



تاثیر توزیع تصادفی سنگدانه بر رفتار فشاری بتن مبتنی بر شبیه‌سازی عددی به روش مونت کارلو

بهزاد نظام‌دوست^۱، علی‌اصغر صادقی^{۲*}، حمید اسکندری نداف^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت ساخت، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

خلاصه

در این پژوهش، اثرات درصد‌های مختلف توزیع سنگدانه بر روی مقاومت فشاری اسمی بتن با استفاده از شبیه‌سازی فشاری تک محوری مبتنی بر مدل سازی تصادفی مونت کارلو بررسی گردیده است. ابتدا یک مدل تصادفی سه فازی در مقیاس مزو متشکل از ساختار ملات بتن، سنگدانه‌های درشت و ریز ارائه شده است. شبیه‌سازی عددی با در نظر گرفتن اندازه نمونه و اندازه سنگدانه‌های درشت و ریز بر روی مقاومت فشاری اسمی بتن و فرمول‌های مربوطه ارائه شده است که در این مدل، برای سنگدانه‌ها و خمیر سیمان به ترتیب خواص الاستیک خطی و پلاستیک در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد، الگوی شکست برای توزیع‌های مختلف سنگدانه درشت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد متفاوت می‌باشد. با این حال، بیشینه میزان آسیب فشاری برای هر سه توزیع سنگدانه برابر ۰.۹۸۶ می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش درصد درشت‌دانه میزان تمرکز تنش به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، ترکیب دانه‌بندی حاوی ۵۰ درصد درشت‌دانه و ۵۰ درصد ریزدانه به عنوان توزیع بهینه جهت کاهش میزان تنش‌های وارده در مخلوط بتن حاصل شد.

کلمات کلیدی: مونت کارلو، مقاومت فشاری بتن، توزیع تصادفی سنگدانه، مقیاس مزو، آسیب پلاستیک.

۱. مقدمه

بتن یک ماده مرکب متشکل از سنگ دانه‌های درشت، سنگ دانه‌های ریز، ملات بتن، ترک‌ها و حفرات و عوامل دیگر است. بسیاری از محققان مطالعات گسترده‌ای در زمینه بتن انجام داده‌اند [۳-۱]. با این حال، تحقیقات قبلی خواص مکانیکی در مقیاس ماکرو انجام شده است و ساختار پیچیده درون بتن را نادیده گرفته است. از این رو، آشکار کردن مکانیزم‌های فیزیکی تغییر شکل و تخریب، به ویژه به هنگام در نظر گرفتن تاثیر عوامل سطح میکرو بر خواص مکانیکی مانند توزیع تصادفی سنگدانه‌ها در ساختار بتن دشوار است. مدل میکرو که توسط بازانت [۴-۶] پیشنهاد شده بود، رفتار ارتجاعی بتن را از روابط تنش-کرنش تعدادی از صفحات میکرو در ساختار درونی بتن (سطوح تماس مابین ذرات سنگدانه) استنتاج شده است. با این حال، مدل بازانت از پیچیدگی خاصی برخوردار بود، به طوری که کالیبراسیون پارامترها در این مدل دشوار بود.

* Corresponding author: Ali Asghar Sadeghi
Email: A.sadeghi@hsu.ac.ir



و شکل واقعی، اندازه، قابلیت ارتجاعی و شکست احتمالی ذرات سنگ دانه‌ها را در نظر نگرفته بود. گارسون [۷] مدلی را ایجاد کرد که ویژگی‌های مزو مواد را منعکس می‌کرد اما بر روی توصیف رفتار مکانیکی مواد فلزی متخلخل متمرکز بود. مدل توزیع تصادفی توسط وانگ [۸] بهبود یافت. ساختار مزو ایجاد شده توسط روش شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو و ساختار واقعی بتن به طور مشابه یک مدل آماری بود. هر چه سهولت و قابلیت اجرایی در تحقق برنامه توزیع تصادفی سنگدانه‌ها گسترده‌تر شود، کاربرد تجزیه و تحلیل در سطح مزو و میکرو اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. لیو و همکاران [۹] مدل توزیع تصادفی فرآیند شکست تحت کشش یک طرفه را شبیه‌سازی کرده و نتایج نزدیک به منحنی نرم شدگی شکست در آزمایش‌ها را بدست آوردند.

با وجود مطالعات صورت گرفته در این زمینه، هنوز اطلاعات کافی در رابطه با رفتار فازهای متخلخل تشکیل دهنده مخلوط بتن در سطح مزو و میکرو در دست محققان وجود ندارد و این امر نیازمند بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر می‌باشد. لذا، در این مطالعه، براساس روش شبیه‌سازی تصادفی مونت کارلو، یک مدل تصادفی سه فازی، متشکل از ملات بتن، سنگدانه‌ها و فاز چسبنده (بین ملات و سنگ دانه) ارائه شده است. در ادامه، شبیه‌سازی عددی با در نظر گرفتن اثرات سطح مقطع سنگدانه‌های درشت و ریز بر مقاومت فشاری بتن در نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. سپس، الگوی رفتار آسیب بتن و تنش‌های وارده به اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل توزیع تصادفی سه فازی

۲-۱. ساخت مدل

بر اساس روش عددی توزیع تصادفی مونت کارلو و معادله ۱ در زیر، با استفاده از منحنی فولر تعیین می‌شود [۲۹]، توزیع تصادفی سنگدانه‌ها با استفاده از برنامه MATLAB بدست آورده شده است، و یک مدل سه فازی بتن، شامل ساختار ملات، سنگ دانه‌ها، باند چسبنده را تشکیل داده است. در این تحقیق، یک ناحیه جامد نازک با ضخامت ۰.۵ میلی متر برای شبیه‌سازی فاز میانی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$P(D < D_0) = P_k \left[1.065 \left(\frac{D_0}{D_{max}} \right)^{0.5} - 0.053 \left(\frac{D_0}{D_{max}} \right)^4 - 0.012 \left(\frac{D_0}{D_{max}} \right)^6 - 0.0045 \left(\frac{D_0}{D_{max}} \right)^8 - 0.0025 \left(\frac{D_0}{D_{max}} \right)^{10} \right] \quad (1)$$

که P احتمال هر نقطه با قطر $D < D_0$ در مقطع بتن می‌باشد. در اینجا، P_k سطح اشغال شده توسط سنگدانه‌ها (درشت‌دانه و ریزدانه) نسبت به سطح کل بتن می‌باشد که معمولاً در حدود ۷۵ درصد می‌باشد. D اندازه واقعی سنگدانه، D_0 اندازه ذرات سنگدانه‌ها تعریف شده و D_{max} حداکثر اندازه سنگدانه‌ها می‌باشد. در منحنی دانه‌بندی داده شده توسط $P(D)$ ، D اندازه الک و $P(D)$ درصد تجمعی عبور از الک است، سپس مقدار سنگدانه در بازه $[D_S, D_{S+1}]$ برابر است با:

$$A_{agg}[D_S, D_{S+1}] = \frac{P(D_{S+1}) - P(D_S)}{P(D_{max}) - P(D_{min})} \times R_{agg} \times A_{con} \quad (2)$$

که در آن A_{agg} سطح سنگدانه‌ها، R_{agg} درصد مساحت سنگدانه و A_{con} سطح مقطع عرضی بتن می‌باشد. به طور کلی سنگدانه‌ها ۶۰ تا ۸۰ درصد ساختار بتن را تشکیل می‌دهد. سنگدانه‌های درشت با اندازه ذرات بزرگ‌تر از ۲.۳۶ میلی متر در نظر گرفته می‌شود، و دانه‌های ریز با سیمان مخلوط می‌شوند تا یک ملات یکنواخت تشکیل دهند. فرآیند محاسبه توزیع سنگدانه نمونه بتنی که اندازه آن ۵۰ میلی متر است و درصد سنگدانه‌های درشت ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ می‌باشد در زیر نشان داده شده است: از آنجا که حداکثر اندازه دانه‌ها نباید از ۰.۲۵ اندازه مقطع تجاوز کند [۱۰]، در نتیجه با توجه به نمونه‌های با ابعاد ۵۰ میلی‌متر، حداکثر اندازه سنگدانه از ۱۲.۵ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. از آنجا، اندازه کل نمونه با ابعاد ۵۰ میلی‌متر می‌باشد براساس توزیع اندازه سنگدانه در جدول ۱ به دو دامنه [۲.۳۶، ۴.۷۵] و [۴.۷۵، ۹.۵] تقسیم می‌شود. تعداد اندازه ذرات مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ نشان داده شده است. احتمال تجمعی هر اندازه سنگدانه طبق معادله ۱ بدست می‌آید که در جدول ۲ نشان داده شده است.



بنابراین، احتمال سایز هر بخش را می توان بدست آورد:

$$P_C(2.36 < D < 4.75) = 0.562 - 0.397 = 0.165$$

$$P_C(4.75 < D < 9.5) = 0.744 - 0.562 = 0.182$$

$$P_C(2.36 < D < 9.5) = 0.744 - 0.397 = 0.347$$

جدول ۱- توزیع اندازه سنگدانه درشت

سایز الک میلی‌متر	درصد تجمعی عبور کرده
۱۹.۰۰	۱۰۰
۱۲.۷۰	۹۷
۹.۵۰	۶۱
۴.۷۵	۱۰
۲.۳۶	۱۴

جدول ۲- احتمال تجمعی بازه هر سایز سنگدانه

D_0	۲.۳۶	۴.۷۵	۹.۵
$\frac{D_0}{D_{max}}$	۰.۲۴۸	۰.۵	۱
$P_C(D < D_0)$	۰.۳۹۷	۰.۵۶۲	۰.۷۴۴

مطابق معادله ۲ تعداد سنگدانه ها برابر است با:

برای ۳۰٪ درشت‌دانه:

$$A_{agg}[4.75,9.5] = \frac{0.182}{0.347} \times 30\% \times 50^2 = 393 \text{ mm}^2$$

$$n[4.75,9.5] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 9$$

$$A_{agg}[2.36,4.75] = \frac{0.165}{0.347} \times 30\% \times 50^2 = 357 \text{ mm}^2$$

$$n[2.36,4.75] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 32$$

به همین ترتیب برای سایر مقادیر خواهیم داشت:

برای ۴۰٪ درشت‌دانه:

$$n[4.75,9.5] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 13$$

$$n[2.36,4.75] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 43$$

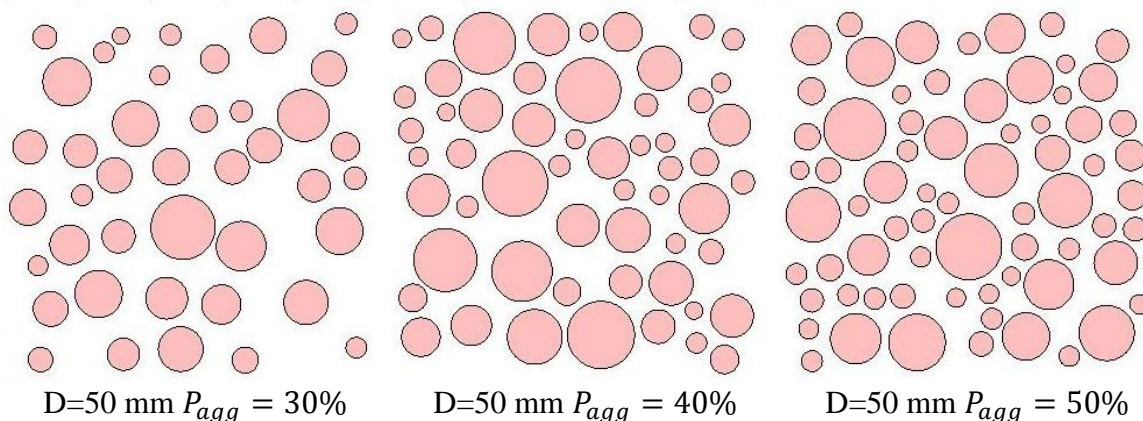
برای ۵۰٪ درشت‌دانه:

$$n[4.75,9.5] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 16$$

$$n[2.36,4.75] = \frac{524.5}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = 53$$



که توزیع سنگ‌دانه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- توزیع سنگدانه برای درصدهای مختلف

۲-۲. شبیه‌سازی در آباکوس

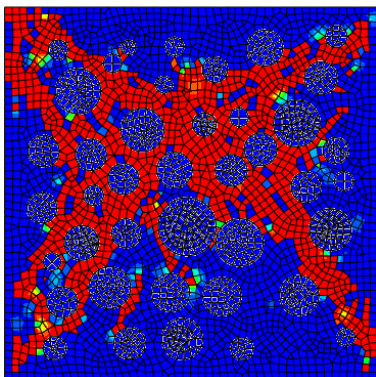
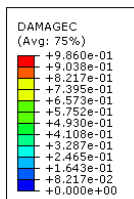
در این پژوهش، یک مدل دوبعدی جهت بررسی رفتار فشاری نمونه مکعبی بتن در نرم افزار آباکوس ارائه شده است. بارگذاری تحت کنترل جابجایی مورد استفاده قرار گرفته و جابجایی یکنواخت به سطح بالایی مدل اعمال شد. در سطح پایینی مدل نیز شرایط مرزی مناسب جهت جلوگیری از جابجایی اضافی اعمال گردید.

از آن جایی که ترکها و تغییرشکل های برگشت ناپذیر به طور مشترک در واکنش های غیر خطی بتن تاثیر می گذارند؛ پس باید برای تحلیل یک نمونه بتن از دو حالت فیزیکی جدا از هم استفاده کرد. بدین منظور، از مدل کوپل پلاستیک آسیب در نرم افزار آباکوس استفاده می شود [۳، ۱۱، ۱۲].

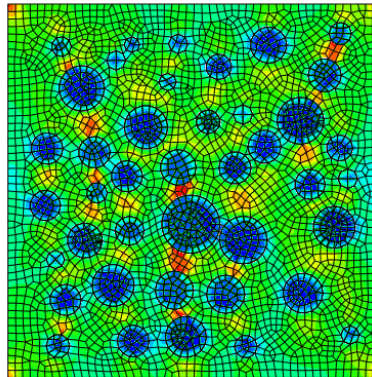
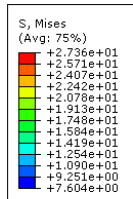
این مدل برای باز تولید شکست که بر اساس ترک خوردگی کششی و خورد شدگی فشاری میباشد، بسیار مناسب است. در این تحقیق، برای اندازه گیری اثرات مختلف بارهای فشاری و کششی از دو معیار آسیب فشاری و کششی استفاده شده است. همچنین سنگدانه‌های مدل شده در ملات بتن به عنوان یک ماده الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود و از اختصاص کوپل پلاستیک-آسیب به آنها صرف نظر شده است. اما برای ملات بتن 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 پژوهش از یک مدل دو بعدی برای تشریح رفتار ملات به صورت کامپوزیتی استفاده شده است. از الگوریتم عددی برای اجرای مدل پیشنهادی از زیرشاخه *UMAT* در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

اشکال ۲-۴ الگوی آسیب فشاری و تنش میز را برای سه نمونه با درصد سنگدانه و توزیع تصادفی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، الگوی شکست برای توزیع های مختلف سنگدانه متفاوت می‌باشد. با این حال، بیشینه میزان آسیب فشاری برای هر سه توزیع سنگدانه برابر ۰.۹۸۶ می‌باشد.

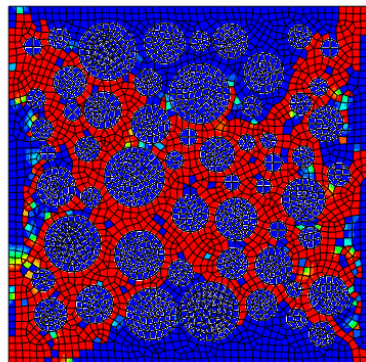
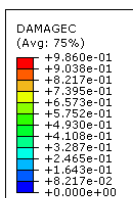


آسیب فشاری نمونه با توزیع $P_{agg} = 30\%$

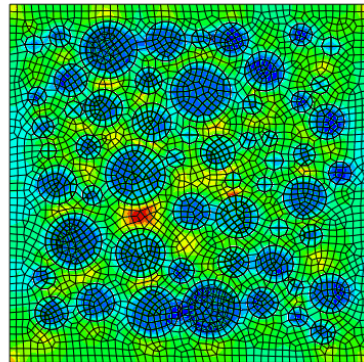
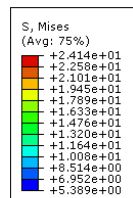


تنش میزز نمونه با توزیع $P_{agg} = 30\%$

شکل ۲- آسیب و تنش میزز $P_{agg} = 30\%$

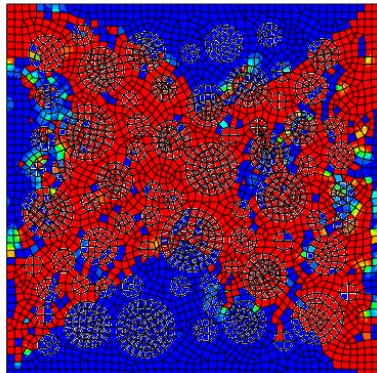
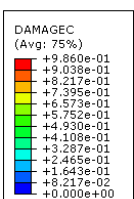


آسیب فشاری نمونه با توزیع $P_{agg} = 40\%$

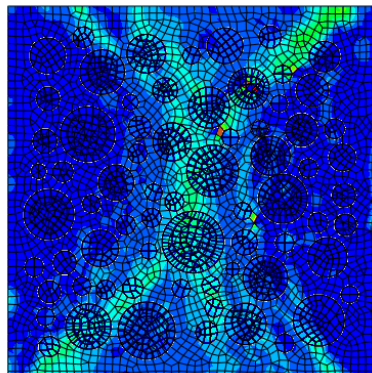
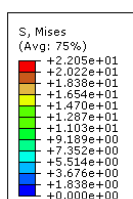


تنش میزز نمونه با توزیع $P_{agg} = 40\%$

شکل ۳- آسیب و تنش میزز $P_{agg} = 40\%$



آسیب فشاری نمونه با توزیع $P_{agg} = 50\%$



تنش میزز نمونه با توزیع $P_{agg} = 50\%$

شکل ۴- آسیب و تنش میزز $P_{agg} = 50\%$



در اشکال ۲-۴ همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان درصد سنگدانه درشت، الگوی آسیب فشاری گسترش می‌یابد که این امر می‌تواند به علت بیشتر بودن مدول الاستیسیته سنگدانه نسبت به ملات بتن باشد؛ بدین صورت که با افزایش تعداد سنگدانه در مخلوط بتن، بارهای وارده بیشتر توسط ملات بتن تحمل می‌شود که این امر منجر به تخریب بیشتر این فاز می‌گردد. مطالعه چن و همکاران [۱۳] نیز این امر را تایید می‌نماید. بنابراین، می‌توان با بررسی پارامترهای ریزساختار که امکان رخ دادن آسیب در آن بیشتر است، میزان ترک خوردگی در بتن را کاهش داد.

با بررسی الگوی تنش میز در اشکال ۲-۴ می‌توان مشاهده کرد که میزان تمرکز تنش در توزیع حاوی ۳۰ درصد درشت‌دانه و ۷۰ درصد ریزدانه دارای بیشترین مقدار و در حدود ۲۷ مگاپاسکال می‌باشد. درحالی‌که، با افزایش تدریجی توزیع درشت‌دانه و کاهش میزان ریزدانه، میزان تمرکز تنش کاهش می‌یابد؛ به طوری که برای توزیع‌های درشت‌دانه ۴۰ و ۵۰ درصد، به ترتیب برابر ۲۴ و ۲۲ مگاپاسکال می‌باشد. در نتیجه، می‌توان دریافت که توزیع سنگدانه ۵۰ درصد درشت‌دانه و ۵۰ درصد ریزدانه می‌تواند دانه‌بندی مناسب‌تری جهت کاهش میزان تنش‌های وارده در مخلوط بتن باشد.

۴. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- الگوی شکست برای توزیع‌های مختلف سنگدانه درشت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد متفاوت می‌باشد. با این حال، بیشینه میزان آسیب فشاری برای هر سه توزیع سنگدانه برابر ۰.۹۸۶ می‌باشد.
- ۲- میزان تمرکز تنش با افزایش درصد درشت‌دانه میزان تمرکز تنش از ۲۷ به ۲۲ مگاپاسکال به تدریج کاهش می‌یابد.
- ۳- ترکیب دانه‌بندی حاوی ۵۰ درصد درشت‌دانه و ۵۰ درصد ریزدانه به عنوان توزیع بهینه جهت کاهش میزان تنش‌های وارده در مخلوط بتن می‌باشد.

مراجع

1. Popovics, S., *A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete*. Cement and concrete research, 1973. **3**(5): p. 583-599.
2. Mehta, P.K., *Concrete. Structure, properties and materials*. 1986.
3. Lubliner, J., et al., *A plastic-damage model for concrete*. International Journal of solids and structures, 1989. **25**(3): p. 299-326.
4. Bažant, Z.P., *Nonlocal damage theory based on micromechanics of crack interactions*. Journal of engineering mechanics, 1994. **120**(3): p. 593-617.
5. Bažant, Z.P. and B.H. Oh, *Microplane model for progressive fracture of concrete and rock*. Journal of Engineering Mechanics, 1985. **111**(4): p. 559-582.
6. Bažant, Z.P. and T.-P. Chang, *Nonlocal finite element analysis of strain-softening solids*. Journal of engineering mechanics, 1987. **113**(1): p. 89-105.
7. Gurson, A.L., *Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media*. 1977.
8. Wang, Z., A. Kwan, and H. Chan, *Mesosopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh*. Computers & structures, 1999. **70**(5): p. 533-544.
9. Guangting, L. and W. Zongmin, *Numerical simulation study of fracture of concrete materials using random aggregate model [J]*. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1996. **1**.



10. MOHURD, *Code for Design of Concrete Structures (GB 50010–2010)*. 2010, China Architecture and Building Press Beijing, PR China.
11. Eskandari, H. and A. Madadi, *Investigation of ferrocement channels using experimental and finite element analysis*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2015. **18**(4): p. 769-775.
12. Madadi, A., H. Eskandari-Naddaf, and M. Gharouni-Nik, *Lightweight ferrocement matrix compressive behavior: experiments versus finite element analysis*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017. **42**(9): p. 4001-4013.
13. Chen, C., et al., *The multi-factor effect of tensile strength of concrete in numerical simulation based on the Monte Carlo random aggregate distribution*. Construction and Building Materials, 2018. **165**: p. 585-595.