

تأثیر مدلسازی ۳ بعدی در محاسبه پارامترهای شکست بتن

علی پرمون

دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

امیر هوشنگ اخویسی*

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی-عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

چکیده

مسئله‌ی شکست همه ساله هزینه‌ی مالی و جانی بسیاری برای جوامع گوناگون به بار می‌آورد. از اوایل قرن بیستم، نگاه علمی به این مسئله آغاز شد. از این رو بررسی مسئله شکست در مواد مختلف از جمله بتن، که یکی از پرکاربردترین مواد در صنعت ساخت و ساز می‌باشد امری ضروری به نظر می‌رسد. برای تحلیل سازه‌های بتنی در مقیاس ماکرو فرض می‌شود بتن یک ماده همگن است، در صورتیکه در واقعیت بتن شامل اجزا مختلفی مانند خمیر سیمان، شن، ماسه و هوا می‌باشد که وجود این اجزا در تعیین رفتار بتن حائز اهمیت است. بنابراین در این بررسی برای محاسبه پارامترهای شکست بتن، خمیر سیمان و ۴ سازه مختلف سنگدانه مدل‌سازی شد تا بتوان تأثیر وجود سنگدانه‌ها در داخل خمیر سیمان بررسی گردد. با توجه به توزیع اتفاقی سنگدانه‌ها در خمیر سیمان، ۱۰۰ نوع مختلف توزیع سنگدانه در خمیر سیمان مدل‌سازی شد تا محدود و وسیعی از پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با بررسی نتایج ۱۰۰ نمونه عددی تیر خمشی تحت آزمایش سه نقطه، بر خلاف انتظار که تحت این آزمایش فقط باید ضریب شکست مود اول ایجاد شود به علت توزیع سنگدانه‌ها ضرایب شکست مود دوم و سوم نیز ایجاد شد، مقدار این مودها احتمالاً به شکل سنگدانه‌ها و محل قرارگیری آنها وابسته می‌باشد. وجود هر سه مود شکست، توزیع نرخ‌های انرژی را در ضخامت از حالت یکنواخت خارج کرده، که می‌تواند باعث شکست زود هنگام نمونه گردد.

واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست الاستیک خطی، اجزای محدود، مودهای شکست، مقیاس مزو.

* نویسنده مسئول: Ahakhaveissy@razi.ac.ir

۱- مقدمه

شود به علت توزیع سنگدانه‌ها ضرایب شکست مود دوم و سوم نیز ایجاد شد، بنظر می‌رسد برای مصالح غیر همگن همانند بتن نباید از مدل‌های همگن برای محاسبه ضریب شدت تنش استفاده کرد و در نظر گرفتن ناهمگنی برای بدست آوردن پارامترهای شکست امری ضروری می‌باشد.

۲- مشخصات مکانیکی و هندسه مدل آزمایشگاهی

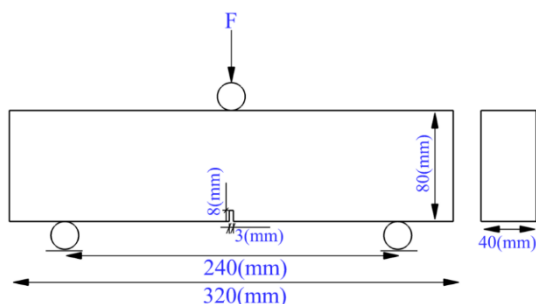
در این بررسی از مشخصات مدل آزمایشگاهی اسکرانسکی و همکاران [۱۳] استفاده شد. این تیر بتنی دارای طول ۳۲۰ میلی‌متر، ارتفاع ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۴۰ میلی‌متر، با ترکیبی به عرض ۳ و طول ۸ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد نمونه آزمایشگاهی تیر بتنی سه نقطه در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی نمونه بتنی و همچنین مشخصات سنگدانه و خمیر سیمان به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. پارامتر β در جدول (۱) مقدار درصد حجمی کل سنگدانه در مخلوط بتن می‌باشد. از مقدار هوای موجود داخل نمونه بتنی (air void) صرف نظر شده است. مقدار بار وارده ۲۵۰۰ نیوتن می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات نمونه بتنی [۱]

مخلوط بتن ($d_{50}=2mm, d_{max}=16mm, \beta=75\%$)($kg m^{-3}$)	مواد تشکیل دهنده بتن
۸۱۰	سیمان
۶۵۰	ماسه
۵۸۰	شن (۸-۲ میلی‌متر)
۵۸۰	شن (۱۶-۸ میلی‌متر)
۳۴۰	آب

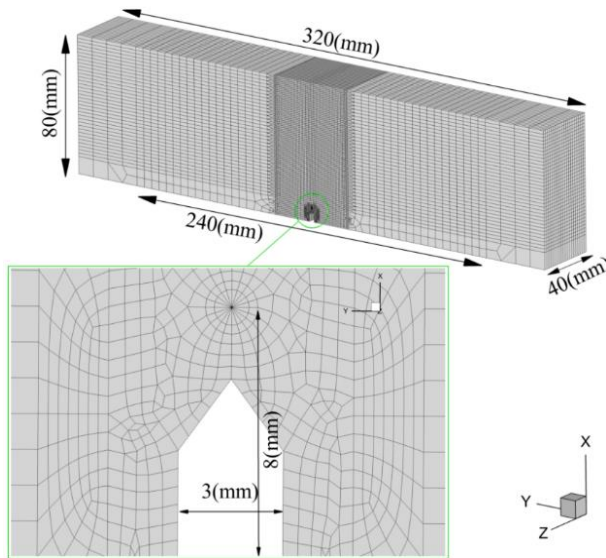
جدول ۲- مشخصات مکانیکی اجزای مختلف بتن [۱]

مخلوط بتن	ملاط سیمانی	شن ($d_a \geq 2mm$)	مشخصات مکانیکی
۳۶۱۰۰	۲۹۲۰۰	۴۷۲۰۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۰/۲	۰/۲	۰/۲	نسبت پواسون



شکل ۱- ابعاد نمونه آزمایشگاهی [۱]

فرایند مکانیک شکست در مواد ترد و شبه ترد، مانند بتن، به دلیل گسترش ترک و درگیر شدن ترک‌ها و دانه‌ها با یکدیگر بسیار پیچیده است [۱-۳]. آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی بتن تحت بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد که رفتار شکست بتن به ساختار داخلی آن از جمله اندازه‌ی سنگدانه‌ها، منحنی توزیع سنگدانه‌ها، حجم ملاط و میزان تداخل موجود بستگی دارد. بنابراین تحلیلی واقع بینانه از شکست بتن تنها زمانی حاصل می‌شود که عواملی که ذکر شد، در مدلسازی بتن در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن از شن و ماسه تشکیل شده است، اندازه‌ی سنگدانه‌ها و محل قرارگیری آنها در مدلسازی بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۴]. رشد ترک در ناحیه انتقالی بین ماتریس و سنگدانه‌ها شروع می‌شود، عرض این منطقه وابسته به زبری سنگدانه از صفر تا ۵۰ میلی‌متر متغیر است [۵-۷]. شبیه‌سازی بتن در مقیاس مزو می‌تواند با استفاده از مدل‌های پیوسته [۸-۱۴] و ناپیوسته [۱۵-۱۸] انجام گیرد. همچنین می‌توان برای مدلسازی رفتار بتن از روش اجزای گسسته که یک روش عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی مجموعه‌ای از ذرات جدا از هم است استفاده شود [۱۹-۲۲]. این روش بر اساس استفاده از یک رویه عددی صریح است که اثر متقابل بین ذرات از طریق تماس و حرکت ذرات را ذره به ذره بررسی می‌کند. روش المان مرزی با استفاده از اجزای محدود غیرخطی [۲۳] و همچنین استفاده از روش فنر جسم صلب (جرم-فنر) [۲۴-۲۶] برای بررسی رفتار شکست بتن، با مدلسازی اجزای بتن نیز مناسب هستند. با داشتن توزیع فضایی سنگدانه‌ها و الگوهای خرابی بتن می‌تواند به درک درستی از رفتار شکست بتن رسید. از این رو مطالعات تجربی بسیاری از جمله روش-های بازرسی غیرمخرب تکنیک آکوستیک [۲۷] و همچنین اسکن با استفاده از اشعه X [۲۸] صورت گرفته است. آنچه در مدلسازی شکست بنظر مهم می‌رسد مدلسازی ۳ بعدی می‌باشد. اخویسی و همکاران [۲۹] با مدلسازی دیسک نیم دایره بصورت ۳ بعدی نتایج دقیق‌تری برای محاسبه ضریب شکل دیسک نیم دایره محاسبه کردند. در این تحقیق با بررسی شکست تیر خمشی تحت آزمایش ۳ نقطه با در نظر گرفتن ۱۰۰ حالت مختلف توزیع سنگدانه‌ها در ماتریس سیمان مقادیر ضریب شدت تنش محاسبه شد، بر خلاف انتظار که تحت این آزمایش فقط باید ضریب شکست مود اول ایجاد



شکل ۲- ابعاد و نحوه‌ی مش‌بندی مدل

برای محاسبه مقدار ضریب شدت تنش در روش اجزای محدود از جابجایی صفحه‌ی ترک استفاده شد، در این روش با توجه به مقدار جابجایی صفحه ترک در راستاهای مختلف مقادیر ضریب شدت تنش موده‌ای مختلف محاسبه می‌شود، مقدار جابجایی صفحه‌ی ترک در مکانیک شکست الاستیک خطی از روابط (۱) محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} u = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa + 3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ v = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa - 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left((2\kappa + 3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ w = \frac{2K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \\ \kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{if Plane strain or axisymmetric} \\ \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & \text{if Plane stress} \end{cases} \end{cases}$$

روابط (۲) محاسبه می‌شود. در مکانیک شکست خطی مقدار ضرایب شکست در نوک ترک مدنظر است لذا باید نقطه‌ی انتخابی تا حد امکان به نوک ترک نزدیک شود، در روش اجزای محدود باید از روابط (۲) هنگامیکه r به سمت صفر میل می‌کند، حد عددی گرفته شود تا پاسخ صحیح باشد، لذا با حل عددی و استفاده از مسیر I,J,K و I,L,M باید حد گرفته شود، بطور مثال برای مود اول ضریب شدت تنش طبق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

۳- مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

برای محاسبه ضرایب شدت تنش نوک ترک از روش مکانیک شکست الاستیک خطی استفاده شد. ابتدا مدل عددی تیر بتنی با خصوصیات مکانیکی همگن تحلیل و نتایج مدل‌سازی ۲ بعدی و ۳ بعدی با روابط تحلیلی مکانیک شکست خطی مقایسه شد و از درستی نتایج اطمینان حاصل گردید. در ادامه با مدل‌سازی ۴ سازه مختلف سنگدانه (درشت‌دانه) و ماتریس سیمانی در فضای محدود به ۲۵ میلی-متر، اطراف نوک ترک (مقیاس مزر) نتایج با روش مکانیک شکست الاستیک خطی مقایسه شد. برای مدل‌سازی سه بعدی نمونه بتنی تحت آزمایش تیر سه نقطه در نرم‌افزار ANSYS از المان‌هایی با قابلیت حل تکنه نوک ترک استفاده شد. این المان‌ها قابلیت حل تکین شدن تنش و کرنش نوک ترک را دارا می‌باشند. برای مدل‌سازی نمونه سه بعدی، از المان ۲۰ گره‌ای (Solid186) با سه درجه آزادی در هر گره و برای مدل‌سازی ۲ بعدی، از المان ۸ گره‌ای (Solid183) با سه درجه آزادی در هر گره استفاده شد. ۲۰ المان در اطراف ترک قرار دارد که طول آنها ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. نحوه‌ی مش‌بندی مدل اجزای محدود در شکل (۲) نشان داده شده است.

(۱)

u, v, w جابجایی در دستگاه کارتزین محلی، r, θ مختصات قطبی محلی، G مدول برشی و K_I, K_{II}, K_{III} به ترتیب ضرایب شدت تنش برای مود اول، دوم و سوم می‌باشد. با توجه به صفحه‌ی ترک و مقدار بازشدگی نوک ترک در شکل ۳ مقادیر ضریب شدت تنش با استفاده از روابط (۱) محاسبه می‌شود. در این روابط مقدار بازشدگی صفحه‌ی ترک به تغییر فاصله بین گره‌های I,J,K,L,M در سه جهت کارتزین (مود اول تا سوم) بستگی دارد و برای یک ترک کامل، ضرایب شدت تنش طبق

(۴)

$$K_I = \frac{PS}{BW^{1.5}} f(a/w)$$

$$f(a/w) = \frac{3(a/w)^{0.5} (1.99 - \frac{a}{w} (1 - \frac{a}{w}) (2.15 - 3.93 \frac{a}{w}) + 2.7 (\frac{a}{w})^2)}{2(1 + 2 \frac{a}{w}) (1 - \frac{a}{w})^{1.5}}$$

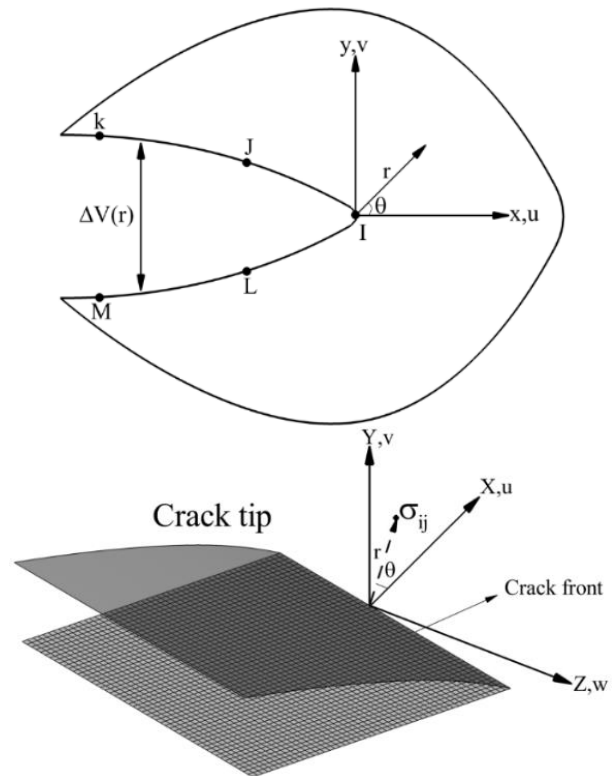
با جایگذاری $a=8mm$ و $w=80mm$ و $s=240mm$ مقدار ضریب شکل تیر تحت بارگذاری سه نقطه $f=0.846$ محاسبه می‌شود. با جایگذاری مقدار ضریب شکل در رابطه (۴) مقدار ضریب شدت تنش مود اول $K_I = 17.755$ بدست می‌آید. با مقایسه‌ی نتایج تحلیل اجزای محدود بصورت ۲ بعدی و ۳ بعدی با روابط تحلیلی مکانیک شکست الاستیک خطی تطابق خوبی بین نتایج عددی و تحلیلی مشاهده می‌شود و بنظر می‌رسد با توجه به جدول ۳ می‌توان به نتایج عددی اطمینان کرد. در شکل ۴ با مقایسه‌ی الگوی تنش در راستای عمود بر ترک و روابط تحلیلی اروین [۲۹] تطابق خوبی مشاهده می‌شود، این تطابق و تقارن الگوی تنش بین دو سمت صفحه‌ی ترک نیز می‌تواند دلیلی بر درستی مدل‌سازی عددی، نحوه‌ی بارگذاری و فرضیات در نظر گرفته شده باشد.

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج عددی ۲ بعدی و ۳ بعدی با روابط

تحلیلی مکانیک شکست الاستیک خطی

Method		$K_I (MPa\sqrt{mm})$
3D	FEM	17.248
	LEFM	17.755
2D	FEM	16.891

در ادامه با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج مدل‌سازی ۲ بعدی با نتایج مدل‌سازی ۳ بعدی و روابط مکانیک شکست الاستیک خطی تفاوت دارد، این تفاوت ناشی از در نظر نگرفتن تنش در راستای عمود بر صفحه می‌باشد، با توجه به شکل ۵ با عبور از صفحه‌ی بیرونی به سمت مرکز نمونه رفتار از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای تغییر خواهد کرد، و این امر در مدل‌سازی ۲ بعدی دیده نخواهد شد، لذا این امر باعث اختلاف در نتایج ۲ بعدی و ۳ بعدی می‌شود.



شکل ۳- شکل شماتیک نوک ترک و نحوه‌ی بازشدگی ترک

$$K_I = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+\kappa} \frac{|Vv|}{\sqrt{r}}$$

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{G}{1+\kappa} \frac{|Vu|}{\sqrt{r}} \quad (۲)$$

$$K_{III} = \sqrt{2\pi} \frac{G}{4} \frac{|Vw|}{\sqrt{r}}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{|v|}{\sqrt{r}} = A + Br \Rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} \frac{|v|}{\sqrt{r}} = A \\ K_I = \sqrt{2\pi} \frac{4GA}{1+\kappa} \end{aligned} \right\} \quad (۳)$$

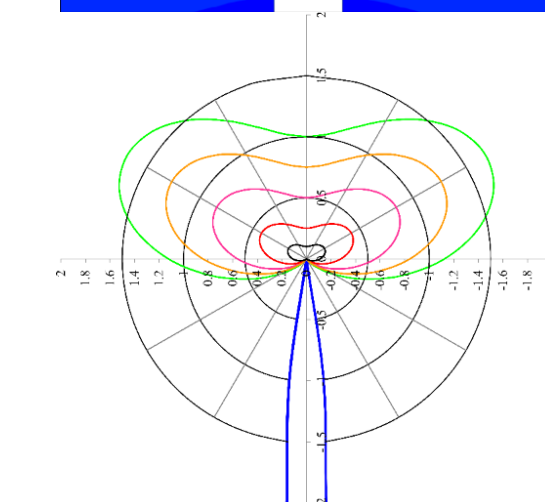
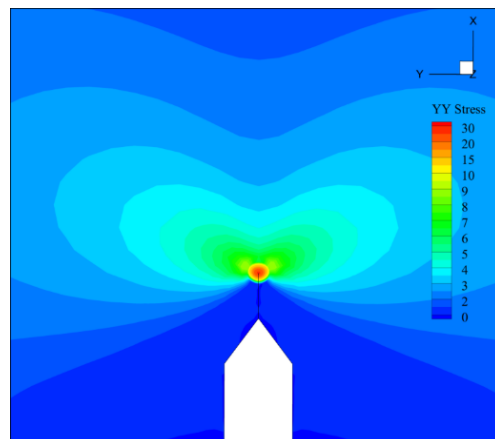
۳-۱- اعتبارسنجی نتایج عددی با روابط مکانیک شکست

الاستیک خطی

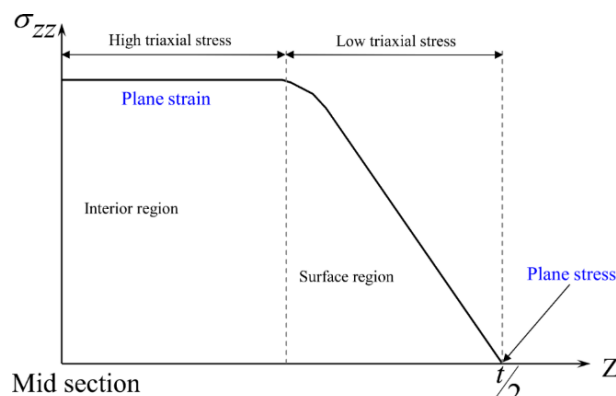
برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل اجزای محدود، ضریب شکست مود اول تیر سه نقطه شکل ۱ با روابط مکانیک شکست الاستیک خطی مقایسه شد. برای تیر سه نقطه مقدار ضریب شدت تنش مود اول در مکانیک شکست الاستیک خطی از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود، در این رابطه تابع f ضریب شکل نام دارد که به ابعاد هندسی نمونه و ترک بستگی دارد، a مقدار طول ترک، W ارتفاع تیر B ضخامت تیر P نیروی وارده و S فاصله بین دو تکیه‌گاه می‌باشد.

سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی با توجه به خواص مکانیکی منحصر به خود در تحلیل در نظر گرفته شوند. نتایج مدل‌سازی در این مقیاس تفاوت‌های چشمگیری نسبت به پیش‌بینی‌های عددی با رفتار همگن ایجاد می‌کند، بعنوان مثال برای محاسبه ضرایب شدت تنش در بتن با توجه به قرار گیری، ابعاد، و جنس سنگدانه و ماتریس سیمانی تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. در ادامه بررسی با توجه به مشخصات دانه‌بندی مدل آزمایشگاهی [۱۳] ۴ نوع سنگدانه با قطرهای کوچکتر از ۴، (۶-۴)، (۸-۱۰)، (۱۲-۱۶) میلی‌متر برای ساخت مدل عددی در نظر گرفته شد. این ابعاد با توجه به اینکه سنگدانه‌های درشت تأثیر مهمی در رشد ترک و ضرایب شدت تنش دارند، انتخاب شده‌اند [۱۷، ۳۰-۳۲]، از این رو این درشت‌دانه بصورت مشخص مدل‌سازی شده و ریز دانه (ماسه) جز ماتریس سیمانی در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی در مقیاس مزو با توجه به اینکه هر سنگدانه مدل می‌شود، نمی‌توان به قطعیت محل هر کدام مشخص شود، لذا باید احتمال محل قرار گیری هر سنگدانه در نظر گرفته شود [۳۳-۳۵]، بنابراین از الگوریتم شکل ۶ برای پخش سنگدانه‌ها در ماتریس سیمانی استفاده شد، در این الگوریتم با توجه به شعاع معادل سنگدانه و تعداد سنگدانه با شعاع خاص توزیع انجام می‌شود، ابتدا اولین کره معادل بصورت تصادفی در حجم ماتریس سیمانی در نظر گرفته می‌شود، سپس نودهای داخل کره‌های معادل انتخاب می‌شود، اگر بین نودها همپوشانی باشد، مرکز کره دوباره تغییر می‌کند این روند تا زمانی که هیچ دو کره همپوشانی نداشته باشند ادامه می‌یابد، در ادامه مشخصات مکانیکی سنگدانه برای المان‌های متصل به نودها انتخاب می‌شود و اگر اختلاف حجم المان مورد نظر با سنگدانه در نظر گرفته شده کمتر از یک درصد باشد عملیات قابل قبول می‌باشد، در غیر اینصورت از المان‌های متصل به نودها غیرفعال شده تا اختلاف حجم کمتر از یک درصد شود.

با توجه به اینکه حجم محدود به اطراف نوک ترک در گسترش ترک و ضریب شدت تنش موثر است از این رو مدل‌سازی عددی کل نمونه در مقیاس مزو امری غیر ضروری بوده و فقط حجم محدود به ۲۵ میلی-متر از هر طرف ترک برای مدل‌سازی در مقیاس مزو در نظر گرفته شد [۱۳]، با علم بر اینکه تمرکز تنش‌ها اطراف نوک ترک می‌باشد، بنابراین سنگدانه‌ها در حجمی محدود اطراف نوک ترک توزیع شده و اطراف هر سنگدانه ماتریس سیمانی در نظر گرفته شد. در این الگوریتم تمرکز اصلی بر روی توزیع سنگدانه‌ها می‌باشد.



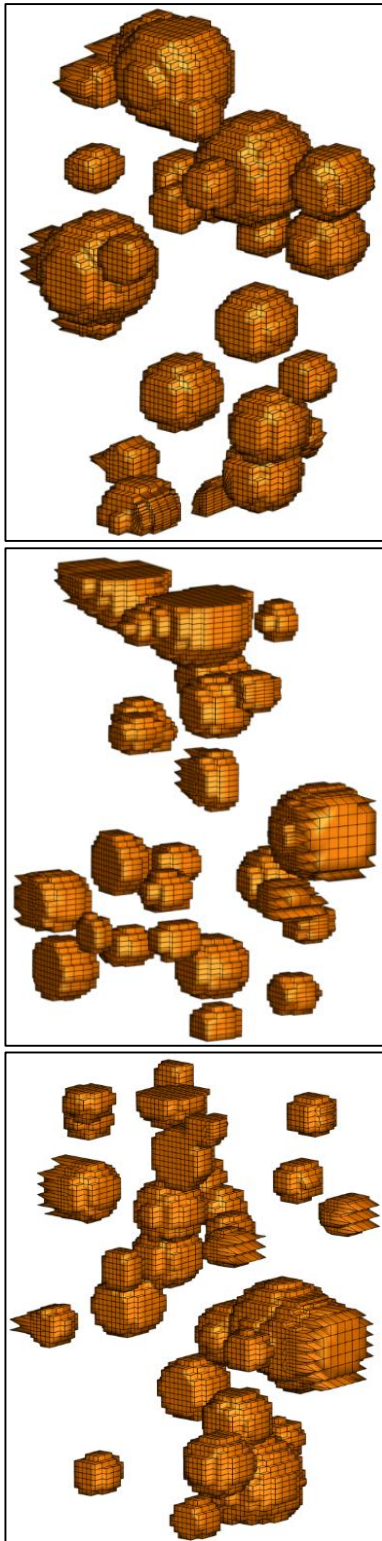
شکل ۴- مقایسه‌ی الگوی تنش بین نتایج اجزای محدود و روابط تحلیلی اروین [۲۹]



شکل ۵- تغییر رفتار تنش در ضخامت نمونه

۴- مدل‌سازی ۳ بعدی با در نظر گرفتن توزیع سنگدانه‌ها در مقیاس مزو

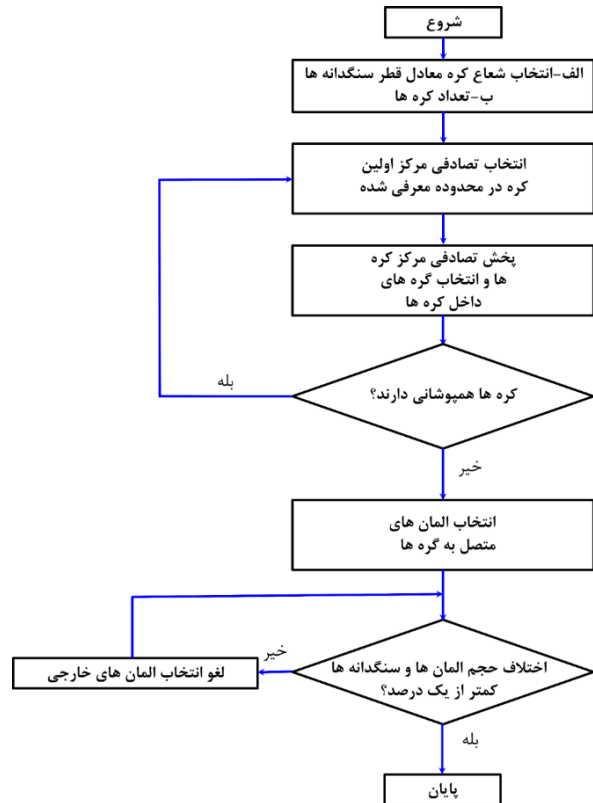
با توجه به اینکه بتن ماده‌ای ناهمگن می‌باشد لذا رفتاری مشابه در سه راستا ندارد، این امر باعث تغییر رفتار بتن می‌شود و این تغییر در مقیاس مزو بسیار چشمگیرتر می‌باشد [۱۳، ۱۷، ۱۸]، منظور از مقیاس مزو، مدل‌سازی در حدود ابعاد میلی‌متر می‌باشد، در این ابعاد می‌توان



شکل ۸- سه نمونه از توزیع سنگدانه‌ها در ماتریس سیمانی در حجم محدود

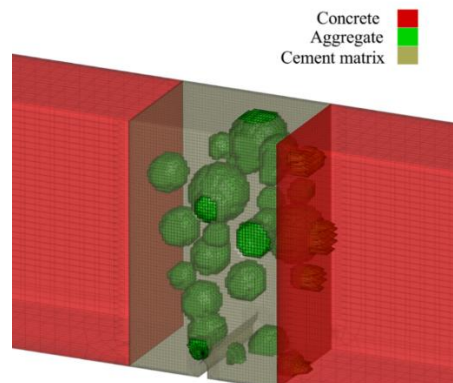
۵- بررسی نتایج تحلیل نمونه‌ها در مقیاس مزو

با تحلیل ۱۰۰ نمونه و بررسی نتایج کاملاً مشخص شد با مدل-سازی در مقیاس مزو نتایج نسبت به مدل‌سازی همگن کاملاً تغییر



شکل ۶- الگوریتم توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

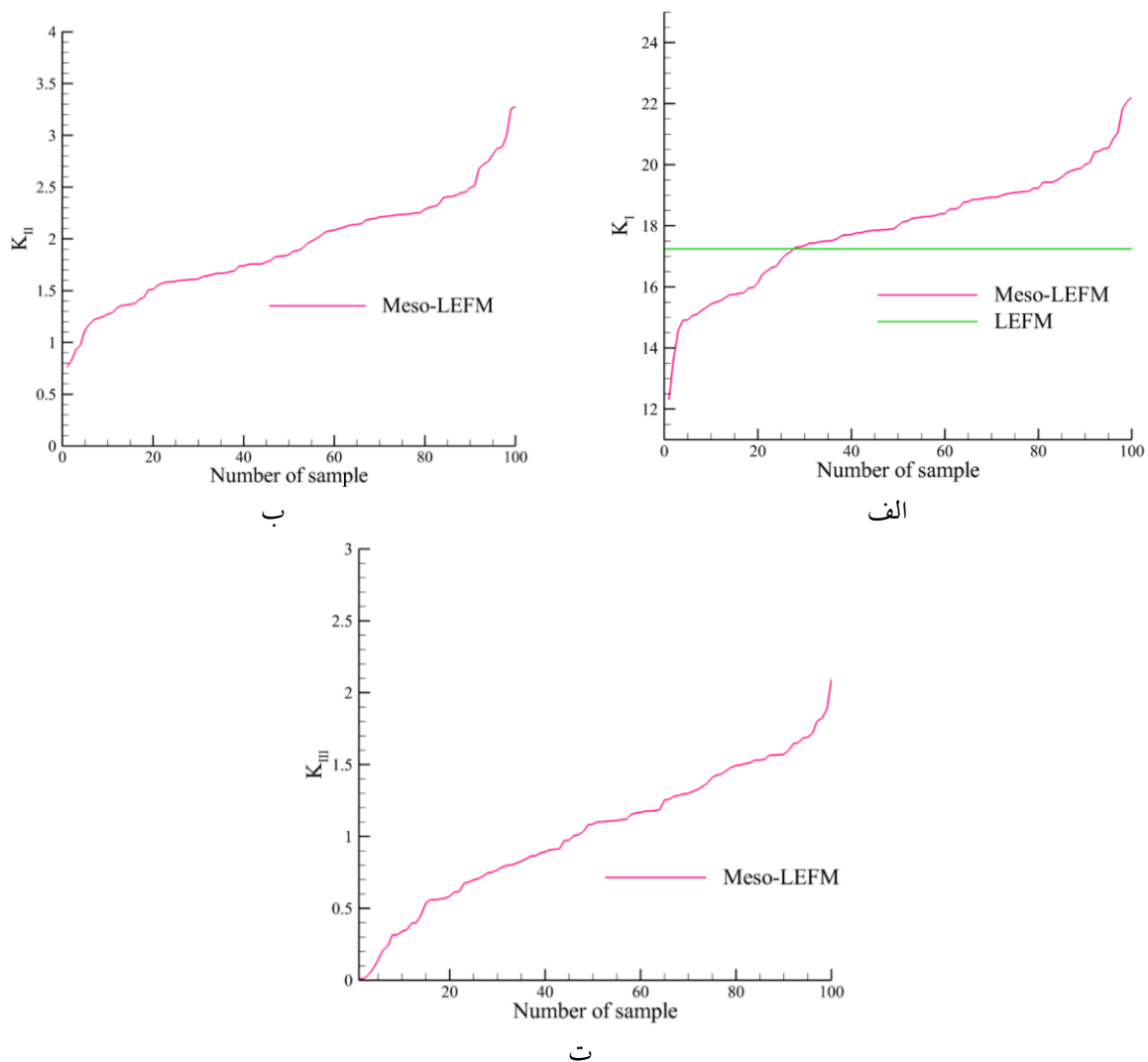
با توجه به عدم قطعیت محل هر سنگدانه در ماتریس سیمانی برای اینکه بتوان طیف وسیعی از پاسخ‌ها در دسترس باشد، طبق الگوریتم ۱۰۰ نمونه عددی از توزیع سنگدانه‌ها در ماتریس سیمانی در نظر گرفته شد. در شکل ۷ یک نمونه تصادفی از مدل اجزای محدود نشان داده شده است. در این مدل محدوده‌ی مقیاس مزو، سنگدانه‌ها، ماتریس سیمانی و بتن همگن مشخص است. مشخصات مکانیکی هر قسمت با توجه به جدول ۲ اختصاص داده شد. در شکل ۸ سه نمونه از توزیع تصادفی سنگدانه‌ها در ماتریس سیمانی نشان داده شده است.



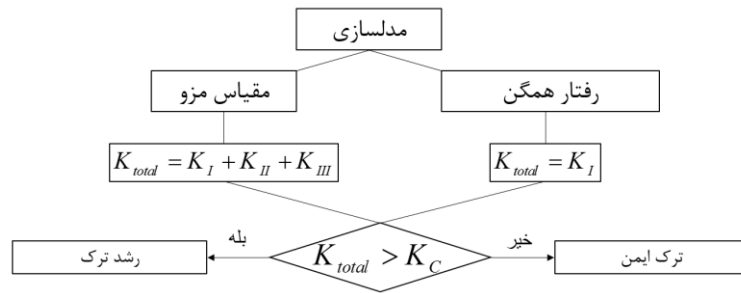
شکل ۷- یک نمونه از توزیع سنگدانه‌ها در مقیاس مزو (حجم محدود)

ضریب شدت تنش مود اول در محدوده وسیعی ۱۲/۵ تا ۲۲/۵ تغییر کرده است اما با در نظر گرفتن رفتار همگن برای مدل عددی مقدار ثابت ۱۷/۷۵۵ برای ضریب شدت تنش مود اول ارائه می‌شود. در تحلیل رشد ترک، مقدار ضریب شدت تنش از جمع جبری هر سه مود ضریب شدت تنش بدست می‌آید و با مقدار چقرمگی شکست یک ماده مقایسه می‌گردد، در صورتی که با در نظر گرفتن رفتار همگن برای بتن عدد ثابت ۱۷/۷۵۵ با مقدار چقرمگی شکست مقایسه می‌شود، از این رو ممکن است با در نظر گرفتن رفتار همگن مقدار ضریب شدت تنش از مقدار چقرمگی کمتر باشد و ترک در حالت ایمن باشد اما با در نظر گرفتن رفتار غیرهمگن برای بتن مقدار ضریب شدت تنش از مقدار چقرمگی شکست بیشتر شود و ترک رشد کند، در شکل ۱۰ این روند کاملاً در یک الگوریتم مشخص می‌باشد.

کرده است، زیرا در مدل‌سازی همگن انتظار می‌رود که نوک ترک تحت آزمایش ۳ نقطه فقط دارای ضریب شدت تنش مود اول باشد به علت اینکه نوک ترک تحت کشش می‌باشد و این امر باعث باز شدن صفحه‌ی ترک می‌شود، اما با توجه به وجود سنگدانه‌ها مودهای دوم و سوم شکست هم ایجاد شد، و مقادیر آنها در بازه‌ی وسیعی تغییر کرد. در شکل ۹ کاملاً محدوده تغییر ضرایب شدت تنش مودهای اول، دوم و سوم در تحلیل ۱۰۰ نمونه عددی مشخص است، با توجه به شکل (۹-الف) انتظار می‌رود نتایج عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شوند، زیرا یک محدوده برای پاسخ‌ها در نظر گرفته شده است و هر یک از این پاسخ‌ها ممکن است در آزمایشگاه رخ دهند، لذا منطقی بنظر می‌رسد که یک محدود برای ضرایب شدت تنش در نظر گرفت نه یک عدد خاص. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که



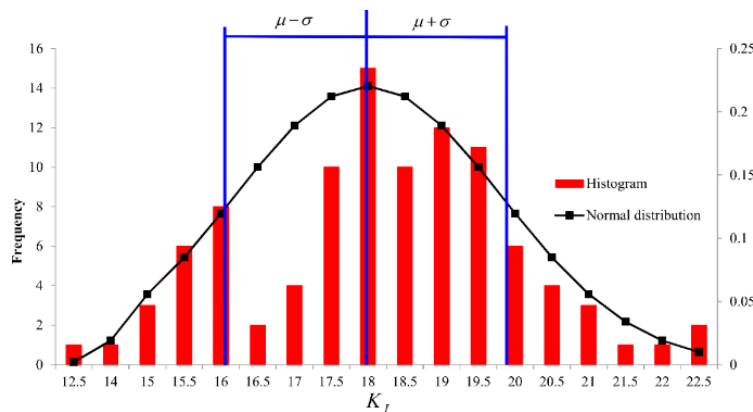
شکل ۹- مقادیر ضرایب شدت تنش برای ۱۰۰ نمونه (الف) مود اول (ب) مود دوم (ت) مود سوم



شکل ۱۰- تاثیر نحوه‌ی مدلسازی رشد ترک در بتن

با مقایسه‌ی کانتور تنش در اطراف نوک ترک کاملاً مشخص است به علت در نظر گرفتن ناهمگنی در مقیاس مزو کانتورهای تنش اطراف نوک ترک از حالت تقارن خارج شده‌اند، در شکل ۱۲ کاملاً الگوی تنش نوک ترک بین مدل با رفتار همگن و ناهمگن تفاوت دارد و این تفاوت باعث بوجود آمدن ضرایب شدت تنش در راستاهای دیگر شده است. ترکیب موده‌های شکست موجب رسیدن زود هنگام ضریب شدت تنش به چقرمگی شکست می‌شود در صورتی که بر طبق محاسبات مکانیک شکست الاستیک خطی با رفتار همگن تا چقرمگی شکست فاصله می‌باشد.

با رسم هیستوگرام داده‌های ضریب شدت تنش مود اول شکل ۱۱ نوعی همبستگی بین نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که توزیع نرمال داده‌ها حول ضریب شدت تنش همگن می‌باشد. با این تفسیر مشخص است که تقریباً مقادیر ضریب شدت تنش مود اول با در نظر گرفتن رفتار غیر همگن حول ضریب شدت تنش مود اول با رفتار همگن در حال تغییر هستند. اما با توجه به مدلسازی در مقیاس مزو مود دوم و سوم شکست نیز ایجاد شده است که باعث افزایش ضریب شدت تنش کل خواهد شد، که این افزایش در پیش بینی‌ها با رفتار همگن در نظر گرفته نشده است و ممکن است باعث خطا شود.



شکل ۱۱- هیستوگرام و توزیع نرمال داده‌های ضریب شدت تنش مود اول

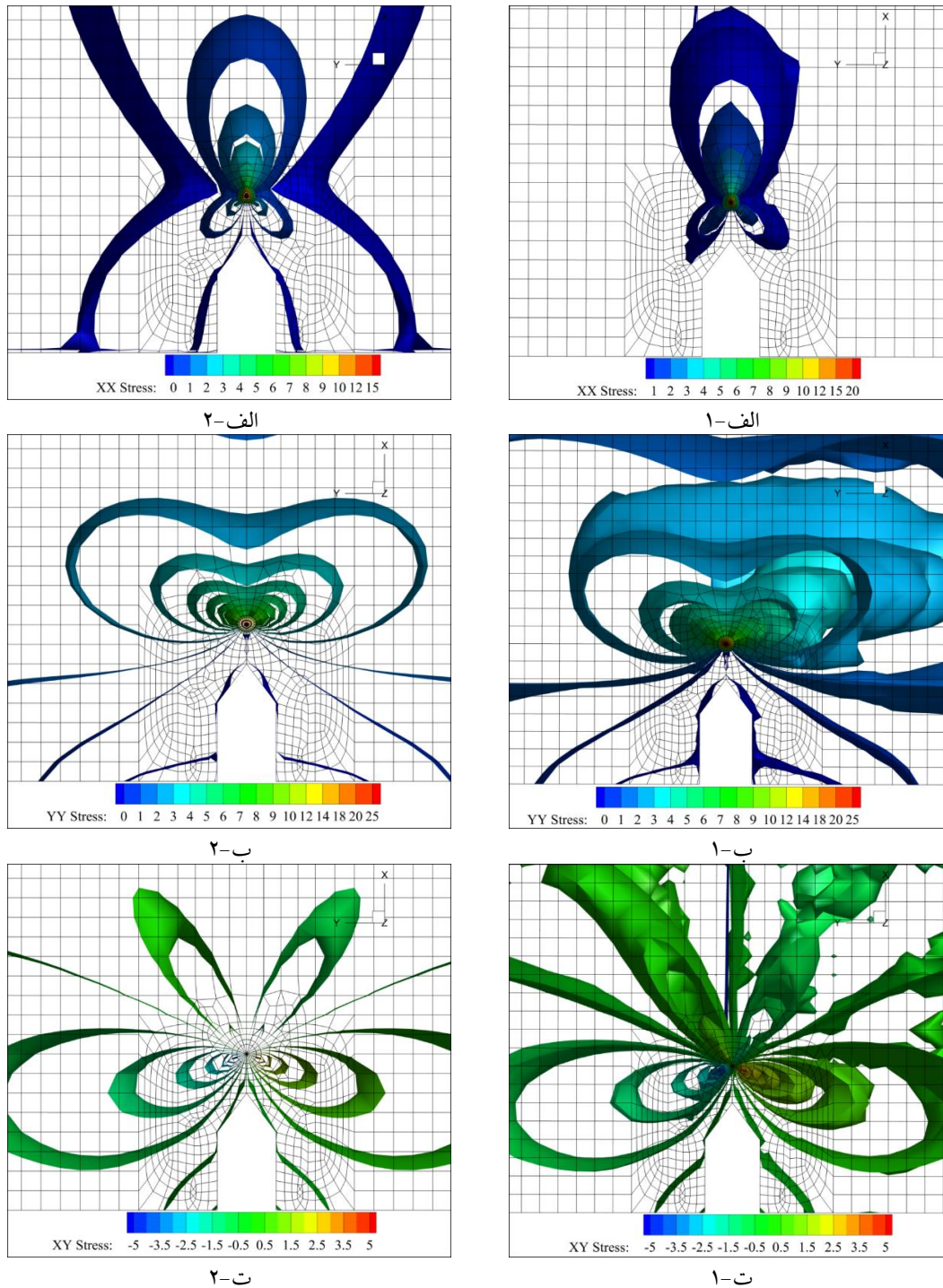
ضحامت کاملاً تفاوت بین مدل با رفتار همگن و مدل در مقیاس مزو را نشان می‌دهد، مقدار انرژی رها شده در ضحامت با در نظر گرفتن رفتار همگن تقریباً دارای مقدار عددی کمتری نسبت به مدل در مقیاس مزو می‌باشد. این تفاوت نشان می‌دهد که ترکیب ضرایب شدت تنش در راستاهای مختلف می‌تواند باعث شکست زود هنگام نمونه شود، به عبارت دیگر ممکن است مقدار نرخ انرژی محاسبه شده از مقدار نرخ انرژی بحرانی بیشتر باشد و باعث شکست نمونه شود در صورتی که با مدلسازی با رفتار همگن این شکست پیش

۱-۵- بررسی پارامترهای شکست در ضخامت نمونه بتنی در مقیاس مزو

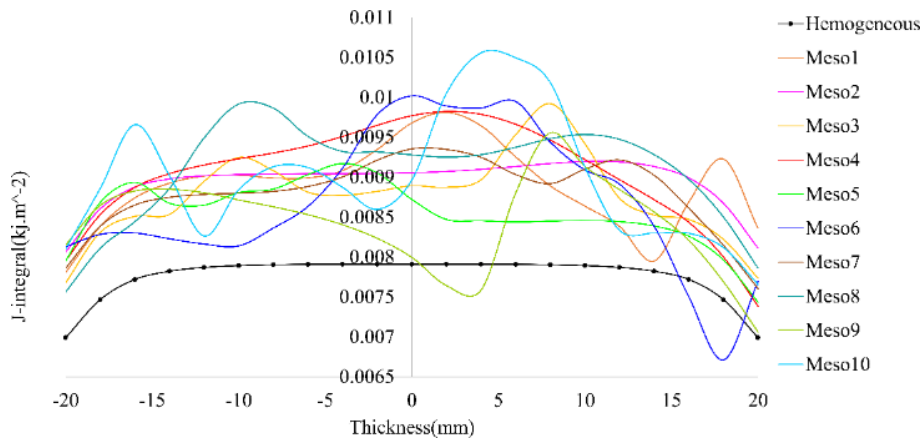
در ادامه با مقایسه‌ی مقدار انتگرال J در ضخامت نمونه بتنی، که معرف مقدار نرخ رهایی انرژی در مکانیک شکست خطی بوده و اثرات هر سه مود شکست را همزمان در نظر می‌گیرد، می‌توان تفاوت بین مقادیر مدل با رفتار همگن و مدل در مقیاس مزو را مشاهده کرد. برای مشاهده بهتر نتایج ۱۰ نمونه بصورت تصادفی انتخاب شده است (شکل ۱۳). تغییرات مقدار انرژی رها شده در

مدل‌های تحلیلی با رفتار همگن برای بتن پیش‌بینی نشده است (شکل ۱۴) از این رو بهتر است برای بررسی گسترش ترک یا ضرایب شدت تنش مدل بصورت ۳ بعدی و با در نظر گرفتن اثرات ناهمگنی همانند مدل‌سازی سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی مدل شود تا پیش‌بینی دقیق نسبت به شرایط و رشد ترک بدست آید.

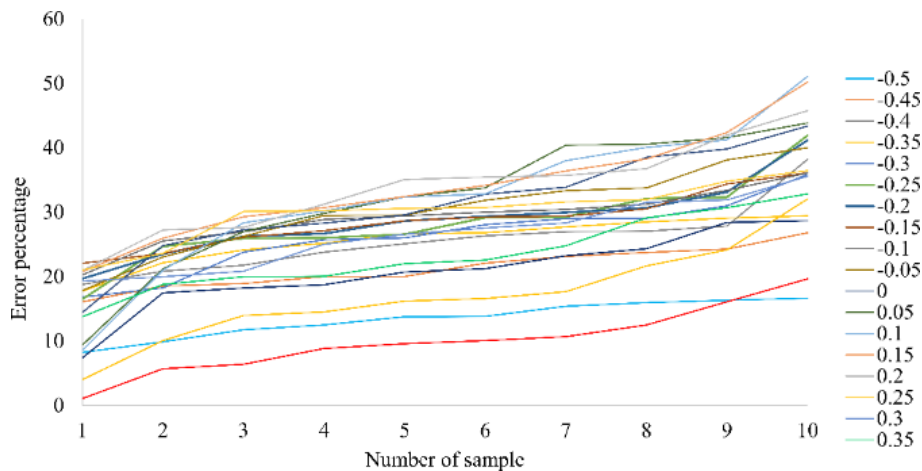
بینی نمی‌شود. با مقایسه مقدار خطای نسبی نرخ رهایی انرژی مدل-سازی در مقیاس مزو با نرخ رهایی انرژی مدل با رفتار همگن در ضخامت مدل عددی کاملاً مشهود است، در بعضی موارد بیش از ۵۰ درصد اختلاف بین این دو روش وجود دارد، با توجه به دقت مدل مزو این اختلاف موجب عوض شدن مسیر رشد ترک شده که در



شکل ۱۲- مقایسه‌ی بین الگوی تنش در حالت مدل همگن و مدل با مقیاس مزو ۱-مدل مزو ۲ مدل همگن الف) توزیع تنش در راستای X ب) توزیع تنش در راستای Y ت) توزیع تنش برشی XY



شکل ۱۳- مقدار انرژی رها شده در ضخامت نمونه



شکل ۱۴- مقدار خطای نسبی انرژی رها شده در حالت همگن و مقیاس مزو

در ضخامت با مقدار انتگرال J نمونه با رفتار همگن مقایسه شد، زیرا مقدار انتگرال J در بگيرنده تمامی مودهای شکست می باشد، در این بررسی در بعضی از نمونه ها اختلافی تا بیش از ۵۰ درصد نسبت به مدل با رفتار همگن مشاهده شد. این تفاوت نشان دهنده ثابت نبودن مقدار چقرمگی شکست در بتن می باشد، زیرا با توجه به اندازه سنگدانه، ابعاد و محل قرارگیری آنها، مقادیر آزمایشگاهی چقرمگی شکست بتن متفاوت باشد، و به همین جهت نتایج روش مقیاس مزو می تواند به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر باشد.

۷- مراجع

- [1] Bazant, Z.P. and J. Planas, Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, 1998. CRC Press.
 [2] Teichman, J. and J. Bobiński, Continuous and discontinuous modelling of fracture in concrete using FEM. 2012: Springer Science & Business

۶- نتایج

با مدل سازی ناحیه محدود در اطراف نوک ترک در مقیاس مزو رفتار بتن نسبت به تحلیل های عددی با رفتار همگن به واقعیت نزدیک تر می شود. برای مدل سازی بتن به روش مزو مشخصات مکانیکی اجزای اعم از شن، ماسه و ملات سیمان ضروری می باشد. باید با توجه به دقت مورد نیاز تعدادی از سنگدانه ها با قطر مختلف در نظر گرفته می شود و با الگوریتمی تکراری در ماتریس سیمانی در مقیاس مزو با محدودیت های خاصی پخش می شود، با توجه به اینکه محل قرارگیری سنگدانه ها در ماتریس سیمانی مشخص نمی باشد، از این رو ۱۰۰ مدل مختلف با توزیع متفاوت و تصادفی سنگدانه در نظر گرفته شد تا بتوان طیف وسیعی از پاسخ ها در نظر گرفته شود. با تحلیل نمونه ها بر خلاف انتظار ضرایب شدت تنش مودهای دوم و سوم شکست ایجاد شد. همچنین مقادیر ضریب شدت تنش مود اول نیز در بازه ی گسترده ای تغییر کرد. برای مقایسه ی تاثیر مدل سازی در مقیاس مزو مقدار انتگرال J نمونه ها

- [16] Wang, X., Z. Yang, and A.P. Jivkov, Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: a size effect study. *Construction and Building Materials*, 2015. 80: p. 262-272.
- [17] Wang, X., M. Zhang, and A.P. Jivkov, Computational technology for analysis of 3D meso-structure effects on damage and failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 2016. 80: p. 310-333.
- [18] Trawiński, W., J. Bobiński, and J. Tejchman, Two-dimensional simulations of concrete fracture at aggregate level with cohesive elements based on X-ray μ CT images. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016. 168: p. 204-226.
- [19] Sakaguchi, H. and H. Mühlhaus, Mesh free modelling of failure and localization in brittle materials. *Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, 1997: p. 15-21.
- [20] D'Addetta, G.A., F. Kun, and E. Ramm, On the application of a discrete model to the fracture process of cohesive granular materials. *Granular Matter*, 2002. 4(2): p. 77-90.
- [21] Hentz, S., F.V. Donzé, and L. Daudeville, Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates. *Computers & Structures*, 2004. 82(29): p. 2509-2524.
- [22] Nitka, M. and J. Tejchman, Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM. *Granular Matter*, 2015. 17(1): p. 145-164.
- [23] Kozicki, J. and J. Tejchman, Effect of aggregate structure on fracture process in concrete using 2D lattice model. *Archives of Mechanics*, 2007. 59(4-5): p. 365-384.
- [24] Kikuchi, A., T. Kawai, and N. Suzuki, The rigid bodies—spring models and their applications to three-dimensional crack problems. *Computers & Structures*, 1992. 44(1): p. 469-480.
- [25] Cusatis, G., Z.P. Bažant, and L. Cedolin, Confinement-shear lattice CSL model for fracture propagation in concrete. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006. 195(52): p. 7154-7171.
- [26] Mariotti, C., Lamb's problem with the lattice model Mka3D. *Geophysical Journal International*, 2007. 171(2): p. 857-864.
- [27] Landis, E.N., Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete. *Construction and Building Materials*, 1999. 13(1-2): p. 65-72.
- [28] Trawiński, W., J. Tejchman, and J. Bobiński, A three-dimensional meso-scale modelling of concrete fracture, based on cohesive elements and X-ray μ CT images. *Engineering Fracture Media*.
- [3] Lilliu, G. and J.G.M. van Mier, 3D lattice type fracture model for concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003. 70(7): p. 927-941.
- [4] Skarżyński, Ł., M. Nitka, and J. Tejchman, Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on X-ray μ CT images of internal structure. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015. 147: p. 13-35.
- [5] Scrivener, K.L., A.K. Crumbie, and P. Laugesen, The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 2004. 12(4): p. 411-421.
- [6] Mondal, P., S.P. Shah, and L.D. Marks. *Nanomechanical Properties of Interfacial Transition Zone in Concrete*. 2009. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [7] Königsberger, M., B. Pichler, and C. Hellmich, Micromechanics of ITZ-Aggregate Interaction in Concrete Part II: Strength Upscaling. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014. 97(2): p. 543-551.
- [8] Gitman, I.M., H. Askes, and L.J. Sluys, Coupled-volume multi-scale modelling of quasi-brittle material. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2008. 27(3): p. 302-327.
- [9] Skarżyński, Ł. and J. Tejchman, Calculations of fracture process zones on meso-scale in notched concrete beams subjected to three-point bending. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2010. 29(4): p. 746-760.
- [10] Tejchman, J., Modelling the effect of material composition on the tensile properties of concrete, in *Understanding the Tensile Properties of Concrete*. 2013, Elsevier. p. 52-97.
- [11] Kim, S.-M. and R.K. Abu Al-Rub, Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 2011. 41(3): p. 339-358.
- [12] Shahbeyk, S., M. Hosseini, and M. Yaghoobi, Mesoscale finite element prediction of concrete failure. *Computational Materials Science*, 2011. 50(7): p. 1973-1990.
- [13] Skarżyński, Ł. and J. Tejchman, Experimental Investigations of Fracture Process in Concrete by Means of X-ray Micro-computed Tomography. *Strain*, 2016. 52(1): p. 26-45.
- [14] Li, Y. and D.R. Schmitt, Drilling-induced core fractures and in situ stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998. 103(B3): p. 5225-5239.
- [15] Ren, W., et al., Two-dimensional X-ray CT image based meso-scale fracture modelling of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015. 153: p. 24-39.

Mechanics, 2018. 189: p. 27-50.

[29] Akhaveissy, A., A. Permannoon, and R. Raeisi, Analyzing the Edge Cracked Semicircular Disc under Uniform Compressive (ECSD (UD)) Load. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2018. 62(2): p. 353-362.

[30] Yılmaz, O. and J.-F. Molinari, A mesoscale fracture model for concrete. Cement and Concrete Research, 2017. 97: p. 84-94.

[31] Shahbazi, S. and I. Rasoolan, Meso-scale finite element modeling of non-homogeneous three-phase concrete. Case Studies in Construction Materials, 2017. 6: p. 29-42.

[32] Huang, Y., et al., 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, 2015. 67-68: p. 340-352.

[33] Zhang, Z., et al., Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm. Composites Science and Technology, 2017. 149: p. 235-245.

[34] Huang, J., et al., A combined-alpha-shape-implicit-surface approach to generate 3D random concrete mesostructures via digital image processing, spectral representation, and point cloud. Construction and Building Materials, 2017. 143: p. 330-365.

[35] Xu, W., et al., Random non-convex particle model for the fraction of interfacial transition zones (ITZs) in fully-graded concrete. Powder Technology, 2018. 323: p. 301-309.

Effect of 3D modeling in calculating concrete fracture parameters

Ali Permanoon

Phd student of structural engineering, Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

A.H. Akhaveissy *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Abstract

The problem of failure brings about considerable financial and living costs to various societies every year. The issue came under a scientific scrutiny since the beginning of the twentieth century. For the macro scale analysis of concrete structures, concrete is assumed as a homogeneous material, whereas in reality concrete contains various components such as cement paste, sand and air, which are important for concrete behavior determination. Therefore, in the current research, to calculate concrete failure parameters, cement paste and 4 different aggregate sizes were modelled to examine the effect of aggregates in the cement paste. According to the random distribution of the aggregates in the cement paste, 100 different types of the aggregate distribution in the cement paste were modeled to evaluate a wide range of responses. By examining the results obtained from 100 numerical samples of the bending beam under the three-point test, an unexpected result was obtained. It is normally expected that only the failure coefficient of the first mode should be created under this experiment. However, the failure coefficients of the second and third modes were also created due to the distribution of aggregates. The amount of these modes are probably dependent on aggregates and their location. The existence of all three failure modes contributes to the inconsistency of energy release rate distribution in the thickness, and the final result is the early failure of the sample.

Keywords: Linear elastic fracture mechanic, finite element, fracture's mode meso scale.

* Corresponding Author: Ahakhaveissy@razi.ac.ir

