

پژوهش‌های بنیادی و کاربردی فناوری چاپ سه بعدی (3DP) در مطالعات میادین نفتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

کد مقاله: ۶۵۵۸۱

مهدی گندم‌گون^{۱*}، محمد حسین گندم‌گون^۲

چکیده

تکنولوژی چاپ سه بعدی (DP۳) یک روش سریع و مقرون به صرفه برای تولید و تکرار طرح‌های پیچیده با حداقل خطا می‌باشد که می‌تواند در اجرای آزمایش‌های تکرار پذیر بدون تخریب نمونه‌های سنگ به کار رود. نمونه‌های چاپ شده می‌توانند جایگزین نمونه‌های سنگی مانند مغزه‌ها و پلاگ‌ها شوند و به طور بالقوه شبیه سازی‌های عددی را تایید و اندازه گیری‌های آزمایشگاهی موجود در مورد تغییرات ویژگی‌های فیزیک سنگی در مقیاس زمان زمین شناسی را تکمیل کنند. هدف از این مقاله بررسی کاربرد بالقوه و توسعه فناوری چاپ سه بعدی (DP۳) برای کاربردهای مهندسی در صنعت نفت می‌باشد که در تحقیقات و آموزش علوم زمین به کار می‌رود، این بررسی با شرح مختصری از مفاهیم و اصول مرتبط با چاپ سه بعدی آغاز می‌شود و سپس کاربرد اصلی تکنولوژی چاپ سه بعدی در بخش‌های مختلف مانند ژئومکانیک و مدل سازی‌های عددی، میکروسیالات و شبیه سازی جریان‌ها، اثرات تغییرات ریز ساختارها در بررسی‌های پتروفیزیکی در طول فرایند دیاژنز شدگی رسوبات، بررسی‌های فیزیک سنگی شرح داده می‌شوند، در ادامه برخی از چشم اندازهای مورد نیاز برای بررسی در آینده نیز پیشنهاد شده‌اند. مروری بر پژوهش‌های منتشر شده از سوی مقالات دانشگاهی، دولتی و صنعتی، جامعه هدف رو به رشدی از کاربردهای چاپ سه بعدی را نشان می‌دهد.

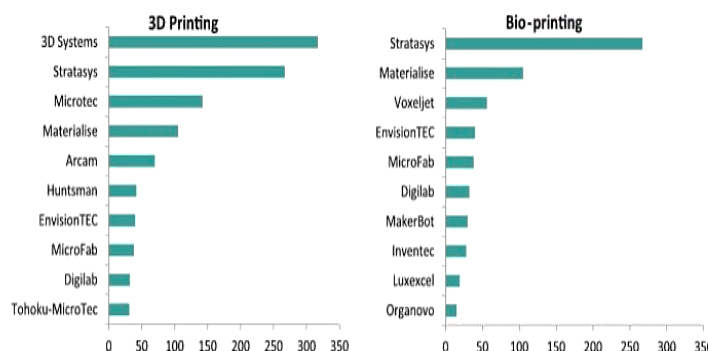
واژگان کلیدی: چاپ سه بعدی (DP۳)، مدل سازی پرینت سه بعدی (ساخت افزودنی)، مدل سازی فیزیک دیجیتال سنگ، شبیه سازی عددی، مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های جایگزین سنگ در چاپ سه بعدی.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه صنعتی سهند تبریز (نویسنده مسئول) mehdi.72.gandomgoon@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه صنعتی سهند تبریز

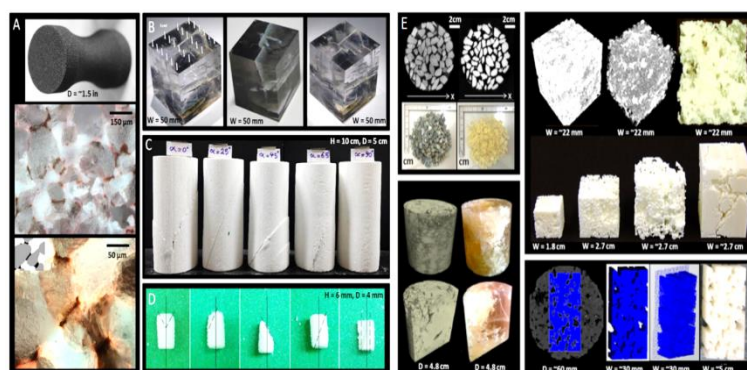
۱- مقدمه

عبارت چاپگر سه بعدی به عنوان تکنولوژی قرن حاضر که طرح‌های دیجیتال را به اشیاء فیزیکی سه بعدی تبدیل می‌کند، مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. بسیاری از متفکران پیشرو در صنعت، دانشگاه و دولت، آینده چاپ سه بعدی را بسیار ارزشمند می‌بینند (شکل ۱). اشیاء چاپ شده سه بعدی توسط چاپگرهای سه بعدی، ابزارهای نمایش دیجیتال و تجسم سازی را تکمیل می‌کنند و یک نمایش فیزیکی از هندسه‌های سه بعدی را فراهم می‌کنند. در حالی که مدل‌های دیجیتال را می‌توان تنها بر روی یک صفحه نمایش مشاهده کرد، یک چاپ سه بعدی را می‌توان با تمام حواس تجربه کرد و از همه مهم‌تر مورد آزمون قرار داد. چاپ سه بعدی راهی برای آزمایش سریع مفاهیم جدید فراهم می‌کند و می‌تواند اشیاء مختلف را در طیف وسیعی از مقیاس‌ها با دقت و تکرار پذیری بالا تولید کند. این قابلیت‌های نمونه‌سازی سریع به کمک مواد ساخت افزودنی، روش‌های مقرون به صرفه را فراهم می‌کند (Cohen D, et al, 2014).

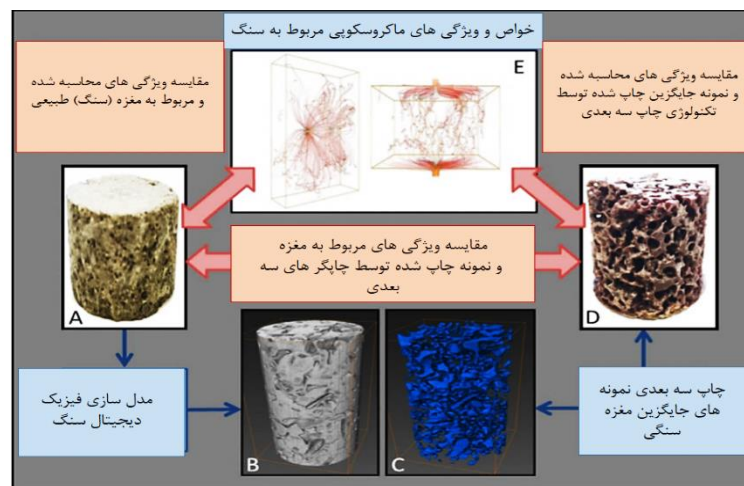


شکل ۱- آمار ثبت اختراع و رشد سریع پیشرفت فناوری چاپ سه بعدی (بر اساس آمار پایگاه علم سنجی تامسون).

همانند چاپگرهای دو بعدی، چاپگرهای سه بعدی تصاویری را در لایه‌ها می‌سازند، در حالی که یک چاپگر دو بعدی یک لایه جوهر بسیار نازک را چاپ می‌کند، یک چاپگر سه بعدی مجموعه‌ای از لایه‌ها را در یک یا چند ماده می‌سازد بنابراین از اصطلاح چاپ در روی کاغذ برای نشان دادن چاپ سه بعدی استفاده می‌شود (Hull CW, 1984). ظهور و پیشرفت سریع انواع چاپگرهای سه بعدی، نرم افزارهای پردازش تصاویر و دسترسی نسبتاً آسان به این منابع، راه‌های جدیدی را برای بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی باز می‌کنند. در این میان، علم زمین‌شناسی آماده استفاده از چاپ سه بعدی برای پر کردن شکاف بین تحلیل‌های محاسباتی و تجربی است. نمونه‌ای از کاربردهای چاپ سه بعدی در پژوهش‌های انجام شده در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نمونه چاپ شده جایگزین مغزه ماسه سنگی (A)، استفاده از چاپ سه بعدی در آزمون‌های ژئومکانیکی برای تجسم هندسه شکست و شدت تنش‌ها (B)، تولید نمونه چاپ سه بعدی جایگزین مغزه توسط ماده اولیه پودر گچ (C)، تاثیر جهت گیری لایه‌ها بر مقاومت فشاری تولید شده توسط فناوری چاپ سه بعدی (D) (Osinga S, et al 2015, Ju Y, et al 2014,)، نمونه‌های سه بعدی چاپ شده جایگزین نمونه‌های اصلی به کمک مدل‌های دیجیتال با استفاده از تصاویر اسکن شده اشعه ایکس (E) (Fereshtenejad S, et al, 2016, Vlasea M, et al, 2015 Matsumura S, et al 2015, Dal Ferro) (E) (μCT) (N, et al, 2015, Otten W, et al, 2012, Funatsu T, et al 2015)



شکل ۳- روند انجام مقایسه ویژگی سنگ های ماکروسکوپی با مدل های دیجیتالی و ویژگی های نمونه های سه بعدی چاپ شده: خواص ماکروسکوپی توسط اندازه گیری های حجمی تعریف می شوند که یک مقدار میانگین فضایی را فراتر از مقیاس میکروسکوپی نشان می دهند و شامل ویژگی های جریان، الکتریکی (مقاومت ویژه)، صوتی سرعت های موج P و S، صوتی، اولتراسونیک و مغناطیسی برای مثال، تشدید رزونانس مغناطیسی هسته ای (NMR) هستند. مثال های ارائه شده از یک نمونه چاپ شده جایگزین پلاگ مغزه که خواص سنگ بر روی آن اندازه گیری می شود در شکل نشان داده شده است، نخست نمونه فیزیکی اسکن شده و یک مدل دیجیتال (B) ایجاد شده و رندرینگ ماتریس سنگ (C) به دست آمده است، سپس مدل ماتریس دیجیتال به عنوان ورودی برای چاپ سه بعدی یک نمونه سنگ (D) استفاده می شود و خواص سنگ چاپ شده اندازه گیری می شوند. به طور موازی، مدل های دیجیتال نیز برای محاسبه خواص سنگ مانند نفوذپذیری استفاده می شوند (E) در نهایت، خواص سنگ طبیعی، خواص سنگ چاپ شده سه بعدی و خواص سنگ محاسبه شده مقایسه می شوند (Ishutov, S).

۲- روش های چاپ سه بعدی

اولین قدم در فناوری چاپ سه بعدی، ساخت مدل سه بعدی دیجیتالی است، این کار معمولاً با استفاده از نرم افزارهای طراحی گرافیکی CAD صورت می پذیرد. همچنین می توان از روش های دیگر ساخت مدل دیجیتال شامل اسکن های سه بعدی و مجموعه تصاویر سی تی اسکن بهره برد. قبل از چاپ سه بعدی نمونه ها، مدل های دیجیتال برای ایجاد قالب های لایه ای برش داده می شوند. مشخصات چاپ تعیین شده شامل ضخامت هر برش، ابعاد عمودی و افقی و سرعت چاپ می باشد، نمونه چاپ شده اغلب نیاز به پرداخت خواهند داشت.

در روش استریولیتوگرافی نمونه طراحی شده برای چاپ با استفاده از یک منبع لیزر UV به صورت لایه به لایه رزین را جامد می کند موادی که در چاپگرهای سه بعدی SLA استفاده می شوند حساس به نور هستند و با قرار گرفتن در معرض نور UV جامد می شوند. تفاوت نمونه های چاپ شده در روش های مختلف چاپ سه بعدی از دو جنبه آشکار می شوند: فناوری نمونه سازی و مواد مورد نیاز برای چاپ (Song L, et al, 2018, Fereshtenejad S, et al, 2016, Liu P, et al, 2016, Mazhar H, et al, 2016, Mitchell MG, 2016).

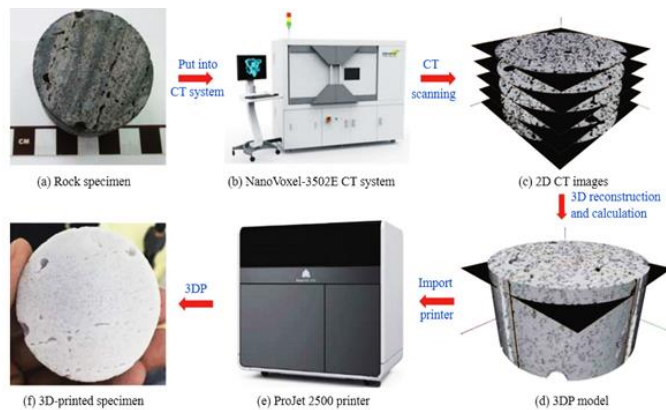
با این حال روش های مختلف دو ویژگی مشترک دارند، که عبارتند از: نمونه سازی لایه به لایه مواد مدل سازی شده (Jiang et al, 2016) و روش های چاپ عمومی که شامل چهار مرحله زیر می توان در نظر گرفت:

(۱) ایجاد یک مدل سنگ هدف برای چاپ سه بعدی طراحی شده توسط نرم افزارهای CAD (Zhou T, 2016, Song L, 2018) یا استخراج شده توسط تصاویر سی تی اسکن (شکل های ۴ و ۵) و سپس تبدیل به مدل سنگ سه بعدی ساخته شده به فرمت STL که توسط اکثر چاپگرهای سه بعدی قابل تشخیص می باشند.

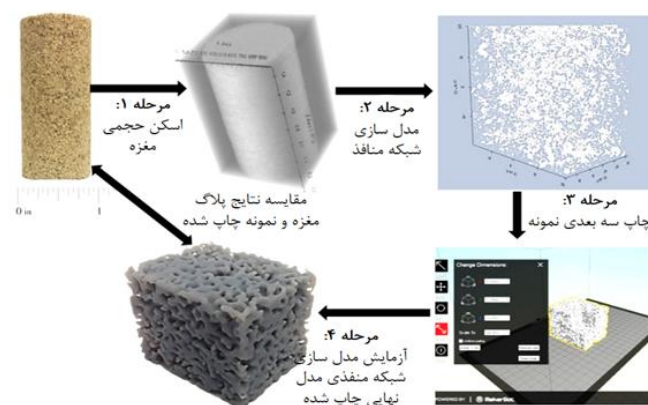
(۲) پردازش مربوط به برش و تنظیم پارامترهای چاپ مناسب شامل ضخامت لایه، نسبت کردن و مسیر خروجی برای چاپگر.

(۳) چاپ مدل اولیه نمونه ایجاد شده جایگزین سنگ هدف را لایه به لایه براساس قوانین عملیاتی.

(۴) اصلاح مدل های چاپ شده جایگزین با استفاده از روش های پرداخت (پس پردازش) مانند پولیش و صاف کردن نمونه های مدل سازی شده، پرتودهی ماورا بنفش (UV) یا حذف مواد پشتیبان که ساختار متخلخل داخلی و عناصر خارجی را در طول چاپ نگه می دارد و از تغییر شکل یا آسیب طرح های پیچیده جلوگیری می نماید.



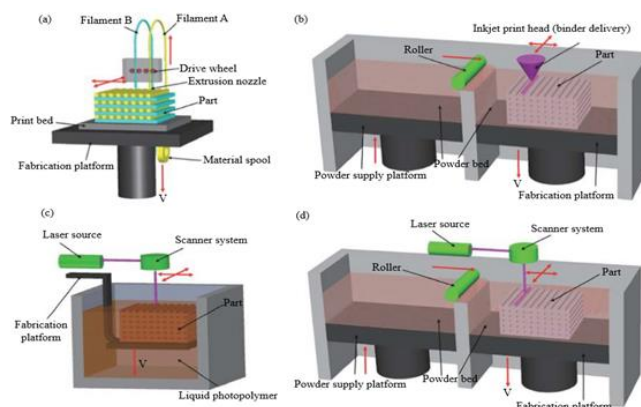
شکل ۴- مراحل ایجاد نمونه‌های ایجاد شده جایگزین نمونه پلاگ مغزه با استفاده از تکنولوژی‌های چاپ سه بعدی همراه با فناوری سی‌تی‌اسکن پلاگ مغزه (Gao YT, et al 2021).



شکل ۵- فلوجارت ایجاد نمونه مشابه از ساختار سنگ مخزن با استفاده از روش چاپ سه بعدی (Ishutov, S).

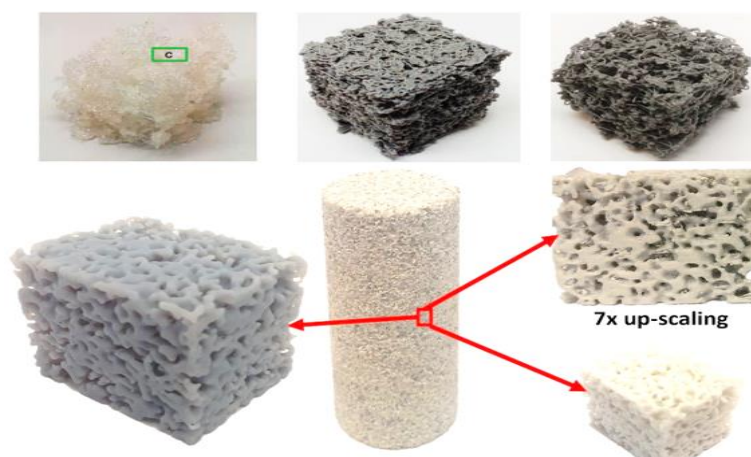
۳- روش‌های چاپ سه بعدی

فناوری چاپ سه بعدی برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در ایالات متحده مطرح شد و به عنوان فناوری نمونه‌سازی سریع شناخته گردید، ابتدا روش دستگاه استریولیتوگرافی (SLA) در سال ۱۹۸۶ معرفی شد که نقطه عطفی در توسعه تکنولوژی چاپ سه بعدی به شمار می‌رفت (Bose S, 2013). از آن زمان تا کنون، تکنولوژی چاپ سه بعدی به سرعت توسعه یافته است. اخیراً، فناوری‌های مختلف چاپ سه بعدی مانند مدل‌سازی رسوبی آمیخته (FDM)، SLA، و ستر لیزری انتخابی (SLS) مورد توجه قرار گرفته است که در جدول ۲ به صورت کامل ویژگی‌ها و کاربردهای مختلف این روش‌ها در تحقیقات مربوط به مهندسی نفت و علوم زمین ارائه شده است. در حال حاضر مواد مختلف برای چاپ سه بعدی موجود در ساخت نمونه سنگ به کار می‌روند (Osinga S, 2015, Ju Y et al, 2014, Fereshtenejad S, et al, 2016, Vlasea M, et al, 2015, Funatsu T, et al, 2008, Li L, et al 2016, Bultreys T, et al 2015, et al). و جدول ۲ چندین نمونه پرینت سه بعدی معمول و در دسترس را نشان می‌دهد. هنگامی که تکنولوژی چاپ سه بعدی در آماده‌سازی نمونه‌های سنگی آزمایشگاهی همانند نمونه‌های ساخته شده جایگزین مغزه استفاده می‌شود، هدایت و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های سنگی طبیعی برای بررسی امکان‌سنجی و اعتبار بالقوه استفاده از مواد چاپ سه بعدی ضروری می‌باشد، از جمله این دلایل تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد مکانیکی نمونه‌های سنگی بر اساس مواد و روش‌های چاپ شده سه بعدی می‌باشد.



شکل ۶- روش شماتیک برای اصل نمونه سازی فناوری های مختلف چاپ سه بعدی: فناوری FDM (a)؛ فناوری 3DP (b)، فناوری SLA (c)؛ فناوری SLS (d) (Wang X, et al 2017).

چاپگرهای سه بعدی می توانند از طیف وسیعی از مواد ساختمانی (پلاستیک، فلزات، رزین، سرامیک، پودر معدنی، کاغذ، بیومواد) استفاده کنند، در حالی که در حال حاضر هیچ ماده در دسترس قادر به تکرار تمام ویژگی های مربوط به سنگ طبیعی به طور همزمان نیست، مواد موجود در دسترس، در یک نمونه چاپ شده جایگزین تاثیر می گذارند. در حال حاضر، مواد را می توان برای یک مدل مشخص براساس مناسب بودن آن ها برای استفاده برای بررسی یک ویژگی منحصر به فرد به طور جداگانه (به عنوان مثال، جریان، الکتریکی، صوتی و مکانیکی) انتخاب کرد. خواص شیمیایی پودرهای معدنی (به عنوان مثال، گچ، سیلیکا و کلسیت) مورد استفاده در نمونه های سنگی چاپ سه بعدی، به سنگ طبیعی نزدیک هستند، اما خواص مکانیکی نمونه های ایجاد شده اغلب ضعیف تر هستند که باید مورد توجه واقع شود.



شکل ۷- نمونه مدل چاپ شده از نمونه پلاگ مغزه ماسه سنگی با استفاده از مواد مختلف (ترموپلاستیک (بیوپلاستیک ها)، گچ، رزین ها) (Ishutov, S).

جدول ۱- انواع روش های چاپ سه بعدی، مراحل آماده سازی نمونه و مواد لازم برای چاپ نمونه ها.

چاپگرهای سه بعدی موجود	مواد مورد استفاده برای چاپ	شماتیک روش	روش های آماده سازی نمونه	مرجع
PLA	PLA	شکل ۶-ا	FDM	Song L, et al 2018
Object Connex 500	رزین	شکل ۶-ج	SLA	Liu P, et al 2016
ZP 450	گچ، ماسه، سرامیک	شکل ۶-ب	3 DP	Zhou T, 2016
Sinter Station 2500	ماسه	شکل ۶-د	SLS	Mazhar H, et 2016
Geological Material 3DP	مواد زمین شناسی	-	Chemical reaction	Mitchell MG, 2016

جدول ۲- نمای کلی از روش‌های چاپ سه بعدی و ویژگی‌های آنها: SLA- چاپگرهای سه بعدی، DLP- پردازش دیجیتال نوری، FDM- مدل‌سازی رسوبی گداخته، FFF- ساخت رشته‌های فیلامنتی ذوب‌شده، DIW/DLW- تولید با استفاده از جوهر/ لیزر مستقیم، SLS- جوشی لیزری انتخابی، SLM- ذوب لیزر، EBM/EBW- ذوب و ساخت قطعات فلزی با استفاده از پرتوی الکترونی، شکل‌دهی شبکه‌ای با لیزر یا لنز، LOM- تولید جسم لایه‌ای، SDL- چندلایه‌ای شدن انتخابی رسوب (Matsumura S, et al, 2015, Gao W, et al 2015, Camisa JA, et al 2014)، روش کلی هر دسته با نماد (*) مشخص شده است.

روش / فناوری	مواد	منبع نیرو	قدرت تفکیک (XY/Z)± دقت، میکرون	حداکثر ابعاد ایجاد نمونه (میلی متر مکعب)	هزینه (دلار آمریکا × 1000)	کاربرد در بخش مهندسی نفت و علوم زمین	قابلیت‌ها	محدودیت‌ها
(پلیمریزاسیون):* DLP و SLA	سرامیک (آلومینا، زیرکونیا)، پلیمر، رزین	نور لیزر فرابنفش	75/25±50	500 × 500 × 600	3-700	۱- ژئومکانیک (مطالعه شکستگی) ۲- انجام آزمایش جریان بر روی ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های کرناته با منافذ بزرگ ۳- ژئومورفولوژی	۱- سرعت بالای ساخت ۲- حداقل یا فاقد مواد با تخلخل ریز	۱- انقباض تحت نور مستقیم ۲- تغییر شکل تحت دما و فشار بالا
(اکستروژن):* FDM FFF جوهر افشان / پلی جت DIW/DLW	پلاستیک، دوغاب سرامیکی، چسب فلز، واکس ژل‌های کلونیدی، سوسپانسیون، مذاب‌های پلیمر، واکس، کمپلکس‌های غلیظ پلی‌الکترولیت	انرژی حرارتی انرژی حرارتی و لیزر	150/25±20 1/0.15±0.5	500 × 500 × 500 85 × 50 × 25	0.5-200 40-3000	۱- ژئومورفولوژی ۲- انجام آزمایش جریان بر روی ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های با اندازه منافذ بزرگ ۳- انجام آزمایش جریان بر روی کرنات‌هایی با منافذ کوچک ۴- مطالعه ریز سیال ۵- مطالعه ریز شکستگی	۱- سرعت بالای ساخت ۲- چاپ چندین ماده ۱- بالاترین قدرت تفکیک ۲- فاقد مواد با تخلخل ریز ۳- سریع‌ترین زمان ساخت	۱- کیفیت پایین سطح ۲- انقباض و تاب‌خوردگی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی پرهزینه‌ترین لوازم و چاپگرهای سه بعدی
(گداختگی):* SLS SLM EBM/EBW لنز	پلیمر، فلز، سرامیک فلز (فولاد، ضدزنگ، کبالت، کروم، تیتانیوم) و پودر سرامیک - پودر فلز مذاب لنز	لیزر با قدرت بالا - پرتوی الکترونی لیزر	150/50±50 200/100±100 100/100±100 25/100±10	330 × 380 × 425 350 × 350 × 400 200 × 200 × 100 91 × 91 × 152	200-750 250-400 130-1500 200-1700	مدل‌هایی از مخزن مدرج که شامل داده‌های لرزه‌ای است سنجش خواص صوتی و الکتریکی مدل‌های سنگ مخزن آزمایش‌های جریان منافذ ۱- انجام آزمایش جریان بر روی ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های کرناته با منافذ بزرگ ۲- آزمایش‌های فیزیک سنگی	۱- مدل‌های چاپ شده سه بعدی که استحکام بالایی دارند مدل‌های چاپ شده سه بعدی که استحکام بالایی دارند مدل‌های چاپ شده سه بعدی که استحکام بالایی دارند ۱- چاپ مواد طبقه‌بندی شده ۲- دقت بالا	۱- مواد با تخلخل ریز ۲- مواد پشتیبانی که در ریزخف‌ها گیر افتاده‌اند هزینه بالای لوازم و چاپگرهای سه بعدی هزینه بالای لوازم و چاپگرهای سه بعدی ۱- هزینه بالای تعمیر قسمت‌های آسیب‌دیده و فرسوده ۲- نیاز به فرآیند پرداخت

۱- دقت پایین ساختارهای درونی	۱- پردازش بالای سطح ۲- هزینه پایین لوازم	ژئومورفولوژی	12-150	800 × 550 × 500	10/100±200	لیزر، تیغه تنگستن	فیلم پلاستیکی، ورقه فلزی، نوار سرامیکی، کاغذ، پلیمر	(روسوب گذاری): SDL و LOM
۲- عدم تولید نمونه های متخلخل								
۱- نیاز به فرآیند پس-پردازشی (پرداخت) چسب	انتخاب گسترده مواد برای چاپ رنگی	۱- مدل هایی از مخزن مدرج که شامل داده های لرزه ای است ۲- ژئومکانیک (مطالعه شکستگی) ۳- ژئومورفولوژی	70-700	350 × 350 × 450	100/50±50	انرژی حرارتی	پودر (سیلیکا، گچ، سرامیک، فلز)	بایندر جتینگ ^۱
۲- مواد پودری با تخلخل ریز و منافذ مسدود شده								

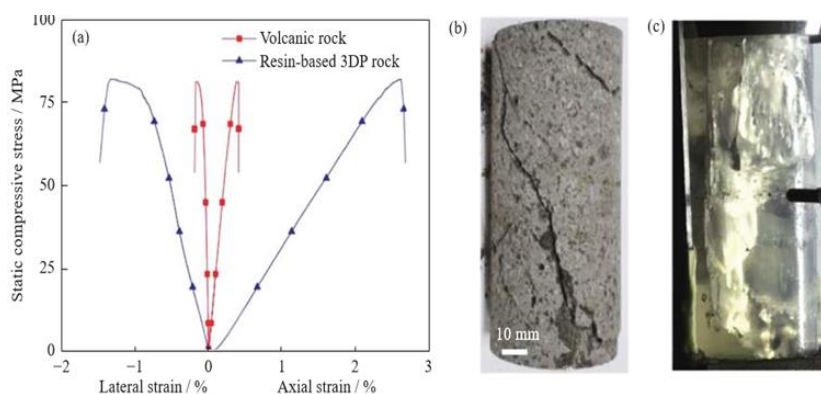
۴- نمونه پژوهش های بنیادی، آموزش و کاربردها چاپ سه بعدی در صنعت نفت

۴-۱- ژئومکانیک

۴-۱-۱- مطالعات بررسی مقاومت فشاری و سیستم تنش-کرنش

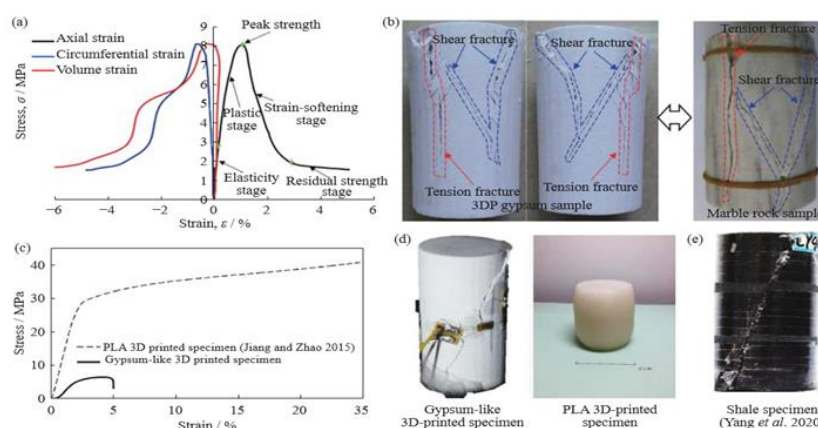
محیط زمین شناسی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی پیچیده سنگ مانند غیرخطی بودن، ناپیوستگی، ناهمگنی و ناهمسانگردی را تعیین می کند که همه آن ها منجر به افزایش دشواری استفاده از روش های تحقیق نظری رابج برای مطالعه پاسخ سنگ تحت تنش می شود. با این حال، نمونه های سنگی با خواص مشابه نمی توانند دو بار تولید و مورد آزمون قرار گیرند اما نمونه های جایگزین چاپ شده سه بعدی به ما اجازه می دهند تا آزمایش های مکرر بر روی نمونه های چاپ شده صورت پذیرد، چاپ سه بعدی همچنین امکان وارد کردن سیستماتیک ناهمگونی های مختلف، مانند میکروشکستگی ها، استیلولیت ها و حفره ها را در میان چندین نمونه آزمایش تقریباً یکسان فراهم می کند. با شناخت و کنترل تغییرپذیری بین نمونه ها از نظر تخلخل و تراکم پذیری، شبکه های شکستگی، توزیع اندازه دانه و توزیع چگالی، چاپ سه بعدی مواد هندسی ابزار ارزشمندی را برای تایید مدل های عددی، توسعه قوانین مقیاس بندی و روابط ساختاری، کمی سازی درجه تاثیر هندسه منافذ، ویژگی های شبکه شکستگی و ناهمگونی ساختاری بر خواص ماکروسکوپی فراهم می کند و امکان طراحی نسل جدیدی از آزمایش ها ژئومکانیکی - مخزنی را برای اعتبار بخشی به فرایندهایی مانند کوپل مدل های ژئومکانیکی و مدل سازی های عددی موجود را فراهم می آورد. فناوری چاپ سه بعدی اخیراً در زمینه دانش ژئومکانیک بسیار مورد توجه قرار گرفته، که در ادامه برخی از پژوهش های انجام شده در این زمینه اشاره خواهد شد:

در پژوهش اول (Zhou T, et al 2018)، ماده رزین شفاف به عنوان مناسب ترین ماده برای شبیه سازی مغزه های سنگی ترد در نظر گرفته شد (سنگ های ترد، سنگ های شکننده ای هستند که وقتی تحت تنش قرار می گیرند با تغییر شکل الاستیک کمی و بدون تغییر شکل پلاستیکی قابل شکست هستند (Ngo, TD, et al 2018, Ju Y, et al, 2017) زیرا در مقایسه با خواص مکانیکی چند ماده دیگر، مواد رزین شفاف مانند شکنندگی، مقاومت و نسبت مقاومت فشاری-کششی شباهت بیشتری به سنگ واقعی دارند. در این راستا، یک تیم تحقیقاتی (Zhou T, et al 2017, Zhu JB, et al, 2016) به اجرای مجموعه ای از آزمون های شبه استاتیک و دینامیک بر روی رزین چاپ شده سه بعدی و نمونه های سنگ طبیعی ادامه داد، آن ها دریافتند که خواص مکانیکی استاتیک نمونه رزین چاپ شده سه بعدی، شامل مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، حالت های شکست، رفتار شکنندگی و منحنی تنش-کرنش تک محوری، به طور قابل توجهی مشابه خواص مغزه سنگی طبیعی هستند، با این حال، مشخص شد که کرنش اوج نمونه های چاپ شده سه بعدی بیشتر از سنگ است که دلالت بر بالا بودن مدول الاستیک بالاتر خواهد داشت (شکل ۸) (Zhu JB, et al 2018). پژوهش ها در این خصوص نشان داده شد که مواد رزینی، پتانسیل و چشم انداز زیادی در تکرار رفتارهای مکانیکی سنگ سخت شکننده دارند. علاوه بر این شفافیت این ماده، بررسی سازوکار تحول شکستگی ها در سنگ را به صورت کاملاً واضح امکان پذیر می سازد.



شکل ۸- مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش (a) حالت‌های شکست سنگ طبیعی و نمونه جایگزین چاپ شده سه بعدی مبتنی بر رزین در آزمایش‌های فشار تک محوری استاتیک (b و c).

در سال‌های اخیر، پودر گچ در آماده‌سازی نمونه سنگ برای بررسی پتانسیل آن در تکرار خواص مکانیکی سنگ مورد استفاده قرار گرفته است (Osinga S, et al, 2015, Kong L, et al 2017). سانگ و همکارانش (Song L, et al 2018) دریافتند که یک نمونه گچی چاپ‌شده سه بعدی از نظر تغییر شکل و ویژگی‌های شکست، مانند الگوی شکست مختلط، مشابه سنگ واقعی است (شکل ۹ بخش a و b) با این حال، در مقایسه با نمونه چاپ شده جایگزین توسط چاپگر PLA (Jiang C, et al, 2016)، اگرچه نمونه گچی ویژگی تردی بالاتری دارد و به حالت شکست شیل‌های طبیعی نزدیک‌تر است (Yang SQ, et al, 2020)، اما مقاومت فشاری کمتری را از خود در آزمون‌ها نشان می‌دهند (شکل ۹ بخش c و d) (Jiang C, et al 2016).



شکل ۹- نتایج تجربی حاصل از آزمون مقاومت فشار تک محوری: رفتار تنش-کرنش (a) و حالت شکست گچ چاپ شده بوسیله پرینت سه بعدی (b) مقایسه رفتارهای تنش-کرنش (c) و حالت‌های شکست نمونه‌های گچی و PLA (d)؛ حالت شکست نمونه لیتولوژی شیلی (e).

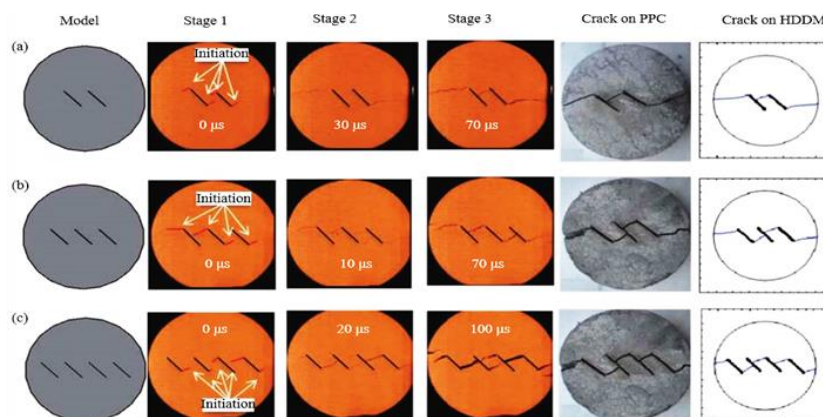
فنگ و همکارانش یک روش جدید چاپ سه بعدی از مواد زمین‌شناسی سنگ مانند شامل مواد سیمانی (مانند سیمان و گچ) و سنگ‌دانه (مانند ماسه سیلیسی) را با توجه به خواص سیال مواد زمین‌شناسی پیشنهاد کردند. پس از آن، آن‌ها یک آزمایش مقاومت فشاری تک محوری را بر روی یک نمونه ماده زمین‌شناسی سنگی چاپ سه بعدی انجام دادند. نتایج نشان داد که نمونه چاپ شده سه بعدی بر پایه سیمانی را می‌توان برای تکرار طبقات خاصی از سنگ لایه‌ای با توجه به منحنی تنش-کرنش و حالت شکست به کاربرد. این پژوهش نشان داد که مواد زمین‌شناسی سنگ مانند ممکن است در شبیه‌سازی سنگ طبیعی سودمندتر از چند ماده ذکر شده در بالا باشند (Feng XT, et al 2019).

۴-۱-۲- بررسی سیستم درزه‌ها

درزه‌های موجود در یک توده سنگ نقش بسیار مهمی را در خواص مکانیکی توده سنگ ایفا می‌کنند (Goodman RE, et al 1968). در حال حاضر، روش‌های اصلی، از جمله روش‌های درجا (سنگ‌های بکر)، روش‌های آزمایشگاهی (مصنوعی) و

مدلهای عددی برش مستقیم، به ما اجازه می‌دهند تا به طور جامع خواص مکانیکی برشی درزه‌های طبیعی را در توده‌های سنگی بررسی کنیم (Bandis S, et al 1981, Park JW, et al 2009).

در یک روش جدید تکنولوژی چاپ سه بعدی (Kumar R, et al 2016, Gui Y, et al S 2017)، از لاستیک سیلیکون یا فیلم جداسازی برای تکثیر سطح درزه‌های سنگی بکر برای تشکیل قالب سطحی درزه‌ای اصلی استفاده می‌شود و درزه‌ها براساس یک قالب چاپ شده سه بعدی ایجاد می‌شوند (شکل ۱۰).

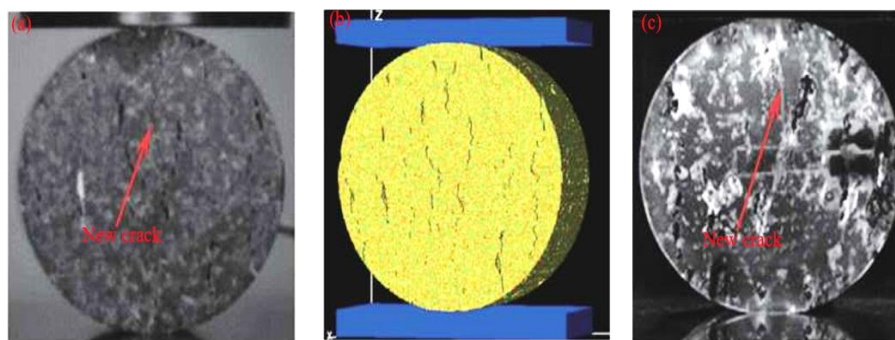


شکل ۱۰- مقایسه تکامل پیوند سه نمونه چاپ شده سه بعدی مختلف: نمونه سیمانی شده، و مدل عددی HDDM با چندین شکاف از قبل موجود.

۴-۱-۳- ارتباط بین آزمون‌های تجربی و شبیه سازی‌های عددی به کمک روش چاپ سه بعدی

همانطور که قبلاً اشاره شد، تبدیل از مدل دیجیتالی سنگ به نمونه جایگزین از طریق چاپ سه بعدی انجام شد نمونه‌های چاپ شده به ما این اجازه را می‌دهند تا آزمایش‌های مکرر را انجام دهیم همچنین چاپ سه بعدی کاستی‌های بین آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی را متعادل می‌کند و می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی در ارتباط بین آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی باشد (Kong L, et al 2019).

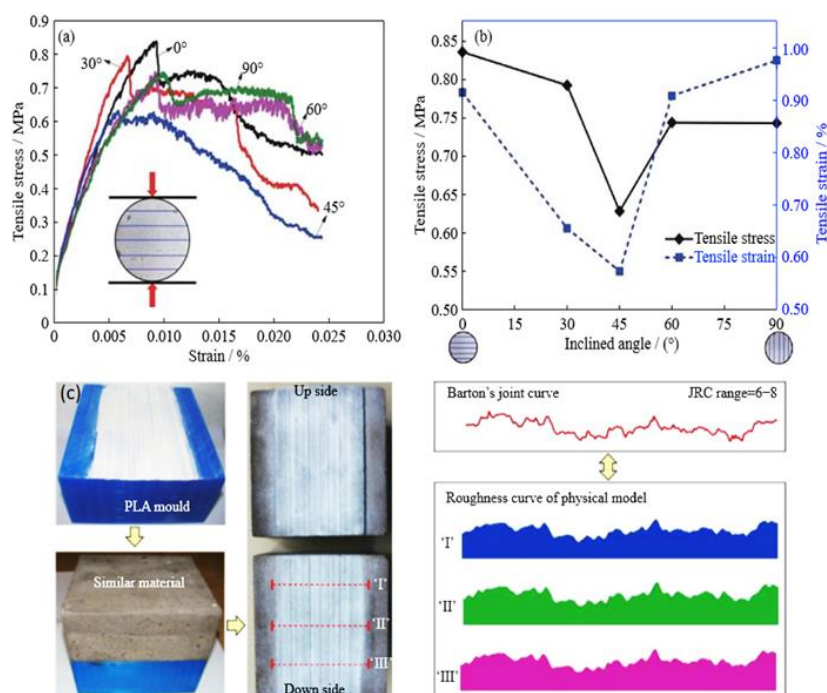
در شکل ۱۱ سه مدل پلاگ مغزه ایجاد شده به صورت طبیعی، مدل سازی عددی و چاپ سه بعدی را نشان می‌دهد که بر روی هر سه نمونه آزمایش دیسک برزلی صورت گرفت، یافته‌ها نشان داد که مسیر رشد ترک و حالت شکست مشابه نمونه‌های دیگر می‌باشد و نتایج تجربی با نتایج عددی همخوانی خوبی دارند. این نتایج پیشنهاد می‌کنند که کاربرد چاپ سه بعدی در این زمینه، کاربردهای نتایج تجربی را غنی می‌کند و اعتبار نتایج آزمون را بهبود می‌بخشد (Huang YH, et al 2019).



شکل ۱۱- طرح کلی سه مدل نمونه سنگی تحت آزمایش‌های استاتیکی دیسک برزلی: سنگ طبیعی (a)؛ مدل عددی (b)؛ چاپ سه بعدی سنگ (c).

در پژوهش اخیر، مجموعه‌ای از آزمون‌های شکافت برزلی بر روی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی مبتنی بر گچ برای بررسی اثر جهت گیری چاپ بر خواص کششی آن‌ها انجام شد، شکل (۱۲-ا) با افزایش زاویه چاپ، ویژگی‌های شکنندگی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه زاویه چاپ برابر با ۴۵ درجه است، نمونه‌ها اثرات شکل پذیری را به گونه‌ای نشان می‌دهند که از شکل (۱۲-ب)، با افزایش زاویه چاپ (از ۰ به ۹۰ درجه)، مقاومت کششی و کرنش کششی روند تغییرات ν شکل را نشان می‌دهند، به این معنی که ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند. هنگامی که زاویه چاپ برابر با ۴۵

درجه باشد، استحکام کششی و کرنش کششی به ترتیب به کم ترین مقدار خود می‌رسند، این نتایج نشان می‌دهند که جهت چاپ تاثیر آشکاری بر خواص مکانیکی کششی و ویژگی‌های تردی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی دارد.

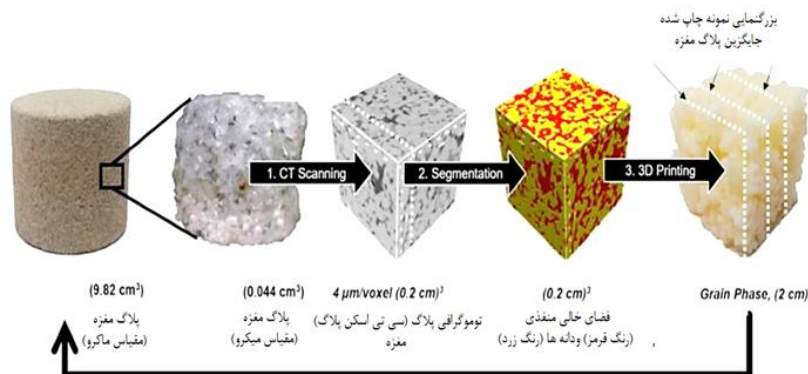


شکل ۱۲- تاثیر جهت چاپ بر خواص کششی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی مبتنی بر ژئوپرس: تنش-کرنش کششی (a)، رابطه بین استحکام کششی، کرنش کششی و زاویه چاپ (b)، مقایسه زبری و سختی نمونه‌های اتصال پروفیل اولیه بارتون JRC ضریب زبری مشترک در نمونه چاپ شده توسط چاپگر سه بعدی (c) (Gao YT, et al 2021).

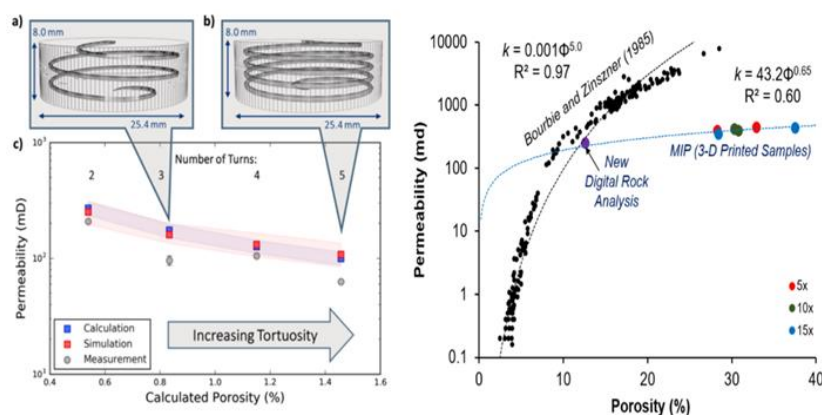
۲-۴- بازسازی تصاویر پیچیده ساختار داخلی سنگ

سنگ مخزن شامل ساختارهای داخلی پیچیده‌ای است که از شبکه‌های حفره و شکاف تشکیل شده‌اند و نقش مهمی را در بهره‌برداری از منابع غیر متعارف از نظر نفت، گاز طبیعی، گاز شیل دارند زیرا ویژگی‌های آن‌ها (به عنوان مثال، اتصال، توزیع حفره، اندازه حفره و سایر ویژگی‌ها) به طور جدایی ناپذیری به انرژی ذخیره و رفتار مهاجرت از مخازن متصل هستند (Ju Y, et al 2013). بر این اساس، شناسایی دقیق و تصویرسازی ساختار داخلی سنگ مخزن، کلید بررسی و تحلیل خواص پتروفیزیکی مخازن، به ویژه تراوایی است (Ju Y, et al 2014). چاپ سه بعدی می‌تواند یک مدل دیجیتال پیچیده مجازی به دست آمده از طراحی، توموگرافی یا میکروسکوپی CAD را به یک جسم فیزیکی ملموس در مقیاس‌های مختلف تبدیل کند، بنابراین یک فرصت جدید برای تکرار و بازتولید ساختارهای پیچیده داخلی و ساختار آشفته سنگ فراهم می‌کند که ممکن است به صورت تجربی مورد بررسی قرار گیرد (Ishutov, S, et al 2018, Jiang Q, et al, 2016, Suzuki A, et al 2016).

در شکل ۱۴ برای واسنجی مدل‌های دیجیتال ایجاد شده با مدل‌های چاپ شده، یک نمونه با نفوذپذیری قابل حل تحلیلی ایجاد و امکان مقایسه مستقیم محاسبات تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی نفوذپذیری نمونه مشابه را فراهم می‌گردد. وضوح تصویر برداری و چاپ سه بعدی ممکن است اطلاعات مربوط به هندسه منافذ را در طی مدل‌سازی و تولید در مقیاس نمونه اصلی از دست بدهد. با این حال، افزایش مقیاس سیستم‌های منافذ (به عنوان مثال، از ۱ میکرون در واقعیت به ۵۰ میکرون در یک مدل چاپ شده سه بعدی) به تعیین بهتر روابط تخلخل - تراوایی کمک خواهد کرد زیرا اتصال منافذ کوچکی که در مقیاس اصلی مشاهده نشده است، پس از افزایش مقیاس قابل تشخیص خواهد بود. علاوه بر این، شبکه منافذ مقیاس گذاری شده دیجیتالی را می‌توان به صورت کمی با در نظر گرفتن عامل مقیاس گذاری که تغییرات در ویژگی‌هایی مانند فشار سیال، سرعت جریان و ویسکوزیته را تحت تاثیر قرار می‌دهد تجزیه و تحلیل کرد.



شکل ۱۳- روند انجام تحلیل نمونه‌های ماسه‌سنگی؛ مرحله ۱: اسکن میکروپلاگ ماسه سنگی تهیه شده با استفاده از آشکارساز کامپیوتر (سی تی اسکن نمونه‌ها) مرحله ۲: حجم کل به دو بخش منافذ (رنگ قرمز) و دانه‌ها (رنگ زرد) تقسیم شدند، از منافذ برای محاسبه تخلخل و اندازه‌گیری حفره‌ها استفاده می‌شود. مرحله ۳: اندازه بخشی دانه‌ها ده برابر بزرگتر شد تا در چاپگرهای سه بعدی واضح‌تر شود مرحله ۴: نمونه‌های سنگ طبیعی و نمونه‌های دیگر (از جمله نمونه سی تی اسکن شده و چاپ شده توسط چاپگرهای سه بعدی) به وسیله آزمون تخلخل‌سنجی جیوه برای تعیین توزیع اندازه حفره و تخلخل بررسی شد، نتایج تحلیل‌های مدل‌های دیجیتال و چاپ شده با پلاگ‌های اصلی سنگ در آزمایش تخلخل‌سنجی جیوه مقایسه و مورد اعتبار‌سنجی واقع می‌شوند (Ishutov, S).

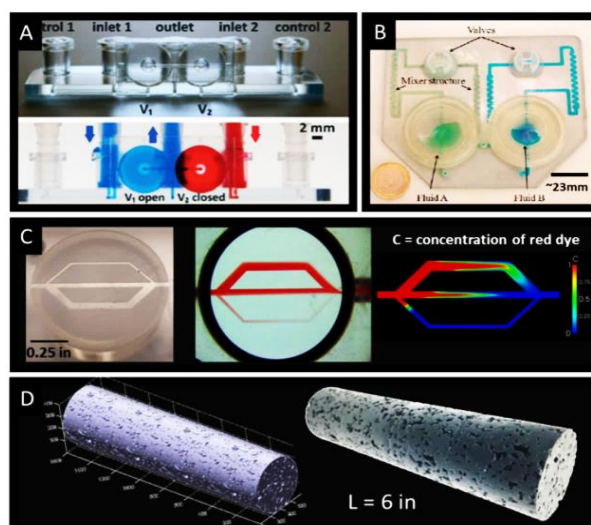


شکل ۱۴- روش مدل‌سازی سیستم‌های هندسی و نتایج نفوذ پذیری: مدل فریم سیمی چاپ سه بعدی حاوی یک ماریج با سه دور، با ابعاد ذکر شده (شکل سمت چپ - a)، مدل فریم سیمی چاپ سه بعدی حاوی یک ماریج با پنج دور (شکل سمت چپ - b)، نفوذپذیری محاسبه شده، شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به عنوان تابعی از تخلخل محاسبه شده برای چاپ‌های سه بعدی با فضای حفره‌ای ماریج (نواحی سایه‌دار متناظر با مدل‌هایی هستند که تا ۵٪ ± 80 ابعاد مدل ورودی، هم برای محاسبات و هم برای شبیه‌سازی‌ها مقیاس بندی شده‌اند) (شکل سمت چپ - c)، نمودار نتایج حاصل از تخلخل جیوه و مدل‌سازی دیجیتالی و نمونه چاپ شده توسط فناوری چاپ سه بعدی (نمودار سمت راست): خط روند و نقطه داده‌ها که با رنگ سیاه مشخص شده است رابطه تخلخل به همراه نفوذ پذیری را نشان می‌دهند (برای تخلخل‌های زیاد (بیش از ۹ درصد) در نظر گرفته می‌شود)، خط روند که با رنگ آبی مشخص شده است رابطه تخلخل با نفوذپذیری در آزمون تزریق جیوه تخلخل‌سنجی در نمونه‌های چاپ شده به وسیله فناوری چاپ سه بعدی همراه با بزرگ‌نمایی مربوطه نشان می‌دهد. در نمودار k نفوذپذیری و ϕ تخلخل می‌باشد، نقطه داده بنفش که به رابطه تخلخل و نفوذپذیری مربوط است (تخلخل (محور x) بر حسب درصد، نفوذپذیری مقیاس لگاریتمی (محور y) نشان داده شده است (Head D, et al 2016).

۴-۳- بررسی میکروسیالات و مدل‌سازی جریان

سیستم‌های فلوئیدیک چاپ شده سه بعدی، که از سنگ‌های طبیعی پیروی نموده و شامل ساختارهای میکروکانال با شیمی سطح قابل تنظیم می‌باشند، می‌توانند به تعمیق درک ما از جریان چند مقیاسی کمک نمایند (شکل ۱۵). در صنعت نفت، ابزارهای میکروفلوئیدیک (که عموماً به آن‌ها میکرومدل گفته می‌شود) برای بررسی جابجایی نفت توسط یک سیال غیرقابل امتزاج و دیگر

پدیده‌های جریان دو و سه فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات میکرومدل‌ها، بینش‌هایی را برای فرآیندهای نفوذپذیری، نفوذپذیری نسبی آب و نفت، مطالعات جریان چند فازی مانند ذخیره‌سازی کربن، تکرار آزمون‌های ترشوندگی و اثر سیال بر ناپایداری سافمن-تیلور فراهم کرده‌اند که همه آن‌ها بر بازیابی نفت تاثیر گذارند.



شکل ۱۵- استفاده از ابزارهای چاپ سه بعدی و نمونه‌های سنگی برای پدیده ریز سیال شناسی (A، B)، کاربرد ابزارهای ریز سیال‌ها چاپ شده سه بعدی شفاف را برای مقایسه آزمایش‌های جریان و انتقال با شبیه‌سازی‌های عددی (C)، نمایش دیجیتال سه بعدی یک پلاگ مغزه ماسه سنگی طبیعی (سمت چپ) و نمونه سنگ چاپ‌شده سه بعدی (سمت راست) مورد استفاده در آزمایش‌ها پتروفیزیکی مربوط به مغزه (Bonyár A, Sántha H, et al 2016, Yazdi AA, et al 2010, et al 2019, D).

پیشرفت در چاپ سه بعدی مدل‌های میکروفلوئیدیک همراه با تصویربرداری در مقیاس منافذ و حفرات، پایه و اساس تحقیقات آتی علوم زمین را فراهم می‌آورد این پژوهش‌ها می‌توانند آزمایش‌ها جریانی را که به طور معمول برای مطالعه فعل و انفعالات فیزیکی - شیمیایی بین سیالات و سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند را شامل شوند. چاپ سه بعدی همچنین می‌تواند برای بررسی روابط مقیاس‌بندی فرآیندهای جریان (به عنوان مثال، تغییرات در نفوذپذیری) مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱۵)، ترکیب بسیاری از این مدل‌ها می‌تواند برای ساخت یک مدل جامع‌تر و پیچیده‌تر (ناهمگن) برای بهبود روش‌های اندازه‌گیری استفاده شود (Bultreys T, et al 2016, Li L, et al 2008, Watson F, et al 2019).

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش توسعه و پیشرفت کاربرد فناوری چاپ سه بعدی در زمینه مهندسی نفت بیان گردید که نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

۱- چاپ سه بعدی، همراه با سایر فناوری‌های پیشرفته مانند سی‌تی‌اسکن، تست فتوالاستیک و همچنین تنوع مواد به کار گرفته شده در چاپگرهای سه بعدی، به ما اجازه می‌دهد تا ساختارهای سنگی طبیعی پیچیده را بازسازی و تجسم کنیم و فرآیندهای ذاتی فیزیکی و مکانیکی و مکانیزم‌های میکروسکوپی درون توده‌های سنگی را روشن سازیم، در نتیجه فرصت‌های تحقیقاتی جدیدی را در زمینه‌های مختلف دانش صنعت نفت پیش روی علاقه‌مندان قرار می‌دهد.

۲- ایجاد تطابق خوب بین محاسبات تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی اساس لازم برای پیاده‌سازی چاپ سه بعدی به عنوان یک تکنیک تحلیلی برای مقایسه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با راه‌حل‌های عددی با همان حجم را فراهم آورد. این کلید ارتباط مستقیم اندازه‌گیری در مقیاس‌های مختلف و ارتباط اندازه‌گیری فیزیکی با خواص فضای منفذی است. علاوه بر این، روش چاپ سه بعدی با اجازه دادن به تکرار و فرصت دسترسی و اتصال مقیاس‌های چندگانه به صورت دیجیتالی و تجربی، به بهبود تکرارپذیری تجربی کمک می‌کند.

۳- سنسورهای تعبیه شده در نمونه‌های سنگی چاپ شده سه بعدی درک فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی را تقویت می‌کنند و اعتبار شبیه‌سازی‌های عددی را تا حد زیادی بهبود می‌بخشند، سنسورها می‌توانند با چاپ سه بعدی برای اندازه‌گیری‌های تنش‌ها و خمش، ایجاد و ادغام شوند همچنین نمونه‌های ایجاد شده توسط چاپ سه بعدی را می‌توان با سنسورهای فیبر نوری در محل چاپ کرد که پارامترهایی مانند فشار، دما یا ترکیب شیمیایی را برای نظارت داخلی فراهم می‌کنند.

۴- مواد چاپ شده سه بعدی به عنوان خط اصلی بحث در مورد بهبود در شباهت‌های رفتارهای مکانیکی و فیزیک سنگی بین نمونه‌های سنگی طبیعی و چاپ‌شده سه بعدی شناخته می‌شوند در این خصوص می‌توان از مواد گوناگون متناسب با داده‌های در دسترس استفاده نمود، در زمینه آزمون‌های ژئومکانیکی ثابت شده است که ماده رزین شفاف برای شبیه‌سازی سنگ‌های ترد طبیعی مناسب است، اما باید توجه نمود که شکنندگی و استحکام آن هنوز به مطالعات بیشتری در این زمینه دارد همچنین مواد مصرفی باید قادر به مقاومت در برابر شرایط زیر سطحی برای آزمایش‌های دما و فشار بالا باشند، واضح است که پیشرفت‌های بیشتر در چاپ سه بعدی برای دانش مهندسی در صنعت نفت نیاز به یک تلاش تحقیقاتی گسترده برای ایجاد مواد و بافت‌های مناسب برای نشان دادن انواع مختلف سنگ‌ها و مواد مورد استفاده در چاپ نمونه‌ها دارد.

۵- در بررسی رفتارهای مکانیکی (مانند منحنی تنش-کرنش، پارامترهای مکانیکی، الگوی شکست و شکنندگی) بین نمونه‌های چاپ شده سه بعدی ساخته‌شده با مواد چاپ مختلف و سنگ واقعی نشان داده شد که نمونه‌های چاپ شده سه بعدی، شکنندگی کمتر، مقاومت کمتر، شکل‌پذیری بیشتر و مدول الاستیک کمتر (تغییر شکل بیشتر) را نسبت به نمونه‌های واقعی تحت شرایط یکسان نشان می‌دهند ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های چاپ‌شده سه بعدی ممکن است به طور مصنوعی اصلاح شوند تا بیشتر شبیه به ویژگی‌های سنگ طبیعی از طریق برخی از پیکربندی‌های چاپ و معیارهای بهبود شوند، انتخاب معیارهای بهبود، مانند انجماد، گرمایش، عمل‌آوری، و نفوذ، وابستگی زیادی به مواد مورد استفاده برای چاپ سه بعدی دارد بنابراین، مواد چاپ‌شده سه بعدی به عنوان خط اصلی بحث در مورد بهبود در شباهت‌های رفتارهای مکانیکی بین نمونه‌های سنگی طبیعی و چاپ شده سه بعدی شناخته می‌شوند. ثابت شده است که ماده رزین شفاف برای شبیه‌سازی سنگ‌های ترد طبیعی مناسب است، اما باید توجه نمود که شکنندگی و استحکام آن هنوز به مطالعات بیشتری در این زمینه دارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از خانم دکتر دلسی هد از دپارتمان مهندسی منابع انرژی و ژئوفیزیک دانشگاه استنفورد جهت کمک‌هایی که در ارتقای کیفی این پژوهش داشتند تشکر نمایند.

منابع

1. Bandis, S., Lumsden, AC., Barton, NR (1981) Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, Feb 1 Vol. 18, No. 1, pp. 1-21. Pergamon.
2. Bonyár, A., Sántha, H., Ring, B., Varga, M., Kovács, JG., Harsányi, G (2010) 3D Rapid Prototyping Technology (RPT) as a powerful tool in microfluidic development. Procedia Engineering. Jan 1;5:291-4.
3. Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A (2013) Bone tissue engineering using 3D printing. Materials today. Dec 1;16(12):496-504.
4. Bultreys, T., De Boever, W., Cnudde, V (2016) Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art. Earth-Science Reviews. Apr 1;155:93-128.
5. Camisa, JA., Verma, V., Marler, DO., Madlinger, A (2014) Additive manufacturing and 3D printing for oil and gas-transformative potential and technology constraints. In The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference, Jun 15. OnePetro.
6. Cohen, D., Sargeant, M., Somers, K (2014), 3-D printing takes shape. McKinsey Quarterly. Jan;1:1-6.
7. Dal Ferro, N., Morari, F (2015), From real soils to 3D-printed soils: reproduction of complex pore network at the real size in a silty-loam soil. In Soil Science Society of America.
8. Feng, XT., Gong, YH., Zhou, YY., Li, ZW., Liu, XF (2019) The 3D-printing technology of geological models using rock-like materials. Rock Mechanics and Rock Engineering. Jul;52(7):2261-77.
9. Fereshtenejad, S., Song, JJ (2016) Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics. Rock Mechanics and Rock Engineering. Jun;49(6):2065-74.
10. Fereshtenejad, S., Song, JJ (2016), Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics. Rock Mechanics and Rock Engineering. Jun;49(6):2065-74.
11. Funatsu, T., Shimizu, N., Kuruppu, M., Matsui, K (2015) Evaluation of mode I fracture toughness assisted by the numerical determination of K-resistance. Rock Mechanics and Rock Engineering. Jan 1;48(1):143-57.

12. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, CB., Wang, CC., Shin, YC., Zhang, S., Zavattieri, PD (2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. Dec 1;69:65-89.
13. Gao, YT., Wu, TH., Zhou, Y (2021) Application and prospective of 3D printing in rock mechanics: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. Jan;28(1):1-7.
14. Goodman, RE., Taylor, RL., Brekke, TL (1968) A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the soil mechanics and foundations division*. May;94(3):637-59.
15. Gui, Y., Xia, C., Ding, W., Qian, X., Du, S (2017) A new method for 3D modeling of joint surface degradation and void space evolution under normal and shear loads. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Oct;50(10):2827-36.
16. Head, D., Vanorio, T (2016) Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3-D printing investigation. *Geophysical Research Letters*. Jul 28;43(14):7494-502.
17. Huang, YH., Yang, SQ., Tian, WL (2019) Cracking process of a granite specimen that contains multiple pre-existing holes under uniaxial compression. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Jun;42(6):1341-56.
18. Hull, CW (1984), Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. United States Patent, Appl., No. 638905, Filed.
19. Ishutov, S. 3D printing porous proxies as a new tool for laboratory and numerical analyses of sedimentary rocks (Doctoral dissertation, Iowa State University).
20. Jiang, C., Zhao, GF., Zhu, J., Zhao, YX., Shen, L (2016) Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3D printing material. *Rock mechanics and rock engineering*. Oct;49(10):3983-98.
21. Jiang, Q., Feng, X., Song, L., Gong, Y., Zheng, H., Cui, J (2016) Modeling rock specimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica*. 2016 Feb 1;32(1):101-11.
22. Ju, Y., Wang, L., Xie, H., Ma, G., Zheng, Z., Mao, L (2017) Visualization and transparentization of the structure and stress field of aggregated geomaterials through 3D printing and photoelastic techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Jun;50(6):1383-407.
23. Ju, Y., Xie, H., Zheng, Z., Lu, J., Mao, L., Gao, F., Peng, R (2014), Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chinese science bulletin*. Dec;59(36):5354-65.
24. Ju, Y., Xie, H., Zheng, Z., Lu, J., Mao, L., Gao, F., Peng, R (2014) Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chinese science bulletin*. Dec;59(36):5354-65.
25. Ju, Y., Zhang, Q., Yang, Y., Xie, H., Gao, F., Wang, H (2013) An experimental investigation on the mechanism of fluid flow through single rough fracture of rock. *Science China Technological Sciences*. Aug;56(8):2070-80.
26. Kong, L., Ostadhassan, M., Li, C., Tamimi, N (2017) Rock physics and geomechanics of 3-D printed rocks. In ARMA 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, California, USA. Conference Paper, Jun 25 (pp. 1-8).
27. Kong, L., Ostadhassan, M., Zamiran, S., Liu, B., Li, C., Marino, GG (2019) Geomechanical upscaling methods: comparison and verification via 3D printing. *Energies*. Jan;12(3):382.
28. Kumar, R., Verma, AK (2016) Anisotropic shear behavior of rock joint replicas. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Dec 1;90:62-73.
29. Li, L., Steefel, CI., Yang, L (2008) Scale dependence of mineral dissolution rates within single pores and fractures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Jan 15;72(2):360-77.
30. Liu, P., Ju, Y., Ranjith, PG., Zheng, Z., Wang, L (2016) Wanniarachchi A. Visual representation and characterization of three-dimensional hydrofracturing cracks within heterogeneous rock through 3D printing and transparent models. *International Journal of Coal Science & Technology*. Sep;3(3):284-94.
31. Matsumura, S., Mizutani, T (2015), 3D printing of soil structure for evaluation of mechanical behavior. *Acta Stereologica*. Jul 10.
32. Mazhar, H., Osswald, T., Negrut, D (2016) On the use of computational multi-body dynamics analysis in SLS-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. Oct 1;12:291-5.
33. Mazhar, H., Osswald, T., Negrut, D (2016) On the use of computational multi-body dynamics analysis in SLS-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. Oct 1;12:291-5.

34. Mcdougall, SR., Mackay, EJ (1998) The impact of pressure-dependent interfacial tension and buoyancy forces upon pressure depletion in virgin hydrocarbon reservoirs. *Chemical Engineering Research and Design*. Jul 1;76(5):553-61.
35. Mitchell, MG (2016) *Cell Biology: Translational impact in cancer biology and bioinformatics*. Academic Press; Jan 16.
36. Ngo, TD., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, KT., Hui, D (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. Jun 15;143:172-96.
37. Osinga, S., Zambrano-Narvaez, G., Chalaturnyk, RJ (2015), Study of geomechanical properties of 3D printed sandstone analogue. In 49th US rock mechanics/geomechanics symposium, Jun 28. OnePetro.
38. Otten, W., Pajor, R., Schmidt, S., Baveye, PC., Hague, R., Falconer, RE (2012), Combining X-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries. *Soil Biology and Biochemistry*. Aug 1;51:53-5.
39. Park, JW., Song, JJ (2009) Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Dec 1;46(8):1315-28.
40. Song, L., Jiang, Q., Shi, YE., Feng, XT., Li, Y., Su, F., Liu, C (2018) Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Aug;51(8):2617-37.
41. Suzuki, A., Sawasdee, S., Makita, H., Hashida, T., Li, K., Horne, RN (2016) Characterization of 3D printed fracture networks. *Proc. 41st Work. Geotherm. Reserv. Eng.*
42. Vlasea, M., Pilliar, R., Toyserkani, E (2015), Control of structural and mechanical properties in bioceramic bone substitutes via additive manufacturing layer stacking orientation. *Additive Manufacturing*. Apr 1;6:30-8.
43. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D (2017) 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. Feb 1;110:442-58.
44. Watson, F., Maes, J., Geiger, S., Mackay, E., Singleton, M., McGravie, T., Anouilh, T., Jobe, TD., Zhang, S., Agar, S., Ishutov, S (2019) Comparison of flow and transport experiments on 3D printed micromodels with direct numerical simulations. *Transport in Porous Media*. Sep;129(2):449-66.
45. Yang, SQ., Yin, PF., Ranjith, PG (2020) Experimental study on mechanical behavior and brittleness characteristics of longmaxi formation shale in Changning, Sichuan basin, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Feb 11:1-23.
46. Yazdi, AA., Popma, A., Wong, W., Nguyen, T., Pan, Y., Xu, J (2016) 3D printing: an emerging tool for novel microfluidics and lab-on-a-chip applications. *Microfluidics and Nanofluidics*. Mar 1;20(3):50.
47. Zhou, T., Zhu, J (2017) An experimental investigation of tensile fracturing behavior of natural and artificial rocks in static and dynamic Brazilian disc tests. *Procedia engineering*. Jan 1;191:992-8.
48. Zhou, T., Zhu, J (2017) An experimental investigation of tensile fracturing behavior of natural and artificial rocks in static and dynamic Brazilian disc tests. *Procedia engineering*. Jan 1;191:992-8.
49. Zhou, T., Zhu, JB (2016) Application of 3D printing and micro-CT scan to rock dynamics. In ISRM 2nd International Conference on Rock Dynamics, May 18. OnePetro.
50. Zhou, T., Zhu, JB (2018) Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Mar;51(3):765-77.
51. Zhu, JB., Zhou, T., Liao, ZY., Sun, L., Li, XB., Chen, R (2018) Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Jun 1;106:198-212.

