

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیست و دوم، شماره۳، سال ۱٤۰۱

# بررسی پارامتری عوامل موثر در مدلسازی بتن در مقیاس مزو

رضا فلاحی'، مصطفی امینی مزرعهنو' \*، محمد فیاض"، محسن امینالرعایا <sup>٤</sup>

۱- دانش آموخته مهندسی عمران گرایش زلزله از دانشگاه تهران
 ۲- استادیار دانشکده پدافند غیرعامل دانشگاه امام حسین (ع)
 ۳- استادیار دانشکده پدافند غیرعامل دانشگاه امام حسین (ع)
 ۶- دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش سازه از دانشگاه تربیت مدرس

#### maminimz@ihu.ac.ir

تاريخ پذيرش:١٤٠١/٠٤/١

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۰۵/۳۱

#### چکیدہ

مدلهای عددی راهکاری مقرون به صرفه در مقایسه با تستهای میدانی و آزمایشگاهی هستند که در صورت لحاظ نمودن ویژگیهای دقیق ماده توانایی پیش بینی رفتار مصالح را با دقت قابل قبولی دارند. مزیت دیگر مدلهای عددی در مقیاس مزو، قابلیت ارائه رفتار اندرکنش اجزاء مختلف مصالح غیرهمگن مانند بتن است که این ویژگی در پیش بینی رفتار بتن در مقابل بارهای دینامیکی، کارآیی بالایی دارد. به منظور انجام مدلسازی بتن در مقیاس مزو پلتفرمی برای ایجاد نمونههای بتنی با درنظرگیری سنگدانه، ملات و الیاف ایجاد شد. بستر ایجاد شده در این پژوهش قادر است سنگدانههای بیضوی مطابق با منحنی دانه بندی دلخواه به صورت کاملا تصادفی تولید و با کنترل عدم تداخل سنگدانهها در کنار یکدیگر به صورت از پیش تعیین نشده درون مرزهای قالب جایگذاری کند و پس از معین شدن هندسه نمونه و مش بندی آن، مدل ساخته شده تد بایر توردی برنامههای تحلیل عددی می شود و بارگذاری فشاری و کششی بر روی آن انجام میگیرد. با استفاده از مدلهای عددی ایجاد شده پارامترها شامل نسبت حجمی سنگدانه در نمونه، میزان مجاز کشیدگی سنگدانههای بیضوی، درنظرگیری یا عدم در نظرگیری المان کارگیری الیاف انجام شده است. در تحلیلهای انجام شده بیشینه مقاومت فشاری و میزان شکل پذیری بتن و در موردی می گار و به بررسی قرار گرفته است. در تحلیلهای انجام شده بیشینه مقاومت فشاری و میزان شکل پذیری بتن و در مواردی مسیر گسترش ترک مورد

واژگان كليدى: مقياس مزو، مدلسازى عددى بتن، نمونه فشارى تكمحورى.

#### ۱- مقدمه

در مطالعات و پژوهش های انجام شده در حوزه بتن، مدلسازی رفتار مصالح بیشتر در سه مقیاس میکرو، مزو و

ماکرو انجام گرفته است. در مدلسازی مقیاس ماکرو، بتن به عنوان یک ماده تکفاز و اغلب همگن در نظر گرفته می شود. همچنین یکی از موضوعات اصلی مورد بررسی در این

مطالعات اندرکنش بتن با آرماتور است. در مدلسازی بتن در مقياس ميكرو، معمولا بخش ملات مورد بررسي قرار مي گيرد و مخلوط سيمان و آب (چسب سيمان) به صورت کریستال های سیلیکات آبدار مدلسازی می شوند و با درنظرگیری اشکال هندسی بلورها، روابط پایداری بررسی می شوند. اما در مدلسازی مقیاس مزو، بتن به صورت یک محیط چندفازی و متشکل از سنگدانهها، ملات سیمان و سایر افزونه ها مانند انواع الياف و با لحاظ برخي نقايص (اعم از حبابها، ناحیه مرزی، ترکها و غیره) بررسی میشوند. مدلسازی و آنالیز بتن در این مقیاس می تواند مبین صفات بتن غیرمسلح ساخته شده باشد. هر کدام از فازهای نامبرده به صورت یک ماده همگن و مجزا در نظر گرفته می شوند و با استفاده از روش های عددی از قبیل اجزای محدود، مقاومت بتن در برابر بارگذاری اندازه گیری و ارزیابی می شوند.

## ۲– پیشینه یژوهش

در پایاننامه والراون<sup>۲</sup> با بررسی بتن در مقیاس مزو و با سادهسازی شکل هندسی سنگدانه و درنظر گرفتن آن به صورت کروی، زوایای ترک قالب بتنی پیش بینی و مدل سازی شده است [1]. بازانت و همکاران با شبیه سازی شبکه سنگدانهها در نمونه بتنی به یک خرپای سهبعدی شکل (۲-۱) توزیع تنش در یک نمونه بتن را به صورت عددی شبیهسازی کردند. سنگدانهها به صورت کروی و در قطرهای مختلف توليد و توزيع شدهاند. تيم تحقيقاتي در اين پژوهش تلاش كردند كه مدول الاستيسيته و نمودار تنش-كرنش نمونه بتنی را با روش های عددی بازسازی کنند [2].

### مصطفی امینی مزرعهنو و همکاران



Fig. 1.2. D simulation of aggregates to truss [2].

گاربوسی<sup>٤</sup> در سال ۲۰۰۲ به صورت سهبعدی با استفاده از پرتوی-X شکل سنگدانهها در نمونه بتنی را تحلیل و روشهایی عددي براي شبيهسازي سنگدانههايي با هندسه نامنظم ارائه نموده است. این پژوهش برخلاف پژوهشهای قبلی که برای مدلسازی اشکال دوبعدی فرمول ارائه کرده بودند، روابطی هندسی برای تعریف احجام نامنظم در فضا را توسعه داده است. روابط پیشهادی در این پژوهش قادر به مدلسازی احجام با تیزی در گوشهها و وجود تقعر در حجم است [3].

هيفنر<sup>°</sup>و همكاران با انجام تحقيق براى مدلسازى اشكال نامنظم در فضا، روندی برای چینش احجام تولید شده در فضا بدون تداخل سنگدانهها ارائه و در یک گام فراتر همچنین روشی برای فشرده کردن سنگدانهها پیشنهاد نمودهاند. نتیجه نهایی یژوهش منجر به تولید سنگدانههای بیضوی و مستطیلی با گوشههای گردشده در نمونههای مکعبی بتنی شکل (۲-٤)، شده است [4-5].

کس\_ماتکا<sup>۲</sup>و کرکھوف<sup>۷</sup>در پژوهش\_ی در س\_ال ۲۰۱۱ منحنی های مانده روی الک بهینه برای ساخت بتن را پیشنهاد و بررسى كردەاند [6].

لايته أو همكاران در مدل سازي نمونه بتن مكعبي در مقياس مزو مسير ترک را پيش بيني و با نمونه فيزيکي درستي آزمايي این امر را انجام داده اند و در پژوهش دیگری با بتن های الیافی

> Interfacial Transition Zone (ITZ) Walraven Bazant Garboczi

Hafner **k**osmatka **k**irkhoff Leite

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

مسير ترک تحت فشار را پيش بيني کردهاند [7–8]. مدلسازی شده را بررسی و برای شبیهسازی ۲– بعدی از مش بندى مثلثي استفاده نمودهاند [9].

اونگر<sup>۱۲</sup>و اکارت<sup>۱۳</sup>در پژوهشی المانهای مختلف بتنی، در اندازههای مختلف را در مقیاس های مزو و ماکرو بررسی کردند. سنگدانههای درنظرگرفتهشده در مقیاس مزو به صورت بیضوی بوده اند. تولید، جایگذاری و کنترل عدم تداخل سنگدانههای این پژوهش بر مبنای روشی ماتریسی معرفی*شد*ه توسط وانگ<sup>ئ</sup>او همكاران انجام شده است [11-13].

ويتمن°و همکاران به منظور مدلسازی مواد چند فازی روشی

هدف از این پژوهش، مدلسازی نمونههای مکعبی بتن به ابعاد ۱۰۰ و ۱۵۰ میلیمتری و در دو حالت غیرمسلح و مسلح به الیاف در مقیاس مزو و بررسی رفتار آنها تحت فشار تکمحوری با استفاده از مدل یلاستیسیته آسیبدیده (CDP) در نرمافزار ABAQUS است. بدینمنظور، ابتدا با استفاده از یک برنامه یباده شده در محیط MATLAB، هندسه محیط دوفازی نمونه متشکل از سنگدانه و ملات ماسهسیمان را با توزیع مناسب و جانمایی تصادفی سنگدانهها داخل حجم نمونه ایجاد کرده و سپس گسستهسازی هندسی مساله با توزیع مش مناسب روی هر دو فاز نمونه (سنگدانه + ملات ماسه سیمان) و در ادامه تخصیص مصالح و مدل رفتاری متاسب با هر فاز، امکان پذیر خواهد شد.

در کتاب مسائل ریاضی شوارتز (روشی نوین برای کنترل تداخل احجام بيضوى پيشنهاد داده است [10].

هوشمند برای مشبندی غیرهمگن مواد را ارائه دادهاند [14]. ریگر<sup>۲</sup>و مفتاح<sup>۷</sup>برای مدلسازی بتن در مقیاس مزو، معادلات رفتاری متفاوتی برای سنگدانه، ملات و ITZ در نظر گرفتند. سنگدانه ها به صورت کروی و در ۵ اندازه در نمونه مکعبی یخش شدەاند [15].

0.045

دوره بیست و دوم / شماره ۳/ سال ۱٤۰۱

## ۳- روش حل مساله ۳-۱- ساخت نمونه با سنگدانههای کروی

برای مدلسازی نمونه مکعبی بتن، ابتدا یک برنامه با استفاده از نرمافزار MATLAB توسعه داده شد که سنگدانههای کرویشکل در اندازههای مختلف تولید نموده و آنها را متناسب با هندسه و حجم نمونه بتنی مدل شده توزیع نماید. نکته مهم در تولید سنگدانهها، تقریب و نزدیکسازی درصد سنگدانه تولید شده از هر اندازه (یا قطر) با درصد استاندارد مانده روی الک متناسب با آن قطر است. این درصدهای وزنی مانده بر طبق منحنیهای فولر^اباید به عنوان ورودی به برنامه داده شوند و پس از آن درصد سنگدانه تولید شده توسط برنامه (در هر قطر) با درصدهای وزنی استاندارد مانده روی هر الک (که توسط کاربر تعريف شده) کنترل می شود. در اين برنامه به منظور توليد سنگدانه از منحنی های بهینه توصیه شده توسط کسماتکا و كركهوف استفاده شده است [6]. نمودار درصد وزني بهينه مانده روی هر الک (مطابق پیشنهاد مرجع ٦) در شکل(۳–۱) آمده است.



شکل ۳-۱. منحنی درصدحجمی دانهبندی بهینه ارائه شده [7]. Fig. 1.3. Optimal grain aggregation curve of aggregates [6]. لازم به ذکر است که بتن تولید شده با فرض بزرگترین سنگدانه کوچکتر از ۲۵ میلیمتر ساخته شده است. به منظور جلوگیری از پیچیدگی محاسبات و تولید سنگدانه های ریز، تنها سنگدانه ها برای ٦ الک اول توليد مي شود.

!₩ang
Wittmann
Wrigger
Moftah
Fuller

Nan Mier \schwarz Mynger! \Eckardt

Schlangen

بررسی پارامتری عوامل موثر در مدلسازی بتن در مقیاس **مزو** 

به منظور تولید کاملا تصادفی سنگدانهها و عدم وقوع چولگی ناخواسته در توزیع لگاریتمی سنگدانهها از روابط ارائه شده در پژوهش اونگر و اکارت استفاده شده است [11].  $d_{eqv} = \frac{d_{min}d_{max}}{\sqrt[3]{X}d_{min}^3 + (1-X)d_{max}^3}$ , 0 < X < 1(1).

که در آن dmin و dmax به ترتیب اندازه قطر بالا و پایین بازه سنگدانه تولیدشده (و به عبارت بهتر، اندازه دو الک متوالی در منحنی دانهبندی) هستند و X یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین • و ۱ است و deqv قطر تصادفی سنگدانه در بازه دو الک انتخابی است. تولید سنگدانه با قطرهای تصادفی و در بازه مابین اندازه دو الک متوالی، تا جایی ادامه مییابد که درصد وزنی استاندارد مانده روی الک ریزتر (متناسب با اندازه d<sub>min</sub>) تا حد مطلوبی حاصل شده باشد. حد مطلوب در نظر گرفته شده برای توقف تولید سنگدانههای تصادفی مابین دو الک متوالی، از ۹۵ درصد مقدار استاندارد (تعریفشده بر اساس منحنی فولر) برای الکهای درشت شروع میشود و هرچه الک ریزتر میشود این حد به ۱۰۰٪ نزدیکتر می شود. در شکل (۳–۲)، یک نمونه از منحنی دانهبندی عبوری از الک برای سنگدانههای تولید شده توسط برنامه، با منحني فولر هدف مقايسه شده است. اين منحني برای نمونه مکعبی ۱۰ سانتی متری با نسبت حجمی سنگدانه ۷۵ درصد توليد شده است.



شکل ۳-۲. منحنی دانهبندی تجمعی سنگدانه تولید شده در مقایسه با منحنی

**Fig. 2.3.** Cumulative aggregate aggregation curve produced compared to the target curve.

پس از تولید سنگدانهها با رعایت تنا سب ماندههای روی الک، باید این سنگدانههای کروی در فضای مکعبی نمونه به صورت کاملاً تصادفی و در عین حال یکنواخت و بدون تداخل با یکدیگر جانمایی شوند.

۲-۲- جانمایی سنگدانهها در داخل حجم نمونه

به منظور جانمایی سنگدانههای تولیدشده، ابتدا باید سنگدانهها را بر اساس حجم و از بزرگ به کوچک مرتب و با این ترتیب جاگذاری نمود چرا که سنگدانههای کوچکتر فضای سنگدانههای بزرگ را اشغال نکنند. مختصات مرکز سنگدانه به صورت تصادفی و با فرض توزیع یکنواخت انتخاب می شود. سپس هر سنگدانه جدید که جانمایی می شود، باید عدم تداخلش با تمامی سنگدانههای جانمایی شده قبلی کنترل شود. رابطه کنترل عدم تداخل سنگدانهها با یکدیگر به صورت زیر است:

 $\sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 + (z1-z2)^2} > (r1+r2)$  (2). (2). x و z مختصات مرکز هر سنگدانه کروی است. پس از جانمایی هر سنگدانه و کنترل عدم تداخل آن با تمامی سنگدانههای جانمایی شده قبلی، هندسه مدل ساخته شده و آماده مشبندی خواهد بود. شکل (۳–۳)یک نمونه مکعبی ۱۵ سانتی متری ساخته شده با سنگدانه های کروی به روش گفته شده را نشان می دهد.



Fig. 3.3. Spherical aggregates located in a cube specimen.

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

(7).

$$D_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 0 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & -c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

۳- تشکیل ماتریس مبین دوران با استفاده از زوایای اویلری<sup>۱۹</sup>
 چرخش در فضا (θ, ψ, φ) معادل دوران های ( coll)، مطابق زیر:

$D_r =$	$\begin{bmatrix} C\psi C\varphi - C\theta S\psi S\varphi \\ -C\psi S\varphi - C\theta S\psi C\varphi \\ S\theta S\psi \\ 0 \end{bmatrix}$	<i>SθSφ</i> <i>SθCφ</i> <i>Cθ</i> 0	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
		آن	.(ہ) که در آ

$$s\theta = \sin \theta, s\psi = \sin \psi, s\phi = \sin \phi,$$
  
$$c\theta = \cos \theta, c\psi = \cos \psi, c\phi = \cos \phi,$$

است.

ب) یک بردار چهار مولفهای<sup>ان</sup>که ســه مولفه اول آن، بردار یکه معرف جهت هســـتند و مولفه چهارم میزان دوران در واحد رادیان را نشان میدهد.

نخستین نمونه ها برای کنترل عدم تداخل سنگدانه ها در ابعاد  
کوچکتر و با تعداد کمتر ســنگدانه ها سـاخته شــدند تا بتوان از  
عدم تماس و در هم رفتگی سنگدانه ها اطمینان پیدا کرد.  
٤- با تشکیل ماتریس های مبین شعاع، جابه جایی انتقالی، دوران  
بیضوی و نمایش صـحیح سـنگدانه ها در فضـا، حال ماتریس  
بیضوی و نمایش صحیح سـنگدانه ها در فضا، حال ماتریس  
معرف بیضوی به فرم زیر قابل تشکیل است:  
$$E = D_t^T D_r^T \overline{E} D_r D_t$$
  
(9).  
ماتریس *T* تمامی ویژگی های یک بیضوی تولید شـده را در بر

۲-۳- ساخت نمونه با سنگدانه بیضوی

در تولید نمونه با سنگدانه بیضوی یک پارامتر جدید به نام ضریب شکل برای بیضوی تعریف می شود. این پارامتر حدود تغییر نسبت قطر بزرگ به کوچک بیضوی را مشخص می کند. برای این که یک سنگدانه از روزنه الک عبور کند تنها و تنها کافی است که ۲ قطر از ۳ قطر بیضوی کوچکتر یا مساوی روزنه الک باشند. اگر سه شعاع بیضوی به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب گردند و  $r_1$  بزرگترین شعاع،  $r_2$  شعاع میانی و  $r_3$  کوچکترین شعاع باشد،  $r_2$  معادل نصف اندازه تولید شده در قسمت قبل (یا همان  $d_{eqv}$ ) خواهد بود:

$$d_{eqv} = 2r_2$$

.(3) فرض فوق کافی است تا سنگدانه بیضوی در بازه الک انتخابی قرار گیرد. سـپس اندازههای دو شــعاع دیگر براســاس پارامتر شکل به صورت زیر تعریف میشود:

$$r_{1} = \left(1 + u_{1}\frac{m-1}{m+1}\right)r^{2}$$
$$r_{3} = \left(1 - u_{3}\frac{m-1}{m+1}\right)r^{2}$$

که در آن m پارامتر شکل است و  $u_1$  و  $u_3$  و  $u_3$  به ترتیب هرکدام یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه • و ۱ هستند. پس از تولید سنگدانهها، جانمایی و توزیع آنها بر اساس روشی ماتریسی مطابق پیشنهاد وانگ [12–13] که در ادامه تبیین می شود انجام می گیرد. این روش مبتنی بر یک ماتریس ٤ در ٤ به عنوان ماتریس معرف هر یک از سنگدانههای بیضوی است. چگونگی تشکیل ماتریس معرف بیضوی شامل چهار مرحله به شرح زیر است:

(4-5).

$$\overline{E} = \begin{bmatrix} 1/r_1^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1/r_2^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1/r_3^2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(6).

۲- ماتریس مبین انتقال که با مختصات مرکز بیضوی مشخص

Euler angles

Quaternion

بررسی پارامتری عوامل موثر در مدلسازی بتن در مقیاس **مزو** 

 $f(\lambda) = \det(\lambda E_1 + E_2)$ (10).

خوشبختانه این معادله مشخصه در صورت ریشهدار بودن، دو ریشه حقیقی مثبت دارد که این موضوع به تسریع روند حل کمک میکند.

به منظور حل معادله مشخصه بالا می توان از حل کننده های <sup>۱</sup> (ائه شده در در نرمافزارها استفاده کرد یا اینکه با افزایش لگاریتمی مقدار لم تغییر علامت *f* را کنترل کرد و چنانچه تغییر علامت رخداده باشد نشان می دهد که دو بیضوی با یکدیگر تداخل ندارند. تغییرات لم به دلیل هم ارزی دو ماتریس معرف بیضوی ها باید لگاریتمی باشد. پس از تولید سنگدانه ها و جانمایی آن ها بر مبنای کنترل عدم تداخل با یکدیگر به روش ذکر شده بالا و نیز کنترل عدم بیرون زدگی از مرزهای نمونه، مدل هندسی نمونه ساخته خواهد شد. در شکل (۳–٤) سنگدانه های بیضوی ساخته شده برای یک نمونه مکعبی نمایش داده شده است.

**شکل ۳–٤**. نمونه مکعبی ساختهشده با اندازه ٥٠ میلیمتر، ضریب شکل ۳ و بزرگترین سنگدانه ۱۲ میلیمتر و کوچکترین سنگدانه ٤ میلیمتر



Fig. 3.4. A cubic sample with dimension of 50 mm, shape coefficient equals to 3, the largest aggregate 12 mm and the smallest aggregate 4 mm.

مصطفی امینی مزرعەنو و همکاران

## ۳-۳- مشوبندی و تخصیص ماده پس از جانمایی تصادفی، نوبت به مشربندی نمونه میرسد. برای

این منظور، ابتدا نمونه در دستگاه مختصات دکارتی به صورت ساختیافته <sup>۳</sup>و منظم و با استفاده از المانهای سالید ۸ گرهی مش بندی می شود، به گونه ای که هر بعد المان تولید شده، حداکثر برابر یک میلی متر باشد. موقعیت قرارگیری نقطه مرکزی هر المان در هر یک از دو فاز سنگدانه یا ملات تعیین کننده نوع ماده ای است که باید به آن المان اختصاص داده شود. بنابراین چنانچه مختصات مرکز یک المان درون هندسه سنگدانه قرار گیرد، ویژگی های مصالح و مدل رفتاری سنگدانه به آن المان منتسب می شود و در غیر این صورت مصالح تشکیل دهنده آن المان، ملات در نظر گرفته خواهد شد. شرط لازم و کافی برای قرارگیری نقطه ای به مختصات این مرکز یک المان به مختصات ارضای رابطه زیر است:

(x − cx)<sup>2</sup> + (y − cy)<sup>2</sup> + (z − cz)<sup>2</sup> ≤ r<sup>2</sup> (11). و شرط قرار گیری یک نقطه در سنگدانه بیضوی به صورت زیر است:

$$X = [x \ y \ z \ 1]^T; \quad X^T E X \le 0$$

روند تخصیص المان به سنگدانهها به این ترتیب است که ابتدا المانهایی که مرکزشان درون سنگدانهها قرار میگیرد شناسایی میشود سپس فضای باقیمانده به ملات اختصاص داده میشود. برای مثال نمونه مشبندی یک نمونه بیضوی در ذیل در شکل (–۳ ۵) آمده است.

**شکل ۳–**۵. نمای المانهای تخصیص داده شده به سنگدانه در یک نمونه با سنگدانههای بیضوی



۲Structured mesh

7 Solver

(12).

دوره بیست و دوم/ شماره ۳/ سال ۱٤۰۱

Fig. 3.5. View of the elements assigned to the aggregate in a sample with elliptical aggregates با تکمیل فرآیند مش بندی نمونه بتنی، تهیه ورودی نرمافزارهای تحلیل دینامیکی قابل انجام است. نمونه با مش بندی سازهای مکعبی به وسیله برنامه متن محوری که نوشته شده، تبدیل به ورودی های نرمافزارهای Abaqus و Diana شده است.

بر پایه نتایج تحقیقات آز مایشیگاهی، المان های ITZ ضخامتی در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر دارند، که بسیار کوچکتر از اندازه مشبندی در پژوهش حاضر است؛ به همین علت مشبندی نمونه بدون تغییر انجام می شود و میزان افت مقاومت ناحیه تعدیل می شود. این تعدیل به صورتی انجام می شود که نتایج تحلیل با نمونه آزمایشگاه قابل هماهنگ شود. در ادامه پژوهش فاز ITZ نیز به نمونه اضافه شد و با تشخیص المانهای ملات پیرامون هر سنگدانه آن المان را به ITZ تخصیص می دهد. پس از تخصیص المانها، فایل ورودی مربوط به هر برنامه تولید می شود. در شکل (۳–۲) نمونه مش بندی شده با در نظر گرفتن المانهای ITZ.

به منظور در نظر گرفتن المان ITZ مدلسازی با موازی فرض کردن ملات و المان های ITZ پایه گذاری شد؛ به این صورت که بیشترین مقاومت ملات و ITZ به شکلی، به ترتیب زیاد و کم شدند که با فرض این که چنانچه دو ماده به صورت موازی در کنار هم قرار گرفته با شند، مقاومت مجموعشان برابر با مقاو مت ملات در نمو نه بدون درنظر گرفتن ITZ باشد. فرضیات زیر نیز به منظور سادهسازی استفاده شدند:

 المانها همه یکاندازه هستند و تعداد المانها بیانگر حجم ITZ و حجم ملات هستند. این فرض در مشبندی سازهای مکعبی مطابق با واقعیت و در مشبندی چهاروجهی غیرساختاریافته، فرضی ساده شده است.

$$F_{c\,ITZ} = (1 - 10\% * \frac{N_{total}}{N_{ITZ}}) * F_c \quad \bullet$$

$$F_{c mortar} = (1 + 10\% * \frac{N_{total}}{N_{mortar}}) * F_c \bullet$$

- $F_{c} * N_{total} = F_{c \, ITZ} * N_{ITZ} + F_{c \, mortar} * \bullet N_{mortar}$
- مدول الاستیسیته جدید ملات و ITZ با در نظر گیری

رابطه مرسوم در نظر مدول الاستیسیته بتن با جذر حداکثر مقاومت فشاری به دست می آید.  $E_{ITZ} = \sqrt{\frac{F_{c\,ITZ}}{F_{c}}} E_{c}$  ,  $E_{mortar} = \sqrt{\frac{F_{c\,mortar}}{F_{c}}} E_{c}$  •

**شکل ۳-۳.** نمونه مشربندی شده با در نظر گرفتن المان ITZ. المانهای قرمز ITZ و المانهای آبی سنگدانه هستند.



Fig. 3.6. Meshed sample with ITZ consideration. The red elements are ITZ and the blue elements are aggregates.

## ٤- شبیهسازی مدلها و ارزیابی نتایج فرضیات مدلسازیها

- در مدلهای مزو ساخته شده سنگدانههای بزرگتر از ۲,۳٦
   میلیمتر مدلسازیمیشوند و سنگدانههای کوچکتر بخشی
   از ملات فرض میشوند.
- منحنی دانهبندی ثابت درنظرگرفته شده و مطابق با منحنی
   اشاره شده است.
- نمونه مرجعی که مقایسه با آن نمونه انجام می شود دارای درصد حجمی ۷۵ درصد و پارامتر شکل برابر ۲ است و در نمونه های دیگر چنانچه درصد حجمی تغییر کند، پارامتر شکل برابر ۲ است و چنانچه پارامتر شکل تغییر کند، درصد حجمی برابر ۷۵ درصد است.
- در مش بندی های تتراهدرون بیشینه و کمینه اندازه یال
   المان ها به ترتیب برابر با ٤ میلی متر و ٨,٠ میلی متر است و
   حداقل زاویه رئوس برابر با ٣٠ درجه.
- نمونهها تحت آزمایش فشاری و کششی نسبتا سریع با نرخ
   ۱ میلیمتر بر ثانیه بارگذاری شدند.

هر پنج در صد افزایش در صد سنگدانه، بیشترین مقاومت ۰/۰ درصد افزایش پیدا میکند. با وجود رفتار تقریبا خطی افزایش مقاومت به ازای افزایش در صد سنگدانه، اما سطح زیر نمودار تنش-کرنش چنین رفتاری ندارد و بیشترین مساحت متعلق به ۵۷ در صد و کمترین مساحت مربوط به نسبت سنگدانه برابر با ۸۰ درصد است.



Fig. 4.2. Stress-strain diagram with different volume ratios of aggregate.

تاثیر پارامتر شکل سنگدانه بر مقاومت نهایی بتن با دقت در شکل (۲-۳) نتایج مدلسازی ها نشان می دهد، برخلاف آنچه تصور می شود، هرچه سنگدانه های نمونه گردگو شهتر بودهاند، نمونه مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. شکل پذیری نمونه ها یا به عبارت دیگر سطح زیر منحنی در نمونه ها نیز مانند بیشترین مقاومت، با گردتر شدن سنگدانه ها افزایش یافته است اما مشاهده می شود که در قسمت پس از قله در منحنی 4=M، نمودار با شیب ملایمتری افت پیدا می کند.



## اعتبارسنجي نتايج

به منظور اعتبارسنجی نتایج مدلسازی عددی، نمودار استخراج شده آزمایشهای فشاری در نرمافزار با نمودار مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. سعی شده است که تمامی پارامترهای قابل تنظیم در مدلسازی به جز سرعت بارگذاری، به شکلی مقداردهی شوند که با مدل ساخته شده در آزمایشگاه هماهنگی داشته باشند. سرعت بارگذاری مدلها کمتر از نمونههای ساخته شده در آزمایشگاه بوده است. از دقت در نمودارها مشخص می شود که مقدار پیکها به یکدیگر نزدیک بوده اند و مطابق با مطالعه انجام شده توسط فو<sup>37</sup>و همکاران مقدار مدول الاستیسیته اندکی کاهش و شیب کاهش مقاومت در ناحیه پس از پیک تندتر شده است [17]. با مبنا قراردادن قرابت نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی در ادامه پارامترهای دیگر مساله حساسیتسنجی شدند.



Fig. 4.1. Comparison of stress-strain diagram of numerical model with experimental model.

برر سی اثر نسبت حجمی سنگدانه در مقاومت نهایی بتن با فرض ٤ نسبت حجمی سنگدانه، نمونههای بتنی تصادفی با ضریب شکل یکسان و برابر ۲ ساخته شد. نسبتهای حجمی انتخابی عبارتند از ۲۵، ۷۰، ۵۰، درصد. همان گونه که در شکل (٤-۲) مشاهده می شود، نتایج مدلسازیها نشان می دهد که با افزایش درصد سنگدانه، بیشترین مقاومت فشاری به ازای

۲Fu

Fig. 4.3. Stress-strain diagram with different shape coefficient.

# بررسی تاثیر مشبندی در منحنی تنش-کرنش و محل ترک

نوع مش بندی تاثیر زیادی در هزینه محاسبات مدلسازی دارد و هرچه مدلسازیهای نامبرده تعداد المان کمتری را تولید کنند، زمان محاسبات بیشتر کاهش می یابد. در این بخش دو روش مش بندی مکعبی سازهای که در آن لزومی در هماهنگی سطوح در تماس مواد با یکدیگر نیست و مش بندی چهار – وجهی با یکدیگر مقایسه می شوند. مشاهده می شود که مش بندی مکعبی سازهای در اندازههای بزرگ نقطه قله را در کرنشی کمتر از کرنش نمونه با مش چهاروجهی و مقدار حداکثر مقاومت را بیشتر المانها اختلاف نمودارهای مش یکنواخت با نمودار نمونه با غیر ساختاریافته کاهش می یابد، تا جایی که نمودار با مش یکنواخت با اندازه المانهای ۵٫۰ میلی متری بسیار نزدیک به نمودار مدل با مش غیر ساختاریافته می شود، اما هزینه محاسباتی تحلیل این مدل بسیار بیشتر از هزینه محاسباتی تحلیل مدل با مش غیر ساختاریافته است.

همچنین به منظور حساسیتسنجی اندازه المان در مشبندی غیرساختاریافته چهاروجهی نمونههای عددی با اندازه اولیه المان ۱، ۱٫۵، ۲ و ۳ میلیمتر مشبندی شدند و نتایج به دست آمده اختلاف کمتر از ۰٫۰ درصد در تمامی نقاط نمودارها را نشان می داد.



Fig. 4.4. effect of meshing of stress-strain results.

## بررسـی تاثیر مدلسـازی ITZ در پیشـبینی محل وقوع تر ک

بررسی نمونههای مکعبی سازهای نشان میدهد مدلسازی ITZ نتایج دقیق تری در پیش بینی محل وقوع ترک ارائه می کند. در مدلسازی نمونههای کششی، مشخص شد که تنها با درنظر گرفتن ITZ محل وقوع ترک در صفحهای غیر از تکیه گاه بالا رخ خواهد داد که این موضوع نزدیک تر به مسائل واقعی است. همچنین در مدلسازی ها با درنظر گرفتن ITZ سطح زیر نمودار تنش - کرنش در قسمت کششی افزایش پیدا می کند. تصاویر نمونه ها در لحظه گسیختگی در شکل های (٤-٥ و ٤-٦) به ترتیب برای بارگذاری های فشاری و کششی آمده است و نمودار تحلیل های فشاری به منظور برر سی تاثیر ناحیه ITZ در شکل (٤-۷) آمده است.

**شکل ٤–٥**. بروز گسیختگی فشاری در نمونههای از چپ به راست و بالا به پایین: چهار وجهی غیر سازهای بدون ITZ، چهار وجهی غیر سازهای با ITZ، سازهای بدون ITZ و سازهای با ITZ



Fig. 4.5. Compression rupture in specimens left-to-right and top to down respectively: non-ITZ non-structural quadrilaterals, non-ITZ quadrilaterals, non-ITZ structures, and ITZ structures

شکل ٤-٦- محل وقوع گسیختگی کششی در نمونهها: بالا بدون در نظر گرفتن ITZ، پایین راست شامل ITZ با مش چهار وجهی غیر سازهای و پایین چپ شامل ITZ با مش مکعبی سازهای.



Fig. 4.6. Location of tensile rupture in specimens: Top without considering ITZ, bottom right containing ITZ with non-structural quadrilateral mesh and bottom left containing ITZ with structural cube mesh.



## ٥- بررسي تحليلها

از مدل سازی های انجام شده می توان نتیجه گرفت که مش بندی سازه ای با المان های بزرگ مقاومت نمونه را بالاتر از واقعیت نشان می دهد و شکل پذیری آن را نیز بیشتر از حد انتظار پیش بینی می کند. به هر مقدار که المان ها کو چک تر شوند و تعداد شان افزایش یابد مقاومت مدل افت پیدا می کند و حتی مقاومت را از مدل با مش چهار وجهی غیر سازه ای نیز پایین تر نشان می دهد. در مش بندی سازه ای نمودار نهایی وابستگی

زيادي به اندازه المانها دارد. اضافه كردن المان ITZ در نمودار فشاری سبب شدیدتر شدن افت مقاومت پس از قله می شود اما در نمودار کششی باعث شکل یذیر تر شدن مدل می شود. همچنین تنها به و سیله مدلسازی ITZ محل وقوع ترک کششی در بتن قابل پیش بینی است و در سایر حالات گسیختگی در تکیهگاه بالایی رخ میدهد. به منظور بررسمی نتایج تحلیلهای فشاری و کششی نمونهها بیشترین مقاومت فشاری و کششی و همچنین شکل یذیری نمونه ها برای مقایسه در جداول ذیل جمع آوری شدهاند. اعداد درج شده در قسمت شکل پذیری به صورت مقایسهای هستند و چنانچه شکلپذیری نمونه ۷۵ درصدی با درنظر گیری ITZ برابر ۱۰۰ فرض شود، مساحت زیر نمودار تا نقطه ۷۰ درصد مقاومت نهایی پس از قله محاسبه می شــود و عدد مذکور تقســیم بر مقدار مشــابه در نمونه ۷۵ درصدی میشود. با بررسی نتایج، چنانچه از اضافه مقاومت محاسبه شده در نمونههای بدون در نظر گیری ITZ چشمپوشی شود، به و ضوح می توان عملکرد موثر فیبرها را مشاهده نمود. اگرچه نسبت حجمی فیبر فولادی در قیاس با فیبر یلیمری یایین است، اما در قسمت فشاری عملکرد مناسب تری داشته و توانسته است تا حد زیادی از ترد شکنی در بتن جلوگیری نماید. اما فیبر پلیمری در قسمت کششی بازدهی بسیار بالایی داشته و توانسته است شکل یذیری نمونه را تا حدود ٤٠ در صد بهبود ببخشد.

**جدول ٥-١**. نتايج تحليل فشارى

specimen	tensile Strength	relative ductility
Unstructured mesh with ITZ	31.07	100
Volume of aggregate 65%	31.31	95.62
Volume of aggregate 70%	31.46	105.81
Volume of aggregate 75%	31.67	106.99
Volume of aggregate 80%	31.68	104.19
Shape coefficient 1	31.68	107.89
Shape coefficient 3	31.36	102.75
Shape coefficient 4	30.83	102.91
1 mm structured mesh	30.27	92.25

نسبتهای حجمی سنگدانه به که نمونه برابر با ۲۵، ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درصد، نسبت حجمی ۷۵ درصد به نسبت بهینه برای دستیابی

Table 6.3. Number of elements and spent time to analyze

با در نظر گیری همزمان حداکثر مقاومت و مساحت زیر نمودار
 تنش-کرنش، می توان نتیجه گیری کرد که از میان درصدهای

دوره بیست و دوم / شماره ۳/ سال ۱٤۰۱

1 mm structured mesh with ITZ

samples

به بهترین عملکرد فشاری بتن، نزدیک تر است. - مقایسه طیف سنگدانه های بیضوی در مدلسازی های نشان داد که هرچه سنگدانه ها به احجام کروی نزدیک تر باشند بیشترین مقاومت افزایش بیدا میکند اما مقاومت بتن پس از قله با شیب تندتری افت پیدا میکند.

- اگرچه تحلیل نمونههای بتنی در مقیاس مزو نیازمند هزینههای محاسباتی بسیار بالاتری نسبت به تحلیل ماکرو میباشد، اما این تحلیل قادر است نمودارهای مقاومت کششی و فشاری بتن را با دقت بالاتری ارائه کند و همچنین برای بررسی نمونههای جدید با تغییرات در پارامترهای اصلی برآورد قابل قبولی از رفتار بتن بدون نیاز به ساخت نمونه فیزیکی ارائه کند.

- بررسیها نشان داد که مشبندی غیر سازهای چهار وجهی غیر سازهای نمودارهای نزدیکتری به نمودارهای آزمایشگاهی و تجربی ارائه میکند و همینطور در این تحلیل اندازه مش تاثیر بسیارکمی در نتایج دارد؛ در صورتی که در نمونههای با مش مکعبی سازهای، اندازه مش به شدت نتایج تحلیل را تحتالشعاع قرار میدهد.

- چنانچه اندازه مناسب برای مش بندی سازهای با استفاده از نتایج نمونه مش غیر ساختاریافته کالیبره شود، می توان با زمان و هزینه محاسباتی بسیار کمتری نتایجی نزدیک به مش بندی نمونه های غیر ساختاریافته به دست آورد.

- با وجود این که درنظرگیری ITZ کمک میکند منحنی تنش-کرنش در قسمت پیش از قله به نمودارهای آزمایشگاهی نزدیکتر باشد و همینطور محل گسترشترک با دقت بالاتری نسبت به مدلسازی بدون ITZ پیشبینی شود، اما سبب افت مقاومت در قسمت پس از قله میشود و پیشبینی میشود، میتوان با کالیبره 
 2.5 mm structured mesh
 33.88
 114.81

 1 mm structured mesh with ITZ
 29.03
 92.34

1.6

1000

۷- نتیجه گیری

Table 5.3. Compression analysis results

specimen	tensile Strength	relative ductility
Unstructured mesh with ITZ	3.14	100
Volume of aggregate 65%	3.64	81.24
Volume of aggregate 70%	3.63	71.82
Volume of aggregate 75%	3.64	83.55
Volume of aggregate 80%	3.63	70.01
Shape coefficient 1	3.65	83.77
Shape coefficient 3	3.64	74.49
Shape coefficient 4	3.64	73.36
1 mm structured mesh	3.63	60.65
2.5 mm structured mesh	3.48	89.75
1 mm structured mesh with ITZ	3.15	90.96

**جدول ٥-٢**. نتايج تحليل كششي

 Table 5.2. Tensile analysis results

#### مقایسه هزینه محاسباتی مدلها

هزینه محاسباتی مدلها رابطهای مستقیم و غیر خطی با تعداد المانها دارد و به هر میزان تعداد المانها بیشتر شوند به دلیل رشد فزاینده اندرکنش میان المانها زمان تحلیل به صورت تصاعدی بالا میرود. تحلیلهای انجامشده در سخت افزار با CPU دوازده هستهای و حافظه ۱۲ گیگابایت انجام شده است.

جدول ٦-٣. زمان صرف شده و تعداد المانهاي براي تحليل نمونهها.

specimen	No of 1000 elems	Run time (hours)
Unstructured mesh with ITZ	2498	21
Volume of aggregate 65%	2095	16.2
Volume of aggregate 70%	2124	17.8
Volume of aggregate 75%	2120	16.4
Volume of aggregate 80%	2221	17.2
Shape coefficient 1	1345	7.9
Shape coefficient 3	2733	26.3
Shape coefficient 4	4651	58.1
2.5 mm structured mesh	64	0.1
1 mm structured mesh	1000	1.6

#### مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

مصطفی امینی مزرعهنو و همکاران

بررسی پارامتری عوامل موثر در مدلسازی بتن در مقیاس **مزو** 

18, no. 6, pp. 531–539, 2001.

- [13] Z. M. Wang, A. K. H. Kwan, and H. C. Chan, "Mesoscopic study of concrete I: Generation of random aggregate structure and finite element mesh," *Comput. Struct.*, vol. 70, no. 5, pp. 533– 544, 1999.
- [14] F. H. Wittmann and H. Sadouki, "O00Qo," *Mater. Sci.*, vol. 68, pp. 239–248, 1985.
- [15] P. Wriggers and S. O. Moftah, "Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 42, no. 7 SPEC. ISS., pp. 623–636, 2006.
- [16] Lertsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M. and Niwa, J., 2001. Experimental study on parameters in localization of concrete subjected to compression. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2001(669), pp.309-321.
- [17] Fu, H. C., Erki, M. A., & Seckin, M. (1991). Review of effects of loading rate on concrete in compression. *Journal of structural engineering*, 117(12), 3645-3659.

کردن مقدار کاهش مقاومت ITZ این موضوع را تا حدی کنترل کرد.

منابع

- [1] "Walraven Thesis 1980."
- [2] B. Z. P. Bazant, M. R. Tabbara, S. Member, M. T. Kazemi, G. Pyaudier-cabot, and A. Member, "Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites," vol. 116, no. 8, pp. 1686–1705, 1991.
- [3] E. J. Garboczi, "Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 10, pp. 1621– 1638, 2002.
- [4] S. Häfner, S. Eckardt, and C. Könke, "A geometrical inclusion-matrix model for the finite element analysis of concrete at multiple scales," *Proc. 16th IKM*, vol. 1, no. 1, pp. 2–10, 2003.
- [5] S. Häfner, S. Eckardt, T. Luther, and C. Könke, "Mesoscale modeling of concrete: Geometry and numerics," *Comput. Struct.*, vol. 84, no. 7, pp. 450–461, 2006.
- [6] P. W. Kosmatka SH, Kerkhoff B, "Design and Control of Concrete Mixtures (Chapter 5: Aggregates for concrete)," *PCA Man.*, no. 69792, pp. 79–103, 2011.
- [7] J. P. B. Leite, V. Slowik, and J. Apel, "Computational model of mesoscopic structure of concrete for simulation of fracture processes," *Comput. Struct.*, vol. 85, no. 17–18, pp. 1293–1303, 2007.
- [8] J. P. B. Leite, V. Slowik, and H. Mihashi, "Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 6, pp. 1025–1033, 2004.
- [9] E. Schlangen and J. G. M. van Mier, "Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures," *Mater. Struct.*, vol. 25, no. 9, pp. 534–542, 1992.
- [10] W. Schwarz, *Problem Books in Mathematics*. 2008.
- [11] J. F. Unger and S. Eckardt, "Multiscale Modeling of Concrete," Arch. Comput. Methods Eng., vol. 18, no. 3, pp. 341–393, 2011.
- [12] W. Wang, J. Wang, and M. S. Kim, "An algebraic condition for the separation of two ellipsoids," *Comput. Aided Geom. Des.*, vol.

# Parametric study of effective factors in meso scale concrete modeling

Reza Fallahi<sup>1</sup>, Mostafa Amini mazree no<sup>2\*</sup>, Mohammad Fayyaz<sup>3</sup>, Mohsen Aminraya<sup>4</sup>

1- Graduate student of earthquake engineering at university of Tehran

2- Assistant professor at Imam Hussain university

3- Assistant professor at Imam Hussain university

4- PhD candidate of Structural civil engineering at modares university

#### Abstract

Numerical models are cost-effective solutions compared to field and laboratory tests that have the ability to predict the behavior of materials with acceptable accuracy if the exact properties of the material are taken into account. Another advantage of numerical models on the meso-scale is the ability to provide the interaction behavior of different components of inhomogeneous materials such as concrete, which is highly effective in predicting the behavior of concrete against dynamic loads. In order to model concrete at the meso-scale, a platform was created to create concrete samples considering aggregates, mortars, and fibers. The platform created in this research can produce elliptical aggregates according to the desired granulation curve in a completely random manner. By controlling the non-interference of aggregates next to each other stochastically placed within the mold boundaries and after determining the sample geometry and grid, The constructed model is converted into input text of numerical analysis programs. Compression and tensile loading are performed on it. Using numerical models, the effect of changes in these parameters was investigated: the volume ratio of aggregates in the sample, the allowable elongation of elliptical aggregates, whether or not to consider the ITZ element, and the use of fibers. In the performed analyzes, the maximum compressive strength and ductility of concrete and, in some cases, the crack propagation path have been investigated. Results show that considering both the maximum strength and the area under the stress-strain diagram; it can be concluded that among the percentages of aggregate volume ratios to the sample equal to 65, 70, 75, and 80%, the volume ratio of 75% to the optimal ratio to achieve the best compressive performance Concrete is closer.

Comparison of the shape of the elliptical aggregates in the modeling showed that the closer the aggregate form is to the sphere, the maximum resistance increases, but the strength of the concrete decreases with a steeper slope after the peak.although the analysis of concrete samples at the meso-scale requires much higher computational costs than the macro analysis, this analysis can provide diagrams of tensile and compressive strength of concrete more accurately and also to test new samples with changes in the main parameters acceptable estimation of behavior. Provide concrete without the need to build a physical sample. Studies have shown that unstructured tetrahedron meshing provides graphs closer to empirical results. In analyses with unstructured mesh, mesh size has minimal effect on the results; In the case of models with a structured cubic mesh, the mesh size severely overshadows the analysis results. Suppose the appropriate size for uniform meshing is calibrated using the results of non-structured mesh samples. In that case, results close to the meshes of non-structured samples can be obtained with much less computational time and cost. Although considering the ITZ helps the stress-strain curve at the front of the peak to be closer to the laboratory graphs and also to predict the location of the crack more accurately than without modeling without ITZ, it causes a decrease in resistance at the rear of the peak and is predicted. This can be partially controlled by calibrating the ITZ resistance reduction value.

Keywords: Meso-scale, numerical modeling of concrete, uniaxial compression specimen