

# فرایند تولید خودکار هندسه‌ی نمونه‌ی دو بعدی بتنی با در نظر گرفتن توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها و حل آن با روش المان گسسته

رضا عباس‌نیا\* (دانشیار)

مجتبی اسلمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی هندی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

در این نوشتار، الگوریتم تولید خودکار هندسه‌ی مدل و پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی بتن با استفاده از روش‌های گسسته با در نظر گرفتن توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها ارائه شده است. برای تولید یک بافت نامنظم، از دیاگرام Voronoi برای شبکه‌بندی نمونه استفاده شده است. سنگ‌دانه‌ها با یک دانه‌بندی استاندارد و در شکل‌های متفاوت، به‌طور تصادفی در بافت بتن توزیع می‌شوند. با توجه به اندازه‌ی المان‌ها و سنگ‌دانه‌ها، هر سنگ‌دانه می‌تواند از یک یا چند المان تشکیل شود، که بدین ترتیب امکان بررسی شکستگی سنگ‌دانه در بتن‌های با مقاومت بالا فراهم شده است. در این الگوریتم با تعیین ابعاد و تعداد المان، نمونه‌ی بتنی مورد نظر با تمام پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی بتن ساخته می‌شود. در پایان، چگونگی حل نمونه‌ی حاصل با استفاده از روش المان گسسته ارائه شده است.

واژگان کلیدی: نمونه‌ی بتنی، دیاگرام Voronoi، سنگ‌دانه‌ها، ماتریس اتصال، روش المان گسسته.

## ۱. مقدمه

اولین گام در شبیه‌سازی عددی رفتار مصالح، ایجاد هندسه و شکل مجازی آن است. در تحقیقاتی که تاکنون در رابطه با مدل‌سازی گسیختگی بتن انجام شده است، از نمونه‌های متفاوتی استفاده شده است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۶، با استفاده از روش اجزای محدود به مدل‌سازی نمونه‌های دو بعدی بتنی پرداخته شده است.<sup>[۱]</sup> در این روش از شبکه‌بندی منظم برای تقسیم‌بندی نمونه‌ها استفاده شده است. در سال ۲۰۰۰، نیز با استفاده از روش المان گسسته<sup>۱</sup> رفتار بتن تحت بار فشاری با در نظر گرفتن دو فاز سنگ‌دانه و ملات سیمان مدل شده است.<sup>[۲]</sup> از آنجا که ایجاد هندسه‌ی مدل با استفاده از روش دیاگرام Voronoi کاری دشوار و طولانی است، در این روش فقط از یک نمونه بدون در نظر گرفتن توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها استفاده شده است. همچنین در سال ۲۰۰۴، با استفاده از روش RBSM<sup>۲</sup>، گسیختگی بتن در مقیاس متوسط با در نظر گرفتن سه فاز ملات، سنگ‌دانه و سطوح بین این دو مدل شده است.<sup>[۳]</sup> هر چند نمونه‌ی مورد استفاده در این مدل‌سازی، یک نمونه‌ی کامل با توزیع استاندارد سنگ‌دانه‌ها بود، اما به دلیل سختی در تولید نمونه‌های با توزیع متفاوت سنگ‌دانه‌ها، در این روش نیز از سنگ‌دانه‌های با شکل دایروی و یک توزیع ثابت استفاده شده است. از آنجا که هر چه نمونه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد، نتایج نیز واقعی‌تر خواهند بود؛ در این نوشتار،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۰۶/۲۹، پذیرش ۱۳۹۰/۰۷/۲۵.

abbasnia@iust.ac.ir  
maslami@civileng.iust.ac.ir

برنامه‌ی برای تولید خودکار نمونه‌های مستطیلی بتنی با در نظر گرفتن یک منحنی دانه‌بندی استاندارد برای سنگ‌دانه‌ها و توزیع تصادفی آن‌ها ارائه شده است. در این برنامه با تعیین ابعاد نمونه و تعداد المان‌های مورد نظر، نمونه‌ی ملاتی یا بتنی (بسته به نوع مدل‌سازی) به همراه تمام پارامترهای مورد نیاز جهت حل مسئله، به‌طور خودکار تولید می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ضمن مدل‌سازی بتن با نمونه‌های حاصل، اثر توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها، در یک نمونه‌ی مشخص را نیز بررسی کرد.

## ۲. الگوریتم جدید ارائه‌شده برای تولید نمونه‌های بتنی

در این بخش، الگوریتم جدید مدل‌سازی نمونه‌های دو بعدی بتنی با در نظر گرفتن منحنی دانه‌بندی استاندارد برای سنگ‌دانه‌ها و توزیع تصادفی آن‌ها تشریح می‌شود. مراحل به این صورت است:

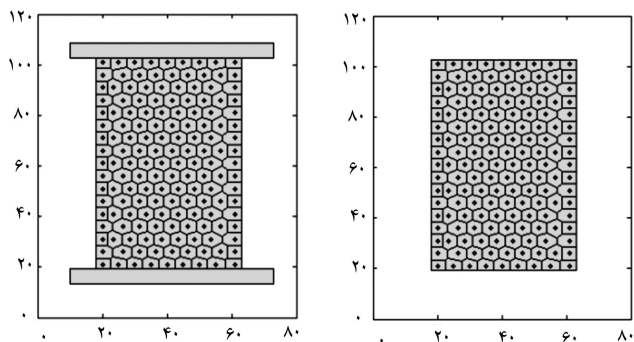
۱. تعیین ابعاد نمونه و تعداد المان‌های مورد نظر در جهات افقی و قائم.
۲. تعیین فاصله‌ی تقریبی مرکز المان‌ها از یکدیگر با استفاده از داده‌های مرحله‌ی یک.
۳. توزیع نقاط مرکز المان‌ها در محدوده‌ی ابعاد نمونه: در این مرحله با استفاده از فاصله‌ی تقریبی مرکز به مرکز المان‌ها، نقاط مورد نظر (مرکز المان‌ها) به طور

یکنواخت و با رعایت فاصله‌ی به دست آمده از مرحله‌ی دوم در تمام نمونه توزیع می‌شوند (شکل الف).

۴. استفاده از دیاگرام Voronoi<sup>[۴]</sup> برای تشکیل المان‌ها: در روش‌های عددی برای اینکه بتوان به مدل‌سازی یک نمونه پرداخت، باید نمونه را به جزء‌های کوچکی تقسیم و رفتار را در هر کدام از آن‌ها بررسی کرد. در مدل‌سازی گسیختگی بتن برای از بین بردن هرگونه احتمال در تعیین یک مسیر ترک خوردگی مشخص، از دیاگرام Voronoi برای تولید بافت نامنظم استفاده می‌شود. در این مرحله با استفاده از تابع Voronoi در برنامه‌نویسی MATLAB، فضای دو بعدی صفحه تقسیم‌بندی و مختصات تشکیل دهنده‌ی گوشه‌ی المان‌ها در یک ماتریس ذخیره می‌شود. در اثر تقسیم‌بندی فضای دو بعدی با این روش نقاطی که در مرز بیرونی مجموعه‌ی نقاط توزیع شده در صفحه قرار می‌گیرند، تشکیل یک چندضلعی بسته که بتوان از آن‌ها به منزله‌ی المان استفاده کرد، نمی‌دهند (شکل ۱ ب). در این مرحله با افزودن یک سری نقاط منظم و با فاصله‌ی کم از یکدیگر، در اطراف نمونه (شکل الف ۲)، المان‌های مرزی نیز پس از تقسیم‌بندی فضای تشکیل چندضلعی بسته (المان) می‌دهند (شکل ۲ ب).

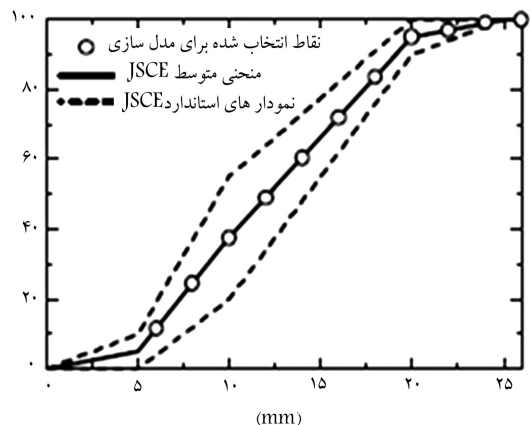
۵. ایجاد شکل نهایی مدل: از آنجا که المان‌های مرزی دارای گوشه‌های نامنظم هستند (شکل ۲ ب)، باید با تصحیح مختصات این گوشه‌ها شکل مستطیلی نمونه را به دست آورد (شکل ۳ الف). شکل نهایی با افزودن صفحات بارگذاری در بالا و پایین نمونه ایجاد می‌شود (شکل ۳ ب). از نمونه‌ی ایجاد شده تا این مرحله می‌توان برای شبیه‌سازی نمونه‌های ملات استفاده کرد.

۶. توزیع سنگ‌دانه‌ها برای ایجاد نمونه‌های بتنی: پس از تشکیل هندسه‌ی مدل و به دست آوردن مختصات گوشه‌های تمام المان‌ها، باید سنگ‌دانه‌ها را در نمونه



الف) شکل نهایی نمونه؛ ب) شکل نهایی نمونه با افزودن صفحات بارگذاری.

شکل ۳. نمونه نهایی با صفحات بارگذاری



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی بتن در استاندارد JSCE<sup>[۳]</sup>.

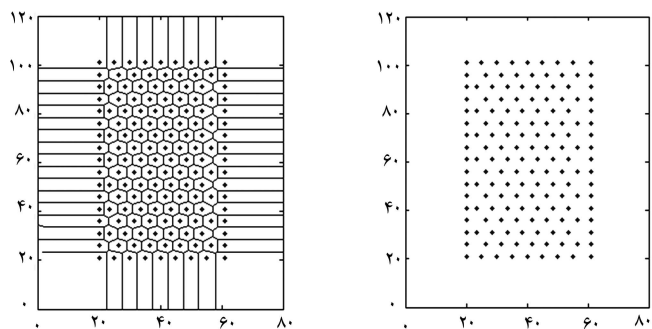
جدول ۱. قطر و درصد سنگ‌دانه‌های استفاده شده در مدل‌سازی.

درصد معادل هر قطر	قطر سنگ‌دانه‌ها
۱۲	۶
۱۴	۸
۱۳	۱۰
۱۱	۱۲
۱۳	۱۴
۱۱	۱۶
۱۱	۱۸
۱۵	۲۰

توزیع کرد. تعیین درصد و اندازه‌ی سنگ‌های نمونه با استفاده از استاندارد JSCE (مشخصات استاندارد برای سازه‌های بتنی ۲۰۰۲) انجام می‌شود (شکل ۴).<sup>[۳]</sup> در این مدل‌سازی سنگ‌دانه‌های بتن حدود ۳۸٪ سطح نمونه (اندازه‌ی ۲۰ میلی‌متر برای بزرگ‌ترین سنگ‌دانه) را تشکیل می‌دهند.

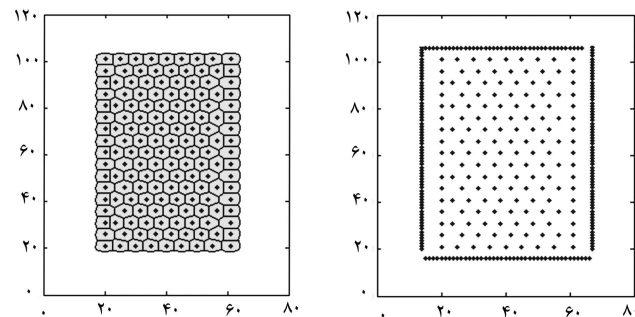
قطر و درصد (درصد حجم یک قطر مشخص نسبت به حجم کل سنگ‌دانه‌ها) سنگ‌دانه‌های لازم برای ایجاد یک منحنی دانه‌بندی کامل در جدول ۱ تعیین شده است.

برای تشکیل سنگ‌دانه در مدل از ترکیب چندین المان تولید شده در مرحله‌ی قبل استفاده می‌شود. این روش ایجاد سنگ‌دانه، امکان بررسی شکست سنگ‌دانه در بتن‌های با مقاومت بالا را فراهم می‌کند. در ادامه، الگوریتم ارائه شده برای



الف) نقاط توزیع شده به عنوان مرکز المان‌ها؛ ب) نمونه با المان‌های مرزی ناقص.

شکل ۱. مرحله اولیه ساخت المان‌ها



الف) افزودن نقاط اضافی؛ ب) نمونه با المان‌های مرزی کامل.

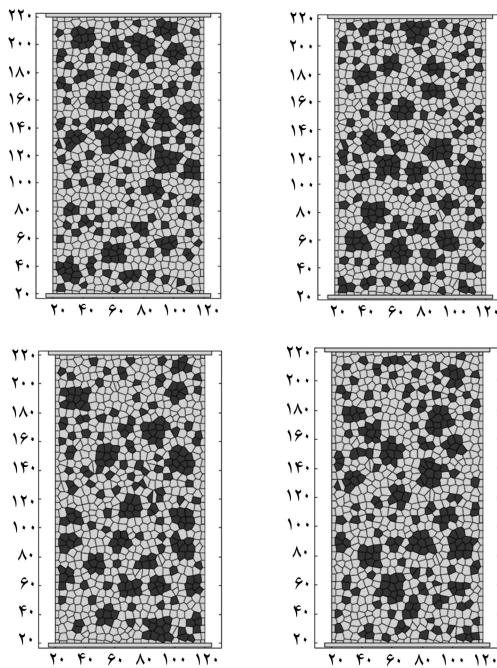
شکل ۲. نمونه با المان‌بندی کامل

```

تعداد تقسیم‌بندی سنگ‌دانه‌ها در قطرهای معادل (مثلاً قطرهای ۱۶، ۱۸، ۲۰) :
For i = ۱:
{
تعداد سنگ‌دانه‌های معادل با قطر i :
{
در نظر گرفتن المان z به منزله‌ی المان مرکزی سنگ‌دانه (از ماتریس حاصل شده از مرحله‌ی ۲)
For k = ۱:
تعداد المان‌های در نظر گرفته شده برای توزیع سنگ‌دانه‌ها :
{
تعیین فاصله‌ی مرکز المان شماره‌ی z با بقیه‌ی المان‌های k
آیا فاصله‌ی به دست آمده در بالا از شعاع معادل آن سنگ‌دانه کمتر است
در نظر گرفتن المان تمام المان‌های وارد شده به این بخش به منزله‌ی بقیه‌ی المان‌های سنگ‌دانه
End
}
End
}
حذف المان z و بقیه‌ی المان‌های تعیین شده برای این سنگ‌دانه، از ماتریس ایجاد شده در مرحله‌ی ۲
End
}
End

```

الگوریتم ۱. توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها.



شکل ۵. هندسه‌ی تکمیل شده‌ی چند نمونه‌ی بتنی با ابعاد و تعداد المان‌های یکسان و توزیع متفاوت سنگ‌دانه.

مثلث‌سازی<sup>۳</sup> به روش Delaunay استفاده می‌شود. اگر نقطه‌های توزیع شده در یک صفحه با اتصال‌هایی که هر نقطه را فقط به نقاط مجاور آن متصل می‌کند، به هم وصل شوند؛ بافت ایجاد شده یک بافت مثلثی Delaunay است.<sup>[۴]</sup> در شکل ۶ الف مثلث‌های ایجاد شده برای مراکز المان‌های یک نمونه نشان داده شده است. با توجه به اینکه مرکز یک المان در بافت ایجاد شده، یکی از گوشه‌های مثلث‌های اطراف خود است (شکل ۶ ب)؛ می‌توان با استفاده از تابع TRI در نرم‌افزار MATLAB،

توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها تشریح می‌شود:

الف) حذف المان‌های مرزی از المان‌های مورد نظر برای توزیع سنگ‌دانه‌ها،  
 ب) ایجاد یک چیدمان تصادفی از شماره‌ی المان‌های باقی‌مانده،  
 ج) توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها به روش الگوریتم ۱ انجام شده است.  
 هندسه‌ی تکمیل شده‌ی چندین نمونه‌ی بتنی با ابعاد و المان‌های یکسان و توزیع متفاوت سنگ‌دانه در شکل ۵ نشان داده شده است.

۷. اختصاص ممان اینرسی سنگ‌دانه‌ها: ممان اینرسی المان‌ها برای در نظر گرفتن درجه‌ی آزادی چرخشی آن‌ها استفاده می‌شود. از آنجا که سنگ‌دانه‌ها از چند المان تشکیل شده‌اند، نمی‌توان از جمع ممان اینرسی تک تک المان‌ها برای رسیدن به ممان اینرسی نهایی سنگ‌دانه استفاده کرد. بنابراین، برای محاسبه‌ی ممان اینرسی هر سنگ‌دانه، ممان اینرسی دایره‌ی معادل محاسبه و بین المان‌های تشکیل دهنده‌ی آن توزیع می‌شود.

### ۳. محاسبات پارامترهای مورد نیاز برای حل مدل

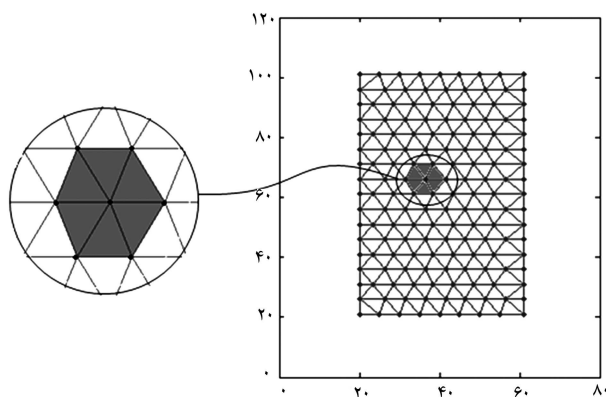
در این نوشتار، از روش RBSM اصلاح شده<sup>[۵]</sup> برای تشکیل مدل مکانیکی و چگونگی ارتباط المان‌ها با یکدیگر استفاده می‌شود. در ادامه، پارامترهای مورد نیاز در این روش‌ها با توجه به خصوصیات هندسه‌ی مدل به دست آورده می‌شوند.

#### ۱.۳. محاسبه‌ی ماتریس اتصال

در روش‌های گسسته، استفاده از یک الگوریتم قوی برای یافتن المان‌های در تماس با هم (در هر گام زمانی) ضروری است. در این مدل‌سازی به دلیل استفاده از مدل مکانیکی RBSM و تعریف فنر بین المان‌های مجاور هم، می‌توان از یک ماتریس اتصال در تمام طول حل مسئله استفاده کرد. برای رسیدن به این ماتریس از ویژگی

طول ماتریس اتصال هر المان، ستون دارند. بنابراین، هر عضو این ماتریس‌ها ( $h_{ij}$ ) نشان‌دهنده‌ی  $h_1$  و  $h_2$  المان  $i$  در اتصال با المان  $j$  است. با توجه به خصوصیات دیاگرام Voronoi اعضای این ماتریس‌ها، با نصف‌کردن فاصله‌ی مرکز تا مرکز دو المان به دست می‌آید.

همچنین  $b$ ، طول سطح مشترک دو المان مجاور هم است و با داشتن مختصات گوشه‌های هر المان می‌توان این ماتریس را به دست آورد. این ماتریس نیز به تعداد المان‌ها، سطر و به تعداد طول اتصال آن، ستون خواهد داشت. هر سطر ماتریس  $b$  که مربوط به طول سطح مشترک یک المان با تمام المان‌های مجاور خود است، با استفاده از ماتریس اتصال و این نکته که مختصات ابتدا و انتهای این طول در دو المان مجاور هم وجود دارند، به دست می‌آید.



شکل ۶. چگونگی تشکیل ماتریس اتصال.  
(الف) مثلث‌های ایجاد شده برای مراکز المان‌های یک نمونه؛ (ب) مثلث‌های اطراف مرکز یک.

### ۳.۳. محاسبه‌ی جرم و ممان اینرسی المان‌ها

برای به دست آوردن جرم ( $m$ ) هر المان، ابتدا مساحت آن محاسبه و سپس در چگالی ( $\rho$ ) ضرب می‌شود. به دلیل استفاده از چندضلعی‌های نامنظم باید روشی برای محاسبه‌ی جرم و ممان اینرسی (I) ارائه داد. با استفاده از دو ماتریس  $h_1$  و  $b$  این نکته که هر کدام از این چندضلعی‌ها متشکل از مثلث‌هایی با قاعده‌ی  $b$  و ارتفاع  $h_1$  هستند، می‌توان با محاسبه‌ی مساحت و ممان اینرسی مثلث‌ها، ماتریس‌های  $m$  و I کل نمونه را به دست آورد. بدین ترتیب هندسه‌ی مدل و پارامترهای مورد نیاز برای حل تکمیل می‌شوند.

### ۴. حل مدل تولیدشده [۶]

یک محیط گسسته از ذرات مجزا که مستقل از یکدیگر حرکت می‌کنند و فقط در نقاط تماس با هم اندرکنش دارند، تشکیل شده است. روش به کار گرفته شده برای تحلیل و بررسی چنین محیط‌هایی باید قادر به بررسی اثر تک تک المان‌ها بر روی هم و تعیین نیروهای بین المانی باشد. برای حل مسائل محیط‌های گسسته می‌توان از روش‌هایی مثل RBSM، DEM، DDA<sup>۴</sup> و یا روش‌های گسسته‌ی دیگر استفاده کرد. روش المان گسسته با داشتن قابلیت بررسی رفتار غیرخطی مصالح، روشی مناسب برای مدل‌سازی بتن است. در ادامه، چگونگی حل مدل مکانیکی تولیدشده در مرحله‌ی قبل، با استفاده از روش المان گسسته بیان می‌شود.

روش المان گسسته یک مدل عددی برای توصیف رفتار مکانیکی محیط‌های گسسته است. در این روش نیروهای تماسی ایجادشده بین المان‌ها و همچنین جابجایی هر کدام از آن‌ها با انجام محاسبات متوالی بر روی تک تک ذرات به دست می‌آید. جابجایی المان‌ها در اثر انتشار آشفته‌گی‌هایی است که از مرزها شروع می‌شوند. سرعت این انتشار، تابعی از خصوصیات فیزیکی محیط گسسته است. برای بررسی رفتار دینامیکی (انتشار آشفته‌گی)، اعمال بار به نمونه در بازه‌های زمانی<sup>۵</sup> کوچک و با ثابت فرض کردن سرعت و شتاب (در یک بازه‌ی زمانی) صورت می‌گیرد.

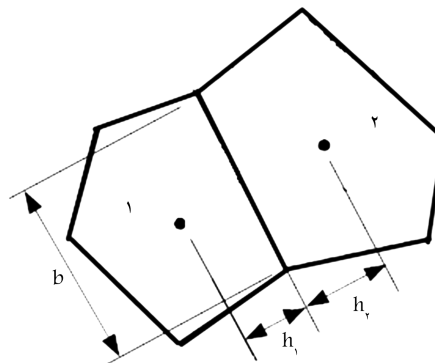
در روش المان گسسته، گام زمانی باید آنقدر کوچک باشد که در طول آن، آشفته‌گی موجود در یک المان فقط به المان‌های کناری خودش انتقال یابد. بدین صورت می‌توان نیروهای برابند واردشده بر هر المان را به طور مجزا و توسط اندرکنش با المان‌هایی که در تماس با آن هستند، به دست آورد. این روند، ویژگی اصلی و کلیدی روش المان گسسته است و آن را قادر به بررسی اندرکنش‌های غیرخطی تعداد زیاد المان، بدون نیاز به حافظه‌ی زیاد و یا نیاز به استفاده از روش سعی و خطا می‌سازد.

مثلث‌هایی که مرکز یک المان به منزله‌ی یکی از گوشه‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌هاست را جدا و در یک ماتریس ذخیره کرد. سپس با حذف گوشه‌های تکراری و شمارهی خود المان، شمارهی المان‌های در تماس با این المان به دست می‌آید. در ادامه، الگوریتم محاسبه‌ی ماتریس اتصال برای المان  $i$  توصیف شده است:  
(الف) با استفاده از تابع TRI در نرم‌افزار MATLAB، مثلث‌های Delaunay ایجاد می‌شوند.  
(ب) اعضای تمام مثلث‌هایی که المان  $i$  عضو آن‌هاست، در یک ماتریس ذخیره می‌شوند.  
(ج) با حذف اعضای تکراری و خود المان  $i$  ماتریس حاصل شده، ماتریس اتصال المان  $i$  خواهد بود.

### ۲.۳. محاسبه‌ی فاصله‌ی مرکز المان تا سطح مشترک و طول سطح

#### مشترک دو المان مجاور

المان ۱ و المان مجاور آن (المان ۲) را در نظر بگیرید (شکل ۷). با توجه به ویژگی‌های روش المان مجزا<sup>[۶]</sup> برای محاسبه‌ی سرعت یک المان نسبت به المان مجاورش، دو فاصله‌ی  $h_1$  و  $h_2$  برای در نظر گرفتن اثر چرخشی المان‌ها مورد نیاز است. چگونگی محاسبه‌ی این فواصل در ادامه بیان می‌شود.  $h_1$  فاصله‌ی مرکز المانی که محاسبات بر روی آن انجام می‌شود تا سطح مشترک المان مجاور، و  $h_2$  فاصله‌ی مرکز المان مجاور تا سطح مشترک دو المان است. ماتریس  $h_1$  و  $h_2$  به تعداد المان‌های سطر و به



شکل ۷. پارامترهای هندسی دو المان در تماس با هم.

است. روش بدین صورت است که ابتدا با به‌کارگیری قانون نیرو-جابجایی نیروهای تماسی ناشی از اعمال جابجایی اولیه یک المان محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از قانون دوم نیوتن حرکت المان‌ها در نتیجه‌ی نیروهای تماسی بین آن‌ها به‌دست می‌آید.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، الگوریتم تولید خودکار هندسه‌ی نمونه‌های بتنی برای استفاده در مدل‌سازی آن‌ها به روش‌های گسسته ارائه شد. این مدل نسبت به مدل‌های ارائه‌شده تاکنون، دارای این پیشرفت‌هاست:

۱. استفاده از یک منحنی دانه‌بندی استاندارد برای سنگ‌دانه‌ها مطابق با نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی؛
۲. فراهم‌شدن امکان بررسی تأثیر منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر روی مقاومت پیشینه، کرنش نظیر آن و شکل ترک‌خوردگی نمونه؛
۳. استفاده از شکل‌های نامنظم برای سنگ‌دانه‌ها که مدل‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند؛
۴. مدل‌سازی سنگ‌دانه‌ها با چند المان و فراهم‌کردن امکان بررسی شکست در آن‌ها در بتن‌های با مقاومت بالا؛
۵. ارائه‌ی الگوریتم جدید برای توزیع تصادفی سنگ‌دانه‌ها در بافت بتن؛
۶. فراهم‌کردن امکان بررسی تأثیر توزیع سنگ‌دانه‌ها بر روی رفتار نمونه؛
۷. ارائه‌ی برنامه‌ی تولید خودکار هندسه‌ی مدل با تعیین ابعاد و تعداد المان‌ها.

الگوریتم این روش برای حل یک سیستم متشکل از المان‌های صلب به‌این صورت است:

۱. نمونه متشکل از المان‌های صلب مقید<sup>۶</sup> و بدون بارگذاری در موقعیت اولیه‌ی خود قرار دارد.
  ۲. هنگامی که بارگذاری (مثلاً: بارها، جابجایی‌ها یا نیروهای گرانشی مرزی) بر نمونه اعمال می‌شود، اثر بارگذاری به‌صورت هم‌زمان برای کل المان‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. بلکه بررسی به‌صورت تک تک و مجزا بر روی هر المان انجام می‌شود.
  ۳. جابجایی‌های انتقالی و چرخشی المان رهاشده از قیود<sup>۷</sup>، بر طبق معادلات کنترل‌کننده<sup>۸</sup> (در اینجا معادلات حرکت) به‌دست می‌آیند. این در حالی است که سایر المان‌ها در موقعیت و شرایط اولیه‌ی خود قرار دارند.
  ۴. نیروهای تماسی بین المان رهاشده و المان‌های کناری آن بر طبق قوانین و موقعیت تماس آن‌ها با هم محاسبه می‌شوند. با این مکانیسم اثر بارگذاری المان به المان انتقال می‌یابد.
  ۵. در مرحله‌ی بعد این المان‌های کناری هستند که به‌صورت تک تک از قیود اولیه آزاد می‌شوند و حرکتشان بر اثر نیروها و ممان‌های انتقال‌یافته از المان قبل محاسبه می‌شود.
  ۶. مرحله‌های ۱ تا ۵ بر روی تمام المان‌های مجموعه تا کمینه<sup>۹</sup> شدن نیروها و ممان‌های خارج از تعادل<sup>۱۰</sup> اعمال می‌شود.
- محاسبات انجام‌شده در روش المان گسسته ترکیبی از اعمال قانون دوم نیوتن برای حرکت المان‌ها و قانون نیرو-جابجایی برای به‌دست‌آوردن نیروها در نقاط تماس

## پانویس‌ها

1. discrete element method
2. rigid body spring method
3. triangulation
4. discontinuous deformation analysis
5. time step
6. constrained
7. relaxed
8. governing equations
9. minimum
10. out-of-balance

## منابع (References)

1. Rossi, P., Ulm, F.J. and Hachi, F. "Compressive behavior of concrete: Physical mechanisms and modeling", *J. of*

*Eng. Mechanics*, **122**(11), pp. 1038-1043 (1996).

2. Camborde, F., Mariotti, C. and Donze, F.V. "Numerical study of rock and concrete behavior by discrete element modeling", *Computers and Geotechnics*, **27**(4), pp. 225-247 (2000).
3. Nagai, K., Sato, Y. and Ueda, T. "Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBMSM", *J. of Advanced Concrete Technology*, **2**(3), pp. 359-374 (2004).
4. O'Rourke, J., *Computational Geometry*, in C. 2nd Ed. Cambridge, London, Cambridge University Press (1994).
5. Zhuolin, W. "Numerical simulation of failure process of concrete under compression based on mesoscopic discrete element model", *Tsinghua Science and Technology*, **13**(S1), pp. 19-25 (2008).
6. Cundall, P. and Strack, O. "Discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, **29**(1), pp. 47-65 (1979).

# AUTOMATIC MESH GENERATION FOR CONCRETE SPECIMENS, WITH RANDOM DISTRIBUTION OF AGGREGATES AND SOLUTION WITH THE DISCRETE ELEMENT METHOD

**R. Abbasnia**(corresponding author)

abbasnia@iust.ac.ir

**M. Aslami**

maslami@civileng.iust.ac.ir

**Dept. of Civil Engineering**

**Iran University of Science and Technology**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 23-27, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 26 February 2011; received in revised form 20 September 2011; accepted 17 October 2011.

## Abstract

Concrete is perhaps the most available manufactured material. The low cost, wide availability, ease of use and high durability of concrete has led to its continually increasing usage. It can be a hastily prepared, low-grade mixture for simple applications, or can be a firmly controlled, engineering material for high-performance structures. Complex physical and chemical interactions exist in cement, which plays a main role in the properties of concrete. This complicated structure leads to a complexity in fracture processes. Considering this reason, most mechanical properties of concrete and studies on its behavior are based on experimental results. Since experiments require time and money, providing mathematical models to simulate the behavior of concrete is necessary.

In general, modeling fracture and damage within concrete, and other quasi-brittle materials, has been classified as either continuum or discrete approaches. Continuum models provide an average description of material behavior for a representative volume element. Because the width of the fracture process zone (FPZ) in concrete can be sizeable (roughly several times the maximum aggregate size), simulation of concrete fracture at meso-scale, with continuum approaches, is not suitable. Use of discrete micromechanical models is motivated by the need for fundamental knowledge, to improve material behavior. If the material structure (e.g at micro/meso scale of observation) is explicitly represented, the models provide a direct way for studying crack patterns; mechanisms of softening in post-peak branches and size effect/scaling phenomena.

In this paper, two-dimensional geometrical models for concrete are generated, taking the random distribution of aggregates at mesoscale into consideration. The generation procedure is based upon the Voronoi diagram method. The aggregate particles are constructed by sev-

eral polygons and then placed into the concrete model, in such a way that there is no intersection between them. In this method, simulation of the fracture of aggregate in high strength concrete is feasible. The generated model can be used for modeling concrete with the discrete method. Finally, the model analyzed using the discrete element method.

**Key Words:** Concrete specimen, Voronoi diagram, aggregates, random distribution, connectivity matrix, discrete element method.