

ISSN: 2538-3809

فصلنامه علمی تخصصی

മുസ്ലിം സമൂഹത്തിന്റെ
മുന്നേറ്റം

سال ششم، شماره ۳ (پیاپی ۳۵)، پاییز ۱۴۰۰

ارزیابی ریسک های HSE در حفاری
تونل متروی شماره ۲ شیراز با روش FMEA
احسان سلیمانی

به کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین
نظارت شده ماشین بردار پشتیبان و جنگل
تصادف به منظور پیش‌بینی مقاومت و روانی
مارشال آسفالت

حسن حسین زاده، علیرضا حسینی، سینا آرمان

پژوهش‌های بنیادی و کاربردی فناوری چاپ سه بعدی (DP3) در مطالعات میدانی نفتی
مهدی گندمگون، محمدحسین گندمگون



نشریه

تهران، افسریه، ۱۵ متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲۴۸۷ / ۰۲۶۴۴۴۵۳۱۳۱ / ۰۲۱۳۳۲۰۲۴۸۷
نشانی: کرج، آزادگان، ابتدای بلوار مطهری، کوچه شهید سنجابی، پلاک ۲۸، واحد ۴ کدپستی: ۳۱۳۳۹۵۲۵۹۵
www.NRES.ir @Shij.journals@gmail.com

چاپ

تهران، افسریه، ۱۵ متری اول، کوچه ۲۸، پلاک ۲۹۳
نشانی: تهران، افسریه، ۱۵ متری اول، کوچه ۲۸، پلاک ۲۹۳
تلفن: ۰۲۱۳۳۸۴۰۷۹۲

صاحب امتیاز و مدیر مسئول: امیر حسین یوسفی
زیر نظر شورای سردبیری
مدیر اجرایی: منیژه ملائی

اعضای شورای علمی و داوری تحریریه: (به ترتیب حروف الفبا)

- دکتر محمدعلی ارجمند، عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
- دکتر شهرزاد اسدی، عضو هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی
- دکتر رضا افضل، عضو هیئت علمی دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
- دکتر علی جباری، عضو هیئت علمی دانشگاه اراک
- دکتر نعمت حسینی، عضو هیئت علمی دانشگاه شهید بهشتی
- دکتر راحله خادمیان، عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
- دکتر چنگیز دهقانپایان، عضو هیئت علمی دانشگاه تهران
- دکتر علی رحمانی هنزکی، عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
- دکتر قدرت الله رودینی، عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان
- دکتر محبعلی رهدار، عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان
- دکتر مرتضی زیودار، عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان
- دکتر علی فروغی، عضو هیئت علمی دانشگاه تبریز
- دکتر محمدحسین کاظمی، عضو هیئت علمی دانشگاه شاهد
- دکتر علی لکی روحانی، عضو هیئت علمی دانشگاه زنجان
- دکتر سیدحمید هاشمی، عضو هیئت علمی دانشگاه اراک
- دکتر هجیر کریمی، عضو هیئت علمی دانشگاه یاسوج

فراخوان پذیرش مقاله:

نشریه «پژوهش‌های نوین علوم مهندسی» توسط موسسه مطبوعاتی مطالعات کاربردی شبک و با همکاری علمی اساتید برجسته دانشگاه‌های کشور به انتشار مقالات علمی در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی می‌پردازد. از این‌رو از تمام اساتید، صاحب‌نظران، کارشناسان، دانشجویان و پژوهشگران دعوت می‌شود با ارسال مقالات علمی خود از طریق وبسایت نشریه به نشانی www.Nres.ir در پربارتر کردن این نشریه، ما را یاری نمایند. برای ارسال مقاله کافی است تا در وبسایت ثبت‌نام نموده و با ورود به پنل کاربری، مقاله خود را ثبت کنید.

محورها و موضوعات پذیرش مقاله:

- | | |
|--------------------------|------------------------------------|
| - مهندسی صنایع | - مهندسی برق و الکترونیک |
| - مهندسی عمران | - مهندسی انرژی و فیزیک |
| - مهندسی مکانیک | - مهندسی شیمی، نفت و پلیمر |
| - مهندسی معدن | - مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات |
| - مهندسی هوا فضا | - مبانی علوم مهندسی |
| - مهندسی مواد و متالورژی | - مدیریت دانش در علوم مهندسی |

فهرست مقالات

صفحه	عنوان مقاله
۱	ارزیابی ریسک‌های HSE در حفاری تونل متروی شماره ۲ شیراز با روش FMEA احسان سلیمانی
۹	به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به‌منظور پیش‌بینی مقاومت و روانی مارشال آسفالت حسن حسین زاده، علیرضا حسینی، سینا آرمان
۲۵	پژوهش‌های بنیادی و کاربردی فناوری چاپ سه بعدی (DP۳) در مطالعات میادین نفتی مهدی گندم‌گون، محمدحسین گندم‌گون

ارزیابی ریسک‌های HSE در حفاری تونل متروی شماره ۲ شیراز با روش FMEA

احسان سلیمانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۴

کد مقاله: ۵۵۴۰۳

چکیده

در این پژوهش بررسی دقیق ریسک‌های موجود شناسایی شود. سپس با ارائه اقدامات کاهش دهنده سطح ریسک‌های ناشی از مسائل HSE را تا حد امکان کاهش داده و به سطح قابل قبولی از ریسک رساند. بدین منظور، تحقیق پیش روی با هدف ارزیابی ریسک‌های ایمنی، بهداشت حرفه‌ای و زیست محیطی پروژه تونل‌های حفاری مترو به صورت موردی در شیراز با تکنیک FMEA به انجام رسید جهت جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های مشاهده، تجربه، چک لیست، آئین نامه‌ها و استانداردهای مرتبط و سوابق حوادث ثبت شده استفاده گردید؛ قابلیت کشف خطرات، شدت، احتمال و پیامدهای مخاطرات با حضور کارشناسان با تجربه تعیین شد. طی مطالعه حاضر پروژه به ۱۲ واحد کاری مختلف تفکیک شد. در مجموع ۴۹ عنوان فعالیت مرتبط با این ۱۲ واحد مشخص گردید و در نهایت ۲۹۳ خطر مرتبط با این تعداد فعالیت‌ها مورد شناسایی قرار گرفت. سطوح ریسک ۲۶ مورد در سطح ریسک پایین، ۲۰۲ مورد در سطح ریسک متوسط و ۶۵ مورد در سطح ریسک بالا قرار داشت. بعد از پیاده سازی اقدامات اصلاحی به جز ۳ خطری که در سطح ریسک متوسط قرار گرفتند باقی به سطح ریسک پائین تقلیل یافتند. در این کار با بررسی وضعیت دستگاه حفاری TBM و تأثیر حفاری مکانیزه بر تونل سازی همچنین با بررسی کلیه جزئیات مطالعات ارزیابی ریسک‌های HSE پروژه سعی گردیده ابهامات و ریسک‌های پیش روی پروژه مشخص گردد و اقدامات لازم برای کاهش آن و ایجاد شرایط ایمن برای اجرا اتخاذ گردد از این رو طرح مدیریت و ارزیابی ریسک FMEA برای حفاری مکانیزه در پروژه مترو طرح ریزی و در کلیه مراحل پروژه مشخص گردید و اقدامات لازم برای کاهش آن با دیدگاه تخصصی در هر حوزه بخصوص مطالعات ریسک‌های حفاری مکانیزه ارائه گردید.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک، HSE، حفاری تونل، روش FMEA

۱- کارشناسی ارشد ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص)، پروژه خط ۲ قطار شهری شیراز
ehsan.soleimani70@gmail.com

۱- مقدمه

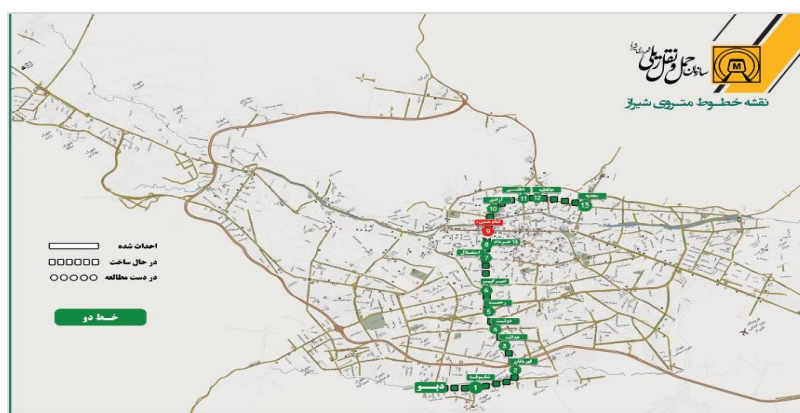
پیامدهای تلخ حوادث بسیار شدید دهه‌های گذشته از جمله حادثه نیروگاه اتمی فوکوشیما در ژاپن، سکوی نفتی پاپیرآلفا در دریای شمال و یا فاجعه اخیر زیست محیطی در خلیج مکزیک و چندین و چند نمونه حوادث مشابه سبب شده تا همواره جواب این سوال اساسی در اذهان بی پاسخ بماند که چرا با استقرار ساختارهای سیستم‌های مدیریت ایمنی، بهداشت و محیط زیست بسیار قوی در این اماکن بعضاً چنین حوادثی با پیامدهای غیرقابل جبران بوجود می‌آید. آیا استقرار چنین سیستم‌هایی نباید انواع خطرات را پیش‌بینی، کنترل و به طبع آن حوادث مربوطه را کاهش دهد [۱]. در میان صنایع مختلف، صنایع فرآیندی با توجه به ماهیت خطرناک مواد و عملیات آن همواره جزو صنایع پرخطر محسوب می‌شوند [۲]. در این بین صنعت نفت و صنایع وابسته به آن در کشور ما به علت انتقال حجم بالایی از فرآورده‌های نفتی که دارای ریسک بالایی از خطرهای ایمنی، بهداشتی و زیست محیطی‌اند از اهمیت بسزایی برخوردارند [۳]. امروزه اهمیت سلامت نیروی انسانی برهیچکس علی‌الخصوص متخصصین امر سلامت پوشیده نیست در محیط‌های کار همواره نیروی کار اعم از صنعتی، تجاری، دفتری و خدماتی به واسطه انواع عوامل زیان‌آور موجود در محیط‌های کاری نظیر عوامل فیزیکی، شیمیایی، زیست‌شناختی، ارگونومیک، روانی یا مکانیکی در معرض انواع مختلف صدمات شغلی قرار دارند. نظر به اینکه نیروهای کار به ویژه نیروهای متخصص که از ارزش‌ترین سرمایه‌های هر کشور و سازمان به شمار می‌آیند و از سوی دیگر برخورداری از سلامت کامل لازمه دست‌یابی به حداکثر بهره‌وری و کسب نتیجه‌ای مطلوب در کار محسوب می‌گردد پر واضح است که مدیریت ریسک‌های HSE از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۴].

صنعت تونل‌سازی با توجه به مشکلات هزینه‌های ساخت و ریسک‌پذیر بودن آن که نه تنها به واسطه شرایط پیش‌بینی نشده زمین که ممکن است بهتر یا بدتر از شرایط مورد انتظار باشد ایجاد نمی‌گردد بلکه می‌تواند از موارد دیگری نیز نشئت بگیرد که در همه موارد انسان نقش اصلی را در کاهش ریسک دارد [۶]. در این پروژه پیمانکار و کارفرما باید ریسک‌های HSE موجود در پروژه را از مرحله طراحی تا پایان پروژه شناسایی و کنترل نموده و بهبود مستمر انجام گیرد [۵]. حفاری تونل‌های با مسیر طولانی و تحت شرایط ژئوتکنیکی متفاوت با حداقل نیروی انسانی و مدت زمان کوتاه‌تر از روش‌های قبلی امکان‌پذیر شده است [۷]. در گذشته هنگام حفار تونل به ازاء هر ۸۰۰ متر حفار تونل معمولاً جان یک نفر به مخاطره جدی می‌افتاد. بدیهی است بدون شناخت و رعایت دقیق موازین HSE^۱ و عدم شناسایی صحیح خطرات می‌تواند زبان‌های قابل توجهی ایجاد و هزینه‌های سنگینی به پیمانکار تحمیل نماید [۸]. آگاهی از مراحل مختلف عملیات اجرایی ساخت تونل و شناسایی خطرات و ریسک‌ها در همه مراحل به ایجاد شرایط امن برای فعالیت کارکنان داخل تونل و ذی‌نفعان کمک مؤثری خواهد نمود [۹]. به دلیل وجود ریسک‌های بالا در حفاری TBM که بخش اعظمی از آن بخاطر نبودن این حفاری و عدم شناخت کافی از شرایط آن بوده، سعی شده تا با بررسی دقیق ریسک‌های موجود شناسایی شود. سپس با ارائه اقدامات کاهش دهنده سطح ریسک‌های ناشی از مسائل HSE را تا حد امکان کاهش داده و به سطح قابل قبولی از ریسک رساند [۱۰].

۲- روش پژوهش

در راستای بهبود خدمات شهری و کاهش مشکلات ناشی از ترافیک در سطوح کلان‌شهرهای کشور، اجرای خطوط قطار شهری از اولویت‌های تعیین شده در سند چشم‌انداز می‌باشد. در این راستا اجرای خط دوم قطار شهری شیراز با هدف تأمین دسترسی سریع و ایمن بخشی از جمعیت شهر شیراز در دستور کار شهرداری قرار گرفت که پس از انجام مطالعات و طراحی اولیه، بخشی از عملیات طرح و ساخت خط ۲ از تاریخ ۹۲/۰۹/۲۷ شروع شد. خط ۲ قطار شهری شیراز به طول تقریبی ۱۵ کیلومتر با تعداد ۱۳ ایستگاه از میدان شکوفه واقع در شهرک میانرود در جنوب غربی شیراز آغاز و پس از عبور از بلوار عدالت و میدان بسیج در امتداد خیابان انقلاب به سمت میدان امام حسین (ع) و آزادی و از آنجا در امتداد غرب به شرق شیراز پس از گذر از میدان اطلسی و حافظیه به میدان گلستان ختم خواهد شد، ظرفیت حمل‌مسافر در نظر گرفته شده برای این خط ۱۶۰۰۰ نفر ساعت است که با ۲۲ رام قطار ۵ واگن سرفاصله ۳ دقیقه‌ای برای اعزام قطارها در افق طرح در نظر گرفته شده است. این پروژه در دو فاز قابل اجرا خواهد بود که فاز اول آن از میدان شکوفه تا میدان امام حسین (ع) به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر با در نظر گرفتن ایستگاه‌های اصلی خط ۲ شامل ایستگاه‌های شکوفه و قهرمانان واقع در شهرک میانرود، ایستگاه‌های عادل آباد، دولت، رحمت، امیرکبیر در بلوار عدالت و ایستگاه‌های استقلال، پانزده خرداد و امام حسین (ع) در خیابان انقلاب در حال اجرا می‌باشد؛ در فاز دوم پروژه، ادامه مسیر به طول تقریبی ۴ کیلومتر از میدان آزادی تا میدان گلستان شامل ایستگاه‌های آزادی، اطلسی، حافظیه و گلستان تکمیل خواهد شد. مسیر ۱۱ کیلومتری فاز اول شامل دو تونل عمیق تک خطه هر کدام به طول تقریبی ۷/۵ کیلومتر و حدود ۲ کیلومتر مسیر روزمینی است، عملیات ساخت تونل‌های عمیق پس از سرویس و تعمیر دو دستگاه حفاری مکانیزه (TBM) و کارخانه تولید قطعات

بتنی پیش ساخته که قبلاً جهت اجرای تونل‌های خط یک مورد استفاده قرار گرفته بود برای خط دو مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور توقف و سرویس سیستم ناوگان خط دو محوطه دیو و پارکینگ قطارها در ابتدای خط به مساحت ۱۳ هکتار در نظر گرفته شده است که شامل سالن و تجهیزات ویژه سرویس و تعمیر و شستشوی قطارها می باشد. ایستگاه‌های خط ۲ در عمق متوسط ۱۷ متر از سطح زمین احداث می‌شوند که در میان آن‌ها ایستگاه امام حسین (ع) با عمق ۳۴ متری از سطح زمین به دلیل تقاطع با خط یک قطار شهری شیراز عمیق‌ترین ایستگاه است، ایستگاه‌های استقلال و پانزده خرداد نیز جزء ایستگاه‌های عمیق خط ۲ هستند و به جز ایستگاه شکوفه که تنها ایستگاه روزمینی خط ۲ محسوب می‌شود سایر ایستگاه‌ها در دسته ایستگاه‌های نیمه عمیق با عمق بین ۱۵ تا ۲۲ متر قرار می‌گیرند. خط ۲ مترو از شهرک بهارستان در جنوب غربی شیراز آغاز شده و با عبور از بولوار عدالت، میدان بسیج، میدان امام حسین (ع)، میدان آزادی، بولوار آزادی، میدان اطلسی، بولوار گلستان از نزدیکی آرامگاه حافظ و آرامگاه سعدی نیز می‌گذرد. خط ۲ مترو با خطوط ۴، ۱ و ۶ قطار شهری شیراز به ترتیب در ایستگاه امام حسین (ع)، ایستگاه استقلال و ایستگاه رحمت تقاطع دارد. این خط عمدتاً به صورت زیرزمینی در حال احداث می باشد. خط ۲ حدود ۱/۱۵ کیلومتر طول داشته (۱۳۴۰۰ متر به صورت زیر زمینی و ۱۷۰۰ متر به صورت همسطح) و شامل دو مسیر تونلی مجزا، ۱۳ ایستگاه (۱۲ ایستگاه زیرزمینی و ۱ ایستگاه روزمینی)، مجموعه دیو و پارکینگ (در منتهی الیه جنوب غربی مسیر) و یک فضای محدود پارکینگ در انتهای شمال شرقی خط می باشد. در شکل (۱) نمایی از نقشه خطوط متروی شیراز آورده شده است.



شکل (۱): نمایی از نقشه خطوط متروی شیراز

۳- مراحل انجام کار

۳-۱- حالات شکست و تجزیه و تحلیل اثرات آن

ابزاری است که اولین بار از طرف سازمان ناسا در سال ۱۹۶۳ برای الزامات واضح قابلیت اطمینان پیشنهاد شد. از آن به بعد، FMEA به عنوان یک تکنیک قدرتمند به طور گسترده‌ای برای ایمنی سیستم و آنالیز قابلیت اطمینان تولیدات و فرآیندها در طیف وسیعی از صنایع به خصوص هوا فضا، هسته ای، خودرو و پزشکی مورد استفاده قرار گرفت. تکنیک FMEA در سال ۱۹۷۰ در تاسیسات هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفت و از سال ۱۹۷۷ در صنعت خودروسازی اجرا شد. شرکت‌های خودروسازی معروفی مانند سیتروئن و پژو نیز از ۱۹۸۰ شروع به استفاده از این تکنیک کردند. امروزه این تکنیک برای تمام سازمان‌ها مفید است. استفاده از این تکنیک ساده است و هنوز روش قدرتمندی برای مهندسی کیفیت فعال است که به شناسایی و شمارش نقاط ضعف در فاز اولیه مفهومی تولید و فرآیند می‌پردازد.

۳-۲- توابع و اهداف FMEA

یکی از بهترین ویژگی‌های FMEA شیوه کنشی آن به جای برخورد واکنشی با خطا است. به عبارت دیگر، FMEA کنشی قبل از بروز خطا است نه بعد از آن، بنابراین به منظور افزایش کارایی FMEA بهتر است در مرحله طراحی پردازش خطاهای احتمالی ورودی به سیستم را انجام داد. صرف هر مقدار زمان و هزینه برای اجرای جامع و دقیق FMEA در مرحله طراحی، امکان اعمال هرگونه تغییرات و اصلاحات را در مراحل بعد ساده و با هزینه کمی می‌سازد. تکنیک FMEA مجموعه فعالیت‌های سازماندهی شده‌ای است که برای دنبال کردن اهداف زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- شناسایی و تخمین خطاهای بالقوه در فرآیند کار و نتایج حاصل شده از این خطاها
- تعیین فعالیت‌هایی که می‌توانند احتمال وقوع خطاهای بالقوه را کاهش دهند و یا اینکه حذف کنند.

۳-۳- چگونگی اجرای FMEA

در این مطالعه یک الگوی پنج مرحله‌ای تدوین گردید و براساس آن و طبق اهداف از پیش تعیین شده مطالعه حاضر به صورت زیرانجام شد:

مرحله (۱): تعیین تیم بررسی کننده ریسک‌های ایمنی بهداشتی

برای اجرای این روش باید تیم FMEA شامل مهندسين متخصص و آشنا با فرآیند پروژه و همچنین متخصصینی که بیشترین آگاهی را در رابطه با فرآیند دارند، شکل بگیرد. یکی از مزایای کار تیمی این است که هر فعالیتی که تعریف می‌شود همیشه با موافقت همه واحدهای سازمان خواهد بود. این تیم مسئول همه فعالیت‌های مرتبط با ارزیابی از اولین مراحل تا اجرای اقدامات پیشنهادی و بررسی نتایج آن‌ها می‌باشد. در این مرحله موارد زیر نیز طی می‌شود.

- جمع آوری اطلاعات مربوط به فرآیند: سایت یا مکانی که در آن ارزیابی ریسک انجام می‌شود باید کاملاً شناسایی و نحوه فعالیت‌ها و فرآیندها به دقت بررسی شود.

- تقسیم واحد به زیر واحدهای تشکیل دهنده آن در صورت نیاز

در همین راستا واحدهای مختلف موجود در پروژه شناسایی و اطلاعات مربوط به فرآیندهای صورت گرفته در هر واحد جمع آوری گردید. سپس هر کدام به زیر واحدها یا همان فعالیت‌های زیرمجموعه آن واحد تفکیک شد. جدول شماره (۴-۱) واحدهای موجود در پروژه و تعداد زیر واحدهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

مرحله (۲): شناسایی و ثبت خطرات بالقوه

در این مرحله اعضای منتخب تیم FMEA با استفاده از تکنیک‌های جاری بازرسی ایمنی و بهداشتی اقدام به شناسایی تمامی تجهیزات و ماشین آلات، مراحل انجام کار مشاغل فعال و همچنین فرآیندهای اجرایی و ارزیابی شرایط محیط کار می‌نمایند، و تمام خطرات محیطی، تجهیزاتی، انسانی، خطرات مرتبط با مواد و ... که ایمنی را تهدید می‌کند و می‌تواند مخاطرات بهداشتی به وجود آورد را در نظر گرفته و حالات مختلف هر خطر نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مطالعه جهت جمع آوری اطلاعات مرتبط با عوامل زیان آور ایمنی و بهداشتی محیط‌ها و موقعیت‌های کاری از کاربرگ‌هایی که برای این منظور طراحی شد، استفاده گردید. این کاربرگ‌ها در واقع همان فرم‌های تجزیه و تحلیل ایمنی شغلی می‌باشند. این کاربرگ‌ها به طور نظام‌مند و سیستماتیک اطلاعات مرتبط با عوامل زیان آور محیط کار در رابطه با هر واحد را مورد بررسی قرار می‌دهند. شایان ذکر است که فعالیت‌ها و وظایف غیر روتین نیز می‌بایستی در شناسایی خطرات مد نظر اعضا تیم قرار گیرد. در این مطالعه به تعداد فعالیت‌های زیر مجموعه هر کدام از واحدها (زیر واحدهای موجود) خطر شناسایی شد. به عنوان مثال هر ۶۱ فعالیت شناسایی شده در واحد سگمنت سازی خطرناک و دارای عوامل زیان آور مختلفی تشخیص داده شد.

مرحله (۳): تجزیه و تحلیل ریسک

اعضای تیم FMEA بعد از شناسایی و ثبت تمامی خطرات مشاغل فعال طبق فرم JSA اقدام به تجزیه و تحلیل ریسک مطابق با کاربرگ ارزیابی ریسک تکنیک حالات شکست و تجزیه و تحلیل اثرات آن می‌کنند، که در واقع بخش کلیدی فرآیند ارزیابی و آنالیز خطرات ایمنی و بهداشتی است و به تیم اجازه می‌دهد که مهم‌ترین ریسک‌های موجود در سیستم را درک کنند تا در مرحله بعد اقدامات کنترلی برای انواع خطر را ارائه دهند. ارزیابی ریسک فرآیند برآورد احتمال وقوع یک رویداد و بزرگی یا شدت اثرات زیان آور آن است. در این مطالعه احتمال وقوع یک رویداد توسط یک ماتریس در ۶ حالت تعریف شده که حالت یک آن نشان دهنده این است که وقوع خطر یا رخداد شکست حتمی است (سابقه نشان داده که خطر معمولاً یک یا چند بار در هفته به وقوع می‌پیوندد) و رتبه ۶ یعنی وقوع خطر بعید به نظر می‌رسد. برای رتبه بندی شدت خطر نیز از یک ماتریس شش حالت‌ها استفاده شده که حالت اول آن یعنی هیچگونه اثر سوء شناخته شده‌ای برای کارکنان، محیط زیست و دارایی‌های سازمان ندارد و حالت ۶ نشان دهنده این است که خطر باعث از کارافتادگی دائم و یا فوت حداقل یک نفر از کارکنان می‌گردد و خسارات مالی بیش از یک میلیارد ریال به بار می‌آورد. قابلیت کشف (کشف عیب یا خطر) نیز در شش حالت تعریف شده که حالت اول آن گویای این است که با کنترل‌های موجود در سیستم خطرهای بالقوه به طور صد در صد ردیابی و آشکار می‌گردد (احتمال کشف خطر وجود دارد و اقدامات فعلی کافی است) و حالت ۶ یعنی مطلقاً امکان تشخیص موجود نیست و هیچگونه کنترلی وجود ندارد یا در صورت وجود قادر به کشف خطر بالقوه و شکست‌های احتمالی نیست (نیاز به تجهیزات فوق تخصصی می‌باشد). شدت باید برای بدترین حالت ممکن وقوع یک رویداد در نظر گرفته شود. اگر تیم تأثیرات چندگانه خطر را شناسایی کرد بایستی همه آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد و شدیدترین پیامد بالقوه را انتخاب کند.

مرحله (۴): محاسبه عدد اولویت ریسک (Risk Priority Number)

برای محاسبه RPN، تیم FMEA باید مقادیر سه فاکتوری که در مرحله قبل به دست آمده، یعنی شدت (Severity)، احتمال وقوع (Occurrence) و قابلیت کشف (Detect) را در یکدیگر ضرب کند. معادله یک چگونگی محاسبه RPN را نشان می دهد.

$$RPN = (S) \times (O) \times (D) \quad (۱)$$

مقادیر RPN می تواند بین ۱ تا ۲۱۶ متفاوت باشد و خطاها یا نقص-ها با توجه به مقدار محاسبه شده RPN برای آن ها اولویت بندی می شوند. خطاهایی که مقادیر RPN بالاتری دارند دارای برتری اولویتی بالاتری از لحاظ تجزیه و تحلیلی و تخصیص منابع می باشند، بنابراین تیم FMEA باید روی این خطاها تمرکز کند. عدد اولویت ریسک در واقع نقش یک جدا کننده خطرات قابل قبول و غیر قابل قبول در سیستم مورد نظر را دارد. در این مطالعه با توجه به بررسی های انجام شده توسط تیم FMEA در رابطه با ریسک-های قابل قبول و غیر قابل قبول و حساسیت و شرایط پروژه، مقادیر RPN در سه سطح (کم) $=1$ - 25 ، متوسط $=26-50$ ، زیاد $=51-216$ اولویت بندی شد. لازم به ذکر است خطاهایی که حداکثر مقدار شدت را دارند (یعنی خطر مرگ وجود دارد) بدون توجه به مقدار RPN آن ها، سطح ریسک آن ها High در نظر گرفته شده است.

مرحله (۵): اقدامات کنترلی و ارائه پیشنهادات

بعد از ارزیابی ریسک تیم باید اقدامات کنترلی که به کاهش یا به حداقل رسانیدن ریسک-های غیر قابل قبول کمک می کند را ارائه نمایند. برای مثال حذف یک ماده شیمیایی یا جانشینی آن با یک ماده بی-خطر باعث حذف خطر خواهد شد. اگر نتوان ریسک را حذف کرد و یا انجام آن غیرممکن باشد باید اقدامات کنترلی مناسب دیگری برای کارکنان در فرآیندها توصیه کرد (مانند استفاده از لوازم حفاظت فردی).

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- ارزیابی ریسک های ایمنی و بهداشتی به روش FMEA

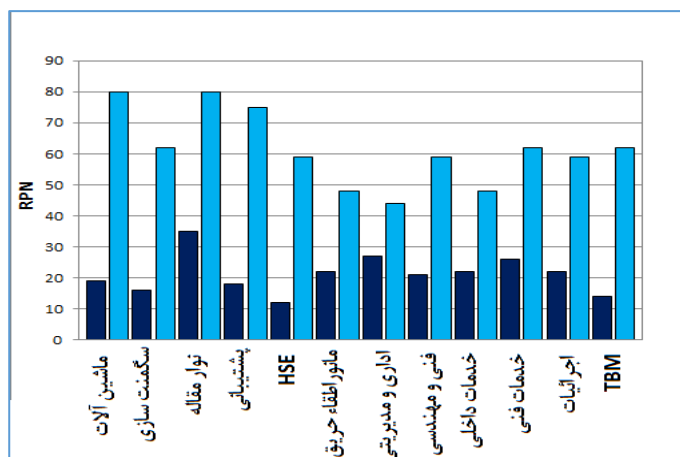
جدول شماره (۱) اطلاعات مربوط به فراوانی سطوح ریسک با توجه به عدد RPN به دست آمده برای هر فعالیت و درصد سطوح ریسک ثانویه یعنی بعد از پیاده سازی اقدامات کنترلی را در واحدهای مختلف ارائه می کند. نکته قابل توجه بعد از پیاده سازی اقدامات کنترلی به صفر رسیدن درصد سطوح ریسک بالا می باشد. همچنین یکی از ستون های این جدول مربوط به درصد سطوح ریسک بالا در هر واحد می باشد. واحد TBM با $RPN = 17$ ، در سطح ریسک بالا دارای بیشترین فراوانی از این لحاظ است و بعد از آن به ترتیب واحدهای سگمنت سازی و ماشین آلات قرار دارند. اما از لحاظ درصد سطح ریسک بالا به ترتیب واحدهای اجرائیات، TBM و خدمات فنی و HSE (هر دو با درصد $28/57$) رتبه های اول تا سوم را دارند.

با توجه به اطلاعات به دست آمده از جدول (۱) مجموع فعالیت-ها صورت گرفته در تمامی واحدهای پروژه ۲۹۳ عنوان فعالیت بوده است که واحدهای ماشین آلات، سگمنت سازی و TBM به ترتیب بیشترین تعداد فعالیت های صورت گرفته را به خود اختصاص دادند. تحلیل ایمنی اولیه فعالیت ها، رجوع به مخاطرات و حوادث مستند گذشته و گرفتن نظرات متخصصین حالات ممکن خطایی که در هر فعالیت پتانسیل بروز داشت را مشخص کرد. اثراتی که در صورت بروز خطاها روی خواهند داد لیست شده و علل بروز آن ها نیز ثبت شد. پارامترهای شدت، احتمال وقوع و قابلیت کشف با توجه به ماتریس های ریسک مربوط به هر پارامتر تعیین شد و مقادیر RPN از ضرب آن ها به دست آمد.

شکل (۱) نشان دهنده بیشترین و کمترین عدد RPN قبل از ارائه و پیاده سازی اقدامات کنترلی در واحدهای موجود در پروژه است. همانطور که از این شکل پیداست بیشترین عدد RPN به طور مشترک مربوط به واحدهای ماشین آلات و نوار نقاله با $RPN = 80$ و همچنین واحد پشتیبانی با $RPN = 75$ و کمترین عدد مربوط به واحدهای HSE با عدد $RPN = 12$ و سگمنت سازی و TBM با عدد $RPN = 16$ می باشد.

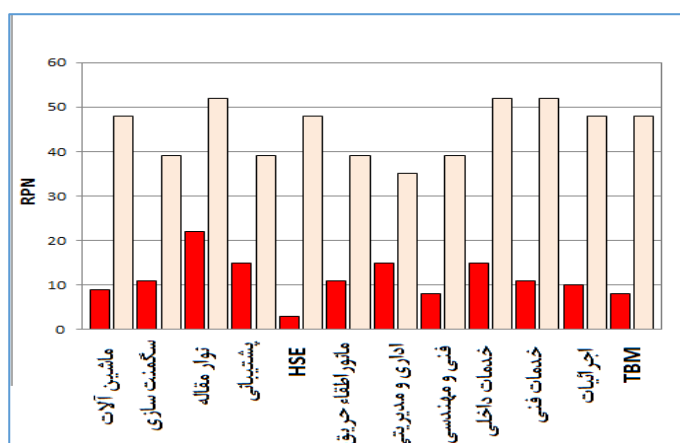
جدول (۱): سطوح ریسک اولیه، درصد ریسک محاسبه شده و سطح ریسک کنترل خطرات بالقوه

نام واحد	تعداد فعالیت های خطرناک	سطوح ریسک	درصد سطوح ریسک بالا و متوسط	سطح ریسک کنترل شده (درصد)
اجرائیات	۱۱	کم = ۱	زیاد = ۳۶/۳۶ متوسط = ۵۴/۵۴	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۶		
		زیاد = ۴		
TBM	۵۵	کم = ۲	زیاد = ۳۱ متوسط = ۶۵/۴۵	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۳۶		
		زیاد = ۱۷		
خدمات فنی	۱۴	کم = ۰	زیاد = ۲۸/۵۷ متوسط = ۷۱/۴۳	کم = ۸۵/۷۱ متوسط = ۱۴/۲۵
		متوسط = ۱۰		
		زیاد = ۴		
واحد HSE	۱۴	کم = ۴	زیاد = ۲۸/۵۷ متوسط = ۴۲/۸۶	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۶		
		زیاد = ۴		
سگمنت سازی	۶۱	کم = ۷	زیاد = ۲۶/۲۲ متوسط = ۶۲/۳۰	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۳۸		
		زیاد = ۱۶		
فنی مهندسی	۹	کم = ۰	زیاد = ۲۲/۲۲ متوسط = ۷۷/۷۷	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۷		
		زیاد = ۲		
نوار نقاله	۱۴	کم = ۰	زیاد = ۲۱/۴۳ متوسط = ۷۸/۵۷	کم = ۹۲/۸۶ متوسط = ۱۴/۰۷
		متوسط = ۱۱		
		زیاد = ۳		
ماشین آلات	۶۷	کم = ۸	زیاد = ۱۹/۴۰ متوسط = ۶۸/۶۵	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۴۶		
		زیاد = ۱۳		
مانور اطفاء حریق	۸	کم = ۰	زیاد = ۱۲/۵۰ متوسط = ۸۷/۵۰	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۷		
		زیاد = ۱		
خدمات داخلی	۲۱	کم = ۱	زیاد = ۴/۷۶ متوسط = ۹۰/۴۷	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۱۹		
		زیاد = ۱۷		
پشتیبانی	۱۳	کم = ۳	زیاد = ۰ متوسط = ۷۶/۹۲	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۱۹		
		زیاد = ۰		
واحد های اداری و مدیریتی	۶	کم = ۰	زیاد = ۰ متوسط = ۱۰۰	کم = ۱۰۰
		متوسط = ۶		
		زیاد = ۰		



شکل (۱): کمترین و بیشترین میزان RPN قبل از پیاده سازی اقدامات اصلاحی به تفکیک واحدها

شکل (۲) بیشترین و کمترین عدد RPN بعد از پیاده سازی اقدامات کنترلی و اصلاحی را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که بیشترین عدد RPN در این مرحله مربوط به واحدهای خدمات فنی، نوار مقاله و خدمات داخلی با عدد RPN برابر با ۲۷ می‌باشد. کمترین RPN نیز بعد از پیاده سازی اقدامات اصلاحی متعلق به واحد HSE با $RPN=2$ و پس از آن واحدهای فنی مهندسی و TBM با عدد RPN برابر با ۴ می‌باشد.



شکل (۲): کمترین و بیشترین میزان RPN بعد از پیاده سازی اقدامات اصلاحی به تفکیک واحدها

۴- نتیجه‌گیری

- (۱) در این مطالعه در خصوص ارزیابی ریسک‌های ایمنی و بهداشتی پروژه جمعاً ۱۹۳ عنوان فعالیت کاری و ۱۹۳ خطر مرتبط با این فعالیت‌ها در پروژه شناسایی و میزان احتمال کشف خطرات، شدت حادثه و احتمال وقوع حوادث و سطح ریسک‌های آن‌ها در شرایط عادی و قبل از اقدامات کنترلی در پروژه بررسی و ثبت گردیده و سپس بعد از پیاده سازی اقدامات کنترلی مناسب مهندسی، مدیریتی، حذف خطرات یا استفاده از وسائل حفاظت فردی مجدداً میزان احتمال کشف خطر و شدت حادثه، احتمال وقوع حوادث و سطح ریسک‌ها تعیین گردیده که اکثراً قابل قبول و به سطح ریسک پایین تقلیل یافته‌اند.
- (۲) ارزیابی ریسک‌های انجام شده که بصورت دوره‌ای و مستمر و با هرگونه تغییر در پروژه انجام گردیده باعث شد که خطر حوادث جانی و مالی و خسارات تجهیزاتی و ... در پروژه کاهش یافته، بطوریکه پروژه با حداقل حوادث انجام شد.
- (۳) ارزیابی ریسک‌های بهداشتی در کارگاه باعث سلامت نیروی انسانی کارگاه و انجام معاینات سالیانه گردیده است. همچنین ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی در کارگاه باعث کاهش اثرات سوء فعالیت‌های کاری پروژه بر محیط زیست گردیده است.
- (۴) در حالت عادی ۱۲ مورد سطح ریسک پایین، ۱۳۷ مورد سطح ریسک متوسط و ۴۴ مورد سطح ریسک بالا داشته‌اند. که پس از پیاده سازی اقدامات کنترلی تمامی این ریسک‌ها به سطح ریسک پایین تقلیل یافتند.

منابع

- [۱] محمدفام، ایرج. (۱۳۸۲). مهندسی ایمنی، انتشارات فن آوران. صفحه ۳۳.
- [۲] کشوری، عبدالرحمن. (۱۳۹۲). مدیریت سلامت، ایمنی و محیط زیست در حفاری مکانیزه، چاپ اول، انتشارات آوای قلم، صفحه ۵۶.
- [3] Brito, A.J., et al. (2010). A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory, *European Journal of Operational Research*, 200: 812-821.
- [۴] تیرگر، الف. (۱۳۸۷). بهداشت حرفه ای، چاپ سوم، انتشارات اندیشه رفیع، ۲۱-۳۳.
- [۵] عماد، م. (۱۳۸۸). ارزیابی ریسک در پروژه های حفاری مکانیزه تونل های مترو از منظر مسائل ژئوتکنیکی، پایان نامه دوره کارشناسی/ارشد، ۱۶-۲۵.
- [6] Zhixing, Gu. (2018). History review of nuclear reactor safet. *Annals of Nuclear Energy*, 120; 682-690.
- [۷] کاظمی، بابک. (۱۳۸۲). ایمنی و بهداشت کار (حفاظت صنعتی)، چاپ دوم، پشتون، صفحه ۹-۱۲.
- [8] Faisal I. Khan, S.A. Abbasi. (2000). Towards automation of HAZOP with a new tool EXPERTOP. *Environmental modeling & software* 15; 67 – 77.
- [۹] حبیبی، ا. (۱۳۸۸). ایمنی کاربردی در صنایع، انتشارات فن آوران، صفحه ۳۸-۴۴.
- [10] R. King and J. Magid. (1979). *Industrial Hazard and Safety Handbook*, Newnes Butterworth's, London, pp. 34-38.

به کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت شده ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به منظور پیش‌بینی مقاومت و روانی مارشال آسفالت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کد مقاله: ۲۵۵۷۷

حسن حسین زاده^{۱*}، علیرضا حسینی^۲، سینا آرمان^۳

چکیده

هدف اصلی این تحقیق استفاده از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به منظور پیش‌بینی مقاومت و روانی مارشال مخلوط آسفالتی می‌باشد. با این هدف، ۲۱۶ نمونه به روش طرح اختلاط مارشال با شش درصد قیر متفاوت از ۳٫۵ تا ۶ و حاوی ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد از فیلر رایج بین گرم، خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به‌طور جداگانه ساخته شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان داد که جایگزینی فیلر رایج با RHA و FA خواص مارشال را بهبود می‌بخشد و مقادیر قیر بهینه مخلوط اصلاح‌شده را کاهش می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از پارامترهای مارشال اندازه‌گیری شده‌ی ۷۲ نمونه شامل نوع فیلر، درصد فیلر، درصد قیر، وزن مخصوص، درصد فضای خالی، فضای خالی سنگ‌دانه و فضای خالی پر شده با قیر و با به کارگیری مدل‌های SVM و RF، مقاومت و روانی مارشال مدل‌سازی شد. ۷۰ درصد نمونه‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد نمونه به‌منظور ارزیابی مدل‌های ساخته‌شده مورد استفاده قرار گرفت. نزدیک بودن نتایج حاصل مدل‌ها و مقادیر واقعی نشان‌دهنده عملکرد مثبت مدل‌ها در پیش‌بینی مقاومت و روانی مارشال آسفالت است. مقدار ضریب تعیین برای مدل‌سازی مقاومت مارشال برای مدل SVM و RF به ترتیب ۰٫۸۷۵ و ۰٫۸۲ و برای مدل‌سازی روانی مارشال به ترتیب ۰٫۸۷۱ و ۰٫۸۱ به دست آمد. می‌توان از این روش‌ها به‌منظور اجتناب از آزمایش‌های وقت‌گیر و مکرر آزمایشگاهی بهره برد.

واژگان کلیدی: ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، طرح اختلاط مارشال، خاکستر پوسته برنج، خاکستر بادی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش راه و ترابری، کارشناس تحقیق و توسعه سازمان عمران شهرداری مشهد (نویسنده مسئول) hosseinzadeh-ha@mashhad.ir

۲- کارشناس مسئول امور تحقیق و توسعه سازمان عمران شهرداری مشهد

۳- رییس اداره برنامه ریزی و توسعه سرمایه انسانی سازمان عمران شهرداری مشهد

رشد زیاد تعداد وسایل نقلیه و بارهای محورها مستلزم افزایش بیشتر شبکه جاده‌ها و در نتیجه مصالح طبیعی مورد استفاده در ساخت آن است (Al-Humeidawi & Mandal, 2018; Al-Khuzai et al., 2019; Al-Khuzai et al., 2020). ارائه روسازی مقرون به صرفه، ایمن و بادوام هدف مسئولان مربوطه جهت تحمل بارهای پیش‌بینی شده است (Airey et al., 2003). مخلوط آسفالتی به دلیل عملکرد خوب در حین سرویس‌دهی، پرکاربردترین ماده در روسازی می‌باشد. مخلوط آسفالتی ترکیبی از سنگ‌دانه، قیر و فیلر است. فیلر جز مهمی به حساب می‌آید زیرا ساختار مخلوط از یک سیستم پراکنده با ترکیب قیر و فیلر تشکیل می‌شود. فعل و انفعال فیزیکی و شیمیایی بین قیر و فیلر تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر عملکرد HMA دارد. همچنین فیلر می‌تواند فضای خالی مخلوط آسفالت را پر کند که بر پایداری تأثیر می‌گذارد و مقاومت مخلوط را در برابر تغییر شکل پلاستیک در دماهای بالا افزایش می‌دهد (Arabani et al., 2017). استفاده از پرکننده در آسفالت گرم برافزایش عملکرد خستگی، رفتار شیارشدگی و مقاومت در برابر رطوبت تأثیر می‌گذارد (Arabani et al., 2017; Chen et al., 2015; Kim et al., 2018; Tahami et al., 2018; al., 2003). مطالعات مختلفی برای بررسی تأثیر مواد پرکننده معدنی بر رفتار مخلوط‌های قیری و نقش آن‌ها در تقویت پیوند بین قیر و سنگ‌دانه انجام شده است. درحالی‌که رایج‌ترین فیلر در حال حاضر سنگ آهک است اما انواع مختلف فیلر شامل سیمان پرتلند (Guha & Assaf, 2020)، پودر شیشه (Lachance-Tremblay et al., 2016)، گرد و گرد سنگ مرمر (Chandra et al., 2002)، گل قرمز (Choudhary et al., 2018) و ... می‌شود. خاکستر پسته برنج^۱ و خاکستر بادی^۲ فیلرهایی هستند که به تازگی تحقیقات زیادی در مورد آن‌ها در حال انجام است. یکی از عظیم‌ترین مواد زائد تولید شده از پسته برنج در ایران، خاکستر پسته برنج است. این ماده برای تهیه سوخت کارخانجات کارخانه برنج استفاده می‌شود. این امر منجر به نگرانی‌های بسیاری از جمله مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی شده است. طی یک آمار در سال ۲۰۱۳ تقریباً ۵۰۰ میلیون تن پسته برنج تولید می‌شود که تقریباً ۲۰ درصد آن به RHA تبدیل می‌شود (Sargin et al., 2013). خاکستر بادی محصول فرعی سوخت زغال‌سنگ بوده که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن است (Montini et al., 2018). تحقیقات زیادی به منظور ارزیابی تأثیر استفاده از این دو نوع فیلر انجام شده است که همگی نشان‌دهنده بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی و کاهش درصد قیر بهینه می‌باشد (Al-gurah & Al-Humeidawi, 2021; Arabani & Tahami, 2017; Helal et al., 2020; Lu et al., 2020; Mirković et al., 2019; Mistry et al., 2019; Tahami et al., 2018; al., 2020).

از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که در اختلاط آسفالت مورد توجه قرار می‌گیرد مقاومت^۳ و روانی^۴ مارشال آسفالت می‌باشد (Ozgan, 2009). پایین بودن مقدار مقاومت مارشال آسفالت باعث پایین آمدن کارایی آن و ایجاد مشکلاتی از جمله خستگی و ترک‌ها می‌شود به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار مقاومت آسفالت نشان‌دهنده توانایی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شیار شدگی و برآمدگی تحت بارگذاری سنگین ترافیکی است (Choubane et al., 2000) و روانی معیاری است از میزان وارفتن یا به عبارت دیگر تغییر شکل آسفالت تحت تأثیر بار وارده می‌باشد به‌طوری‌که هرچه تغییر شکل نسبی بیشتر باشد میزان وارفتن آسفالت پخش شده تحت تأثیر بار بیشتر خواهد بود. بتن آسفالتی از یک استخوان‌بندی مصالح سنگی خوب دانه‌بندی شده با فضای خالی مناسب که قیر سطح دانه‌ها را اندود کرده و آن‌ها را به یکدیگر چسبانده است تشکیل شده و مرغوب‌ترین نوع آسفالت به شمار می‌رود. مقاومت مارشال بتن آسفالتی نیز تابعی از دانه‌بندی، ویژگی‌های مصالح سنگی و همچنین درصد و نوع قیر مصرفی آن می‌باشد (Özgan & Saruhan, 2010). به دلیل متغیرها و پیچیدگی روابط بین آن‌ها و مقاومت مارشال، تاکنون رابطه تحلیلی ریاضی بین این متغیرها و مقاومت مارشال و تأثیر متقابل آن‌ها ارائه نگردیده و صرفاً به کمک آزمایش تعیین می‌گردد. از آنجائیکه ساخت و توسعه راه‌ها از مبانی پیشرفت اقتصادی و فرهنگی کشورها محسوب می‌شود و با توجه به هزینه‌های سنگین آسفالت و نگهداری آن ضرورت استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته‌تر در طرح و کنترل کیفی آسفالت روزبه‌روز محسوس‌تر می‌شود (Ozgan, 2009). حجم بالای داده‌ها در مطالعات و ارتباط پیچیده موجود بین معیار باعث شده تا روش‌های تحلیل سنتی دارای عدم قطعیت بالایی باشند. از این‌رو به‌کارگیری روش‌هایی که توانایی تحلیل و کشف ارتباط پیچیده فضایی را در بین داده‌های اولیه دارا باشند توسعه یافته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به خانواده روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین^۵ و تشخیص الگو^۶ اشاره کرد که به‌کارگیری آن‌ها بخصوص در سالیان اخیر محبوبیت بسیاری در بین دانشمندان پیدا کرده است. در دو دهه گذشته الگوریتم‌های هوش مصنوعی در حل مسائل مرتبط با علوم مهندسی به‌صورت وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است (Lary et al., 2016). الگوریتم‌های آموزش ماشین به‌عنوان زیرشاخه‌ای از علم هوش مصنوعی، به‌منظور دریافت جوابی با درصد اطمینان قابل قبول توسعه یافته است. هدف از آموزش ماشین درواقع بهینه‌سازی عملکرد سیستم با استفاده از تجربیات گذشته

1 Rice Husk Ash

2 Fly Ash

3 Stability

4 Flow

5 Machine Learning

6 Pattern recognition

است (Kanevski, 2009). یادگیری ماشین یکی از مهم‌ترین بخش‌های هوش مصنوعی است که از علوم کامپیوتر آغاز شده و به سرعت در حال رشد است به طوری که در حوزه‌های دیگر علوم نیز کاربردهای فراوانی یافته است. یکی از تعاریف یادگیری ماشین آن‌طور که از سوی تام میشل ارائه گردیده است بدین شرح است: نوعی برنامه کامپیوتری که با توجه به برخی وظایف گروه T و عملکرد P، تجربه E را شکل می‌دهد، اگر عملکرد آن در گروه وظایف T آن‌طور که توسط P اندازه‌گیری شده باتجربه E بهبود پیدا کند (Mitchell, 1999). به عبارت ساده‌تر، اگر یک برنامه کامپیوتری بتواند عملکرد خود در انجام یک وظیفه را با استفاده از تجربیات قبلی‌اش بهبود ببخشد آنگاه می‌توانید بگویید که آن ماشین یاد گرفته است؛ بنابراین، یادگیری ماشین عبارت از بهینه سازی یک عملکرد با استفاده از تجربیات گذشته است. فرآیند آموزش معمولاً با به کارگیری اطلاعات تجربی از هدف موردبررسی صورت گرفته و پس از ایجاد مدل آموزشی، از آن به عنوان مدلی جهت پیش‌بینی و یا طبقه‌بندی رفتار سیستم موردبررسی استفاده می‌شود (Burkov, 2020; Kanevski, 2009). الگوریتم‌های یادگیری ماشین بر اساس نوع نحوه آموزش به چهار نوع نظارت‌شده^۱، نظارت‌نشده^۲، نیمه نظارتی^۳ و یادگیری تقویت شونده^۴ تقسیم می‌شوند. در الگوریتم‌های نظارت‌شده با دو نوع از متغیرها سروکار داریم. نوع اول که متغیرهای مستقل نامیده می‌شوند، یک یا چند متغیر هستند که قرار است بر اساس مقادیر آن‌ها، یک متغیر دیگر را پیش‌بینی کنیم. نوع دوم هم متغیرهای وابسته یا هدف یا خروجی هستند و قرار است مقادیر آن‌ها را به کمک این الگوریتم‌ها پیش‌بینی کنیم. برای این منظور باید تابعی ایجاد شود که ورودی‌ها (متغیرهای مستقل) را گرفته و خروجی موردنظر (متغیر وابسته یا هدف) را تولید کند. فرآیند یافتن این تابع که در حقیقت کشف رابطه‌ای بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته است، فرآیند آموزش^۵ نامیده می‌شود که روی داده‌های موجود (داده‌هایی که هم متغیرهای مستقل و هم متغیرهای وابسته آن‌ها معلوم می‌باشد) اعمال می‌شود و تا رسیدن به دقت لازم، ادامه می‌یابد (Ray, 2019). الگوریتم‌های درخت‌های تصمیم^۶، جنگل‌های تصادفی^۷، K نزدیک‌ترین همسایه^۸، ماشین بردار پشتیبان^۹، روش‌های مبتنی بر نظریه بیز^{۱۰} و رگرسیون لجستیک^{۱۱} نمونه‌ای از این یادگیری می‌باشند (Jalil et al., 2019).

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح سنگی

از مصالح کربناته خردشده شن ۱۹-۲۵ میلی‌متر (مطابق با دانه‌بندی رده ۵ جدول ۲ استاندارد ASTM C33)، شن ۱۹-۱۲ میلی‌متر (مطابق با دانه‌بندی رده ۶۷ جدول ۲ استاندارد ASTM C33)، شن ۱۲-۶ میلی‌متر (مطابق با دانه‌بندی رده ۸ جدول ۲ استاندارد ASTM C33) و ماسه ۰-۶ میلی‌متر (مطابق با دانه‌بندی رده ۴ جدول ۱ استاندارد ASTM D1073) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی مصالح در جدول ۱ شرح داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی و به منظور دستیابی به حدود دانه‌بندی پیوسته D4 جدول ۱ استاندارد ASTM D3515، درصد وزنی رد شده مخلوط مصالح سنگی به شرح جدول ۲ و شکل ۱ به دست آمد.

جدول ۱: ارزیابی خواص سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

ویژگی	مقدار
ارزش ماسه‌ای (ASTM D2419)	۸۲
درصد شکستگی (ASTM D5821)	۹۲
سایش لس‌انجلس (AASHTO-T96)	۲۴
شاخص تطویل و تورق (BS-812)	تطویل
	تورق
وزن مخصوص	درشت‌دانه (AASHTO-T85)
	ریزدانه (AASHTO-T84)
جذب آب	درشت‌دانه (AASHTO-T85)
	ریزدانه (AASHTO-T84)

1 Supervised

2 Unsupervised

3 Semi supervised

4 Reinforced

5 Train

6 Decision tree

7 Random Forest

8 K-Nearest neighbor

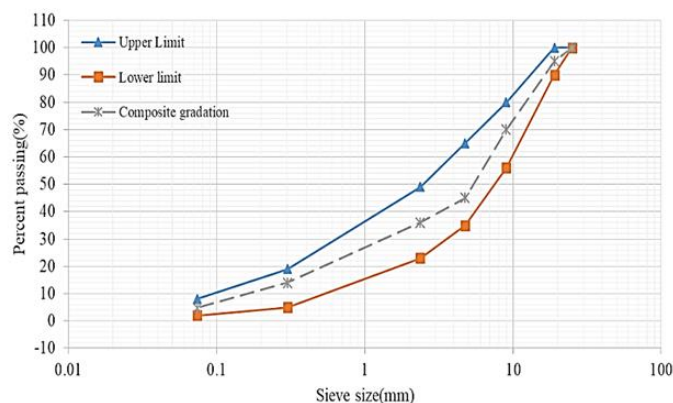
9 Support vector machine

10 Bayes theory

11 Logistic regression

جدول ۲: دانه‌بندی به‌دست‌آمده مخلوط آسفالتی مطابق با رده D-4 استاندارد ASTM D3515

سایز الک (mm)	25mm	19mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	0.3mm	0.075mm
حدود بالا و پایین رده D4 (%)	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	۸۰-۵۶	۶۵-۳۵	۴۹-۲۳	۱۹-۵	۸-۲
حدود به‌دست‌آمده (%)	۱۰۰	۹۵	۷۰	۴۸	۲۶	۱۴	۲،۴۶،۸



شکل ۱: دانه‌بندی به‌دست‌آمده مطابق با رده D-4 استاندارد ASTM D3515

۲-۲- قیر

قیرهای خالص مصرفی در راه‌سازی براساس طبقه‌بندی درجه نفوذ^۱ و عملکردی^۲ تقسیم می‌شوند (Asphalt, 2015). قیر رایج مورد استفاده در مشهد، قیر درجه عملکردی PG64-22 می‌باشد که در این تحقیق این نوع قیر که از شرکت نفت جی تهیه شده استفاده شده است. خصوصیات قیر که در آزمایشگاه کنترل کیفیت شهرداری مشهد مورد بررسی قرار گرفته است در جدول ۳ شرح داده شده است.

جدول ۳: خواص قیر PG64-22 مورد استفاده در این مطالعه

قیر اصلی			
دمای اشتعال	۳۰۰		
	دمای آزمایش (°C)	۱۳۵	
ویسکوزیته (ASTM D4402)	نتیجه آزمایش (پاسکال ثانیه)	۰،۳۵۰	
	دمای آزمایش (°C)	۶۴	۷۰
برش دینامیکی (ASTM D7175)	نتیجه آزمایش $G^*/\sin\delta$ کیلوپاسکال	۱،۰۳۱	۰،۵۴۴
	اون لایه‌نازک متحرک قیر (ASTM D2872)		
افت وزنی، درصد	۰،۰۱		
برش دینامیکی (ASTM D7175)	دمای آزمایش (°C)	۶۴	۷۰
	نتیجه آزمایش $G^*/\sin\delta$ کیلوپاسکال	۲،۳۵۰	۱،۰۴۲
آزمون تسریع پیرشدگی قیر (ASTM D6521)			
دمای پیرشدگی (°C)	۱۰۰		
	دمای آزمایش (°C)	۲۵	۲۲
برش دینامیکی (ASTM D7175)	نتیجه آزمایش $G^*/\sin\delta$ کیلوپاسکال	۲۶۲۰	
	دمای آزمایش (°C)	-۱۲	-۱۸
سفتی خزش خمشی (ASTM D6618)	نتیجه آزمایش سفتی خزش مگا پاسکال	۱۲۳	۲۵۷
	نتیجه آزمایش ضریب m	۰،۳۲۴	۰،۲۶۳

1 Penetration Grad
2 Performance Grade

۳-۲- فیلر

در این مطالعه دو نوع فیلر به عنوان جایگزین فیلر رایج استفاده شد: خاکستر پسته برنج تهیه شده از شرکت گیلان کشت و خاکستر بادی تهیه شده از شرکت آفاتوس استفاده شده است. هر دو محصول RHA و FA مستقیماً در هنگام احتراق تولید می شوند. فیلر رایج (CF) مورد استفاده در مخلوط آسفالتی که از بین گرم به دست می آید نیز به منظور مقایسه نتایج در این تحقیق استفاده شده است. جدول ۴ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فیلرهای مورد مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۴: خواص فیزیکی و شیمیایی فیلرهای مورد مطالعه

فیلر	ترکیب شیمیایی								خواص فیزیکی
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI	SG
Current filler (CF)	۱۰,۹۸	۳۴,۵۹	۱,۷	۰,۰۵	۱۲	۰,۳	۰,۳۹	۳۹,۰۵	۲,۵۴۹
RHA	۹۶,۰۸	۰,۲۴	۰,۲۱	۰,۱۴	۰,۴۸	۰,۵۱	۰,۱۲	۱,۶۴	۲,۱۱۵
FA	۲۰	۳	۶	۹	۲۸	۶	۵	۳	۲,۲۳۰

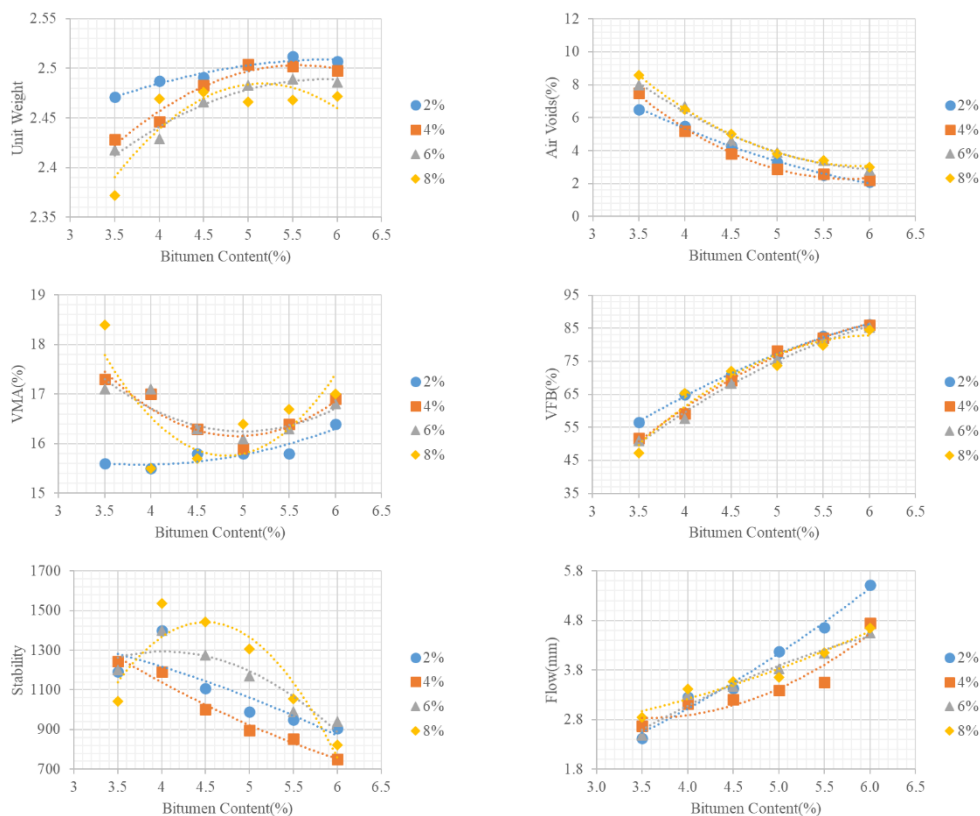
۳- طراحی مخلوط آسفالتی

مخلوط آسفالتی در حال حاضر به سه روش مختلف طرح می شوند که عبارتند از: آسفالت ممتاز، مارشال و ویم (Asphalt, 2015). در این مطالعه روش مارشال جهت طراحی مخلوط آسفالتی با دانه پیوسته با درصدهای مختلف فیلر و نوعهای مختلف فیلر به منظور رسیدن به میران قیر بهینه استفاده شد. دستورالعملهای آزمایش مارشال توسط انجمن آزمایش و مصالح آمریکا و انجمن راه و ترابری ایالتی آمریکا استاندارد شده اند. برای تهیه نمونه ها، سنگ دانه ها و فیلرها برای صفر شدن رطوبت در دمای ۱۰۰±۵ درجه گرم شدند. طبق دستورالعملهای مشخص شده در نشریه MS-2، دماهایی که باید قیر را گرم کرد تا ویسکوزیته کینماتیکی قیر به ۱۵۰-۱۹۰ و ۲۵۰-۳۱۰ که به ترتیب نشان دهنده دمای اختلاط و تراکم می باشد (Asphalt, 2015)، برسد تعیین شد. براساس این معیار دمای اختلاط و تراکم برای همه مخلوطها به ترتیب ۱۵۵-۱۶۵ و ۱۴۰-۱۴۵ نظر گرفته شد. سنگ دانه ها با دانه بندی مشخص شده، فیلرها با درصدهای ۲ تا ۸ درصد و قیر با درصدهای ۳,۵ تا ۶,۵ درصد در دمای اختلاط کاملاً مخلوط شدند و متعاقباً تراکم با چکش اتوماتیک مارشال (۷۵ ضربه در هر طرف) در دمای تراکم انجام شد تا نمونه مارشال با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۶۳,۵ میلی متر تولید شود. سه نمونه برای هر درصد قیر تهیه شد که در مجموع ۲۱۶ نمونه (۶ نوع درصد قیر، ۳ مدل فیلر در ۴ درصد مختلف و سه نمونه برای هر کدام) ساخته شد.

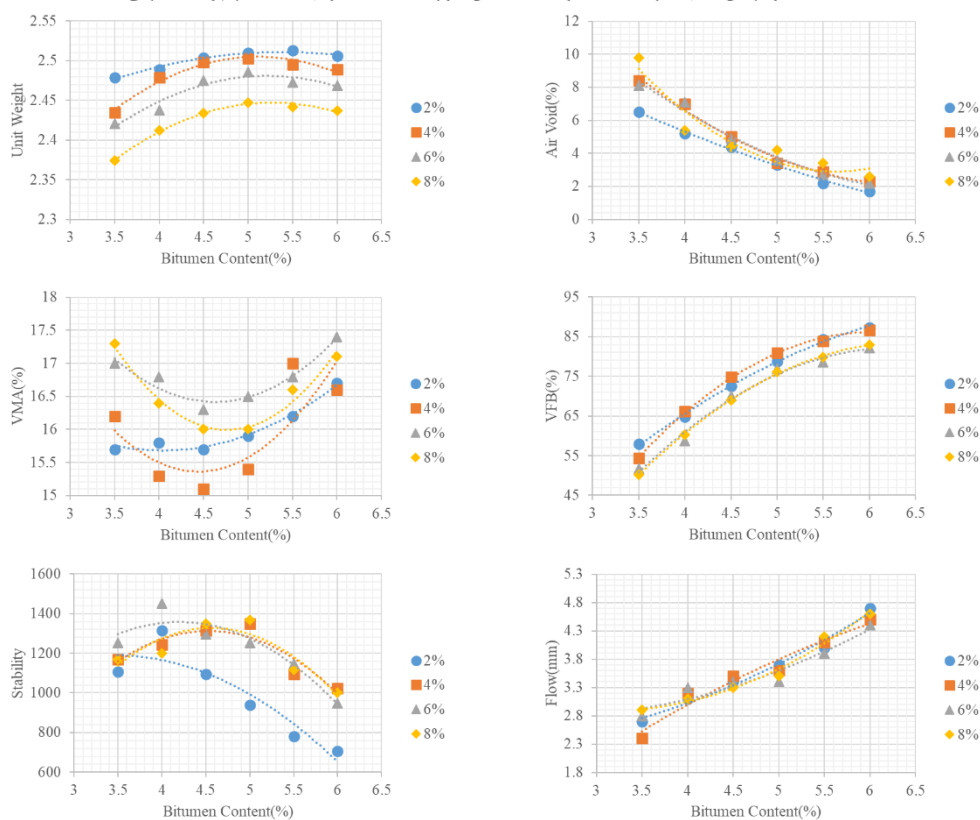
جدول ۵: جزئیات درصدهای مختلف قیر، نوع فیلر و درصد آنها برای تهیه نمونه های آسفالت

نوع فیلر	CF				RHA				FA			
	۲	۴	۶	۸	۲	۴	۶	۸	۲	۴	۶	۸
درصد قیر	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵	۳,۵
	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵
	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵	۵,۵
	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶

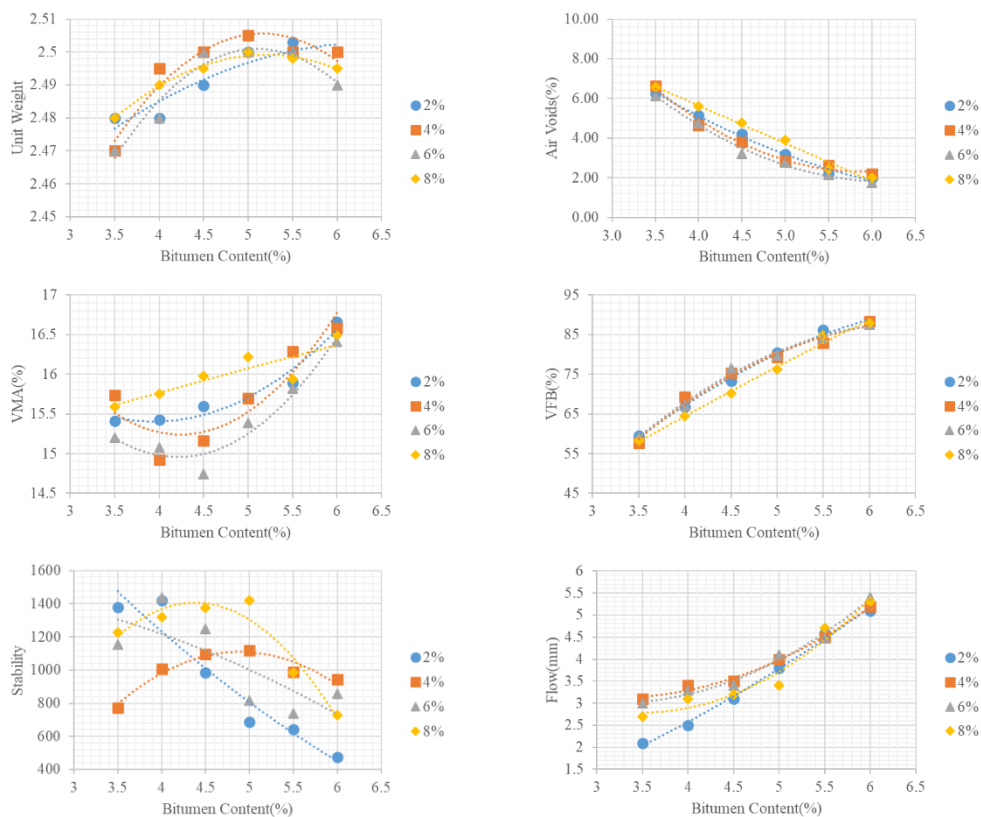
شکل های ۲-۴ نتایج آزمایش شامل وزن مخصوص، فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی (VMA)، فضای خالی پر شده با قیر (VFB)، مقاومت، روانی و ضریب مارشال مخلوطهای آسفالتی مربوط به درصدهای مختلف قیر و درصد فیلرهای مختلف CF، RHA و FA مورد مطالعه را نشان می دهد. به کمک این منحنی ها مناسب ترین درصد قیر آسفالت مورد آزمایش تعیین می گردد. هدف از تعیین مناسب ترین درصد قیر، عبارت است از تعیین درصد قیری که آسفالت تهیه شده بر مبنای آن دارای بهترین مشخصات باشد یعنی وزن مخصوص و تاب فشاری آن به ماکزیمم نزدیک و فضای خالی آسفالت نیز در حدود ۴ درصد باشد (Asphalt, 2015).



شکل ۲: ویژگی‌های مارشال مخلوط آسفالتی مورد مطالعه حاوی خاکستر پوسته برنج



شکل ۳: ویژگی‌های مارشال مخلوط آسفالتی مورد مطالعه حاوی خاکستر بادی

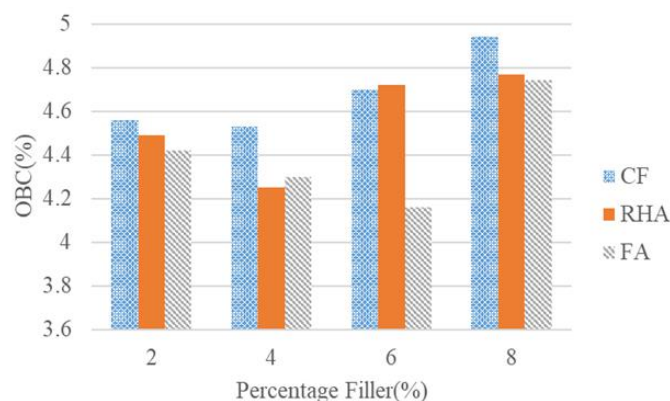


شکل ۴: ویژگی‌های مارشال مخلوط آسفالتی مورد مطالعه حاوی فیلر رایج بین گرم

مطابق جدول ۶، مقدار قیر بهینه مخلوط با ۲ درصد CF، ۴٫۵۶ می‌باشد. با این حال با افزایش CF (از ۲ به ۴ درصد) مقدار قیر بهینه به ۴٫۵۳ کاهش می‌یابد. اما با ۶ و ۸ درصد فیلر، مقدار بهینه قیر به ترتیب به ۴٫۷ و ۴٫۹۴ رسیده است. نمونه‌های حاوی RHA و FA مصرف کمتر قیر بهینه را در مقایسه CF نشان می‌دهد. مقدار قیر بهینه در ۴ درصد RHA و ۶ درصد FA به ترتیب به ۴٫۲۵ و ۴٫۱۶ می‌رسد که کمتر از مقدار بهینه حاصل از فیلر CF می‌باشد. چون نوع مصالح سنگی، دانه‌بندی و نوع قیر مشابه هستند، بنابراین تغییرات درصد قیر بهینه فقط بسته به نوع فیلر و درصد آن محاسبه می‌شود.

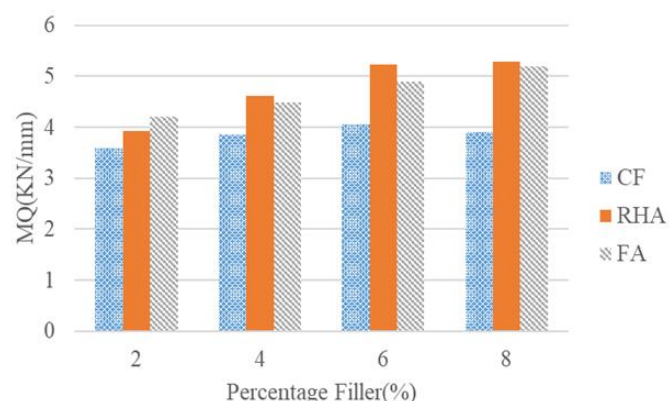
جدول ۶: ویژگی‌های مارشال مرتبط با درصد قیر بهینه در مقادیر مختلف فیلهای CF، RHA و FA

نوع فیلر	مقدار فیلر	قیر بهینه	مقاومت	روانی	VMA	VFB	MQ
CF	۲	۴٫۵۶	۱۱۸۴	۳٫۲۳	۱۶٫۰۸	۷۴٫۵۷	۳٫۵۹
	۴	۴٫۵۳	۱۲۵۰	۳٫۱۸	۱۶٫۱۷	۷۲٫۵۹	۳٫۸۵
	۶	۴٫۷	۱۳۲۵	۳٫۲	۱۶٫۳۲	۷۴٫۷۹	۴٫۰۶
	۸	۴٫۹۴	۱۲۴۵	۳٫۱۲	۱۶٫۵	۷۴٫۸۵	۳٫۹۱
RHA	۲	۴٫۴۹	۱۲۲۸	۳٫۰۶	۱۵٫۳	۷۰٫۴۴	۳٫۹۳
	۴	۴٫۲۵	۱۳۶۴	۲٫۸۹	۱۵٫۶۶	۷۰٫۸۳	۴٫۶۲
	۶	۴٫۷۲	۱۴۴۶	۲٫۷۱	۱۶٫۲۱	۷۳٫۳۴	۵٫۲۳
	۸	۴٫۷۷	۱۳۵۰	۲٫۵	۱۶٫۸۲	۷۳٫۸۷	۵٫۲۹
FA	۲	۴٫۴۲	۱۱۰۲	۲٫۵۷	۱۵٫۶۱	۷۴٫۲۸	۴٫۲۰
	۴	۴٫۳	۱۳۴۳	۲٫۹۴	۱۵٫۱۱	۷۴٫۳۳	۴٫۴۸
	۶	۴٫۱۶	۱۳۷۸	۲٫۷۶	۱۶٫۱۶	۷۳٫۶۲	۴٫۸۹
	۸	۴٫۷۴	۱۴۰۰	۲٫۶۴	۱۶٫۳۷	۷۴٫۳	۵٫۲۰
حدود قابل قبول			حداقل ۸۰۰	۲-۳٫۵	حداقل ۱۳	۶۵-۷۵	



شکل ۵: تغییرات مقادیر قیر بهینه برای نمونه‌های مختلف مورد مطالعه

با استفاده از شکل‌های ۲-۴، نتایج آزمایش مارشال مربوط به درصد قیر بهینه با تمام فیله‌های مورد مطالعه در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار متوسط مقاومت برای مخلوط حاوی ۲ درصد CF، ۱۱۸۴ می‌باشد که با افزایش مقدار CF به ۴ و ۶ درصد مقاومت به ترتیب به افزایش ۱۲۵۰ و ۱۳۲۵ افزایش می‌یابد. اما در مقدار ۸ درصد مقاومت کاهش پیدا می‌کند. استفاده از RHA مقاومت را در تمامی درصد فیله‌ها نسبت به CF افزایش می‌دهد. به این صورت که مقدار مقاومت در درصد‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ RHA نسبت به همین درصد‌ها در مخلوط حاوی CF، به ترتیب ۳،۷، ۹،۱، ۹،۱ و ۶،۵ درصد افزایش می‌یابد. در مورد استفاده از ۲ درصد FA، مقدار مقاومت کمی نسبت به مقدار مشابه CF کاهش می‌یابد اما با افزایش FA (از ۴ تا ۸ درصد) مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت نیز به ۱۳۴۳، ۱۳۷۸ و ۱۴۰۰ افزایش می‌یابد. این بهبود در مقاومت مارشال برای مخلوط‌های حاوی RHA را می‌توان به ذرات نامنظم RHA نسبت داد که ممکن است مقاومت برشی و سختی قیر را افزایش دهد. علاوه بر این، برای مخلوط‌های FA، یکی از دلایل افزایش مقاومت مارشال این است که شکل منظم ذرات FA (معمولاً کروی) ممکن است به عنوان غلطک‌هایی عمل کنند که اصطکاک کمتری هنگام تراکم ایجاد می‌کند، در نتیجه تراکم بیشتر حاصل می‌شود (Mistry et al., 2019). همچنین، فضای خالی موجود در سنگ‌دانه (VMA) و فضای خالی پر شده با قیر (VFB) از محدوده تعیین شده عبور نمی‌کند. تغییر مقادیر ضریب مارشال (MQ) می‌تواند ماهیت نتایج آزمایش مارشال به دست آمده را بدون زحمت توضیح دهد. ضریب مارشال (MQ) به صورت مقاومت مارشال (KN) به روانی (mm) تعریف می‌شود و به نوعی اشاره به سفتی مخلوط‌ها دارد. پذیرفته شده است که MQ سنجشی است از مقاومت مواد در برابر تنش‌های برشی، تغییر شکل دائمی و در نتیجه خراب شدن است. نتیجه MQ برای همه فیله‌ها در جدول ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است. در مخلوط‌های حاوی RHA و FA، مقادیر MQ به تدریج افزایش می‌یابد و از حداکثر مجاز MQ 5 kN/mm تجاوز می‌کند. روند افزایشی مقادیر MQ را می‌توان به این دلیل نسبت داد که با قیر بهینه کمتر و درصد بیشتر فیله، فیله جزء سبک قیر را جذب می‌کند، ویسکوزیته و سفتی قیر را افزایش می‌دهد. این موضوع چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها را افزایش می‌دهد و توانایی کلی مخلوط آسفالتی را در تحمل بارها بهبود می‌بخشد (Hamed & Tahami, 2018).

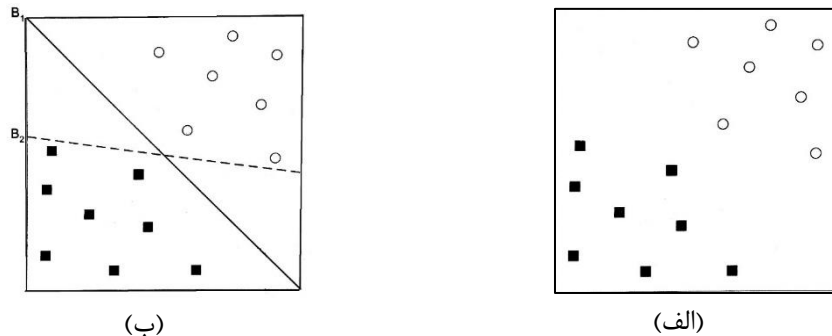


شکل ۶: مقادیر MQ در درصد فیله‌های مختلف

۴- کاربرد روش‌های یادگیری ماشین

۴-۱- ماشین بردار پشتیبان

استفاده از بردارهای پشتیبان در مسائل دسته‌بندی و رگرسیون، رویکرد جدیدی است که در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. ماشین بردار پشتیبان در ابتدا توسط واپنیک^۱ در سال ۱۹۹۰ طراحی شد و نظریه آماری یادگیری را به صورت مستحکم بنا نهاد. در تعریف ساده، SVM الگوریتمی است که به وسیله یک ابر صفحه^۲ جداکننده که روی داده‌های آموزشی تعریف می‌شود، دو کلاس خاص از هم جدا و مشخص می‌شوند (Yang et al., 2008).



شکل ۷: (الف) مجموعه نقاط متعلق به دودسته، (ب) خطوط دسته‌بندی نمونه‌ها

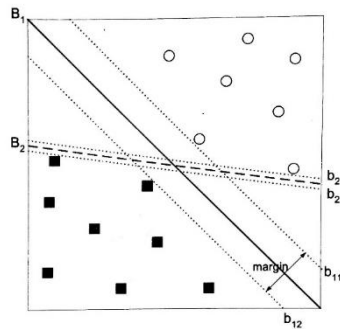
از جمله قابلیت‌های ماشین بردار پشتیبان، توانایی غلبه بر مشکل توزیع غیرخطی داده‌های آموزشی است. در این حالت با استفاده از توابع کرنل^۳، داده‌ها به فضایی به بعد بزرگ‌تر انتقال می‌یابند که در آن تفکیک پذیری بهتر انجام می‌شود و ابر صفحه جداکننده در آن فضا تعیین می‌شود. در روش ماشین بردار پشتیبان از چهار تابع کرنل خطی، چندجمله‌ای، تابع پایه شعاعی و تابع سیگموئید بیشتر استفاده می‌شود. روابط این توابع در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷: توابع کرنل متداول در ماشین بردار پشتیبان (Shawe-Taylor & Cristianini, 2000)

فرمول	نوع تابع
$x_i \times x_j$	خطی
$[\gamma x_i x_j + \text{coefficient}]^d$	چندجمله‌ای
$\exp(-\gamma \ x_i - x_j\ ^2)$	پایه شعاعی
$\tanh(\gamma x_i x_j + \text{coefficient})$	سیگموئید

الگوریتم‌های مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان الگوریتم‌هایی هستند که سعی می‌کنند یک حاشیه^۴ را بیشینه کنند. این الگوریتم‌ها برای پیدا کردن خط جداکننده دسته‌ها، از دو خط موازی شروع کرده و این خطوط را در جهت خلاف یکدیگر حرکت می‌دهند تا هر کدام از خطوط به یک نمونه از یک دسته خاص در سمت خود برسد. پس از انجام این مرحله، میان دو خط موازی یک نوار یا حاشیه شکل می‌گیرد. هرچه پهنای این نوار بیشتر باشد، به این معناست که الگوریتم توانسته حاشیه را بیشینه کند و هدف نیز بیشینه نمودن این حاشیه است. درواقع هدف ما این است که بیشترین مقدار ممکن برای این حاشیه انتخاب شود. هرچه حاشیه بیشتر باشد خطای کلاس‌بندی کمتر خواهد بود. در مرکز حاشیه شکل، خط جداکننده دسته‌ها یا همان خط مرکزی (در حالت دوبعدی خط، سه‌بعدی صفحه و در حالت بیشتر از سه‌بعدی ابر صفحه) قرار می‌گیرد. حال از بین خطوطی که رسم می‌شوند، الگوریتم خطی را که حاشیه کناری آن بیشتر باشد، به عنوان خط جداکننده دسته‌ها انتخاب می‌کند. حاشیه مربوط به دو خط B1 و B2 در شکل ۸ نمایش داده شده است. الگوریتم خط B1 را به عنوان خط جداکننده انتخاب می‌کند چرا که حاشیه کناری این خط، نسبت به حاشیه کناری خط B2 بیشتر است.

1 Vapnik
2 Hyperplane
3 Kernel functions
4 Margin



شکل ۸: حاشیه خطوط دسته‌بندی نمونه

فرض کنید داده‌ها آموزشی شامل N جفت داده به شکل زیر باشد که متغیرهای مستقل x_i بتوانند در دو کلاس $y_i = 1$ و $y_i = -1$ طبقه‌بندی شوند.

$$D = \{(x_i, y_i) \mid x_i \in \mathbb{R}^n, y_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^N \quad (1)$$

در این صورت معادله ابر صفحه جداکننده دو کلاس به صورت زیر است:

$$D = \{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) = w \cdot x + b = 0\}, w \in \mathbb{R}^n, b \in \mathbb{R}^n \quad (2)$$

که بردار ضرایب ابر صفحه و b بردار نشان‌دهنده فاصله ابر صفحه از مبدأ مختصات است. انتخاب جواب‌های منحصر به فرد برای این دو پارامتر منجر به داشتن حداکثر فاصله دو ابر صفحه موازی و بالا رفتن قابلیت تعمیم‌پذیری ابر صفحه جداکننده خواهد شد؛ بنابراین مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر مطرح می‌شود:

$$\min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (3)$$

مشروط به قیود زیر:

$$y_i (\varphi(x_i) \cdot w + b) \geq (1 - \xi_i) \forall i, \xi_i \geq 0 \quad (4)$$

که $\varphi(x_i)$ تابع کرنل، c ثابت ظرفیت، ξ_i پارامتر کمکی برای تفکیک داده‌های دارای همپوشانی است. مقادیر بزرگ‌تر c نشان‌دهنده توجه بیشتر به نقاط در نزدیکی مرز تصمیم‌گیری و مقادیر کوچک‌تر شامل نقاط دورتر از مرز تصمیم‌گیری نیز در حل مسئله بهینه‌سازی خواهد بود.

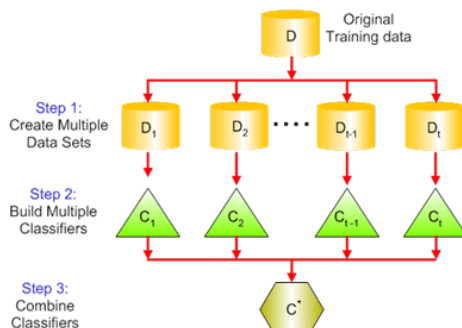
برای حل رابطه ۳ از تابع لاگرانژین دوگانه ولف با حفظ شرایط Karush-Kuhn-Tucker استفاده می‌شود. با به دست آمدن بردارهای w و b توسط بیشینه کردن تابع لاگرانژین دوگانه ولف، تابع تصمیم‌گیری برای کلاسه‌بندی یک متغیر جدید به صورت زیر خواهد بود (Shawe-Taylor & Cristianini, 2000):

$$G(x) = \text{sign}[f(x)] = \text{sign}[\varphi(x) \cdot w + b] \quad (5)$$

برای به دست آوردن نتایج مناسب کلاسه‌بندی در روش ماشین بردار پشتیبان این نکات را بایستی مورد توجه قرارداد: به دست آوردن مقدار بهینه برای پارامتر c و تغییر پارامترهای مختلف تابع کرنل یا تعویض آن‌ها با استفاده از روش‌های Cross Validation (Shabankareh & Hezarkhani, 2017).

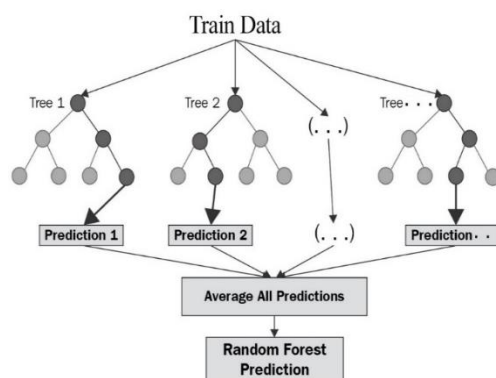
۲-۴- جنگل تصادفی

روش جنگل تصادفی از جمله روش‌های تلفیقی می‌باشد. در روش‌های تلفیقی مدلی که برای دسته‌بندی یا رگرسیون انتخاب می‌شود که ترکیبی از چندین مدل است. هر مدل رأی خود را صادر می‌کند و نتیجه نهایی در مورد مقدار بر اساس این رأی‌ها صادر می‌شود. اغلب صحت یک روش تلفیقی بهتر از مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن یعنی مدل‌ها است (Mohri et al., 2018).



شکل ۹: ایده کلی الگوریتم‌های تلفیقی

تصور کنید مدل‌های استفاده‌شده در روش تلفیقی همگی از نوع درخت تصمیم هستند، بدین ترتیب این مجموعه تشکیل یک جنگل را خواهد داد. هر یک از درختان تصمیم با استفاده از یک انتخاب تصادفی صفات خاصی موجود در هر گره^۱ جهت تعیین انشعاب ساخته می‌شوند. به عبارت دیگر هر درخت بر اساس مقادیر یک بردار تصادفی ساخته می‌شود. این مقادیر دارای توزیع یکسانی برای تمام درختان موجود در جنگل هستند و به صورت مستقلی نمونه‌گیری می‌شوند. برای دسته‌بندی نیز هر درخت رأی خود را صادر و نتیجه نهایی بارأی اکثریت تعیین می‌شود (Liaw & Wiener, 2002). پارامترهای مهم در الگوریتم جنگل تصادفی، تعداد متغیر انتخاب‌شده در هر گره درخت و تعداد درخت می‌باشند که لازم است برای آن‌ها مقادیر مناسبی تعیین شوند (Harris & Grunsky, 2015).



شکل ۱۰: ایده الگوریتم جنگل تصادفی

در این روش در هر بار نمونه‌گیری با جایگزینی اطلاعات، برخی اطلاعات هرگز نمونه‌گیری نمی‌شوند و برخی دیگر شاید چند بار نمونه‌گیری شوند. به عبارت دیگر برخی داده‌های ورودی برای برخی درخت‌ها در اصطلاح نمونه خارج از کیسه (OOB)^۲ خواهند بود یعنی در ایجاد برخی درخت‌ها مشارکت نخواهند داشت. این داده‌ها عمل یک اعتبارسنج داخلی برای هر درخت را دارند که این اعتبارسنجی از طریق برآورد خطای خارج از کیسه انجام می‌شود. اگر خود داده‌های خارج از کیسه از طریق درختان پیش‌بینی شوند، برای این پیش‌بینی‌ها خطا وجود خواهد داشت و میانگین این خطاها، خطای خارج از کیسه نامیده می‌شود که نشان‌دهنده میزان تأثیر نمونه‌های انتخاب‌نشده بر میزان خطای نتیجه نهایی جنگل تصادفی است (James et al., 2013).

۴-۳- ارزیابی مدل

ارزیابی عملکرد مدل‌های SVM و RF بر اساس ضریب تعیین^۳، میانگین مربعات خطای تخمین^۴، میانگین خطای نسبی^۵ و قدر مطلق خطای نسبی^۶ که همگی معرف میزان دقت (خطای) تخمین می‌باشند استفاده شده است. مدلی که بیشترین مقدار R2 و کمترین مقدار RMSE، SDE و MAPE را دارا باشد از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است (Nagelkerke, 1991). کمیت R2 که ضریب تعیین نیز نامیده می‌شود، نسبت تغییرات (متغیرهای) تعریف‌شده، به کل تغییرات (متغیرها) می‌باشد. این اندازه‌گیری به ما این امکان را می‌دهد که تعیین کنیم چقدر می‌توان به پیش‌بینی یک مدل یا نمودار مطمئن بود. روش‌های دیگر اگرچه مفید هستند، اما یک اشکال مشترک دارند: از آنجا که مقادیر آن‌ها می‌تواند بین صفر تا + بی‌نهایت متغیر باشد، یک مقدار واحد آن‌ها در مورد عملکرد به‌تنهایی چیز زیادی نمی‌گوید و فقط در هنگام مقایسه قابل تفسیر هستند (Chicco et al., 2021).

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

1 Node

2 Out Of Bag

3 Coefficient of Determination

4 Root mean square error

5 Standard deviation error

6 Mean absolute percentage error

$$SDE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} - \frac{MAPE}{100} \right)^2} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (9)$$

۴-۴- داده‌های ورودی

در این مطالعه، از مقادیر طراحی مارشال مخلوط معمولی و اصلاح‌شده برای تولید مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. در مجموع ۷۲ نمونه برای مدل‌سازی استفاده شد که ۷۰ درصد آن به‌صورت تصادفی برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش و اعتبار سنجی نتایج مدل استفاده شدند. محققان نشان داده‌اند که این ترکیب بهترین عملکرد به همراه داشته باشد (Ghorbanzadeh et al., 2018; Tiwari et al., 2018). متغیرهای ورودی در نظر گرفته‌شده برای مدل‌سازی عبارت‌اند از نوع فیلر (FT)، درصد فیلر (PF)، قیر (BC)، وزن مخصوص نمونه‌های متراکم، درصد فضای خالی (Vv)، فضای خالی موجود در سنگ‌دانه (VMA) و فضای خالی پرشده با قیر (VFB).

در زمینه الگوریتم‌های یادگیری ماشین هر نمونه، یک بردار ویژگی ۱ در نظر گرفته می‌شود که محتوای آن (صفات خاصه) توسط نتایج آزمایشات تعریف شده‌اند؛ بنابراین تعداد ابعاد بردار ویژگی برابر با تعداد آزمایشات می‌باشد (Porwal et al., 2004). نتایج تمام آزمایش‌ها برای ایجاد ۷۲ بردار ویژگی ۷ بعدی با یکدیگر ترکیب شدند. داده‌ها بر اساس نتیجه مقاومت و روانی مارشال به‌دست‌آمده برچسب‌گذاری شدند. با توجه به اینکه رنج داده‌ها و واحد اندازه‌گیری آن‌ها در نتایج متفاوت می‌باشند، در الگوریتم‌های یادگیری ماشین عملکرد تابع با محدودیت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری همراه است و نمی‌تواند عملکرد مثبتی داشته باشد. برای مثال، در این پژوهش داده‌های وزن مخصوص قیر مقادیری بسیار کوچک‌تر از فضای خالی پرشده با قیر دارند؛ بنابراین نیاز است تا مقادیر پردازش‌شده نرمالایز شوند (Ioffe & Szegedy, 2015). ساده‌ترین روش برای بی‌مقیاس کردن این است که مقادیر را به مقیاس [0,1] تغییر دهیم. فرمول این روش به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\hat{x} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (10)$$

که در آن x داده اصلی و $\hat{x}$ مقدار نرمالایز شده می‌باشد (Patro & Sahu, 2015).

۴-۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از روش SVM و RF

از داده‌های آموزشی برای ساخت مدل‌های SVM استفاده شده است. همان‌طور که در قبل اشاره شد در این روش می‌بایست از توابع کرنل استفاده کرد. مدل‌سازی بر روی داده‌های آموزشی توسط هر چهار تابع کرنل معرفی‌شده انجام شده است که بهترین نتایج با تابع کرنل پایه شعاعی به دست آمده است. همچنین به‌منظور بهینه کردن پارامترهای C و γ متعلق به تابع کرنل از روش 10-fold cross validation استفاده شده است که مقدار C برابر ۸ و مقدار γ برابر ۰.۹ برای مدل‌سازی مقاومت مارشال و مقدار C برابر ۱۰ و مقدار γ برابر ۰.۸ برای مدل‌سازی روانی مارشال در نظر گرفته شده است. مقادیر غیرازاین دو باعث کاهش دقت و صحت الگوریتم می‌شود. پس از آموزش، مدل توسط داده‌های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج مربوط SDE ، $RMSE$ و $MAPE$ مطابق جدول ۳ به دست آمد. کلیه فرایندهای مدل‌سازی با استفاده از بسته E1071 نرم‌افزار R (Meyer et al., 2019) انجام شده است.

در روش RF به‌منظور تعیین تعداد متغیر انتخاب‌شده در هر گره درخت (mtry) و همچنین تعداد درخت (ntree) از روش 10-fold cross validation استفاده شده است. مطابق این روش تعداد ۱۰۰۰ درخت و ۵ متغیر در هر گره مطلوب‌ترین شرایط به برای مدل فراهم کرده است. لذا این مقادیر به‌منظور مدل‌سازی استفاده شد.

پس از ساخت مدل با استفاده از بسته random forest در نرم‌افزار R (Leo Breiman and Adele Cutler, 2018)، مدل توسط داده‌های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. یکی از مزایای الگوریتم جنگل تصادفی این است می‌تواند اهمیت متغیرها را در یک مسئله مشخص کند. در این تحقیق اهمیت پارامترهای ورودی بر اساس شاخص اهمیت جینی و اهمیت جایگشتی به دست آمده است (Han et al., 2016) که درصد قیر و درصد فیلر دارای اهمیت بالاتری نسبت به سایر پارامترها می‌باشند.

1 Feature vector

2 Normalize

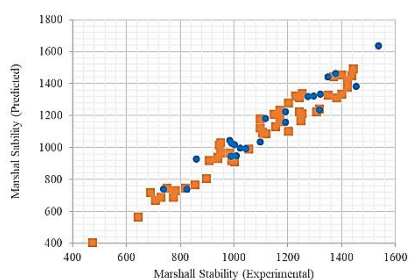
جدول ۸: نتایج ارزیابی مدل‌های SVM و RF برای مقاومت مارشال

MAPE	RMSE	SDE	R ²	نوع داده	مدل
۲,۹۸۱	۳۸,۵۲۷	۰,۰۱۸۰	۰,۹۱۳۵	آموزش	SVM
۳,۰۱۷۳	۴۰,۰۴۱۲	۰,۰۲۰۸	۰,۸۷۵	آزمایش	
۳,۰۲۳	۳۹,۹۸۵	۰,۰۲۰۹	۰,۸۷۴۵	آموزش	RF
۳,۱۶۴۱	۴۱,۸۷۰	۰,۰۲۱۱	۰,۸۲۶۹	آزمایش	

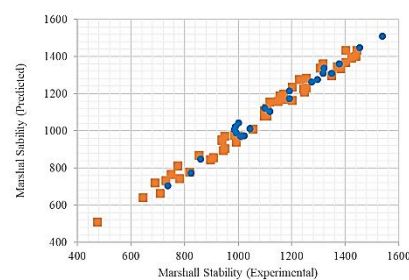
جدول ۹: نتایج ارزیابی مدل‌های SVM و RF برای روانی مارشال

MAPE	RMSE	SDE	R ²	نوع داده	مدل
۲,۹۸	۳۸,۴	۰,۰۱۴۱	۰,۹۲۹	آموزش	SVM
۳,۰۳	۴۰	۰,۰۲۱۴	۰,۸۴۱	آزمایش	
۳	۳۹,۷	۰,۰۲	۰,۸۸۹	آموزش	RF
۳,۱۱	۴۱,۳	۰,۰۲۰۳	۰,۸۱۱	آزمایش	

در شکل ۱۱ و ۱۲ نمودار مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت و روانی آسفالت توسط مدل SVM و RF برای داده‌های آموزشی و آزمایشی ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل نیز به‌خوبی دیده می‌شود، نتایج به خط نیم‌ساز نزدیک هستند و می‌توان گفت مقادیر را با دقت خوبی پیش‌بینی کرده است. از لحاظ تئوری اگر R^2 برابر ۱۰۰ درصد شود تمامی مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر برازش شده یکسان خواهند بود و همه نقاط داده‌ها بر روی خط برازش شده قرار خواهند گرفت (Devore, 2011).

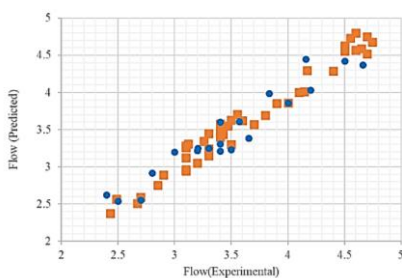


(ب)

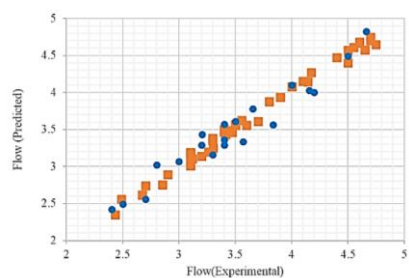


(الف)

شکل ۱۱: مقایسه مقدار مقاومت مارشال پیش‌بینی شده و واقعی (الف) مدل SVM (ب) مدل RF



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: مقایسه مقدار روانی مارشال پیش‌بینی شده و واقعی (الف) مدل SVM (ب) مدل RF

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر استفاده از سه نوع فیلر (فیلر حاصل از بین گرم، خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی) در درصد‌های مختلف بر خواص مارشال مخلوط آسفالتی با حداکثر سایز دانه ۲۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه درصد‌های قیرهای نمونه‌های حاوی RHA و FA با نمونه‌های حاوی CF در درصد‌های مشابه اختلاط نشان می‌دهد مقدار قیر بهینه کاهش پیدا

کرده است. همچنین مقاومت مارشال به دست آمده از نمونه های حاوی این سه نوع فیلر نشان می دهد با توجه به کاهش قیر بهینه در مخلوط های حاوی RHA و FA، مقاومت آن ها نسبت به نمونه های حاوی CF افزایش پیدا کرده است. در مخلوط های حاوی CF، مقدار ۴ درصد از این فیلر کمترین مقدار قیر بهینه نتیجه داده است که برابر با ۴٫۵۳ می باشد. کمترین مقدار قیر بهینه برای مخلوط های حاوی RHA برابر با ۴٫۲۵ می باشد و برای مخلوط حاوی ۴ درصد از این فیلر بدست آمده است و برای مخلوط حاوی FA کمترین مقدار قیر بهینه در ۶ درصد از این فیلر به دست آمده است و برابر با ۴٫۱۶ می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مقدار ۶ درصد فیلر FA کمترین مقدار قیر بهینه را نتیجه داده است. در مقایسه مقاومت های به دست آمده در درصد قیرهای ذکر شده، مخلوط حاوی ۶ درصد FA بیشترین مقاومت را داراست که با مقدار MQ برابر با ۴٫۸۹ این مقدار نیز قابل قبول است. براین اساس می توان نتیجه گرفت که با استفاده از فیلرهای RHA و FA می توان در مصرف قیر صرفه جویی کرد به طوری که عملکرد روسازی نسبت به قبل بهتر باشد. در ادامه به منظور ارائه مدلی برای پیش بینی مقاومت و روانی مارشال مخلوط های آسفالتی، از الگوریتم های یادگیری ماشین نظارت شده ی SVM و RF استفاده شد. مدل ها با استفاده از پارامترهای طرح مارشال آموزش داده شدند و سپس با استفاده از داده های آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقدار R^2 برای دو مدل SVM و RF در مدل سازی مقاومت مارشال به ترتیب برابر با ۰٫۹۱۳۵ و ۰٫۸۷۴۵ برای داده آموزشی و ۰٫۸۷۵ و ۰٫۸۲۶۹ برای داده آزمایشی به دست آمد. این مقدار برای این مدل در مدل سازی روانی مارشال نیز به ترتیب ۰٫۹۲۹ و ۰٫۸۸۹ برای داده های آموزشی و ۰٫۸۴۱ و ۰٫۸۱۱ برای داده آزمایشی بود. نتایج حاصله نشان دهنده کارآمدی مدل های استفاده شده در برابر روش های آزمایشگاهی برای پیش بینی مقاومت و روانی مارشال آسفالت می باشد که روش SVM عملکرد بهتری را نسبت به RF داراست. به منظور بهینه کردن الگوریتم های یادگیری ماشین به دست آمده و طراحی یک مدل پویای پیش بینی پیشنهاد می شود پس از انجام آزمایشات هر نمونه جدید، از نتایج حاصله در آموزش مجدد الگوریتم استفاده شود.

منابع

1. Airey, G. D., Rahman, M. M., & Collop, A. C. (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(2), 105-119 .
2. Al-gurah, E. R., & Al-Humeidawi, B. H. (2021). Investigation the effect of different types of mineral fillers on mechanical properties of Hot Mix Asphalt. *Journal of Physics: Conference Series* ,
3. Al-Humeidawi, B. H., & Mandal, P. (2018). Experimental investigation on the combined effect of dowel misalignment and cyclic wheel loading on dowel bar performance in JPCP. *Engineering Structures*, 174, 256-266 .
4. Al-Khuzai, M. G., Al-Humeidawi, B. H., & Ra'id, F. (2019). Assessment of Dowel Bars Performance in Concrete Pavement Containing Crumb Rubber of Tires. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 12(4), 214-219 .
5. Al-Khuzai, M. G., Al-Humeidawi, B. H., & Ra'id, F. (2020). Assessment of the mechanical properties of concrete pavement containing crumb rubber of tires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* ,
6. Arabani, M., & Tahami, S. A. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 149, 350-358 .
7. Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2017). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 713-729 .
8. Asphalt, I. (2015). *Asphalt Mix Design Methods MS-2* (Seventh ed., Vol. 188). Asphalt Institute .
9. Burkov, A. (2020). *Machine learning engineering*. True Positive Incorporated .
10. Chandra, S., Kumar, P., & Feyissa, B. A. (2002). Use of marble dust in road construction. *Road Materials and Pavement Design*, 3(3), 317-330 .
11. Chen, M., Zheng, J., Li, F., Wu, S., Lin, J., & Wan, L. (2015). Thermal performances of asphalt mixtures using recycled tyre rubber as mineral filler. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 379-391 .
12. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623 .
13. Choubane, B., Page, G. C., & Musselman, J. A. (2000). Suitability of asphalt pavement analyzer for predicting pavement rutting. *Transportation Research Record*, 1723(1), 107-115 .

14. Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2018). Application of waste materials as fillers in bituminous mixes. *Waste Management*, 78, 417-425 .
15. Devore, J. L. (2011). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage learning .
16. Ghorbanzadeh, O ., Rostamzadeh, H., Blaschke, T., Gholaminia, K., & Aryal, J. (2018). A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 94(2), 497-517 .
17. Guha, A. H., & Assaf, G. J. (2020). Effect of Portland cement as a filler in hot-mix asphalt in hot regions. *Journal of Building Engineering*, 28, 101036 .
18. Hamed, G. H., & Tahami, S. (2018). The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 81, 90-97 .
19. Han, H., Guo, X., & Yu, H. (2016). Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease gini based on random forest. 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSSS) ,
20. Harris, J., & Grunsky, E. C. (2015). Predictive lithological mapping of Canada's North using Random Forest classification applied to geophysical and geochemical data. *Computers & Geosciences*, 80, 9-25 .
21. Helal, M. M. E., Mahdy, H. A.-e., & Ibrahim, M. F. (2020). Effect of Rice Husk Ash on the Performance of Hot Asphalt Mixes. *MEJ. Mansoura Engineering Journal*, 45(2), 8-19 .
22. Ioffe, S., & Szegedy, C. (2015). Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. International conference on machine learning ,
23. Jalil, N. A., Hwang, H. J., & Dawi, N. M. (2019). Machines learning trends, perspectives and prospects in education sector. Proceedings of the 23rd International Conference on Education and Multimedia Technology ,
24. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 112). Springer .
25. Kanevski, M. (2009). *Machine learning for spatial environmental data: theory, applications, and software*. EPFL press .
26. Kim, Y.-R., Little, D. N., & Song, I. (2003). Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: mechanistic evaluation. *Transportation Research Record*, 18 ٨-١ , (١) ٣٢
27. Lachance-Tremblay, É., Vaillancourt, M., & Perraton, D. (2016). Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 600-618 .
28. Lary, D. J., Alavi, A. H., Gandomi, A. H., & Walker, A. L. (2016). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 3-10 .
29. Leo Breiman and Adele Cutler, R. p. b. A. L. a. M. W. (2018). Package 'randomForest'. *The R Journal* .
30. Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18-22 .
31. Lu, Z., Sha, A., Wang, W., & Gao, J. (2020). Studying the Properties of SBS/Rice Husk Ash-Modified Asphalt Binder and Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020 .
32. Meyer, D., Dimitriadou, E., Hornik, K., Weingessel, A., Leisch, F., Chang, C.-C., Lin, C.-C., & Meyer, M. D. (2019). Package 'e1071'. *The R Journal* .
33. Mirković, K., Tošić, N., & Mladenović, G. (2019). Effect of different types of fly ash on properties of asphalt mixtures. *Advances in civil engineering*, 2019 .
34. Mistry, R., Karmakar, S., & Kumar Roy, T. (2019). Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 979-990 .
35. Mitchell, T. M. (١٩٩٩). Machine learning and data mining. *Communications of the ACM*, 42(11), 30-36 .

36. Mohri, M., Rostamizadeh, A., & Talwalkar, A. (2018). Foundations of Machine Learning. Adaptive Computation and Machine Learning series. In: MIT Press.
37. Montini, M., Li, X., Rodrigues, A., Romano, R., Pileggi, R. G., & Scrivener, K. (2018). Activate fly ash reaction using bauxite residue in blended cement. 2nd International Bauxite Residue Valorization and Best Practices Conference ,
38. Nagelkerke, N. J. (1991). A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, 78(3), 691-692 .
39. Ozgan, E. (2009). Fuzzy logic and statistical-based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete under varying temperatures and exposure times. *Advances in engineering software*, 40(7), 527-534 .
40. Özgan, E., & Saruhan, H. (2010). Modeling of asphalt concrete via simulated annealing. *Advances in engineering software*, 41(4), 680-683 .
41. Patro, S., & Sahu, K. K. (2015). Normalization: A preprocessing stage. *arXiv preprint arXiv:1503.06462* .
42. Porwal, A., Carranza, E., & Hale, M. (2004). A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping. *Mathematical geology*, 36(7), 803-826 .
43. Ray, S. (2019). A quick review of machine learning algorithms. 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) ,
44. Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390-397 .
45. Shabankareh, M., & Hezarkhani, A. (2017). Application of support vector machines for copper potential mapping in Kerman region, Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 128, 116-126 .
46. Shawe-Taylor, J., & Cristianini, N. (2000). *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods* (Vol. 204). Volume .
47. Tahami, S. A., Arabani, M., & Mirhosseini, A. F. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 170, 547-556 .
48. Tiwari, S., Babbar, R., & Kaur, G. (2018). Performance evaluation of two ANFIS models for predicting water quality Index of River Satluj (India). *Advances in civil engineering*, 2018 .
49. Yang, Q., Li, X., & Shi, X. (2008). Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines. *Computers & geosciences*, 34(6), 592-602 .

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.

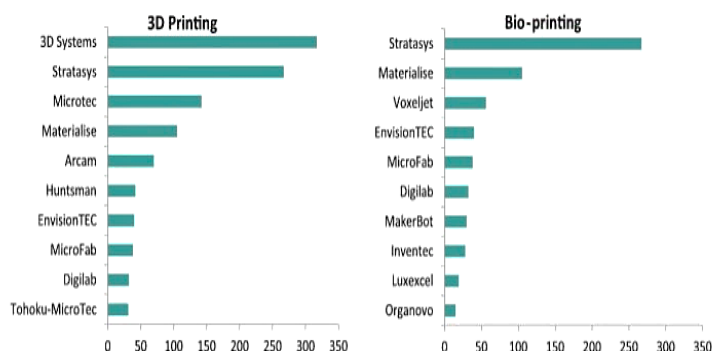
واژگان کلیدی: چاپ سه بعدی (DP۳)، مدل سازی پرینت سه بعدی (ساخت افزودنی)، مدل سازی فیزیک دیجیتال سنگ، شبیه سازی عددی، مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های جایگزین سنگ در چاپ سه بعدی.

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

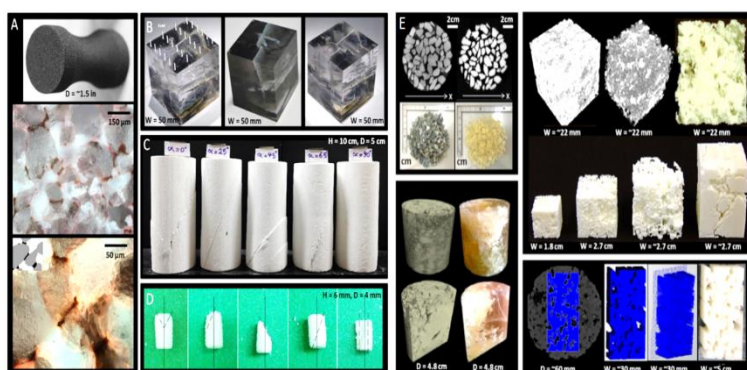
۱- مقدمه

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).

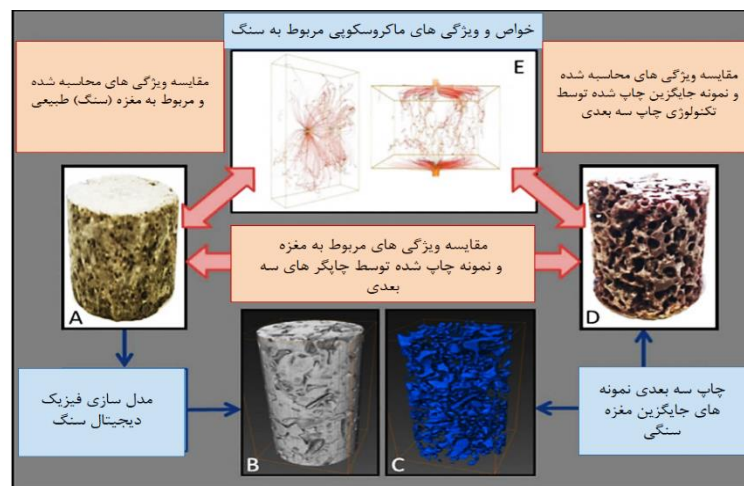


شکل ۱- آمار ثبت اختراع و رشد سریع پیشرفت فناوری چاپ سه بعدی (بر اساس آمار پایگاه علم سنجی تامسون).

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) (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 اسکانه 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).

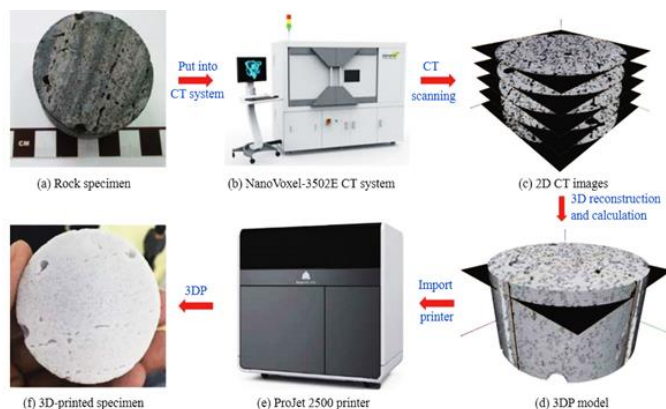
با این حال روش های مختلف دو ویژگی مشترک دارند، که عبارتند از: نمونه سازی لایه به لایه مواد مدل سازی شده (Jiang et al, 2016) و روش های چاپ عمومی که شامل چهار مرحله زیر می توان در نظر گرفت:

(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.

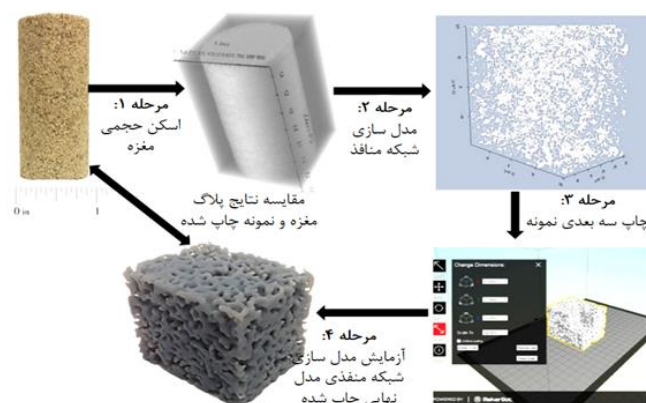
(۲) پردازش مربوط به برش و تنظیم پارامترهای چاپ مناسب شامل ضخامت لایه، نسبت کردن و مسیر خروجی برای چاپگر.

(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.



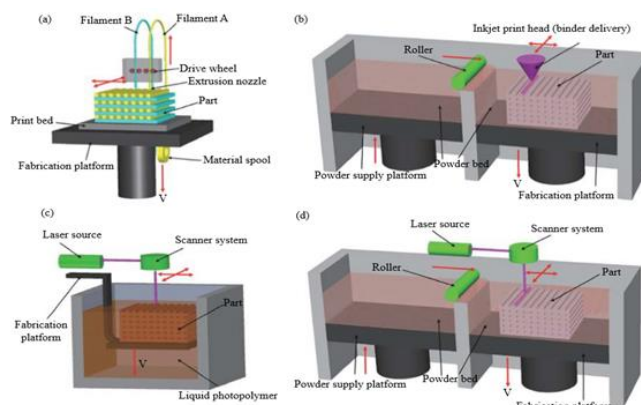
شکل ۴- مراحل ایجاد نمونه‌های ایجاد شده جایگزین نمونه پلاگ مغزه با استفاده از تکنولوژی‌های چاپ سه بعدی همراه با فناوری سی‌تی‌اسکن پلاگ مغزه (Gao YT, et al 2021).



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

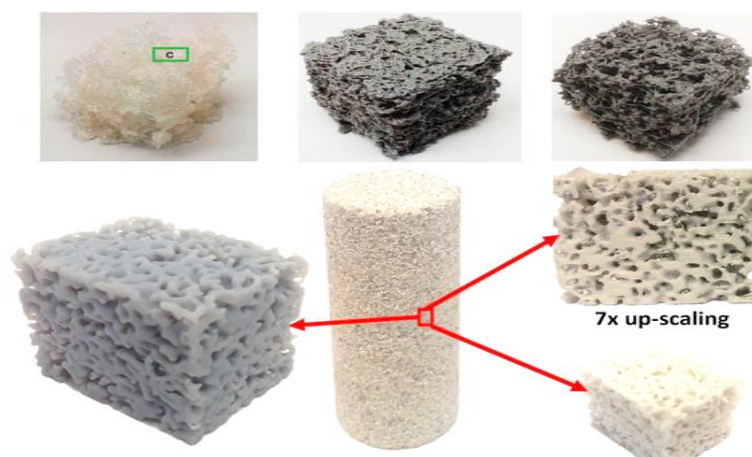
۳- روش‌های چاپ سه بعدی

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 کربناته 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 کربنات‌هایی 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 کربناته 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 فرایند پس-پردازشی (پرداخت) چسب ۲- مواد پودری با تخلخل ریز و منافذ مسدود شده	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

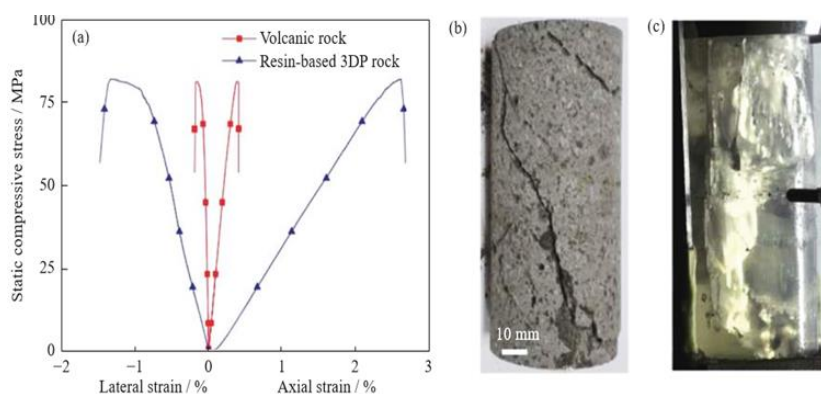
۴- نمونه پژوهش های بنیادی، آموزش و کاربردها چاپ سه بعدی در صنعت نفت

۴-۱- ژئومکانیک

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

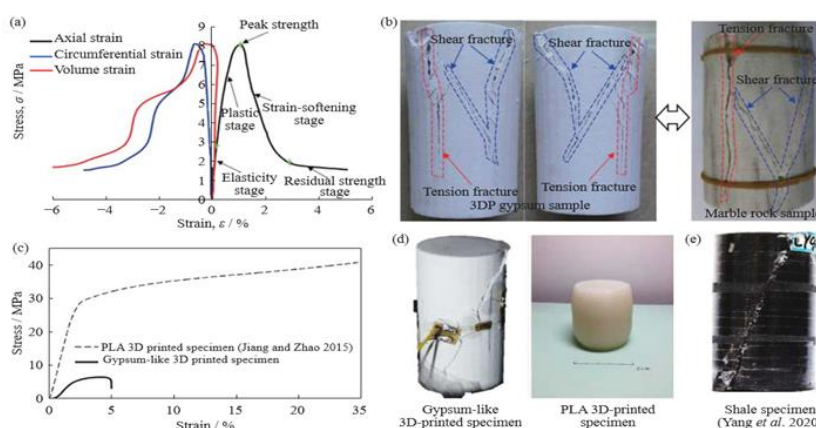
محیط زمین شناسی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی پیچیده سنگ مانند غیرخطی بودن، ناپیوستگی، ناهمگنی و ناهمسانگردی را تعیین می کند که همه آن ها منجر به افزایش دشواری استفاده از روش های تحقیق نظری رابج برای مطالعه پاسخ سنگ تحت تنش می شود. با این حال، نمونه های سنگی با خواص مشابه نمی توانند دو بار تولید و مورد 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 های 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).

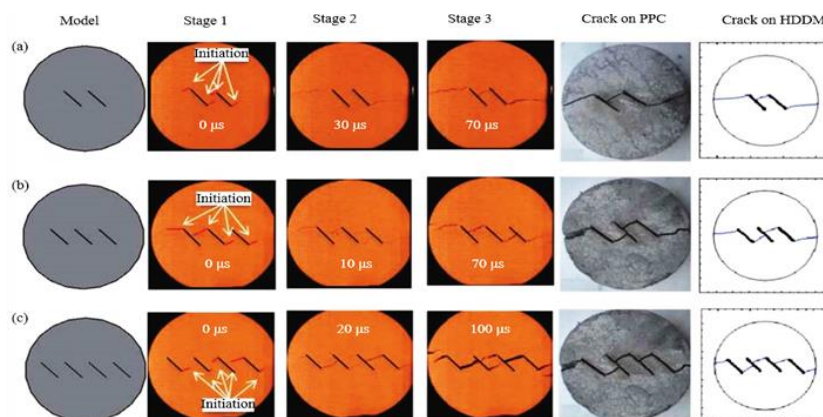
فنگ و همکارانش یک روش جدید چاپ سه بعدی از مواد زمین‌شناسی سنگ مانند شامل مواد سیمانی (مانند سیمان و گچ) و سنگ‌دانه (مانند ماسه سیلیسی) را با توجه به خواص سیال مواد زمین‌شناسی پیشنهاد کردند. پس از آن، آن‌ها یک آزمایش مقاومت فشاری تک محوری را بر روی یک نمونه ماده زمین‌شناسی سنگی چاپ سه بعدی انجام دادند. 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 درزهای 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 درزه‌ای سنگی بکر برای تشکیل قالب سطحی درزه‌ای اصلی استفاده می‌شود و درزه‌ها براساس یک قالب چاپ شده سه بعدی ایجاد می‌شوند (شکل ۱۰).

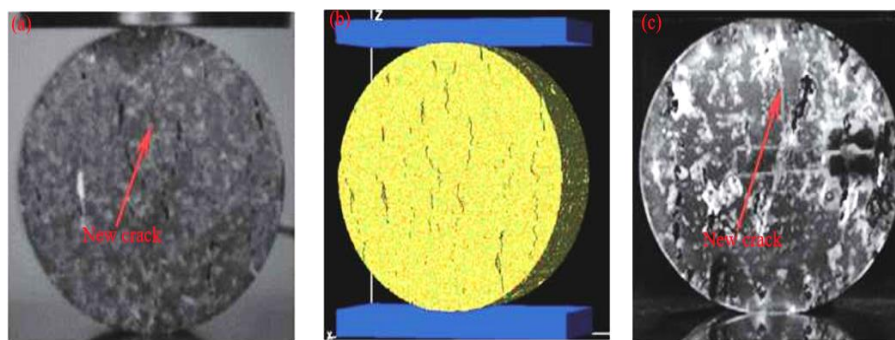


شکل ۱۰- مقایسه تکامل پیوند سه نمونه چاپ شده سه بعدی مختلف: نمونه سیمانی شده، و مدل عددی HDDM با چندین شکاف از قبل موجود.

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).

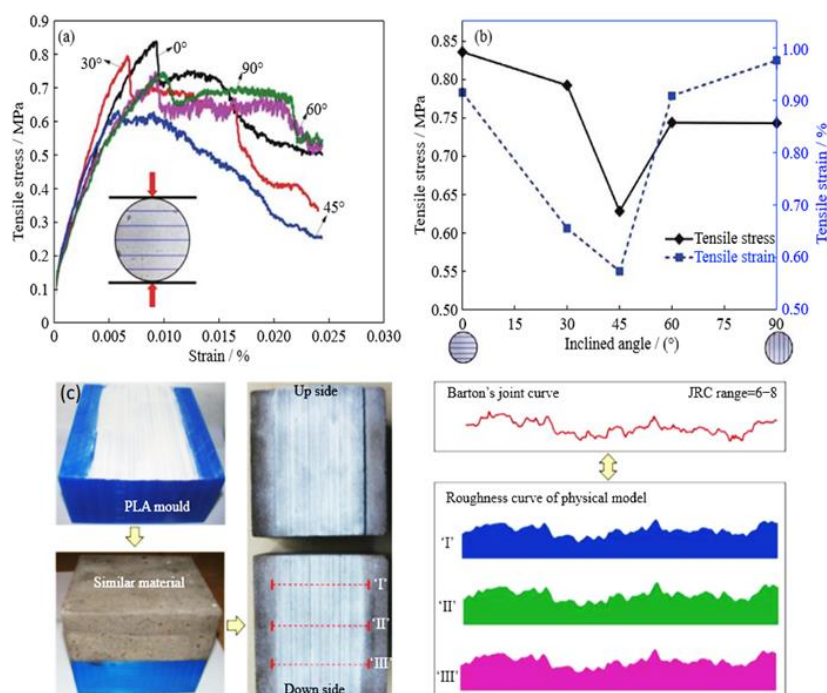
در شکل ۱۱ سه مدل پلاگ مغزه ایجاد شده به صورت طبیعی، مدل سازی عددی و چاپ سه بعدی را نشان می‌دهد که بر روی هر سه نمونه آزمایش دیسک برزلی صورت گرفت، یافته‌ها نشان داد که مسیر رشد ترک و حالت شکست مشابه نمونه‌های دیگر می‌باشد و نتایج تجربی با نتایج عددی همخوانی خوبی دارند. این نتایج پیشنهاد می‌کنند که کاربرد 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 سنگ (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.

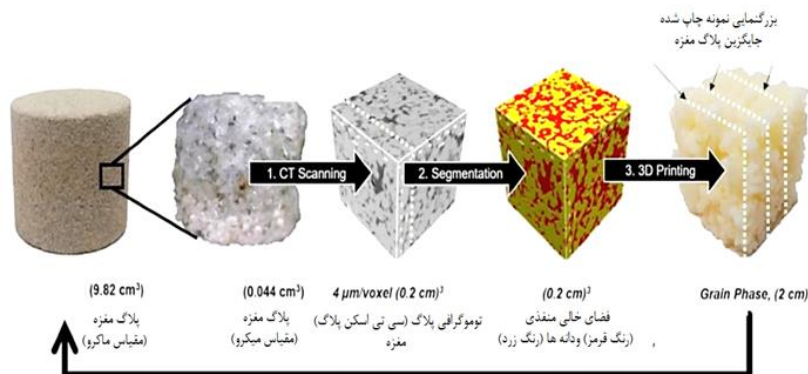


شکل ۱۲- تاثیر جهت چاپ بر خواص کششی نمونه‌های چاپ شده سه بعدی مبتنی بر ژئوپرس: تنش-کرنش کششی (a)، رابطه بین استحکام کششی، کرنش کششی و زاویه چاپ (b)، مقایسه زبری و سختی نمونه‌های اتصال پروفیل اولیه بارتون JRC ضریب زبری مشترک در نمونه چاپ شده توسط چاپگر سه بعدی (c) (Gao YT, et al 2021).

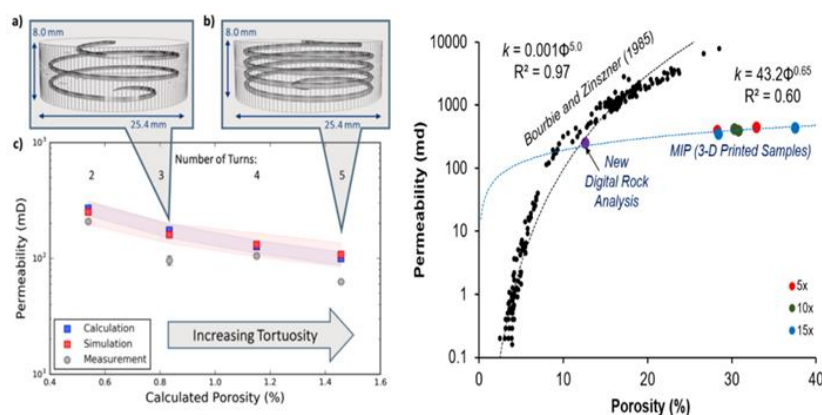
۲-۴- بازسازی تصاویر پیچیده ساختار داخلی سنگ

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).

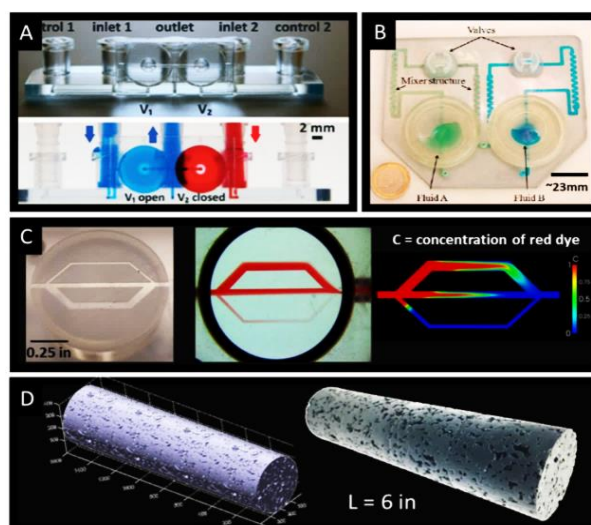


شکل ۱۴- روش مدل‌سازی سیستم‌های هندسی و نتایج نفوذ پذیری: مدل فریم سیمی چاپ سه بعدی حاوی یک ماریچ با سه دور، با ابعاد ذکر شده (شکل سمت چپ - a)، مدل فریم سیمی چاپ سه بعدی حاوی یک ماریچ با پنج دور (شکل سمت چپ - b)، نفوذپذیری محاسبه شده، شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به عنوان تابعی از تخلخل محاسبه شده برای چاپ‌های سه بعدی با فضای حفره‌ای ماریچ (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

- 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.
- 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.
- Bose, S., Vahabzadeh, S., Bandyopadhyay, A (2013) Bone tissue engineering using 3D printing. Materials today. Dec 1;16(12):496-504.
- 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.
- 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.
- Cohen, D., Sargeant, M., Somers, K (2014), 3-D printing takes shape. McKinsey Quarterly. Jan;1:1-6.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

پژوهش‌های نوین مقدمه‌مهندسی

تهران، افسریه، ۱۵ متری چهارم،
کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج، آزادگان، ابتدای بلوار مطهری،
کوچه شهید سبحانی، پلاک ۲۸، واحد ۴
۰۲۱ ۳۳۲۰ ۲۴ ۸۷
۰۲۶ ۳۴۴۵ ۳۱ ۳۱
۰۹۹۰ ۵۹۸ ۰ ۲۰۶
www.NRES.ir