



مقاله پژوهشی

تأثیر زبری بر مقاومت برشی فصل مشترک بتن-سنگ نرم: مطالعه‌ای تجربی-عددی

وهاب سرفرازی^{۱*}، علی احمدیان صالح^۱، هادی حائری^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت: ۰۵ آبان ۱۴۰۴، بازنگری: ۱۵ خرداد ۱۴۰۵، پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۴۰۵)

چکیده

در این مطالعه، رفتار برشی فصل مشترک بتن-سنگ نرم با استفاده از نرم افزار PFC^{2D} (کد جریان ذره) شبیه سازی و نتایج با آزمون های فیزیکی مقایسه شد. فصل مشترک بتن-سنگ هندسه های مختلفی دارد، بتن نیز در حفره های گچ نفوذ داده شد. نمونه هایی با ابعاد 15×15 سانتی متر $\times$ 5 سانتی متر حاوی لایه های گچ و بتن ساخته شد. بتن در قسمت میانی نمونه قرار گرفته و دو طرف آن توسط گچ احاطه شده است تا بتن بتواند به داخل گچ نفوذ کند. نه هندسه مختلف برای فصل مشترک بتن-سنگ انتخاب شد، یعنی فصل مشترک زیگزاگ متقارن، فصل مشترک زیگزاگ غیرمتقارن و فصل مشترک مسطح. همچنین ارتفاع دندان های بتنی، پایه دندان های بتنی و زوایای دندان ها متفاوت بودند. در فصل مشترک ثابت، بتن از یک، دو و سه کانال از هر طرف به گچ نفوذ می کند. ۲۷ مدل مختلف تهیه شد. نمونه ها با استفاده از قالب های ویژه، در دستگاه UCS (مقاومت فشاری تک محوری) جایگذاری شده و تحت بارگذاری برش پانچ آزمایش شدند. هم زمان با انجام آزمایش ها، شبیه سازی عددی نیز انجام شد. به این صورت که مدل در نرم افزار PFC کالیبره شده و سپس مدل سازی عددی رفتار برشی فصل مشترک بتن و سنگ انجام می شود. نتایج نشان داد که الگوی شکست فصل مشترک بتن-سنگ تحت تأثیر هندسه دندان های بتنی قرار گرفته است. در نمونه های بدون دندان بتنی، شکست کششی در فصل مشترک رخ می دهد؛ اما با افزایش زاویه زبری، علاوه بر شکست کششی، ترک های کششی در نوک زبری در نمونه ایجاد می شود. با افزایش زاویه از ۰ تا ۳۰، تعداد ترک های کششی در نمونه افزایش می یابد. با افزایش کانال های تزریق بتن در سنگ، الگوی شکست نهایی تغییر نمی کند اما تنش شروع ترک، سختی برشی و تنش شکست افزایش می یابد. تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

کلمات کلیدی

رفتار برشی، فصل مشترک بتن-سنگ، زبری، کانال تزریق بتن، ترک کششی

*عهده دار مکاتبات: vahab.sarfarazi@gmail.com

DOI: 10.22034/ANM.2026.23851.1704

۱- مقدمه

ساخت تونل در مقیاس بزرگ به سرعت در حال توسعه است و حفاری تونل معمولاً زمین‌شناسی نامطلوبی را در معرض دید قرار می‌دهد، به عنوان مثال توده‌های سنگی ضعیف که به راحتی باعث هجوم گل‌ولای می‌شوند و در نتیجه منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست می‌شوند [۳-۱].

برای مقابله با آن، روش تزریق، از نظر تزریق شکافنده، تزریق نفوذی، تزریق پرکننده و تزریق تراکمی، به طور گسترده برای افزایش خواص مکانیکی توده‌های سنگ ضعیف در مهندسی تونل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۵]. در میان آن‌ها، تزریق دوغاب برای ایجاد شکستگی، فرآیند غالب خواهد بود [۶]، زمانی که تزریق دوغاب در زمینی با نفوذپذیری کم، مانند خاک، انجام می‌شود. دوغاب‌های تحت فشار بالا به زمین تزریق می‌شوند تا شکستگی‌هایی ایجاد کنند [۷] و سپس متراکم شده و با زمین ترکیب شوند. به این ترتیب، می‌توان مقاومت زمین را بهبود بخشید؛ بنابراین، یکی از مسائل اصلی در کاربردهای دوغاب‌ریزی، انتخاب ماده دوغاب‌ریزی مناسب است [۸].

به دلیل مقاومت بالا، قابلیت تزریق خوب، دوام عالی و هزینه کم، دوغاب پایه سیمانی به رایج‌ترین ماده دوغاب‌ریزی مورد استفاده در دهه‌های گذشته تبدیل شده است [۹]. به منظور کمک به ارزیابی اثربخشی این روش اصلاح خاک، خواص دوغاب پایه سیمانی یکی از جالب‌ترین زمینه‌های تحقیق در مواد دوغاب‌ریزی بوده است. به عنوان مثال، وارگا و همکاران با انجام یک مطالعه پایداری ابعادی، عملکرد پیوند فصل مشترک دوغاب- بتن را ارزیابی کردند [۱۰].

چن و همکاران آزمون‌های سه محوری را برای بررسی رفتارهای برشی دوغاب سیمان پرتلند اصلاح شده با دو نسبت آب به سیمان (W/C) مختلف انجام دادند [۱۱]. جورن و همکاران به شکل استوانه‌های کوچک، قابلیت تزریق دوغاب را در ۱۱ نوع محیط متخلخل با ویژگی‌های مختلف در امتداد ارتفاع تزریق بررسی کردند [۱۲]. لی و همکاران خواص رئولوژیکی و مکانیکی ۶ نوع دوغاب MC و ۲ نوع سیمان پرتلند معمولی را اندازه‌گیری کردند [۱۳]. اگرچه همه این مطالعات ذکر شده در بالا به درک بهتر خواص دوغاب پایه سیمانی کمک می‌کنند، اما آن‌ها فقط خود دوغاب، از جمله

عملکرد چسبندگی، رفتارهای برشی، قابلیت تزریق، خواص رئولوژیکی و مکانیکی تمرکز داشتند. در واقع، بهسازی زمین نه تنها شامل خواص دوغاب، بلکه شامل خواص توده‌های سنگ ضعیف نیز می‌شود؛ به عبارت دیگر، مقاومت ترکیب دوغاب سخت شده و توده‌های سنگ ضعیف است که به طور مستقیم اثربخشی این بهسازی زمین را تعیین می‌کند. در همین راستا، شاهو و همکاران میزان خاکستر بادی، میزان دولیم و دوره عمل‌آوری را بر مقاومت برشی مخلوط سرباره مس-خاکستر بادی- دولیم بررسی کردند [۱۴].

فرامرزی و همکاران تأثیر آنیزوتروپی سنگ مصنوعی را بر خصوصیات مکانیکی آن مطالعه کردند [۱۵]. سرفرازی و همکاران رشد ترک را در نمونه‌های گرانیته حاوی درزه‌های نامتد بحث برش پانچ بررسی کردند. سه مورد کشش، برش و ترکیب کشش و برش در نمونه‌ها مشاهده شد [۱۶]. نجاتی و همکاران تأثیر پرشدگی شکاف را بر چقرمگی شکست بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که حضور پرشدگی باعث تغییر مسیر رشد ترک می‌شود [۱۷]. عبداللهی پور و همکاران، با استفاده از روش المان مرزی، رشد ترک را در سنگ‌های شکننده مورد مطالعه قرار دادند [۱۸].

یانگ و همکاران تأثیر میزان سیمان بر مقاومت برشی خاک- سیمان را بررسی کردند [۱۹]. با این حال، انواع مواد تحت هیچ فشاری باهم مخلوط شدند که با فرآیند تزریق با فشار تزریق بالا متفاوت است. سلیمیان و همکاران [۲۰]، هو و همکاران [۲۱] و هان و همکاران [۲۲] به صورت تجربی خواص مکانیکی توده‌های سنگ شکسته را قبل و بعد از تزریق دوغاب بررسی کردند. آن‌ها به طور نوآورانه‌ای مقاومت ترکیبی دوغاب سخت شده و توده‌های سنگ ضعیف را مطالعه کردند، با این حال، به عنوان یک ترکیب، ناحیه انتقال بین دو ماده نادیده گرفته شد. ژانگ و همکاران مجموعه‌ای از آزمایش‌های شبیه‌سازی تزریق را در خاک انجام دادند تا بهبود مقاومت ناشی از تزریق را بررسی کنند [۲۳].

به طور خاص، بر اساس نتایج آزمایش‌های فشار تک‌محوری، گزارش شد که مقاومت ترکیبی دوغاب سخت شده و خاک می‌تواند پس از تزریق از ۱۸۱ درصد تا ۲۵۳۵ درصد افزایش یابد. در همین حال، مشخص شد که فصل مشترک بین دوغاب سخت شده و توده‌های سنگ ضعیف (فصل مشترک دوغاب- سنگ) فرآیند شکست فشاری نمونه‌ها را کنترل می‌کند. این امر عمدتاً به این دلیل است

فوم با زاویه‌داری مختلف، الوارهای چوبی با ابعاد $1 \times 2 \times 15$ سانتی‌متر، سیمان، گچ، ماسه، آب و گریس. شکل ۱ نحوه تهیه نمونه را نشان می‌دهد. به‌منظور کاهش ابعاد نمونه به $5 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و صرفه‌جویی در مصرف مواد، ابتدا فومی با ابعاد $15 \times 15 \times 9$ سانتی‌متر در کف قالب‌های پلاستیکی قرار داده شد (شکل ۱-الف)، سپس فوم‌های زاویه‌دار با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، ضخامت ۵ و با عرض‌های مختلف تهیه شدند، به‌طوری‌که ۹ آرایش مختلف برای فوم ایجاد شد (شکل ۱-ب).

در داخل این فوم‌ها، یک، دو و سه حفره ایجاد می‌شود (شکل ۱-ج). فاصله بین حفره‌ها در فوم‌های دو حفره‌ای ۶ سانتی‌متر و فوم‌های سه حفره‌ای ۲ سانتی‌متر است. این حفره‌ها برای قرار دادن الوار چوبی ایجاد می‌شوند (شکل ۱-د). چوب‌ها آماده شدند و پس از گریس کاری، در حفره‌ها قرار داده شدند (شکل ۱-ه). فوم‌ها گریس کاری شده و در وسط قالب قرار داده شدند (شکل ۱-و د).

لازم به ذکر است که قبل از قرار دادن چوب در حفره، کف و اطراف فوم‌ها روغن کاری شدند تا برداشتن نمونه از قالب آسان‌تر شود. پس از نصب چوب، گچ و آب به نسبت $1/2$ به ۱ ریخته شد (شکل ۱-ه). پس از ۲۰ دقیقه، قالب‌های پلاستیکی باز شدند و نمونه‌های گچ از فوم مرکزی جدا شدند (شکل ۱-و).

وجود الوار چوبی در گچ باعث ایجاد حفره‌هایی می‌شود (شکل ۱-ز). نمونه‌های گچ دوباره در قالب پلاستیکی قرار داده می‌شوند (شکل ۱-ح). فضای بین دو نمونه گچ با بتن پر می‌شود (شکل ۱-ح). بتن علاوه بر پر کردن فضای بین دو نمونه گچ، وارد حفره‌های گچ شده و به گچ نفوذ می‌کند.

به این ترتیب نمونه‌هایی با یک، دو و سه کانال تزریق بتن از هر طرف نمونه گچ ایجاد شد. به دلیل محدودیت ابعاد نمونه آزمایشگاهی سه پیکربندی انتخاب شد. این کانال‌ها بیانگر نفوذ دوغاب در درز و شکستگی‌های سنگ هستند.

که دوغاب سخت شده و توده‌های سنگ، خواص مکانیکی کاملاً متفاوتی دارند و بنابراین، هنگام اعمال تنش، تمایل به نشان دادن ویژگی‌های تغییر شکل ناهم‌هنگ دارند؛ بنابراین، به‌عنوان یک ناحیه گذار بین دوغاب سخت‌شده و توده‌های سنگ، فصل مشترک است که مقاومت کلی را تعیین می‌کند؛ بنابراین، مسئله خواص فصل مشترک باید توجه ویژه‌ای را به خود جلب کند.

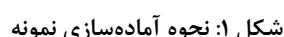
برای غلبه بر مشکلات ذکرشده، این مطالعه بر خواص برشی فصل مشترک دوغاب-سنگ تمرکز دارد. ابتدا، یک سیستم آزمایشی که می‌تواند فشار تزریق بالایی را اعمال کند، برای شبیه‌سازی محیط تولید واقعی فصل مشترک دوغاب-سنگ توسعه داده شد. سپس، دو مجموعه نمونه با سه نسبت آب به سیمان (W/C) مختلف و سه فشار تزریق مختلف تهیه شد. در تحقیق‌های قبلی، تأثیر هندسه فصل مشترک سنگ-بتن بر مکانیزم شکست برشی فصل مشترک سنگ-بتن بررسی نشده است. همچنین، چگونگی تأثیر بتن نفوذ کرده در سنگ بر خواص برشی فصل مشترک سنگ-بتن مطالعه نشده است.

در این مطالعه، مکانیزم شکست برشی ۲۷ هندسه مختلف فصل مشترک بتن-سنگ شامل یک، دو و سه کانال بتن تزریق‌شده در سنگ با استفاده از آزمایش برش پانچ فیزیکی و کد جریان ذرات در دو بعد PFC2D بررسی شد. برای بررسی رفتار شکست فصل مشترک سنگ-بتن، نمونه‌هایی با ابعاد $15 \times 15 \times 5$ سانتی‌متر حاوی لایه‌های گچ و بتن ساخته شدند. بتن در قسمت میانی نمونه قرار دارد و دو طرف آن توسط گچ احاطه شده است. فصل مشترک، بتن و گچ زیری متفاوتی دارند. نمونه‌سازی به گونه‌ای انجام می‌شود که بتن بتواند در یک، دو و سه کانال از هر طرف به داخل سنگ نفوذ کند. در این مقاله نتایج مدل‌سازی دوبعدی با نتایج سه‌بعدی ارائه شده در مرجع [۲۴] مقایسه شده است.

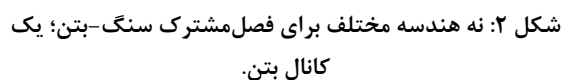
۲- مطالعه‌های تجربی

۲-۱- نحوه ساخت مدل و آماده‌سازی نمونه

برای تهیه نمونه از مواد و ابزارهای زیر استفاده شد: ۹ قالب مکعبی پلاستیکی سخت با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر،



پس از ۲۴ ساعت که بتن به مقاومت اولیه خود رسید، قالب پلاستیکی باز شد و بتن مرکزی برداشته شد. بدین ترتیب ۹ آرایش مختلف برای فصل مشترک بتن و سنگ آماده شد. وقتی دندان‌های بتن وارد سنگ می‌شوند، زاویه با علامت مثبت و وقتی دندان‌های سنگ وارد بتن می‌شوند، زاویه با علامت منفی نشان داده می‌شود (شکل‌های ۲-۴). آرایش مدل ۱-۹ به شرح زیر است: مدل ۱ در شکل ۲-الف: مدل با فصل مشترک یک دندان سنگ و دودندانه بتن. ارتفاع دندان‌ها برابر، طول پایه هر دندان ۷/۵ سانتی‌متر و زاویه زبری (۱۵°، -۱۵° و ۱۵°+) است. مدل ۲ در شکل ۲-ب: مدل با فصل مشترک یک دندان سنگ و دودندانه بتن. ارتفاع دندان‌ها برابر، طول پایه هر دندان ۷/۵ سانتی‌متر و زاویه زبری (۳۰°، -۳۰° و ۳۰°+) است. مدل ۳ در شکل ۲-ج: مدل با فصل مشترک یک دندان بتن؛ زاویه زبری (۱۵° درجه) و طول دندان ۱۵ سانتی‌متر است.



پس از ۲۸ روز، یک قطعه فولاد در قسمت بالایی و در وسط بتن و دو قطعه در قسمت پایینی و در طرفین قرار داده شد. نمونه‌ها در دستگاه UCS قرار داده شدند و شرایط برش پانچ برای فصل‌مشتک بتن-سنگ فراهم شد (شکل ۳).
نرخ بارگذاری ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه است.

مدل ۴ در شکل ۲-۵: مدل با فصل مشترک یک دندانه بتن؛ زاویه زبری (30° درجه) و طول دندانه ۱۵ سانتی متر است. مدل ۵ در شکل ۲-۵: مدل با فصل مشترک یک دندانه سنگ؛ زاویه زبری (15°) درجه و طول دندانه ۱۵ سانتی متر است. مدل ۶ در شکل ۲-۵: مدل با فصل مشترک یک دندانه سنگ؛ زاویه زبری (30°) درجه و طول دندانه ۱۵ سانتی متر است.

مدل ۷ در شکل ۲-ز: مدل با فصل مشترک دودندانه، (یک دندانه سنگ، با زاویه زبری 15° و یک دندانه بتن با زاویه زبری 15°)؛ طول پایه دندانه $12/5$ سانتی متر است.

صحیح، مانند الاستیسیته درزه تخت، اتصال اصطکاکی، مقاومت کششی درزه تخت، چسبندگی درزه تخت، نسبت سختی نرمال به سختی برشی و چگالی، شبیه‌سازی شوند. با انتخاب ریز ویژگی‌های مناسب، مدل کالیبره شده و رفتار آن با رفتار مکانیکی نمونه فیزیکی برابر می‌شود [۲۷-۲۸]. برای کالیبراسیون مدل عددی بایستی مدول یانگ ذرات و اتصال‌ها، مقاومت کششی اتصال مسطح و چسبندگی اتصال مسطح کالیبره شود.

شایان‌ذکر است که مدول یانگ ذرات و اتصال‌ها مقدار مدول یانگ را در مقیاس ماکروسکوپی کالیبره می‌کنند. مقاومت کششی اتصال مسطح، مقاومت کششی برزلی را کالیبره می‌کند و چسبندگی اتصال مسطح، مقاومت فشاری بزرگ‌مقیاس را کالیبره می‌کند. ابتدا با سعی و خطا مقدار میکرو پارامترهای مدول‌های یانگ انتخاب می‌شود به گونه‌ای که ماکروپارامتر مدول یانگ در آزمایش تک‌محوره عددی مشابه آزمایشگاهی شود. لازم به ذکر است که مقدار اول میکروپارامتر مدول یانگ مشابه مدول یانگ آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود و سپس با سعی و خطا مقدار دقیق آن تعیین می‌شود. بعد از مدول یانگ، مقدار مقاومت فشاری عددی کالیبره می‌شود. که با تغییرات مقدار چسبندگی انجام می‌شود.

از آنجایی که برای کالیبراسیون مقاومت فشاری عددی، میکروپارامترهای چسبندگی و مقاومت کششی هم‌زمان تغییر داده می‌شوند؛ لذا با کالیبره‌شدن مقاومت فشاری عددی، مقاومت کششی عددی نیز مشابه مقدار آزمایشگاهی خواهد شد. در غیر این صورت مجدداً مقدار میکروپارامترهای چسبندگی و مقاومت کششی به مقدار کمی تغییر داده شده و سپس آزمایش‌ها مجدداً تکرار می‌شوند. طبق راهنمای نرم‌افزار مقدار ضریب میرایی برای بارگذاری استاتیکی ۰/۷ انتخاب شد. طبق راهنمای نرم‌افزار مقدار تخلخل ۰/۰۸ انتخاب شد. با این تخلخل، ذرات در ۷۰ درصد شعاع‌شان ایجاد می‌شوند تا هم‌پوشانی نداشته باشد. سپس شعاع زیاد می‌شود تا کل فضای موردنظر را پر کند. به‌طور کلی ذرات بایستی حداقل با دو دیسک دیگر در تماس باشند که برای اقناع‌شدن این مهم، شعاع آن ذرات تا حد مشخصی افزایش می‌یابد تا اتصال برقرار شود. برای پارامترهای میکرو-مکانیکی فصل مشترک از پارامترهای مصالح اصلی استفاده شده است.



شکل ۳: آزمایش برش پانچ روی فصل مشترک سنگ- بتن

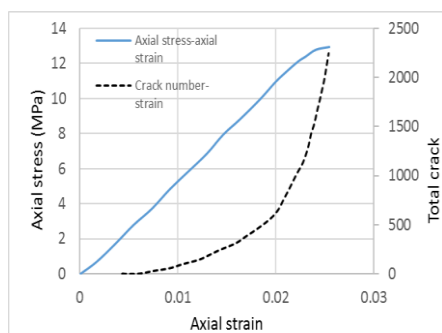
۳- مدل سازی عددی

۳-۱- کد جریان ذرات دوبعدی (PFC^{2D})

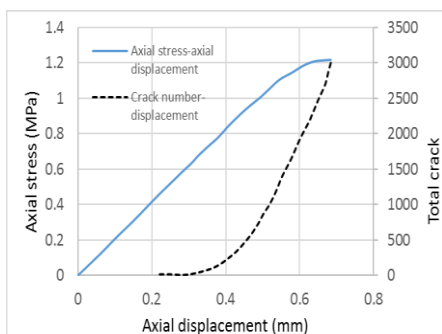
پوتوندی [۲۵-۲۶] مدل سازی PFC^{2D} را با استفاده از مدل اتصال تخت برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی واقعی مواد شکننده که نسبت مقاومت فشاری به کششی بیش از هشت دارند، انجام داد. درواقع، پیوندهای قبلی مانند پیوند موازی و پیوند تماسی به دلیل صلیبت مدل‌های تشکیل‌دهنده‌شان در تماس‌های گوی-گوی، قادر به شبیه‌سازی خواص مکانیکی واقعی مواد سنگی هستند. پیوند FJ سطوح تختی است که در مرکز تماس دو گوی قرار دارند. نیرو و گشتاور در تماس هر دو صفر هستند و بر اساس قانون نسبی نیرو-جابه‌جایی به‌روزرسانی می‌شوند. الاستیک خطی بین تماس‌ها تا زمانی که از مقاومت نهایی آن فراتر رود، برقرار است. حداکثر تنش‌های نرمال و برشی در تماس‌ها محاسبه و سپس با معیار مور-کولمب مقایسه شدند. اگر تنش نرمال در هر تماس بیشتر از مقاومت کششی تماس باشد، ترک کششی آغاز می‌شود؛ اما وقتی تنش برشی بین گوی‌های تماسی بیشتر از مقاومت برشی تماسی باشد، ترک برشی بین گوی‌ها رخ می‌دهد و گوی‌های مرتبط به حالت غیر چسبندگی برمی‌گردند، بنابراین زاویه اصطکاک بین آن‌ها فعال بوده است.

۳-۲- کالیبراسیون مدل

در نرم‌افزار PFC^{2D} باید ریز پارامترهای ایده‌آل برای مدل تعیین شوند تا رفتار کششی و فشاری مدل عددی با نمونه فیزیکی بتن-سنگ برابر باشد؛ بنابراین آزمایش‌های کشش تک‌محوری و برزلی شبیه‌سازی شدند. در مدل سازی عددی، ویژگی‌های مکانیکی مدل باید با انتخاب ریز ویژگی‌های



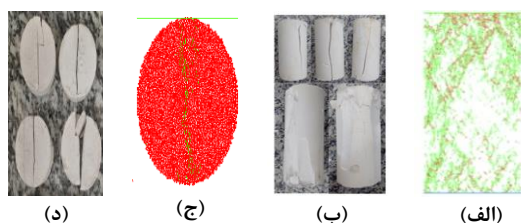
(الف)



(ب)

شکل ۵: الف) تنش محوری در برابر کرنش محوری به همراه ترک‌های ایجادشده در آزمایش تک‌محوری، ب) منحنی تنش کششی محوری بر اساس جابه‌جایی محوری به همراه ترک‌های ایجادشده در آزمایش برزبلی؛ مدل بتنی.

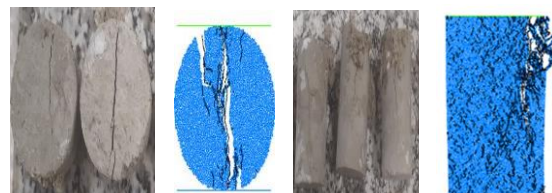
شکل‌های ۶ الگوی شکست نمونه‌های کشش تک‌محوری و غیرمستقیم گچ را نشان می‌دهند. در هر شکل، الگوی شکست آزمایشگاهی نشان داده شده است. ترک‌های قرمز مربوط به ترک‌های کششی و ترک‌های سیاه مربوط به ترک‌های برشی هستند. با مقایسه نتایج عددی و تجربی، نتیجه می‌گیریم که تطابق خوبی بین مدل‌ها برقرار شده است، بنابراین مدل‌ها کالیبره می‌شوند.



شکل ۶: الف) الگوی ترک‌ها در مدل گچی تحت آزمایش UCS، ب) الگوی ترک‌ها در نمونه گچی تحت آزمایش UCS، ج) الگوی ترک‌ها در مدل دیسک گچی تحت آزمایش BTS، د) الگوی ترک‌ها در نمونه دیسک گچی تحت آزمایش.

شکل ۷-الف منحنی تنش فشاری محوری را برحسب کرنش محوری برای مدل عددی سنگ گچ تحت آزمایش فشار تک‌محوری نشان می‌دهد. رشد و افزایش ترک‌ها نیز

شکل ۴ الگوی شکست کششی تک‌محوری و برزبلی را برای نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد. ترک‌های قرمز ترک‌های کششی و سیاه ترک‌های برشی هستند. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، شباهت آن‌ها اثبات شد و مدل‌ها کالیبره شدند.



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۴: الف) الگوی ترک‌ها در مدل بتنی تحت آزمایش UCS، ب) الگوی ترک‌ها در نمونه بتنی تحت آزمایش UCS، ج) الگوی ترک‌ها در مدل بتنی تحت آزمایش BTS، د) الگوی ترک‌ها در نمونه دیسک بتنی تحت آزمایش BTS.

شکل ۵-الف منحنی تنش فشاری محوری را برحسب کرنش محوری برای مدل عددی بتن تحت آزمایش فشار تک‌محوری نشان می‌دهد. رشد و افزایش ترک‌ها نیز نشان داده شده است. منحنی تنش-کرنش دارای سه مرحله است: الاستیک، پلاستیک و شکست که مشابه منحنی تنش-کرنش نمادین نمونه بتن است. همچنین مشخص شده است که در مرحله اولیه بارگذاری ترک‌های کمی وجود دارد. ترک‌ها با افزایش بارگذاری افزایش می‌یابند و پس از نیروی اوج، بلافاصله ترک‌ها ایجاد می‌شوند.

شکل ۵-ب منحنی تنش کششی محوری را برحسب جابه‌جایی محوری برای مدل عددی بتن تحت آزمایش برزبلی نشان می‌دهد. رشد و افزایش ترک‌ها در طول بارگذاری نیز نشان داده شده است. منحنی تنش-جابه‌جایی دارای دو مرحله است: مرحله الاستیک و مرحله شکست. این مراحل مشابه منحنی تنش-جابه‌جایی نمادین نمونه بتن هستند. همچنین مشخص شده است که در مرحله اولیه بارگذاری ترک‌های کمی وجود دارد. ترک‌ها با افزایش بارگذاری افزایش می‌یابند و پس از نیروی اوج، بلافاصله ترک‌ها ایجاد می‌شوند. اکثر ترک‌ها پس از نیروی اوج در مدل تشکیل می‌شوند، بنابراین شکست تدریجی پس از نیروی اوج رخ می‌دهد.

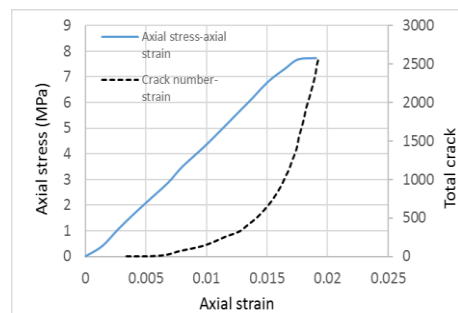
۳-۳- مدل سازی عددی فصل مشترک سنگ- بتن با نفوذ بتن در سنگ

آزمایش‌های برش پانچ برای فصل مشترک سنگ- بتن همان‌طور که در شکل‌های ۸-۱۰ نشان داده شده است، شبیه سازی شدند. ابعاد مدل ۱۵۰ میلی متر $\times$ ۱۵۰ میلی متر بود. برای ایجاد مدل اصلی، از ۶۷۵۴۶ گوی با حداقل شعاع ۰/۲۷ میلی متر استفاده شد.

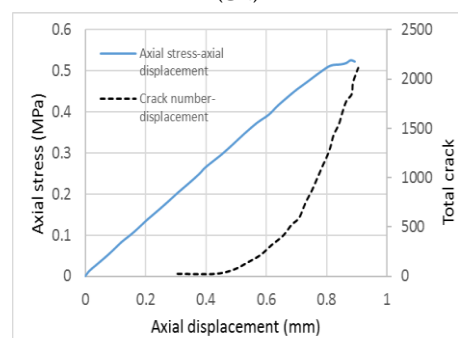
ابتدا مدل اصلی با خواص مکانیکی سنگ ساخته شد و سپس خواص مکانیکی ناحیه میانی به بتن تغییر داده شد (شکل‌های ۸-۱۰). نه آرایش مختلف برای فصل مشترک سنگ- بتن انتخاب شد. رنگ‌های سبز و آبی در ۸-۱۰ به ترتیب مربوط به سنگ و بتن هستند. وقتی دندان‌های بتن وارد سنگ می‌شوند، زاویه با علامت مثبت و وقتی دندان‌های سنگ وارد بتن می‌شوند، زاویه با علامت منفی نشان داده می‌شود (شکل‌های ۸-۱۰). همچنین، یک، دو و سه تداخل بتنی از هر طرف در مدل‌های سنگ منتشر شدند (شکل‌های ۸-۱۰). ارتفاع و عرض این قطعه به ترتیب ۱۰ و ۱۵ میلی متر بود، درحالی که طول آن رابطه نزدیکی با آرایش فصل مشترک سنگ- بتن داشت. فاصله بین قطعات در مدل دو کانال بتنی ۶۰ میلی متر و در مدل سه کانال بتنی ۲۰ میلی متر بود. باتوجه به عرض ۱۵۰ میلی متری، کمبود فضا در نمونه‌های سه حفره‌ای وجود دارد که ۲ سانتیمتر بین هر حفره از محدودیت‌های آزمایشگاهی است.

درمجموع ۲۷ مدل مختلف تحت بارگذاری فشاری آزمایش شدند. هندسه فصل مشترک سنگ- بتن مشابه نمونه‌های فیزیکی یک بود (شکل‌های ۲). سه قطعه بارگذاری در بالا و پایین مدل‌ها قرار گرفتند و دو دیوار متحرک در هر دو قسمت بالا و پایین مدل نصب شدند. مدل‌ها تحت آزمایش برش پانچ قرار گرفتند، زمانی که دیوار به دو طرف مخالف جهت γ حرکت می‌کرد. سرعت دیوارهای متحرک ۰/۰۱۶ میلی متر بر ثانیه بود. نیروی فشاری از نیروهای واکنش دیوار بالایی نمونه ثبت شد. نوارهای قرمز در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مربوط به قطعات بارگذاری هستند.

نشان داده شده است. منحنی تنش- کرنش دارای سه مرحله است: الاستیک، پلاستیک و شکست که مشابه منحنی تنش- کرنش نمادین نمونه سنگ است. همچنین مشخص شده است که در مرحله اولیه بارگذاری ترک‌های کمی وجود دارد. ترک‌ها با افزایش بارگذاری افزایش می‌یابند و پس از نیروی اوج، بلافاصله ترک‌ها ایجاد می‌شوند. شکل ۷-ب منحنی تنش کششی محوری را برحسب جابه‌جایی محوری برای مدل عددی سنگ گچ تحت آزمایش برزلی نشان می‌دهد. رشد و افزایش ترک‌ها در طول بارگذاری نیز نشان داده شده است. منحنی تنش- جابه‌جایی دارای دو مرحله است: مرحله الاستیک و مرحله شکست. این مراحل مشابه منحنی تنش- جابه‌جایی نمادین نمونه سنگ هستند. همچنین مشخص شده است که در مرحله اولیه بارگذاری ترک‌های کمی وجود دارد. ترک‌ها با افزایش بارگذاری افزایش می‌یابند و پس از نیروی اوج، بلافاصله ترک‌ها ایجاد می‌شوند. اکثر ترک‌ها پس از نیروی اوج در مدل تشکیل می‌شوند، بنابراین شکست تدریجی پس از نیروی اوج رخ می‌دهد.

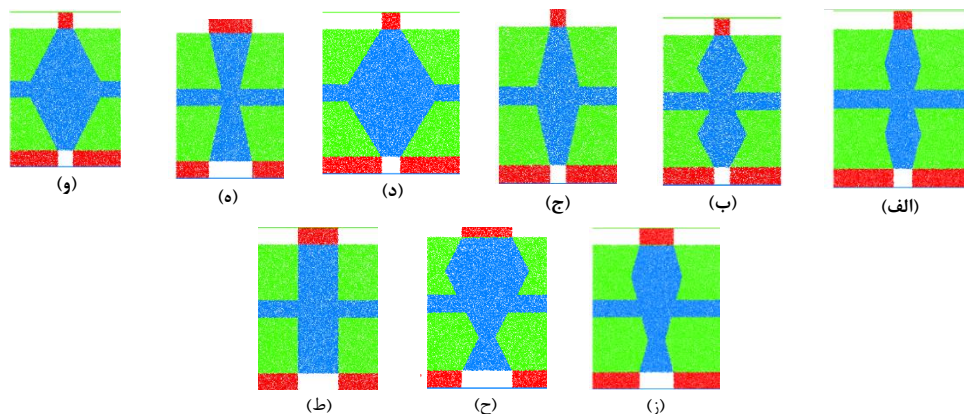


(الف)

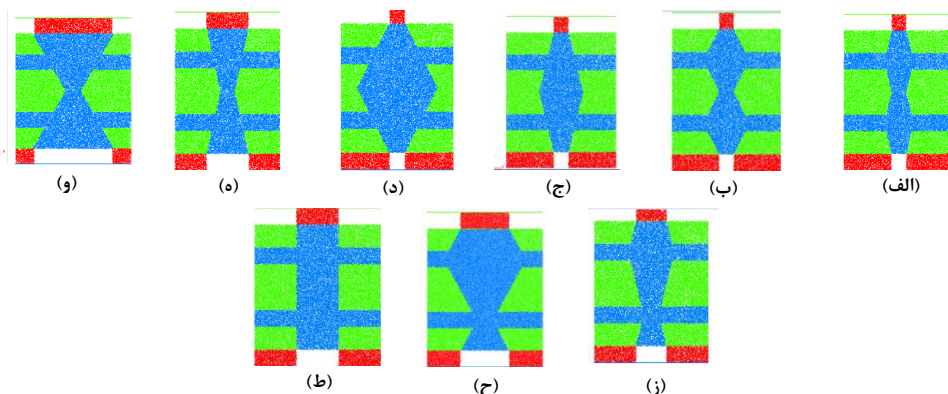


(ب)

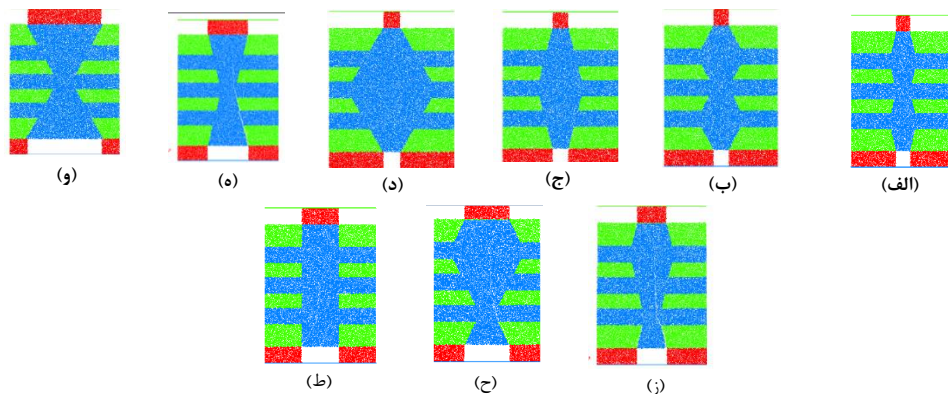
شکل ۷: الف) تنش محوری در برابر کرنش محوری به همراه ترک‌های ایجادشده در آزمایش تک محوری، ب) منحنی تنش کششی محوری بر اساس جابه‌جایی محوری به همراه ترک‌های ایجادشده در آزمایش برزلی؛ مدل گچی



شکل ۸: نه آرایش مختلف برای فصل مشترک بتن-سنگ؛ یک قطعه بتنی در هر طرف.



شکل ۹: نه آرایش مختلف برای فصل مشترک بتن-سنگ؛ دو قطعه بتنی در هر طرف



شکل ۱۰: نه آرایش مختلف برای فصل مشترک بتن-سنگ؛ سه قطعه بتنی در هر طرف

۴- نتایج

۴-۱- مکانیزم شکست نمونه‌های فیزیکی

۴-۱-۱- نمونه‌هایی با یک کانال تزریق بتن در سنگ

شکل‌های ۱۱ نتایج الگوی شکست آزمایشگاهی فصل مشترک سنگ-بتن شامل یک کانال تزریق بتن در سنگ را نشان می‌دهند. در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندان در بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه

بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۱-الف). در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰- درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. ترک کششی دیگری به صورت مورب در بتن رخ داد (شکل ۱۱-ب).

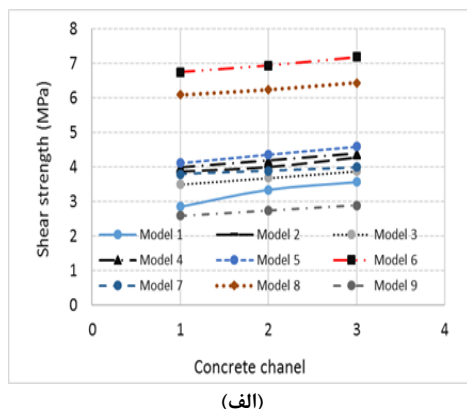
کششی دیگری به صورت مورب در بتن رخ داد. (شکل ۱۱-د).

۴-۱-۳- نمونه هایی با سه کانال تزریق بتن در سنگ

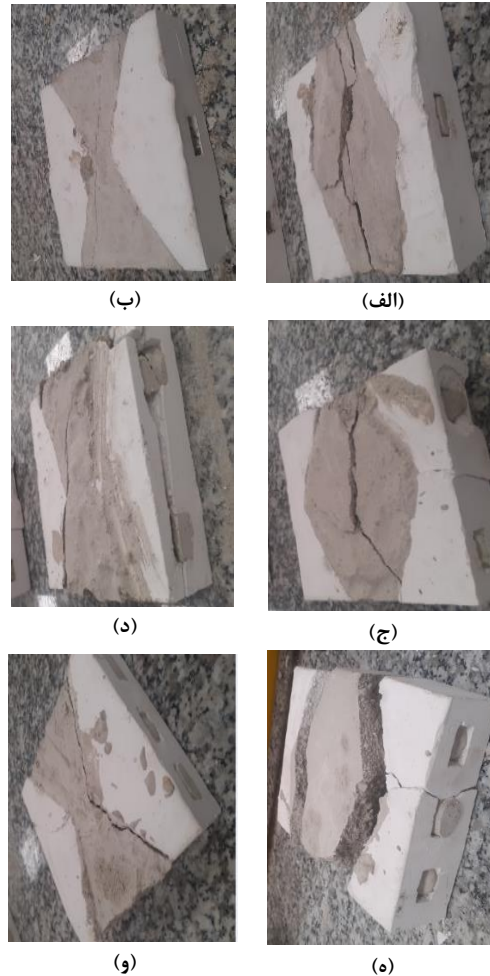
در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان ذرات بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می رساند (شکل ۱۱-ه). در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان ذرات بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می رساند. ترک کششی دیگری به صورت مورب در بتن رخ داد (شکل ۱۱-و).

۴-۱-۴- تأثیر آرایش فصل مشترک بتن-سنگ بر مقاومت برشی

شکل ۱۲-الف تغییرات مقاومت برشی را بر اساس تعداد کانال های تزریق در مدل سازی دوبعدی نشان می دهد. همچنین شکل ۱۲-ب تغییرات مقاومت برشی را بر اساس تعداد کانال های تزریق در مدل سازی سه بعدی مرجع [۲۴] نشان می دهد. با افزایش کانال تزریق، مقاومت برشی افزایش می یابد. با افزایش کانال های تزریق، سطح مقطع بتن متصل به سنگ افزایش می یابد و این منجر به افزایش مقاومت برشی می شود. مدل شماره ۶ و ۹ بیشترین و کمترین مقاومت برشی را در شبیه سازی عددی و آزمون آزمایشگاهی داشتند. در مدل شماره ۶ ترک از نواحی بکر سنگ می گذرد؛ ولی در مدل شماره ۹ لغزش در فصل مشترک اتفاق می افتد.



(الف)



شکل ۱۱: الگوی شکست فصل مشترک سنگ-بتن حاوی کانال های تزریق بتن در سنگ.

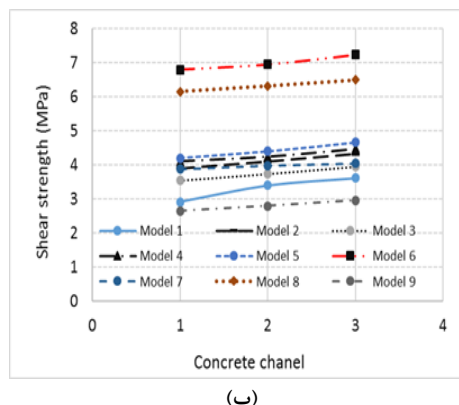
۴-۱-۲- نمونه هایی با دو کانال تزریق بتن در سنگ

شکل های ۱۱-ج و د نتایج الگوی شکست آزمایشگاهی فصل مشترک سنگ-بتن شامل دو کانال تزریق بتن در سنگ را نشان می دهند. در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان ذرات بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می رساند (شکل ۱۱-ج). در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل. این ترک کششی از میان ذرات بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می رساند. ترک

از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها شروع شده و به صورت مورب به داخل سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۳-د).

در مدل ۵، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۱۵- درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۳-ه). در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰- درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها آغاز شده و به صورت مورب در بتن منتشر شده‌اند (شکل ۱۳-و). در مدل ۷، یعنی مدلی با یک دندان بتن و یک دندان بتن با زاویه ۱۵ درجه، ۱۵- درجه و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۳-ز). در مدل ۸، یعنی مدلی با یک دندان بتن و یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ۳۰- درجه و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها ایجاد شده و به صورت مورب در سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۳-ح).

در مدل ۹، یعنی مدل بدون دندان، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شده و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شده است. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۳-ط).



شکل ۱۲: تغییرات مقاومت برشی بر اساس تعداد کانال‌های تزریق، الف) مدل سازی دوبعدی، ب) مدل سازی سه بعدی [۲۴].

۲-۴- مکانیزم شکست مدل‌های عددی

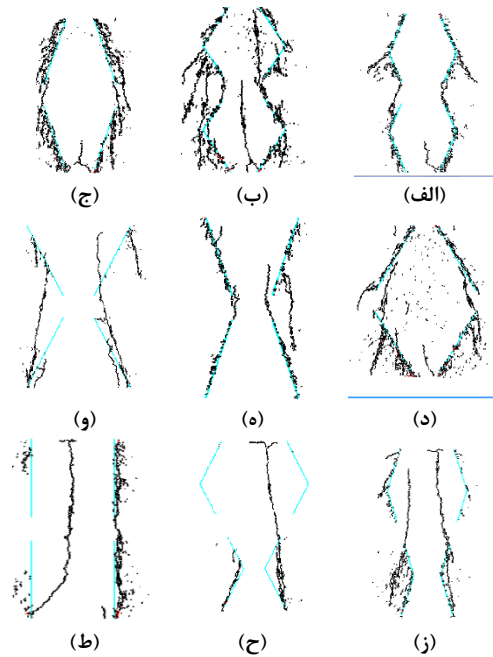
۲-۴-۱- نمونه‌هایی با یک کانال تزریق بتن در سنگ

شکل ۱۳ نتایج الگوی شکست آزمایشگاهی فصل مشترک سنگ-بتن شامل یک کانال تزریق بتن در سنگ را نشان می‌دهد. در مدل ۱، یعنی مدلی با یک دندان بتن و دودندان بتن با زاویه ۱۵°، ۱۵°، ۱۵° و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۳-الف). در مدل ۲، یعنی مدلی با یک دندان بتن و دودندان بتن با زاویه ۳۰°، ۳۰°، ۳۰° و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها شروع شده و به صورت مورب به داخل سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۳-ب). در مدل ۳، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۱۵ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شده تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۳-ج). در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شده تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی

بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۴-ج). در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندانانه بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شده تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانانه‌ها شروع شده و به صورت مورب به داخل سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۴-د).

در مدل ۵، یعنی مدلی با یک دندانانه بتن با زاویه ۱۵-درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۴-ه). در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندانانه بتن با زاویه ۳۰-درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانانه‌ها آغاز شده و به صورت مورب در بتن منتشر شده‌اند (شکل ۱۴-و). در مدل ۷، یعنی مدلی با یک دندانانه سنگ و یک دندانانه بتن با زاویه ۱۵ درجه، ۱۵-درجه و ارتفاع دندانانه‌های برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۴-ز). در مدل ۸، یعنی مدلی با یک دندانانه سنگ و یک دندانانه بتن با زاویه ۳۰ درجه، ۳۰-درجه و ارتفاع دندانانه‌های برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانانه‌ها ایجاد شده و به صورت مورب در سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۴-ح).

در مدل ۹، یعنی مدل بدون دندانانه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شده و به موازات جهت بارگذاری



شکل ۱۳: الگوی شکست فصل مشترک سنگ-بتن شامل یک کانال تزریق بتن در سنگ.

۴-۲-۲- نمونه‌هایی با دو کانال تزریق بتن در سنگ

شکل ۱۴ نتایج الگوی شکست آزمایشگاهی فصل مشترک سنگ-بتن شامل دو کانال تزریق بتن در سنگ را نشان می‌دهد.

در مدل ۱، یعنی مدلی با یک دندانانه سنگ و دودندانانه بتن با زاویه 15° ، 15° و 15° و ارتفاع دندانانه‌های برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و موازی با جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۴-الف). در مدل ۲، یعنی مدلی با یک دندانانه سنگ و دودندانانه بتن با زاویه 30° ، 30° و 30° و ارتفاع دندانانه‌های برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و موازی با جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانانه‌ها شروع شده و به صورت مورب به داخل سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۴-ب). در مدل ۳، یعنی مدلی با یک دندانانه بتن با زاویه ۱۵ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شده تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان

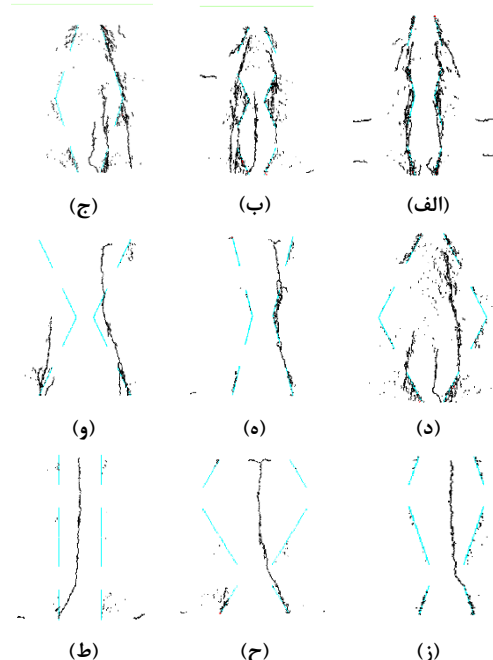
است که دو ترک کششی از نوک دندانها شروع شده و به صورت مورب در سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۵-ب). در مدل ۳، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۱۵ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شده تا با مرز مدل به هم پیوندند. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۵-ج). در مدل ۴، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن شروع شده و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شده تا با مرز مدل به هم پیوندند. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها شروع شده و به صورت مورب در سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۵-د). در مدل ۵، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۱۵ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۵-ه).

در مدل ۶، یعنی مدلی با یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانها آغاز شده و به صورت مورب در بتن منتشر شده‌اند (شکل ۱۵-و).

در مدل ۷، یعنی مدلی با یک دندان سنگ و یک دندان بتن با زاویه ۱۵ درجه، ۱۵ درجه و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۵-ز).

در مدل ۸، یعنی مدلی با یک دندان سنگ و یک دندان بتن با زاویه ۳۰ درجه، ۳۰ درجه و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن ایجاد شد و

برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر شده است. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۴-ط).



شکل ۱۴: الگوی شکست فصل مشترک سنگ-بتن شامل دو کانال تزریق بتن در سنگ.

۴-۲-۳- نمونه‌هایی با سه کانال تزریق بتن در سنگ.

شکل ۱۵ نتایج الگوی شکست آزمایشگاهی فصل مشترک سنگ-بتن شامل سه کانال تزریق بتن در سنگ را نشان می‌دهد.

در مدل ۱، یعنی مدلی با یک دندان سنگ و دو دندان بتن با زاویه ۱۵°، ۱۵°، ۱۵° و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۵-الف).

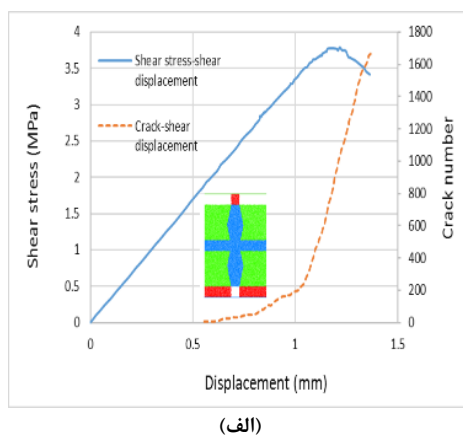
در مدل ۲، یعنی مدلی با یک دندان سنگ و دو دندان بتن با زاویه ۳۰°، ۳۰°، ۳۰° و ارتفاع دندانهای برابر، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شد و به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتن منتشر شد تا به مرز مدل برسد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر

کامل نیز تنش برشی در مقابل جابه‌جایی برشی را در طول آزمایش نشان می‌دهد.

الف) مدل‌های حاوی یک کانال تزریق بتن در سنگ

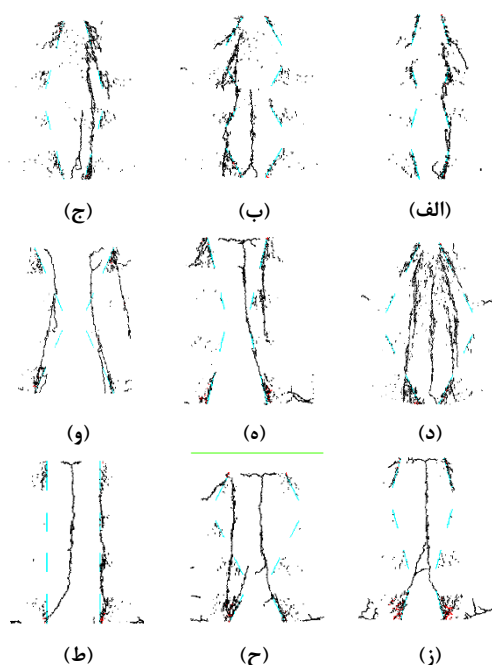
شکل ۱۶ نشان می‌دهد که در مدل‌های سنگی حاوی یک کانال بتنی، سه مرحله مختلف در طول بارگذاری برشی رخ داده است، یعنی محدوده الاستیک، محدوده پلاستیک و شکست نهایی. در مرحله الاستیک، تغییر شکل مدل نشان‌دهنده عملکرد الاستیک خطی بود و تعداد ترک‌های کششی به تدریج افزایش یافت. سپس، منحنی تنش برشی در برابر جابه‌جایی برشی با افزایش تعداد ترک‌های کششی، غیرخطی شد و نیروی اعمال شده به نقطه اوج خود رسید و سپس ترک‌ها به هم پیوستند. قبل از اوج بار، نوسان کمی وجود دارد که به دلیل ادغام مجموعه‌های شکستگی اصلی است. افزایشی در نرخ شروع ترک کششی (شکل ۱۶) وجود داشت که مربوط به رشد تدریجی تعداد ترک‌ها قبل از اوج بار در شکل ۱۶ است. اگر نمونه دیگر نتواند بار اعمال شده را تحمل کند، افت ناگهانی تنش رخ می‌دهد. کاهش بیشتر تنش پس از اوج بار به دلیل شکست ماکرو در سراسر نمونه مدل‌سازی شده است. درواقع، افت تنش کمتر با افزایش تعداد ترک‌های کششی همراه است. از شکل ۱۶، مشخص است که ترک‌های برشی در بار اوج رخ داده‌اند و پس از شکست پس از اوج، با سرعت زیادی افزایش یافته‌اند.

شکل ۱۶ نشان می‌دهد که جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش زاویه دندانه‌ها افزایش یافته است. جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با کاهش تعداد دندانه‌ها افزایش یافته است. همچنین، جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش تعداد دندانه‌های زاویه‌دار منفی در مدل، افزایش یافته است.



(الف)

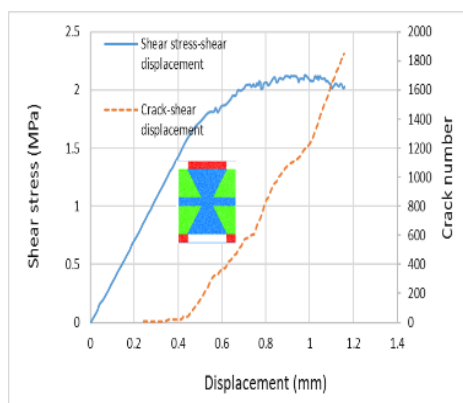
به موازات جهت بارگذاری برشی از طریق پایه بتنی تا ادغام با مرز مدل منتشر شد. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند. لازم به ذکر است که دو ترک کششی از نوک دندانه‌ها ایجاد شده و به صورت مورب در سنگ نرم منتشر شده‌اند (شکل ۱۵-ح). در مدل ۹، یعنی مدل بدون دندانه، ترک کششی در فصل مشترک سنگ-بتن آغاز شده و به موازات جهت بارگذاری برشی در تماس سنگ-بتن تا زمان ادغام با مرز مدل منتشر می‌شود. این ترک کششی از میان بتن عبور کرده و فصل مشترک سنگ-بتن را به شکست می‌رساند (شکل ۱۵-ط). با مقایسه شکل ۱۱ و شکل‌های ۱۳-۱۵، می‌توان مشاهده کرد که بین الگوهای شکست تجربی و عددی تطابق خوبی وجود دارد.



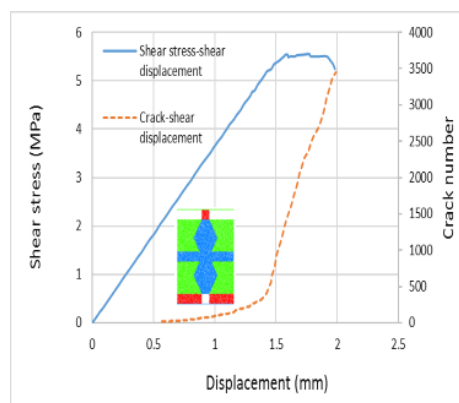
شکل ۱۵: الگوی شکست فصل مشترک سنگ-بتن شامل سه کانال تزریق بتن در سنگ.

۴-۲-۴- بررسی رفتار منحنی تنش برشی-جابه‌جایی برشی به همراه تعداد ترک‌ها

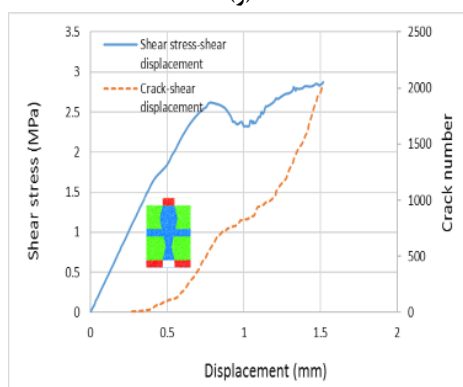
شکل‌های ۱۶-۱۸ منحنی تنش برشی-جابه‌جایی برشی را به همراه تعداد ترک‌های برشی، ترک‌های کششی و کل ترک‌ها نشان می‌دهند. در اینجا خط نقطه‌چین قرمز کوچک نشان‌دهنده تعداد ترک‌های برشی، خط نقطه‌چین خاکستری متوسط نشان‌دهنده ترک‌های کششی و خط نقطه‌چین نارنجی بزرگ نشان‌دهنده کل ترک‌ها است. خط منحنی



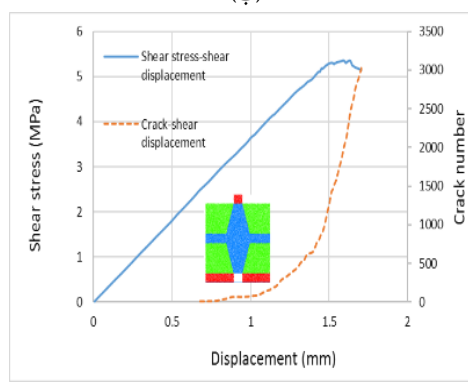
(ا)



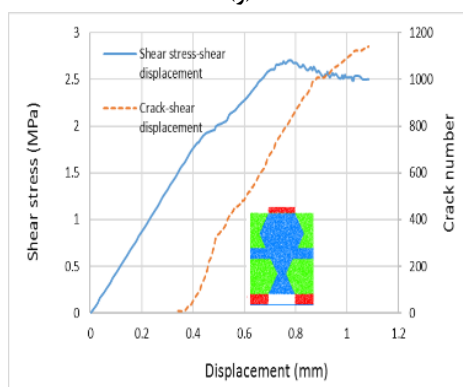
(ب)



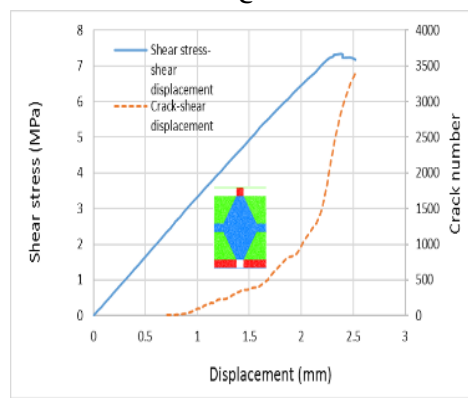
(ج)



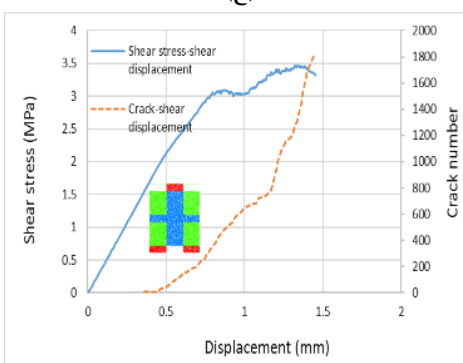
(د)



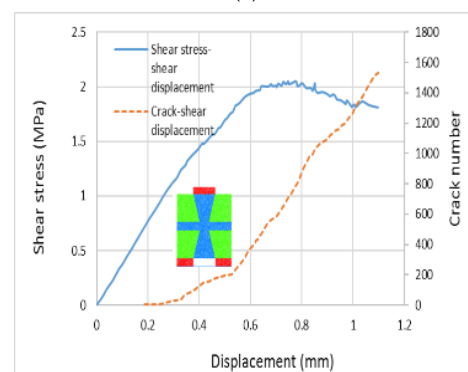
(ه)



(و)



(ز)



(ح)

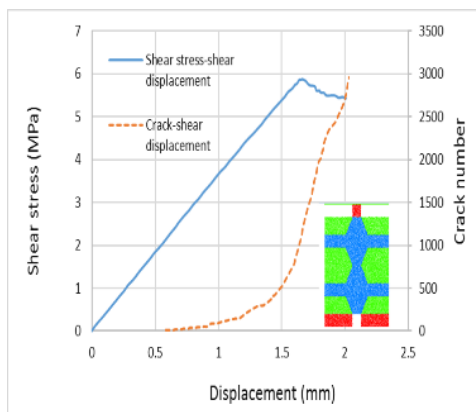
شکل ۱۶: منحنی تنش برشی-جابجایی برشی را به همراه تعداد ترک‌های برشی، ترک‌های کششی و کل ترک‌ها نشان می‌دهد؛ یک کانال بتنی.

ب) مدل‌های حاوی دو کانال تزریق بتن در سنگ

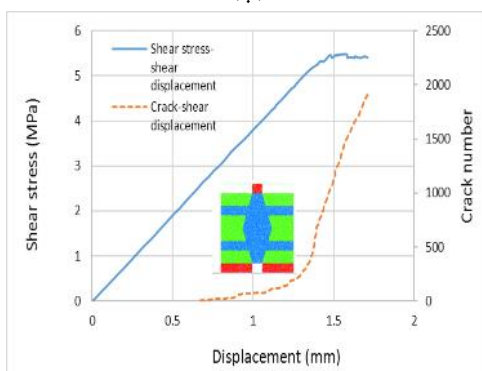
شکل ۱۷ نشان می‌دهد که در مدل‌های سنگی حاوی دو کانال بتنی، سه مرحله مختلف در طول بارگذاری برشی رخ داده است، یعنی محدوده الاستیک، محدوده پلاستیک و شکست نهایی.

در مرحله الاستیک، تغییر شکل مدل نشان‌دهنده عملکرد الاستیک خطی بود و تعداد ترک‌های کششی به تدریج افزایش یافت. سپس، منحنی تنش برشی در برابر جابه‌جایی برشی با افزایش سرعت افزایش تعداد ترک‌های کششی، غیرخطی شد و نیروی اعمال‌شده به نقطه اوج خود رسید و سپس ترک‌ها به هم پیوستند. قبل از اوج بار، نوسان کمی وجود دارد که به دلیل ادغام مجموعه‌های شکستگی اصلی است. افزایشی در نرخ شروع ترک کششی (شکل ۱۷) وجود داشت که مربوط به رشد تدریجی تعداد ترک‌ها قبل از اوج بار در شکل ۱۷ است. اگر نمونه دیگر نتواند بار اعمال‌شده را تحمل کند، افت ناگهانی تنش رخ می‌دهد. کاهش بیشتر تنش پس از اوج بار به دلیل شکست ماکرو در سراسر نمونه مدل‌سازی شده است. در واقع، افت تنش کمتر با افزایش تعداد ترک‌های کششی همراه است. از شکل ۱۷، مشخص است که ترک‌های برشی در بار اوج رخ داده‌اند و پس از شکست پس از اوج، با سرعت زیادی افزایش یافته‌اند.

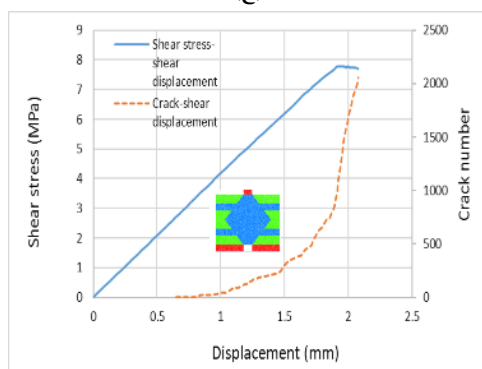
شکل ۱۷ نشان می‌دهد که جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش زاویه دندان‌ها افزایش یافته است. جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با کاهش تعداد دندان‌ها افزایش یافته است. همچنین، جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش تعداد دندان‌های زاویه‌دار منفی در مدل، افزایش یافته است.



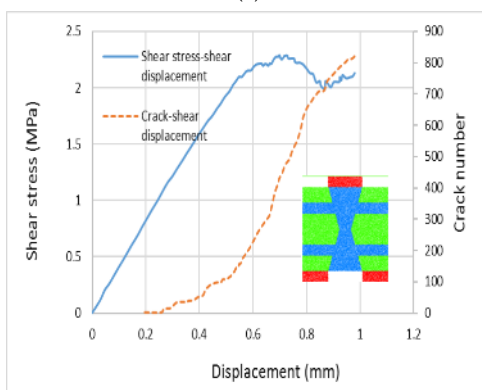
(ب)



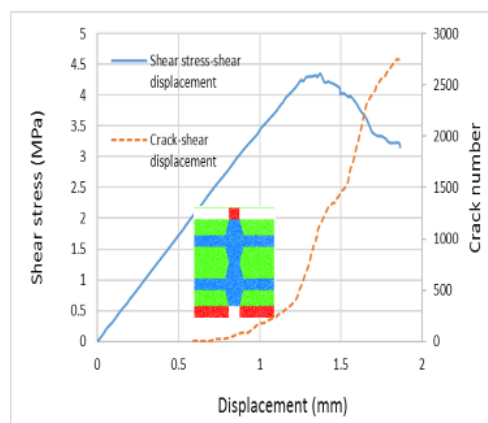
(ج)



(د)



(ه)

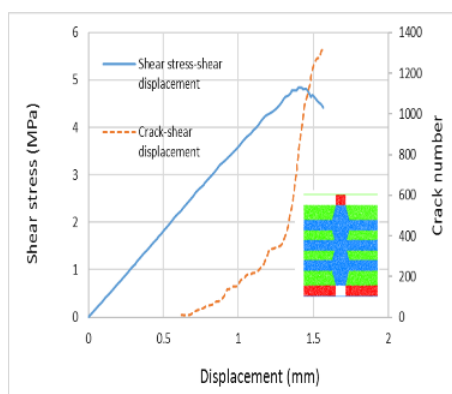


(الف)

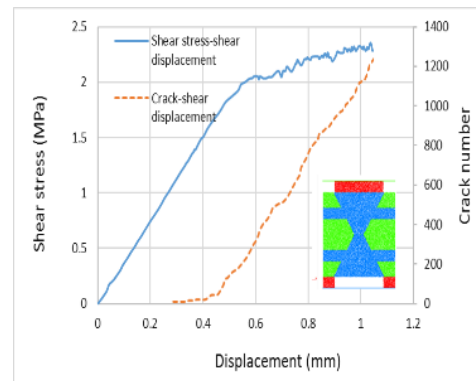
ج) مدل‌هایی شامل سه کانال تزریق بتن در سنگ

شکل ۱۸ نشان می‌دهد که در مدل‌های سنگی شامل سه کانال بتنی، سه مرحله مختلف در طول بارگذاری برشی رخ داده است، یعنی محدوده الاستیک، محدوده پلاستیک و شکست نهایی. در مرحله الاستیک، تغییر شکل مدل نشان‌دهنده عملکرد الاستیک خطی بود و تعداد ترک‌های کششی به تدریج افزایش یافت. سپس، منحنی تنش برشی در برابر جابه‌جایی برشی با افزایش تعداد ترک‌های کششی، غیرخطی شد و نیروی اعمال شده به نقطه اوج خود رسید و سپس ترک‌ها به هم پیوستند. قبل از اوج بار، نوسان کمی وجود دارد که به دلیل ادغام مجموعه‌های شکستگی اصلی است. افزایشی در نرخ شروع ترک کششی (شکل ۱۸) وجود داشت که مربوط به رشد تدریجی تعداد ترک‌ها قبل از اوج بار در شکل ۱۸ است. اگر نمونه دیگر نتواند بار اعمال شده را تحمل کند، افت ناگهانی تنش رخ می‌دهد. کاهش بیشتر تنش پس از اوج بار به دلیل شکست ماکرو در سراسر نمونه مدل‌سازی شده است. در واقع، افت تنش کمتر با افزایش تعداد ترک‌های کششی همراه است. از شکل ۱۸، مشخص است که ترک‌های برشی در بار اوج رخ داده‌اند و پس از شکست پس از اوج، با سرعت زیادی افزایش یافته‌اند.

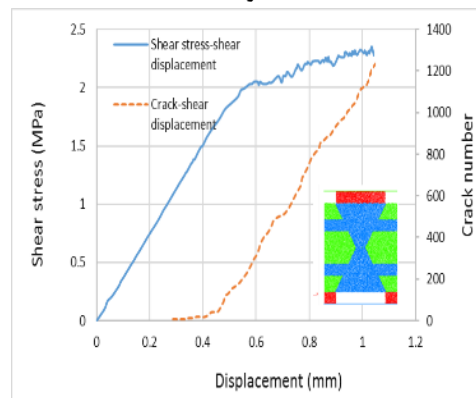
شکل ۱۸ نشان می‌دهد که جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش زاویه دندانه‌ها افزایش یافته است. جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با کاهش تعداد دندانه‌ها افزایش یافته است. همچنین، جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش تعداد دندانه‌های زاویه‌دار منفی در مدل، افزایش یافته است. با مقایسه بین شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ می‌توان نتیجه گرفت که در هندسه ثابت فصل مشترک سنگ-بتن، جابه‌جایی برشی مرتبط با حداکثر تنش با افزایش کانال‌های بتنی افزایش یافته



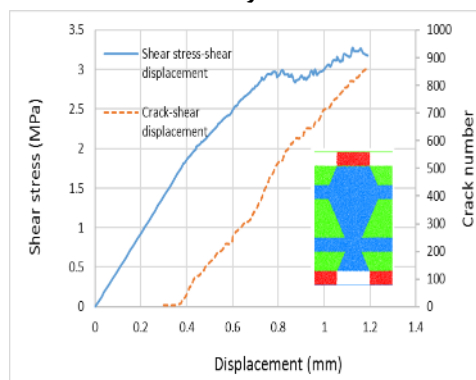
(الف)



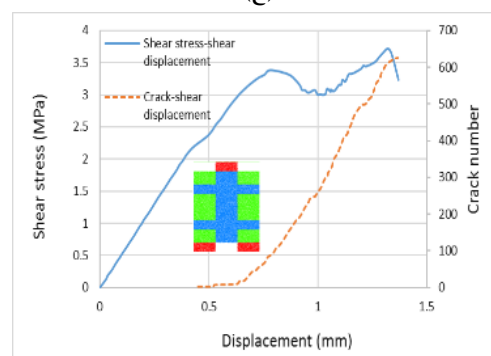
(و)



(ز)

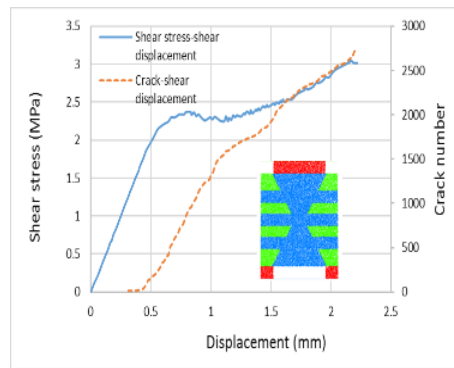


(ح)

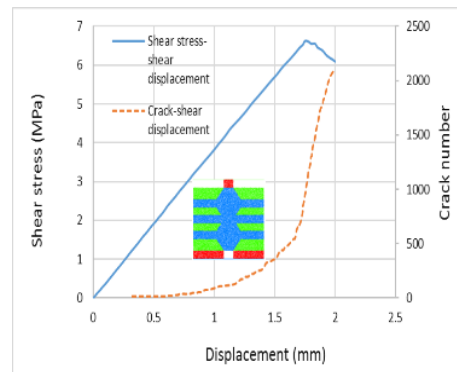


(ط)

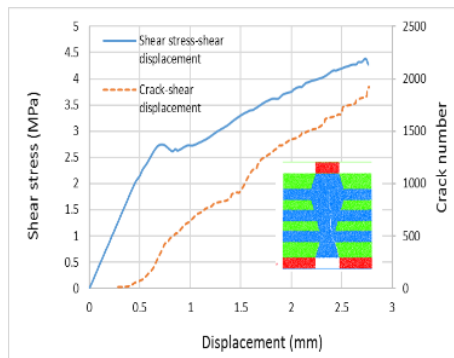
شکل ۱۷: منحنی تنش برشی-جابه‌جایی برشی را به همراه تعداد ترک‌های برشی، ترک‌های کششی و کل ترک‌ها نشان می‌دهد؛ دو کانال بتنی.



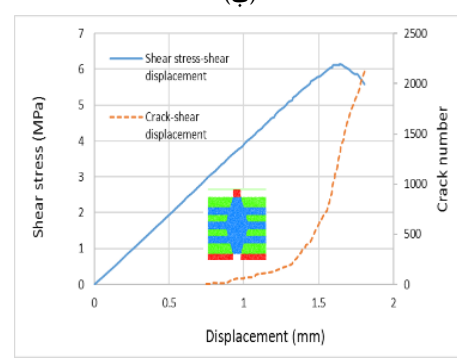
(ا)



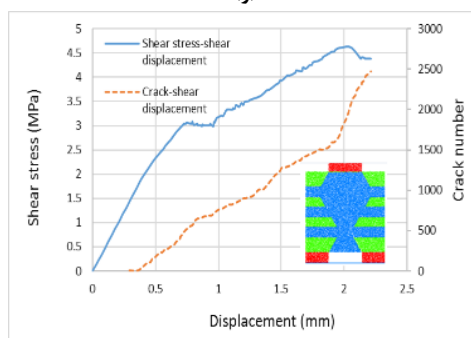
(ب)



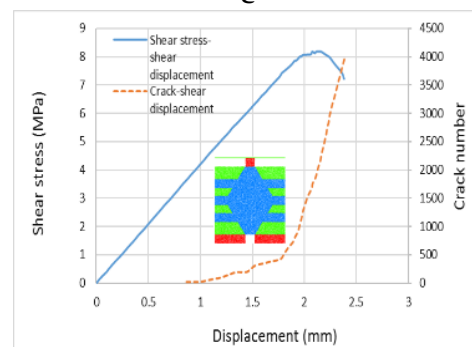
(ج)



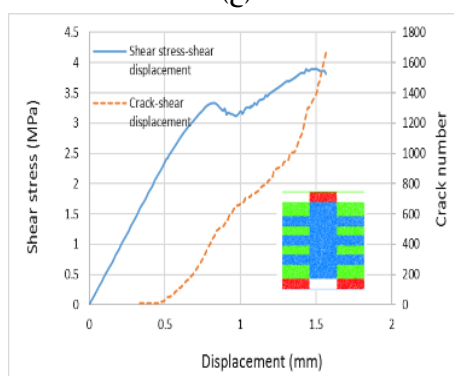
(د)



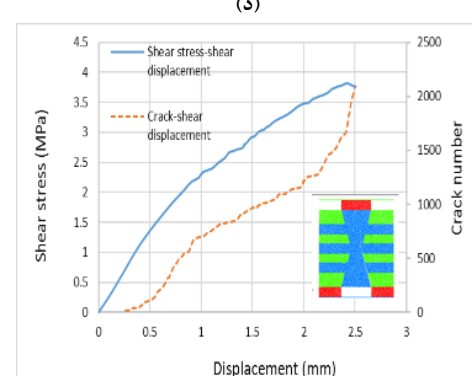
(ه)



(و)



(ز)



(ح)

شکل ۱۸: منحنی تنش برشی-جابجایی برشی را به همراه تعداد ترک‌های برشی، ترک‌های کششی و کل ترک‌ها نشان می‌دهد؛ سه کانال بتنی.

شماره ۹ که بدون دندانه است، کم‌ترین سختی برشی را دارد. در مجموع سختی برشی در مدل‌های با دندانه ۳۰ درجه بیش‌تر از مدل‌های با دندانه ۱۵ درجه است. دلیل این امر

به‌طور کلی در هندسه ثابت فصل مشترک، سختی برشی با افزایش دندانه‌ها افزایش می‌یابد. مدل شماره ۶ به دلیل داشتن سه دندانه ۳۰-درجه، بیش‌ترین سختی برشی و مدل

است که بتن بتواند در یک، دو و سه کانال از هر طرف به داخل سنگ نفوذ کند. نتایج نشان می‌دهد که:

۱- الگوی شکست مدل تابعی از زبری فصل مشترک است. در نمونه‌های بدون زبری، یک سطح کششی در فصل مشترک ایجاد می‌شود؛ اما با افزایش زاویه زبری، علاوه بر احتمال شکست کششی در فصل مشترک، ترک‌های کششی زیادی در زبری نمونه ایجاد می‌شود. ترک‌های کششی اتفاق افتاده در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول ترک‌هایی هستند که در قسمت‌های بکر سنگ عبور می‌کنند و دسته دوم آن‌هایی که از کانال‌های تزریق بتن عبور می‌کنند. به‌طور کلی با افزایش طول این ترک‌ها مقاومت زیاد می‌شود.

۲- با افزایش زاویه دندان از ۰ تا ۳۰، تعداد ترک‌های کششی در نمونه افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش کانال تزریق بتن در سنگ، الگوی شکست نهایی ثابت است.

۴- با افزایش کانال تزریق بتن، سختی برش، تنش شروع ترک و تنش شکست افزایش می‌یابد.

۵- مدل شماره ۶ که شامل سنگ با دندان ۳۰- است، بیشترین مقاومت برشی، تنش شروع ترک و سختی برشی را دارد و مدل شماره ۹ که بدون دندان است، کمترین خواص مکانیکی را دارد.

۶- در هندسه ثابت فصل مشترک بتن-سنگ، تنش شروع ترک و سختی برشی با افزایش زاویه دندان مقاومت برشی افزایش می‌یابد.

۷- باتوجه به شکست‌های اتفاق افتاده در مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی، می‌توان مدل‌های مذکور را به‌طور دوبعدی نیز مدل‌سازی کرد. ترک یا از دندان‌های سنگی می‌شکند و یا لغزش در فصل مشترک اتفاق می‌افتد. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌سازی به‌طور سه‌بعدی و دوبعدی برای این آرایش تفاوتی ندارد.

۸- یکی از محدودیت‌های این مطالعه اختلاف در مقیاس دانه‌بندی گچ و بتن است که باعث می‌شود سطوح تماس گچ و بتن با شرایط توده سنگ واقعی مغایرت داشته باشد.

۹- در برش پانچ به دلیل حضور تعادل در مدل، برش به‌طور ایده‌آل اتفاق می‌افتد. ولی در برش مستقیم، نیروهای نامتعادل کننده شرایط نمونه را از حالت تعادلی برش خارج می‌کنند.

ضخامت بتن مرکزی و افزایش سطح مقطع فصل مشترک در زاویه دندان ۳۰ است. با افزایش کانال‌های تزریق، سطح مقطع بتن متصل به سنگ افزایش می‌یابد و این منجر به افزایش سختی برشی می‌شود.

به‌طور کلی در هندسه ثابت فصل مشترک، تنش شروع ترک با افزایش دندان‌ها افزایش می‌یابد. مدل شماره ۶ به دلیل داشتن سه دندان ۳۰-، بیشترین تنش شروع ترک و مدل شماره ۹ که بدون دندان است، کمترین تنش شروع ترک را دارد. به‌طور کلی شروع ترک در مدل‌های با دندان ۳۰ درجه بیشتر از مدل‌های با دندان ۱۵ درجه است. دلیل این امر ضخامت بتن مرکزی و افزایش سطح مقطع فصل مشترک در زاویه دندان ۳۰ است. با افزایش کانال‌های تزریق، سطح مقطع بتن متصل به سنگ افزایش می‌یابد و این منجر به افزایش تنش شروع ترک می‌شود.

به‌طور کلی در هندسه ثابت فصل مشترک، مقاومت برشی با افزایش دندان کاهش می‌یابد. مدل‌های با دندان ۳۰- مقاومت بیشتری نسبت به مدل‌های با دندان ۱۵- درجه دارند. دلیل این امر، ضخامت بتن مرکزی و افزایش سطح مقطع فصل مشترک در زاویه دندان ۳۰ است. مدل شماره ۶ بیشترین و مدل شماره ۹ کمترین مقاومت برشی را دارند. با افزایش کانال تزریق، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. با افزایش کانال‌های تزریق، سطح مقطع بتن متصل به سنگ افزایش می‌یابد و این منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود. مدل‌های شماره ۶ و ۹ در شبیه‌سازی عددی و آزمایش آزمایشگاهی بیشترین و کمترین مقاومت برشی را داشتند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مکانیزم شکست برشی ۲۷ هندسه مختلف از فصل مشترک بتن-سنگ شامل یک، دو و سه کانال تزریق بتن با استفاده از آزمایش برش پانچ فیزیکی و کد جریان ذرات در دو بعد (PFC^{2D}) بررسی شد. برای بررسی رفتار شکست فصل مشترک سنگ-بتن، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۵×۱۵×۵ سانتی‌متر حاوی لایه‌های گچ و بتن ساخته شد. بتن در قسمت میانی نمونه قرار دارد و دو طرف آن توسط گچ احاطه شده است. در فصل مشترک، بتن و گچ دارای زبری‌های متفاوتی هستند. نمونه‌سازی به‌گونه‌ای انجام شده

FA series of grout materials in an underwater condition. *Construction & Building Materials*, 144, 74, 2017.

[9] LI P., ZHANG Q.S., LI S.C., ZHANG X. Time-dependent empirical model for fracture propagation in soil grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 94, 103, 2019.

[10] VARGA D.L., MUÑOZ J.F., BENTZ D.P. Grout-concrete interface bond performance: Effect of interface moisture on the tensile bond strength and grout microstructure. *Construction & Building Materials*, 170, 747, 2018.

[11] CHEN J., XU C. A study of the shear behavior of a Portland cement grout with the triaxial test. *Construction & Building Materials*, 176, 81, 2018.

[12] JORNE F., HENRIQUES F.M.A. Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow. *Construction & Building Materials*, 122 (30), 171, 2016.

[13] LI S.C., SHA F., LIU R.T., ZHANG Q.S., LI Z.F. Investigation on fundamental properties of microfine cement and cement-slag grouts. *Construction & Building Materials*, 153, 965, 2017.

[14] SHAHU J.T., PATEL S., SENAPATI A. Engineering properties of copper slag-fly ash-dolime mix and its utilization in the base course of flexible pavement. *Journal of materials in civil engineering*, 25, 1871, 2013.

[15] Faramarzi, L., Darbor, M., Ebrahimi Jouzdani, B., Hoseinie, S.H. The effect of anisotropy on the mechanical properties of artificial rock mass based on laboratory physical modeling, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 35(13): 51-62, 2023.

[16] Sarfarazi, V., Fatehi Maraji, M., Haeri, H., Crack growth mechanism in granite specimens with non-persistent joints under punch shear through test, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 33(12): 17-26, 2023.

[17] Nejati1, H.R., Azinfar, M.J. Effect of Rock Fracture Filling on Mode I and II Fracture Toughness, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 8(17):19-25. 2019.

[18] Abdollahipour, A. , Fatehi Marji, M. , Yarahmadi Bafghi, A. and Gholamnejad, J. (2017). A Fourth Order Formulation of DDM for Crack Analysis in Brittle Solids. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 6(Special Issue), 25-40.

[19] YANG H.X. Experimental study on mechanical property of soil cement. 2nd international conference on electronic and mechanical engineering and information technology, 790, 2012.

۱۰- تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.

۱۱- در این مقاله مقیاس نمونه‌ها آزمایشگاهی است که برش فصل مشترک دوغاب-گچ با حضور آرایش‌های مختلف فصل مشترک در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده است. این مهم با شرایط واقعی تزریق در توده سنگ متفاوت است. نویسندگان قصد دارند در آینده نزدیک به این مهم با کاربرد شبکه درزه‌های مجزا در PFC بپردازند.

۱۲- اگر شکستگی‌ها و منافذ موجود در توده سنگ کاملاً با گروت پر شوند، بیش‌ترین مقاومت برشی را ارائه خواهند داد. دانه‌بندی گروت برای این مهم بسیار مهم است به‌گونه‌ای که برگشت‌پذیری گروت تا لحظه پرشدن تمام شکستگی‌ها اتفاق نیافتد.

مراجع

[1] LI M.T., ZHANG X., KUANG W., ZHOU Z. Grouting reinforcement of shallow and small clearance tunnel. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30 (1), 752, 2021.

[2] LIU J.G., ZHANG X., LI M.T., LAN X.D., HAO P.S. Research on permeation grouting mechanism considering gravity in the treatment of mud inrush disaster. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30 (3), 2609, 2021.

[3] LI L.P., SHANG C.S., CHU K.W., ZHOU Z.Q., SONG S.G., LIU Z.H., CHEN Y.H. Large-scale geo-mechanical model tests for stability assessment of super-large crosssection tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, 103756, 2021.

[4] HEIDARI M., TONON F. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 76, 200, 2015.

[5] SALIMIAN M.H., BAGHBANAN A., HASHEMOLHOSSEINI H. Effect of grouting on shear behavior of rock joint. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 98, 159, 2017.

[6] BEZUIJEN A., TE GROTEHUIS R., VAN TOL A.F., BOSCH J.W., HAASNOOT J.K. Analytical model for fracture grouting in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (6), 611, 2010.

[7] FATTAH M.Y., AL-ANI M.M., AL-LAMY M.T.A. Studying collapse potential of gypseous soil treated by grouting. *Soils & Foundations*, 54 (3), 396, 2014.

[8] SONG B.D., PARK B.G., CHOI Y. Determining the engineering characteristics of the Hi-

and numerical study of shear behavior of concrete–soft rock interface: with approach of concrete penetration in rock cavities, *Computational Particle Mechanics* 12 (1), 327-349.

[25] Potyondy D. The effect of voids on the mechanical properties of rock. In: *Proceedings of the discrete element modeling conference (DEM2007)*, 2007, 27–29 Aug, Brisbane, Australia.

[26] Potyondya, D.O., Cundall P.A. Abonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41:1329-1364.

[27] Sarfarazi, V., Ghazvinian, A., Schubert, W., Blumel, M., Nejati, H.R. Numerical simulation of the process of fracture of Echelon rock joints”, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2014, 47(4): 1355-1371.

[28] MO Manesh, V Sarfarazi, N Babanouri, A Rezaei, AM Far 2025, New method for determining the Mode-I fracture toughness of shotcrete: edge notched partial disc test, *Magazine of Concrete Research*, 76(11): 557-573.

[20] SULUGURU A.K., JAYATHEJA M., KAR A., GUHARAY A., SURANA A.R., JAMES N. Experimental studies on the microstructural, physical and chemical characteristics of building derived materials to assess their suitability in ground improvement. *Construction & Building Materials*, 156, 921, 2017.

[21] HU W., SUI W.H., WANG D.L., MA L.X. Experimental investigation on mechanical properties and representative elementary volume for chemically grouted fractured rock masses. *China Science Paper*, 8 (5), 408, 2013.

[22] HAN L., ZONG Y., HAN G., ZHANG H. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement. *Rock and Soil Mechanics*, 32(9), 2570, 2011.

[23] ZHANG Q.S., LI P., ZHANG X., LI S.C., ZHANG W.J., LIU J.G., YU H.Y. Model test of grouting strengthening mechanism for fault gouge of tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 34 (5), 924, 2015.

[24] Sarfarazi V., Ahmadian Saleh, A., Fu J., Haeri, H., Tahmasebi Moez, M (2025) Experimental