

Investigation of the Effect of Hholes Interaction on the Concrete Structure under High Stress Using PFC2D

Hadi Haeri*

*Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran
haerihadi@gmail.com*

Vahab sarfarazi

²Academic member, hamedan university of technology, Hamedan, Iran

Syed Iman Mousavi Mirsalari

Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran

Hamidreza Azhir

Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran

Mohammadamin Karbala

Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran

Abstract:

The presence of openings in concrete structure has destructive effect on the lifetime. In this paper, the interaction between two openings has been investigated using particle flow code. For this purpose, after calibration of model, one small opening has been situated in various distances and various angularities from big pore opening. The radius of smaller opening is 0.2 of radius of big opening. This complex is situated in a concrete slab with uniaxial strength of 7 MPa. This slab is under principal stress of 2MPa and 6 MPa. The results show that spacing and angularity of small opening has important effect on the stress distribution and failure pattern around the big opening. The critical position for small opening is when it situated at 0.0 degree. Also the spacing between two openings is less, the failure volume is more.

Key word: *Pore, Tensile Failure, Concrete, Particle Flow Code.*

مطالعه تاثیر اندرکنش حفره ها در سازه بتنی

تحت تنش زیاد توسط کد PFC2D

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۲-۰۹

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

هادی حائری*

مدیر تحقیق و توسعه و کنترل کیفیت شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران
haerihadi@gmail.com

وهاب سرفرازی

استادیار دانشگاه صنعتی همدان

سید ایمان موسوی میرسالاری

فائم مقام مدیرعامل شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران

حمیدرضا آژیر

معاون فنی شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران

محمد امین کربلا

مدیر فنی شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران

چکیده

وجود حفره ها در سازه های بتنی تاثیر مخربی در ساخت و سرویس دهی آنها دارد. در این مقاله با استفاده از کد جریان ذره دو بعدی، رفتار دو حفره در مجاورت یکدیگر بررسی شده است. به این منظور بعد از کالیبراسیون نرم افزار با بتن، یک حفره کوچک با شعاع ۰/۲ شعاع حفره اصلی در زاویه داری های مختلف نسبت به افق و فاصله داری های مختلف از مرکز حفره اصلی جایگذاری شده است. این مجموعه در یک محیط بتنی با مقاومت فشاری ۷ MPa واقع گردیده که تحت تنش های اصلی ۲ MPa و ۶ MPa قرار دارد. نتایج نشان می دهد که فاصله داری و زاویه داری حفره کوچک تاثیر بسزایی بر توزیع تنش و الگوی شکست فضای اطراف حفره اصلی دارد. بحرانی ترین آرایش حفره زمانی است که زاویه داری آن با حفره اصلی ۰/۰° گردد. همچنین هرچه فاصله داری حفره از حفره اصلی کم شود، شدت آسیب پل بین دو حفره افزایش می یابد. واژه های کلیدی: حفره، شکست کششی، بتن، کد جریان ذره

حفرات که به دلیل انحلال ایجاد می‌شوند یکی از مشکلات برای تونلکاری می‌باشند. حشمتی و همکاران [۱]، با استفاده از نرم افزار PLAXIS3D اثر حفرات را روی تغییرشکل های پوشش تونل مطالعه نمودند. آنها بیان داشتند که وجود حفرات باعث افزایش تغییرشکل های تونل خواهد شد بطوریکه با در نظر گرفتن نسبت حجمی حفرات برابر ۱/۱٪، تغییر مکان افقی نقاط قرار گرفته در جناحین تونل و تغییر مکان قائم نقاط قرار گرفته در کف و تاج تونل، برای سنگ آهک بخش ورودی تونل ۱۵٪ افزایش خواهد یافت. قارونی نیک و همکاران [۲]، پوشش تونل دالا که در زمین های کارستی استان خوزستان واقع گردیده را طراحی نمودند. کاساگراند [۳]، خسارتهای وارد شده به تونل راه آهن موجود در زمینهای کارستی ایتالیا را گزارش نمودند. بک و پرسون [۴]، سسی [۵] و کنز [۶] با مطالعه روی حفره های کارستی بیان داشتند که برای تونلسازی در زمینهای کارستی بایستی تمام حفرات انحلالی موثر بر تونل شناسایی گردد تا ریسک آسیب به تونل کم شود. از منظر دیگر، ترک هایی با شکل های مختلف در سازه های بتنی و سنگی وجود دارد. محققین مختلفی رشد و گسترش ترک را در ماسه سنگ [۷ و ۸]، مرمر [۹ و ۱۰] و بتن [۱۱] مطالعه نمودند. یانگ [۱۲] رشد و گسترش ترک را در نمونه های ماسه سنگ حاوی دو ترک مرکزی مطالعه نمودند. نتایج نشان دادند که ارتباط نزدیکی بین رشد ترک و هندسه درزه ها وجود دارد. فن [۱۳] مجموعه ای از آزمایشات را روی نمونه های حاوی حفره و درزه تحت بار تک محوره انجام داد. نتایج نشان دادند که تنش در اطراف حفره متمرکز می شود. هودیما [۱۴] نمونه های مستطیلی و مکعبی حاوی حفره را تحت بار تک محوره قرار دادند و چهار نوع الگوی شکست ارائه نمودند. هرچند تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه تونلسازی در محیط های کارستی انجام شده است ولی مطالعه چندانی درباره اندرکنش دو حفره واقع در سازه بتنی بررسی نشده است. در این مقاله تأثیر حفره کوچک بر پایداری حفره بزرگتر واقع در سازه بتنی توسط کد جریان ذره دو بعدی (PFC2D¹) مطالعه گردیده است.

مدلسازی عددی کد جریان ذره

کد جریان ذره دو بعدی، یک کد المان مجزا است که توده سنگ را با مجموعه ای از دیسک های دایره ای مدل می نماید. ذرات مستقل از یکدیگر حرکت می کنند و فقط در نقاط تماس با یکدیگر اندرکنش دارند. بطور کلی دو نوع اتصال در PFC وجود دارد که باعث استحکام مجموعه دیسک ها می شود: ۱- اتصال تماسی ۲- اتصال موازی. اتصال تماسی رفتار فیزیکی دانه های بهم چسبیده با سیمان شدگی ناچیز را تقریب می زند در حالیکه اتصال موازی رفتار فیزیکی دانه های بهم چسبیده با سیمان شدگی زیاد را تخمین می زند. در این مقاله از اتصال موازی استفاده شده است که با میکرو پارامترهای زیر به مدل معرفی می گردد. مدول تماسی دیسک- دیسک، نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال تماسی، ضریب اصطکاک دیسک ها، مقاومت برشی و مقاومت نرمال اتصال موازی، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت برشی اتصال موازی، شعاع مینیمم دیسک، افزایش دهنده شعاع اتصال موازی، مدول موازی و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی.

¹ Particle Flow Code in 2 Dimension

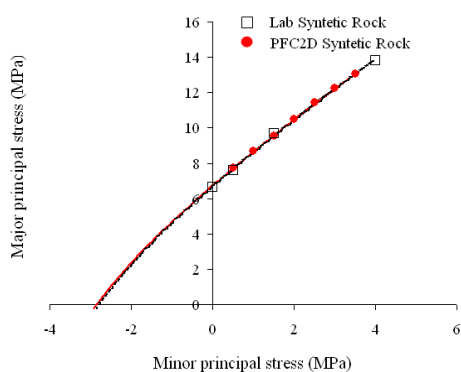
آماده‌سازی و کالیبراسیون مدل عددی

به منظور آماده‌سازی مدل عددی از دستورالعمل ارائه شده توسط آیتاسکا [۱۶] استفاده شده است. این دستورالعمل شامل چهار مرحله است. ۱- تولید دیسک‌ها، ۲- فشردگی دیسک‌ها، ۳- اعمال تنش ایزوتروپیک، ۴- حذف دیسک‌های شناور و ایجاد مدل عددی مناسب.

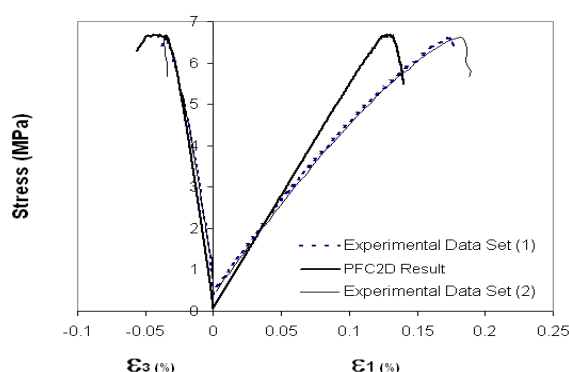
بعد از ساخت مدل، باید میکرو پارامترهای اتصال موازی مناسبی برای مدل عددی تعیین نمود. منظور از میکرو پارامترهای مناسب آنهایی هستند که با بکارگیری آنها رفتار مدل عددی مشابه رفتار نمونه آزمایشگاهی می‌شود. به این منظور با مدلسازی عددی آزمایش تک محوره، برزیلی و سه محوره، میکرو پارامترهای مدل آنقدر تغییر داده می‌شود تا رفتار مکانیکی نمونه عددی و آزمایشگاهی یکسان گردد. نحوه تغییر میکرو پارامترها در مرجع [۱۶] آورده شده است. میکرو پارامترهای مناسب برای کالیبراسیون مدل عددی در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱- الف و ب ترتیب منحنی تنش- کرنش آزمایش تک محوره و منحنی $\sigma_1 - \sigma_3$ آزمایش سه محوره را برای مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

جدول (۱): میکرو پارامترهای مناسب برای کالیبراسیون مدل

میکرو پارامتر	مقدار	میکرو پارامتر	مقدار
افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	1	نوع ذره	دیسک
مدول یانگ اتصال موازی	4	دانسیته (kg/m^3)	1000
نسبت سختی اتصال موازی	1.7	شعاع مینیمم دیسک (m)	0.27
ضریب اصطکاک	0.4	نسبت ابعاد ذرات	1.56
انحراف میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی (MPa)	5.6	نسبت تخلخل	0.08
انحراف استاندارد مقاومت نرمال اتصال موازی (MPa)	1.4	ضریب میرایی	0.7
انحراف میانگین مقاومت برشی اتصال موازی (MPa)	5.6	مدول یانگ اتصال تماسی (GPa)	4
انحراف استاندارد مقاومت برشی اتصال موازی (MPa)	1.4	نسبت سختی اتصال تماسی	1.7



(ب)



(الف)

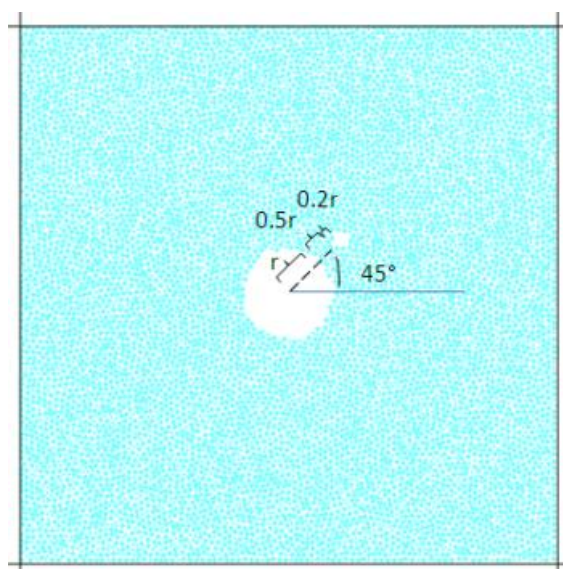
شکل (۱): الف) منحنی تنش- کرنش آزمایش تک محوره، ب) منحنی $\sigma_1 - \sigma_3$ آزمایش سه محوره برای مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی

تشابه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بیانگر کالیبراسیون صحیح مدل می‌باشد. بعد از کالیبراسیون مدل بایستی از میکروپارامترهای بدست آمده برای مدلسازی اثر حفره کارستی بر پایداری تونل استفاده نمود.

نحوه مدلسازی حفره کوچک پیرامون حفره دایره‌ای بزرگ

برای ساخت مدل بتنی حاوی حفره بزرگ و کوچک در ابتدا مدلی با ابعاد $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ ساخته شد. قطر دیسک‌های استفاده شده در ساخت مدل مطابق جدول ۱ است. در ابتدا مدل تحت تنش جانبی فشاری همه جانبه 2 MPa قرار می‌گیرد سپس حفره‌های کوچکتر به شعاع $0.2r$ بطور جداگانه در زوایای 0° ، 45° و 90° نسبت به محور تقارن افقی حفره بزرگ فرضی به شعاع $r=5\text{m}$ واقع می‌شوند. این حفره‌ها در فواصل $0.2r$ ، $0.5r$ و r از دیواره حفره بزرگ فرضی قرار دارند. بعد از جانمایی حفره در مدل، حفره دایره‌ای بزرگ با قطر 10m در مرکز مدل حفر می‌گردد. بعد از ایجاد حفره کوچک و حفره بزرگ، تنش اصلی تا 6 MPa افزایش می‌یابد. با استفاده از سیستم کنترل اتوماتیک، تنش جانبی در طی آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. به منظور مطالعه اندرکنش دو حفره، توزیع نیروها در مدل، تنش شروع ترک، بردار جابجایی دیسک‌ها و الگوی شکست پل بین دو حفره ثبت می‌گردد.

شکل ۲ نمایی از مدل عددی حاوی تونل به شعاع $r=5\text{m}$ و یک حفره کوچک به شعاع $0.2r$ که با زاویه 45° و در فاصله $0.5r$ از دیواره حفره بزرگ جایگذاری شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مدل عددی حاوی یک حفره کوچک با زاویه 45° و فاصله داری $0.5r$ از دیواره حفره بزرگتر

نتایج مدلسازی عددی

بطور کلی نتایج نشان دادند که بعد از حضور حفره‌های کوچک در مدل، هیچگونه ترک در مجاورت آن ظاهر نمی‌شود ولی با ایجاد حفره بزرگتر در مدل، ترک‌ها در دو موقعیت ایجاد می‌شوند. موقعیت اول در مجاورت حفره بزرگتر و در راستای تنش اصلی حداکثر و موقعیت دوم در ناحیه بین حفره بزرگ و حفره کوچکتر. لازم به ذکر

است که با افزایش فاصله حفره کوچک از حفره بزرگ، ترک‌ها فقط در موقعیت اول، یعنی در مجاورت حفره بزرگ و در راستای تنش اصلی حداکثر ایجاد می‌شوند و حضور حفره کوچک هیچ اثری در شکل‌گیری ترک اطراف حفره بزرگ ندارد.

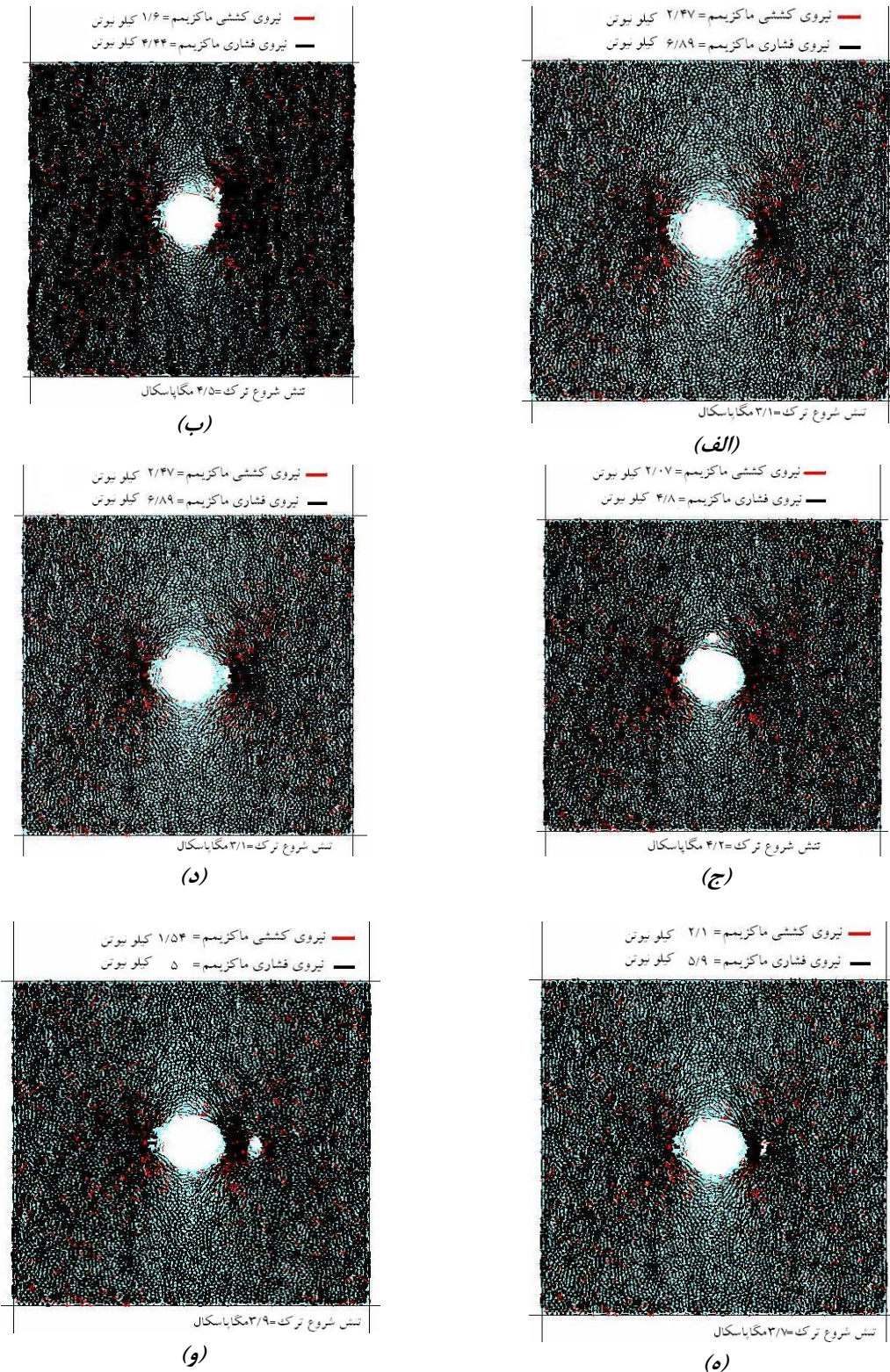
در ادامه به بررسی اثر حفره کوچک بر توزیع نیروها، تنش شروع ترک، بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده و گسترش ترک پیرامون دو حفره پراخته می‌شود.

توزیع نیروها در مدل بعد از شروع اولین ترک

شکل ۳ توزیع نیروهای کششی و فشاری را در اطراف حفره بزرگ و حفره کوچک نشان می‌دهد. در شکل های ۳- الف، ب و ج فاصله قرارگیری حفره کوچک از دیواره حفره بزرگ $0/25r$ و زاویه قرارگیری آن $0/0^\circ$ ، 45° و 90° است و در شکل های ۳-د، ه و و زاویه قرارگیری حفره کوچک $0/0^\circ$ و فاصله قرارگیری آن از دیواره حفره بزرگ $0/25r$ ، $0/5r$ و r می‌باشد. خطوط روشن نماینده نیروی کششی و خطوط تیره، نماینده نیروی فشاری می‌باشند. مقادیر نیروی کششی و فشاری ماکزیمم و همچنین تنش شروع ترک روی شکل ثبت شده است.

بطور کلی می‌توان دریافت که نیروی کشش ماکزیمم در جناحین حفره بزرگ واقع گردیده است. همچنین تحت تنش فشاری همه جانبه، وقتی حفره کوچک در زاویه $0/0^\circ$ قرار دارد، نیروی کششی ماکزیمم در جناحین حفره کوچک نیز متمرکز می‌شود. از شکل ۳- الف، ب و ج می‌توان دریافت که در طول ثابت منطقه پل، زمانیکه حفره کوچک در زاویه $0/0^\circ$ قرار دارد مقدار نیروی کششی، ماکزیمم و برابر $2/47$ کیلونیوتن است. همچنین تنش شروع ترک در این آرایش، مینیمم و برابر $3/1$ MPa است. این بدین معنی است که در این آرایش پل بین حفره بزرگ و حفره کوچک تحت بیشترین نیروی کششی القایی قرار دارد و مقاومت آن در برابر شکست کم می‌شود. این روند در سایر فاصله‌داری‌های حفره کوچک نیز مشاهده شده است.

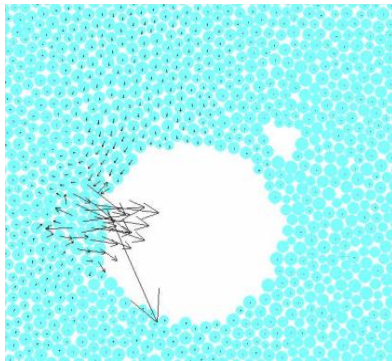
از شکل ۳- د، ه و و نیز می‌توان دریافت که در زاویه ثابت منطقه پل، با کاهش فاصله حفره کوچک از حفره بزرگ، نیروی کششی ماکزیمم افزایش می‌یابد که مقدار نیروی کششی ماکزیمم مربوط به فاصله داری $0/25r$ بوده و برابر $2/47$ کیلونیوتن است. همچنین تنش شروع ترک در این آرایش، مینیمم و برابر $3/1$ MPa است. این بدین معنی می‌باشد که هرچه طول پل بین حفره بزرگ و حفره کوچک کاهش یابد، مقاومت آن در برابر شکست کم می‌شود و با کمترین تنش خارجی می‌شکند. این روند در سایر زاویه‌های حفره کوچک نیز مشاهده شده است. هر چند این یک نتیجه بدیهی می‌باشد ولی این مهم نشان دهنده اعتبار نرم افزار PFC در شبیه سازی مذکور می‌باشد



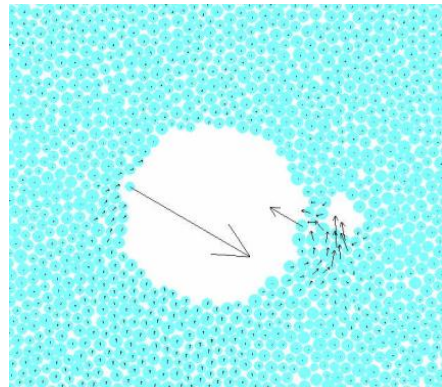
شکل (۳): توزیع نیروهای کششی و فشاری در اطراف حفره بزرگ و حفره کوچک؛ الف) فاصله قرارگیری حفره از دیواره حفره بزرگ $0/252$ و زاویه قرارگیری آن $0/0^\circ$ ، ب) فاصله قرارگیری حفره از دیواره حفره بزرگ $0/252$ و زاویه قرارگیری آن 45° ، ج) فاصله قرارگیری حفره از دیواره حفره بزرگ $0/252$ و زاویه قرارگیری آن 90° ، د) زاویه قرارگیری حفره کوچک $0/0^\circ$ و فاصله قرارگیری آن از دیواره حفره بزرگ $0/252$ ، ه) زاویه قرارگیری حفره کوچک $0/0^\circ$ و فاصله قرارگیری آن از دیواره حفره بزرگ $0/52$ و و) زاویه قرارگیری حفره کوچک $0/0^\circ$ و فاصله قرارگیری آن از دیواره حفره بزرگ 1

بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده

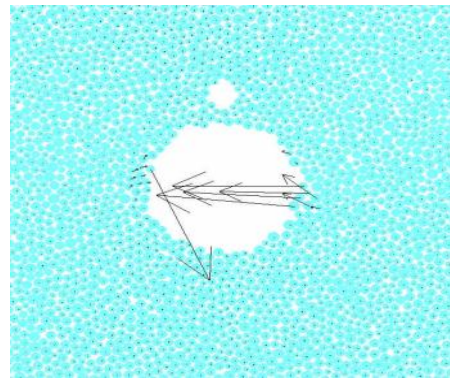
شکل ۴ بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده را اطراف حفره بزرگ نشان می‌دهد. فاصله حفره کوچک از حفره بزرگ $0/252$ و زاویه قرارگیری آن 0° ، 45° و 90° می‌باشد.



(ب)



(الف)



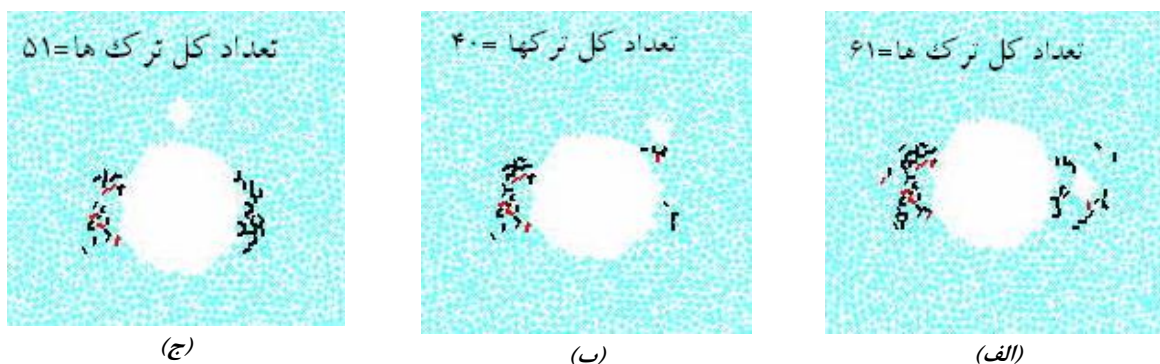
(ج)

شکل (۴): بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده؛ فاصله حفره کوچک از حفره بزرگ $0/252$ و زاویه قرارگیری حفره کوچک؛ (الف) 0° ، (ب) 45° و (ج) 90°

زمانیکه زاویه قرارگیری 90° است، بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده به سمت حفره بزرگ بوده که نشان‌دهنده ریزش تمام دیسک‌ها درون حفره بزرگ می‌باشد. این روند با کاهش زاویه‌داری تغییر می‌نماید بگونه‌ای که در زاویه 0° بردار جابجایی دیسک‌های شکسته شده به سمت حفره بزرگ و حفره کوچک می‌باشد که نشان‌دهنده ریزش درون حفره بزرگ و حفره کوچک است.

توزیع ترک پیرامون حفره بزرگ و حفره کوچک

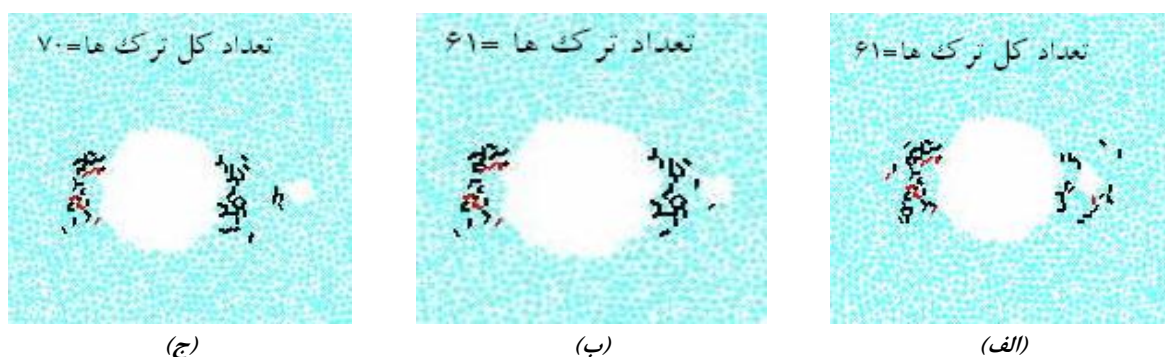
شکل ۵- الف، ب و ج توزیع ترک اطراف حفره دایره‌ای بزرگ و حفره کوچک را نشان می‌دهد. زاویه قرارگیری حفره کوچک به ترتیب 0° ، 45° و 90° می‌باشد که فاصله آن با دیواره حفره بزرگ $0/252$ است. ترک‌های کششی با خطوط تیره و ترک‌های برشی با خطوط روشن مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است که تعداد کل ترک‌های ایجاد شده تا تنش 6 MPa در هر شکل نشان داده شده است.



شکل (۵): توزیع ترک در مدل؛ فاصله حفره کوچک تا حفره بزرگ $0.25r$ و زاویه قرارگیری حفره کوچک نسبت به حفره بزرگ عبارتست از: الف) 0° ، ب) 45° و ج) 90°

نتایج حاکی از آن هستند که عمدتاً ترک‌های کششی در اطراف حفره بزرگ و حفره کوچک ایجاد می‌شوند. زمانیکه زاویه حفره کوچک 0° و 45° است، نیروی کششی ماکزیمم پیرامون حفره بزرگ و حفره کوچک متمرکز می‌شود (شکل ۳- الف و ب) که باعث شکل‌گیری ترک‌ها در این نقاط می‌شود (شکل ۵- الف و ب). در زاویه 90° ، نیروی کششی ماکزیمم فقط در جناحین حفره بزرگ متمرکز می‌گردد (شکل ۳- ج) که منجر به گسترش ترک در این نقاط می‌شود (شکل ۵- ج). لازم به ذکر است که در زاویه 0° بیشترین شکستگی اطراف حفره بزرگ و حفره کوچک اتفاق می‌افتد (شکل ۵- الف). در حقیقت بدلیل اندرکنش حفره بزرگ و حفره کوچک، محدوده تاثیر نیروی کششی ماکزیمم زیاد می‌شود (شکل ۳- الف) که منجر به افزایش تعداد شکستگی‌ها می‌گردد. ولی در زاویه 45° حضور حفره کوچک مانند یک سپر عمل کرده که شعاع تاثیر نیروی کششی ماکزیمم اطراف حفره بزرگ را کاسته و حجم شکست اطراف حفره بزرگ را کم می‌نماید (شکل ۵- الف).

شکل ۶- الف، ب و ج توزیع ترک کششی اطراف حفره بزرگ و حفره کوچک را نشان می‌دهد. زاویه قرارگیری حفره 0° و فاصله قرارگیری حفره کوچک از دیوار حفره بزرگ به ترتیب $0.25r$ ، $0.5r$ و r است. ترک‌های کششی با خطوط تیره و ترک‌های برشی با خطوط روشن مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است که تعداد کل ترک‌های ایجاد شده تا تنش 6 MPa در هر شکل نشان داده شده است.



شکل (۶): توزیع ترک در مدل؛ زاویه قرارگیری حفره کوچک نسبت به حفره بزرگ 90° و فاصله حفره تا حفره بزرگ عبارتست از: الف) r ، ب) $0.5r$ و ج) $0.25r$

زمانیکه طول پل $0.25r$ و $0.5r$ است، نیروی کششی ماکزیمم در سراسر پل القا می‌شود (شکل ۳- د، ه) که این منجر به تخریب کامل پل می‌گردد (شکل ۶- و). با افزایش طول پل، نیروی کششی ماکزیمم فقط پیرامون حفره بزرگ متمرکز می‌گردد (شکل ۳- و) که باعث ایجاد ترک کششی در محدوده اطراف حفره بزرگ می‌شود (شکل ۶- و).

و). بنابراین هر چه طول پل کم شود، وقوع یکپارچگی بین حفره کوچک و حفره بزرگ افزایش می یابد. لازم به ذکر است که در تمام آرایش ها، حجم زون شکسته شده اطراف حفره بزرگ و یا تعداد ترک های ایجاد شده اطراف حفره بزرگ تقریباً یکسان است. عبارت دیگر تا فاصله داری ۲، حضور حفره کوچک تاثیری بر حجم زون شکسته شده نخواهد داشت؛ چراکه در این آرایشها محدوده توزیع نیروی کششی ماکزیمم به اندازه کافی زیاد است که تحت تاثیر محل حفره کوچک قرار نگرفته و منجر به شکست کامل فضای پیرامون حفره بزرگ می گردد. لازم به ذکر است که در فاصله داری ۲، تعداد کل ترک ها بیشتر از سایر آرایش ها می باشد. این پدیده بدلیل تنش محصور کننده زیاد می باشد بطوریکه وجود اتصالات زیاد در اطراف حفره اصلی و تنش زیاد منجر به شکست اتصالات بیشتر می گردد.

نتیجه گیری

با مدلسازی عددی حفره کوچک در مجاورت یک حفره دایره ای بزرگ در مدل بتنی، اندرکنش حفره بزرگ و حفره کوچک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در طول منطقه پل ثابت، زمانیکه حفره کوچک در زاویه 0° نسبت به حفره بزرگ قرار دارد، نیروی کششی ماکزیمم القایی اطراف حفره بزرگ بیشتر از سایر آرایشها است که این نشان دهنده مقاومت کمتر پل می باشد. همچنین هر چه فاصله حفره کوچکتر از دیوار حفره بزرگ کمتر باشد نیروی کششی بیشتری در فضای بین حفره کوچک و حفره بزرگ القا می شود و تنش شروع ترک کاهش می یابد.

زمانیکه زاویه قرارگیری 90° است، بردار جابجایی دیسک های شکسته شده جناحین حفره بزرگ به سمت حفره بزرگ بوده که نشان دهنده ریزش تمام دیسکها درون حفره بزرگ می باشد. این روند با کاهش زاویه داری تغییر می یابد بگونه ای که در زاویه 0° بردار جابجایی دیسک های شکسته شده به دو سمت گرایش دارد یعنی حفره بزرگ و حفره کوچک؛ این نشان دهنده ریزش درون حفره بزرگ و حفره کوچک است. در طول منطقه پل ثابت، با کاهش زاویه داری حفره کوچک، محدوده توزیع نیروی کششی ماکزیمم افزایش یافته که به این ترتیب حجم شکست اطراف حفره بزرگ زیاد می شود. همچنین زمانیکه زاویه داری حفره کوچک 0° است، با افزایش فاصله داری حفره کوچک حجم شکست اطراف حفره بزرگ زیاد و ثابت می باشد.

مراجع

- [۲] حشمتی، ع.، صالح زاده، ح.، فرهادی، م.، اثر حفرات کارستی بر روی تغییرشکل های پوشش تونل حفر شده در سنگ آهک انحلالی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.
- [۲] قارونی نیک، م.، توکلی، م.، مظفری شمس، ا.، طراحی پوشش تونل در زمینهای کارستی - مطالعه موردی: تونل دالا، پنجمین کنفرانس تونل ایران، تهران، ۱۳۸۰.
- [3] Casagrande, G., "Hazard connected to railway tunnel construction in karstic area: applied geomorphological and hydrogeological surveys", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(5); 243-250, 2005.
- [4] Beck, B. F. and Pearson, F. M., "Karst geohazards - Engineering and environmental problems in karst terrain", *Proceedings of the Fifth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of Karst*, A. A. Balkema, p. 581, 1995.
- [5] Scesi, L., and Papini, M., "Studi geologici nei progetti di gallerie", *Geo-graph S.n.c. Ed., Segrate.*, 244, 1998.
- [6] Knez, M., Slabe, T., and Sebela, S., "Karstification of the aquifer discovered during the construction of the expressway between Klanec and Crni kal", *Classical Karst, Acta Carsologica*, 33(1); 205-217, 2004.

- [8] S. Miao, P.Z. Pan, Z. Wu, S. Li, S. Zhao, *Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression*, *Eng. Fract. Mech.* 204 (2018) 319–343.
- [9] Q. Wu, L. Weng, Y. Zhao, B. Guo, T. Luo, *On the tensile mechanical characteristics of fine-grained granite after heating/cooling treatments with different cooling rates*, *Eng. Geol.* 253 (2019) 94–110.
- [10] Z. Zhou, L. Tan, W. Cao, Z. Zhou, X. Cai, *Fracture evolution and failure behaviour of marble specimens containing rectangular cavities under uniaxial loading*, *Eng. Fract. Mech.* 184 (2017) 183–201.
- [11] Q. Dong, C. Xiong, C. Ma, H. Wei, *Experimental study on cracking behaviour of intermittent double S-shaped fissures under uniaxial compression*, *KSCE J. Civ. Eng.* 23 (6) (2019) 2483–2494.
- [12] H. Haeri, A. Khaloo, M.F. Marji, *Fracture analyses of different pre-holed concrete specimens under compression*, *Acta Mech. Sin.* 31 (6) (2015) 855–870.
- [13] S.Q. Yang, Y.H. Huang, W.L. Tian, J.B. Zhu, *An experimental investigation on strength, deformation and crack evolution behavior of sandstone containing two oval flaws under uniaxial compression*, *Eng. Geol.* 217 (2017) 35–48.
- [14] X. Fan, R. Chen, H. Lin, H. Lai, C. Zhang, Q. Zhao, *Cracking and failure in rock specimen containing*, *Adv. Civ. Eng.* 2018 (2018).
- [15] N. Hudyma, B.B. Avar, M. Karakouzian, *Compressive strength and failure modes of lithophysae-rich Topopah Spring Tuff specimens and analog models containing cavities*, *Eng. Geol.* 73 (1–2) (2004) 179–190.
- [16] Itasca Consulting Group. *PFC 2D user's manual, ver. 3.0*. Minneapolis: Minnesota; 2003.