

## بررسی رفتار برشی سنگ دارای ناپیوستگی ساخته شده توسط چاچگر سه‌بعدی

محمد عبدالملکی<sup>۱</sup>؛ حمیدرضا نجاتی<sup>۲\*</sup>؛ مرتضی احمدی<sup>۳</sup>

۱- فارغ‌التحصیل مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

(\*) نویسنده مسئول: [h.nejati@modare.ac.ir](mailto:h.nejati@modare.ac.ir)

### چکیده

وجود ناپیوستگی مانند درزه بر رفتار سنگ تأثیر دارد و در نتیجه پایداری سازه‌های ساخته شده در توده سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا مشخص شدن رفتار توده سنگ برای طراحی در آن مهم است. انجام آزمونهای برجا مناسب‌ترین روش برای تخمین خواص مکانیکی توده سنگ است، اما انجام این آزمایش‌ها هزینه‌بر و وقت‌گیر است. لذا محققین اقدام به ساخت نمونه توده سنگ در آزمایشگاه نموده‌اند. در سالهای اخیر از فناوری پرینت سه‌بعدی برای ساخت نمونه سنگ درزه‌دار بهره گرفته شده است. هدف از انجام این تحقیق مطالعه رفتار برشی نمونه‌های شبه سنگی دارای درزه ساخته شده توسط پرینتر سه‌بعدی است. دو دسته درزه توسط پرینتر سه‌بعدی با ماده پلی وینیل الکل ساخته شد. سپس این شبکه درون قالب مکعبی قرار داده شد و با دوغاب سیمانی پر شد تا نمونه مکعبی دارای دو دسته ناپیوستگی ساخته شود. استفاده از مواد پلی وینیل الکل برای ساخت درزه‌ها عملکرد مناسبی داشته به طوری که پس از گیرش سیمان به راحتی این مواد توسط آب حل می‌شوند. آزمایش برشی مستقیم بر روی نمونه‌های توصیف شده به عنوان نمونه توده سنگ و سنگ بکر انجام شد. نمونه‌های دارای سیستم ناپیوستگی در چهار زاویه صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه ساخته شد. در مجموع تعداد ۱۵ نمونه ساخته شد که سه نمونه آن برای سنگ بکر و مابقی برای نمونه دارای ناپیوستگی است. آزمایش برش مستقیم تحت تنشهای نرمال مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که فناوری چاچگر سه‌بعدی قادر به تهیه نمونه شبه سنگی (بتن) دارای شبکه ناپیوستگی بوده و با توجه به اینکه ماده پلی وینیل الکل در آب حل می‌شود، هیچ‌گونه اثری بر روی پارامترهای برشی نمونه‌ها ندارد. مقایسه نتایج آزمایش برش روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی مشخص نمود که با تغییر زاویه اعمال نیروی برشی (سطح برش) با سیستم ناپیوستگی مقاومت برشی تغییر و رفتار شکست شکننده‌تر می‌شود. میزان چسبندگی نمونه دارای سیستم ناپیوستگی ارتباط مستقیمی با جهت درزه و سطح برش دارد، بدین ترتیب که هم‌راستا بودن سطح برش با امتداد ناپیوستگی موجب کاهش چسبندگی خواهد شد.

پرینت سه‌بعدی، نمونه سنگ دارای ناپیوستگی، سیستم ناپیوستگی، آزمایش برش مستقیم و مقاومت برشی.

### واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

است. به دلیل وجود ناپیوستگی، خواص مکانیکی توده سنگ کاهش می‌یابد و انتشار و توسعه ناپیوستگی‌ها در نهایت منجر به شکست سنگ می‌شود [۱-۴]. ناپیوستگی در نمونه سنگ

در مهندسی سنگ، یکی از بزرگترین مشکلات وجود ناپیوستگی (گسل، درزه، شکستگی، ترک، صفحات لایه‌بندی)

نمونه یکسان تولید نموده تا آزمایش‌ها بتوانند تکرار شوند و نتایج قابل قبولتری بدست آید [۱۹-۲۲].

از مواد چاپی مانند پلی لاکتیک اسید (PLA)<sup>۱</sup>، رزین، پودر گچ مانند و پودر ماسه برای ساخت نمونه‌های سنگی استفاده شده است [۲۳-۲۷]. معمولاً مواد سنگی عموماً با مقاومت بالا و شکننده می‌باشند. با این حال، از منظر مواد چاپی مورد استفاده در حال حاضر، نتایج تجربی مقاومت کم و شکل‌پذیری بالا را نشان داده است که متفاوت از مواد سنگ واقعی است. بنابراین، برای استفاده از چاپگر سه‌بعدی در تحقیقات مکانیک سنگ، غلبه بر این مشکلات ضروری است. برای حل این مشکل، ژو، جیانگ و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۲۱ اثر ضخامت لایه چاپ را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ مانند با پودر ماسه بررسی کردند [۲۸]. این مطالعه نشان داد که افزایش ضخامت لایه از ۰/۲ به ۰/۴ میلی‌متر منجر به کاهش وزن، چگالی، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیک نمونه‌ها می‌شود. فرشته‌نژاد و سانگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۶ به بررسی فناوری خواص مواد چاپگر لایه پودری پرداختند و بهبود خواص مکانیکی چاپگرهای سه‌بعدی پودری برای کاربردهای مکانیک سنگ را بررسی کردند [۲۹]. مشخص شد که مقاومت فشاری تک‌محوری و رفتار تنش-کرنش نمونه‌های ساخته شده با چاپگر سه‌بعدی را می‌توان با افزایش ضخامت لایه چاپ، غلظت بایندر (*Binder*) و فرآیند گرمایش تحت تأثیر قرار داد. لازم به ذکر است ماده بایندر یک ماده متصل‌کننده مایع برای پیوست دادن مواد اولیه که به صورت ذرات پودر می‌باشند، استفاده می‌شود. سپس لایه‌های مواد برای ایجاد یک جسم به یکدیگر متصل می‌شوند.

جیانگ و ژائو<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۵ تأثیر تغییرات ساختاری (ساختار دانه‌ای و ساختار پولکی) را بر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان داد که پلی-لاکتیک اسید مورد استفاده به‌عنوان ماده چاپ *FDM*<sup>۵</sup> برای مدل‌سازی مستقیم سنگ‌ها مناسب نیست [۳۰]. واگلر، والش و همکاران<sup>۶</sup> در سال ۲۰۱۷ از فناوری چاپگر سه‌بعدی برای

تأثیر قابل توجهی بر مقاومت و الگوی شکست ماکروسکوپی دارد، لذا این ناپیوستگی بر پایداری سازه‌های حفر شده در توده سنگ تأثیر می‌گذارد [۵-۷].

روش‌های اصلی در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ تحلیلی فیزیکی و مدل‌سازی عددی است. آزمونهای آزمایشگاهی به‌عنوان یک روش مهم می‌تواند رفتار و خواص مکانیکی سنگ را مشخص نموده و در مطالعه پایداری سازه‌های سنگی و تأیید مدل‌های عددی استفاده شود [۸-۱۲]. به‌طور کلی، دو روش برای بدست آوردن نمونه‌های آزمایشی وجود دارد: نمونه‌های سنگ واقعی و نمونه‌های ساخته شده (مصنوعی) از مواد یکسان. نمونه‌های سنگ واقعی معمولاً در منطقه خاص که در آن پارامترهای مکانیکی توده سنگ باید در محل یکسان باشد، تهیه می‌شوند. به دلیل ناهمگونی و ناهمسانگردی سنگ طبیعی، حتی نمونه‌های سنگی بدست‌آمده روی همان توده سنگ نیز دارای تفاوت‌های زیادی در خواص مکانیکی هستند. تولید دو نمونه یکسان غیرممکن است. علاوه بر این آزمونهای آزمایشگاهی (فشارشی، برشی، ضربه‌ای) عمدتاً آزمایش‌های مخرب هستند که انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ را در یک سطح یا شرایط بارگذاری در یک‌زمان غیرممکن می‌سازد و منجر به پراکندگی و تکرار ناپذیری آزمایش می‌شود.

با توجه به محدودیت‌های نمونه سنگ واقعی، روش ساخت نمونه مصنوعی مشابه سنگ توسط محققان مورد مطالعه است. ساخت نمونه مصنوعی معمولاً از روش ریختن مواد گچی و سیمانی در قالب می‌باشد.

گسترش سریع فناوری ساخت جسم سه‌بعدی (*3DP*)<sup>۱</sup>، منجر به توسعه این تکنیک به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین برای ساخت نمونه مصنوعی شده است [۱۳-۱۵].

در سال‌های اخیر تحقیقات در خصوص فناوری چاپگر سه‌بعدی در زمینه مکانیک سنگ انجام شده است. چاپگر سه‌بعدی روش جدیدی برای شبیه‌سازی فیزیکی سنگ درزه‌دار می‌باشد. چاپگر سه‌بعدی قادر به تکرار درزه در نمونه مصنوعی می‌باشد [۱۶-۱۸]. این فناوری می‌تواند چندین

<sup>1</sup> 3D Printing

<sup>2</sup> Polylactic Acid (PLA)

<sup>3</sup> Xu, Jiang et al.

<sup>4</sup> Fereshtenejad and Song

<sup>5</sup> Jiang and Zhao

<sup>6</sup> Fused Deposition Modeling

<sup>7</sup> Vogler, Walsh et al.

با سخت شدن سریع سولفوآلومینات تهیه شد.

### ۱-۱- ضرورت تحقیق

خصوصیات مکانیکی سنگ بسیار مهم است. این خصوصیات وابسته به نقاط ضعف سنگ است که درزه‌ها، ناپیوستگی‌ها و صفحات لایه‌بندی می‌باشد. از طرفی بررسی پارامترهای مکانیکی توده سنگ نیازمند آزمایش‌های متعدد و مختلفی می‌باشد که برای نیل به این هدف داشتن نمونه‌های سنگی با هندسه کاملاً مشابه امری ضروری است. چالش اصلی در اندازه‌گیری مقاومت برشی و همچنین محاسبه خصوصیات و پارامترهای مکانیکی توده سنگ اینست که دسترسی به نمونه‌های مختلف با هندسه ناپیوستگی یکسان در طبیعت عملاً ممکن نیست، لذا ناگزیر به استفاده از مدل‌سازی ناپیوستگی‌های سنگ خواهیم بود. ساخت نمونه‌های فیزیکی کاملاً مشابه، یکی دیگر از چالش‌های موجود در این زمینه می‌باشد، چراکه خطای انسانی باعث تغییرات زیادی در نمونه می‌شود. بنابراین لازم است روشی برای ساخت نمونه‌های کاملاً مشابه معرفی شود.

### ۱-۲- هدف تحقیق

با توجه به کاستی‌هایی که در زمینه مدل‌سازی فیزیکی توده سنگ وجود دارد، در این تحقیق، هدف ابداع روشی برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در سنگ به صورت فیزیکی و با استفاده از تکنولوژی روز دنیا بوده است. تاکنون روش‌های متعدد و ارزشمندی برای مدل‌سازی توده سنگ به صورت فیزیکی انجام گرفته که ساده سازی‌های فراوانی در این رابطه انجام شده و هیچکدام از روش‌های کار شده نتوانسته به صورت واقعی توده سنگ را مدل نمایند و یا محدودیت‌هایی در زمینه هندسه ناپیوستگی وجود داشته است؛ بنابراین در تحقیق حاضر هدف ساخته نمونه شبه‌سنگی دارای تعدد ناپیوستگی بوده تا نسبت به نمونه‌های ساخته شده موجود نقصان کمتری داشته باشد.

### ۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا وضعیت تحقیقاتی آزمایش‌های مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های درزدار بررسی و مورد بحث

ساخت دو نمونه با اندازه ذرات مختلف استفاده کردند و آن‌ها را با سه نوع نمونه ماسه سنگ طبیعی مقایسه کردند [۳۱]. نمونه‌های چاپ سه‌بعدی از نظر زبری، مقاومت کششی و فرآیند شکست بسیار شبیه به ضعیف‌ترین نمونه‌های ماسه‌سنگی بودند. ژو و زو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۷ نمونه‌های تهیه شده توسط چاپگر را با کنتراست *FDM* و *SLA*<sup>۲</sup> از طریق آزمون‌های فشارشی تک‌محوری و دیسک برزلی مقایسه و آنالیز کردند [۳۲]. مشخص شد که نمونه‌های تهیه شده با فناوری *SLA* تردتر و برای شبیه‌سازی سنگ سخت مناسب هستند.

با ظهور و پیشرفت فناوری چاپگر سه‌بعدی، مدل‌سازی جامد از سازه‌های پیچیده به تدریج امکان‌پذیر شده است. جو و شیآ<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) نمونه فیزیکی از زغال سنگ طبیعی دارای درزه‌های پیچیده تهیه نمودند و تأثیر شکستگی‌ها را بر مقاومت، تغییر شکل و تمرکز تنش زغال سنگ بررسی نمودند. آن‌ها اظهار داشتند و چاپگر سه‌بعدی روشی امیدوارکننده برای شبیه‌سازی نمونه شبه‌سنگی بوده و نقش مهمی در ارتقای پیشرفت تحقیقات مکانیک سنگ دارد [۳۳]. بنابراین، فناوری چاپگر سه‌بعدی کاربرد گسترده‌ای در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ دارد.

در حال حاضر، محققان از قالب‌های چاپ شده سه‌بعدی برای انجام تحقیقات بر روی شبکه‌های شکستگی پیچیده استفاده کرده‌اند. وانگ، لیو و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۲۲ روشی را برای تهیه مدل‌های شبکه شکستگی با اشکال هندسی مختلف بر اساس فناوری چاپگر سه‌بعدی ارائه کرده و آزمایش‌های تک‌محوری فشارشی را برای مدل *RDFN*<sup>۵</sup> (شبکه شکست گسسته زبر)، مدل *DFN*<sup>۶</sup> خطی (شبکه شکست گسسته) و مدل جامد با اندازه‌های نمونه مختلف انجام دادند [۳۴]. اثر اندازه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این روش یک مدل شبکه شکستگی سه‌بعدی را توسط شبکه شکست دوبعدی ایجاد می‌نماید. مدل درزه توسط یک چاپگر سه‌بعدی با پلاستیک پلیمری *PLA* به عنوان ماده و مدل مشابهی از توده سنگ درزه‌دار توسط مدل ریخته‌گری سیمان

<sup>1</sup> Zhou and Zhu

<sup>2</sup> StereoLithography Additive manufacturing

<sup>3</sup> Ju, Xie et al.

<sup>4</sup> Wang, Liu et al.

<sup>5</sup> Rough Discrete Fracture Network (RDFN)

<sup>6</sup> Discrete Fracture Network (DFN)

لازم به ذکر است که یکی از محدودیت‌های این تکنیک درزه‌های جدا شده (درزه‌هایی که با دیگر درزه‌ها ارتباط ندارند و به صورت منفرد هستند) یا توده سنگی با چگالی درزه کم (تعداد درزه‌های اندک) است که در این حالت استفاده از چاپگر سه‌بعدی دشوار است. چندین پایه نگهداری برای چاپ قطعات جدا شده مورد نیاز است که ممکن است بر رفتار مکانیکی نمونه‌های چاپ شده تأثیر بگذارد [۳۴].

فایل‌های دارای فرمت *STL* در چاپگر سه‌بعدی وارد می‌شوند. ضخامت مدل چاپ شده توسط قابلیت وضوح یا دقت نازل دستگاه چاپگر سه‌بعدی کنترل می‌شود. دقت دستگاه ۰/۱ میلی‌متر است که توسط موتور پله‌ای کنترل می‌شود. اگرچه ضخامت حداقل ۰/۱ میلی‌متر را می‌توان انتخاب کرد، اما چاپ موفقیت‌آمیز مدل درزه دشوار است. در این تحقیق ضخامت لایه موثر پس از چندین بار سعی ۰/۳ میلی‌متر تعیین شد. روش چاپ تجهیزات بر اساس مدل‌سازی رسوب ذوب شده (*FDM*) بود. پلی‌وینیل الکل یا *PVA*<sup>۱</sup> که در بخش ۴ شرح داده خواهد شد، به‌عنوان ماده چاپ استفاده شد. ماده *PVA* تا نقطه ذوب خود گرم شده و از طریق یک نازل به یک رشته نازک تبدیل می‌شود.

### ۳- تهیه فایل جی‌کد<sup>۲</sup>

جی‌کد یک زبان برنامه‌نویسی کنترلی عددی است که توسط سیستم‌های کامپیوتری برای ارتباط با پرینتر سه‌بعدی بکار می‌رود. با استفاده از جی‌کد یک کامپیوتر می‌تواند حرکت اکسترودر چاپگر سه‌بعدی را در زمان، مکان و چگونگی آن در طول فرآیند پرینت کنترل نماید.

### ۳-۱- نرم‌افزار اسلایسر<sup>۳</sup>

اسلایسر یک نرم‌افزار کامپیوتری است که در ساخت افزایشی و مشخصاً پرینت سه‌بعدی استفاده می‌شود. وظیفه‌ی اسلایسر این است که یک مدل سه‌بعدی را به دستورالعمل‌های قابل فهم برای پرینتر سه‌بعدی تبدیل کند.

نرم‌افزار اسلایسر به‌طور کلی برای همه زیرتکنولوژی‌های پرینتر سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اسلایسرهای پرینتر سه‌بعدی به‌طور کلی مدل سه‌بعدی را به فرمت *STL* و

قرار خواهد گرفت. سپس، فناوری چاپگر سه‌بعدی و وضعیت کاربرد آن در مهندسی سنگ به‌طور جامع از سه جنبه روش‌شناسی چاپ، مدل چاپ و مواد چاپ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این مطالعه به توسعه آینده استفاده از چاپگر سه‌بعدی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در چالش‌های حل‌نشده مکانیک سنگ کمک خواهد نمود.

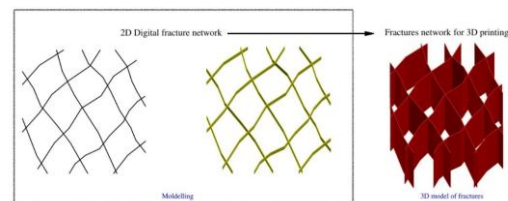
### ۲- تهیه نمونه دارای ناپیوستگی

برای تهیه نمونه سه‌بعدی شبکه ناپیوستگی ابتدا لازم است تا مدل دوبعدی از شبکه ساخته شده و در ادامه به مدل سه‌بعدی تبدیل شود.

۱. ابتدا یک تصویر دیجیتالی از مدل شبکه شکستگی با استفاده از نرم‌افزار اتوکید همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، ساخته می‌شود. سپس تصویر اثر درزه‌ها صفحه *XY* گسترش می‌یابد. لازم به ذکر است که عرض هر اثر باید تا حد امکان نازک باشد. با این حال، دقت سیستم چاپگر سه‌بعدی نیز باید در نظر گرفته شود.

۲. پس از کشیده شدن اثر درزه در جهت *Z*، مدل سه‌بعدی درزه ایجاد می‌شود (شکل ۱). مدل دیجیتال سه‌بعدی به‌صورت فایل *STL*\* خروجی گرفته می‌شود و سپس می‌تواند به نرم‌افزار که در بخش ۳-۱ توضیح داده می‌شود، وارد شود، جایی که مدل سه‌بعدی را می‌توان به لایه‌های نازک زیادی تقسیم کرد.

۳. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پس از برش مدل سه‌بعدی دیجیتال، مدل درزه چاپ شده با چاپ سه‌بعدی می‌تواند بوجود آید (در بخش ۳-۱ توضیح داده می‌شود).

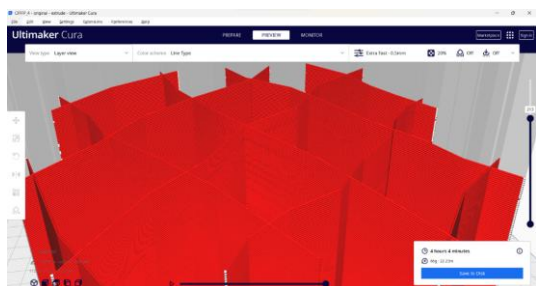


شکل ۱- تکنیک ایجاد مدل شبکه شکستگی با استفاده از چاپ سه‌بعدی.

<sup>۱</sup> Polyvinyl Alcohol (PVA)

<sup>۲</sup> G-Code

<sup>۳</sup> Slicer



شکل ۴- تبدیل مدل شبکه ناپیوستگی به لایه‌های متعدد در نرم افزار اسلایسر.

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد و در شکل ۴ نیز نشان داده شده، مدل به لایه‌های متعددی تقسیم شده که می‌توان توسط نرم‌افزار نحوه چاپ هر کدام از لایه‌ها، زمان مورد نیاز برای چاپ مدل و موارد دیگر را بررسی نمود و در صورت نیاز آن‌ها را تغییر داد. پس از اتمام کار لازم است فایل جی‌کد برای دستگاه پرینتر ذخیره شود.

#### ۴- مواد مورد استفاده و مشخصات فنی برای ایجاد ناپیوستگی

پلی‌وینیل‌الکل یا *PVA*، یک پلیمر محلول در آب است. *PVA* یک پلیمر مصنوعی بی‌رنگ و بدون بو است که دارای خواص زیست‌سازگاری قابل‌توجهی است. بزرگ‌ترین مزیت رشته *PVA* این است که در آب حل می‌شود، بنابراین می‌توان با قرار دادن قطعه پرینت شده در آب، ساپورت‌های چسبیده به قطعه اصلی را در طی چند ساعت از بین برد.

##### ۴-۱- ویژگی‌ها و کاربردهای فیلامنت پرینتر

##### سه‌بعدی *PVA*

انعطاف‌پذیر، نرم و قابل حل بوده و در برابر خستگی مکانیکی مقاوم می‌باشد. به‌عنوان ماده ساپورت برای فیلامنت *PLA* و *ABS*<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شرکت سازنده می‌تواند برای هر دو فیلامنت یا یکی از آن‌ها قابل استفاده باشد. همان‌طور که ذکر شد کاربرد عمده فیلامنت *PVA* به‌عنوان ساپورت بوده که در این تحقیق از خاصیت حلال بودن این فیلامنت استفاده شده و برای اولین بار در زمینه مکانیک سنگ و ساخت مدل ناپیوستگی از این نوع فیلامنت استفاده شده است.

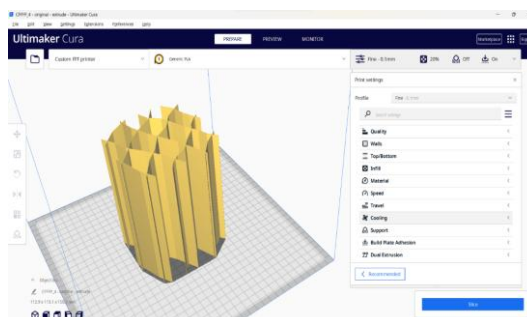
یا *OBJ* دریافت می‌کنند و سپس خروجی را به فرمت جی‌کد به کاربر ارائه می‌دهند.

وظیفه‌ی اصلی اسلایسرهای این است که خروجی یک نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی مانند *CAD* را دریافت کنند و آنرا بصورت لایه به لایه برای پرینتر سه‌بعدی تعریف می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر نرم‌افزار اسلایسر در وهله‌ی اول مدل سه‌بعدی را به مقاطع دوطبقه تقسیم نموده تا پرینتر سه‌بعدی بتواند این مقاطع را به ترتیب بسازد (شکل ۲).



شکل ۲- مراحل ساخت نمونه از مرحله طراحی تا اجرا توسط پرینتر سه‌بعدی.

در شکل ۳ محیط نرم‌افزار اسلایسر نمایش داده شده است که مدل طراحی سه‌بعدی وارد نرم‌افزار شده و تنظیمات مربوطه بر آن اعمال می‌شود.



شکل ۳- نمایشی از نرم‌افزار اسلایسر *Cura*.

محیط نرم‌افزار از بخش‌های مختلفی تشکیل شده که پس از اعمال تنظیمات موردنظر، نرم‌افزار عملیات اسلایسر را انجام داده که در شکل ۴ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene

پارامترهای مکانیکی ترکیب مورد استفاده، هم‌زمان با ساخت نمونه فیزیکی دارای شبکه ناپیوستگی، نمونه‌های استوانه‌ای جهت انجام آزمون‌های تک‌محوره و سه‌محوره با قطر ۵۴ میلی‌متر در قالب‌های استوانه‌ای پلی‌آمید ساخته شد (شکل ۸). همه نمونه‌ها در دما و رطوبت ثابت برای مدت ۲۸ روز نگهداری شدند تا به مقاومت نهایی خود برسند.



شکل ۶- قرار دادن شبکه ناپیوستگی ساخته شده با چاپگر سه‌بعدی در قالب فلزی.

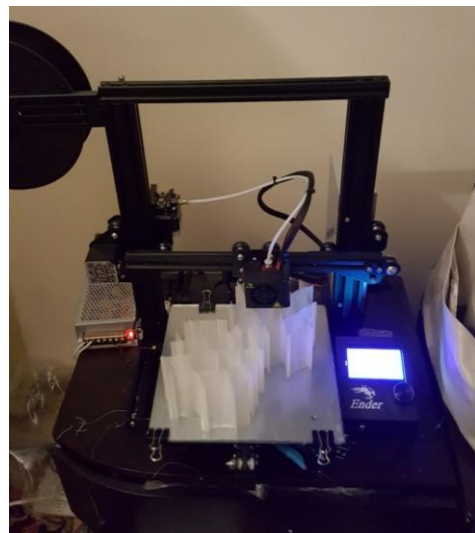


شکل ۷- نمونه‌های ساخته شده سنگ دارای شبکه درزه.

## ۵- چاپ مدل شبکه ناپیوستگی

پس از طراحی مدل دیجیتالی و تبدیل آن به فایل جی‌کد، مدل فیزیکی شبکه ناپیوستگی توسط پرینتر سه‌بعدی با مواد توضیح داده شده ساخته می‌شود. در شکل ۵ نمای ساخت مدل فیزیکی شبکه ناپیوستگی توسط پرینتر سه‌بعدی ملاحظه می‌شود.

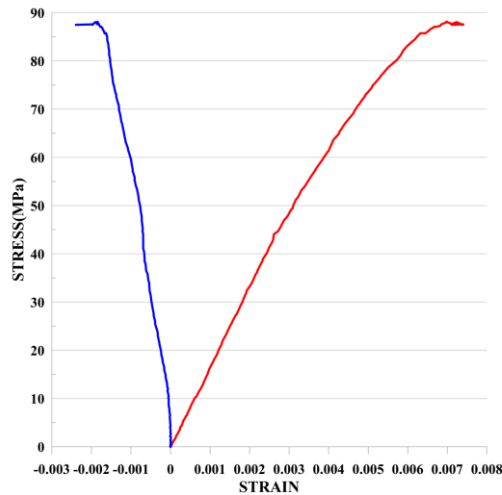
با توجه به جنس فیلامنت مورد استفاده و همچنین ضخامت ناپیوستگی، باید سرعت چاپ مدل به نحوی انتخاب شود تا در حین چاپ، مدل دچار تغییر شکل و شکستگی نشود. لازم به ذکر است زمان پرینت هر کدام از مدل‌ها با ابعاد نامبرده شده حدود ۱۲ ساعت بوده که در هر مرحله تعداد دو مدل به صورت هم‌زمان ساخته شده است که این قابلیت یکی از مزایای پرینتر سه‌بعدی می‌باشد.



شکل ۵- نمای پرینتر سه‌بعدی در حال ساخت شبکه ناپیوستگی.

## ۶- ساخت نمونه مصنوعی توده سنگ

پس از اتمام چاپ (ساختن) مدل‌های شبکه ناپیوستگی، مدل‌ها در قالب‌های فلزی به ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متری که از قبل تمیز شده و توسط افشانه لایه نازکی از روغن بر روی سطوح داخلی قالب قرار داده شده تا پس از گیرش دوغاب، نمونه به راحتی از قالب جدا شود (شکل ۶) سپس دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان  $0/4$  پر می‌شود. پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند (شکل ۷). برای دستیابی به



شکل ۹- نمودار تنش- کرنش یکی از آزمون‌های فشارشی تک‌محوره.



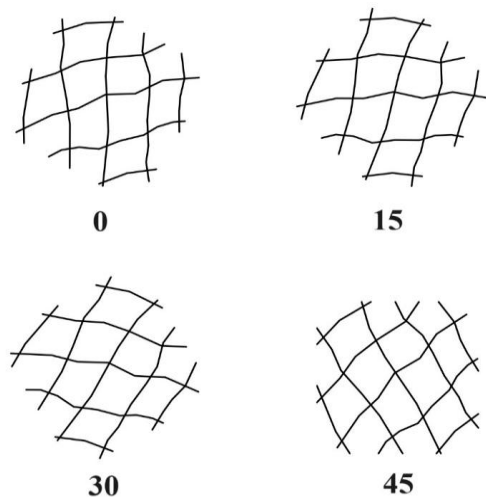
شکل ۸- نمونه‌های استوانه‌ای شبه سنگی.

در مجموع ۱۵ نمونه برشی قالب‌گیری و آزمایش برش مستقیم بر روی آن‌ها انجام شد. ابعاد قالب  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر می‌باشد. پارامترهای متغیر در این آزمایش‌ها، تنش نرمال و زاویه قرارگیری درزه‌ها بوده است. زاویه قرارگیری مدل شبکه ناپیوستگی درون قالب در زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه بوده و برای هر زاویه سه نمونه مشابه ساخته شد و سه نمونه مدل بکر نیز قالب‌گیری شد (شکل ۱۰).

بر روی نمونه‌های استوانه‌ای (۵۴ میلی‌متر قطر و ۱۰۸ میلی‌متر طول) آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی برای بدست آوردن خواص مکانیکی نمونه ساخته شده انجام شد. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ نتایج آزمون‌های تک‌محوره و سه‌محوره

مشخصات	اندازه
مقاومت فشارشی تک‌محوره (MPa)	۷۴/۲
نسبت پواسون	۰/۳
چسبندگی (MPa)	۱۱/۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۵۷
مقاومت کششی (MPa)	۷/۱۲
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۶/۳
مدول دگرشکل‌پذیری (GPa)	۱۵۷/۴
وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )	۲۰۸۷



شکل ۱۰- زاویه قرارگیری شبکه ناپیوستگی در قالب.

نمودار تنش-کرنش یکی از آزمون‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

## ۷- آزمایش برش مستقیم

مطالعه آزمایشگاهی مقاومت برشی شبکه شکستگی سنگ درزه‌دار تحت شرایط تنش نرمال ثابت با استفاده از تجهیزات برش مستقیم آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس طبق استاندارد *ISRM* انجام شده است. تجهیزات شامل یک چهارچوب فولادی سخت است که بر روی آن دو عدد جک به صورت عمود بر هم قرار گرفته است که نمونه در آن قرار می‌گیرد. بار برشی توسط یکی از جک‌های هیدرولیکی از طریق یک پمپ اعمال می‌شود همچنین بار نرمال نیز توسط جک دیگر و پمپ مجزا به نمونه وارد می‌شود (شکل ۱۱).



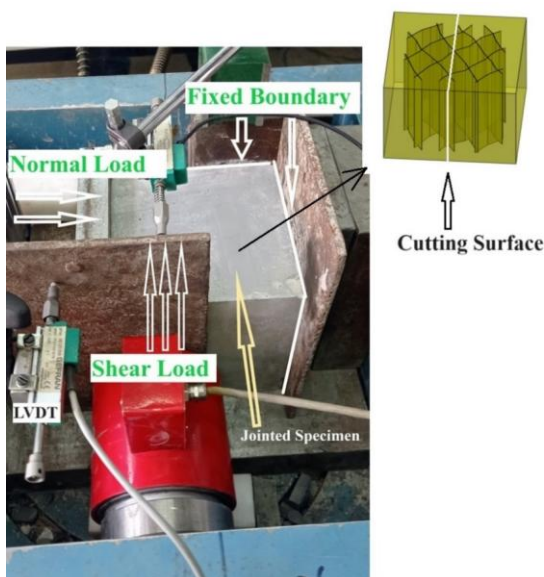
شکل ۱۱- مجموعه آزمایش برش مستقیم.

داده می‌شود. در طول آزمایش برش این سیستم داده‌ها را در هر  $0.3$  ثانیه جمع‌آوری و ثبت می‌نماید. تنش‌های نرمال اعمالی بر هر یک از نمونه‌ها  $8/8$ ،  $17/5$  و  $25$  کیلو پاسکال بودند. پس از شکست نمونه، بار برشی قطع شده و بار نرمال از روی نمونه‌ها برداشته می‌شود. نحوه قرارگیری نمونه دارای زاویه  $45$  درجه در مجموعه آزمایش در شکل ۱۲ ارائه شده است.

## ۸- تجزیه و تحلیل

### ۸-۱- رفتار برشی مستقیم

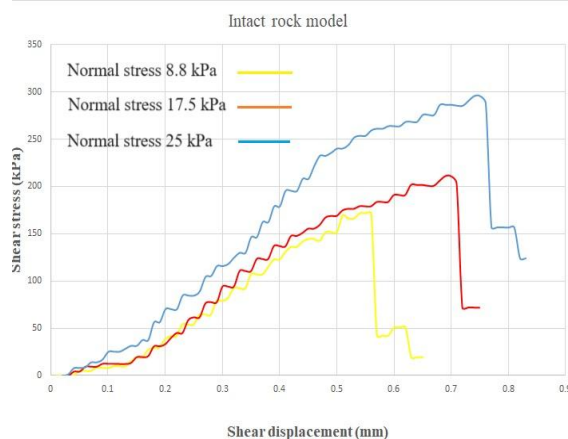
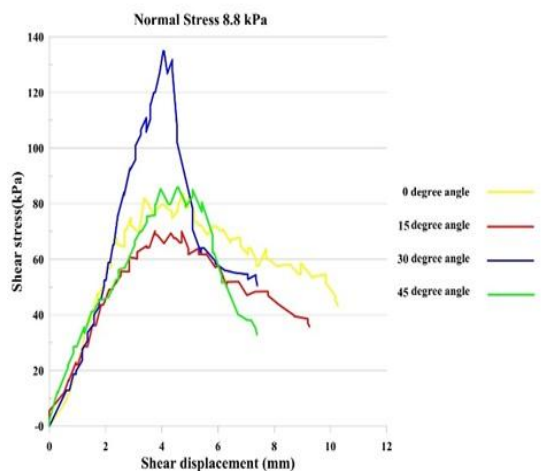
به منظور درک اثر ناپیوستگی در نمونه، چهار نمونه ناپیوستگی با زوایای ناپیوستگی مختلف و همچنین نمونه سنگ بکر ساخته شده و آزمایش برشی مستقیم انجام شد.



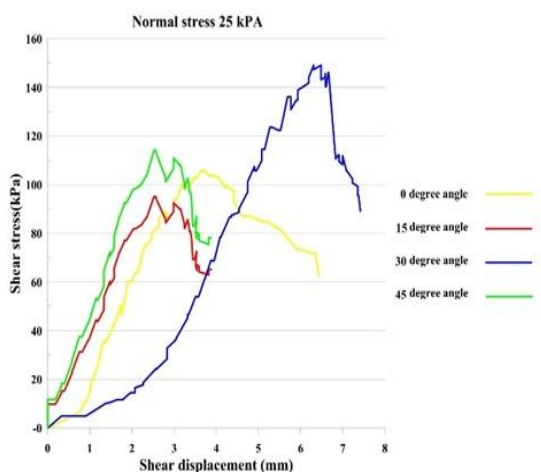
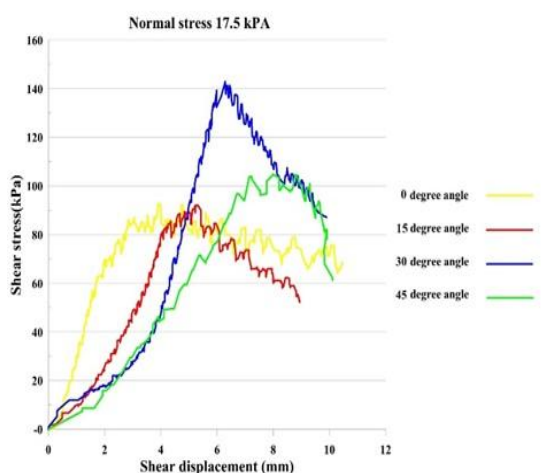
شکل ۱۲- آزمایش برشی مستقیم و نمونه سنگی درزه‌دار با زاویه  $45$  درجه.

در شکل ۱۳ منحنی‌های جابجایی-تنش برشی برای نمونه سنگ بکر نشان داده شده است؛ سه نمونه با تنش‌های نرمال  $8/8$ ،  $17/5$  و  $25$  کیلو پاسکال تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند.

بار برشی اعمالی با استفاده از یک نیروسنج (با ظرفیت  $500$  کیلو نیوتن و دقت  $10$  نیوتن) اندازه‌گیری می‌شود. درحالی‌که نصف بلوک در جای خود ثابت است، نیروی برشی به نیمه دیگر بلوک وارد می‌شود و همچنین نیروی قائم اعمالی نیز به صورت عمود بر نیروی برشی به بلوک اعمال می‌شود. سرعت جابجایی برشی در تمام آزمایش‌ها یکنواخت و معادل  $0.075$  میلی‌متر بر ثانیه بوده است. پس از قرارگیری نمونه‌ها درون جعبه برش جزئیات اندازه‌گیری جابجایی توسط دو *LVDT* عمودی (با دقت  $0.01$  میلی‌متر) قرار گرفته بر روی نمونه ثبت می‌شوند. پس از آماده‌سازی آزمایش، بار نرمال به‌طور یکنواخت تا سطح مورد نظر افزایش می‌یابد. درحالی‌که برش اعمال می‌شود، تنش نرمال ثابت می‌ماند. مقادیر بار برشی و جابجایی برشی ثبت شده و توسط یک رایانه مجهز به یک سیستم جمع‌آوری داده و نرم‌افزار *LABVIEW* نمایش



شکل ۱۳- نتایج آزمون برش روی سنگ بکر.



شکل ۱۴- منحنی تنش برشی - تغییر شکل برشی در سه تنش نرمال.

با توجه به شکل ۱۳ تنش نرمال تأثیر زیادی بر مقاومت برشی نمونه دارد؛ همان طور که انتظار می‌رفت رفتار برشی سنگ بکر ترد و شکننده است.

آزمایشها عمدتاً برای مشخص شدن اثر وجود ناپیوستگی متمرکز شده است تا اهمیت وجود درزه آشکار شود. آزمایش برشی مستقیم بر روی نمونه‌های درزه دار مطابق شکل ۱۲ انجام شده است. منحنی‌های تنش برشی-جابجایی برای چهار نوع نمونه سنگ با تنش‌های نرمال مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

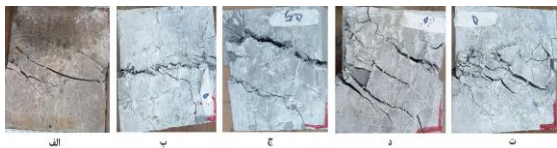
با افزایش تنش نرمال، حداکثر تنش برشی افزایش یافته است. همان طور که انتظار می‌رفت، حداکثر تنش برشی نمونه‌های بکر بیشتر از مدل‌های سنگی درزه دار بوده است. در مرحله پس از اوج، نمونه‌های بکر یک واکنش شکست شکننده را نشان دادند. نمونه‌های سنگ درزه دار با افزایش تنش نرمال رفتار شکل‌پذیر را از خود نشان دادند.

منحنی‌های معمولی تنش برشی-جابجایی برای چهار نوع نمونه سنگ با تنش‌های نرمال مختلف در شکل ۱۵ ارائه شده است.

با توجه به منحنی‌های شکل ۱۵ بیشترین مقاومت برشی مربوط به نمونه دارای شبکه ناپیوستگی با زاویه ۳۰ درجه و تنش نرمال ۲۵ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین نمونه دارای شبکه ناپیوستگی با زاویه ۳۰ درجه در مقایسه با نمونه‌های دیگر با تنش نرمال مشابه دارای مقاومت برشی بیشتری است. دلیل این امر اینست که در زاویه مذکور هر دو سیستم درزه دارای بیشترین زاویه با سطح برش می‌باشند.

## ۲-۸- الگوی شکست نمونه‌ها

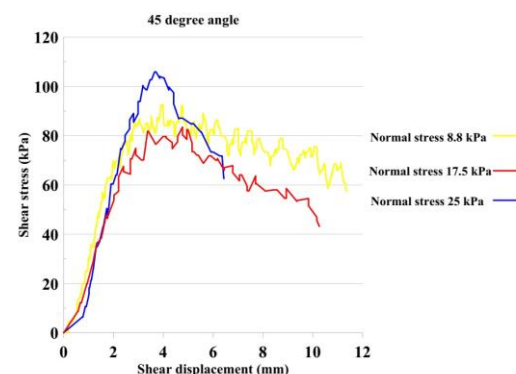
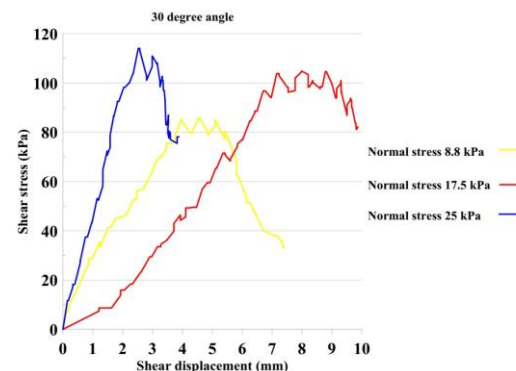
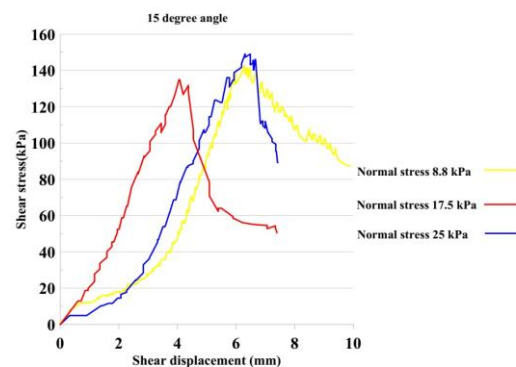
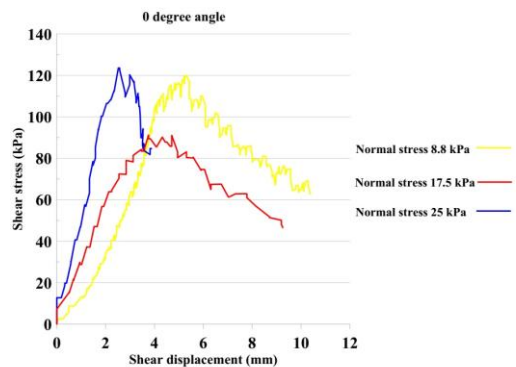
الگوهای شکست پنج نوع نمونه سنگ در شکل ۱۶ ارائه شده است. برای نمونه‌های بکر، صفحات شکست الگوهای نسبتاً منظم و شکست شکننده را ارائه داده که در شکل ۱۶ (الف) ارائه شده است. الگوهای شکست در نمونه‌های سنگی در زردار نسبتاً پیچیده بوده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ (ب الی ت) نشان داده شده است، حضور یک یا دو درزه نقش مهمی در الگوی شکست ایفا می‌نماید.



شکل ۱۶- الگوهای شکست در آزمایش برش مستقیم بر روی پنج نوع نمونه از سنگ درزه‌دار.

آزمایش برش مستقیم برای تعیین پارامترهای برشی نمونه سنگی دارای سطح ناپیوستگی انجام می‌شود. در این آزمایش ابتدا نمونه سنگ تحت تنش قائم معینی قرار گرفته و سپس تنش برشی با سرعت تنظیم شده به نمونه وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود. حداکثر تنش برشی برای یک تنش قائم خاص، مختصات یک نقطه را بدست می‌دهد. آزمایش معمولاً با سه تنش قائم مختلف انجام و بدین ترتیب در دستگاه مختصات تنش برشی-تنش قائم سه نقطه بدست می‌آید. با ترسیم بهترین خط عبور کننده از این نقاط می‌توان پارامترهای برشی نمونه را تعیین نمود. این امر برای نمونه دارای سیستم درزه انجام و در شکل ۱۷ ارائه شده است. در جدول ۲ پارامترهای برشی نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۸ تغییرات چسبندگی نسبت به زاویه سیستم درزه ارائه شده است. در شکل ۱۹ نیز این تغییرات برای زاویه اصطکاک داخلی ارائه شده است.

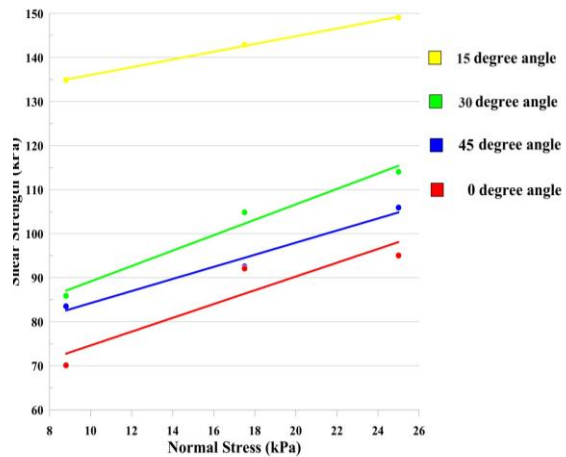
طبق معادلات خط موجود در نمودار شکل ۱۷ پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به هر کدام از نمونه‌ها را می‌توان محاسبه نمود که در جدول ۲ این پارامترها ارائه شده است.



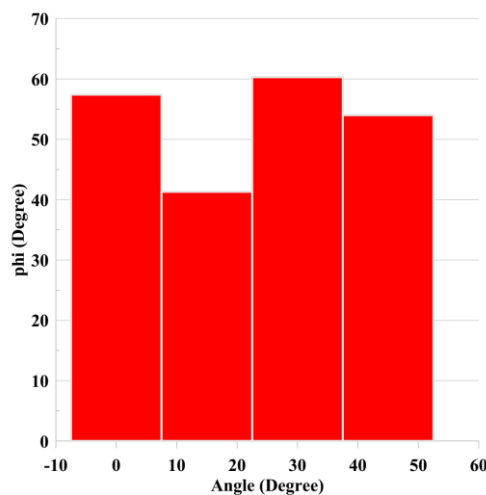
شکل ۱۵- منحنی‌های تنش برشی-جابجایی نمونه‌های مختلف توده سنگ بر اساس زاویه سیستم ناپیوستگی.

به عبارت دیگر هنگامی که درزه‌ها در امتداد سطح برش قرار دارند، میزان چسبندگی کاهش یافته و هرچه امتداد سیستم ناپیوستگی نسبت به سطح برش دارای زاویه بیشتری باشد، میزان چسبندگی افزایش می‌یابد.

چسبندگی توده سنگ به طور واضح وابسته به زاویه و جهت صفحه برش با امتداد درزه‌ها دارد. به‌ویژه، زمانیکه صفحه برش با امتداد درزه‌ها هم‌راستا باشد، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در چسبندگی نمونه مشاهده می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که در طراحی سازه‌های مهندسی در محیط‌های دارای ناپیوستگی، توجه به جهت‌داری درزه‌ها برای پیش‌بینی رفتار توده سنگ ضروری است.



شکل ۱۷- نمودار تعیین پارامترهای برشی نمونه‌ها.



شکل ۱۹- تغییرات زاویه اصطکاک نسبت به زاویه درزه.

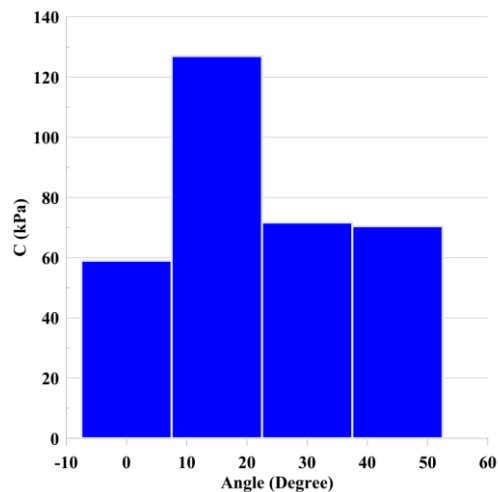
روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نسبت به زاویه ناپیوستگی‌ها در نمونه نشان می‌دهد که روند تغییرات زاویه اصطکاک ابتدا کاهشی بوده و سپس افزایش یافته است. به عبارت دیگر هنگامی که درزه‌ها در امتداد سطح برش قرار گیرند میزان زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته و هرچه امتداد سیستم درزه یا نسبت به سطح برش دارای زاویه باشند، میزان زاویه اصطکاک داخلی کاهش خواهد یافت.

### ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآیند ساخت نمونه سنگ دارای ناپیوستگی توسط چاپگر سه بعدی بررسی شد. بدین منظور مطالعه زیادی بر روی انواع چاپگرهای سه بعدی انجام شد.

جدول ۲- پارامترهای برشی نمونه‌ها.

زاویه (درجه)	$C(kPa)$	$\phi^\circ$
صفر	۵۹	۵۷/۴
۱۵	۱۲۷	۴۱/۳
۳۰	۷۱/۷	۶۰/۳
۴۵	۷۰/۵	۵۴



شکل ۱۸- تغییرات چسبندگی نسبت به زاویه درزه.

با توجه به روند تغییرات چسبندگی نسبت به زاویه ناپیوستگی در نمونه ملاحظه می‌شود که روند تغییرات چسبندگی ابتدا افزایشی بوده و سپس کاهش یافته است.

سطح برش باشد، الگوی شکست نمونه از الگوی شکست سنگ بکر تبعیت می‌نماید. با بیشتر شدن زاویه بین امتداد ناپیوستگی و سطح برش، الگوی شکست در نمونه سستیستم ناپیوستگی در امتداد آثار ناپیوستگی می‌باشد. (۵) مقدار چسبندگی سطوح لغزش دارای ناپیوستگی ناممتد کمتر از چسبندگی سنگ بکر و بیشتر از چسبندگی سطح ناپیوستگی می‌باشد.

سپس مدل دیجیتالی از شبکه شکستگی در کامپیوتر طراحی شد. از مواد قابل‌حل در آب برای ساخت سیستم ناپیوستگی استفاده شد. نمونه‌های سنگ که دارای دو دسته درزه عمود برهم بودند ساخته شد. با تغییر زاویه دو دسته درزه چهار نوع نمونه سنگ درزه‌دار تهیه شد. بر روی نمونه‌ها آزمون برشی انجام شد. نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارت است از:

(۱) ساخت شبکه ناپیوستگی با PVA راهکار مناسبی برای ساخت نمونه می‌باشد، چراکه هم‌زمان با عمل‌آوری نمونه در استخر آب، شبکه درزه ساخته شده در آب حل شده و از بین می‌رود بدین ترتیب مواد یاد شده هیچ تاثیری در آزمون‌های مکانیک سنگ نخواهد داشت.

(۲) مقایسه نتایج آزمایش برش روی نمونه‌های دارای ناپیوستگی مشخص نمود که با تغییر زاویه اعمال نیروی برشی (سطح برش) با سیستم ناپیوستگی مقاومت برشی و رفتار شکست شکننده‌تری تغییر می‌یابد.

(۳) میزان چسبندگی نمونه شبه سنگی دارای سستیستم ناپیوستگی ارتباط مستقیمی با جهت ناپیوستگی و سطح برش دارد، بدین ترتیب که هم‌راستا بودن سطح برش با امتداد درزه یا درزه‌ها موجب کاهش چسبندگی خواهد شد و بالعکس.

(۴) هرچه امتداد ناپیوستگی‌ها در نمونه درزه‌دار هم‌راستای

## ۱۰- منابع

- Bai, Q., C. Zhang, and R. Paul Young, *Using true-triaxial stress path to simulate excavation-induced rock damage: a case study*. International Journal of Coal Science & Technology, 2022. **9**(1): p. 49.
- Cao, R.-h., et al., *Mechanical behavior of brittle rock-like specimens with pre-existing fissures under uniaxial loading: experimental studies and particle mechanics approach*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016. **49**: p. 763-783.
- Fan, W., et al., *Experimental and numerical investigation on crack mechanism of folded flawed rock-like material under uniaxial compression*. Engineering Geology, 2021. **291**: p. 106210.
- Sainoki, A., et al., *Quantitative energy-based evaluation of the intensity of mining-induced seismic activity in a fractured rock mass*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019. **52**: p. 4651-4667.
- He, P., et al., *Discontinuous deformation analysis of super section tunnel surrounding rock stability based on joint distribution simulation*. Computers and Geotechnics, 2017. **91**: p. 218-229.
- Yang, S.-Q., et al., *A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China*. Engineering Geology, 2017. **217**: p. 89-101.
- Zhao, J.-J., Y. Zhang, and P. Ranjith, *Numerical modelling of blast-induced fractures in coal masses under high in-situ stresses*. Engineering Fracture Mechanics, 2020. **225**: p. 106749.
- Bachmann, D., S. Bouissou, and A. Chemenda, *Influence of weathering and pre-existing large scale fractures on gravitational slope failure: insights from 3-D physical modelling*. Natural hazards and earth system sciences, 2004. **4**(5/6): p. 711-717.
- He, M., et al., *Physical modeling of deep ground excavation in geologically horizontal strata based on infrared thermography*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010. **25**(4): p. 366-376.

10. Song, L., et al., *Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018. **51**: p. 2617-2637.
11. Xia, Y., et al., *Application of 3D printing technology in the mechanical testing of complex structural rock masses*. Geofluids, 2021. **2021**(1): p. 7278131.
12. Zhang, Q., et al., *Physical model test and numerical simulation for the stability analysis of deep gas storage cavern group located in bedded rock salt formation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017. **94**: p. 43-54.
13. Lee, C., et al., *Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts*. Journal of materials processing technology, 2007. **187**: p. 627-630.
14. Rankin, T.M., et al., *Three-dimensional printing surgical instruments: are we there yet?* Journal of Surgical Research, 2014. **189**(2): p. 193-197.
15. Tymrak, B., M. Kreiger, and J.M. Pearce, *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. Materials & Design, 2014. **58**: p. 242-246.
16. Bourke, M., et al., *Innovative applications of laser scanning and rapid prototype printing to rock breakdown experiments*. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2008. **33**(10): p. 1614-1621.
17. Suzuki, A., et al., *Fracture network created by 3-D printer and its validation using CT images*. Water Resources Research, 2017. **53**(7): p. 6330-6339.
18. Wu, H., et al., *Size effects in the uniaxial compressive properties of 3D printed models of rocks: An experimental investigation*. International Journal of Coal Science & Technology, 2022. **9**(1): p. 83.
19. Niu, Q., et al., *Application and prospects of 3D printing in physical experiments of rock mass mechanics and engineering: materials, methodologies and models*. International Journal of Coal Science & Technology, 2023. **10**(1): p. 5.
20. Sharafisafa, M., L. Shen, and Q. Xu, *Characterisation of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital image correlation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018. **112**: p. 122-138.
21. Squelch, A., *3D printing rocks for geo-educational, technical, and hobbyist pursuits*. Geosphere, 2018. **14**(1): p. 360-366.
22. Gell, E.M., S.M. Walley, and C.H. Braithwaite, *Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019. **52**: p. 2949-2961.
23. Ju, Y., et al., *Quantification of hidden whole-field stress inside porous geomaterials via three-dimensional printing and photoelastic testing methods*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019. **124**(6): p. 5408-5426.
24. Ju, Y., et al., *Quantitative visualization methods for continuous evolution of three-dimensional discontinuous structures and stress field in subsurface rock mass induced by excavation and construction-an overview*. Engineering Geology, 2020. **265**: p. 105443.
25. Ju, Y., et al., *Quantification of continuous evolution of full-field stress associated with shear deformation of faults using three-dimensional printing and phase-shifting methods*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020. **126**: p. 104187.
26. Ju, Y., et al., *Visualization of the three-dimensional structure and stress field of aggregated concrete materials through 3D printing and frozen-stress techniques*. Construction and Building Materials, 2017. **143**: p. 121-137.
27. Ju, Y., et al., *Experimental visualisation methods for three-dimensional stress fields of porous solids*. Experimental Techniques, 2017. **41**: p. 331-344.
28. Xu, Q., et al., *Effect of layer thickness on the physical and mechanical properties of sand powder 3D printing specimens*. Frontiers in Earth Science, 2021. **9**: p. 763202.
29. Fereshstenejad, S. and J.-J. Song, *Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016. **49**: p. 2065-2074.
30. Jiang, C. and G.-F. Zhao, *A preliminary study of 3D printing on rock mechanics*. Rock Mechanics

- 
- and Rock Engineering, 2015. **48**: p. 1041-1050.
  31. Vogler, D., et al., *A comparison of tensile failure in 3D-printed and natural sandstone*. Engineering Geology, 2017. **226**: p. 221-235.
  32. Zhou, T. and J. Zhu, *An experimental investigation of tensile fracturing behavior of natural and artificial rocks in static and dynamic Brazilian disc tests*. Procedia engineering, 2017. **191**: p. 992-998.
  33. Ju, Y., et al., *Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology*. Chinese science bulletin, 2014. **59**: p. 5354-5365.
  34. Wang, P., et al., *Shear behavior of synthetic rough jointed rock mass with 3D-printed jointing*. Arabian Journal of Geosciences, 2022. **15**(5): p. 392.



## Investigation of shear behavior of discontinuities rock sample made by 3D printer

M. Abdolmaleki<sup>1</sup>; H. Nejati<sup>2\*</sup>; M. Ahmadi<sup>3</sup>

1- MSc. in Rock Mechanics, Mining Dept., Eng. Faculty, Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

2- Associate Prof., Mining Dept., Eng. Faculty, Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

3- Prof. of Rock Mechanics, Mining Dept., Eng. Faculty, Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

Received: 23 September 2024 Accepted: 14 December 2024

(\*Corresponding author: h.nejati@modare.ac.ir)

### Keywords

3D printing  
Discontinuous rock sample  
Direct shear test  
Shear strength  
Discontinuity system

### Abstract

The stability of structures built within rock masses is heavily influenced by the presence of discontinuities such as joints. These features significantly impact the mechanical behavior of rock, making it essential to understand their effects before designing and constructing such structures. While in-situ testing is the most reliable method for assessing the geomechanical properties of rock masses, it is often costly and time-consuming. To address this challenge, researchers have turned to alternative approaches, such as fabricating synthetic rock mass specimens in laboratory settings.

In recent years, 3D printing technology has gained traction in rock mechanics, allowing for the construction of jointed rock analogues. This study aims to examine the shear behavior of joint networks in rock by creating quasi-rock specimens with

predefined discontinuities using a 3D printer. To achieve this, a network of two joint sets was printed using polyvinyl alcohol (PVA) filament. The printed structure was then placed inside a cubic mold and filled with cement grout, forming a cubic specimen that contained two distinct discontinuity sets.

Direct shear tests were conducted on both intact and jointed specimens. The jointed samples were fabricated with joint orientations of 0°, 15°, 30°, and 45° relative to the shear plane. In total, 15 specimens were prepared—three intact samples and twelve jointed ones. The results demonstrated that 3D printing technology effectively replicates discontinuity networks within synthetic rock (concrete) specimens.

A comparison between the intact and jointed samples revealed notable differences in mechanical behavior. The intact specimens exhibited higher shear strength and brittle failure characteristics, whereas the jointed specimens displayed more ductile responses, particularly under higher normal stresses. The use of polyvinyl alcohol for constructing the discontinuity network proved effective, as the material completely dissolved in water after cement curing, leaving no residual impact on the shear strength parameters of the jointed concrete specimens. Additionally, the orientation of the discontinuities relative to the shear plane had a pronounced effect on cohesion—when the shear plane aligned with the joint sets, cohesion significantly decreased.

### Summary

Discontinuities such as faults, joints, cracks, and bedding planes present one of the biggest challenges in rock engineering. Their presence significantly reduces the geomechanical properties of rock, affecting fracture patterns and the overall strength of rock masses. As a result, they play a crucial role in determining the stability of structures built within these formations. To analyze and address these challenges, rock mechanics and engineering rely on analytical methods, numerical modeling, and laboratory tests. Among these, laboratory testing remains a fundamental approach, providing detailed insights into rock behavior and geomechanical properties. However, due to the inherent heterogeneity and anisotropy of rocks, even samples taken from the same rock mass can exhibit substantial variations in their mechanical characteristics.

The rapid advancement of additive manufacturing technology—commonly known as 3D printing—has led to its growing adoption across multiple scientific fields, including rock mechanics. This technique offers a powerful alternative for research, enabling the precise replication of internal defect structures within rock masses—something that was difficult to achieve



using traditional methods for creating artificial rock samples. A key advantage of 3D printing is its ability to produce identical specimens, facilitating repeated experiments and ensuring more reliable results. Additionally, by accurately controlling the internal structure of test models, it eliminates variations that commonly occur between natural rock samples, making it an ideal approach for physical rock testing.

To create a three-dimensional model of a discontinuity system, the process begins with generating a two-dimensional digital representation, which is then converted into a 3D model. The steps involved in producing a rock sample using 3D printing are as follows:

A digital image of the discontinuities system is created using AutoCAD software, and then adjusted within the program. The joint trace is extended in the Z direction to generate a three-dimensional joint model. The 3D digital model is exported as an .STL file, which can then be imported into specialized software to divide it into thin layers.

Once the digital model is sliced, the discontinuous rock system can be printed using a 3D printer.

#### Introduction

This study focuses on modeling rock discontinuity systems using 3D printing technology to investigate the shear behavior of jointed rock. The research involves conducting rock mechanics tests on synthetic rock samples and determining their shear strength parameters—key factors in designing and evaluating the stability of structures built on or within rock masses.

The shear strength parameters of the 3D-printed synthetic rock samples were obtained through laboratory tests. These values play a crucial role in assessing the stability of excavated structures and informing engineering designs. The research process began with the fabrication of the discontinuity system using a 3D printer, followed by placing the printed structure into a frame and filling it with cement to create the final specimen.

One of the key challenges was selecting a material for the discontinuity system that would not alter the strength properties of the sample. To address this, polyvinyl alcohol (PVA) filament was chosen due to its low strength and ability to dissolve in water. This ensured that the printed discontinuities did not interfere with the shear strength measurements. The synthetic rock specimens were then subjected to direct shear tests, and their shear strength parameters were analyzed.

#### Methodology and Approaches

To investigate the shear behavior of synthetic rock samples, direct shear tests were conducted under constant normal stress conditions at the Rock Mechanics Laboratory of Tarbiat Modares University. The testing setup consisted of a rigid steel frame equipped with two vertically placed jacks to secure the sample. Shear load was applied using a mechanical pump, while another pump exerted the normal load.

Each rock sample measured  $15 \times 15 \times 15$  cm. The shear load was measured using a load cell with a 500 kN capacity and an accuracy of 10 N. During testing, one half of the specimen remained fixed, while shear force was applied to the other half. Simultaneously, normal force was exerted perpendicular to the shear direction. The shear displacement rate was kept constant at 0.075 mm/s across all tests.

Once the samples were positioned in the shear box, displacement measurements were recorded using two LVDTs with an accuracy of 0.001 mm, placed directly on the specimen. Testing began with a gradual increase in normal load until it reached the desired level, at which point the shear force was applied while maintaining constant normal stress. The shear load and shear displacement values were continuously logged by a data acquisition system, which recorded data at 0.3-second intervals and displayed real-time results on a computer monitor.

The applied normal stresses for the tests were 8.8, 17.5, and 25 kPa. Once the shear process was complete, loading ceased, and the normal force was carefully removed from the samples.

#### Results and Conclusions

This research explored the process of producing synthetic rock samples with discontinuity systems using 3D printing technology. Various types of 3D printers were examined to determine their suitability for fabricating rock analogues. A digital model of the discontinuity system was designed using computer software, and water-soluble materials were employed to create the discontinuities. Rock mass samples containing two perpendicular joint sets were produced, with four variations created by adjusting the joint angles. These samples were then subjected to shear testing to evaluate their mechanical behavior.

**PVA as a Discontinuity Material** Using polyvinyl alcohol (PVA) to create the discontinuity system proved to be an effective method for fabricating artificial rock samples. PVA dissolves when exposed to water, ensuring that it does not alter the geomechanical properties of the sample.

**Impact of Discontinuity Orientation on Cohesion** The cohesion of the rock sample was strongly influenced by the relative



orientation of the discontinuity system and the shear surface. When the shear plane aligned with the discontinuities, cohesion decreased significantly, whereas misalignment preserved higher cohesion levels.

**Fracture Patterns and Joint Orientation** The fracture pattern of jointed samples correlated with the alignment of the discontinuity system and the shearing surface. As the angle between the joints and the shear plane increased, the resulting fracture patterns became more aligned with the joint traces.

**Cohesion Differences Between Jointed and Intact Rock** The cohesion of discontinuous joints was found to be lower than that of intact rock but higher than that of continuous jointed systems. This suggests that joint orientation and continuity play a critical role in defining the shear strength of rock masses.

---