



مطالعه آزمایشگاهی تاثیر آرایش ترکها در رفتار شکست نمونه‌های شبه سنگی تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری

حسین میرزائی نصیرآباد^{۱*}، رضا کاکایی^۲، محمود شریعتی^۳، سید محمد اسماعیل جلالی^۴

^۱ استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ استاد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۴ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در اثر بارگذاری، ترک‌های موجود در محیط سنگی رشد کرده و به هم متصل می‌شوند و در نهایت منجر به شکست آن می‌گردند. در این مقاله مکانیسم رشد و اتصال ترک‌ها در نمونه‌های شبه سنگی حاوی دو ترک شیب‌دار و باز تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری به طور آزمایشگاهی مطالعه شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از ترکیب گچ و آب تهیه شده و ترک‌ها با قرار دادن صفحات نازک در قالب ایجاد شده‌اند. یک سری نمونه حاوی دو ترک با طول ثابت ۱۵ میلی‌متر، شیب ثابت ۴۵ درجه، طول ثابت خط واصل ۲۰ میلی‌متر و شیب متغیر خط واصل ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ درجه تهیه و تحت بار فشاری رفتار شکست آنها مطالعه شده است. شیب خط واصل دو ترک در مقدار تنش اتصال و حالت اتصال ترک‌ها تاثیر بسزایی دارد. به ازای مقادیر مختلف شیب خط واصل، چهار نوع اتصال: برشی، برشی-کششی، کششی-برشی و کششی مشاهده شد. همچنین شیب خط واصل ترک‌ها با تنش اتصال ارتباط مستقیم دارند.

کلمات کلیدی: مکانیک شکست سنگ؛ اتصال ترک‌ها؛ بار فشاری؛ مطالعه آزمایشگاهی.

۱- مقدمه

تونل‌ها، چاه‌ها و مغارها که عمدتاً در محیط‌های سنگی واقع می‌شوند، نیاز است. برای طراحی بهینه سیستم‌های نگهداری و جلوگیری از هزینه‌های اضافی، اطلاع دقیق از رفتار مکانیکی محیط ساختگاه پروژه ضروری است. در حالت کلی یک محیط سنگی بکر نبوده و به خاطر انواع فعالیت‌های تکتونیکی، ناپیوستگی‌های زیادی در آن به وجود می‌آید.

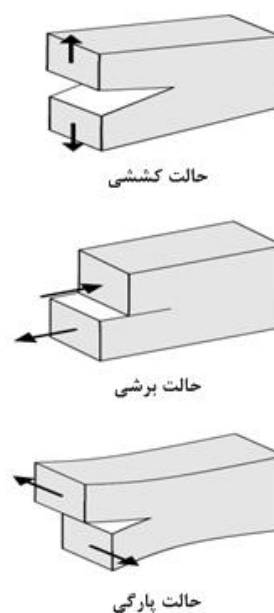
امروزه در حوزه مهندسی معدن و عمران برای انواع کاربری‌ها از جمله بهره برداری از مواد معدنی، راه‌سازی، سیستم فاضلاب شهری، مسیرهای عبور لوله، انتقال آب، نصب ترانسفورماتورها و توربین‌های برق آبی و ... به حفر ترانشه‌ها و شیروانی‌های سطحی و به انواع فضاهای زیرزمینی نظیر

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۴۳۱۵۸۴۱۶؛ فکس: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹

آدرس پست الکترونیک: hmirzaii@shahroodut.ac.ir

مرزی و المان مجزا نحوه انتشار و اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی تحت انواع بارها مطالعه شده است. با استفاده از المان محدود مکانیسم رشد و اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی یا شبه سنگی تحت بار فشاری مطالعه شده است [۳-۵]. به خاطر ماهیت مسائل انتشار ترک (مرزهای متغیر) و مشکلات مربوط به مش‌بندی روش المان محدود، در سال‌های اخیر روش عددی المان مرزی [۶-۹]، روش المان مجزا [۱۰ و ۱۱]، روش عددی مانیفولد^۲ [۱۲] و روش عددی مدل ذره متصل^۳ [۱۳] برای مطالعه رشد و اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی و شبه سنگی بکار گرفته شده‌اند. روش‌های عددی علی‌رغم قابلیت بالا و هزینه کم، در تحلیل انتشار و اتصال ترک‌ها در محیط‌های سنگی به خاطر فرضیات مختلف نیازمند اعتبارسنجی با مطالعات آزمایشگاهی هستند. مطالعات آزمایشگاهی علاوه بر اعتبارسنجی نتایج عددی، به طور مستقل و دقیق قادر هستند جنبه‌های مختلف مکانیسم انشعاب، انتشار و اتصال ترک‌ها را نمایان سازند. در مطالعات آزمایشگاهی مختلف، با استفاده از انواع مصالح سنگی یا شبه‌سنگی، مکانیسم رشد و اتصال ترک‌ها در نمونه‌های حاوی چند ترک، با هندسه‌های مختلف تحت بارهای فشاری بررسی شده است. در این مطالعات انواع مصالح نظیر سنگ آهک [۱۴]، ماسه سنگ [۱۵ و ۱۶]، سنگ مرمر [۱۷ و ۱۸]، گچ [۱۹-۲۱]، ماسه سنگ مصنوعی [۲۲] و گرانیت [۲۳] استفاده شده است. در مطالعات متعدد انشعاب ترک‌های کششی و برشی جدید و اتصال ترک‌ها در نمونه‌های ترک‌دار مطالعه شده است. شن^۴ [۱۹] رشد و اتصال ترک‌ها را در نمونه‌های گچی حاوی دو ترک بسته (سطوح اصطکاکی) و باز (سطوح بدون تماس) مطالعه کرده است. پارک^۵ و بوبت^۶ [۲۴ و ۲۵] انشعاب و اتصال ترک‌ها را در نمونه‌های گچی حاوی دو و سه ترک اصطکاکی (سطوح بسته) مطالعه کرده‌اند. ساگونگ^۷ و بوبت [۲۰] رشد و اتصال ترک‌ها را در نمونه‌های حاوی سه و شانزده ترک باز بررسی کرده‌اند.

مقاومت مکانیکی یک توده سنگ تابع گسترش ناپیوستگی-های آن است. در واقع شکست سنگ درزه‌دار موقعی اتفاق می‌افتد که درزه‌ها گسترش پیدا کرده و به هم متصل شوند. بنابراین در مطالعه مقاومت توده‌سنگ لازم است تاثیر ناپیوستگی‌های موجود در آنها مورد توجه دقیق قرار گیرد. بسته به نوع بارگذاری و هندسه شکستگی‌های سنگ، مطابق شکل ۱ یک شکستگی به صورت یکی از سه حالت اصلی کششی، برشی و یا پارگی و یا ترکیبی از آنها رشد می‌کند.



شکل ۱- حالت‌های مختلف رشد ترک

تاثیر هندسه ترک‌ها بر مقاومت محیط سنگی و رفتار شکست آن با روش‌های مختلفی نظیر روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مطالعه می‌شود. به خاطر ماهیت پیچیده رفتار شکست محیط‌های سنگی ترک‌دار، مطالعات تحلیلی نیازمند فرضیات محدود کننده‌ای است و لذا مکانیسم رشد و اتصال ترک‌های سنگ به طور تحلیلی مطالعه نشده است. با این وجود مطالعات تحلیلی کاجانوف^۱ [۱ و ۲] در محیط الاستیک به محیط‌های سنگی الاستیک قابل تعمیم است. به خاطر قابلیت بالای روش‌های عددی، در مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های عددی المان محدود، المان

² Manifold Method

³ Bonded Particle Model

⁴ Shen

⁵ Park

⁶ Bobet

⁷ Sagong

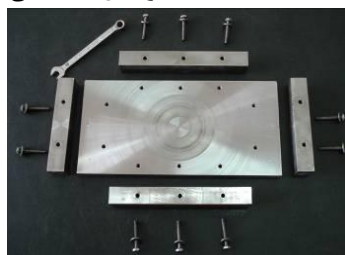
¹ Kachanov

۲- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی به شکل مکعب مستطیلی با ابعاد $3 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر مکعب از ترکیب گچ و آب با نسبت وزنی ۳ به ۲ (گچ به آب) تهیه شده است. برای تهیه نمونه‌های مکعب مستطیلی، قالب نشان داده شده در شکل ۳-الف ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. قسمت بالایی قالب باز بوده و برای تهیه نمونه، دوغاب از این قسمت داخل قالب ریخته می‌شود. بعد از سفت شدن نمونه پیچ‌های چهار وجه کناری قالب باز شده و نمونه به راحتی از قالب جدا می‌گردد (شکل ۳-ب). برای ایجاد ترک قبل از ریختن دوغاب در داخل قالب یک صفحه نازک فلزی با ضخامت ناچیز (0.4 میلی‌متر) و با طولی برابر طول ترک مورد نظر در داخل قالب قرار داده می‌شود و بعد دوغاب ریخته می‌شود. بعد از گیرش اولیه نمونه، صفحه فلزی مورد نظر از داخل نمونه بیرون کشیده می‌شود. در شکل ۳-ج نحوه ایجاد دو ترک شیب‌دار در نمونه نشان داده شده است.



الف) قالب ساخت نمونه آزمایشگاهی



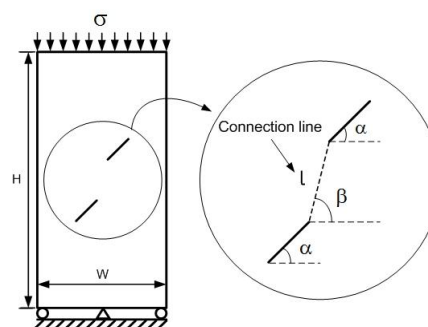
ب) نحوه باز شدن وجه‌های قالب



ج) نحوه ایجاد ترک در نمونه

شکل ۳- ایجاد ترک در محیط آزمایشگاهی

یانگ^۱ و همکارانش [۲۶] مکانیزم رشد و اتصال ترک‌ها را در نمونه‌های استوانه‌ای سنگ مرمر با دو ترک بسته تحت بارگذاری فشاری سه محوری مطالعه کرده‌اند. در تمامی این مطالعات آرایش‌های متفاوتی برای جانمایی ترک‌ها در نظر گرفته شده است. بر مبنای مطالعات فوق، در یک محیط سنگی با یک ترک شیب‌دار، تحت بارگذاری فشاری ابتدا از نوک ترک اصلی، ترک‌های کششی جدید در راستای عمود بر راستای ترک اصلی منشعب شده و مسیر رشد آن به راستای بارگذاری متمایل می‌شود. سپس ترک‌های برشی جدید تقریباً در راستای ترک اصلی منشعب شده و در راستای ثابتی رشد می‌کنند. در نمونه‌های ترک‌دار، هندسه و آرایش ترک‌ها مکانیزم رشد و اتصال ترک‌ها و رفتار شکست نمونه را کنترل می‌کنند. شکل ۲ پارامترهای هندسی از قبیل شیب ترک، طول خط واصل دو ترک و شیب خط واصل دو ترک را در نمونه حاوی دو ترک شیب‌دار نشان می‌دهد.

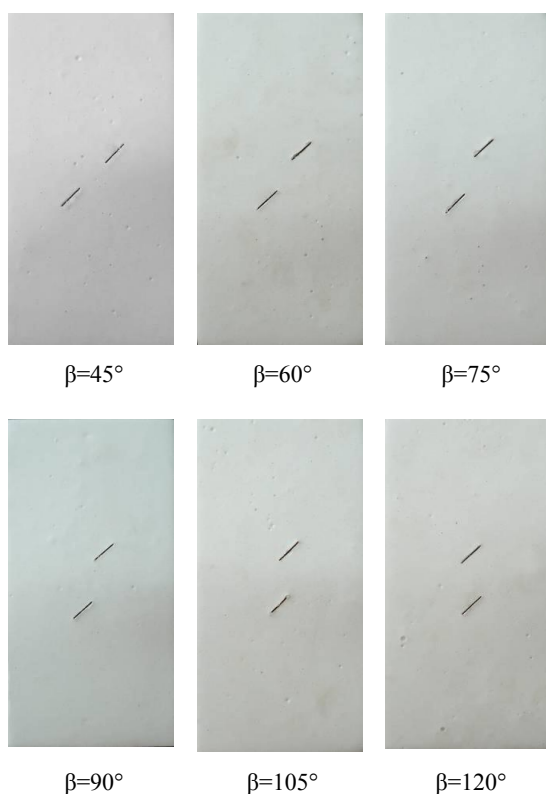


شکل ۲- نمونه حاوی دو ترک شیب‌دار تحت بار فشاری. α ، شیب ترک‌ها، β ، شیب خط واصل دو ترک و l طول خط واصل

در این مقاله تاثیر شیب خط واصل دو ترک در مکانیزم رشد و اتصال ترک‌های جدید و گسیختگی نمونه در نمونه‌های حاوی دو ترک شیب‌دار با شیب ۴۵ درجه، طول ۱۵ میلی‌متر، طول خط واصل ۲۰ میلی‌متر و شیب خط واصل متغیر به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. برای این مطالعه از نمونه‌های تهیه شده از جنس گچ استفاده شده است.

^۱ Yang

تعیین و در نهایت برای هر آزمایش بار گسیختگی نمونه نیز ثبت گردیده است.



شکل ۴- نمونه‌های گچی حاوی ترک شیب‌دار با شیب‌های مختلف خط واصل ترک‌ها

۴- بارگذاری نمونه‌ها و مشاهدات آزمایشگاهی

وقتی یک نمونه حاوی یک ترک شیب‌دار تحت بار فشاری قرار می‌گیرد، ابتدا از دو نوک ترک، ترک‌های کششی در راستای تقریباً عمود بر امتداد ترک منشعب می‌شوند و با افزایش بار فشاری به رشد خود ادامه می‌دهند (رشد پایدار) و به تدریج راستای آن‌ها به راستای بارگذاری متمایل می‌گردد. بعد از انشعاب ترک‌های کششی، از دو نوک ترک اصلی، ترک‌های برشی نیز در راستای نزدیک به امتداد ترک اصلی منشعب و به طور ناپایدار رشد می‌کنند [۱۹، ۲۴ و ۲۶]. با افزایش بارگذاری، ترک‌های کششی به مرز بالایی و پایینی نمونه رسیده و باعث گسیختگی آن می‌شوند (شکل ۶).

بعد از ساخت نمونه‌ها با استفاده از قالب تهیه شده، نمونه‌ها به مدت ۳ روز در کوره با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود تا آب خود را پس داده و خشک و ترد گردند. سپس برای اینکه سطوح نمونه صاف و باهم موازی گردند، دو طرف نمونه‌ها با استفاده از دستگاه برش به اندازه ۵ میلی‌متر برش داده می‌شود. بنابراین طول نمونه آماده شده ۱۹ سانتی‌متر خواهد بود. بدین ترتیب نمونه‌های مختلف حاوی دو ترک شیب‌دار با شیب ۴۵ درجه، طول ۱۵ میلی‌متر، طول خط واصل ۲۰ میلی‌متر و شیب خط واصل متغیر ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ درجه ساخته شده که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. با انجام آزمایش‌های مختلف، خواص مکانیکی مصالح گچی تشکیل دهنده نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین شده است. مقاومت فشاری تک محوری برابر ۱۵/۷ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۳/۱۷ مگاپاسکال، ضریب ارتجاعی ۳/۳۳ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۱۹، چسبندگی ۵/۳۲ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی برابر ۱۰ درجه تعیین شده‌اند.

۳- بارگذاری نمونه‌ها

نمونه‌های تهیه شده در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه بارگذاری INSTRON 8802 تحت بار فشاری تک‌محوری قرار گرفتند (شکل ۵). این دستگاه یک ماشین با قابلیت کنترل بار و جابجایی است. برای ثبت بار منجر به شکست نمونه‌ها از نیروسنج با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن استفاده شده است که با دقت ± 1 نیوتن بار وارده را ثبت می‌کند. بارگذاری نمونه‌ها با مکانیسم کنترل جابجایی و با نرخ ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفته است. بنابراین مدت زمان بارگذاری نمونه‌ها تا مرحله شکست حدود ۲ دقیقه طول کشیده است.

در طی بارگذاری نمونه‌ها، مکانیسم رشد ترک‌ها، زاویه انشعاب ترک‌های جدید، مود انتشار ترک‌های جدید (کششی یا برشی)، مسیر رشد ترک‌ها، نحوه اتصال ترک‌ها و گسیختگی نمونه‌های ترک‌دار ثبت شده است. برای تمامی نمونه‌ها نمودار تنش- کرنش رسم شده و از روی نمودار و با توجه به اینکه در لحظه اتصال ترک‌ها، افت قابل توجهی در نمودار ایجاد می‌گردد، بار یا تنش متناظر با اتصال ترک‌ها

در مصالح گچی وقتی ترک در حالت کششی رشد می‌کند سطح ترک جدید، زبر و تمیز می‌باشد ولی وقتی ترک در حالت برشی رشد می‌کند، به علت سایش، سطح ترک جدید تقریباً صاف بوده و حاوی ذرات خرد شده می‌باشد. بنابراین این مساله به تشخیص ترک‌های کششی و برشی کمک می‌کند.

در نمونه حاوی دو ترک شیب‌دار، تحت بارگذاری فشاری در نوک هر دو ترک تمرکز تنش کششی و برشی به وجود می‌آید و اندرکنش میدان تنش در نوک داخلی دو ترک مکانیزم انتشار ترک‌های جدید و اتصال آن‌ها را کنترل می‌کند [۲۷]. اندرکنش میدان تنش در نوک داخلی دو ترک به هندسه ترک‌ها (در این مطالعه شیب خط واصل دو ترک) وابسته است. در ادامه نتایج آزمایشگاهی رشد و اتصال ترک در نمونه‌ها با شیب خط واصل ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ درجه بررسی می‌شود.

۴-۱- نمونه با شیب خط واصل ۴۵ درجه

نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌هایی با شیب خط واصل ۴۵ درجه نشان می‌دهد که ترک‌های کششی و ترک‌های برشی از دو نوک هر دو ترک منشعب می‌شوند. ترک‌های برشی در راستای تقریبی ترک‌های اصلی و ترک‌های کششی با راستای تقریباً عمود بر راستای ترک‌های موجود منشعب می‌شوند. راستای ترک‌های کششی در حین رشد به راستای بارگذاری متمایل می‌شوند. با اعمال بارگذاری و رشد ناپایدار ترک‌های برشی داخلی، این ترک‌ها به هم رسیده و باعث اتصال ترک‌های اصلی می‌شوند. بعد از اتصال ترک‌ها، ترک‌های کششی خارجی به طور ناپایدار رشد کرده و به مرزهای نمونه می‌رسند و باعث گسیختگی نمونه می‌گردند (شکل ۷). در این نمونه نحوه اتصال ترک‌ها از نوع برشی است.

۴-۲- نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه

برای نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه، نحوه انشعاب ترک‌های کششی و برشی از نوک‌های داخلی و خارجی ترک‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل از دو نوک داخلی ترک‌ها، ترک‌های کششی در راستای عمود بر ترک‌ها و ترک‌های برشی در راستای ترک‌های اصلی منشعب شده‌اند. در دو نوک خارجی نیز ترک‌های کششی منشعب

در رشد پایدار ترک، برای گسترش بیشتر ترک لازم است بار اعمال شده به نمونه افزایش یابد ولی در رشد ناپایدار ترک، وقتی به ازای بار اعمالی مشخصی گسترش ترک شروع می‌شود، با همان بار بدون نیاز به افزایش بار، ترک به رشد خود ادامه می‌دهد.



شکل ۵- دستگاه بارگذاری برای انجام تست فشاری تک-محوری بر روی نمونه‌های ترک‌دار



شکل ۶- انشعاب و رشد ترک‌های کششی و برشی از دو نوک ترک تحت بارگذاری فشاری

می‌رسند (شکل ۱۰). نحوه اتصال ترک‌ها در این نمونه کششی-برشی است.

۴-۵- نمونه با شیب خط واصل ۱۰۵ درجه

برای نمونه با شیب خط واصل ۱۰۵ درجه انشعاب ترک‌های کششی از نوک داخلی و خارجی ترک‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل، با اعمال بارگذاری، ترک‌های کششی از نوک ترک‌ها، در راستای عمود بر امتداد ترک‌ها منشعب می‌شوند. با رشد ترک‌های کششی، ترک‌های برشی نیز به اندازه کمی رشد می‌کنند. با به هم رسیدن ترک‌های کششی و برشی منشعب از نوک داخلی ترک‌ها، اتصال ترک‌ها صورت می‌گیرد. در این نمونه رشد ترک‌های برشی از نوک داخلی ترک‌ها در مقایسه با نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه نامحسوس است ولی وجود دارد. نحوه اتصال ترک‌ها در این نمونه نیز مانند نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه، از نوع کششی-برشی است.

۴-۶- نمونه با شیب خط واصل ۱۲۰ درجه

برای نمونه با شیب خط واصل ۱۲۰ درجه، نحوه انشعاب ترک‌های کششی از نوک‌های داخلی و خارجی ترک‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این نمونه با اعمال بار فشاری فقط انشعاب ترک‌های کششی در نوک ترک‌های اصلی قابل مشاهده است. با افزایش بارگذاری ترک‌های کششی به ویژه ترک‌های کششی داخلی رشد کرده و ترک کششی منشعب از یک ترک به وسط ترک اصلی دیگر رسیده و باعث اتصال ترک‌ها می‌شوند. از نوک داخلی هر دو ترک، ترک کششی منشعب شده است ولی یکی از این ترک‌ها زودتر به قسمت میانی ترک مقابل می‌رسد. در این آزمایش ترک کششی منشعب از نوک داخلی ترک بالایی زودتر به ترک اصلی پایینی رسیده است. نحوه اتصال ترک‌ها در این نمونه از نوع کششی است.

۵- تنش اتصال ترک‌ها و گسیختگی نمونه‌ها

همانطور که اشاره شد برای تمام نمونه‌ها نمودار تنش- کرنش رسم شده است (شکل ۱۳). با توجه به اینکه در لحظه اتصال ترک‌ها افت قابل توجهی در نمودار تنش- کرنش ایجاد می‌شود، مقدار تنش اتصال ترک‌های اصلی (شروع رشد

شده عمود بر راستای ترک‌های اصلی بوده ولی ترک‌های برشی از راستای ترک‌های اصلی مقداری منحرف شده‌اند. با افزایش بارگذاری، ترک‌های برشی منشعب شده از دو نوک داخلی با مکانیسم کشش به هم می‌پیوندند و باعث اتصال دو ترک اصلی می‌شوند. در واقع نحوه اتصال ترک‌ها از نوع برشی-کششی است.

۴-۳- نمونه با شیب خط واصل ۷۵ درجه

برای نمونه با شیب خط واصل ۷۵ درجه نیز همانند نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه ابتدا از نوک ترک‌ها، ترک‌های کششی و برشی شروع به رشد می‌کنند (شکل ۹). با افزایش بارگذاری، ترک‌های برشی منشعب شده از دو نوک داخلی با مکانیسم کشش به هم رسیده و باعث اتصال دو ترک اصلی می‌شوند. همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌گردد در این نمونه طول قسمت کشش متصل کننده ترک‌های برشی داخلی بیشتر از نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه است. بعد از اتصال ترک‌ها، ترک‌های کششی خارجی به طور ناپایدار رشد کرده و به مرزهای بالایی و پایینی نمونه می‌رسند و باعث گسیختگی نمونه می‌گردند (شکل ۹). در این نمونه نیز نحوه اتصال ترک‌ها از نوع برشی-کششی است.

۴-۴- نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه

برای نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه با اعمال بارگذاری، از دو نوک هر دو ترک ابتدا ترک‌های کششی با راستای تقریباً عمود بر راستای ترک‌های موجود منشعب و با افزایش بار اعمالی رشد می‌کنند. راستای این ترک‌ها در حین رشد به راستای بارگذاری متمایل می‌شوند. با رشد ترک‌های کششی از نوک هر دو ترک، ترک‌های برشی نیز تقریباً در راستای ترک‌ها منشعب شده و رشد می‌کنند (شکل ۱۰). همانطور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود راستای ترک‌های برشی همانند ترک‌های کششی واضح نیستند. ترک‌های کششی منشعب شده از نوک داخلی هر یک از دو ترک اصلی به ترک برشی منشعب شده از نوک ترک دیگر رسیده و باعث اتصال ترک‌ها می‌گردند. ترک‌های کششی داخلی در اتصال ترک‌های اصلی نقش بیشتری دارند. بعد از اتصال ترک‌ها، رشد ترک‌های کششی منشعب شده از نوک‌های خارجی به طور ناپایدار ادامه یافته و نوک‌های ترک‌ها به مرزهای نمونه

ترک) وابسته است. بسته به مقدار شیب خط واصل دو ترک چهار حالت اتصال به وجود آمده است. اتصال برشی که از به هم پیوستن ترک‌های برشی داخلی به وجود می‌آید، اتصال برشی- کششی که در آن ابتدا ترک‌های برشی داخلی رشد می‌کنند و سپس این ترک‌ها با مکانیسم کشش به هم متصل می‌شوند، اتصال کششی- برشی که در آن ترک کششی داخلی هر یک از ترک‌های اصلی به ترک برشی ترک اصلی دیگر متصل می‌شود و اتصال کششی که دو ترک اصلی از رسیدن ترک کششی داخلی یکی به قسمت میانی دیگری به وجود می‌آید. در جدول ۲ حالت اتصال نمونه‌های مختلف با شیب خط واصل متغیر نشان داده شده است. چهار حالت مختلف اتصال ترک‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

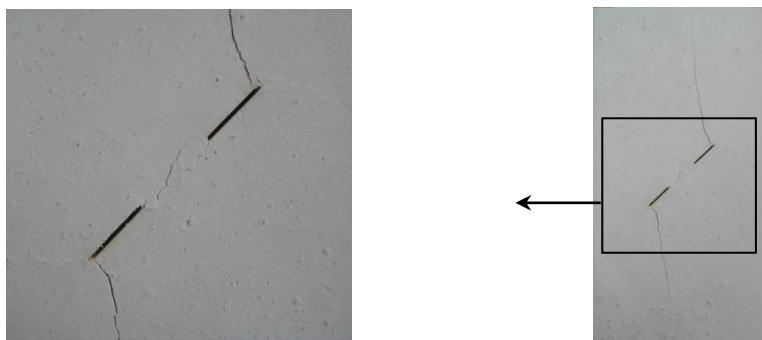
ارزیابی نتایج کمی مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش شیب خط واصل، مقدار بار لازم برای اتصال ترک‌ها افزایش می‌یابد ولی تغییرات بار منجر به گسیختگی نمونه برای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک روند خاصی ندارد. دلیل این مساله این است که بعد از اتصال ترک‌ها، ترک‌های کششی منشعب از نوک خارجی ترک‌ها به طور ناپایدار رشد کرده و به مرزهای بالایی و پایینی نمونه می‌رسند. بعد از این مرحله نمونه به دو تکه تبدیل می‌شود ولی هر یک از این دو تکه و مجموعه آنها هنوز بار تحمل می‌کنند. از آنجائیکه به ازای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک، هندسه دو تکه نمونه در نمونه‌های مختلف متفاوت است، بنابراین بار گسیختگی نمونه‌ها نیز متفاوت و تغییرات آنها منظم نیست.

ناپایدار ترک‌های کششی خارجی) و همچنین بار نهایی گسیختگی هر نمونه از روی نمودار تنش- کرنش مربوطه ثبت گردید.

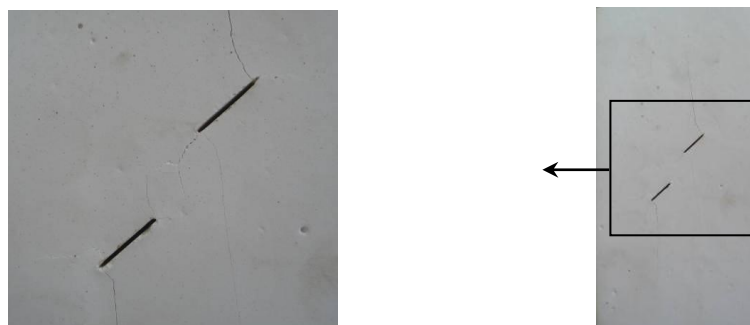
برای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک این مقادیر در جدول ۱ درج شده است. نتایج ثبت شده در جدول مذکور نشان می‌دهد که با افزایش شیب خط واصل، مقدار بار لازم برای اتصال ترک‌ها افزایش می‌یابد ولی تغییرات بار منجر به گسیختگی نمونه‌ها برای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک از روند خاصی پیروی نمی‌کند.

۶- ارزیابی نتایج

ارزیابی نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مختلف حاوی دو ترک شیب‌دار با شیب ۴۵ درجه، طول ۱۵ میلی‌متر، طول خط واصل ۲۰ میلی‌متر و شیب خط واصل متغیر، نشان می‌دهد که شیب خط واصل دو ترک در انتشار و اتصال ترک‌ها تاثیر بسزایی داشته و الگوی انتشار و اتصال ترک‌ها را کنترل می‌کند. بررسی نتایج آزمایش نمونه‌ها نشان می‌دهد وقتی نمونه حاوی ترک شیب‌دار تحت بار فشاری تک محوری قرار می‌گیرد ابتدا از نوک اصلی منشعب می‌شوند و سپس از نوک ترک اصلی، ترک‌های برشی در امتداد خود ترک و یا با زاویه مشخص نسبت به آن منشعب می‌شوند. در نمونه حاوی دو ترک شیب‌دار، در نوک ترک‌ها تمرکز تنش به وجود می‌آید. مکانیسم انتشار و اتصال ترک‌ها، تابع اندرکنش میدان تنش‌ها در نوک داخلی ترک‌ها است. میدان تنش‌ها و مکانیسم اتصال ترک‌ها به آرایش ترک‌ها (شیب خط واصل دو



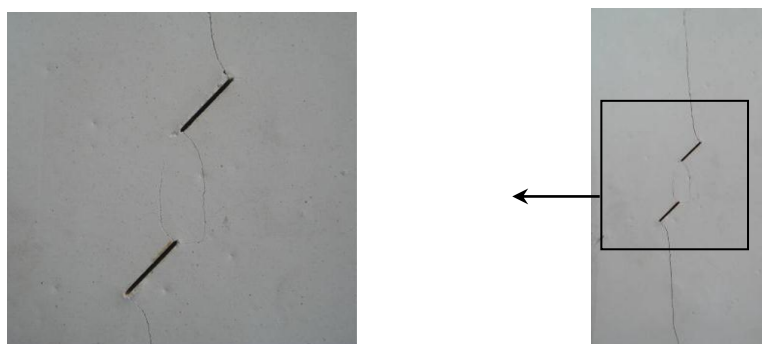
شکل ۷- رشد ترک‌های کششی و برشی از نوک ترک‌ها و اتصال برشی در نمونه حاوی دو ترک با شیب خط واصل ۴۵ درجه



شکل ۸- رشد ترک‌های کششی و برشی از نوک ترک‌ها و اتصال برشی- کششی در نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه



شکل ۹- رشد ترک‌های کششی و برشی از نوک ترک‌ها و اتصال برشی- کششی در نمونه با شیب خط واصل ۷۵ درجه



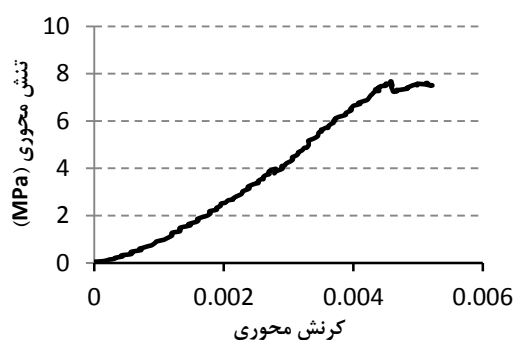
شکل ۱۰- رشد ترک‌های کششی و برشی از نوک ترک‌ها و اتصال کششی- برشی در نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه



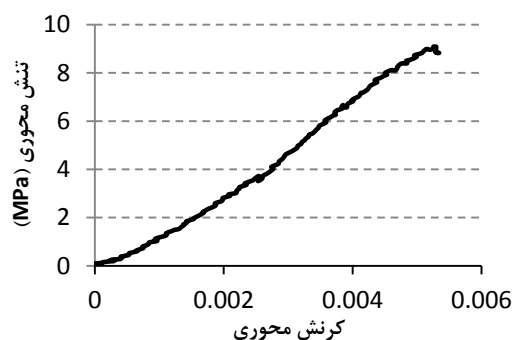
شکل ۱۱- رشد ترک‌های کششی از نوک ترک‌ها و اتصال کششی- برشی در نمونه حاوی دو ترک با شیب خط واصل ۱۰۵ درجه



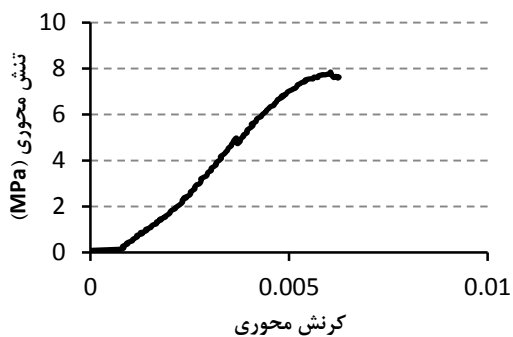
شکل ۱۲- رشد ترک‌های کششی از نوک ترک‌های اصلی و اتصال کششی دو ترک در نمونه با شیب خط واصل ۱۲۰ درجه



(ب) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۶۰ درجه



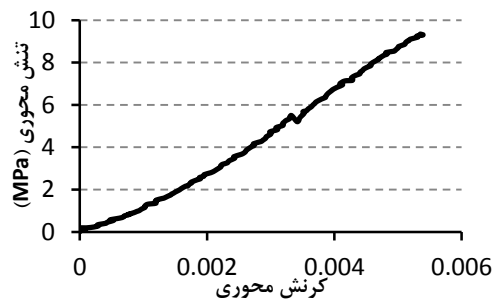
(الف) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۴۵ درجه



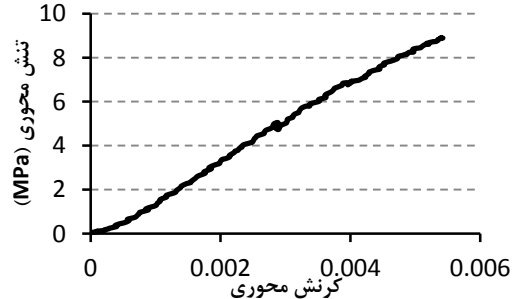
(د) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۹۰ درجه



(ج) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۷۵ درجه

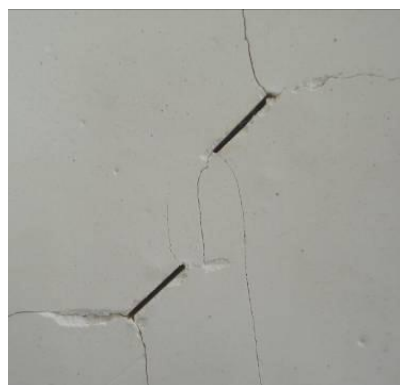


(و) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۱۲۰ درجه



(ه) نمودار نمونه با شیب خط واصل ۱۰۵ درجه

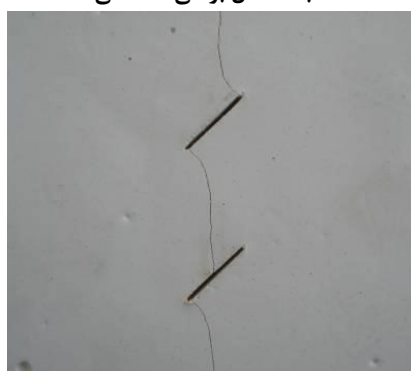
شکل ۱۳- نمودار تنش - کرنش نمونه‌های بارگذاری شده



(ب) اتصال برشی-کششی



(الف) اتصال برشی



(د) اتصال کششی



(ج) اتصال کششی-برشی

شکل ۱۴- حالت‌های مختلف اتصال ترک‌ها در نمونه‌های حاوی دو ترک با شیب ۴۵ درجه،

جدول ۱- بار شروع ناپایدار رشد ترک‌ها و بار گسیختگی نمونه برای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک

شیب خط واصل (درجه)	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
بار اتصال ترک‌ها (MPa)	۳/۷۲	۳/۹۲	۴/۳	۴/۹۷	۵/۱۲	۵/۴۹
بار گسیختگی نمونه (MPa)	۹/۱	۷/۷	۸	۷/۸۴	۸/۹	۹/۲

جدول ۲- حالت اتصال نمونه‌های حاوی دو ترک شیب‌دار با شیب خط واصل متغیر

شیب خط واصل (درجه)	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۰۵	۱۲۰
حالت اتصال	برشی	برشی-کششی	برشی-کششی	کششی-برشی	کششی-برشی	کششی

۷- نتیجه‌گیری

دو ترک شیب‌دار با طول ثابت ۱۵ میلی‌متر، شیب ثابت ۴۵ درجه، طول خط واصل ثابت ۲۰ میلی‌متر و شیب خط واصل متغیر تهیه شد و تحت بار فشاری تک محوره قرار گرفت و رفتار شکست نمونه‌ها ثبت و مطالعه گردید. نتایج آزمایش‌ها

در این مطالعه تاثیر آرایش ترک‌ها در رفتار شکست و مکانیسم انتشار و اتصال ترک‌ها در نمونه‌های گچی حاوی دو ترک شیب‌دار بررسی شد. برای این منظور نمونه‌هایی حاوی

- numerical rock fracture mechanics. *Int J Solids Struct* 43: 1669–1692.
- [10] Kemeny J (2005) Time-dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities. *Rock Mech Rock Sci* 42: 35–46.
- [11] Yang L, Jiang Y, Li B, Li S, Gao Y (2012) Application of the expanded distinct element method for the study of crack growth in rock-like materials under uniaxial compression. *Front. Struct Civ Eng* 6(2): 121–131.
- [12] Wu Z, Wong LNY (2012) Frictional crack initiation and propagation analysis using the numerical manifold method. *Comput and Geotech* 39: 38–53.
- [13] Zhang XP, Wong LNY (2012) Cracking Processes in Rock-Like Material Containing a Single Flaw Under Uniaxial Compression: A Numerical Study Based on Parallel Bonded-Particle Model Approach. *Rock Mech Rock Eng* 45: 711–737.
- [14] Ingraffea AR, Heuze FE (1980) Finite element models for rock fracture mechanics. *Int J Num Anal Methods Geomech* 4: 25–43.
- [15] Yang SQ (2011) Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure. *Eng Fract Mech* 78: 3059–3081.
- [16] Yang SQ, Jing HW (2011) Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression. *Int J Fract* 168:227–250.
- [17] Yang SQ, Dai YH, Han LJ, Jin ZQ (2009) Experimental study on mechanical behavior of brittle marble samples containing different flaws under uniaxial compression. *Eng Fract Mech* 76: 1833–1845.
- [18] Wong LNY, Einstein HH (2009) Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci* 46: 239–249.
- [19] Shen B (1993) Mechanics of fractures and intervening bridges in hard rock. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Division of Engineering Geology.
- [20] Sagong M, Bobet A (2002) Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci* 39: 229–241.
- [21] Mirzaei H, Kakaie R, Jalali SME, Shariati M, Hassani B (2010) Experimental investigation of crack propagation and coalescence in rock-like materials under uniaxial compression. *Eurock 2010*, Taylor & Francis Group, London.
- نشان می‌دهد وقتی نمونه حاوی ترک شیب‌دار تحت بار فشاری تک محوری قرار می‌گیرد ابتدا از نوک ترک، ترک‌های کششی در راستای عمود بر امتداد ترک اصلی منشعب می‌شوند و سپس از نوک ترک اصلی، ترک‌های برشی در امتداد خود ترک و یا با زاویه مشخص نسبت به آن منشعب می‌شوند. در نمونه حاوی دو ترک شیب‌دار، مکانیسم انتشار و اتصال ترک‌ها به آرایش ترک‌ها (شیب خط واصل دو ترک) وابسته است. بسته به مقدار شیب خط واصل دو ترک، چهار حالت اتصال برشی، برشی-کششی، کششی-برشی و کششی به وجود می‌آید. ارزیابی تنش متناظر با اتصال و گسیختگی نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شیب خط واصل، مقدار بار لازم برای اتصال ترک‌ها افزایش می‌یابد ولی تغییرات بار منجر به گسیختگی نمونه برای مقادیر مختلف شیب خط واصل دو ترک از روند خاصی برخوردار نیست.

مراجع

- [1] Kachanov M (1994) Elastic solids with many cracks and related problems. *Advances in Applied Mechanics*, Academic Press: 256–426.
- [2] Kachanov M (2003) On the problems of crack interactions and crack coalescence. *Int J Fract* 120: 537–543.
- [3] Tasdemir MA, Maji AK and Shah SP (1990) Crack propagation in concrete under compression. *J Eng Mech* 116(5): 1058–1076.
- [4] Reyes O, Einstein HH (1991) Failure mechanism of fractured rock - A fracture coalescence model. *Proc 7th International Congress of Rock Mechanics* 1: 333–340.
- [5] Li H, Wong LNY (2012) Influence of flaw inclination angle and loading condition on crack initiation and propagation. *Int J Solids Struct* 49: 2482–2499.
- [6] Bobet A, Einstein HH (1998) Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material. *Int J Fract* 92: 221–252.
- [7] Vasarhelyi B, Bobet A (2000) Modeling of Crack Initiation, Propagation and Coalescence in Uniaxial Compression. *Rock Mech Rock Eng* 33(2): 119–139.
- [8] Dobroskok A, Ghassemi A and Linkov A (2005) Extended structural criterion for numerical simulation of crack propagation and coalescence under compressive loads. *Int J Fract* 133: 223–246.
- [9] Fatehi M M, HosseiniNasab H, Kohsary AH (2006) On the uses of special crack tip elements in

- [25] Park CH, Bobet A (2010) Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression. *Eng Fract Mech* 77: 2727–2748.
- [26] Yang SQ, Jiang YZ, Xu WY, Chen XQ (2008) Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression. *Int J Solids Struct* 45:4796–4819.
- [27] Tang CA, Lin P, Wong RHC, Chau KT (2001) Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws Part II: numerical approach. *Int J Rock Mech Min Sci* 38: 925–939.
- [22] Wong RHC, Chau KT, Tang, CA, Lin P (2001) Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I. experimental approach. *Int J Rock Mech Min Sci* 38: 909–924.
- [23] Lee H, Jeon S (2011) An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression. *Int J Solids Struct* 48: 979–999.
- [24] Park CH, Bobet A (2007) Crack initiation and propagation from frictional fractures. *Proc. of first Canada-US rock mechanics symposium, Vancouver, Rotterdam: Balkema: 557–564.*