

## تعیین شکل درزه‌ها در توده‌سنگ توسط شبیه‌سازی آماری

مهدی زمانی<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

(دریافت: تیر ۱۳۹۴، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

### چکیده

یکی از عوارض زمین‌شناسی بسیار مهم در تعیین مقاومت و پایداری توده‌سنگ‌ها موقعیت و آرایش درزه‌ها و شکستگی‌ها است. در اینجا شکل درزه شکل هندسی است که از جهت عمود بر سطوح درزه‌ها دیده می‌شود. در مورد شکل هندسی درزه‌ها اطلاعات زیادی وجود ندارد. بعضی از مراجع به صورت تقریبی شکل آنها را مربعی، مستطیلی، دایره‌ای و بیضوی ذکر کرده‌اند. به دلیل آن که معمولاً محل تقاطع صفحه یا رویه درزه با صفحه رخنمون سنگی به صورت یک پاره‌خط قابل رویت است، به سختی می‌توان شکل درزه‌ها را در رخنمون‌های سنگی مشاهده نمود. در این تحقیق درزه‌های موازی که تشکیل سیستم درزه می‌دهند توسط شبیه‌سازی آماری و برای اشکال مختلف تولید گردیده‌اند. سپس با مطالعه چگونگی توزیع آماری درزه‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با توزیع آماری واقعی درزه‌ها در رخنمون سنگی می‌توان فرم و شکل درزه‌ها در توده‌سنگ را پیش‌بینی نمود. بررسی‌های حاصله نشان می‌دهند، توزیع آماری طول درزه‌های شبیه‌سازی شده برای سیستم‌های درزه از توزیع‌های آماری رایج و کلاسیک توانی، لگاریتمی و پواسون پیروی نمی‌کند. طول درزه‌ها در واقع دارای توزیع پیچیده و اکثراً دارای چولگی به سمت چپ هستند.

### کلید واژه‌ها

سیستم درزه، رخنمون سنگی، شبیه‌سازی، طول درزه، ناپیوستگی، ناپایداری

\* عهده دار مکاتبات: mahdi@mail.yu.ac.ir

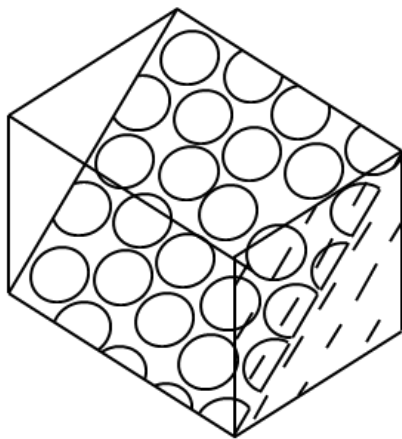
## ۱- مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در درزه‌های منفصل یک توده سنگ شکل و فرم درزه‌ها است. شکل درزه‌ها در خواص مقاومتی توده سنگ توسط مهندسی متخصص در مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی بیان شده است [۱]. مدل‌های مربوط به شکل درزه‌ها مبنای مکانیزم مطالعات بر روی تأثیر آثار مکانیکی شکل درزه‌ها بر توده سنگ است. هندسه و ریخت‌شناسی درزه‌ها می‌توانند کمک به مفاهیمی از جمله *JRC* (ضریب زبری درزه‌ها) و مقاومت برشی توده سنگ نمایند [۳، ۴]. بر طبق توصیه‌های *ISRM* (انجمن بین‌المللی مهندسی مکانیک سنگ) سطوح درزه‌ها از نظر زبری به دو گروه زبری در مقیاس کوچک (*unevenness, cm*) و زبری در مقیاس بزرگ (*waviness, m*) تقسیم‌بندی می‌شوند. ناپایداری بلوک‌های سنگی دارای سطوح درزه با زبری با مقیاس بزرگ تحت تغییر شکل برشی با توجه به نیاز آنها به تغییر مکان عمودی (*dilation*) بر سطح درزه کمتر امکان‌پذیر است. در صورتی که برای درزه‌های دارای زبری با مقیاس کوچک، احتمال حرکت و لغزش بلوک‌ها تحت نیروی برشی بیشتر هستند [۵، ۶]. استانداردها و توصیه‌های انجمن‌های علمی مکانیک سنگ همه در مورد شکل هندسی درزه‌ها در مقاطع عمود بر سطح درزه‌ها هستند [۷-۱۰]. این به خاطر آن است که ۱- توده سنگ‌ها اکثراً غیرقابل دسترس در سه بعد هستند و تنها در رخنمون سنگی و نمونه‌های حفاری قابل مشاهده‌اند ۲- آینه یا صفحات درزه‌ها درون متن سنگ و توده سنگ بوده و دسترسی و مشاهده آنها به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به آسانی امکان‌پذیر نیست. بنابراین ردگیری و برداشت شکل درزه‌ها در توده سنگ امری دشوار است و اطلاعات در این زمینه محدود است. در نتیجه تعبیر و تفسیرهای گوناگون در شکل درزه‌ها در ادبیات مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی وجود دارد. برای راحتی ریاضیات در مدل‌سازی بسیاری از متخصصین مکانیک سنگ شکل سطوح درزه‌ها را به صورت‌های دایره‌ای، چهارضلعی (مربعی، مستطیلی و لوزی) و اکثراً بیضی شکل در نظر گرفته‌اند. واربرتون [۱۱]، چن [۱۲]، ویلاسکوزا و براون [۱۳]، کولاتیلیک [۱۴] و هودسن و پریست [۱۵] شکل درزه‌ها را به صورت دیسک‌های دایره‌ای تصادفی در

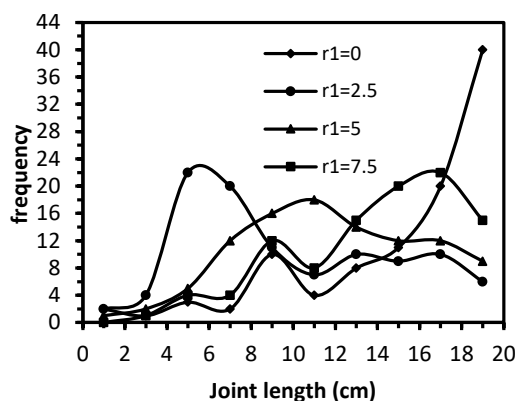
توده سنگ فرض کردند. واربرتون همچنین برای این کار از شکل‌های چهارضلعی و لوزی جهت آنالیز درزه‌ها استفاده کرد. درشویتز و اینستاین در مدل خود برای درزه‌های جدا فرم چندضلعی را در شکل درزه‌ها انتخاب کرد [۱۶]. ایوانو و مایر از مدل چندضلعی و پلی‌گون در آنالیز درزه‌ها استفاده کردند [۱۷، ۱۸]. درشویتز و دیگران در بررسی توزیع طول درزه‌ها، برای ارتباط دادن توزیع آنها با اندازه‌های شکستگی‌ها در توده سنگ، از درزه‌های بیضی شکل کمک گرفتند [۱۹]. زانگ و دیگران و زانگ و اینستاین به وجود شکل درزه‌های دایره‌ای و بیضی شکل، با توجه به دلایل نحوه تشکیل و ایجاد درزه‌ها در ساختارهای زمین‌شناسی و عوامل تکتونیکی، اشاره کردند [۲۰، ۲۱]. با توجه به غیر یکنواختی تنش‌های اعمالی به توده سنگ و غیر همگنی و ناهمسانگردی آن به نظر می‌رسد شکل صفحات درزه‌ها دارای عدم تقارن و در نتیجه به صورت اشکال هندسی منظم و ذکر شده نیستند. آنها از شکل‌های منحنی محدب بسته پیروی می‌کنند. باراکا توسط آغشته کردن و غوطه‌وری نمونه سنگ دارای درزه منفرد با رزین‌های نفتی *EPOFIX* و *RTV141* ضخامت درزه‌های توده سنگ ماسه سنگ با دقت کافی و در حدود  $1/0 \text{ mm}$  اندازه‌گیری کرد [۲۲]. به طریقه مشابه شاید بتوان با برش نمونه سنگ، آغشته به رزین، در امتداد درزه و مشاهده میزان گسترش نفوذ رزین در صفحه درزه به شکل واقعی آن پی‌برد. در این تحقیق با در نظر گرفتن اشکال هندسی منظم (دایره‌ای، بیضی و لوزی) برای شکل دوبعدی درزه‌های تشکیل دهنده در یک سیستم و در حالات مختلف صفحه رخنمون نسبت به صفحات درزه، محل تقاطع صفحات درزه با صفحه رخنمون به دست آمد. سپس توسط مطالعه توزیع آماری درزه‌های شبیه‌سازی شده، ارتباط بین توزیع آماری طول درزه‌ها در رخنمون با شکل درزه‌ها به دست آمد.

## ۲- فرمولاسیون مدل

ابتدا صفحه درزه‌ها به صورت دایره‌ای یکنواخت هم‌شکل در توده سنگ و رخنمون سنگی صفحه‌ای قائم در نظر گرفته شد. در سیستم درزه مفروض مجموعه دایره‌ها موازی هستند و اثر آنها در رخنمون سنگی پاره‌خط‌های هم‌اندازه است که در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در وضعیت شرح



شکل ۲: توزیع آماری درزه‌های دایره‌ای با جابه‌جایی نسبی عمقی در توده‌سنگ و در مقطع رخنمون



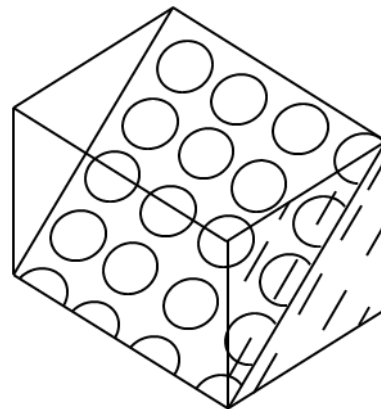
شکل ۳: توزیع آماری درزه‌های دایره‌ای با شعاع متغیر

طول درزه شبیه‌سازی برای شکل (۳) از رابطه (۲) پیروی می‌نماید.

$$d = 4[r_1 + (r_2 - r_1)\varepsilon_1]\sqrt{\varepsilon_2(1 - \varepsilon_2)} \quad (2)$$

که در آن  $r_1$  و  $r_2$  به ترتیب شعاع‌های کمینه و بیشینه درزه‌های دایره‌ای شکل و  $\varepsilon_1$  و  $\varepsilon_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت و در فاصله  $[0, 1]$  است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در درزه‌های دایره‌ای با شعاع متغیر، توزیع طول درزه‌ها به سمت متقارن بودن متمایل می‌گردد و چولگی به سمت چپ توزیع آماری در حالت شعاع ثابت و برابر ۱۰ سانتیمتر برای درزه‌های دایره‌ای با شعاع متغیر به سمت صفر میل می‌کند. همان‌طور که در توزیع آماری طولی درزه‌ها در شکل (۳) مشهود است مقادیر مد یا بیشینه فراوانی تقریباً معادل قطر درزه‌های کمینه است.

داده شده در امتداد عمود بر صفحات درزه بین آنها جابه‌جایی نسبی وجود ندارد.



شکل ۱: توزیع آماری درزه‌های دایره‌ای با توزیع یکنواخت و موازی

اگر سیستم درزه‌ای دارای اشکال مربعی یا بیضی باشند در صورت احراز شرایط بالا تأثیرات آنها بر روی رخنمون سنگی هم‌چنین مطابق شکل (۱) خواهد بود. در این حالت طول درزه‌ها و فواصل بین درزه‌ها در امتداد طول آنها مقادیر ثابتی خواهند داشت. در صورتی که در سیستم درزه‌های دایره‌ای شکل، اگر درزه‌ها جابه‌جایی نسبی نسبت محور عمود بر صفحه درزه‌ها داشته باشند، دیگر تأثیرات آنها در رخنمون سنگی مشابه شکل (۱) نیست و توسط رابطه زیر رابطه (۱) شبیه‌سازی می‌شوند.

$$d = 4r\sqrt{\varepsilon(1 - \varepsilon)} \quad (1)$$

که در آن  $r$  شعاع درزه دایره‌ای،  $d$  طول درزه و  $\varepsilon \in [0, 1]$  نشانگر توزیع یکنواخت درزه است. رابطه (۱) توسط برخورد تصادفی دایره‌ای به شعاع  $r$  و توسط صفحه‌ای قائم که فصل مشترک آنها وتر از دایره مذکور به طول  $d$  به دست آمده است. با استفاده از ۱۰۱ رویداد از وتر تصادفی  $d$ ، توزیع آماری حدوث یا رخداد درزه‌ها با طول مشابه در رخنمون سنگی مطابق شکل (۲) است.

در حالت بعد این روش برای سیستم درزه‌های دایره‌ای شکل با شعاع‌های متغیر تعمیم داده شد. برای چهار حالت  $r \in [2.5, 10]$ ،  $r \in [5, 10]$ ،  $r \in [7.5, 10]$  و  $r_2 = 10$  توزیع آماری برای درزه‌ها در رخنمون مطابق شکل (۳) است.

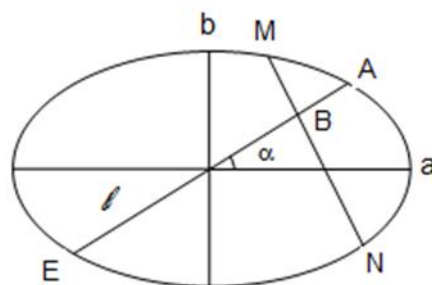
## ۲-۱- درزه‌های بیضی شکل

در این مرحله شکل درزه‌ها به صورت بیضی‌های با اقطار ثابت  $2a$  و  $2b$  در سیستم درزه‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط جابه‌جایی نسبی درزه‌ها در صفحات موازی آنها و عمود بودن قطرهای بزرگ و کوچک بیضی‌های مربوطه نسبت به رخنمون سنگی روابط (۳) و (۴) به دست می‌آیند.

$$d = 4b\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} \quad (3)$$

$$d = 4a\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} \quad (4)$$

شکل (۴) موقعیت یک درزه بیضی شکل را نشان می‌دهد که امتداد عمود بر رخنمون با محور بزرگ درزه زاویه  $\alpha$  می‌سازد. اگر این وضعیت درزه را برای سیستم درزه تعمیم دهیم مجموعه‌ای درزه خواهیم داشت که محور بزرگ آنها همگی زوایای مشابهی با امتداد عمود بر صفحه رخنمون می‌سازند. در صورت وجود جابه‌جایی برای صفحات درزه‌ها توزیع آماری آنها را می‌توان توسط سری رابطه‌های زیر فرموله کرد.



شکل ۴: شبیه‌سازی درزه بیضی شکل

نقاط  $A$  و  $B$  در روی قطر  $AE$  به مختصات  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  و طول  $AB$  را برابر  $\varepsilon_\ell$  در نظر می‌گیریم. قطر بیضی در امتداد زاویه  $\alpha$  برابر است با،

$$2\ell = \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

در شکل (۴) طول درزه شبیه‌سازی است و برابر  $d$  است. رابطه آن به صورت رابطه (۶) است.

$$y_n = -\beta' x + c \quad (6)$$

جائیکه  $\beta' = 1/\alpha'$  و  $\alpha' = \tan \alpha$

$$c = (\ell - \varepsilon_\ell)(\sin \alpha + \beta' \cos \alpha) \quad (7)$$

در رابطه (۷)  $\varepsilon_\ell = 2\ell\varepsilon$  و  $\varepsilon$  عدد تصادفی با توزیع یکنواخت و در فاصله صفر و یک است. مختصات نقاط  $M$  و  $N$  را با اندک محاسبات مثلثاتی در شکل (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$x_M = \frac{\beta' c + p}{q}, \quad x_N = \frac{\beta' c - p}{q} \quad (8)$$

$$\begin{cases} y_M = -\beta' x_M + c \\ y_N = -\beta' x_N + c \end{cases} \quad (9)$$

جایی که  $q = \beta'^2 + b^2/a^2$  و  $p = \sqrt{\beta'^2 c^2 - (\beta'^2 + b^2/a^2)(c^2 - b^2)}$  در خاتمه طول درزه (طول  $MN$ ) را با استفاده از رابطه‌های بالا می‌توان محاسبه کرد.

$$d = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2} \quad (10)$$

محاسبات بالا برای حالت  $\varepsilon \leq 0.5$  است و برای  $\varepsilon > 0.5$  رابطه (۷) به صورت رابطه زیر تصحیح می‌گردد.

$$c = -(\varepsilon_\ell - \ell)(\sin \alpha + \beta' \cos \alpha) \quad (11)$$

با تولید یک صد عدد تصادفی  $\varepsilon$  در رابطه (۱۰) به تعداد مشابه آن مقادیر  $d_i$  یا طول درزه به وجود می‌آید و آن شبیه‌سازی درزه‌ها با شکل بیضی و برای وضعیت بالا است. شکل (۵) توزیع درزه‌های بیضی شکل برای زوایای ۰ و ۳۰ درجه و شکل (۶) توزیع آماری درزه‌هایی که توسط شبیه‌سازی بالا انجام شده است را نمایان می‌کند. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود منحنی‌های آماری حاصله برای  $\alpha$  های صفر، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه هستند.

بهترین شرایطی که برای تصادفی بودن سطوح درزه بیضی شکل در توده سنگ می‌توان در نظر گرفت حالتی است که وضعیت قرار گرفتن صفحه درزه در صفحه افقی تصادفی است. در این حالت زاویه  $\alpha$  متغیر تصادفی است و می‌توان آن را به صورت  $\varepsilon_\alpha = -\pi/2 + \pi\varepsilon_2$  نوشت که در آن  $\varepsilon_2 \in [0,1]$ . رابطه (۱۱) با توجه به تصادفی بودن  $\alpha$  عبارت است از:

$$c = -(\varepsilon_\ell - \ell)\left[\sin\left(-\frac{\pi}{2} + \pi\varepsilon_2\right) + \beta' \cos\left(-\frac{\pi}{2} + \pi\varepsilon_2\right)\right] \quad (12)$$

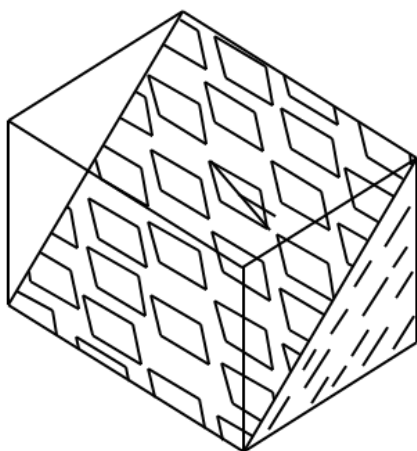
توسط تولید یک صد جفت عدد تصادفی برای  $\varepsilon_\ell$  و  $\varepsilon_2$  شبیه‌سازی طول درزه به تعداد بالا به دست می‌آید که می‌توان آنها را با بکارگیری رابطه (۱۲) در رابطه‌های (۸) تا (۱۰) تعیین کرد. در اینجا به دلیل پیچیدگی ناشی از افزایش متغیرهای تصادفی از انجام آن صرف نظر می‌شود.

توجه به رابطه‌های (۱)، (۳) و (۴) این وجه تمایز قابل مشاهده نیست و تشخیص آن دشوار است.

### ۳- درزه‌های مربعی و لوزی شکل

در حالت درزه‌های مربعی شکل یکنواخت و با قطر  $2a$  و شرایط جابه‌جایی نسبی درزه‌ها در صفحات موازی آنها و عمود بودن رخنمون سنگی بر یکی از اقطار مطابق شکل (۷) توزیع درزه‌ها از تابع (۱۳) متابعت می‌نماید.

$$d = \begin{cases} 4a\varepsilon & \text{for } \varepsilon \leq 0.5 \\ 4a(1-\varepsilon) & \text{for } \varepsilon > 0.5 \end{cases} \quad (13)$$



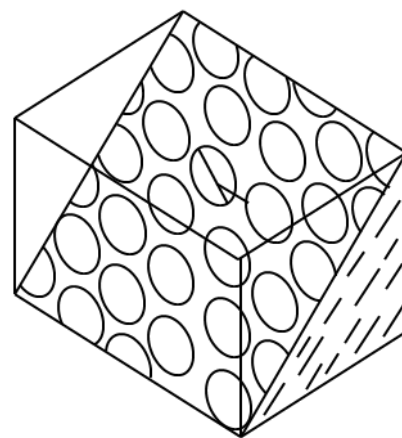
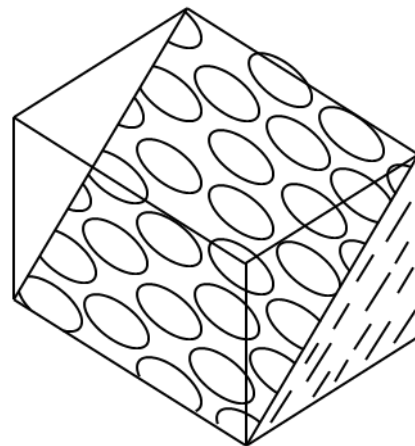
شکل ۷: وضعیت درزه لوزی شکل که با امتداد عمود بر صفحه رخنمون زاویه  $\beta$ .

رابطه (۱۳) برای درزه‌های لوزی شکل با ابعاد قطر بزرگ  $2a$  و قطر کوچک  $2b$  هم‌چنین رخنمون سنگی عمود بر امتداد قطر اصلی عبارت است از:

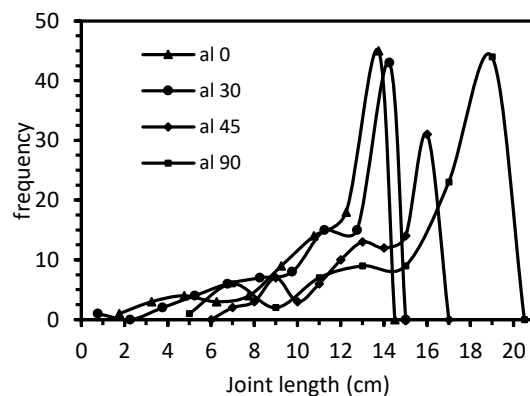
$$d = \begin{cases} 4b\varepsilon & \text{for } \varepsilon \leq 0.5 \\ 4b\varepsilon(1-\varepsilon) & \text{for } \varepsilon > 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

شکل (۸) موقعیت یک درزه لوزی شکل که با امتداد عمود بر صفحه رخنمون زاویه  $\beta$  می‌سازد را نشان می‌دهد. اگر این موقعیت درزه را برای سیستم درزه تعمیم دهیم مجموعه درزه‌هایی خواهیم داشت که تمام آنها وضعیت مشابهی با امتداد عمود بر صفحه رخنمون می‌سازند.

در حالت وجود جابه‌جایی تصادفی برای صفحات درزه‌ها در صفحات افقی فرضی توزیع آماری طول آنها توسط رابطه‌های زیر به دست می‌آیند.



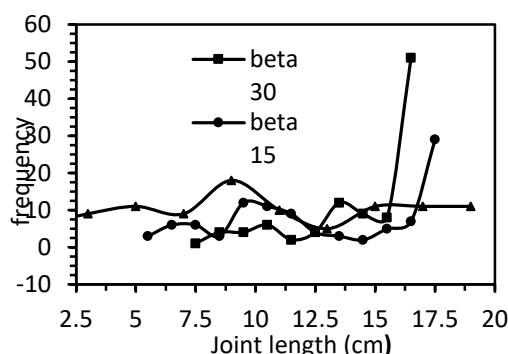
شکل ۵: توزیع درزه‌های بیضی شکل برای زوایای ۰ و ۳۰ درجه



شکل ۶: توزیع آماری طول درزه‌های بیضی شکل تصادفی  $\alpha$  های ۰، ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه

همان‌طور که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود توزیع‌های بالا برای درزه‌های بیضی شکل در حالت کلی متفاوت با درزه‌های دایره‌ای شکل است. بنابراین با مطالعه وضعیت فراوانی طول درزه‌ها در رخنمون‌های سنگی یک توده‌سنگ می‌توان به چگونگی سطوح آنها پی برد. لازم به ذکر است که برای توزیع‌های خاص  $\alpha = \pi/2$  و  $\alpha = 0$

توزیع‌های آماری شکل (۶) مربوط به درزه‌های بیضی شکل نسبتاً مشابه هستند.



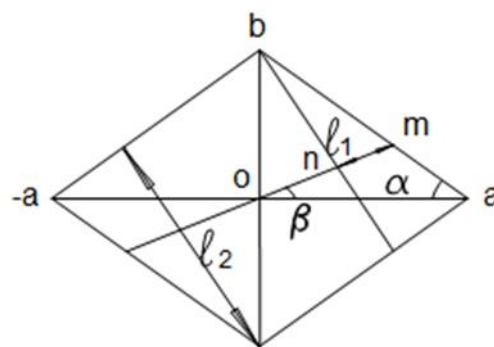
شکل ۹: توزیع آماری طول درزه‌ها برای درزه‌های لوزی شکل

#### ۴- نتایج و پیشنهادات

یکی از روش‌های مهم در تخمین و پیش‌بینی شکل درزه‌ها در توده‌سنگ روش‌های آماری است. تحقیق بالا نشان می‌دهد در صورتی که درزه‌های موجود در توده‌سنگ موازی و یکنواخت باشند با مطالعه درزه‌ها در رخنمون‌های سنگی مخصوصاً مقاطع قائم پیش‌بینی شکل درزه‌ها امکان‌پذیر نیست. آنها هرگونه درزه‌ای از نظر شکل می‌توانند باشند. درزه‌های دایره‌ای شکل با دایره‌های یک‌اندازه ولی با جابه‌جایی نسبی نسبت به یکدیگر یک توزیع نمایی برای طول درزه در رخنمون‌های قائم ارائه می‌دهند. وجود درزه‌های دایره‌ای شکل غیریکنواخت و با قطرهای متفاوت دارای توزیع آماری شبیه نرمال هستند که در آنها مدل توزیع‌ها، با قطر درزه‌های کمینه، رابطه مستقیم دارد. توزیع درزه‌های بیضی شکل با حالت دایره‌ای کاملاً متفاوت است. همچنین شکل توزیع‌های آماری در مورد درزه‌های بیضی شکل و برای انحراف‌های ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه کاملاً مشابه است. توزیع درزه‌های مربعی یا لوزی شکل در رخنمون‌های سنگی موازی اقطار آنها یکنواخت است. در حالی که اگر این‌گونه درزه‌ها دارای انحراف‌های ۱۵ و ۳۰ و یا بیشتر نسبت به محور عمود بر صفحه رخنمون باشند دارای توزیع آماری نمایی خواهند بود. پیشنهاد می‌شود نوع پیچیده‌تر از وضعیت قرارگیری درزه‌ها در توده‌سنگ هم‌زمان با اندازه‌های متفاوت درزه‌ها و انحراف آنها از محور عمود بر رخنمون سنگی در نظر گرفته شود و محاسبات برای درزه‌های دارای شکل غیرهندسی و بسته مورد بررسی قرار گیرند.

$$d = \begin{cases} \frac{\ell_2(t+t_1)}{u} & \text{if } 2\epsilon\ell < \ell_1 \\ \ell_2 & \text{if } \ell_1 \leq 2\epsilon\ell \leq 2\ell - \ell_1 \\ \frac{\ell_2(t+t'_1)}{u} & \text{if } 2\ell - \ell_1 < 2\epsilon\ell \end{cases} \quad (15)$$

که در آن  $\ell = om$ ،  $m$  به مختصات  $(x_1, y_1)$  و  $n$  به مختصات  $(x_2, y_2)$  است. همچنین،



شکل ۸: موقعیت یک درزه لوزی شکل که با امتداد عمود بر صفحه رخنون زاویه  $\beta$

$$t_1 = \frac{2\epsilon\ell}{\sin \gamma}, \quad t'_1 = \frac{2\epsilon'\ell}{\sin \gamma}, \quad \epsilon' = 1 - \epsilon$$

$$\ell_2 = \frac{u \sin 2\alpha}{\sin \gamma}, \quad u = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$t = \sqrt{a^2 + \ell^2 - 2a\ell \cos \beta}, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta$$

$$\ell_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$x_2 = \frac{b}{\tan \beta + \cot \beta}, \quad y_2 = \frac{b \tan \beta}{\tan \beta + \cot \beta}$$

$$x_1 = \ell \cos \beta, \quad y_1 = \ell \sin \beta, \quad \ell = \frac{a \sin \alpha}{\sin \gamma}$$

که زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  و طول‌های  $\ell_1$  و  $\ell_2$  در شکل (۷) ملاحظه می‌شوند و  $\epsilon$  اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند. توزیع آماری طول درزه‌ها برای حالت بالا  $a=15 \text{ cm}$ ،  $b=10 \text{ cm}$  و  $\beta=0, 15, 30$  در شکل (۹) ملاحظه می‌شود. مدل بالا برای درزه‌های لوزی شکل با قطر بزرگ عمود بر صفحه رخنمون توزیع یکنواخت و برای زوایای  $\beta=15, 30$  درجه توزیع‌های نزدیک به توزیع توانی ارائه می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود توزیع‌های به دست آمده در آن برای زوایای  $\beta=15, 30$  درجه با

## مراجع

- [14] Kulatilake P. H. S. W. (1993), "Application of probability and statistics to joint network modeling in three dimensions", An invited paper to appear in the Proc. Of the Conf. on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Canberra, Australia, 25 pp.
- [15] Hudson J. A. and Priest S. D. (1983), "Discontinuity frequency in rock masses", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract; 20: pp. 73-89.
- [16] Dershowitz W. S. and Einstein H. H. (1988), "Characterizing rock joint geometry with joint system models", Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer-Verlag, New York, Vol. 21, pp. 21-25.
- [17] Ivanova V. (1998), "Geologic and stochastic modeling of fracture system in rocks", Ph. D. Theses, MIT.
- [18] Meyer T. (1999), "Geological stochastic modeling of rock fracture systems related to crustal faults", Thesis MIT.
- [19] Dershowitz W. S., Lee G., Geier J., Hitchcock S. and La Point P. (1993), "User documentation: FracMan discrete feature data analysis", Geometric Modeling and Exploration Simulations. Golder Associates, Seattle, USA.
- [20] Zhang L., Einstein H. H. and Dershowitz W. S. (2002), "Stereological relationship between trace length and size distribution of elliptical discontinuities", Geotechnique, 52(6) pp. 419-433.
- [21] Zhang L. and Einstein H. H. (2010), "The planar shape of rock joint", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, Issue 1, pp. 55-68.
- [22] Baraka-Lokmane S. (2002), "A New Resin Impregnation Technique for Characterizing fracture Geometry in Sandstone Cores," International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Pergamon, Vol. 39 pp. 815-823.
- [1] Lynarczuk M. (2010), "Description and Classification of Rock Surface by Means of Laser Profilometry and Mathematical Morphology", International Journal for Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 47, no. 1, pp. 138-149.
- [2] Cap P.; Jia H. Q.; Liu T. Y., and Fan X., (2011), "Practical Analysis of Three-dimensional Topography Characteristics of Rock Joint Surface," Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 30, no. 2, pp. 3839-3843, China.
- [3] Barton N. (1973), "Review of a New Shear-strength Criterion for Rock Joints," Engineering Geology, Vol. 7, no. 4, pp. 287-332.
- [4] Barton N. and Choubey V. (1977), "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice," Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches, Vol. 10, no. 1-2, pp. 1-54.
- [6] Geerisema A. I. (2002), "The Shear Strength of Planar Joints in Mudstone," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, no. 8, pp. 1045-1049.
- [7] Brown E. T. (1981), "Rock Characterization, Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods," pp. 15-16, Pergamon Press, Oxford, UK.
- [8] Shigui Du., Yunjin Hu. and Xiaofei Hu (2014), "Generalized Models for Rock Joint Surface Shapes," The Scientific World Journal, Hindawi, Vol. 14, pp. 1-8.
- [9] Cruden D. M. (1999), "Describing the size of discontinuities", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 14:133-137.
- [10] Priest S. D. (1993), "Discontinuity analysis for rock engineering", Published by Chapman & Hall, London.
- [11] Warburton P. W. (1980), "Stereological interpretation of joint trace data: influence of joint shape and implications for geological surveys", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 17, Issue 6, Dec., pp. 305-316.
- [12] Chan L. Y. (1986), "Application of block theory and simulation techniques to optimum design of rock excavations", Ph. D. Theses, university of California, Berkeley, CA.
- [13] Villaescusa E. and Brown E. T. (1992), "Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements", Rock Mech. & Rock Eng. 25, pp. 67-87.