به صورت بیضوی و نه کروی وجود دارند. در تولید نمونه سنگدانه بیضوی یک پارامتر جدید با نام ضریب شکل برای بیضوی تعریف می‌شود. این پارامتر مشخص می‌کند نسبت قطرهای بیضوی نسبت به یکدیگر در چه حدودی تغییر کنند. برای اینکه یک سنگدانه از روزه الک عبور کند تنها و تنها کافی است که ۲ قطر از ۳ قطر بیضوی کوچکتر یا مساوی روزه الک باشند. اگر سه

شعاع بیضوی به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب گردند و r_1 بزرگترین قطر، r_2 قطر میانی و r_3 کوچکترین قطر را داشته باشد، با r_2 نصف اندازه تولید شده در قسمت قبل با عنوان d_{eqv} برابر قرار داده می شود.

$$d_{eqv} = 2 r_2 \quad (2)$$

فرض فوق کافی است تا سنگدانه بیضوی در بازه الک انتخابی قرار گیرد. سپس اندازه‌های دو شعاع دیگر براساس پارامتر شکل به صورت روابط (۳ و ۴) تعریف می گردد:

$$r_1 = \left(1 + u_1 \frac{m-1}{m+1}\right) r_2 \quad (3)$$

$$r_3 = \left(1 - u_3 \frac{m-1}{m+1}\right) r_2 \quad (4)$$

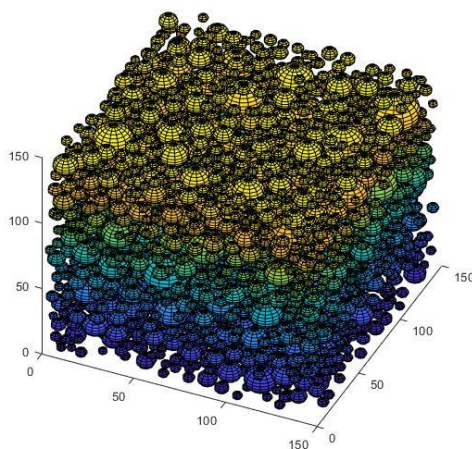
در روابط فوق m پارامتر شکل است که یک عدد تصادفی بزرگتر از ۱ است. u_1 و u_3 هرکدام یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ تا ۱ هستند.

۳-۲ جایگذاری سنگدانه‌ها در نمونه

جایگذاری سنگدانه‌های کروی

پس از تولید سنگدانه‌ها با رعایت تناسب مانده‌های روی الک باید این سنگدانه‌های کروی در فضای مکعبی بدون تداخل با یکدیگر به صورت کاملاً تصادفی جایگذاری شوند. به منظور جایگذاری این سنگدانه‌ها ابتدا باید سنگدانه‌ها به ترتیب از بزرگترین حجم به کوچکترین حجم مرتب گردند و با این ترتیب جایگذاری شوند چرا که سنگدانه‌های کوچکتر فضای سنگدانه‌های بزرگ را اشغال نکنند. مختصات مرکز سنگدانه به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت انتخاب شود. سپس هر سنگدانه جدید که تولید می شود، باید عدم تداخلش با تمامی سنگدانه‌های قبلی کنترل گردد. رابطه کنترل عدم تداخل سنگدانه‌ها با یکدیگر به صورت رابطه (۵) است.

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} > (r_1 + r_2) \quad (5)$$



شکل ۲۰: نمونه مکعبی ساخته شده با اندازه ۱۵۰ میلیمتر با سنگدانه کروی

جایگذاری سنگدانه‌های بیضوی

برای جایگذاری سنگدانه‌های بیضوی از روشی ماتریسی که در ذیل معرفی می‌شود استفاده می‌گردد. این روش در پژوهش‌های وانگ آمده است [7]. در این روابط یک ماتریس ۴ در ۴ معرف هر یک از بیضوی‌ها است. نحوه تشکیل ماتریس معرف بیضوی‌ها بدین صورت است:

۱- تشکیل ماتریس مبین شعاع‌ها به شکل زیر:

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} 1/r_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/r_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/r_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

۲- ماتریس مبین انتقال که با مختصات مرکز بیضوی مشخص می‌شود. پارامتر C مو قعیت هر نقطه در فضا را بر اساس سه جهت Z و Y و X نشان می‌دهد.

$$D_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 0 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & -c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

۳- چرخش در فضا (θ, ψ, ϕ) یا با نام‌گذاری متفاوت (yaw, pitch, roll)، با تولید زوایای اویلر^{۱۴} به صورت تصادفی یکنواخت و ماتریس مبین دوران به شکل رابطه زیر (۸) تشکیل می‌شود:

$$D_r = \begin{bmatrix} c\psi c\phi - c\theta s\psi s\phi & s\psi c\phi + c\theta c\psi s\phi & s\theta s\phi & 0 \\ -c\psi s\phi - c\theta s\psi c\phi & -s\psi s\phi + c\theta c\psi c\phi & s\theta c\phi & 0 \\ s\theta s\psi & -s\theta c\psi & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

در رابطه فوق :

$$s\theta = \sin \theta, s\psi = \sin \psi, s\phi = \sin \phi$$

$$c\theta = \cos \theta, c\psi = \cos \psi, c\phi = \cos \phi$$

علی‌رغم این که ساخت ماتریس دوران فضایی سنگدانه بیضوی تنها با تولید تصادفی زوایای اویلر امکان پذیر است، اما برای نمایش سنگدانه‌ها باید زوایای اویلر به بردار دوران ۱۵ تبدیل گردند. بردار دوران به دو صورت نمایش داده می‌شود. در حالت اول، دو زاویه که معرف جهت بردار در فضا هستند و یک زاویه که اندازه بردار یا به عبارت دیگر میزان دوران را مشخص می‌کند. در حالت دوم یک بردار چهار مولفه‌ای^{۱۶} که سه مولفه اول بردار یکه سه جهته هستند و مولفه چهارم میزان دوران در واحد رادیان است. نخستین نمونه‌های ساخته شده برای کنترل عدم‌تداخل سنگدانه‌ها در ابعاد کوچکتر و با تعداد کمتر سنگدانه‌ها ساخته شدند تا بتوان از عدم‌تماس و درهم‌رفتگی سنگدانه‌ها اطمینان پیدا کرد.

¹⁴ Euler angles

¹⁵ Rotation vector

¹⁶ Quaternion

با تشکیل ماتریس‌های مبین اندازه شعاع، جابه‌جایی انتقالی، چرخش بیضوی و نمایش صحیح سنگدانه‌ها در فضا، حال ماتریس کلی معرف بیضوی قابل تشکیل است.

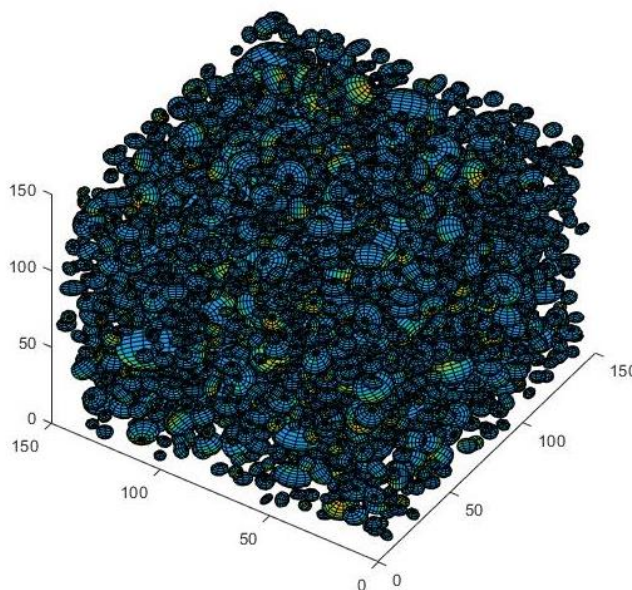
$$E = D_t^T D_r^T \bar{E} D_r D_t \quad (9)$$

ماتریس E تمامی ویژگی‌های یک بیضوی تولید شده را در بر دارد. برای کنترل عدم طلاق دو بیضوی فقط و فقط کافی است که معادله (۱۰) دارای ریشه باشد. خوشبختانه این معادله در صورت ریشه‌دار بودن دو ریشه حقیقی مثبت دارد که این موضوع به تسریع روند حل کمک می‌کند.

$$f(\lambda) = \det(\lambda E_1 + E_2) \quad (10)$$

به منظور حل معادله فوق می‌توان از حل‌کننده‌های ارائه شده در نرم‌افزارها استفاده کرد یا اینکه با افزایش لگاریتمی مقدار λ تغییر علامت f را کنترل کرد و چنانچه گزاره وقوع تغییر علامت رخ داده باشد نشان می‌دهد که دو بیضوی با یکدیگر تداخل ندارند. تغییرات λ به دلیل هم‌ارزی دو ماتریس معرف بیضوی‌ها باید لگاریتمی باشد.

پس از تولید سنگدانه‌ها و چینش آن‌ها و کنترل عدم تداخل با یکدیگر به روش ذکر شده در بالا و عدم بیرون‌زدگی از مرزها نمونه ترسیم می‌شود.



شکل ۲۱: نمونه مکعبی ساخته‌شده با اندازه ۱۵۰ میلی‌متر با سنگدانه بیضوی، ضریب شکل ۲ و بزرگترین سنگدانه ۲۵ میلی‌متری

۳-۳. مش‌بندی و تخصیص ماده

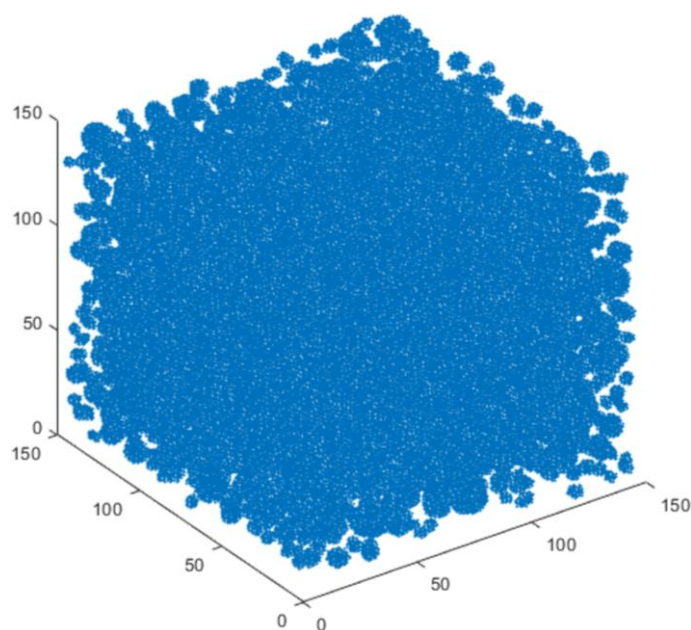
در این مرحله مش بندی نمونه بررسی می‌شود. برای این منظور، تمام نمونه مکعبی به صورت مختصات دکارتی تعریف می‌شود. سپس در میان هر هشت نقطه‌ای که یک فضای مکعبی با مساحت واحد را تشکیل می‌دهند یک المان تعریف می‌گردد. نقطه مرکزی هر المان به عنوان شاخص المان کنترل می‌گردد، چنانچه درون سنگدانه قرار گیرد، المان به عنوان سنگدانه در نظر گرفته می‌شود و چنانچه درون سنگدانه نباشد به عنوان سیمان فرض می‌شود. شرط قرار گیری هر نقطه در سنگدانه کروی رابطه (۱۱) است. پارامتر C موقعیت هر نقطه در فضا را بر اساس سه جهت X, Y, Z نشان می‌دهد.

$$(x-cx)^2 + (y-cy)^2 + (z-cz)^2 \leq r^2 \quad (11)$$

شرط قرارگیری یک نقطه در سنگدانه بیضوی به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) است:

$$x = [x \ y \ z \ 1]^T \quad (12)$$

$$x^T E x \leq 0 \quad (13)$$



شکل ۲۲: سنگدانه مش بندی شده در نمونه مکعبی ۱۵۰ میلیمتری

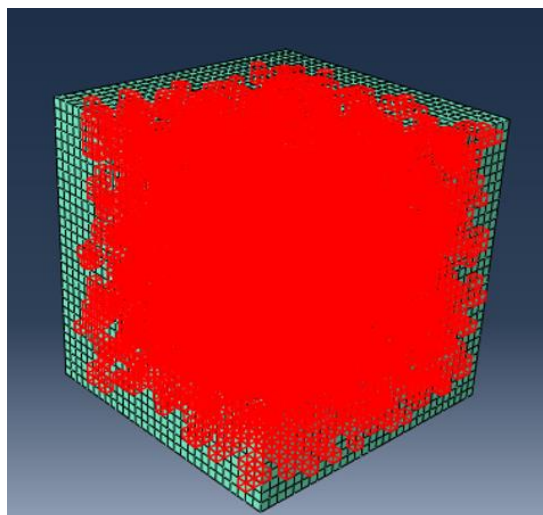
با تکمیل فرآیند مش بندی نمونه بتنی، ورودی نرم افزارهای تحلیل دینامیکی قابل ساخت است. این فایل نمونه با برنامه متن محوری که نوشته شده است، تبدیل به ورودی های نرم افزار آباکوس شده است. با استفاده از فایل خروجی بدست آمده از نرم افزار متلب، فضای مدل سازی سنگدانه در نرم افزار آباکوس تعریف می شود. نهایتاً با تخصیص خواص سنگدانه به فضای مورد نظر، سنگدانه ها مدل سازی می شوند.

جدول ۲: دانه بندی ماسه و سیمان

دانه بندی شن به وزن ۲۹۶۰ گرم		دانه بندی ماسه به وزن ۵۰۰ گرم	
مانده روی الک (گرم)	شماره الک	مانده روی الک (گرم)	شماره الک
0	1 1/2	0	9.5
0	1	35	4
27	3/4	188	10
126	2/4	56	16
766	3/8	41	30
1973	#4	35	50
68	زیر الک	80	100
		32	200
		33	زیر الک

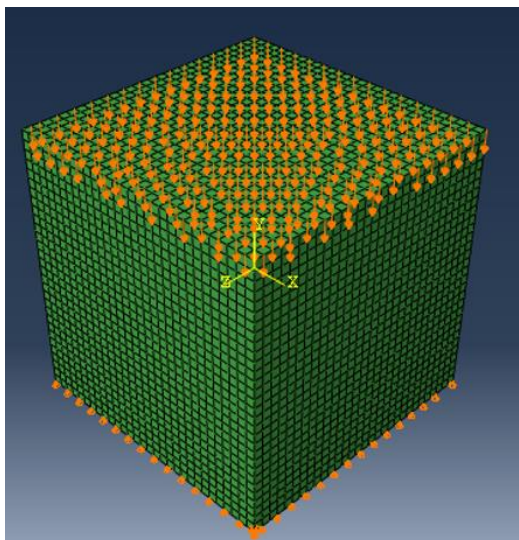
۴- مدلسازی اجزا محدود

برای مدلسازی از یک نمونه مکعبی به ضلع ۱۵۰ میلی متر استفاده شده است. برای مدلسازی رفتار ملات از مدل پلاستیک آسیب دیده بتن ۱۷ استفاده شده و مقاومت فشاری حداکثر ملات برابر ۲۷ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در بتن های معمولی بتن از قسمت ملات ترک می خورد و ملات زودتر از سنگدانه می شکند، لذا سنگدانه ها به صورت الاستیک خطی مدل سازی شده اند. مدول الاستیسیته سنگدانه ها ۶۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰,۲۲ و وزن مخصوص ۲,۶ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۳: نمایش سنگدانه ها و ملات در نمونه مکعبی

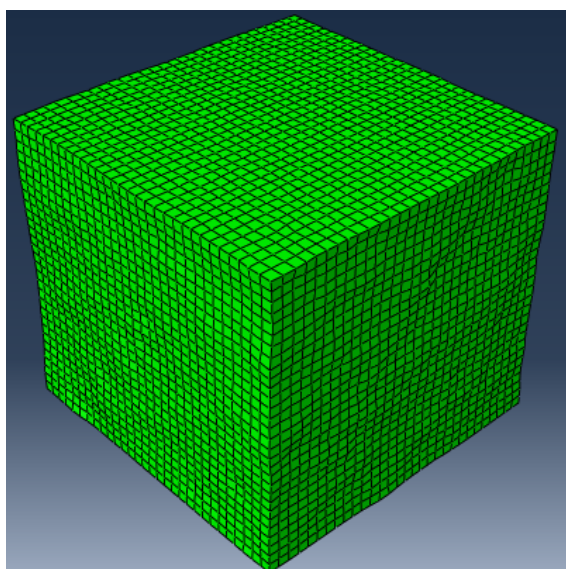
ضلع پایین مکعب به عنوان تکیه گاه در جهت قائم مقید شده است. جهت جلوگیری از ناپایداری، یک نقطه در هر سه جهت مقید شده است. بارگذاری به صورت کنترل جابه جایی ۱۸ در ضلع بالایی مکعب تا جابه جایی حداکثر ۲ میلی متر به صورت خطی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۴: نمایش بارگذاری نمونه مکعبی

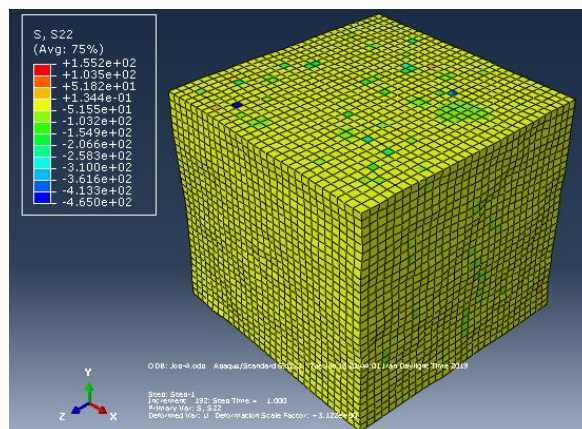
۵- تحلیل

در شکل های ۲۵ تا ۲۸ تغییر شکل ها و تنش های ایجاد شده در نمونه مکعبی ناشی از بارگذاری نشان شده است.

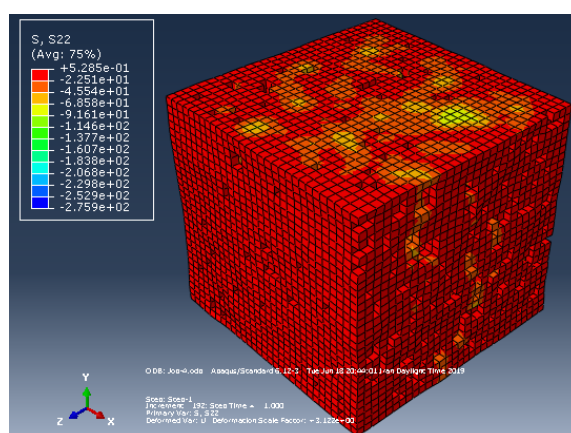


شکل ۲۵: نمایش تغییر شکل های ایجاد شده در نمونه مکعبی

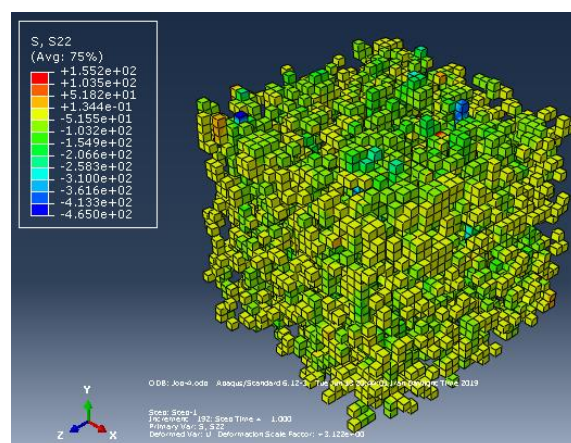
¹⁸ Displacement Control



شکل ۲۶: نمایش تنش‌های ایجاد شده در نمونه مکعبی

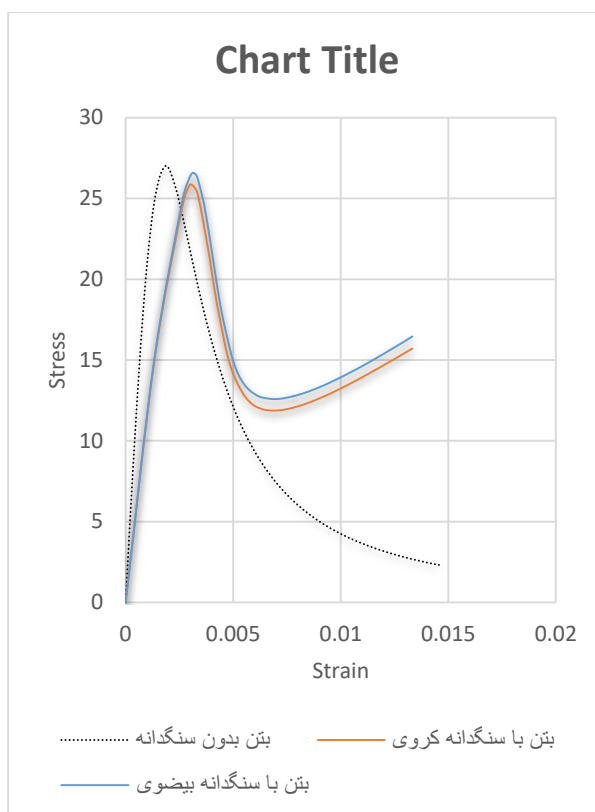


شکل ۲۷: نمایش تنش‌های ایجاد شده در ملات بتن

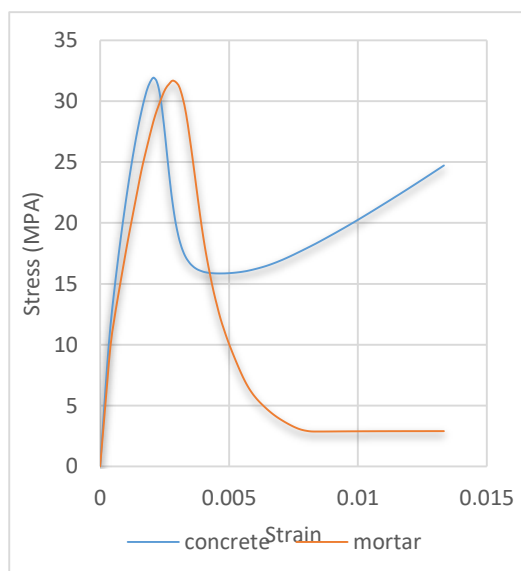


شکل ۲۸: نمایش تنش‌های ایجاد شده در سنگدانه بتن

در شکل ۲۹ و ۳۰ نمودار تنش کرنش بتن مشتمل بر سنگدانه و ملات با مدلسازی تک فاز ملات مقایسه شده‌اند. با توجه به اینکه بتن از رده معمولی بوده و انتظار داریم شکست در ملات اتفاق بیفتد، مقاومت فشاری حداکثر هر دو مدل برابر بوده اما در بتن به دلیل وجود سنگدانه، شیب نمودار در ناحیه الاستیک خطی که معرف مدول الاستیسیته بتن است متفاوت می‌باشد. کروی یا بیضوی بودن سنگدانه‌ها نیز تاثیر چشمگیری در مقاومت حداکثر و منحنی تنش کرنش ندارد.

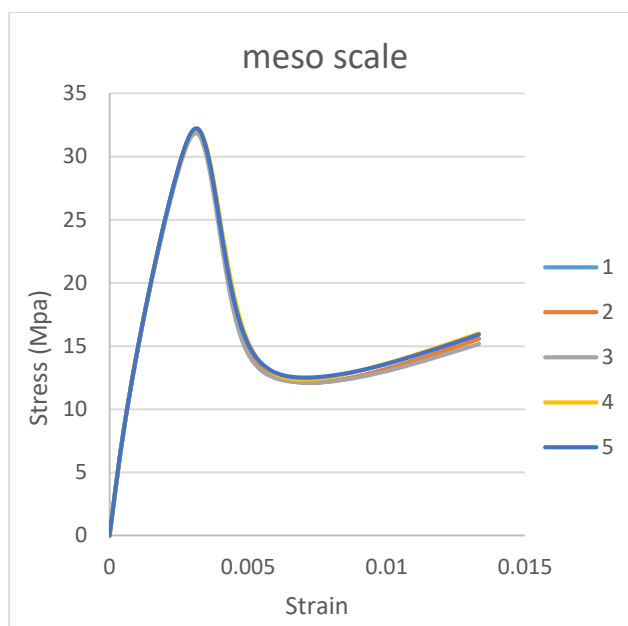


شکل ۲۹: مقایسه نمودار تنش - کرنش مدل مکعبی تک فاز و دو فاز با مقاومت حداکثر ۲۷ مگاپاسکال



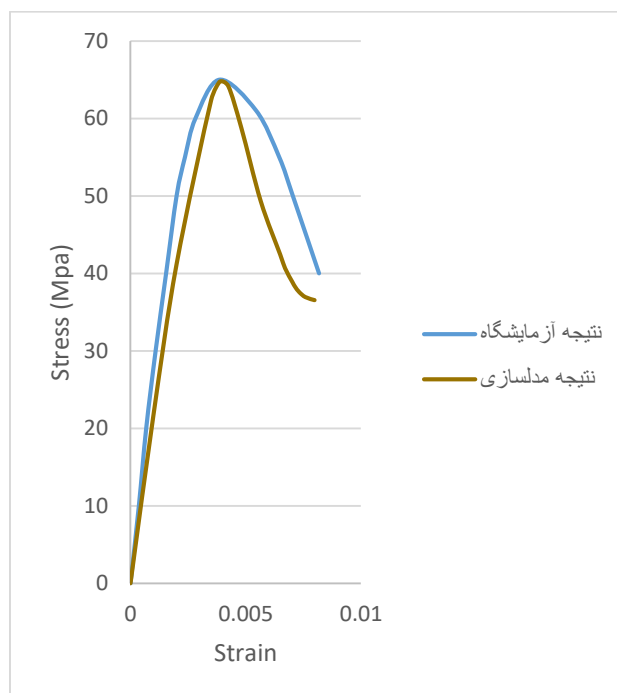
شکل ۳۰: مقایسه نمودار تنش - کرنش مدل مکعبی تک فاز ملات و دو فاز ملات و سنگدانه با مقاومت فشاری حداکثر ۳۲ مگاپاسکال

در شکل ۳۱ مدل سازی برای ۵ نوع چیدمان مختلف سنگدانه بیضوی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند که تقریباً بر هم منطبق بوده اند. لازم به ذکر است مقاومت فشاری تعیین شده برای مدل سازی های شکل ۱۳ برابر ۳۲ مگاپاسکال بوده است.



شکل ۳۱: مقایسه ۵ مدل مکعبی با چیدمان‌های مختلف سنگدانه‌های کروی

جهت بررسی صحت مدل‌سازی‌ها، یک مدل با مشخصات ارائه شده در تحقیقات ژو و همکاران [۵] ساخته شده و در شکل شماره ۳۲ نمودار تنش کرنش آن با نمودارهای حاصل از آزمایش مقایسه شده است.



شکل ۳۲: مقایسه نمودار تنش کرنش حاصل از مدل‌سازی میان مقیاس بتن با نمودار تنش کرنش حاصل از آزمایش ژو و همکاران

هم‌چنین سه نمونه مکعبی بتن با مشخصات ذیل در آزمایشگاه ساخته شده و نتایج حاصل از آزمایش و مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با هم مقایسه گردیده‌اند. نمونه‌ها مکعب ۱۵۰ در ۱۵۰ در ۱۵۰ میلی‌متر با مقاومت فشاری مکعبی PSI ۴۰۰۰ معادل ۲۷ مگاپاسکال طبق طرح اختلاط ACI می‌باشند. نیروی شکست نمونه در آزمایشگاه و وزن هر نمونه مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳: وزن، نیرو و مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها

مقاومت فشاری حداکثر (مگاپاسکال)	نیروی حداکثر (کیلو نیوتون)	وزن (کیلوگرم)	نمونه
۲۲,۶۶	۵۱۰	۷,۸۴۷	اول
۲۵,۳۳	۵۷۰	۷,۷۹۵	دوم
۲۴,۴۴	۵۵۰	۷,۸۰۱	سوم



شکل ۳۳: تصاویر نمونه‌های آزمایشگاهی



شکل ۳۴: نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری



شکل ۳۵: حداکثر نیروی شکست یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری

۶- نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار غیرخطی بتن در نرم‌افزار آباکوس در میان مقیاس و آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل CDP در این نرم‌افزار بوده است. برای این منظور با تغییر هدفمند پارامترهای ورودی CDP انواع مدل‌های ساخته شده تحلیل و بررسی گردید.

نتایج این تحقیق عبارتند از:

در تحلیل مدل CDP، مقدار نیروی حداکثر با پارامترهای Pp (خروج از مرکزیت پلاستیک)، Kc و Ve (پارامتر ویسکوالاستیک) رابطه مستقیم دارد.

در برخی از مدل‌ها به دلیل ناهمگرا شدن تحلیل و لذا ناپایداری مدل در انتهای تحلیل، نمی‌توان نتایج دقیقی از مقایسه پارامترهای ورودی با دو پارامتر خروجی نیروی متناظر با جابه‌جایی حداکثر و سطح زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی گرفت. در واقع نتایج برگرفته از انتهای منحنی تنش کرنش بتن قابل استناد نیست. لذا این دو پارامتر برای مقایسه نتایج پارامترهای مناسبی نمی‌باشند.

در بتن‌های معمولی، بتن از قسمت ملات ترک می‌خورد و ملات زودتر از سنگدانه می‌شکند.

مقاومت فشاری حداکثر هر دو مدل تک فاز ملات و دو فاز مشتمل بر ملات و سنگدانه برابر بوده اما در بتن به دلیل وجود سنگدانه، شیب نمودار در ناحیه الاستیک خطی که معرف مدول الاستیسیته بتن است بیشتر می‌شود. زیرا مدول الاستیسیته بتن دو فاز از ملات بیشتر است.

بتن متشکل از سنگدانه و ملات وارد ناحیه پلاستیک شده و اجازه تغییر شکل غیرخطی دارد اما مقاومت بیشتر سنگدانه نسبت به ملات و رفتار خطی سنگدانه عاملی است تا افت مقاومت بتن دو فاز از حالت تک فاز ملات پس از تسلیم کمتر باشد.

وجود سنگدانه تاثیر چندانی در افزایش مقاومت حداکثر (یا تنش نهایی) بتن ندارند بلکه شکل‌پذیری و رفتار پس از ترک بتن را ارتقا می‌دهد، به نحوی که خردشدگی نهایی به تاخیر می‌افتد و کرنش نهایی بتن با سنگدانه بین ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از نمونه سیمانی

تنها می‌شود. از این رو اگر چیدمان سنگدانه به صورت پراکنده و مناسب صورت بگیرد با تغییر چیدمان مقاومت فشاری حداکثر نمونه بتنی تغییر محسوسی نخواهد کرد و تغییرات متوجه رفتار بتن در ناحیه پلاستیک خواهد بود که متاثر از سنگدانه می‌باشد.

کروی یا بیضوی بودن سنگدانه‌ها تاثیر چشمگیری در مقاومت حداکثر و منحنی تنش کرنش ندارد.

مقاومت فشاری مدلسازی با نمونه‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته است.

۷- مراجع

- [1] Haffner, S. Eckardt, S. Luther, T. and Koknke, C. (2006), "Mesoscale Modeling of Concrete: Geometry and Numerics". Computers and Structures, 84, 450–461.
- [2] P. Wriggers, S.O. Moftah, Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behavior, Institute for Mechanics and Computational Mechanics, University of Hannover, Hannover, Germany, Finite Elements in Analysis and Design 42 (2006) 623– 636
- [3] L. C. Wang et al, Meso-Scale Numerical Modeling of the Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Members, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, No. 6, December 2013
- [4] X.F. Wanga, Z.J. Yang b,a,†, J.R. Yates c, A.P. Jivkov a, Ch Zhang ,2015, Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores, Construction and Building Materials 75 (2015) 35–45
- [5] 3D mesoscale finite element modelling of concrete, Rongxin Zhou, Zhenhuan Song, Yong Lu ,Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JL,UK, 2017
- [6] Shuguang Li, Qingbin Li , 2015, Method of meshing ITZ structure in 3D meso-level finite element analysis for concrete , Finite Elements in Analysis and Design 93(2015)96–106
- [7] W. Wang, J. Wang, and M. S. Kim, "An algebraic condition for the separation of two ellipsoids," Comput. Aided Geom. Des., vol. 18, no. 6, pp. 531–539, 2001.
- [8] F.H. Wittmann, P.E. Roelfstra, H. Sadouki, 1984, Simulation and analysis of composite structures, Mater.Sci. Engng. 68 (2), 239–248.
- [9] Yi Xu, Shenghong Chen , A method for modeling the damage behavior of concrete with a three-phase mesostructured , Construction and Building Materials 102 (2016) 26–38
- [10] Xiuli Du , Liu Jin , Guowei M ,2014, Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at mesoscale, International Journal of Impact Engineering 66 (2014) 5e17
- [11] Pedersen,R.R.,Simone,A.,Sluys,L.J. ,2013, Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete .Cem.Concr.Res.50,74–87.
- [12] L. Snozzi , A. Caballero , J.F. Molinari,2011, Influence of the meso-structure in dynamic fracture simulation of concrete under tensile loading, Cement and Concrete Research 41 (2011) 1130–1142
- [13] Wriggers,P.,Moftah,S.O. ,2006 , Meso scale models for concrete: homogenization and damage behavior ,FiniteElem.Anal.Des.42,623–636.
- [14] G. Lilliu, J.G.M. van Mier, 2003, 3D lattice type fracture model for concrete, Engineering Fracture Mechanics 70 (2003) 927–941
- [15] Xiaofeng Wang ,Mingzhong Zhang ,Andrey P. Jivkov , 2016, Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete, International Journal of Solids and Structures 80 (2016) 310–333
- [16] Kmiecik, P. and Kaminski, M.; "Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken into Consideration"; Archives of Civil and Mechanical Engineering XI, No. 3 (2011)

- [17] Meso scale finite element modelling of non-homogeneous three-phase concrete Siamak Shahbazi, Iraj Rasoolan Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran, 2016
- [18] Abaqus Analysis Users Manual, Version 6-12-3
- [19] Aydin Demir, Hakan Ozturk, Kemal Edip, Marta Stojmanovska, EFFECT OF VISCOSITY PARAMETER ON THE NUMERICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM BEHAVIOR, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Sakarya University, Sakarya, Turkey, July 2018
- [۲۰] امیرحسین کریمی، محمد سعید کریمی، علی خیرالدین، عبدالعظیم امیرشاه کریمی، مدل سازی غیرخطی دیوار مصالح بنایی غیرمسلح تحت بار داخل صفحه و بررسی اثر پارامترهای مختلف در رفتار آن، دانشگاه سمنان، زمستان ۱۳۹۵
- [21] J. F. Unger and S. Eckardt, "Multiscale Modeling of Concrete," Arch. Comput. Methods Eng., vol. 18, no. 3, pp. 341–393, 2011.
- [22] Ravi A. Patel, Janez Perko, Diederik Jacques, Geert De Schutter, Guang Ye, Klaas Van Bruegel Effective diffusivity of cement pastes from virtual microstructures: Role of gel porosity and capillary pore percolation, Construction and Building Materials, Volume 165, 20 March 2018, Pages 833-845