

اعتبارسنجی الگوی شکست نمونه آزمایش شده با دستگاه مبدل بار فشاری به کششی توسط نرم افزار FRANC2D و روش ناپیوستگی جابجایی

دریافت مقاله: ۲۰-۸-۱۳۹۶

پذیرش مقاله: ۲۸-۱-۱۳۹۷

هادی حائری*

مشاور مدیر عامل شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران، ایران

Haerihadi@gmail.com

وهاب سرفرازی

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

جلال بهرامی

مدیر عامل شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران، ایران

امیر خسروی

کارشناس ارشد فنی، شرکت راهسازی و عمران ایران، تهران، ایران

چکیده:

مقاومت کششی بتن در طراحی دیوار حائل، اعضای بتنی تحت فشار، بتن های مسلح، لاینینگ های بتنی تاثیر بسزایی دارد. در این مقاله، دستگاهی معرفی می شود که بتواند شکست کششی در نمونه حفره دار ایجاد نماید. ابتدا با استفاده از نرم افزار FRANC2D هندسه های مختلفی تحت بارگذاری کششی آزمایش شده و بهترین هندسه از لحاظ توزیع تنش و ساخت انتخاب شده است. سپس دستگاه مبدل بار فشاری به کششی (CTT) بکارگرفته می شود که با استفاده از آن می توان شکست کششی را در هندسه نمونه انتخاب شده، ایجاد نمود. این شکست با روش ناپیوستگی جابجایی و نرم افزار FRANC2D اعتبارسنجی شده است. دستگاه تبدیل بار فشاری به بار کششی از ۶ قسمت مختلف ساخته شده است. جزء شماره ۱ و ۲، U شکل و II شکل می باشند که از فولاد ضد زنگ ساخته شده اند. جزء شماره ۳ و ۴، دو فولاد ضد زنگ نیمه استوانه ای با ابعاد $10\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ هستند. جزء شماره ۵ و ۶، دو تیغه فولادی با ابعاد $190\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ می باشند. نمونه های بتنی مورد استفاده در این آزمایش دارای مقطع مستطیلی و حفره مرکزی است. نمونه مورد آزمایش، دارای ابعاد $190\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ و حفره مرکزی دارای قطر 75 mm و ارتفاع 60 mm می باشد. نسبت قطر حفره به عرض نمونه برابر $0/5$ است. این هندسه با استفاده از مجموعه ای از شبیه سازی ها توسط نرم افزار FRANC2D، انتخاب شده است. نمونه های بتنی از ترکیب آب، ماسه ریز دانه و سیمان با نسبت های 40% ، 30% و 30% آماده شده اند. دستگاه و نمونه بتنی در ماشین تک محوره قرار می گیرد. با تبدیل بار فشاری به بار کششی توسط دستگاه CTT، آزمایش کشش انجام شد. الگوی شکست رخ داده در نمونه آزمایشگاهی گویای شکست کششی است. به منظور اعتبارسنجی الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی، آزمایش کشش توسط نرم افزار FRANC2D و روش ناپیوستگی جابجایی مرتبه بالاتر شبیه سازی شد. تطابق الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی، مدل عددی FRANC2D و مدل عددی ناپیوستگی جابجایی مرتبه بالاتر بیانگر اعتبار دستگاه معرفی شده در ایجاد شکست کششی در نمونه می باشد.

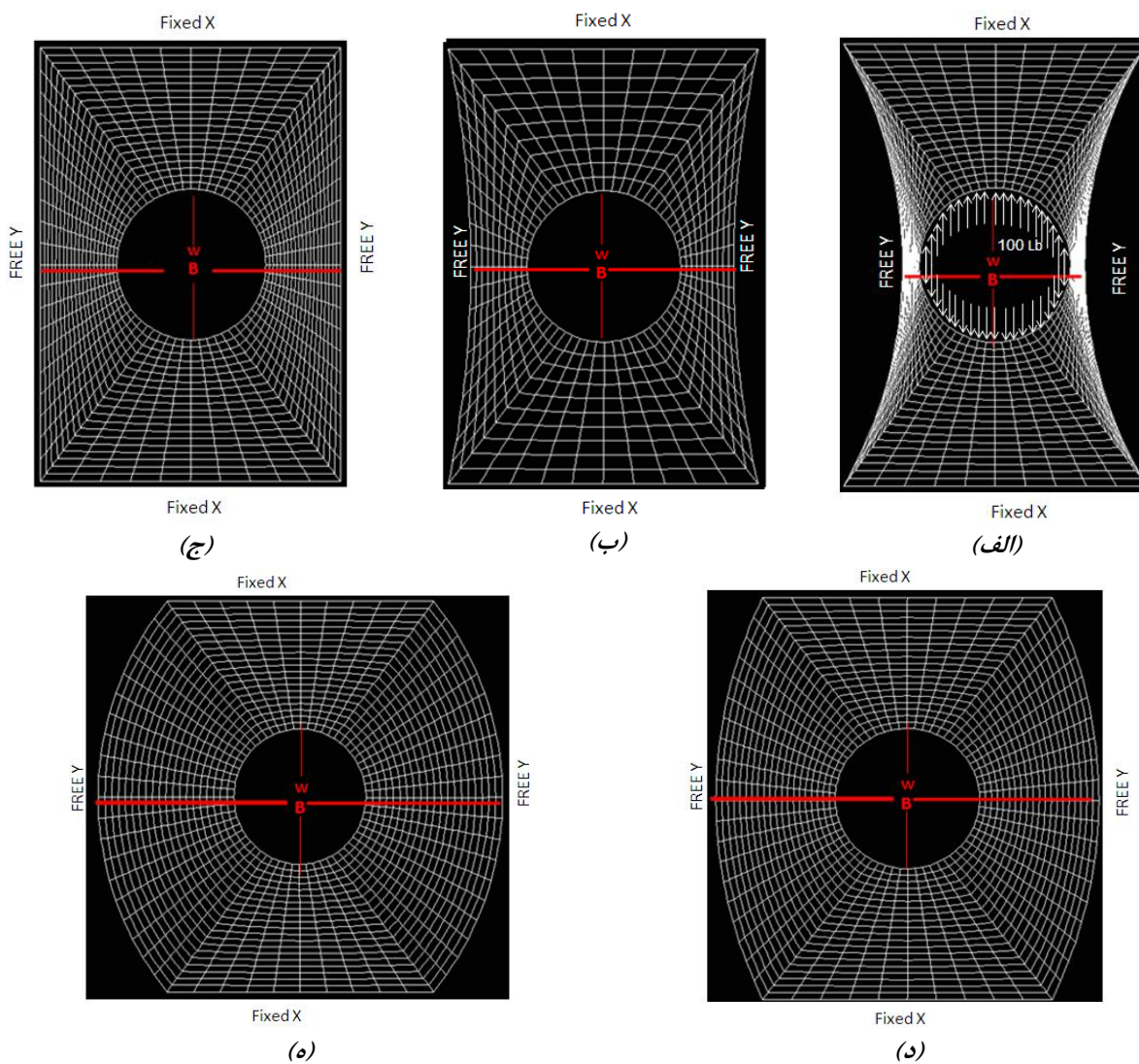
کلمات کلیدی: دستگاه تبدیل بار فشاری به کششی، مقاومت کششی، بتن، FRANC2D، روش ناپیوستگی جابجایی

مطالعات تئوریکی و آزمایشگاهی بسیاری در زمینه تعیین مقاومت کششی بتن انجام شده است [۱-۱۲]. روش های مستقیم مقادیر مقاومت کششی را بطور دقیق تخمین می زند؛ ولی کاستی های این روش نظیر آماده سازی نمونه، چسب اپوکسی مورد نیاز، ظرفیت باربری دستگاه باعث شده تا روش های غیر مستقیم بکار گرفته شوند. یرلیسی [۱۳] بیان داشت که رفتار بتن تحت کشش مستقیم بطور گسترده بررسی نشده که این دلیل محدودیت در انجام تست کشش می باشد. تست برزلی یکی از روش های غیر مستقیم است که برای اندازه گیری مقاومت کششی بتن مورد استفاده قرار می گیرد. آماده سازی نمونه در این روش آسان و انجام آزمایش ساده است. برای بتن معمولی ارتباط خوبی بین مقاومت کششی مستقیم و مقاومت برزلی برقرار است. فرمول تعیین مقاومت کششی بتن از تست برزلی از تئوری الاستیک خطی بدست آمده است [۱۴-۱۶]. رینگ تست که توسط پندیت [۱۷] ارائه شده است، برای تعیین مقاومت کششی بتن کاربرد دارد. این تست دارای مزایایی نظیر آماده سازی آسان نمونه، سیستم بارگذاری ساده و شکست دور از صفحات بارگذاری می باشد. تست پانچ دو طرفه که توسط چن [۱۸] ارائه شده، از روشهای غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی بتن می باشد. در این روش یک نمونه بتنی توسط دو مهره فولادی که در مرکز نمونه قرار می گیرند فشرده می شود و شکست کششی در نمونه اتفاق می افتد. از معایب این روش ابعاد زیاد نمونه و وقوع ترک های کششی اضافی در نمونه می باشد. آزمایش خمش سه نقطه ای و چهار نقطه ای [۱۹ و ۲۰] از روشهای غیر مستقیم تعیین مقاومت کششی بتن می باشند. از نقایص این روش ها آماده سازی نمونه بزرگ مقیاس و دستگاه بارگذاری متناسب می باشد. حائری و همکاران [۲۱]، فاتحی و همکاران [۲۲] مکانیسم شکست نمونه های شکننده را با رویکرد عددی مطالعه نمودند. موارد فوق، اهمیت مطالعه رفتار کششی بتن را آشکار می سازد. هدف این تحقیق ارائه یک سیستم بارگذاری جدید می باشد که با استفاده از آن بتوان بار فشاری را به بارکششی تبدیل و با اعمال تنش کشش به نمونه حفره دار مقاومت کششی نمونه بتنی را تعیین نمود. از اهداف دیگر تحقیق، مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج آزمایش برزلی و اعتبار سنجی الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی با روش ناپیوستگی جابجایی می باشد.

۲- انتخاب شکل هندسی مناسب برای آزمایش تبدیل فشار به کشش توسط نرم افزار FRANC2D

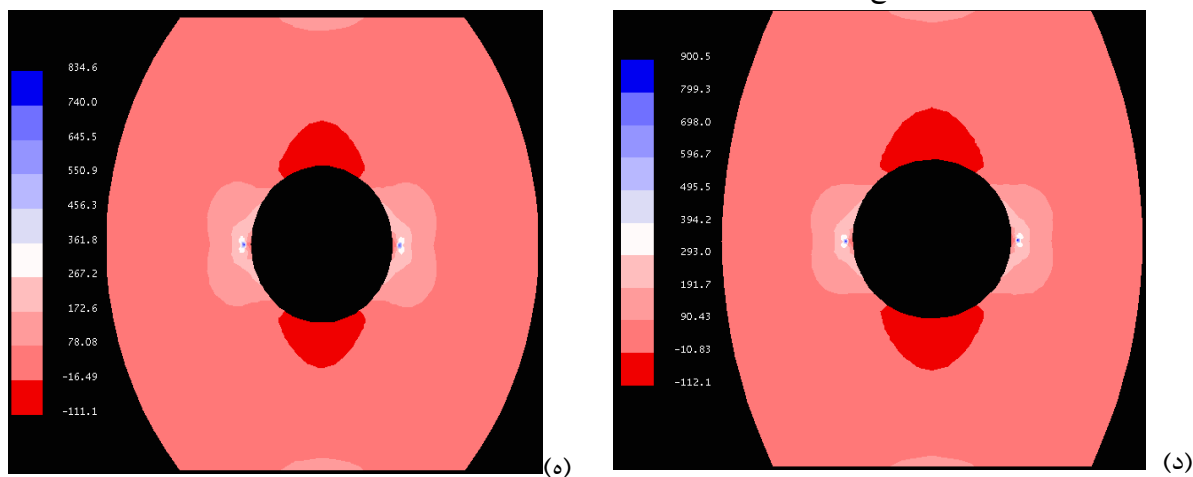
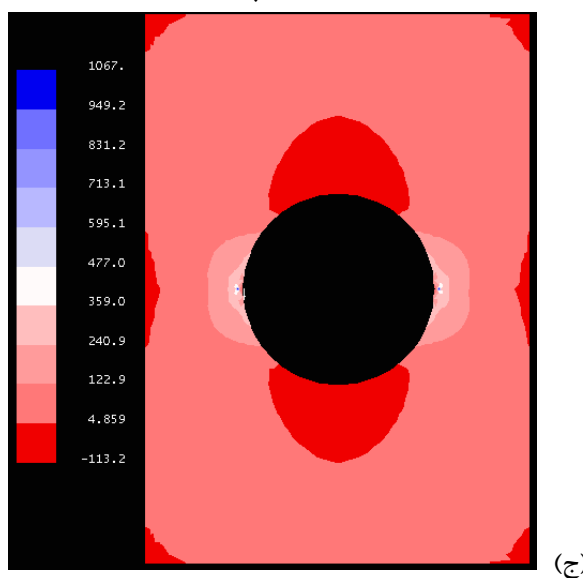
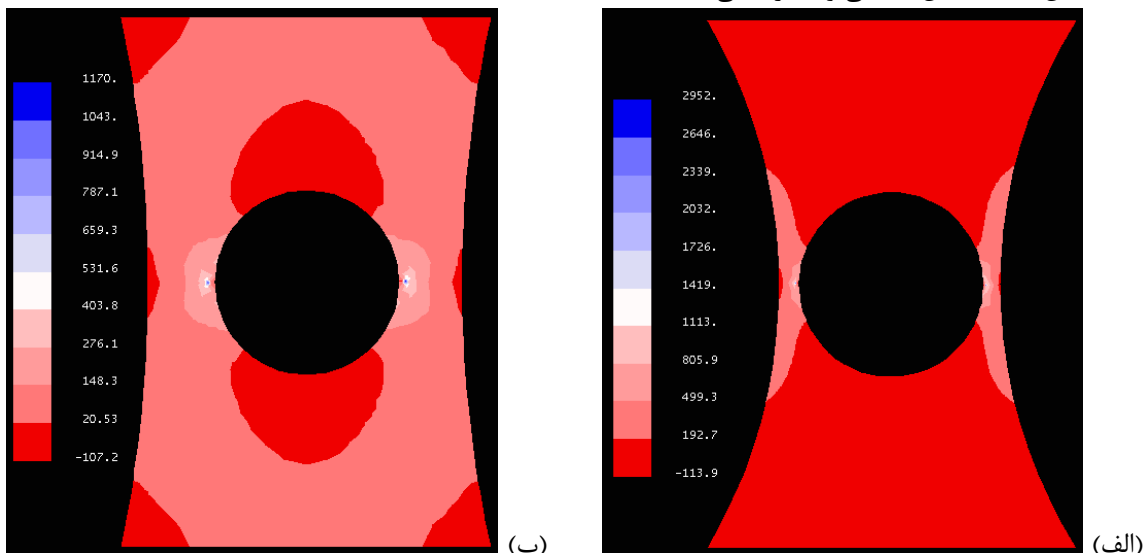
برای انجام شبیه سازی عددی از کد المان محدود دو بعدی FRANC2D استفاده شده است. این کد توسط دانشگاه کرنل ارائه شده و توسط دانشگاه کانزاس برای محیط های چندلایه ای کامل گردیده است. این کد بر اساس مکانیک شکست الاستیک خطی استوار است. مدل سازی با این نرم افزار شامل دو مرحله می باشد. در مرحله اول هندسه مدل ایجاد شده و با اعمال مش بندی، خواص مکانیکی و شرایط مرزی، مدل آماده پردازش می شود. در مرحله دوم، نیروهای مورد نظر به مدل اعمال شده و سپس پردازش مدل انجام می گردد. شکل ۱۹، ۵ مدل مختلف حاوی حفره مرکزی به همراه مش بندی، شرایط مرزی و شرایط بارگذاری را نشان می دهد. بالا و پایین مدل در جهت X بسته شده و سمت چپ و راست مدل در جهت Y ثابت می گردد. برای یافتن توزیع تنش در مدل، ۴۰۰ المان در مدل ایجاد شد. قطر حفره (w) در تمام مدل ها ۷/۵ cm (سرفرازی و همکاران [۲۳]) و عرض نمونه ها (B) متفاوت می باشد. در شکل ۱- الف مرزهای جانبی نمونه مقعر شکل می باشد و نسبت w/B، ۰/۶۲۵ است. شکل ۱- ب مربوط به نمونه مقعر شکل با نسبت w/B، ۰/۸ است. شکل ۱- ج مربوط به نمونه مستطیلی شکل با نسبت w/B، ۰/۵ است. در شکل ۱- د مرزهای جانبی نمونه محدب شکل می باشد و نسبت w/B، ۰/۳۵ است. شکل ۱- ه مربوط به

نمونه محدب شکل با نسبت w/B ، 0.25 است. نمونه های مذکور تحت نیروی کششی داخلی یکنواخت 100 پوند قرار می گیرند (شکل ۱-الف). مدول یانگ و نسبت پواسون مدل 25 GPa و 0.2 در نظر گرفته شد. چگالی مدل 2700 kg/m³ و چقرمگی شکست مود کششی I برابر 1.1 MPa√m می باشد. هدف آنالیز عددی مشخص نمودن این مطلب است که آیا تحت بارگذاری، نیروی کششی در دیواره مدل ایجاد می شود. کدام هندسه برای آزمایش کشش فیزیکی مناسب است.



شکل ۱- نمونه های با شکل هندسی مختلف، شرایط مرزی و نوع بارگذاری، الف) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.8$ ، ب) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.625$ ، ج) نمونه با لبه تخت با نسبت $w/B=0.5$ ، د) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.35$ ، ه) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.25$

شکل ۲ توزیع تنش کششی در نمونه های با شکل هندسی مختلف را نشان می دهد. خطوط تراز آبی و قرمز رنگ به ترتیب نشان دهنده تنش کششی و فشاری می باشند.

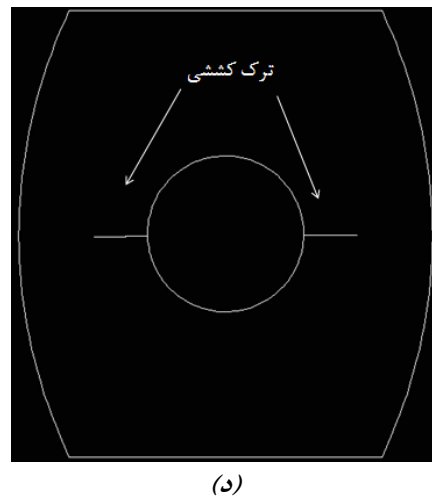
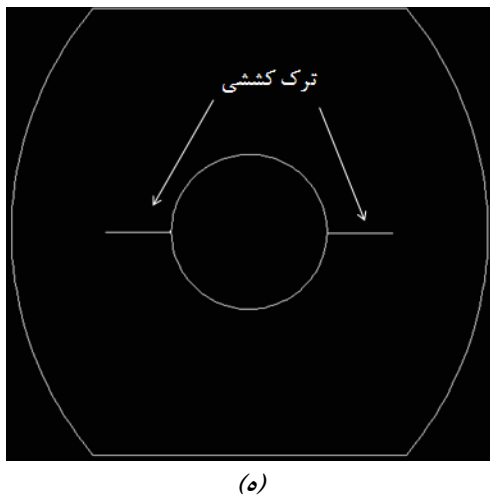
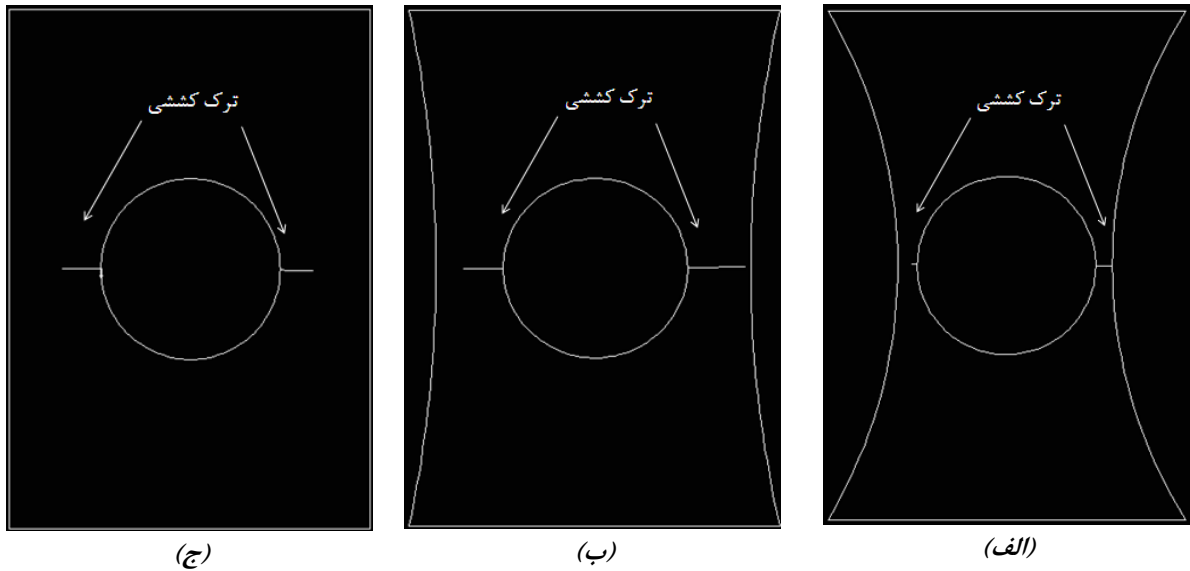


شکل ۲- توزیع تنش در نمونه های با شکل هندسی مختلف، (الف) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.8$ (ب) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.625$ (ج) نمونه با لبه تخت با نسبت $w/B=0.5$ (د) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.35$ (ه) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.25$

تنش کششی در گوشه های سمت راست و چپ نمونه متمرکز شده است. تنش فشاری نیز در بالا و پایین حفره متمرکز می شود. از آنجاییکه مقاومت کششی مدل کمتر از مقاومت فشاری است، بنابراین این مدلها تحت بار کششی از گوشه ها می شکنند؛ قبل از اینکه شکست تحت بار فشاری در راستای قائم اتفاق افتد.

در نمونه مقعر شکل نسبت $w/B=0.8$ (شکل ۲-الف)، تمرکز تنش کششی و فشاری به ترتیب ۲۹۵۲ و ۱۱۳ پوند بر اینچ مربع است. در نمونه مقعر شکل نسبت $w/B=0.625$ (شکل ۲-ب)، تمرکز تنش کششی و فشاری به ترتیب ۱۱۷۰ و ۱۰۷ پوند بر اینچ مربع است. در نمونه با لبه های تخت و نسبت $w/B=0.5$ (شکل ۲-ج)، تمرکز تنش کششی و فشاری به ترتیب ۱۰۶۷ و ۱۱۳ پوند بر اینچ مربع است. در نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.35$ (شکل ۲-د)، تمرکز تنش کششی و فشاری به ترتیب ۹۰۰ و ۱۱۲ پوند بر اینچ مربع است. در نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.25$ (شکل ۲-ه)، تمرکز تنش کششی و فشاری به ترتیب ۸۳۴ و ۱۱۱ پوند بر اینچ مربع است. بطور کلی می توان دریافت که با کاهش نسبت w/B ، تمرکز تنش کششی سمت چپ و راست حفره کاهش می یابد ولی تنش فشاری ماکزیمم همواره ثابت است. به عبارت دیگر برای ایجاد ترک در سمت چپ و راست حفره، به میزان بار بیشتری نیاز است تا تمرکز تنش در این نواحی به حد بحرانی برسد.

شکل ۳ رشد ترک را در مدل های با شکل هندسی مختلف نشان می دهد. بطور کلی ترک کششی از دیواره حفره آغاز شده و عمود بر جهت تنش کششی رشد می کند. در نمونه های با سطوح مقعر شکل، ترک به لبه نمونه متصل می شود. تمرکز تنش کششی ماکزیمم در نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.8$ و 0.625 (شکل ۲-الف و ب) به ترتیب $2/76$ و $1/09$ برابر تمرکز تنش کششی در نمونه با نسبت $w/B=0.5$ است (شکل ۲-ج). به عبارت دیگر تمرکز تنش ماکزیمم ایجاد شده در نمونه های شکل ۳-الف و ب، بقدری زیاد است که منجر به رشد ترک و اتصال آن به لبه نمونه می شود. در نمونه های با سطوح محدب شکل، ترک 25% مسیر را رشد کرده و متوقف می شود. تمرکز تنش کششی ماکزیمم در نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.35$ و 0.25 (شکل ۲-د و ه) به ترتیب $0/84$ و $0/78$ برابر تمرکز تنش کششی در نمونه با نسبت $w/B=0.5$ است (شکل ۲-ج). به عبارت دیگر تمرکز تنش ماکزیمم ایجاد شده در نمونه های شکل ۳-د و ه برای رشد ترک تا لبه نمونه کافی نمی باشد که منجر به توقف ترک در مدل می شود. لازم به ذکر است که در نمونه با سطوح تخت (شکل ۲-ج)، ترک نیمی از مسیر را رشد می کند. به عبارت دیگر در این آرایش، رشد پایدار ترک اتفاق می افتد یعنی برای رشد ترک به افزایش بارگذاری نیاز است. با مقایسه رشد ترک در مدل های با شکل هندسی مختلف، می توان دریافت که با اعمال تنش خارجی کم در نمونه های مقعر شکل، شکست آنی در این نمونه ها اتفاق می افتد. به عبارت دیگر تمرکز تنش در این نواحی به حدی زیاد است که با اعمال تنش خارجی کم، نمونه می شکنند. این مهم، حساسیت نمونه مقعر شکل را نشان می دهد که در حین نصب و یا آماده سازی فیزیکی احتمال شکست وجود دارد. لذا این هندسه ها برای آزمایش در دستگاه مبدل فشار به کشش پیشنهاد نمی شود. لازم به ذکر است که آماده سازی فیزیکی نمونه مقعر شکل، وقت گیر و زمان بر بوده که این نیز باعث عدم استفاده از این شکل هندسی می گردد.



شکل ۳- الگوی شکست در نمونه های با شکل هندسی مختلف، (الف) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.8$ ، (ب) نمونه مقعر شکل با نسبت $w/B=0.625$ (ج) نمونه با لبه تخت با نسبت $w/B=0.5$ ، (د) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.35$ ، (ه) نمونه محدب شکل با نسبت $w/B=0.25$

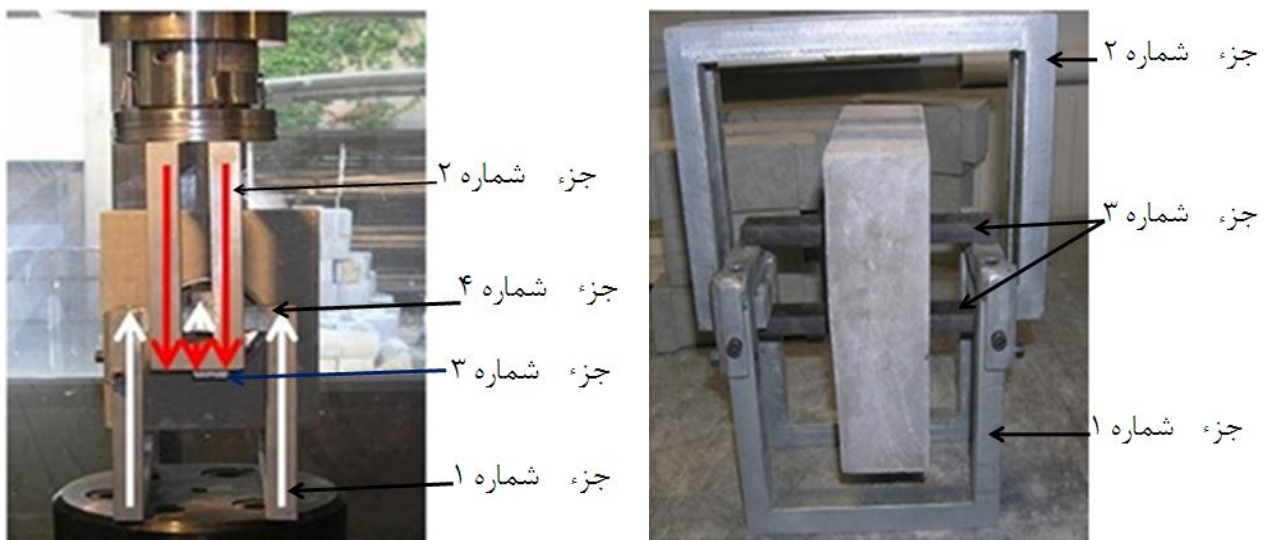
در نمونه های محدب شکل، شکست آنی در نمونه ها اتفاق نمی افتد ولی برای شکست به افزایش بارگذاری نیاز است. در این شرایط ترک بطور مستقیم رشد نمی کند بلکه با زاویه ۴۵ درجه منتشر می شود. این مهم، تجزیه و تحلیل نتایج را برای تعیین مقاومت کششی نمونه با مشکل مواجه می سازد. همچنین مقاومت زیاد نمونه باعث می شود که به تنش خارجی زیادی برای شکست نیاز باشد که ممکن است امکان تامین این بار توسط ماشین بارگذاری ممکن نباشد. لذا این هندسه ها برای آزمایش در دستگاه مبدل فشار به کشش پیشنهاد نمی شود. لازم به ذکر است که آماده سازی فیزیکی نمونه محدب شکل، وقت گیر و زمان بر بوده که این نیز باعث عدم استفاده از این شکل هندسی می شود. بنابراین نمونه با سطوح تخت برای کاربرد در آزمایش فیزیکی انتخاب می شود.

۳- مطالعات آزمایشگاهی:

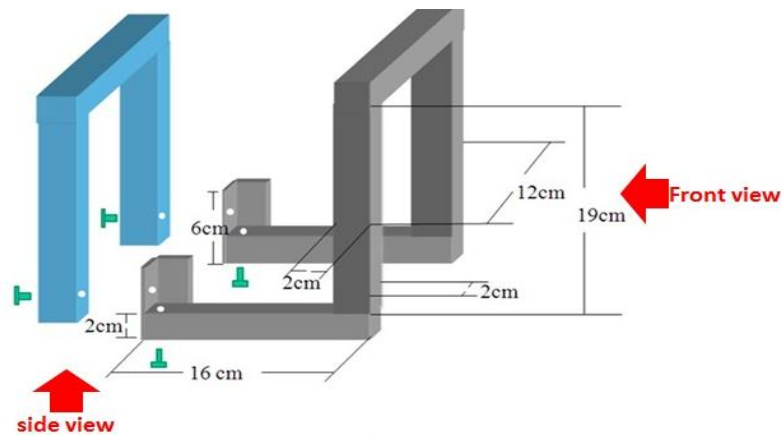
هدف این مقاله ارزیابی عملکرد دستگاه تبدیل بار فشاری به کششی و تعیین الگوی شکست نمونه بتنی است. مواد استفاده شده برای این مطالعه ترکیبی از آب، ماسه ریزدانه و سیمان می باشد. دلیل انتخاب این مواد این است که اولاً مشابه سنگ رفتار می نمایند و می توانند نماینده طیف گسترده‌ای از سنگ های شکننده باشند. ثانیاً می توان نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی قبلی انجام شده با این مواد را با نتایج جدید مقایسه کرد، ثالثاً می توان تعداد زیادی نمونه را با هندسه مورد نظر آماده سازی نمود و رابعاً می توان آزمایش‌ها را مکرراً انجام داد و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود. در این آزمایش، نمونه ها از ترکیب آب، ماسه ریزدانه و سیمان با نسبتهای ۴۰٪، ۳۰٪ و ۳۰٪ آماده می شوند. نمونه مورد آزمایش، مکعبی شکل با ابعاد $190\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ و حاوی حفره مرکزی با قطر 75 mm و ارتفاع 60 mm می باشد. نسبت قطر حفره به عرض نمونه برابر $0/5$ است. پروسه آماده سازی نمونه توسط سرفرازی و همکاران [۲۳] ارائه شده است.

۳-۱- معرفی دستگاه تبدیل بار فشاری به بار کششی

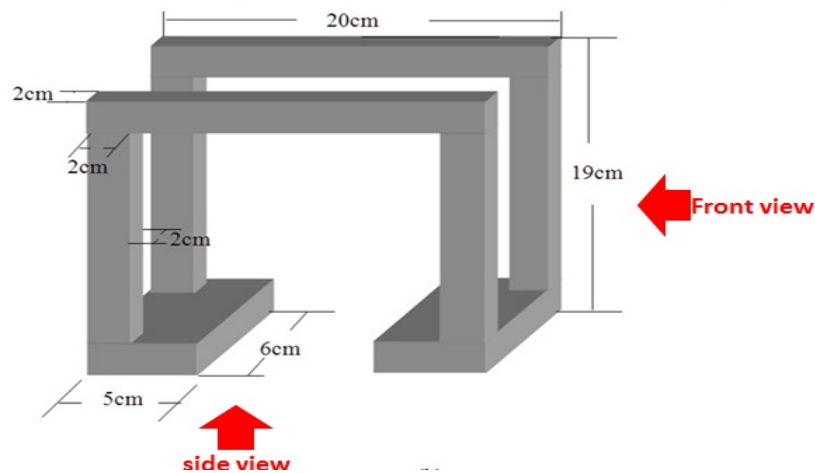
دستگاه تبدیل بار فشاری به بار کششی از ۶ قسمت تشکیل شده است (شکل ۴). جزء شماره ۱ که U شکل می باشد از فولاد ضد زنگ ساخته شده است. این جزء به دو بخش جداگانه "L" و "I" شکل قابل تفکیک است. جزء شماره ۲ دارای شکل "II" بوده و غیر قابل تفکیک است. ابعاد این دو جزء در شکل ۵-الف و ب نشان داده شده است. جزء شماره ۳ از دو فولاد ضد زنگ نیمه استوانه ای با ابعاد $10\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ساخته شده است. جزء شماره ۴ شامل دو تیغه فولادی با ابعاد $190\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ می باشد. مراحل نصب نمونه در دستگاه مبدل بار فشاری به کششی توسط سرفرازی و همکاران [۱] ارائه شده است.



شکل ۴- اجزاء دستگاه مبدل فشار به کشش و نمونه



(الف)



(ب)

شکل ۵- ابعاد اجزاء شماره ۱ و ۲، سرفرازی و همکاران [۲۳].

۳-۲- روند انجام تست کشش:

شکل ۶ ماشین فشاری تک محوره مورد استفاده برای آزمایش کشش را نشان می دهد. دستگاه CTT حاوی نمونه معلق درون این ماشین قرار می گیرد (شکل ۶). زمانی که این سیستم در ماشین بار گذاری تک محوره قرار می گیرد، صفحه بارگذاری بالایی ماشین فشاری به قالب بالایی فشار اعمال می کند. این فشار به قسمت پایین حفره منتقل شده و نمونه به طرف پایین حرکت می کند. همچنین صفحه بارگذاری پایینی ماشین فشاری به قالب پایینی فشار اعمال می نماید. این فشار به قسمت بالایی حفره منتقل شده و نمونه به طرف بالا حرکت می کند. با توجه به اینکه نیمی از نمونه به سمت بالا و نیمه دیگر به سمت پایین جابجا می شود، بنابراین حفره تحت بار کششی قرار می گیرد.

در نمونه آزمایش شده توسط دستگاه تک محوره (شکل ۶)، سطوح افقی بالا و پایین نمونه در راستای x هیچ جابجایی ندارند که این مسئله در مدلسازی عددی لحاظ شده است.

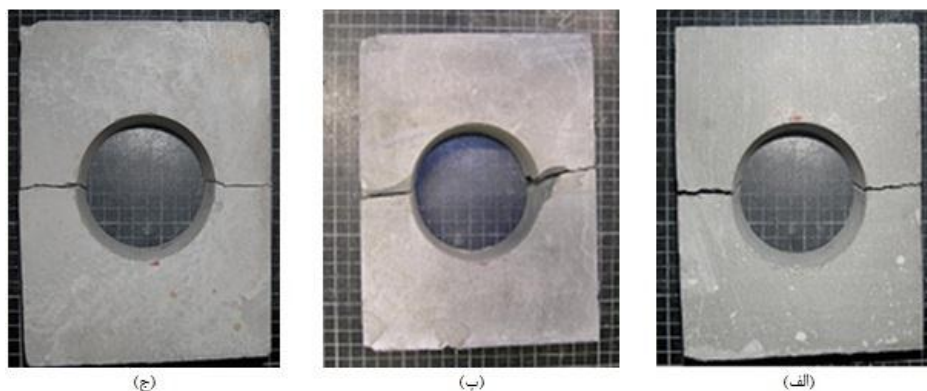
همچنین در آزمایش فشاری واقعی، نمونه در قالب مخصوص معلق است (شکل ۶). هر چند سطح زیرین قالب در جهت Y (عمود) ثابت است ولی صفحه بالایی در راستای Y- جابجایی دارد (خط چین آبی رنگ) که عکس العمل نیروی وارده توسط صفحه بالایی از طریق صفحه زیرین به نمونه اعمال می شود (خط توپر قرمز رنگ). معلق بودن نمونه باعث می شود که بخش بالا و پایین حفره به ترتیب در راستای Y- و Y جابجایی نشان دهند؛ لذا تغییر شکلها در هر دو طرف ایجاد می شود. این رفتار در مدلسازی عددی نیز رعایت شده است.

یک سلول بار هیدرولیکی ۳۰ تنی، بار فشاری را به انتهای صفحات دستگاہ CTT اعمال می نماید. یک سلول بار الکتریکی برای اندازه گیری افزایش بارگذاری استفاده می گردد. برای اینکه اثر نرخ بارگذاری بر نتایج آزمایش محو گردد، بار با نرخ ثابت 0.02 MPa/s بر نمونه اعمال می گردد. این نرخ در محدوده نرخ بارگذاری پیشنهاد شده توسط استاندارد ASTM برای تست مقاومت کششی برزیلی می باشد [۲۴].

در مجموع، سه نمونه حاوی حفره مرکزی تحت آزمایش کشش مستقیم و سه نمونه تحت آزمایش برزیلی قرار گرفت. بطور کلی شکست کششی در مرکز نمونه های حاوی حفره مرکزی مشاهده شد (شکل ۷). ترک از مرز سمت چپ و راست حفره آغاز شده، عمود بر جهت تنش کششی رشد کرده و به دیواره نمونه متصل می شود.



شکل ۶- دستگاہ بارگذاری فشاری و نحوه بارگذاری نمونه.



شکل ۷- الگوی شکست کششی در نمونه های حاوی حفره مرکزی

۴- اعتبار سنجی نتایج با روش ناپیوستگی جابجایی

۴-۱- روش ناپیوستگی جابجایی بالاتر

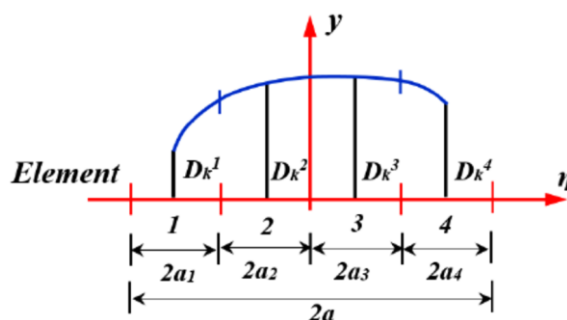
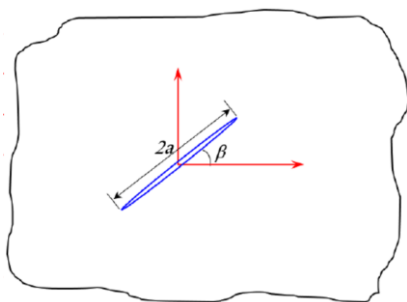
روش ناپیوستگی جابجایی یک روش المان مرزی غیر مستقیم است که توسط کروش [۲۵ و ۲۶] توسعه داده شده است. این روش برای مدلسازی مسائل گسترش ترک در مکانیک شکست سنگ بسیار کاربردی و مناسب است. در این روش میزان تغییر شکل نرمال و موازی با ترک به راحتی قابل محاسبه است. شکل ۸ توزیع ناپیوستگی جابجایی مرتبه دوم را نشان می دهد. اگر بخش ناپیوستگی در جابجایی ها در طول المان ثابت نباشد و بطور خطی یا کوادراتیک تغییر کند آنگاه المان فوق را المان با مرتبه بالا دانسته و از فرمول های ۳-۱۰ برای محاسبه ناپیوستگی در جابجایی ها در طول آن المان استفاده می شود [۲۷]. از دسته المان های چهارتایی برای حالت کوپیک استفاده شده است. ضمناً طول المان ها در هر دسته المان با هم مساوی در نظر گرفته شده است (یعنی $a_1 = a_2, a_2 = a_3, a_3 = a_4$). شکل ۸ دسته المان های چهارتایی برای حالت کوپیک را نشان می دهد.

a_1, a_2, a_3, a_4 نصف طول چهار زیر المان موجود در یک المان کوئیک می باشد. در یک المان کوئیک، چهار گره موجود در مرکز چهار زیر المان به عنوان نقاط برهم نهی شناخته می شوند.

$$D_i^j(\varepsilon) = \Gamma_1(\varepsilon)D_i^1 + \Gamma_2(\varepsilon)D_i^2 + \Gamma_3(\varepsilon)D_i^3 + \Gamma_4(\varepsilon)D_i^4 \quad i = x, y, j = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

که در آن D_i^1, D_i^2, D_i^3 و D_i^4 جابجایی ناپیوستگی های کوئیک در یک المان ناپیوستگی - جابجایی می باشد و با فرض $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$ توابع شکل به صورت زیر تعریف می گردد.

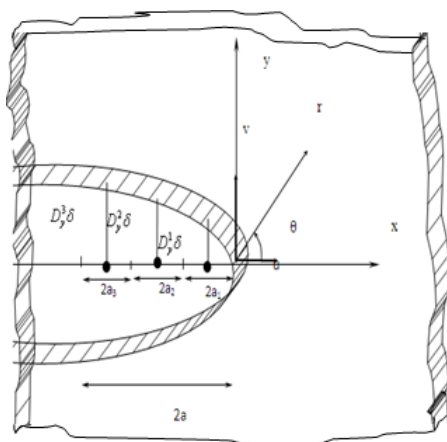
$$\begin{aligned} \Pi_1(\varepsilon) &= -(3a_1^3 - a_1^2\varepsilon - 3a_1\varepsilon^2 + \varepsilon^3)/(48a_1^3), \\ \Pi_2(\varepsilon) &= (9a_1^3 - 9a_1^2\varepsilon - a_1\varepsilon^2 - \varepsilon^3)/(16a_1^3), \\ \Pi_3(\varepsilon) &= (9a_1^3 + 9a_1^2\varepsilon - a_1\varepsilon^2 - \varepsilon^3)/(16a_1^3), \\ \Pi_4(\varepsilon) &= -(3a_1^3 + a_1^2\varepsilon - 3a_1\varepsilon^2 - \varepsilon^3)/(48a_1^3) \end{aligned} \quad (4)$$



شکل ۸- المان کوئیک برای یک المان ناپیوستگی - جابجایی مرتبه بالا [۲۲]

۴-۱-۱- المان های ویژه نوک ترک^۱

به منظور افزایش دقت در محاسبه ناپیوستگی در جابجایی های قائم $D_y(\delta)$ و برشی $D_x(\delta)$ یا به طور کلی $D_j(\delta)$ می توان از یک یا چند المان مخصوص نوک ترک استفاده کرد. سه المان ویژه نوک ترک با طول $2l$ در شکل ۹ نشان داده شده است که برای آن متغیرهای ناپیوستگی جابجایی در طول المان بدست آورده شده است. δ فاصله از نوک ترک می باشد.



شکل ۹- سه المان مخصوص نوک ترک [۲۲]

special crack tip element

$$D_j(\delta) = [\Gamma_{C1}(\delta)]D_j^1(a) + [\Gamma_{C2}(\delta)]D_j^2(a) + [\Gamma_{C3}(\delta)]D_j^3(a) \quad (5)$$

که در آن $\Gamma_{C3}(\delta)$ ، $\Gamma_{C2}(\delta)$ ، $\Gamma_{C1}(\delta)$ توابع شکل برای المان نوک ترک می‌باشند و با فرض $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Gamma_{C1}(\delta) = \frac{15\delta^{\frac{1}{2}}}{8a_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{\delta^{\frac{3}{2}}}{a_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{8a_1^{\frac{5}{2}}}, \quad (6)$$

$$\Gamma_{C2}(\delta) = \frac{-5\delta^{\frac{1}{2}}}{8a_1^{\frac{1}{2}}} + \frac{3\delta^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{3}a_1^{\frac{3}{2}}} - \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{4\sqrt{3}a_1^{\frac{5}{2}}},$$

$$\Gamma_{C3}(\delta) = \frac{3\delta^{\frac{1}{2}}}{8\sqrt{5}a_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{\delta^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{5}a_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{8\sqrt{5}a_1^{\frac{5}{2}}}$$

توابع پتانسیل $F_c(x,y)$ و $g_c(x,y)$ نسبت به x و y برای سه المان ویژه نوک ترک می‌تواند بصورت زیر تعریف گردد:

$$F_C(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-a}^a D_x(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta, \quad (7)$$

$$g_C(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-a}^a D_y(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta$$

با جایگذاری تابع جابجایی ناپیوستگی $D_j(\delta)$ (معادله (5)) در معادله (7)

$$F_C(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \left\{ \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C1}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_x^1 + \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C2}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_x^2 + \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C3}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_x^3 \right\}, \quad (8)$$

$$g_C(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \left\{ \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C1}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_y^1 + \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C2}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_y^2 + \left[\int_{-a}^a \Gamma_{C3}(\delta) \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta \right] D_y^3 \right\},$$

با جایگذاری $\Gamma_{C1}(\delta)$ ، $\Gamma_{C2}(\delta)$ و $\Gamma_{C3}(\delta)$ (معادله (6)) در معادله (8) و انتگرال‌های I_{C1} ، I_{C2} و I_{C3} به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$I_{C1}(x,y) = \int_{-a}^a \delta^{\frac{1}{2}} \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta, \quad (9)$$

$$I_{C2}(x,y) = \int_{-a}^a \delta^{\frac{3}{2}} \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta$$

$$I_{C3}(x,y) = \int_{-a}^a \delta^{\frac{5}{2}} \ln[(x-\delta)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\delta$$

بنابراین بر اساس تئوری مکانیک شکست الاستیسیته‌ی خطی (*LEFM*)، فاکتور شدت تنش حالت I و II (K_I و K_{II})

می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$K_I = \frac{\mu}{4(1-\nu)} \left(\frac{2\pi}{a_1} \right)^{\frac{1}{2}} DD_y(\ell_1), \quad \text{and} \quad K_{II} = \frac{\mu}{4(1-\nu)} \left(\frac{2\pi}{a_1} \right)^{\frac{1}{2}} DD_x(a_1) \quad (10)$$

که در آن μ و ν به ترتیب مدول برشی و پواسون هستند.

۴-۲- نحوه مدل سازی:

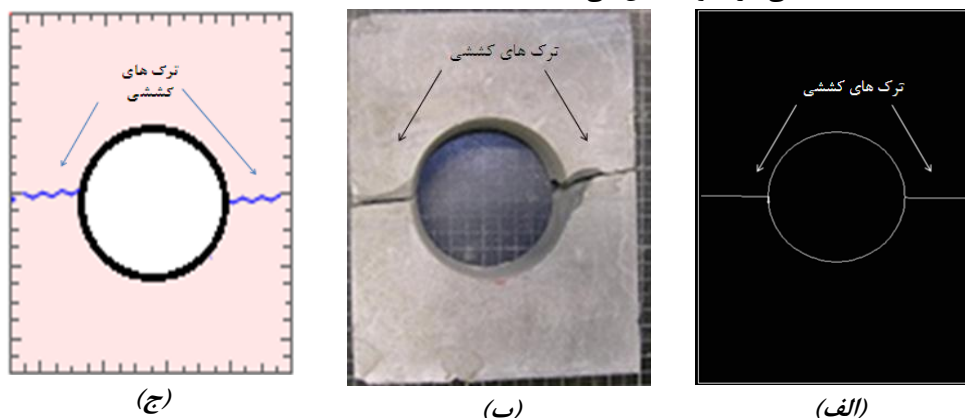
در تحقیقات با رویکرد تحلیلی، امکان مطالعه انتشار و به هم پیوستگی ترک ها در مکانیسم شکست مواد ترد (مواد بتنی و شبه سنگی) بسیار مشکل و وقت گیر می باشد. بنابراین، آزمون های آزمایشگاهی برای مطالعه الگو های انتشار و به هم پیوستگی ترک ها مناسب هستند. همچنین تست های آزمایشگاهی برای اعتبار سنجی نتایج تحلیلی و عددی مفید می باشند. بنابراین نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج روش آزمایشگاهی مقایسه شده تا صحت و دقت استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی با مرتبه بالا تأیید شود.

در فرآیند عددی انتشار ترک ها به روش گام به گام که در هر گام مقادیر فاکتورهای شدت تنش (K_I^N و K_{II}^N) و زاویه شروع ترک ها محاسبه گردیده است. در این مرحله، گسترش ترک از محیط حفره مرکزی به اندازه ۱ mm تا ۲ mm توسعه یافته و به مرز خارجی نمونه میرسد.

برای هر نمونه تکرار گام های افزایشی طول ترک متفاوت بوده است. در صورتی که بر اساس معیار ترک شرایط انتشار را داشته باشد، در گام اول زاویه انتشار از هر نوک ترک تعیین شده و به اندازه ۱ تا ۲ میلی متر ترک گسترش یافته و گام بعدی هم اندازه گام اول و در جهت زاویه انتشار به مدل اضافه می شود و مرحله قبل تا زمان رسیدن ترک ها به مرز نمونه تکرار می گردد. با توجه به تأثیر نسبت المان نوک ترک به نصف طول ترک (L/b)، با انجام آنالیز حساسیت مقدار ۰/۲ برای این نسبت در نظر گرفته شده است. به منظور مدل سازی رشد ترک توسط روش ناپیوستگی جابجایی، نمونه مستطیلی با حفره مرکزی با ابعاد نمونه $150 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ ساخته شد. قطر حفره مرکزی ۷۵ mm می باشد. علاوه بر این، در تقسیم مرز های خارجی مدل ۳۰ المان مرتبه بالا (کوبیک)، مرز های حفره ۱۰ المان مرتبه بالا (کوبیک)، ۳ المان مخصوص نوک ترک و همچنین ۲ المان مرتبه بالا (کوبیک) در هر امتداد طول ترک افزایشی و ۱ المان مخصوص نوک ترک به طول هر ترک افزایشی قبلی اضافه شده، استفاده شده است. چقرمگی شکست مود I برابر $0.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ انتخاب شد. این مدل تحت تنش خارجی $2/5 \text{ MPa}$ قرار می گیرد.

۴-۳- مقایسه الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

شکل ۱۰ الگوی شکست را در مدل عددی FRANC2D، نمونه فیزیکی و مدل عددی جابجایی ناپیوستگی را نشان می دهد. مقایسه الگوی شکست در نمونه فیزیکی و مدل های عددی FRANC2D و روش عددی ناپیوستگی جابجایی حاکی از آن است که الگوی شکست کششی در تمام نمونه ها اتفاق می افتد. ترک کششی از لبه نمونه آغاز شده و عمود بر جهت تنش کششی رشد کرده و به لبه نمونه متصل می شود. این مهم اعتبار دستگاه تبدیل بار فشار به کشش را در ایجاد شکست کششی در نمونه نشان می دهد.



شکل ۱۰- الگوی شکست، (الف) مدل عددی FRANC، (ب) نمونه فیزیکی، (ج) مدل عددی ناپیوستگی جابجایی مرتبه بالا

۳- بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از شبیه سازی عددی FRANC2D اثر شکل هندسی نمونه بر الگوی شکست مشخص گردید و بهترین شکل هندسی برای کاربرد در دستگاه مبدل فشار به کشش ارائه شد. بطور کلی نتایج مدلسازی حاکی از این است که با کاهش نسبت قطر حفره به عرض نمونه، تمرکز تنش پیرامون حفره کاهش می یابد بگونه ای که تنش بیشتری برای شکست نیاز می باشد. همچنین با افزایش نسبت قطر حفره به عرض نمونه، تمرکز تنش پیرامون حفره افزایش می یابد بگونه ای که با اعمال کمترین تنش، شکست در نمونه اتفاق می افتد. براین اساس نمونه ای با سطوح تخت برای آزمایش پیشنهاد شد. نمونه مکعبی بتنی دارای سطوح تخت با ابعاد $190 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 150$ و حاوی حفره مرکزی با قطر 75 mm می باشد. این نمونه در دستگاه مبدل فشار به کشش جایگذاری می شود. ابزار CTC برای تعیین مقاومت کششی مستقیم سنگ توسعه داده شده است. این دستگاه دارای ۶ بخش می باشد که پیرامون نمونه نصب می شود. زمانی که این سیستم در ماشین بار گذاری تک محوره قرار می گیرد، صفحه بارگذاری بالایی ماشین فشاری به قالب بالایی فشار اعمال می کند. این فشار به قسمت پایین حفره منتقل شده و نمونه به طرف پایین حرکت می کند. همچنین صفحه بارگذاری پایینی ماشین فشاری به قالب پایینی فشار اعمال می نماید. این فشار به قسمت بالایی حفره منتقل شده و نمونه به طرف بالا حرکت می کند. با توجه به اینکه نیمی از نمونه به سمت بالا و نیمه دیگر به سمت پایین جابجا می شود، بنابراین حفره تحت بار کششی قرار می گیرد و شکست کششی را در نمونه ایجاد کرد. مقایسه الگوی شکست در نمونه فیزیکی و مدل‌های عددی FRANC2D و روش عددی ناپیوستگی جابجایی حاکی از آن است که الگوی شکست کششی در تمام نمونه ها اتفاق می افتد. ترک از لبه نمونه آغاز شده و عمود بر جهت تنش کششی رشد کرده و به لبه نمونه متصل می شود. این مهم بیانگر اعتبار دستگاه تبدیل بار فشاری به کششی در ایجاد شکست کششی در نمونه می باشد.

۴- قدردانی:

شایسته است از همکاری و هم اندیشی گروه محترم مهندسی مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی همدان، که تمامی آزمایشهای انجام شده این پروژه با استفاده از امکانات و تجهیزات آن دانشکده محترم محقق گردیده است، نهایت سپاس را داریم.

۵- مراجع:

- [1] Wan Ibrahim, MH., Hamzah, AF., Jamaluddin, N., Ramadhansyah, PJ., Fadzil, AM.; 2015; "Split Tensile Strength on Self-compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash"; *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 198, pp. 2280-2289.
- [2] Tiang, Y., Shi, S., Jia, K., Hu, S.; 2015; "Mechanical and dynamic properties of high strength concrete modified with lightweight aggregates presaturated polymer emulsion"; *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 1151-1156.
- [3] Luong, M.; 1990; "tensile and shear strength of concrete and rock"; *Engineering fracture mechanics*, Vol. 35(1-3), pp. 127-135.
- [4] Joseph, O.; 2012; "Flexural and Tensile Strength Properties of Concrete Using Lateritic sand and quarry Dust as Fine Aggregate"; *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 7(3), pp. 324-331.
- [5] Silva, RV., Brito, J., Dhir, RK.; 2015; "tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*"; Vol. 83, pp. 108-118.
- [6] Gerges, N., Issa, C., Fawaz, S.; 2015; "Effect of construction joints on the splitting tensile strength of concrete"; *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 3, pp. 83-91.
- [7] Liu, X., Nie, Z., Wu, S., Wang, C.; 2015; "Self-monitoring application of conductive asphalt concrete under indirect tensile deformation"; *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 3, pp. 70-77.

- [8] Mobasher, B., Bakhshi, M., Barsby, C.; 2014; "Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests"; *Construction and Building Materials*, Vol. 70, pp. 243-253.
- [9] Kim, J., Taha, M R.; 2014; "Experimental and Numerical Evaluation of Direct Tension Test for Cylindrical Concrete Specimens"; *Advances in civil engineering*, Vol. 2014, pp. 1-8.
- [10] Rocco, R., Guinea, G.V., Palans, J.; 2001; "Elices M, Review of the splitting-test standads from a fracture mechanics point of view"; *cement and concrete research*, Vol. 31(1), pp. 73-82.
- [11] Gomez, J T., Shukla, A., Sharma, A.; 2001; "Static and dynamic behavior of concrete and granite in tension with damage"; *Theor Appl Fract Mech*, Vol. 36, pp. 37-49.
- [12] Mier, J G M., Vliet, M R A.; 2002; "Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete"; *Eng Fract Mech*, Vol. 69, pp. 235-247.
- [13] Yerlici, A.; 1965; "Behavior of plain concrete under axial tension"; *ACI Journal*, August, p. 987.
- [14] Castro-Montero, A., Jia, Z., Shah, S.P.; 1995; "Evaluation of damage in brazilian test using holographic interferometry"; In: *ACI Materials Journal* 92, No. 3: 268-275.
- [15] Hannant, D.J., Buckley, K.J., Croft, J.; 1973; "The effect of aggregate size on the use of the cylinder splitting test as a measure of tensile strength"; In: *Materials and Structures* 6, No. 31: 15-21.
- [16] Tedesco, J.W., Ross, C.A., Kuennen, S.T.; 1973; "Experimental and numerical analysis of high strain rate splitting tensile tests.: In: *ACI Materials Journal* 90, No. 2: 162- 169.
- [17] Pandit, G.S.; 1970; "Discussion on the paper, concrete rings for determining tensile strength of concrete"; *ACI Journal*, October, 847-848.
- [18] Chen, W. F.; 1970; "Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete"; *Journal of the American Concrete Institute*; Vol 1(67), pp. 993-995.
- [19] Elayesh S. M.; 2009; "Performance of laterite aggregate concrete". Un published M. Eng. Thesis. University Teknologi, Malaysia.
- [20] BS 1881-118; 1983; "Method for determining flexural strength, British Standards Institution"; London.
- [21] Haeri, H., Shahriar, K., Fatehi Marji, M ,Moarefvand, P.; 2013; "using of DDM for investigation of crack propagation in rock-like material"; *journal of analytical and numerical methods in mining engineering*, Vol. 5, pp. 38-49. (in Persian)
- [22] Marji, M.F.; 2013; "On the Use of Power Series Solution Method in the Crack Analysis of Brittle Materials by Indirect Boundary Element Method"; *Engin Fract Mech*, Vol. 98, pp. 365-382.
- [23] Sarfarazi, V., Ghazvinian, A., Schubert, W., Nejati, H., Hadei, R.; 2016; "A New Approach for Measurement of Tensile Strength of Concrete" *Periodica Polytechnica Civil Engineering*; Online First (2016) paper 8328.
- [24] ASTM C496-96.; "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens"; *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [25] Crouch, S.L.; 1967a; "Analysis of stresses and displacements around underground excavations: an application of the Displacement Discontinuity Method"; *University of Minnesota Geomechanics Report*, Minneapolis, Minnesota.
- [26] Crouch, S.L., 1967b; "Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method"; *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 10, pp. 301-343.
- [27] Fatehi Marji, M., Hosseini_Nasab, H., Kohsary A.H.; 2006; "On the uses of special crack tip elements in numerical rock fracture mechanics"; *Int. jour. of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 1669-1692.

Comparison of Failure Pattern in Sample Tested in Compression to Tensile Load Converter Device Using FRANC2D and Displacement Discontinuity methods

*Hadi Haeri **

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

Vahab Sarfarazi

Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

Jalal Bahrami

Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran

Amir khosravi

Rahsazi & Omran Iran construction Company, Tehran, Iran,

Abstract

In this paper, a compressive to tensile load converter (CTC) device has been introduced which can be used for induction of tensile failure in specimen. This device consisted of 7 different parts. Parts number 1 and 2 which have U shape and II shape section were made from stainless steel. Parts number 3 and 4 were made from two semi-cylindrical stainless steels with dimension of 10mm × 75mm × 60mm. Parts number 5 and 6 were made from two stainless steels with dimension of 190mm × 10mm × 20 mm. The concrete specimens used in this test have rectangle shape with internal pore. This geometry was gained from FRANC2D simulation outputs. The concrete samples have been prepared by mixing water, fine sand and cement by the ratio of 40%, 30% and 30%. The CTC device and sample were inserted in uniaxial test machine. The tensile test was performed by conversion of compression load to tensile load using CTC test. The tensile failure pattern occurred in the sample. For validation of experimental results, numerical simulations have been done using FRANC2D and high order displacement discontinuity method. The good correlation between failure pattern in numerical simulations and experimental test shows the validation of introduced device in induction of tensile failure in specimens.

Keywords: *Compressive to Tensile Converter Device, Tensile Strength, Concrete, FRANC2D, Displacement Discontinuity Method.*