

اثر شکل سنگدانه بر رفتار آسیب پلاستیک ملات سیمان تحت بارهای فشاری و کششی

حمید اسکندری نداف^{۱*}، سعید امیرخانی^۲

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

⋮

چکیده

مدل‌سازی مزو به عنوان یک رویکرد مفید به منظور بررسی رفتار غیر خطی مواد سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ملات سیمان به عنوان یک ماده‌ی کامپوزیت متشکل از دو فاز اصلی خمیر سیمان و سنگدانه است. از این رو سهم هر یک از این دو فاز تحت تاثیر سه نوع شکل سنگدانه متفاوت: دایره‌ای، مربعی و پنج‌ضلعی بر رفتار مقاومتی ملات سیمان مورد بررسی قرار گرفته است. مدل کوپل پلاستیک-آسیب به منظور شبیه‌سازی مقیاس مزو انجام گرفته است که در آن سنگدانه‌ها و خمیر سیمان به ترتیب در غالب خواص الاستیک خطی و پلاستیک تحت بارهای فشاری و کششی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین تنش فشاری قابل تحمل به ترتیب برای سنگدانه‌های با شکل دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مربعی بدست آمده است، در حالی که این روند برای تنش کششی معکوس است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مقیاس مزو، ملات سیمان، شکل سنگدانه، بارهای فشاری و کششی.

۱- مقدمه

مواد تشکیل دهنده‌ی ملات سیمان شامل؛ سیمان، ریزدانه و آب است که از دو فاز خمیر سیمان و ریزدانه تشکیل شده است. با تغییر نسبت مواد تشکیل دهنده‌ی ملات سیمان، میزان مقاومت نیز تغییر می‌کند. برای تعیین مقاومت ملات سیمان می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی استفاده کرد اما روش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و وقت‌گیر هستند، برای رفع این مشکل می‌توان برای بررسی مقاومت و سایر پارامترها از روش‌های مدل‌سازی عددی استفاده کرد. روش‌های متفاوت و نرم افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی عددی وجود دارد، به طور کلی مدل‌سازی عددی در سه مقیاس میکرو 10^{-4} تا 10^{-7} ، مزو 10^{-4} تا 10^{-4} و ماکرو (۴-۳ برابر بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه) انجام می‌گیرد [۱، ۲]. در مقیاس ماکرو، بتن یا ملات سیمان به عنوان یک ماده‌ی همگن و یک‌پارچه فرض می‌شود اما در مقیاس مزو ملات سیمان به صورت یک ماده‌ی کامپوزیتی که از فازهای مختلفی تشکیل شده است در نظر گرفته می‌شود. در اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی طراحی‌های ساختاری و مطالعات عددی رفتار غیر خطی برای مدل‌سازی در مقیاس ماکرو استفاده شده است [۳]. برای بررسی تاثیر فازها بر مقاومت ملات سیمان به صورت جداگانه از مقیاس مزو باید استفاده کرد زیرا این مقیاس ارتباط بین ریزساختارها را بهتر توصیف می‌کند. در مقیاس مزو، محل شروع آسیب و رشد ترک‌ها به سبب توزیع سنگدانه‌ها و مقاومت هر فاز به طور جداگانه بستگی دارد [۴].

هدف ما در این تحقیق بررسی تاثیر شکل سنگدانه‌ها در ملات سیمان می‌باشد که از یک مدل با مقیاس مزو برای تحلیل فازها به صورت جداگانه استفاده شده است. در این مقاله تاثیر سه شکل سنگدانه‌ی، دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مربعی بر

مقاومت ملات سیمان توسط مدل دو بعدی که تحت نیروی فشاری و کششی قرار گرفته بررسی شده است. برای شبیه‌سازی غیر استاتیکی و رفتار آسیب ملات سیمان از مدل کوپل پلاستیک-آسیب در نرم افزار آباکوس استفاده شده است [۵-۹]. در آنالیز مقیاس مزو ملات سیمان به دلیل مقاومت کمتر نسبت به سنگدانه نقش مهم‌تری دارد، بنابراین در مدل‌سازی، خواص پلاستیک به ملات سیمان اختصاص داده شده است. علاوه بر این به دلیل رفتار شکننده‌تر، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بالاتر سنگدانه نسبت به ملات سیمان، سنگدانه به صورت ماده الاستیک خطی مدل شده است [۴، ۱۰].

۲- مدل آسیب پلاستیکی برای ملات سیمان

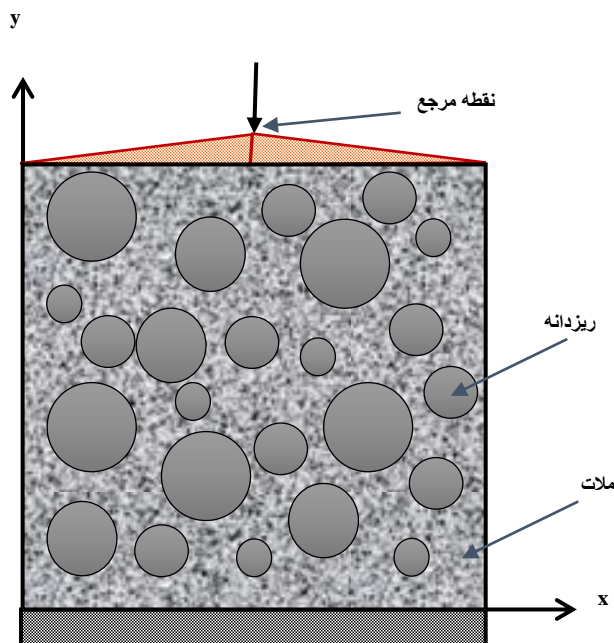
از آن جایی که ترک‌ها و تغییرشکل‌های برگشت ناپذیر به طور مشترک در واکنش‌های غیر خطی ملات تاثیر می‌گذارند پس باید برای تحلیل یک نمونه‌ی ملات از دو حالت فیزیکی جدا از هم استفاده کرد. به این منظور، از مدل کوپل پلاستیک-آسیب در نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود [۵-۹، ۱۱].

این مدل برای باز تولید شکست که بر اساس ترک خوردگی کششی و خورد شدگی فشاری می‌باشد، بسیار مناسب است. در این تحقیق برای اندازه‌گیری اثرات مختلف بارهای فشاری و کششی از دو معیار آسیب فشاری و کششی استفاده شده است، همچنین سنگدانه‌های مدل شده در ملات سیمان به عنوان یک ماده‌ی الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود و از اختصاص کوپل پلاستیک-آسیب به آن‌ها صرف نظر شده است. اما برای ملات سیمان علاوه بر خواص الاستیک، کوپل پلاستیک-آسیب در هر دو نوع فشاری و کششی برای آن تعریف شده است به طوری که آسیب فشاری و کششی به طور مستقل مشخص شود. مدل کوپل پلاستیک-آسیب در برابر بارهای تک محوره عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد اما برای تنش‌های فشاری سه بعدی قابل استفاده نیست. بنابراین در این مقاله نیز از یک مدل دو بعدی برای تشریح رفتار ملات به صورت کامپوزیتی استفاده شده است. از الگوریتم عددی برای اجرای مدل پیشنهادی در قسمت کد سابروتین *UMAT* در نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

۱-۲- شرایط مرزی

در این مدل‌سازی از یک چهار ضلعی مربعی شکل در ابعاد 10×10 میلی‌متر برای سه نوع مدل ساخته شده با شکل سنگدانه‌های متفاوت از هم استفاده شده است. در هر سه نمونه مساحت سنگ دانه‌ها تقریباً با هم برابر گرفته شده است و اختلاف ناچیز آن نیز به دلیل تبدیل سنگدانه‌های دایره‌ای به مربعی و پنج ضلعی می‌باشد. در این مدل سنگدانه‌ها در یک مکان مشابه قرار گرفته‌اند تا نتایج بدست آمده از دقت کافی برخوردار باشد. همچنین خواص سنگدانه‌ها در هر سه مدل شبیه‌سازی شده یکسان در نظر گرفته شده است.

در این شبیه‌سازی انحراف جانبی نمونه محدود شده است و همچنین لایه‌ی پایینی نمونه نیز در جهات *UX* و *UY* مقید شده است. در لایه‌ی بالایی یک نقطه‌ی مرجع به فاصله‌ی ۵ میلی‌متر از سطح بالای نمونه تعریف شده است و این نقطه مرجع در کل سطح بالایی کوپل شده است (شکل ۱). در این شبیه‌سازی از روش کنترل جابه‌جایی استفاده شده است.



شکل ۱: شرایط مرزی برای مدل ملات سیمان

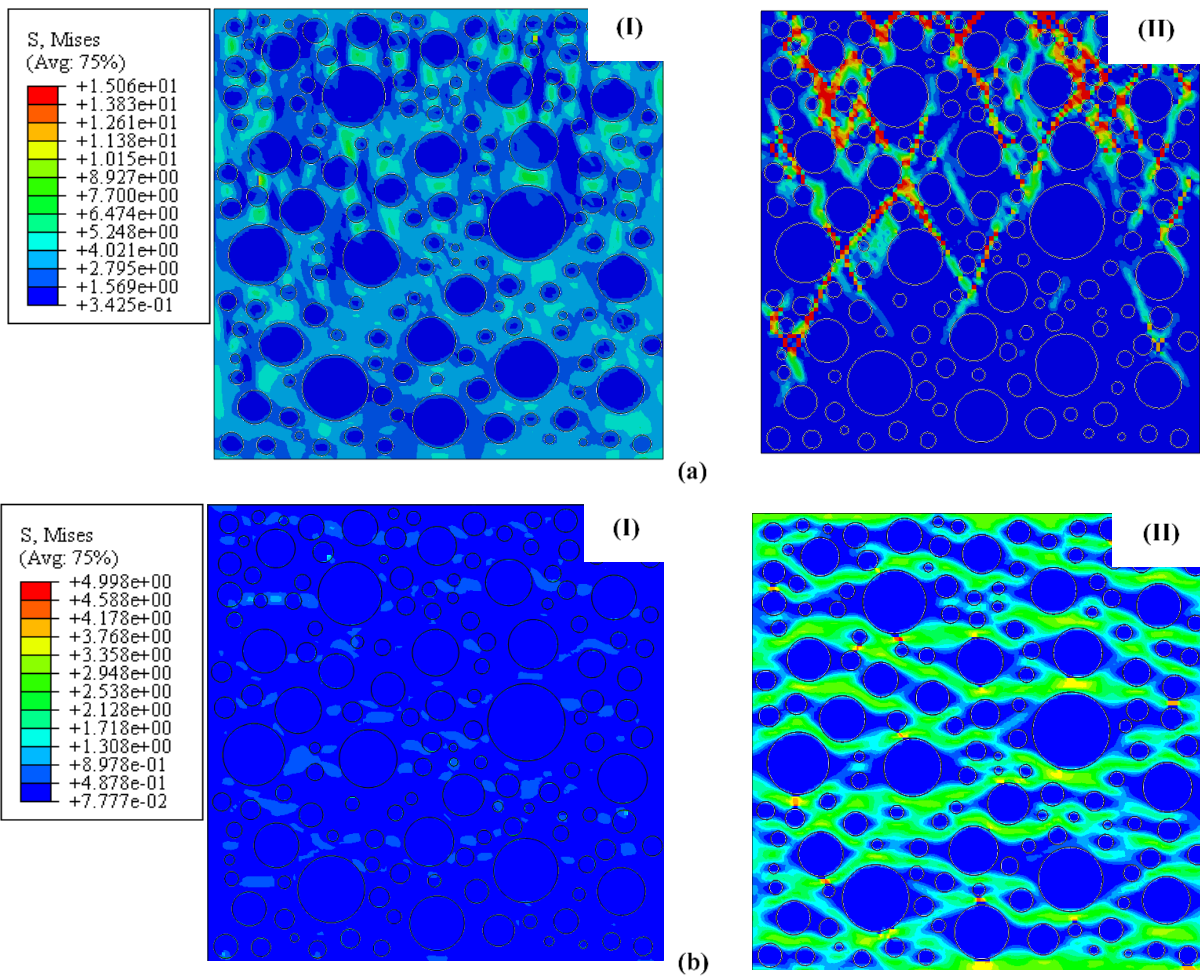
۳- اثر شکل سنگدانه در مقیاس مزو

شکل‌های ۲-۴ اثر شکل‌های مختلف سنگدانه را در قالب سه شکل دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مربعی به منظور بررسی پاسخ تنش و میزان آسیب وارد بر نمونه ملات سیمان تحت فشار و کشش تحت مدل کوپل پلاستیک-آسیب توسط نرم افزار آباکوس نشان می‌دهد. اثر میزان تنش و آسیب در نمونه ملات سیمان با سنگدانه دایره‌ای تحت فشار در شکل ۲a(I-II) نشان داده شده است از شکل ۲a(I) مشاهده می‌شود حداکثر تنش فشاری قابل تحمل توسط نمونه‌ی با سنگدانه‌های دایره‌ای ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار برای نمونه‌ی ملات سیمان با سنگدانه‌های پنج‌ضلعی و مربعی به ترتیب برابر ۱۴/۷ مگاپاسکال و ۱۲/۸ مگاپاسکال می‌باشد. شکل‌های ۳a(I)-۴a(I) همانطور که مشاهده می‌شود، سنگدانه‌های دایره-ای تحت فشار، مقاومت بیشتری در مقایسه با سنگدانه‌های پنج‌ضلعی و سنگدانه‌ی مربعی مقاومت بیشتری نسبت به سنگدانه‌ی مربعی دارد. این امر به دلیل پدیده‌ی افزایش تمرکز تنش در لبه‌های سنگدانه‌های مربعی و پنج‌ضلعی می‌باشد این نتایج گرفته شده با مطالعات انجام شده روی نمونه‌ی بتنی هم‌خوانی دارد [۴, ۱۲].

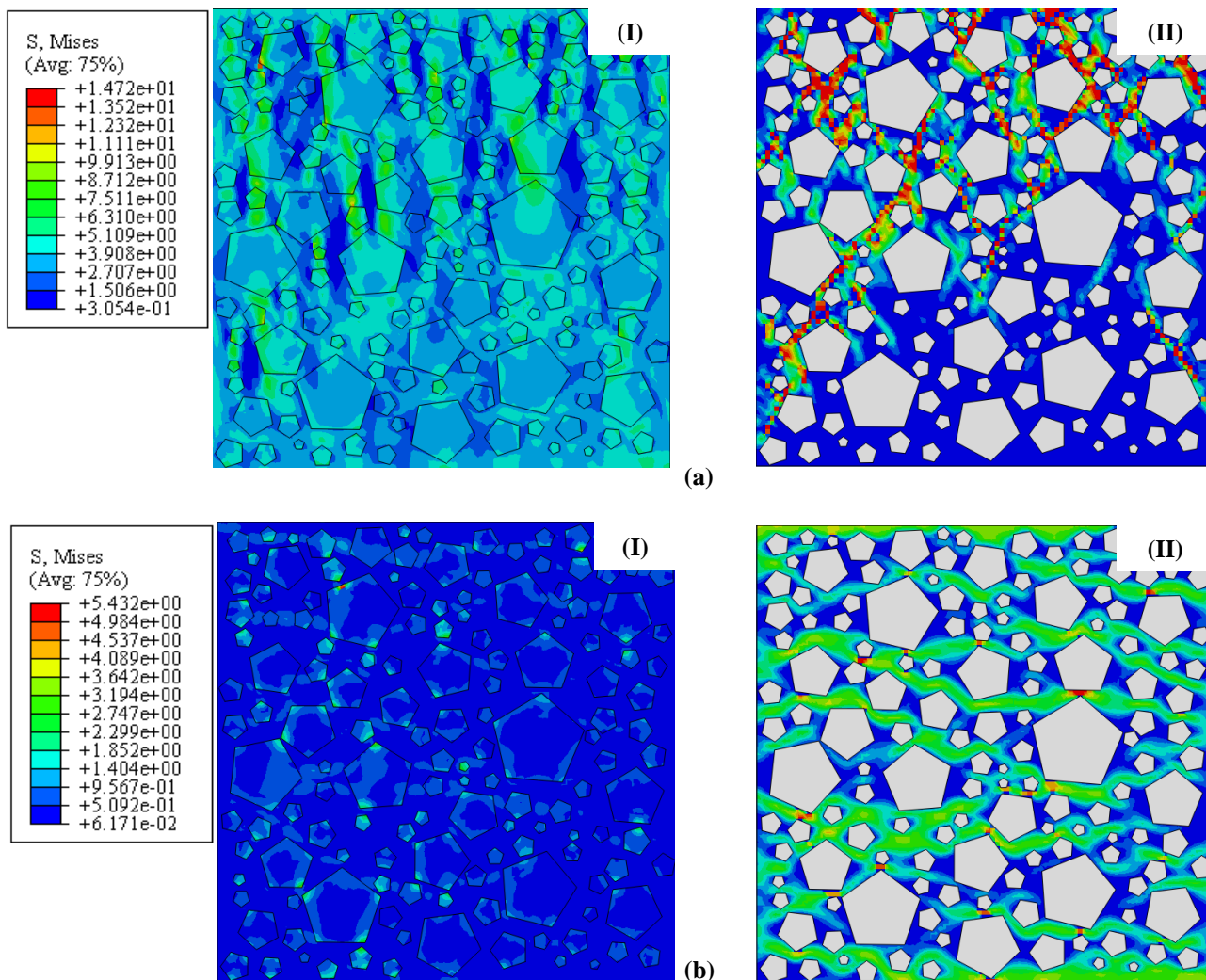
همچنین مطابق شکل‌های ۲b(I)-۴b(I) حداکثر تنش کششی قابل تحمل با سنگدانه‌ی دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مربعی به ترتیب برابر با ۵، ۵/۴ و ۶/۶ می‌باشد، که می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌ی ملات تحت کشش هر چه سنگدانه‌ها تیز گوشه‌تر باشند ملات سیمان مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد، بنابراین مقاومت سنگدانه‌ی مربعی در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر بیشتر است ..

همانطور که مشاهده می‌شود تغییر شکل سنگدانه در مقاومت نهایی ملات سیمان اثر ضعیفی دارد و مقاومت سنگدانه‌ی دایره-ای در حالت فشاری تنها ۱۴ درصد بیشتر از مقاومت سنگدانه‌ی مربعی است و در حالت کششی اختلاف بیشترین و کمترین نوع سنگدانه ۲۴ درصد است.

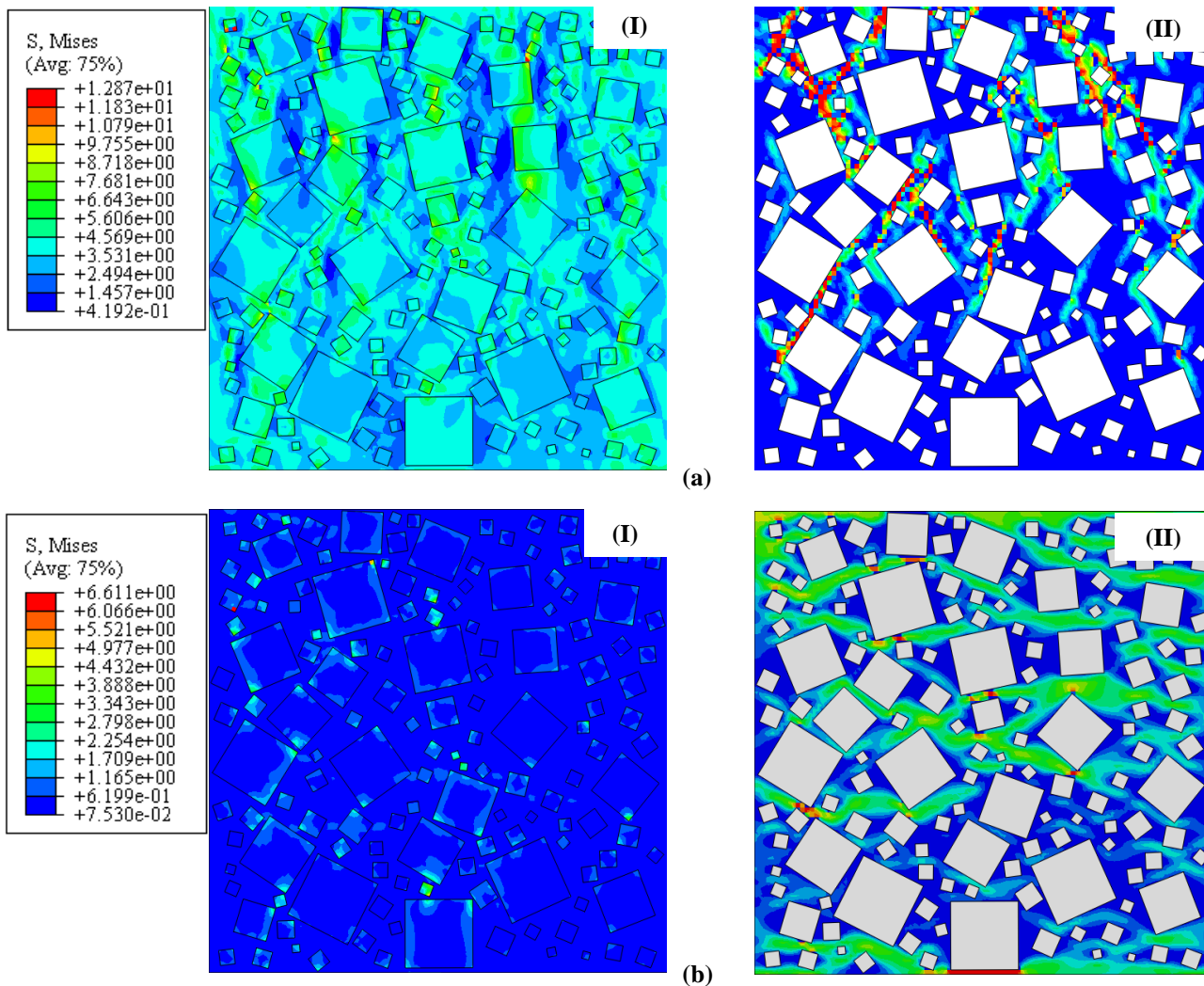
از شکل‌های آسیب پلاستیک ۲a(II)-۴a(II) و ۲b(II)-۴b(II) می‌توان دریافت که در تمامی شکل‌ها، آسیب پلاستیک در نواحی مصالح که به آن خواص پلاستیک اختصاص داده شده که دارای ساختار ریزی است رخ می‌دهد و در نواحی پر مقاومت با مدول الاستیسیته‌ی بالا مانند سنگدانه‌ها این آسیب کم می‌شود، بنابراین می‌توان با بررسی پارامترهای ریزساختار که امکان رخ دادن آسیب در آن بیشتر است، میزان ترک خوردگی در بتن را کاهش داد.



شکل ۲: مدل سازی نمونه با سنگدانه دایره ای در (a) فشار و (b) کشش تحت (I) تنش (II) آسیب پلاستیک.



شکل ۳: مدل سازی نمونه با سنگدانه پنج ضلعی در (a) فشار و (b) کشش تحت (I) تنش (II) آسیب پلاستیک.



شکل ۴: مدل سازی نمونه با سنگدانه مربعی در (a) فشار و (b) کشش تحت (I) تنش (II) آسیب پلاستیک.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر شکل سنگدانه ها در نمونه‌ی ملات سیمان تحت جابه‌جایی کنترل شده‌ی فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفته شد و حداکثر تنش‌های ایجاد شده در هر سه مدل سنگدانه دایره‌ای، پنج‌ضلعی و مربعی بحث شد. نتایج بدست آمده نشان داد به علت افزایش تمرکز تنش در سنگدانه‌ای مربعی و پنج‌ضلعی، مقاومت فشاری سنگدانه‌های دایره‌ای در مقایسه با دیگر سنگدانه‌ها بیشتر می‌باشد، بنابراین استفاده از سنگدانه‌های دایره‌ای در ملات ارزشمندتر است. اما در حالت کششی بر خلاف حالت فشاری سنگدانه‌ی مربعی مقاومت بیشتری نسبت به سنگدانه‌ی دایره‌ای و مربعی دارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سنگدانه‌ی تیز گوشه و نا منظم در حالت کششی مقاومت ملات را افزایش می‌دهد.

مراجع

1. Wittmann, F., et al., *Simulation and analysis of composite structures*. 1985. 68(2): p. 239-248.
2. béton, C.e.-i.d., *CEB-FIP model code 1990: Design code*. 1993: Telford.
3. Habbitt, D., B. Karlsson, and P.J.H. Sorensen, Karlsson, Sorensen Inc, *ABAQUS analysis user's manual*.

4. Kim, S.-M., R.K.A.J.C. Al-Rub, and C. Research, *Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites*. 2011. **41**(3): p. 339-358.
5. Cicekli, U., G.Z. Voyiadjis, and R.K.A.J.I.J.o.p. Al-Rub, *A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete*. 2007. **23**(10-11): p. 1874-1900.
6. Lubliner, J., et al., *A plastic-damage model for concrete*. 1989. **25**(3): p. 299-326.
7. Du, X., L. Jin, and G.J.I.J.o.I.E. Ma, *Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale*. 2014. **66**: p. 5-17.
8. Lima, M.M., et al., *The effects of CFRP orientation on the strengthening of reinforced concrete structures*. 2016. **25**(15): p. 759-784.
9. Aref, A.J., K.M.J.C. Dolatshahi, and Structures, *A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures*. 2013. **120**: p. 9-23.
10. Lee, J. and G.L.J.J.o.e.m. Fenves, *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. 1998. **124**(8): p. 892-900.
11. Al-Rub, R.K.A. and S.-M.J.E.F.M. Kim, *Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture*. 2010. **77**(10): p. 1577-1603.
12. Du, C.-B. and L.-G.J.J.o.A.E. Sun, *Numerical simulation of aggregate shapes of two-dimensional concrete and its application*. 2007. **20**(3): p. 172-178.