



تاثیر شکل و نحوه توزیع سنگ‌دانه‌ها بر پارامترهای خرابی در مدل سازی میان مقیاس اجزای محدود ملات

حمید اسکندری‌نداف^{*}، علی ایزدی‌کیا^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران سازه، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۲- دانشجوی ارشد عمران سازه، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

خلاصه

یکی از متداول‌ترین روش‌های بررسی ویژگی‌های مکانیکی ملات سیمان، مدل سازی با کمک نرم افزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود است. مدل استفاده شده در این روش می‌تواند در مقیاس‌های نانو، میکرو یا میانی باشد، اما برای بررسی خواص مکانیکی ملات مانند تنش، کرنش و پارامترهای خرابی مدل سازی در مقیاس میانی به نتایج دقیق تری منجر می‌شود؛ از آنجایی که در مقیاس میانی ملات ناهمگن فرض می‌شود لازم است تا شکل و نحوه توزیع سنگ دانه‌ها در مدل به گونه‌ای منطقی و نزدیک به واقعیت فرض شود، بنابراین در این تحقیق برای سه نوع سنگ دانه دایروی، شش ضلعی و مربعی، مدل سازی میان مقیاس با روش اجزای محدود صورت گرفته است، نحوه شروع و گسترش خرابی در ملات تحت بار کششی و فشاری تک محوره مورد مطالعه قرار گرفته است جهت بررسی صحت مدل اجزای محدود استفاده شده، داده‌های تحقیق سایر محققین به عنوان ورودی به مدل اجزای محدود داده می‌شود و خروجی با نتایج ایشان مقایسه می‌شود. مشاهده شد که مدل اجزای محدود استفاده شده در این تحقیق از دقت قابل قبولی برخوردار است، همچنین مشخص گردید که نحوه توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها بر الگوی خرابی فشاری تشکیل شده و مقاومت فشاری ملات تاثیر قابل توجهی ندارند، درحالی شکل هندسی سنگ‌دانه‌ها بر این دو پارامتر کاملاً موثرند. علاوه بر این، هرچه شکل هندسی سنگ‌دانه‌های در نظر گرفته به دایره نزدیک‌تر باشند مقاومت فشاری بیشتری بدست خواهد آمد.

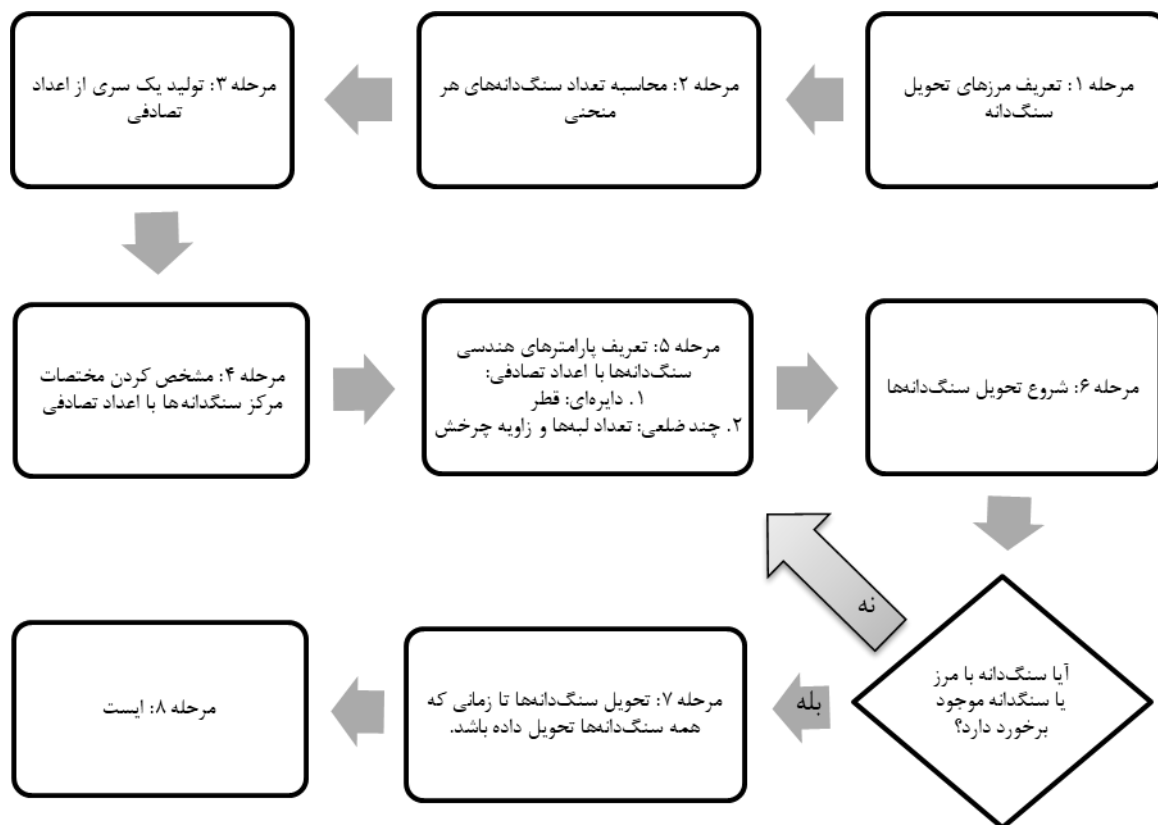
کلمات کلیدی: مدل سازی اجزای محدود، میان مقیاس، الگوی خرابی، توزیع تصادفی، مقاومت فشاری

۱. مقدمه

امروزه مدل سازی به روش اجزای محدود بسیار گسترده شده و در مقیاس‌های مختلف انجام می‌شود. در این روش‌های اجزای محدود هرچه در مقیاس‌های پایین‌تری به مدل سازی و تحلیل پرداخته شود به احتمال زیاد نتایج دقیق‌تری بدست خواهد آمد. بنابراین بسیاری از محققین تلاش می‌کنند که از روش‌های مدل سازی میان مقیاس (Meso-scale) برای بدست آوردن نتایج بزرگ مقیاس (Macro-scale) استفاده نمایند به طوری که بعضی از محققین، به بررسی مدل اجزای محدود در چند مقیاس به صورت دو بعدی و سه بعدی [۱-۴] پرداخته‌اند و اذعان داشته‌اند مدل میان مقیاس توانایی تحلیل

* Corresponding author: Hamid Eskandari-Naddaf
Email: Hamidiisc@yahoo.com

خصوصیات مکانیکی ملات را دارد. همچنین بیان کرده‌اند دو فاز (ژل سیمان و سنگ‌دانه) در نظر گرفتن مدل ملات به نتایج قابل قبولی می‌انجامد. [۱، ۴]. این محققین نحوه خرابی ملات در مقیاس میانی را به صورت پلاستیسیته خرابی بتن (CDP) بیان کرده‌اند که لی و همکاران [۵] مبانی ریاضی آن را برای سازه‌های تحت بار چرخه‌ای و محوری به تفصیل شرح داده‌اند. روپاسینگه و همکاران [۴] مقاومت فشاری نمونه بتنی که با نانوسیلیس ساخته شده را با کمک مدل‌سازی در چند مقیاس مختلف میکرو، میانی و ماکرو پیش‌بینی کرده‌اند، این محققان نتایج عکس‌های میکروسکوپ الکترونی را با مدل میکرومقیاس مقایسه کرده و خروجی این مدل را به عنوان ورودی مدل میان‌مقیاس در نظر گرفته‌اند و به طور مشابه بین مدل میان‌مقیاس و مقیاس ماکرو نیز ارتباط برقرار کرده‌اند. در پایان نشان داده‌اند داده‌های آزمایشگاهی با روش استفاده از چند مقیاس به صورت زنجیری که هر حلقه آن نتایج درستی می‌دهد، به خوبی هم راستا است. از دیگر عوامل موثر در نتایج مدل‌سازی میان‌مقیاس، محل و شکل هندسی فرض شده برای سنگ‌دانه‌ها می‌باشد [۶-۱۰] در این راستا چن و همکاران [۱۱] رفتار یک نمونه بتنی تحت بار کششی و فشاری محوری را در مقیاس میانی بررسی کرده‌اند و با بررسی اثر تیز گوشه‌گی سنگ‌دانه‌ها اعلام کرده‌اند کاملاً کروی در نظر گرفتن سنگ‌دانه‌ها موجب بدست آمدن تا ۲۰٪ تفاوت نسبت به نتایج آزمایشگاهی می‌شود.



شکل ۱- الگوریتم توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها

۲. مدل اجزای محدود

در این تحقیق تلاش شده یک مکعب ملات با طول جانبی ۵۰ میلی‌متر به صورت دو بعدی با کمک نرم‌افزار آباکوس در مقیاس میانی شبیه سازی شود. فلوچارت جریان تولید تصادفی سنگ‌دانه‌ها و شیوه‌های توده کردن آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

از آن‌جا که در این تحقیق مدل‌سازی در مقیاس میانی صورت گرفته‌است، ملات سیمانی، ماده‌ای ناهمگن در نظر گرفته شده و سنگ‌دانه‌ها به صورت جداگانه و مدفون در چسب سیمان مدل شده‌اند و خواص آن جداگانه به عنوان ورودی به نرم افزار داده شده است. خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها با آزمایشات تجربی به راحتی قابل حصول می‌باشند اما برای چسب سیمان نمی‌توان به راحتی و با دقت کافی در مورد خواص مکانیکی و منحنی‌های تنش کرنش صحبت نمود [۴] و تعیین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی نیازمند عکس برداری‌های الکترونی و اسکن‌های دقیق و هزینه‌بر است بنابراین طیف گسترده‌ای از محققین با استفاده از تقریب مناسبی از مدل پلاستیسیته خرابی بتن (CDP) به منظور قوانین حاکم بر چسب سیمان استفاده می‌کنند. [۱، ۹، ۱۰، ۱۲-۱۴] بنابراین در این مطالعه، سنگ‌دانه‌ها به عنوان مصالح الاستیک خطی، بدون در نظر گرفتن رفتار غیر خطی و خرابی کششی یا فشاری در نظر گرفته می‌شوند و برای چسب سیمان، مدل پلاستیسیته خرابی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد که رابطه بین تنش‌ها و کرنش‌ها و نحوه کاهش مدول الاستیک، همانطور که در معادلات (۱) - (۴) نشان داده شده است، توصیف می‌شوند.

$$\sigma = (1-d) \bar{\sigma} \quad (1)$$

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{in} - \frac{d}{(1-d)} \frac{\sigma}{E_0} \quad (2)$$

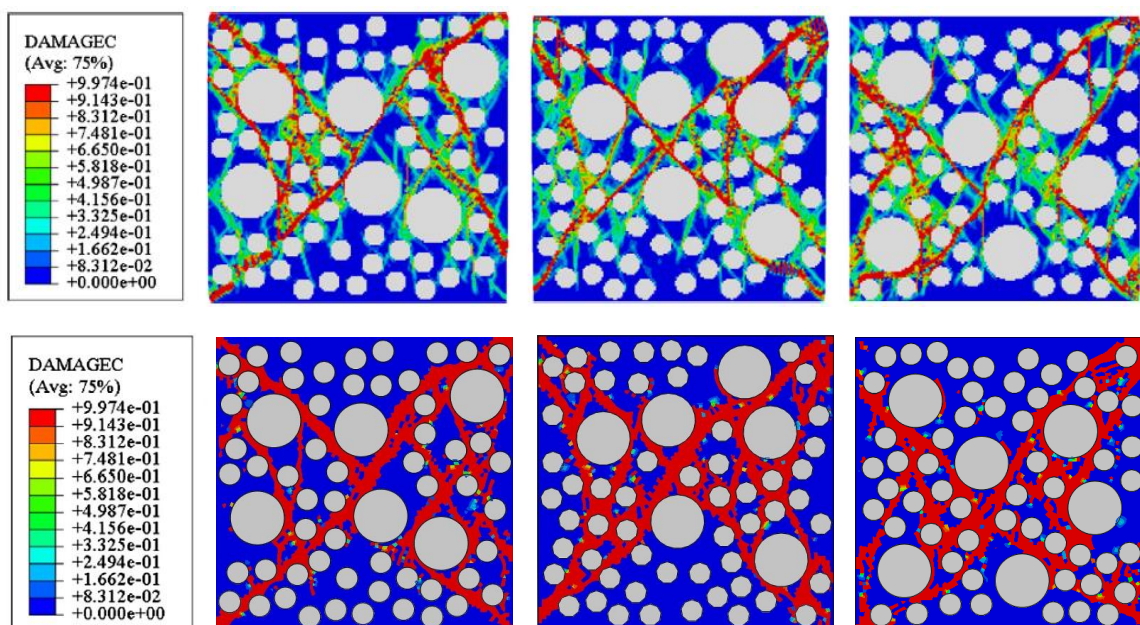
$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \varepsilon_0^{el} \quad (3)$$

$$\varepsilon_0^{el} = \sigma / E_0 \quad (4)$$

که در آن σ و $\bar{\sigma}$ تنش و تنش موثر هستند. ε و ε^{pl} نشان دهنده کرنش و کرنش پلاستیک است در حالی که ε^{in} و ε_0^{el} کرنش غیر الاستیک و کرنش الاستیک اولیه می‌باشند، همچنین d و E_0 به پارامتر خرابی و مدول یانگ اولیه اشاره دارد. سایر پارامترهای مدل‌سازی مورد استفاده در این تحقیق به صورتی اتخاذ شده‌اند که زاویه اتساع، مقدار ۳۱ را می‌گیرد. انحراف از مرکز و ضریب نیز K به ترتیب ۰/۱ و ۱/۶۶ تنظیم شده‌اند. نسبت مقاومت فشاری دو محوری به تک محوری برابر با ۱/۱۶ است. علاوه بر این، ضریب گرانروی نیز $1.0e-5$ است. وقتی مقاومت بتن به طور کامل از بین رفته است، با استفاده از مقادیر خرابی کششی تعریف شده در این مقاله، آباکوس به طور خودکار کرنش پلاستیک را براساس کرنش ترک، با کمک معادله (۲) محاسبه می‌کند.

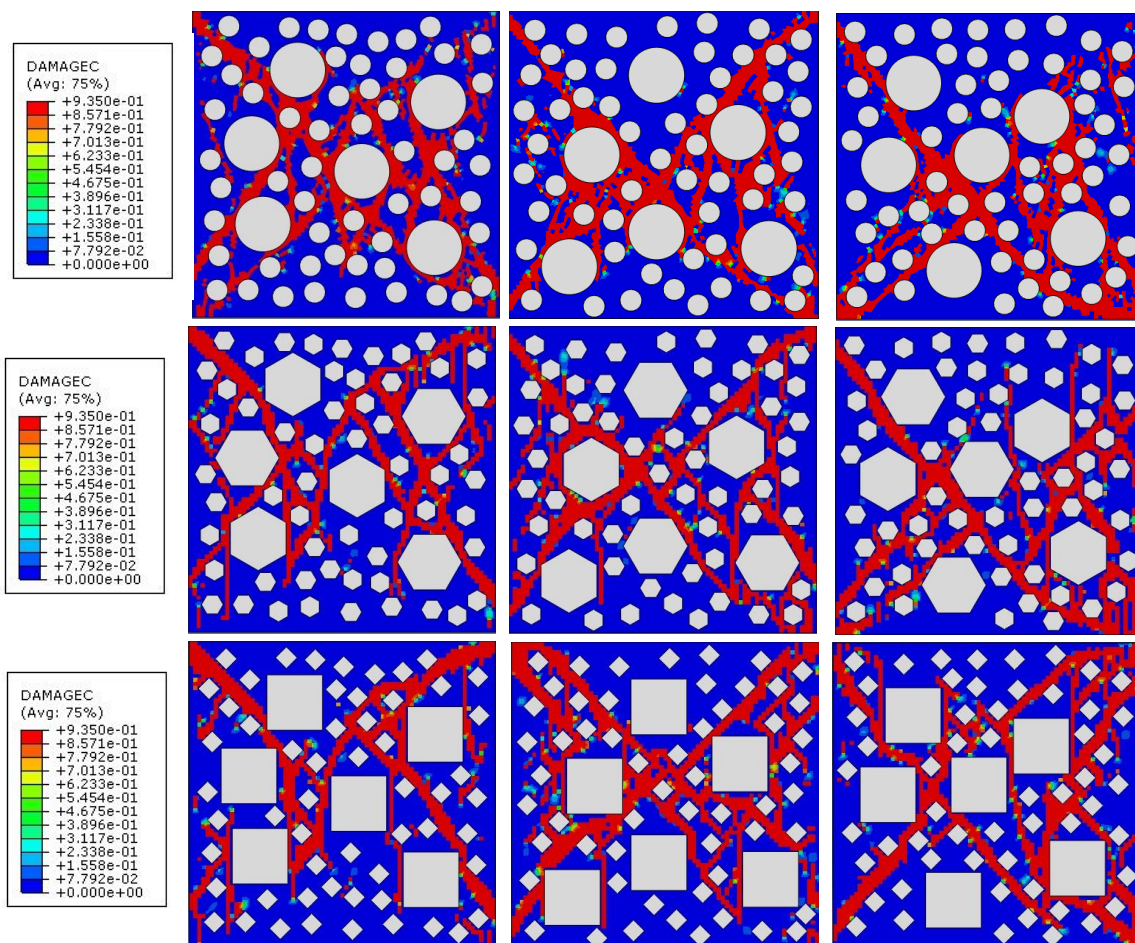
۳. بررسی نتایج

بارگذاری کششی و فشاری تک محوری در نقطه مرجع با کنترل کرنش اعمال می‌شوند. در شکل ۲ توزیع‌های تصادفی استفاده شده در مقاله چن و همکاران [۱۱] به عنوان ورودی به مدل آباکوس مورد استفاده در این داده شد مشاهده می‌شود در نحوه شروع و گسترش خرابی فشاری بین نتایج حاصل از مدل اجزای محدود استفاده شده در این تحقیق، با نتایج ارائه شده در مقاله این محققین، همخوانی قابل قبولی وجود دارد، این تطابق الگوی خرابی ظاهر شده بیانگر صحت مدل‌سازی و قابل اتکا بودن نتایج حاصل از آن می‌باشد. اندک اختلاف مشاهده شده در برخی نقاط احتمالا به دلیل نحوه تعریف نحوه خرابی کششی می‌باشد که در این مقاله، مطابق اکثر تحقیقات انجام شده بر اساس کرنش ترک و پارامتر خرابی ناشی از آن تعریف شده در حالی که چن و همکاران در مدل اجزای محدود از انرژی شکست برای تعریف خرابی کششی استفاده کرده‌اند.



شکل ۲: تطابق الگوی خرابی فشاری در توزیع استفاده شده در مقاله چن و همکاران [۱۱] با مدل مورد استفاده در این تحقیق

پس از اطمینان از صحت مدل اجزای محدود، طبق الگوریتم نشان داده شده در شکل ۱، سه توزیع تصادفی سنگ‌دانه ایجاد گردید که هر کدام به اشکال دایره‌ای، مربعی و چندضلعی تقسیم گردیدند و تحت بار فشاری به صورت کرنش کنترل قرار گرفتند. الگوی خرابی ایجاد شده در شکل ۳ به نمایش درآمد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر ردیف توزیع‌های مختلف سنگ‌دانه برای شکل یکسان سنگ‌دانه، قرار گرفته در حالی که هر ستون، با توزیع ثابت سنگ‌دانه، شکل‌های مختلف را به نمایش می‌گذارد. در تمامی این ۹ حالت، الگوی ساعت شنی حالت خرابی در مکعب ملات تحت بار فشاری به صورت صحیح بوجود آمده است که این الگو، با تغییر توزیع سنگ‌دانه تغییر اندک و غیر قابل توجهی می‌کند که نشان از موثر نبودن نحوه توزیع، بر این الگو دارد ولی با تغییر شکل سنگ‌دانه تغییر ایجاد شده قابل توجه بوده و می‌توان مشاهده کرد که در توزیع ثابت، با تغییر شکل سنگ‌دانه، الگوی خرابی فشاری تغییر قابل توجهی می‌کند. که نشان دهنده موثر بودن شکل سنگ‌دانه بر الگوی خرابی فشاری می‌باشد.



شکل ۳. الگوی خرابی فشاری ملات در توزیع و شکل های مختلف سنگدانه

از مقاومت‌های فشاری تحمل شده توسط هر توزیع، تحت نیروی فشاری اعمال شده به صورت کرنش کنترل، که در جدول ۱ ارائه شده است می‌توان دریافت که نحوه توزیع سنگدانه بر مقاومت فشاری ملات تاثیر چندانی ندارد و اثر نحوه توزیع سنگدانه در مقاومت فشاری نیز قابل چشم پوشی است. البته لازم به ذکر است که در ملات سیمانی مدل‌سازی شده با سنگدانه دایروی، اثر توزیع سنگدانه تاثیر مشهودتری بر مقاومت فشاری دارد این مساله می‌تواند به این دلیل باشد که در مقاومت‌های بالاتر حاصل شده، اختلاف‌ها مشهودتر شده و نمود بیشتری پیدا می‌کند چه این که در سایر نوع سنگدانه‌ها اثر توزیع سنگدانه تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری ندارد. بنابراین به منظور شفاف‌تر شدن این مساله لازم است تحقیقی در این راستا بر روی ملات‌های پر مقاومت صورت گیرد و اثر توزیع سنگدانه در آن‌ها بررسی شود اما بر خلاف اثر توزیع‌های تصادفی مختلف، شکل سنگدانه تاثیر مشخص و ملموسی بر مقاومت فشاری ملات دارد به طوری که مقاومت فشاری نمونه‌های مدل شده با سنگدانه دایروی با اختلاف قابل ملاحظه‌ای از نمونه‌های مدل شده با سایر سنگدانه‌ها بیشتر است، این اختلاف در بیشترین حالت به نزدیک ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. همانطور که از روند مقاومت‌های فشاری برمی‌آید مدل‌های ملات با سنگدانه‌های مربعی کمترین مقاومت‌ها را به خود اختصاص داده‌اند، بنابراین هرچه شکل سنگدانه در نظر گرفته شده به دایروی نزدیک‌تر باشد، مقاومت فشاری کسب شده بالاتر است.

جدول ۱. مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال

	توزیع ۳	توزیع ۲	توزیع ۱
دایروی	۵۲/۶۰	۵۰/۱۴	۵۵/۶۴
شش ضلعی	۴۶/۹۷	۴۴/۶۱	۴۵/۷۲
مربعی	۴۰/۴۸	۴۰/۱۱	۴۱/۳۷

۴. نتیجه گیری

- این تحقیق در مقیاس میانی، که در آن ملات ناهمگن فرض می‌شود و چسب سیمان جدا از سنگ‌دانه‌ها مدل می‌شود، به مدل سازی اجزای محدود ملات سیمانی در سه حالت توزیع تصادفی سنگ‌دانه و سه شکل مختلف سنگ‌دانه پرداخته است. مکعب ملات مدل شده تحت بار فشاری به صورت کرنش کنترل قرار گرفته و نتایج زیر از آن حاصل گردیده است:
- در تمام ۹ حالت بررسی شده، الگوی صحیح خرابی تشکیل شده است.
 - مدل اجزای محدود استفاده شده در این تحقیق، نتایج سایر محققین را با دقت بالایی نتیجه می‌دهد.
 - در توزیع یکسان شکل سنگ‌دانه‌ها بر الگوی خرابی فشاری تشکیل شده تاثیر قابل توجهی می‌گذراند، بنابراین شکل، یک پارامتر موثر بر تشکیل این الگو محسوب می‌شود.
 - برخلاف شکل سنگ‌دانه‌ها، نحوه توزیع آن‌ها تاثیر قابل توجهی بر الگوهای خرابی فشاری ندارند و می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد.
 - نحوه توزیع سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت فشاری ملات مدل شده تاثیر چندانی ندارد. البته این مساله در ملات‌ها پر مقاومت محل بحث می‌باشد.
 - مقاومت فشاری ملات، متاثر از نوع سنگ‌دانه‌ها می‌باشد و این تاثیر قابل توجه -در این تحقیق- در بیشترین اختلاف، به تفاوت نزدیک به ۱۵ مگاپاسکال نیز می‌رسد.
 - هر چه شکل سنگ‌دانه‌های استفاده شده در ملات به دایروی نزدیک‌تر باشند، مقاومت فشاری ملات مورد نظر بیشتر خواهد بود.

۵. مراجع

1. Arbogast, T., et al., *A multiscale mortar mixed finite element method*. Multiscale Modeling & Simulation, 2007. **6**(1): p. 319-346.
2. Maekawa, K., T. Ishida, and T. Kishi, *Multi-scale modeling of concrete performance*. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003. **1**(2): p. 91-126.
3. Nguyen, V.P., M. Stroeve, and L.J. Sluys, *Multiscale failure modeling of concrete: micromechanical modeling, discontinuous homogenization and parallel computations*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011. **201**: p. 139-156.
4. Rupasinghe, M., et al., *Compressive strength prediction of nano-silica incorporated cement systems based on a multiscale approach*. Materials & Design, 2017. **115**: p. 379-392.
5. Lee, J. and G.L. Fenves, *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. Journal of engineering mechanics, 1998. **124**(8): p. 892-900.
6. Abyaneh, S.D., H. Wong, and N. Buenfeld, *Modelling the diffusivity of mortar and concrete using a three-dimensional mesostructure with several aggregate shapes*. Computational Materials Science, 2013. **78**: p. 63-73.



7. Arasan, S., A.S. Hasiloglu, and S. Akbulut, *Shape properties of natural and crushed aggregate using image analysis*. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2010. **1**(2): p. 221.
8. Kwan, A. and C. Mora, *Effects of various, shape parameters on packing of aggregate particles*. Magazine of concrete Research, 2002.
9. Liu, L., et al., *Aggregate shape effect on the diffusivity of mortar: a 3D numerical investigation by random packing models of ellipsoidal particles and of convex polyhedral particles*. Computers & structures, 2014. **144**: p. 40-51.
10. Qian, Z., et al., *Anm: a geometrical model for the composite structure of mortar and concrete using real-shape particles*. Materials and Structures, 2016. **49**(1-2): p. 149-158.
11. Chen, H., et al., *Behavior of meso-scale heterogeneous concrete under uniaxial tensile and compressive loadings*. Construction and Building Materials, 2018. **178**: p. 418-431.
12. Tysmans, T., et al., *Finite element modelling of the biaxial behaviour of high-performance fibre-reinforced cement composites (HPFRCC) using Concrete Damaged Plasticity*. Finite Elements in Analysis and Design, 2015. **100**: p. 47-53.
13. Das, S., et al., *Simulating the Fracture of Notched Mortar Beams through Extended Finite-Element Method and Peridynamics*. Journal of Engineering Mechanics, 2019. **145**(7): p. 04019049.
14. Grassl, P., H.S. Wong, and N.R. Buenfeld, *Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar*. Cement and concrete research, 2010. **40**(1): p. 85-93.