

# مطالعه‌ی آزمایشگاهی رشد شکاف از پیش موجود در محل اتصال دو ماده با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال

شایان ساکی‌پور (کارشناس ارشد)

محمود یزدانی\* (استادیار)

احمدعلی فخمی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۴۰۰)  
دوری ۲ - ۳۷، شمار ۴/۱، ص. ۳-۱۲، (پژوهشی)

محیط‌های سنگی همواره حاوی عیوبی، از قبیل: درزه، ترک و شکاف‌های از پیش موجود هستند. در بسیاری از موارد، ترک‌ها در فصل مشترک دو ماده قرار دارند. مطالعات اندکی در خصوص رفتار ترک در فصل مشترک دو ماده به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است. در مطالعه‌ی حاضر، به صورت آزمایشگاهی به بررسی نمونه‌های شبه‌سنگ حاوی یک شکاف از پیش موجود (در هندسه‌های مختلف) در فصل مشترک دو ماده تحت آزمایش فشاری تک‌محوره پرداخته شده است. برای بررسی دقیق فرایند رشد ترک از جوانه‌زنی تا مرحله‌ی گسیختگی نمونه از روش همبستگی تصاویر دیجیتال استفاده شده است. برای شکاف با زوایای  $0^\circ$  تا  $30^\circ$  درجه، گسیختگی غالباً در اثر رشد ترک کششی، زاویه‌ی  $45^\circ$  تا  $75^\circ$  درجه، گسیختگی غالباً با گسترش ترک برشی در امتداد فصل مشترک و در زاویه‌ی  $90^\circ$  درجه، ترک کششی در مرکز نمونه و در امتداد فصل مشترک ایجاد شده است. نتایج حاصل نشان داد رشد ترک و الگوی گسیختگی به هندسه‌ی شکاف‌های از پیش موجود وابسته است.

**واژگان کلیدی:** ترک در فصل مشترک، نمونه‌ی شبه‌سنگ، رشد ترک، همبستگی تصاویر دیجیتال، الگوی گسیختگی، آزمایش فشاری تک‌محوره.

shayansakipour@modares.ac.ir  
myazdani@modares.ac.ir  
a.fakhimi@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

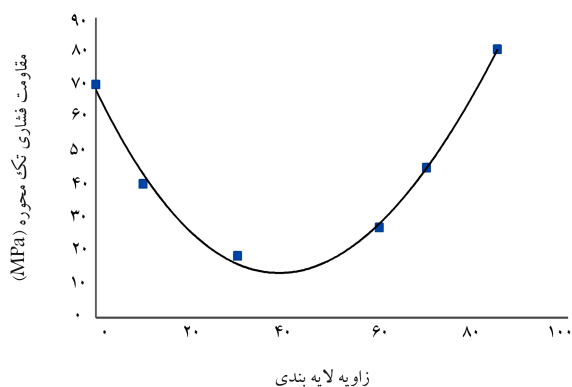
تحت تأثیر ساختار زمین‌شناسی پیچیده و بعد از یک سیر تکاملی طولانی، معمولاً نقص‌های اولیه‌ی ساختاری از قبیل درزه و ترک در سنگ‌ها به وجود می‌آید. مطالعات مختلفی نشان داده است که مورفولوژی هندسی این‌گونه ترک‌ها و درزه‌های موجود در توده‌ی سنگ، تأثیر عمده‌ی در خواص مکانیکی همچون مقاومت، تغییرشکل‌پذیری، رشد و هم‌رسی ترک‌ها تحت تأثیر بار خارجی دارد.<sup>[۱] و [۲]</sup> در نتیجه باید به این موضوع توجه کرد که درزه و ترک جزء جدایی‌ناپذیر از سازه‌های سنگی هستند. به طور کلی درکی عمیق برای فهم این‌که به چه صورتی خواص مکانیکی سنگ تحت حالت‌های بارگذاری مختلف تغییر می‌کند، برای طراحی مناسب، مطمئن و ساخت و ساز در مهندسی معدن، عمران و ساختارهای مهندسی ژئوتکنیک از قبیل فضا‌های زیرزمینی، تونل‌ها، ستون‌های سنگی، پی‌ها و همین‌طور برای درک بهتر در برخی فعالیت‌های مرتبط از قبیل حفاری و انفجار نیاز است.<sup>[۳]</sup> لذا شناسایی چگونگی شروع، انتشار، برهم‌کنش و در نهایت فرایند هم‌رسی ترک‌ها در سنگ منجر به تعیین

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۲، پذیرش ۱۴۰۰/۳/۲۳

DOI:10.24200/J30.2021.55898.2789

وجود ناپیوستگی، درزه یا ترک در سنگ معمولاً باعث کاهش مقاومت و سختی سنگ می‌شود.<sup>[۷]</sup> و همچنین منبعی برای شروع ناپیوستگی‌های جدید هستند، که ممکن است انتشار پیدا کنند و به دیگر ترک‌ها متصل شوند، در نتیجه مقاومت و سختی سنگ را بیشتر کاهش دهند.<sup>[۸]</sup> بنابراین لزوم شناخت و بررسی رفتار ناپیوستگی‌ها در توده‌ی سنگ اهمیت زیادی دارد. تاکنون مطالعات زیادی به صورت تحلیلی، آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در خصوص شکل‌گیری و انتشار ترک در نمونه‌های درزه‌دار صورت گرفته است. از زمانی که بومبولاکیس<sup>[۹]</sup> (۱۹۶۳)، انتشار ترک‌های باله‌یی کششی را از ترک‌های از پیش موجود تحت بارگذاری فشاری گزارش کرد، فرایند رشد ترک و الگوی هم‌رسی<sup>[۲]</sup> شکاف‌ها در نمونه‌های شکاف‌دار تحت بارگذاری فشاری به صورت گسترده‌ی به صورت آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی از جنس مختلف مطالعه شده است.



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری با تغییر زاویه‌ی لایه‌بندی در نمونه‌ی ناهمسان.<sup>[۱۳]</sup>

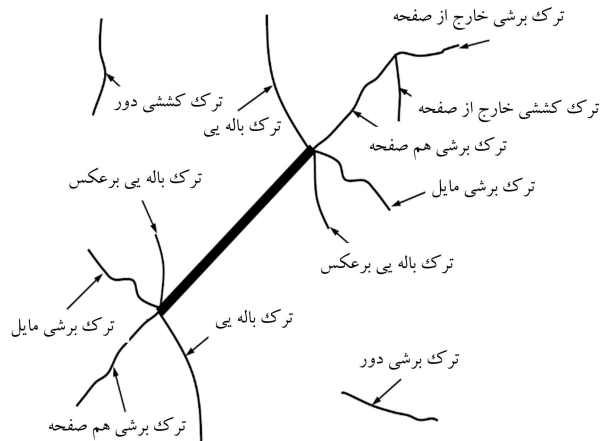
نمونه کاهش و سپس با افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی تا ۹۰ درجه، مقاومت فشاری افزایش یافته است.

اغلب مطالعات آزمایشگاهی انجام شده‌ی پیشین بر روی نمونه‌های ساخته شده از یک ماده بود و ترک‌ها در یک ماده قرار داشتند. برخی از پژوهشگران ترک موجود در محل اتصال دو ماده را به صورت عددی بررسی کرده‌اند، اما نمونه‌های دارای ترک در محل اتصال دو ماده (به طوری که قسمتی از ترک در یک ماده و قسمت دیگر آن در ماده‌ی دوم باشد) مانند محل اتصال یک سد بتنی به دیواره‌ی سنگی، نیازمند مطالعات بیشتری است. ایمنی عملیات سدهای وزنی بتنی، اغلب توسط ترک‌های موجود در فصل مشترک سد و بستر سنگی تهدید می‌شوند. این ترک‌ها معمولاً حین ساخت، توسط بارگذاری پیچیده و یا آثار محیطی در زمان سرویس‌دهی ایجاد می‌شوند. گسترش ترک‌های فصل مشترک تحت فشارهای هیدرواستاتیک می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری سد و در نهایت باعث ترک خوردن و شکست سد شود. در واقع حالت‌های مختلف گسترش ترک‌های موجود در فصل مشترک، الگوهای شکست سد بتنی واقع بر بستر سنگی را مشخص می‌کند.<sup>[۱۵]</sup>

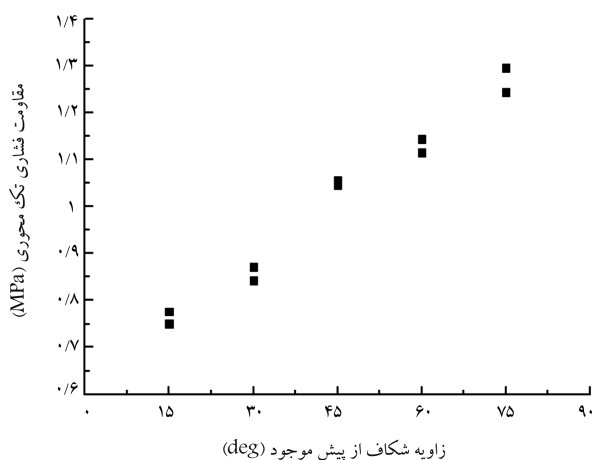
فصل مشترک، یک سطح مرزی بین دو ماده‌ی غیرمشابه است.<sup>[۱۶]</sup> اغلب مطالعات انجام شده بر روی ترک در فصل مشترک ماده‌ها، معمولاً به صورت بررسی تحلیلی بوده و تعداد کمی از آنها به صورت آزمایشگاهی صورت گرفته است.

یکی از چالش برانگیزترین مسائل در کارهای آزمایشگاهی، نزدیک کردن شرایط آزمایش در آزمایشگاه به شرایط واقعی در محل است. به منظور کاهش پیچیدگی‌های شرایط آزمایشگاهی، اغلب تعداد مشخصی از شکاف‌های از پیش موجود مصنوعی با ابعاد مشخص در نمونه‌ها ایجاد می‌شوند تا نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گیرند. نتایج مطالعات پیشین به طور مشخص نشان داده‌اند که رفتار شکست و به هم پیوستن ترک‌ها در انواع سنگ‌ها متفاوت است. مطالعات آزمایشگاهی بسیاری به منظور درک رشد و گسترش ترک‌ها در مصالح طبیعی و مصنوعی صورت گرفته است. یکی از متداول‌ترین آزمایش‌هایی که برای مطالعات در زمینه‌ی مکانیک شکست روی نمونه‌های سنگی یا شبه‌سنگی انجام شده است، آزمایش فشاری تک‌محوره، شکاف مرکزی داشته است.

روش‌های تجربی گوناگونی برای محاسبه‌ی خواص شکست ماده گسترش یافته‌اند، از روش‌های تجربی سنتی برای انجام این کار می‌توان به کرنش‌سنج<sup>۱</sup>، خط‌کش و سوزن اندازه‌گیری<sup>۱۱</sup> اشاره کرد، ولی از روش‌های اخیر برای حل بعضی از مسائل ساده استفاده می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های تجربی نوین و پرباربرد می‌توان به روش‌های نوری<sup>۱۲</sup> اشاره کرد. روش‌های نوری به دلیل محاسبه‌ی میدان کامل جابه‌جایی، غیرمخرب بودن و حساسیت بالای اندازه‌گیری برای بسیاری از



شکل ۴. انواع ترک در نمونه‌های حاوی شکاف تحت بارگذاری فشاری.<sup>[۱۱]</sup>



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری با تغییر زاویه‌ی شکاف در نمونه‌ی تک‌ماده‌یی.<sup>[۱۲]</sup>

بعد از این که مطالعات و آزمایش‌های بیشتری در این زمینه توسط پانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲)<sup>[۱۰]</sup> و چنگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۱]</sup> انجام شد، مشاهده شد که ۶ نوع ترک از نزدیک نوک شکاف‌های از پیش موجود شامل ترک‌های باله‌یی، ترک‌های باله‌بی - برعکس<sup>۵</sup>، ترک‌های برشی هم صفحه، ترک‌های برشی مایل، ترک برشی خارج از صفحه<sup>۶</sup> و ترک‌های کششی خارج<sup>۷</sup> از صفحه توسعه یافته‌اند (شکل ۴).

جیانگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۱۲]</sup> بر روی نمونه‌های مکعب‌مستطیل شکل سنگ نرم دارای ترک، آزمایش تک‌محوری انجام دادند. آنها ۷ زاویه ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه را برای ترک در نظر گرفتند و روند گسترش ترک‌ها را نیز با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال بررسی کردند.

مطابق شکل ۲، در نمونه‌ی یک ماده‌ی همگن با افزایش زاویه‌ی شکاف، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته است.

هوگ<sup>۹</sup> (۱۹۶۴)<sup>[۱۳]</sup> اثر ناهمسانی سنگ را با توجه به جهت لایه‌بندی سنگ برای زوایای مختلف بررسی کرد. همچنین فلک‌ناز (۲۰۱۶)<sup>[۱۴]</sup> بر روی نمونه‌های استوانه‌یی شکل سنگ آفیبول - بیوتیت آزمایش تک‌محوری انجام داد و اثر ناهمسانی سنگ را با توجه به جهت لایه‌بندی سنگ برای زوایای مختلف بررسی کرده است.

با توجه به شکل ۳، با افزایش زاویه‌ی لایه‌بندی تا ۴۵ درجه، مقاومت فشاری

## ۲.۲. هندسه‌ی نمونه و شکاف‌های ایجاد شده

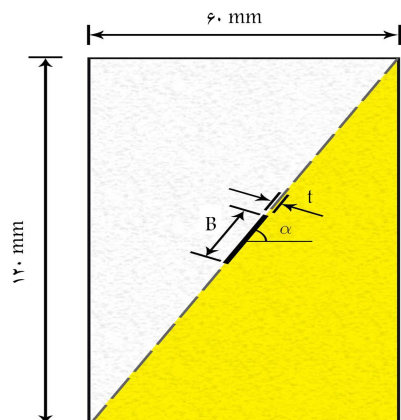
در مطالعه‌ی حاضر، به منظور ایجاد حالتی که تمرکز تنش‌های وارده در مرکز نمونه و اطراف ترک ایجاد شود، نسبت طول به ارتفاع نمونه مساوی ۲ در نظر گرفته شد. همچنین برای این‌که رشد ترک در حالت دو بُعدی صورت گیرد، ضخامت نمونه ۳۰ میلی‌متر منظور شد.<sup>[۱۰]</sup> در نتیجه نمونه‌ها با ابعاد  $60 \times 30 \times 120$  میلی‌متر (به ترتیب از چپ به راست عرض، ضخامت و ارتفاع) ساخته شدند. ضخامت شکاف (t) برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۲ میلی‌متر بود، به طوری که  $\frac{t}{B}$  آن در هر ماده قرار گیرد. برای بررسی تمامی حالت‌های ممکن، ۷ زاویه‌ی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بررسی شد (شکل ۴). طول شکاف B مساوی ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد. در مجموع ۷ نوع هندسه‌ی متفاوت شکاف در نظر گرفته شد و برای بررسی تکرارپذیری و اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، از هر هندسه ۳ نمونه ساخته شد،<sup>[۲۱]</sup> که در مجموع ۲۱ آزمایش مقاومت تک‌محوری فشاری انجام شده است.

## ۳.۲. تعیین مشخصات گچ‌های قالب‌گیری

با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر و همچنین کشش غیرمستقیم برزلی روی دیسک‌های با قطر و ضخامت به ترتیب ۱۰۰ و ۴۰ میلی‌متر، طبق استانداردهای ISRM<sup>[۲۲]</sup> و ASTM<sup>[۲۳]</sup>، ویژگی‌های مهندسی گچ‌های استفاده شده در پژوهش حاضر محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

## ۴.۲. آزمایش فشاری قطری برزلی برای دیسک دو ماده‌یی

با وجود ساخت تمامی نمونه‌ها با روند یکسان، یکی از پارامترهایی که امکان داشت در نمونه‌ها با هم تفاوت داشته باشند، مقاومت کششی فصل مشترک دو ماده بود. علت این تفاوت، سرعت بالای گیرش گچ در فصل مشترک دو ماده و اتصال گچ نوع دوم به نوع اول است. برای بررسی پارامتر مذکور، نمونه‌ی دیسک شکل برزلی



شکل ۴. مشخصات هندسی نمونه و ترک ایجاد شده در آن.

جدول ۱. ویژگی‌های مهندسی گچ‌های قالب‌گیری.

نوع گچ	پارس دندان	اسنوارک
مقاومت فشاری تک‌محوره (مگاپاسکال)	۴۵/۸	۳۶/۶
مقاومت کششی برزلی (مگاپاسکال)	۸/۹	۷/۱
مدول کشسانی (گیگاپاسکال)	۱۰/۴	۱۰/۳

مسائل پیچیده پیشنهاد می‌شوند. در بین روش‌های نوری، به روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی به دلیل چیدمان ساده و دقت بسیار بالای اندازه‌گیری (قابلیت اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی تا  $0.01$  پیکسل<sup>[۱۳]</sup>، در سال‌های اخیر بسیار توجه شده است. روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال<sup>[۱۴]</sup>، یک روش تجربی، نوری، غیرتماسی و غیرمخرب است، که اخیراً برای تحلیل تنش و کرنش اجسام توسعه یافته است. این روش بر پایه‌ی مقایسه‌ی عکس‌هایی است که قبل و بعد از بارگذاری توسط دوربین از جسم گرفته می‌شود، که اصطلاحاً به عکس‌های گرفته شده، مرجع و تغییرشکل‌یافته می‌گویند.<sup>[۱۷]</sup> در روش اخیر از ایجاد یک الگوی لکه‌ی خاکستری بر روی سطح جسم استفاده می‌شود تا وضوح تصویر بالا رود و زیرناحیه‌های منحصربه‌فرد از لکه‌های سیاه و سفید و خاکستری تشکیل شود. این روش که به آن عکس‌برداری الگوی لک دیجیتالی<sup>[۱۵]</sup> نیز گفته می‌شود، بر اساس رقومی کردن روش الگوی لک<sup>[۱۶]</sup>، با عکس‌برداری از قطعه‌یی که نور سفید به آن تابانده شده است و سطح آن الگوی لک تصادفی دارد، برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و کرنش عمل می‌کند. در روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی، الگوی لک قبل و بعد از تغییرشکل صفحه‌یی با استفاده از دوربین ثابت، برای به دست آوردن میدان جابه‌جایی با دقت زیر یک پیکسل ثبت می‌شوند.<sup>[۱۸]</sup> روش‌های مختلفی برای ایجاد این الگو وجود دارد که همگی بر پایه‌ی ایجاد خطوط، شبکه‌بندی، نقطه‌گذاری و یا ترکیب نقاط سیاه و سفید روی سطح جسم هستند.<sup>[۱۹]</sup> در حالت معمول این الگو با اسپری کردن رنگ سفید و پس از آن اسپری کردن رنگ سیاه روی قطعه ایجاد می‌شود.

در نوشتار حاضر، نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی در مورد فرایند شکست در نمونه‌های شبه‌سنگی شکننده‌ی دارای شکاف از پیش موجود در فصل مشترک دو ماده با زوایای شکاف متفاوت ارائه شده است. نمونه‌ها به شکل مکعب‌مستطیل متشکل از دو نوع گچ پُر مقاومت بودند، که تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها، به صورت محاسبه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ها، بررسی دقیق فرایند رشد ترک از جوانه‌زنی تا مرحله‌ی گسیختگی در نمونه‌ها با زوایای شکاف متفاوت با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال ارائه شده‌اند.

## ۲. روش پژوهش

در پژوهش حاضر، توسعه‌ی ترک از شکاف‌ها و رفتار هم‌رسی ترک‌ها بر روی نمونه‌های شبه‌سنگ از جنس گچ قالب‌گیری شده دارای شکاف از پیش موجود تحت بارگذاری تک‌محوره‌ی یک‌نواخت بررسی شده است. در ادامه، مواد تشکیل‌دهنده‌ی نمونه‌ها و نحوه‌ی ساخت آنها بیان شده است.

## ۱.۲. مواد تشکیل‌دهنده‌ی نمونه‌ها

گچ قالب‌گیری شده سال‌ها به عنوان یک سنگ مدل در سراسر جهان و از جمله در ۴۰ سال گذشته توسط تیم تحقیقاتی در دانشگاه MIT استفاده شده است.<sup>[۱۹-۲۱]</sup> به علاوه استفاده از گچ قالب‌گیری شده این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان با ایجاد چند نمونه‌ی کاملاً مشابه، بحث تکرارپذیری نتایج را ارزیابی کرد. امکان ایجاد نمونه‌ها با هر شکل دلخواه و ایجاد شکاف با هر شکل و اندازه در این ماده بسیار ساده‌تر از نمونه‌های سنگ طبیعی است. از آن‌جا که نمونه‌های ساخته شده در پژوهش حاضر، از دو ماده تشکیل شده‌اند، برای ساخت آنها از دو نوع گچ قالب‌گیری شامل گچ زردرنگ پارس دندان (تیپ ۳) ساخت ایران و گچ سفیدرنگ اسنوارک<sup>[۱۷]</sup> (تیپ ۳) ساخت کشور کره‌ی جنوبی استفاده شده است.

مطابق شکل ۵ ساخته شد، که شامل یک فصل مشترک بین دو ماده در طول قطر آن بوده است.

انجام آزمایش فشاری قطری برزیلی طبق استاندارد ASTM<sup>[۲۲]</sup> در شرایطی صحیح و قابل تفسیر است که مدول کشسانی دو ماده یکسان باشد (نمونه‌ی همگن<sup>[۱۸]</sup>)؛ که با توجه به جدول ۱، مدول کشسانی دو ماده تقریباً یکسان بوده است. نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری دیسک برزیلی قرار گرفتند. برای بررسی تکرارپذیری نتایج، سه نمونه‌ی یکسان آزمایش شدند. نتایج حاصل از آزمایش برزیلی نمونه‌ها، تقریباً مشابه بود و می‌توان مقاومت کششی فصل مشترک را برای نمونه‌ها یکسان و برابر  $4/1$  مگاپاسکال در نظر گرفت. نکته‌ی قابل توجه آن است که مقاومت کششی فصل مشترک دو ماده، از مقاومت کششی هر یک از دو ماده‌ی مذکور مطابق جدول ۱ کمتر بوده است.

## ۵.۲. قالب ساخت نمونه

قالب نمونه و قطعات نیمه‌تفلونی در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. برای ساخت نمونه‌ی دو ماده‌یی، ابتدا باید قالب نیمه‌ی اول با گچ پارس دندان و پس از گیرش اولیه، نیمه‌ی دوم با گچ اسنوراک پر شود. به هنگام ریختن ملات برای تشکیل نیمه‌ی اول، نیمه‌ی دوم باید با ماده‌یی پر شود تا ماده‌ی اول به درون آن نفوذ نکند. به این منظور برای تمامی زوایا، قطعاتی از جنس تفلون ساخته شد تا نیمه‌ی مورد نظر را پر کنند. قالب نمونه‌ها نیز از جنس تفلون ساخته شده است. تمامی وجوه قالب برای سهولت در خارج کردن قطعات نیمه‌تفلونی، قابل باز شدن هستند.



شکل ۵. نمونه‌ی برزیلی دو ماده‌یی.

## ۶.۲. چگونگی آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های گچ قالب‌گیری شده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر با استفاده از ترکیب پودر گچ با آب به نسبت ۳ به ۱ جرمی ساخته شده‌اند. به منظور کاهش آب انداختن ملات و ته‌نشین شدن گچ در آب، از افزودن پودر خاک دیاتومه به مخلوط آب و گچ، با نسبت جرمی ۱ خاک دیاتومه به ۳۵ آب استفاده شده است. در ابتدا مخلوط آب و خاک دیاتومه به مدت ۲۰ ثانیه با یکدیگر ترکیب شدند و سپس پودر گچ به صورت تدریجی به ترکیب اضافه و پس از آن ملات به مدت ۲ دقیقه با استفاده از مخلوط‌کن هم زده شد.

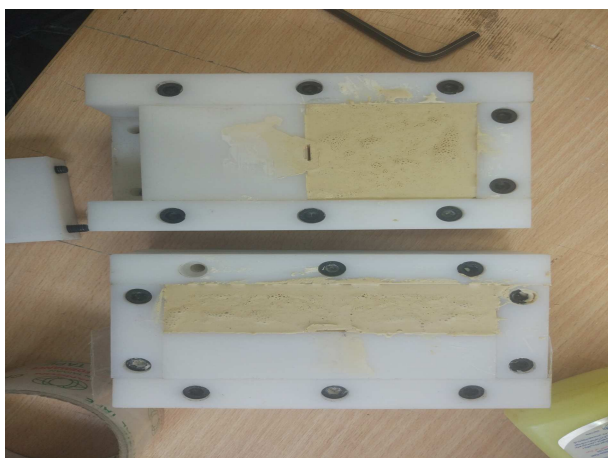
برای ایجاد شکاف‌ها، ابتدا از تسمه‌های فلزی به ضخامت ۱ میلی‌متر برای ایجاد شکاف در ماده‌ی اول استفاده شد. سپس با خروج تسمه‌ی اول و قرار دادن تسمه‌هایی از جنس پلکسی‌گلس به ضخامت ۲ میلی‌متر شکاف کلی ایجاد شد. برای تسهیل در جداسازی نمونه پس از خشک شدن، سطوح داخلی قالب به وازلین آغشته شدند. همچنین برای تسهیل در خارج کردن تسمه‌های فلزی و پلکسی‌گلس، سطوح آنها به روغن سیلیکون آغشته شدند.

نیمه‌ی تفلونی (با توجه به زاویه‌ی شکاف) درون قالب قرار گرفت و ثابت شد. سپس تسمه‌ی ۱ میلی‌متر چسبانده شد. مخلوط گچ، داخل قالب مورد نظر ریخته شد. سپس به منظور خروج حباب‌های هوای محبوس شده در مخلوط، هر قالب به مدت ۴ دقیقه بر روی میز لرزان لرزانده شده است. بعد از زمان گیرش اولیه‌ی تسمه‌ی فلزی جدا شده (۸ دقیقه)، قالب باز و نیمه‌ی تفلونی جدا شد (شکل ۷). سپس تسمه‌ی پلکسی با ضخامت ۲ میلی‌متر در محل تسمه‌ی قبلی قرار گرفت و ملات گچ نوع ۲ درون قالب ریخته شد. به منظور خروج حباب‌های هوای محبوس شده در مخلوط، هر قالب به مدت ۴ دقیقه بر روی میز لرزان، لرزانده و پس از ۸ دقیقه، تسمه‌ی دوم خارج شد.

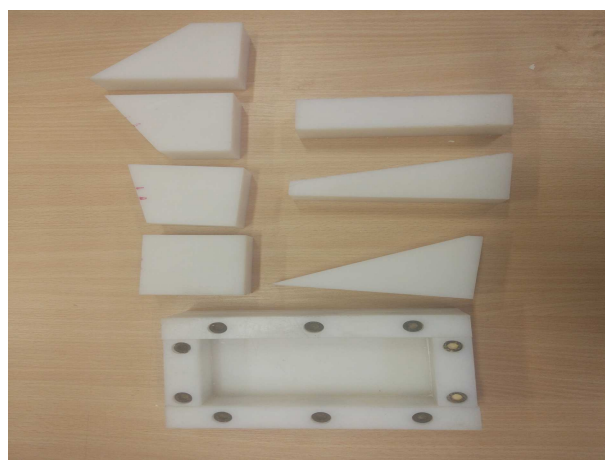
پس از ۳۰ دقیقه، نمونه از قالب خارج و به یک محل تراز شده برای ذخیره‌سازی موقت در دمای اتاق انتقال داده شد ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار گرفت. نمونه‌ها به مدت ۴ روز در گرم‌خانه با دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند، تا وزن آنها به مقدار ثابت برسد. در شکل ۸، نمونه‌های آماده شده مشاهده می‌شوند.

## ۷.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها برای برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی

در مراحل قبلی، نمونه از لحاظ هندسی آماده شد و در آخرین مرحله‌ی قبل از

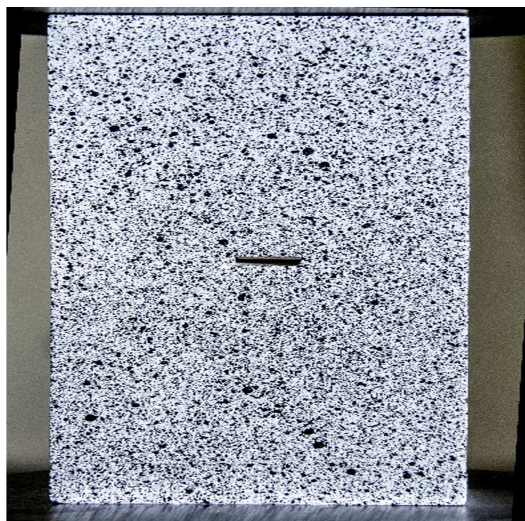


شکل ۷. خروج تسمه‌ی ۱ میلی‌متر و باز کردن قالب.



شکل ۶. قالب ساخت نمونه و قطعات نیمه‌تفلونی.





شکل ۱۰. الگوی لک پاشیده شده روی یک نمونه.



شکل ۱۱. چیدمان دستگاه‌ها برای انجام آزمایش.

که بر روی آنها آزمایش انجام می‌شود، باید لکه‌ی تصادفی مناسب داشته باشند. چیدمان کلی در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

برای تصویربرداری در انجام روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال از دوربین DSLR ساخت شرکت نیکون با مدل DV۱۰۰ با رزولوشن ۲۴/۱ مگاپیکسل و حسگر CMOS استفاده شده است. دوربین DSLR از طریق نرم‌افزار رایانه‌ای مربوط به خود دوربین کنترل می‌شود. همچنین از لنز Nikkor ۸-۱۰۵ mm استفاده شد.

در حالت کلی، آزمایش‌ها به این صورت انجام شد که نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی کامل بین دو فک دستگاه بارگذاری قرار داده شدند و با استفاده از رایانه‌ی کنترل‌کننده‌ی دستگاه، بارگذاری تعیین و مشخص شد و در حین انجام آزمایش مقدار بار توسط برنامه‌ی نرم‌افزاری دستگاه قرائت و ثبت شد. در لحظه‌ی شروع بارگذاری به صورت هم‌زمان، بارگذاری و تصویربرداری (با نرخ یک تصویر بر ثانیه) انجام شده است. یعنی بدین صورت عمل شد که در لحظه‌ی شروع بارگذاری، اپراتور دستگاه بارگذاری با فرمان شروع به اپراتور دوربین عکاسی شروع عکس‌برداری را اعلام کرده و بارگذاری و عکس‌برداری بدین شکل به صورت هم‌زمان انجام شده است.

برای بارگذاری از دستگاه ستام<sup>۱۹</sup> با ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده شده است، که در آن ثبت و قرائت میزان بار اعمال شده به کمک سلول بار خود دستگاه انجام



شکل ۸. نمونه‌های آماده شده.



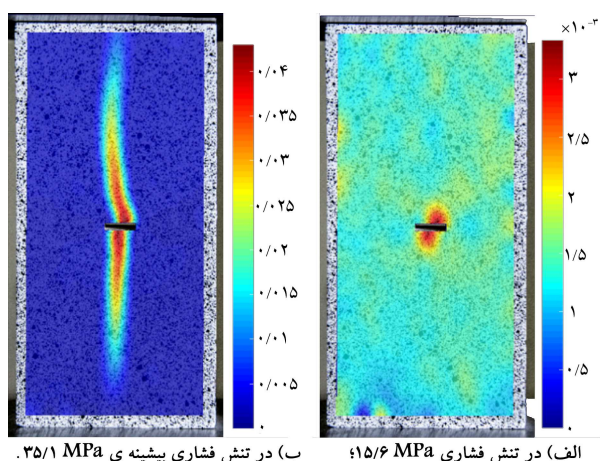
شکل ۹. یک لایه‌ی نازک رنگ سفید مات اسپری شده بر روی نمونه.

انجام آزمایش، نیاز بود که الزامات آماده‌سازی‌های نمونه برای انجام روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال انجام شود. همان‌طور که اشاره شد، در روش کنونی، بر روی نمونه یک الگوی لکه‌ی نامنظم ایجاد می‌شود. در پژوهش حاضر برای ایجاد الگوی لک نامنظم از اسپری رنگ مات استفاده شد. برای ایجاد الگوی لک به این صورت عمل شد که در ابتدا مطابق شکل ۹، یک لایه‌ی رنگ سفید مات بر روی سطح نمونه اسپری شد و به مدت یک روز نمونه‌ها در یک محیط بدون گردوغبار قرار گرفتند.

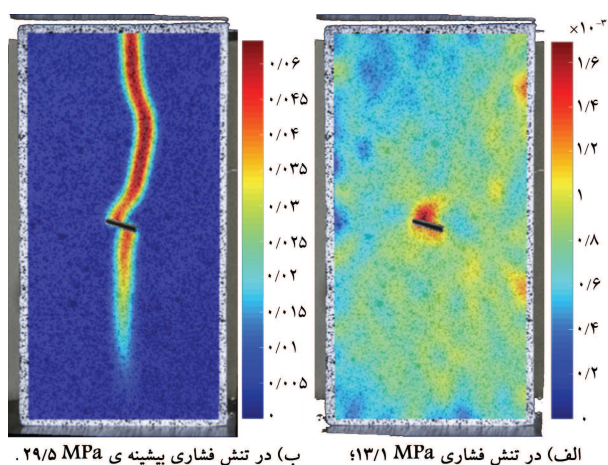
پس از یک روز، الگوی لک سیاه با استفاده از اسپری رنگ سیاه مات همانند شکل ۱۰ بر روی نمونه‌ها اسپری شد. با توجه به این‌که محدوده‌ی اندازه‌ی الگوی لکه با توجه به ابعاد نمونه تنظیم می‌شود، برای دست‌یابی به الگوی لکه‌ی بهینه، ۴ نمونه با الگوی لک‌های متفاوت پاشیده شد، که بعد از انجام آزمایش و سپس تحلیل داده‌ها، الگوی لکه‌ی بهینه برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و کرنش سطح نمونه مشخص شد. در نهایت، پس از دست‌یابی به الگوی لک بهینه، الگوی لک بر روی تمامی نمونه‌ها اسپری شد.

## ۸.۲. روند انجام آزمایش و چیدمان کلی

برای انجام روش همبستگی تصاویر دیجیتال، به یک سری تجهیزات و الزامات نیاز است. در روش اخیر، از دوربین دیجیتال و لامپ LED استفاده می‌شود. نمونه‌هایی



شکل ۱۲. کانتورهای کرنش افقی نمونه‌ی صفر درجه.



شکل ۱۳. کانتورهای کرنش افقی نمونه‌ی ۱۵ درجه.

افزایش بارگذاری، مقداری خمش در مرکز شکاف ایجاد شده است، که این خمش باعث ایجاد تنش کششی در ناحیه‌ی مرکز شکاف شده و با توجه به مقاومت کمتر سنگ در برابر کشش نسبت به فشار و برش در ناحیه‌ی مذکور، ترک به صورت کششی رشد کرده است. با افزایش تنش فشاری مشاهده می‌شود که ترک‌های کششی رشد کرده، رشد بیشتری داشته‌اند و مسیر آنها تقریباً در جهت بارگذاری پیشینه قرار گرفته است. گسترش ترک کششی در هر دو نیمه تقریباً از وسط شکاف شروع شده و گسترش یافته است. تنش گسیختگی در زاویه‌ی صفر درجه برابر با ۳۵/۱ مگاپاسکال به دست آمده است.

مطابق شکل ۱۳، برای زاویه‌ی ترک ۱۵ درجه در تنش ۱۳/۱ مگاپاسکال در نیمه‌ی بالایی نمونه، یک ترک اولیه تقریباً از نوک شکاف به سمت بالای نمونه شروع به رشد کرد (شکل ۱۳ - الف). با افزایش تنش فشاری مشاهده می‌شود که ترک‌های کششی با شدت بیشتری رشد کرده و مسیر آنها تقریباً در جهت بارگذاری پیشینه قرار گرفته است. گسترش ترک در نیمه‌ی بالایی تا گسیختگی در تنش ۲۱ مگاپاسکال ادامه یافته است (شکل ۱۳ - ب). گسترش ترک کششی در نیمه‌ی بالایی از نزدیکی نقطه‌ی X شروع و گسترش یافته است، در حالی که در نیمه‌ی پایینی از نزدیکی نقطه‌ی Y شروع و گسترش یافته است. تنش گسیختگی در زاویه‌ی ۱۵ درجه برابر با ۲۹/۵ مگاپاسکال به دست آمد.

می‌شود. هر نمونه تحت بارگذاری فشاری با نرخ ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت. به طور میانگین، زمان تقریبی بارگذاری هر نمونه تا زمان شکست برابر ۷ دقیقه اندازه‌گیری شد. قرائت میزان بار اعمال شده و همچنین بارگذاری تا لحظه‌ی شکست نمونه صورت گرفت. سپس اطلاعات نهایی توسط نمایشگر و خروجی اکسل ذخیره شد. در لحظه‌ی شروع بارگذاری با استفاده از دوربین از سطح نمونه به طور پیوسته با نرخ ۱ فریم بر ثانیه تصویربرداری شد. [۲۵] پارامتر حساسیت به نور ۲ به صورت دستی روی ۱۰۰ تنظیم شد، زیرا یک نورپردازی مصنوعی قدرتمند (لامپ LED) در دسترس بود. به منظور کمینه‌سازی تأثیر اعوجاج لنز ۲، فاصله‌ی بین دوربین و سطح نمونه تقریباً ۰/۲ متر و فاصله‌ی کانونی (بزرگ‌نمایی ۵۵) میلی‌متر تعیین شد.

## ۹.۲. تحلیل تصاویر با استفاده از نرم‌افزار Ncorr

بعد از انجام آزمایش‌ها و عکس‌برداری از سطح نمونه‌ها برای به دست آوردن میدان جابه‌جایی سطح نمونه و میدان کرنش با کمک روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال از نرم‌افزار Ncorr استفاده شد. [۲۶] Ncorr یک نرم‌افزار در زمینه‌ی برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال دو بعدی است، که قادر به اندازه‌گیری تغییر شکل سطح و کرنش از طریق الگوی لکه‌ی اعمال شده بر روی نمونه است. در ابتدای کار بر روی تصاویر نمونه‌ها، یک ناحیه‌ی مورد علاقه ۲۲ بر روی اولین تصویر گرفته شده از نمونه‌ها قبل از اعمال بار مشخص شد و یک مقیاس برای گرفتن خروجی بر حسب میلی‌متر در نرم‌افزار تعریف شد. برای دنبال کردن نقاط در نرم‌افزار و در نتیجه به دست آوردن جابه‌جایی‌ها، از دو پارامتر اندازه‌ی زیرمجموعه ۲۳ و فاصله‌ی نقاط ۲۴ استفاده شده است. اندازه‌ی زیرمجموعه مشخص می‌کند که نرم‌افزار از چه تعداد پیکسل برای پیگیری نقاط استفاده کند. هر چه این مقدار کمتر باشد، کرنش محلی جزئی‌تری مشاهده می‌شود؛ ولی پیگیری نقاط توسط کد نرم‌افزار در عکس‌های بعدی سخت‌تر می‌شود، که ممکن است با خطا همراه باشد. اندازه‌ی زیرمجموعه تا جایی که امکان دارد باید کم در نظر گرفته شود، ولی در عین حال به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد که نرم‌افزار بتواند نقاط را در تمام مراحل بارگذاری پیگیری کند. با توجه به پیشنهادها داده شده توسط کائو ۲۵ و همکارش (۲۰۱۷)، [۲۷] اندازه‌ی زیرمجموعه مابین ۲۵ الی ۳۵ پیکسل در نظر گرفته شد. پارامتر فاصله‌ی نقاط، میزان هم‌پوشانی زیرمجموعه‌ها را مشخص می‌کند، که فاصله‌ی نقاط به میزان ۲۰ الی ۵۰ درصد میزان زیرمجموعه‌ها در نظر گرفته شد. در نهایت تمامی آزمایش‌های انجام شده بعد از استفاده از نرم‌افزار Ncorr، تحلیل و نتایج ارائه شد.

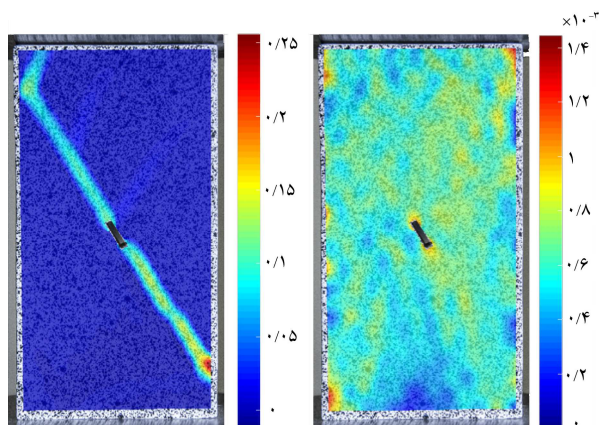
## ۳. بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها

### ۱.۳. الگوی گسیختگی

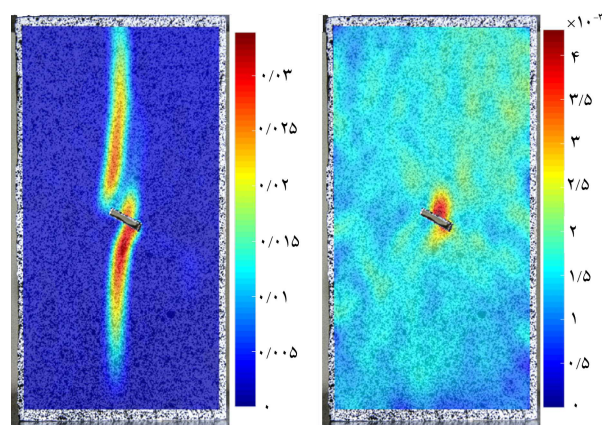
با استفاده از کانتورهای کرنش افقی ( $\epsilon_{xx}$ ) به دست آمده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال سعی شده است ماهیت دقیق ترک‌ها، نوع هم‌رسی اتفاق افتاده و زمان دقیق رشد هر ترک به همراه تنش متناظر به صورت کامل توضیح داده شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ برای زاویه‌ی ترک صفر درجه مشاهده می‌شود:

در تنش ۱۵/۶ مگاپاسکال به صورت هم‌زمان دو ترک اولیه تقریباً از وسط شکاف یکی به سمت پایین نمونه و دیگری به سمت بالای نمونه شروع به رشد کردند (شکل ۱۲ - الف). به نظر می‌رسد علت رشد ترک کششی از مرکز شکاف این است که در ابتدای بارگذاری، تنش فشاری در دو انتهای شکاف مقدار بیشتری دارد و با

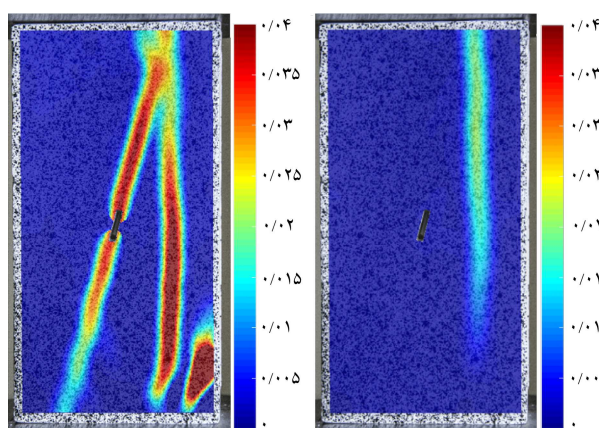




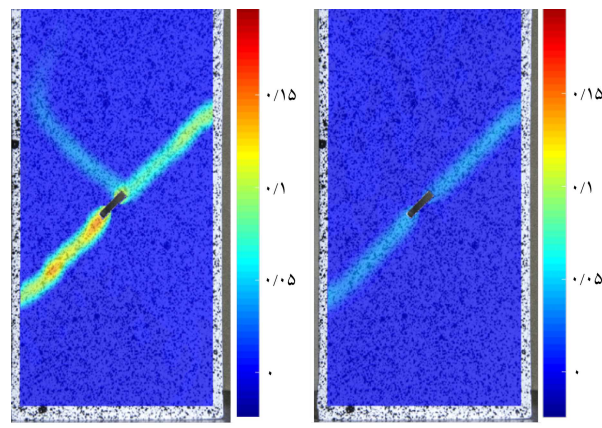
الف) در تنش فشاری ۹/۵ MPa (ب) در تنش فشاری بیشینه ی ۹/۵ MPa. شکل ۱۶. کانتورهای کرنش افقی نمونه ی ۶۰ درجه.



الف) در تنش فشاری ۸ MPa (ب) در تنش فشاری بیشینه ی ۲۴/۶ MPa. شکل ۱۴. کانتورهای کرنش افقی نمونه ی ۳۰ درجه.



الف) در تنش فشاری ۹/۸ MPa (ب) در تنش فشاری بیشینه ی ۲۲ MPa. شکل ۱۷. کانتورهای کرنش افقی نمونه ی ۷۵ درجه.



الف) در تنش فشاری ۴/۵ MPa (ب) در تنش فشاری بیشینه ی ۴/۴ MPa. شکل ۱۵. کانتورهای کرنش افقی نمونه ی ۴۵ درجه.

همان‌طور که در شکل ۱۴ برای زاویه ی ترک ۳۰ درجه مشاهده می‌شود، در تنش ۸ مگاپاسکال در نیمه ی بالایی نمونه، یک ترک اولیه تقریباً از وسط شکاف به سمت بالای نمونه شروع به رشد کرده است (شکل ۱۴ - الف). با افزایش تنش فشاری مشاهده می‌شود که ترک‌کشی اولیه از نقطه ی Y شکاف در نیمه ی پایینی نمونه شروع به رشد کرده است. در ادامه، ترک مذکور در نیمه ی پایینی نمونه به گسترش ادامه داده است، اما ترک‌کشی جدیدی از نقطه ی X شکاف در نیمه ی بالایی نمونه شروع به گسترش کرده است و به انتهای بالایی نمونه رسیده است (شکل ۱۴ - ب). تنش گسیختگی در زاویه ی ۳۰ درجه برابر با ۲۴/۶ مگاپاسکال به دست آمده است.

برای هر سه زاویه ی ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه، گسترش ترک‌کشی در نیمه ی بالایی نمونه زودتر از ترک در نیمه ی پایینی نمونه اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد علت این موضوع مقاومت فشاری کمتر نیمه ی بالایی (گچ اسنوراک) نسبت به نیمه ی پایینی (گچ پارس‌دندان) باشد.

با توجه به شکل ۱۵، برای زاویه ی ترک ۴۵ درجه، ماهیت ترک‌های ایجاد شده ی برشی تشخیص داده شد. به نظر می‌رسد رشد نکردن ترک‌کشی به علت زاویه ی ۴۵ درجه‌یی شکاف نسبت به راستای بارگذاری است، زیرا در این جهت از لحاظ تئوری بیشترین تنش برشی ایجاد شده و همین تمرکز تنش برشی از ایجاد ترک‌کشی باله‌یی جلوگیری کرده است. ترک کاملاً در امتداد فصل مشترک تا لحظه ی

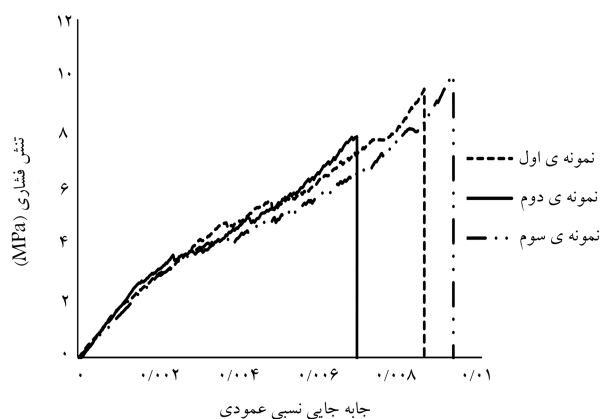
خرابی سازه گسترش یافته است. همچنین ترک‌کشی دور (از محل فصل مشترک) در نیمه ی بالایی نمونه ایجاد شده است. تنش گسیختگی در زاویه ی ۴۵ درجه برابر با ۴/۴ مگاپاسکال به دست آمده است.

مطابق شکل ۱۶، برای زاویه ی ترک ۶۰ درجه ماهیت ترک‌های ایجاد شده، از نوع برشی تشخیص داده شد که ترک به طور کامل در امتداد فصل مشترک تا لحظه ی خرابی سازه گسترش یافته است.

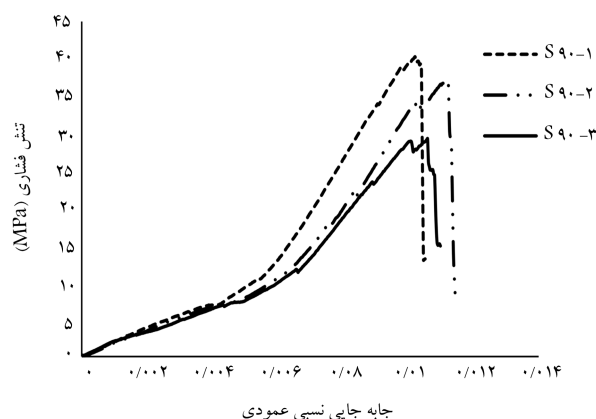
تنش گسیختگی در زاویه ی ۶۰ درجه برابر با ۹/۵ مگاپاسکال به دست آمده است. با مقایسه ی تنش گسیختگی زاویه ی ۶۰ درجه با زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، در زاویه ی ۶۰ درجه کاهش شدید تنش مشاهده می‌شود، ولی شدت کاهش تنش از نمونه‌های با زاویه ی ۴۵ درجه کمتر است.

با توجه به شکل ۱۷، برای زاویه ی ترک ۷۵ درجه، ماهیت ترک‌های ایجاد شده از نوع برشی تشخیص داده شد. البته گسترش ترک‌کشی در نیمه ی ساخته شده از گچ اسنوراک (دارای مقاومت فشاری کمتر) نیز مشاهده شد. ترک به طور کامل در امتداد فصل مشترک تا لحظه ی خرابی سازه گسترش یافته است.

با توجه به شکل ۱۸، برای زاویه ی ترک ۹۰ درجه، ماهیت ترک‌های ایجاد شده، از نوع کششی تشخیص داده شد. ترک به طور کامل در امتداد فصل مشترک تا لحظه ی خرابی سازه گسترش یافته و پدیده ی پوسته‌پوسته شدن نیز در نمونه‌ها مشاهده شده است.



شکل ۲۰. نمودار تنش - جابه‌جایی نسبی نمونه‌های با زاویه‌ی ۶۰ درجه.



شکل ۲۱. نمودار تنش - جابه‌جایی نسبی نمونه‌های با زاویه‌ی ۹۰ درجه.

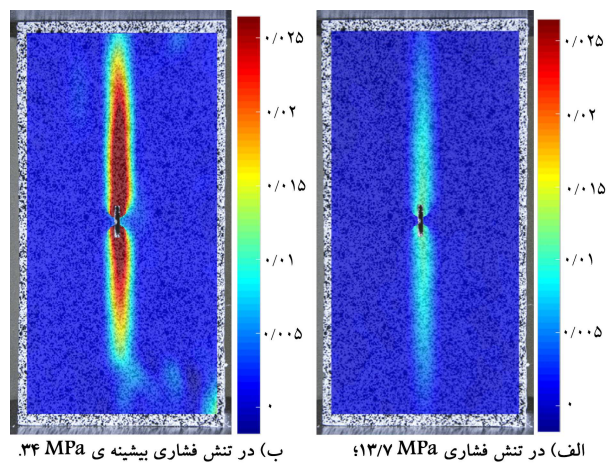
دو ماده گسیخته می‌شود، در حالی که در نمونه با ترک ۹۰ درجه، انشقاق طولی<sup>۲۷</sup> کششی اتفاق می‌افتد. این دو مکانیزم متفاوت از هم هستند و به صورت واضحی اثر متفاوت آنها در رفتار تنش - جابه‌جایی نسبی در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مشاهده می‌شود.

مقایسه‌ی مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های با زاویه‌ی ترک ۹۰ درجه شکل ۲۱ با متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های گچی جدول ۱ مبین نزدیکی این مقادیر است. به عبارت دیگر، وجود ترک با زاویه‌ی ۹۰ درجه تأثیر ناچیزی در مقاومت نمونه داشته است. از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، مقاومت نمونه با ترک ۶۰ درجه بسیار کوچک‌تر از مقاومت متوسط گچ‌های به کار رفته در نمونه است.

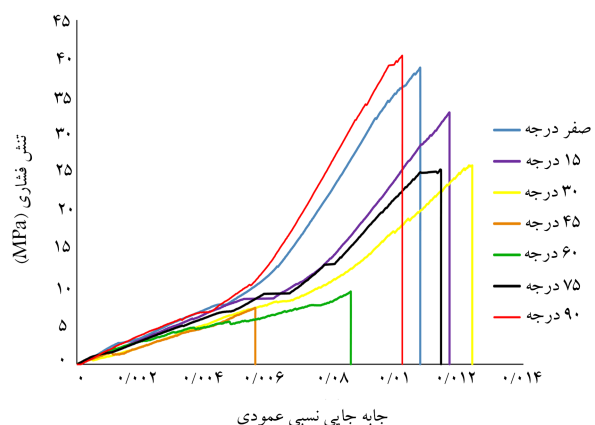
### ۳.۳. بررسی تأثیر زاویه‌ی شکاف در مقاومت نمونه‌ها

در شکل ۲۲، نمودار مربوط به پیشینه‌ی تنش ایجاد شده در نمونه‌های دارای زوایای شکاف مختلف مشاهده می‌شود، که مطابق آن واضح است که تغییر زاویه‌ی شکاف‌های موجود در نمونه‌ها تأثیر زیادی در مقاومت سنگ داشته‌اند. با افزایش زاویه از ۰ به ۱۵ درجه و از ۱۵ به ۳۰ درجه، با افزایش طول فصل مشترک، نیروی برشی بیشتری در فصل مشترک ایجاد شده است، که خود عاملی برای کاهش مقاومت نمونه است.

در حالت زاویه‌ی ۴۵ درجه، بیشترین کاهش مقاومت مشاهده می‌شود، زیرا در این جهت از لحاظ تئوری، بیشترین تنش برشی ایجاد شده است. همچنین با



الف) در تنش فشاری ۱۳/۷ MPa؛ ب) در تنش فشاری بیشینه‌ی ۳۴ MPa.  
شکل ۱۸. کانتورهای کرنش افقی نمونه‌ی ۹۰ درجه.



شکل ۱۹. نمودار تنش - جابه‌جایی نسبی نمونه‌های با زاویه‌ی ۹۰ درجه.

### ۲.۳. بررسی نمودارهای تنش - جابه‌جایی نسبی

در شکل ۱۹، تغییرات تنش فشاری اعمالی در برابر جابه‌جایی نسبی قائم برای تمامی نمونه‌ها با زوایای ترک اولیه‌ی متفاوت مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های با زاویه‌ی ترک متفاوت شکل ۱۹ با متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های گچی جدول ۱ مبین اثر فاحش جهت ترک و مکانیزم تخریب نمونه در مقاومت آن است، که برای بررسی دقیق‌تر آن، نمودار تمامی نمونه‌های آزمایش شده با زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ بررسی شده‌اند.

شکل‌های ۲۰ و ۲۱، تغییرات تنش فشاری اعمالی در برابر جابه‌جایی نسبی قائم را برای نمونه‌های با زاویه‌های ترک اولیه‌ی ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهند. در هر نمودار سه منحنی مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش روی سه نمونه به ظاهر یکسان هستند، تا تکرارپذیری نتایج بررسی شود. نکته‌ی جالب آن است که شیب متوسط منحنی تنش - جابه‌جایی نسبی در نمونه با زاویه‌ی ترک اولیه‌ی ۶۰ درجه کوچک‌تر از پارامتر نظیر آن در نمونه با زاویه‌ی ۹۰ درجه است. این موضوع مبین تراکم‌پذیری بیشتر سطح مشترک دو ماده در نمونه با زاویه‌ی ترک ۶۰ درجه است، زیرا در این حالت سطح تماس دو ماده در حالتی است که مقداری فشار را باید تحمل کند. به علاوه به نظر می‌رسد که تغییر شیب منحنی در لحظه‌ی شکست نمونه، در نمونه با زاویه‌ی ترک ۹۰ درجه بسیار بزرگ‌تر از مقدار نظیر در نمونه با زاویه‌ی ترک ۶۰ درجه است. به عبارت دیگر، نمونه با ترک ۹۰ درجه رفتاری تردتر<sup>۲۶</sup> از خود نشان می‌دهد. نمونه با زاویه‌ی ترک ۶۰ درجه، در برش در طول سطح تماس



دو ماده‌ی (غیرهمگن) دارای ترک و نمونه‌های (شکل ۳ همگن و ناهمسان) بسیار شبیه به هم هستند.

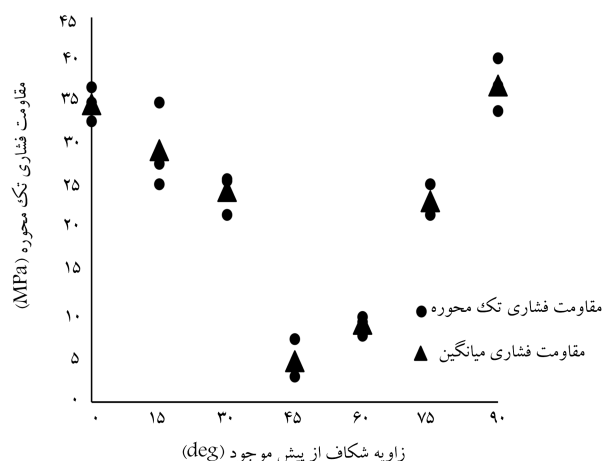
#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های شبه‌سنگ حاوی شکاف از پیش موجود در محل فصل مشترک دو ماده، شروع، گسترش ترک و مکانیزم شکست سنگ تحت بارگذاری تک‌محوره بررسی و نتایج با یکدیگر مقایسه شود. برای بررسی و تحلیل رشد ترک در بارگذاری تک‌محوری از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال استفاده شده است.

تغییر زاویه‌ی شکاف موجود در نمونه‌ها، تأثیر زیادی در مقاومت سنگ داشته است. با افزایش زاویه‌ی شکاف از صفر درجه به ۳۰ درجه، مقاومت فشاری نمونه کاهش یافته است. با افزایش زاویه از ۳۰ درجه به ۴۵ درجه مقاومت فشاری افت شدیدی پیدا کرده است. سپس دوباره با افزایش زاویه تا ۹۰ درجه، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته است. در حالت زاویه‌ی ۴۵ درجه، بیشترین کاهش مقاومت مشاهده شد، زیرا در این جهت از لحاظ تئوری بیشترین تنش برشی ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش طول فصل مشترک، احتمال لغزش در زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشتر است.

برای شکاف با زوایای ۰ تا ۳۰ درجه، به طور غالب الگوی گسترش ترک بدین صورت بوده است که با رشد ترک کششی از شکاف نمونه گسیخته شده است. اما از زاویه‌ی ۴۵ تا ۷۵ درجه، گسیختگی غالباً با گسترش ترک برشی در امتداد فصل مشترک رخ داده است. در زاویه‌ی ۹۰ درجه، ترک کششی در مرکز نمونه<sup>۲۸</sup> و در امتداد فصل مشترک ایجاد شد. پوسته‌پوسته شدن<sup>۲۹</sup> و افزایش میزان بازشدگی دهانه‌ی ترک‌ها در بیشتر نمونه‌ها مشاهده شده است.

روند تغییرات مقاومت فشاری بین نمونه‌ی دو ماده‌ی (غیرهمگن) دارای ترک و تک ماده‌ی (همگن) دارای ترک متفاوت بوده است. همچنین روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ی دو ماده‌ی ترک‌دار و نمونه‌های همگن و ناهمسان، بسیار شبیه به هم بوده است.



شکل ۲۲. نمودار تأثیر تغییر زاویه‌ی شکاف در مقاومت نهایی نمونه‌ها.

افزایش طول فصل مشترک، احتمال لغزش در زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشتر است. در زاویه‌ی ۶۰ درجه، بیشترین طول فصل مشترک وجود دارد. ولی با توجه به نمودارها در زاویه‌ی ۶۰ درجه، مقاومت کششی مقدار کمی از حالت زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشتر است. به نظر می‌رسد اثر بیشینه‌ی تنش برشی حاکم در حالت ۴۵ درجه، بر افزایش طول فصل مشترک زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به ۴۵ درجه غلبه کرده است. با افزایش زاویه‌ی شکاف از ۶۰ به ۷۵ درجه، طول فصل مشترک کاهش یافته است. این عامل باعث افزایش دوباره‌ی مقاومت فشاری نمونه می‌شود. همین عامل برای افزایش مقاومت نمونه در حالت ۹۰ درجه نیز صدق می‌کند. روند تغییرات مقاومت فشاری برای یک ماده‌ی غیرهمگن در مطالعه‌ی حاضر در شکل ۲۲ گزارش شده است. همچنین روند تغییرات مقاومت فشاری برای یک ماده‌ی همگن دارای ترک در شکل ۲ و برای یک ماده‌ی همگن و ناهمسان بدون ترک در شکل ۳ ارائه شده است. با مقایسه‌ی سه شکل اخیر، می‌توان دریافت که روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ی

#### پانویس‌ها

1. Bombolakis
2. coalescence
3. Yang
4. Cheng
5. anti-wing crack
6. out of plane shear crack
7. out of plane tension crack
8. Jiang
9. Hoek
10. strain gauge
11. stylus profiler
12. optical method
13. pixel
14. digital image correlation
15. digital speckle photography
16. speckle pattern
17. snowrock

18. homogeneous
19. santam
20. ISO
21. lens distortion
22. region of interest
23. facet size
24. point distance
25. Kao
26. Brittle
27. axial splitting
28. axial splitting
29. spalling

#### منابع (References)

1. Chen, L. and Liu, J. "Numerical analysis on the crack propagation and failure characteristics of rocks with dou-

- ble fissures under the uniaxial compression", *Petroleum*, **1**(4), pp. 373-381 (2015).
2. Alitalesh, M., Yazdani, M., Fakhimi, A. and end etal. "Effect of loading direction on interaction of two pre-existing open and closed flaws in a rock-like brittle material", *Underground Space*, **5**(3), pp. 242-257 (2019).
3. Chen, Y., Watanabe, K., Kusuda, H. and et al. "Crack growth in Westerly granite during a cyclic loading test", *Engineering Geology*, **117**(3-4), pp. 189-197 (Feb 2011).
4. Wong, L.N.Y. and Einstein, H.H. "Crack coalescence in molded gypsum and carrara marble: Part 1. macroscopic observations and interpretation", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **42**(3), pp. 475-511 (Jun 2009).
5. Yazdani, M. and R, Z. "Application of numerical modeling in simulation of HDR reservoir behavior during hydraulic stimulation", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **30-2**(4.2), pp. 91-100 (in Persian) (2014).
6. Molaali, M. and Yazdani, M. "Numerical modeling of hydraulic fracturing in oil reservoirs with extended finite element method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **30-2**(4.1), pp. 3-11 (in Persian) (2014).
7. Riazi, E., Yazdani, M., Alitalesh, M. and et al. "The assessment of crack surface friction on crack tip's stress intensity factor (SIF) using XFEM", *48<sup>th</sup> US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014*, **1**(Ddm), pp. 462-467 (2014).
8. Bobet, A. and Einstein, H. H. "Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**(7), pp. 863-888 (Oct 1998).
9. Bombolakis, E.G. "Photoelastic stress analysis of crack propagation within a compressive stress field", *Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology* (1963).
10. Yang, S.Q., Yang, D.S., Jing, H.W. and et al. "An experimental study of the fracture coalescence behaviour of brittle sandstone specimens containing three fissures", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**(4), pp. 563-582 (2012).
11. Cheng, H., Zhou, X., Zhu, J. and et al. "The effects of crack openings on crack initiation, propagation and coalescence behavior in rock-like materials under uniaxial compression", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**(9), pp. 3481-3494 (2016).
12. Jiang, T., Pan, X., Lei, J. and et al. "Rupture and crack propagation in artificial soft rock with preexisting fractures under uniaxial compression", *Geotechnical and Geological Engineering*, **37**(3), pp. 1943-1956 (2019).
13. Hoek, E. "Fracture of anisotropic rock" *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **64**(12), pp. 630-631 (1964).
14. Falaknaz, N. "Anisotropic strength behavior of schistose rocks", *2<sup>nd</sup> International Conference on Long Term Behaviour of Dams*, pp. 450-453 (Oct 2016).
15. Dong, W., Yang, D., Zhang, B. and et al. "Rock-concrete interfacial crack propagation under mixed mode I-II fracture", *Journal of Engineering Mechanics*, **144**(6), pp. 1-12 (2018).
16. Braccini, M. and Dupeux, M. "Mechanics of solid interfaces", *Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.* (2012).
17. Reyes, O. and Einstein, H.H. . "Failure mechanisms of fractured rock - A fracture coalescence model" , *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, **29**(4), pp. 333-340 (1991).
18. Sjö Dahl, M. and Benckert, L.R. "Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy", *Applied Optics*, **32**(13), pp. 2278-2284 (1993).
19. McNeill, S.R., Peters, W.H. and Sutton, M.A "Estimation of stress intensity factor by digital image correlation", **28**(1), pp. 101-112 (1987).
20. Voloshin, A. S. and Hung, P.-C. "In-plane strain measurement by digital image correlation", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **25**(3), pp. 215-221 (2003).
21. Shen, B., Stephansson, O., Einstein, H.H. and et al. "Coalescence of fractures under shear stresses in experiments", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **100**(B4), pp. 5975-5990 (Apr 1995).
22. Jiang, T., Pan, X., Jiahua, L. and et al. "Rupture and crack propagation in artificial soft rock with preexisting fractures under uniaxial compression", *Geotech. Geol. Eng.*, **37**, pp. 1943-1956 (2019).
23. ISRM, "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials" , *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*, **16**(2), pp. 135-140 (1977).
24. Suits, L.D., Sheahan, T.C., Fuenkajorn, K. and et al. "Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks", *Geotechnical Testing Journal*, **34**(1), pp. 103-134 (2011).
25. Ren, C., Yang, J., Zhang, X. and et al. "Digital image correlation using specific shape function for stress intensity factor measurement", *Transactions of Tianjin University*, **23**, pp. 157-162 (2017).
26. Blaber, J., Adair, B. and Antoniou, A. "Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software", *Experimental Mechanics*, **55**(6), pp. 1105-1122 (2015).
27. Kao-Walter, S. and Nilsson, P. "Measuring material properties of thin films with DIC and tearing test of laminate", *Masters dissertation, Blekinge Institute of Technology*, PP. 1-79 (2017).