

# بررسی سیستم جدید حفاری برای معدن کاری در سطح ماه

دکتر جمال رستمی و مهندس امیر رضا قاسمی: دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا

## چکیده

ایجاد پایگاه‌های پشتیبانی و عملیاتی در ماه قدم مهمی در سفرهای برنامه‌ریزی شده به فضا، به ویژه سفرهای طولانی در عمق فضا است. هرگونه پایگاهی در ماه باید در تأمین مواد اولیه و انرژی خودکفا بوده و تا حد امکان قادر به معدن‌کاری و فرآوری مواد مصرفی و ذخیره آنها باشد. یکی از اساسی‌ترین نکات در تدارک چنین پایگاهی در ماه، توانایی حفاری در سازندهای مختلف برای معدن‌کاری و نیز فعالیت‌های خاک‌برداری و حفاری زیرساخت ابنیه است. سطح ماه پوشیده از خرده سنگ‌ها و رگولیت<sup>(۱)</sup> است و سطوح زیرین آن به دلیل لرزش‌هایی که در اثر برخورد ذرات به وجود آمده یا احتمالاً به دلیل یخ زدن ذرات میعان یافته‌ی بخار آب در بخش تاریک و یا قطب‌های ماه، تحکیم یافته‌ترند. احتمالاً با ارزش‌ترین ماده معدنی موجود در ماه، یخ موجود در خاک‌های یخ زده است و حفاری آن باید بخشی از طراحی فعالیت‌های معدن‌کاری در برنامه‌های فضایی باشد. این مقاله، خواص رگولیت یخ زده‌ی ماه را بررسی کرده و خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌های متعددی را که بر روی خاک‌های شبیه‌سازی شده‌ی ماه به منظور طراحی ماشین حفاری در ماه انجام شده است، مورد بحث قرار می‌دهد. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های حفاری در مقیاس واقعی بر روی تعدادی از نمونه‌های سنگ و بتن با مقاومت‌های مختلف هستند. ضمناً نتایج آزمایش‌ها بر روی کله‌ی حفاری اولیه طراحی شده و برآورد سرعت حفاری ماشین پیشنهادی برای حفاری در سطح ماه به طور خلاصه مرور خواهد شد.

## ۱- مقدمه

یخ زده کار کنند. حفاری این مصالح متنوع نیاز به سیستم‌های حفاری نوین و ابتکاری قدرتمند و غالباً قابل انعطاف دارد. ماده معدنی که در حال حاضر به‌عنوان هدف اصلی معدن‌کاری مورد نظر است، آب در شکل جامد یا یخ است که ارزشمندترین ماده بر روی ماه است. بقیه‌ی کانی‌های تشکیل دهنده شامل مواد فلزی و احتمالاً کانی‌های صنعتی نیز هنگامی که این ماده معدنی به مراکز فرآوری انتقال می‌یابد، به‌طور جداگانه و در فرآیندی متفاوت استخراج می‌شوند.

برای حفاری در ماه گزینه‌های متعددی شامل اکسکواتورها، شاول‌ها، ماشین‌های معدن‌کاری سطحی<sup>(۲)</sup> و ماشین‌های آسفالت‌بر<sup>(۳)</sup> پیشنهاد شده است. برخی از این ماشین‌ها برای

در حال حاضر موج جدیدی از مطالعات به منظور تعیین خواص مواد تشکیل دهنده‌ی سطح ماه برای معدن‌کاری و فعالیت‌های ساختمانی در این محیط در جریان است. این پژوهش‌ها در رابطه با سفرهای برنامه‌ریزی شده سال ۲۰۱۸ و پس از آن، در حال انجام است. خودکفایی پایگاه‌های پشتیبانی ماه به تأمین مداوم مواد خام نیاز دارد که ترجیحاً باید از طریق معدن‌کاری سطح ماه به‌دست آید. همچنین به منظور ایجاد پایگاهی در ماه، ابتدا باید حفاری قابل توجهی انجام شود که برای این امر نیاز به ماشین‌های حفاری است که بتوانند در مواجهه با مصالح متفاوتی از رگولیت نرم که سطح ماه را پوشانده تا خاک تحکیم شده و احتمالاً خاک

1-Regolith

2-Surface miners

3-Road milling machine

به این ترتیب ماده معدنی مورد نظر برای عملیات استخراجی را باید در این مناطق جستجو نموده و مورد بهره برداری قرار داد. نتایج مطالعات طیف سنجی به امکان وجود مناطقی در سطح ماه که دارای درصد قابل توجهی هیدروژن هستند، اشاره دارد که به نظر می‌رسد مهم‌ترین منبع آن، یخ‌های جذب شده در خاک‌های سرد سطح ماه است. هرچند که دقت اندازه‌گیری‌ها در این مورد خیلی پایین است، ولی شواهد موجود به امکان وجود مناطقی با درصد رطوبتی در حد ۰.۸٪ اشاره دارد.

علاوه بر عدم قطعیت در مورد وجود و عیار این ماده‌ی معدنی و نبود اطلاعات اکتشافی، موارد دیگری نیز وجود دارد که دورنمای معدن‌کاری و در صورت انجام، عملیات اجرایی در ماه را با چالش‌هایی مواجه می‌کند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- نبودن هوا و جو و اثرات حفاظتی آن و همچنین اثر خنک‌کنندگی آن.
  - درجه حرارت‌های به شدت بالا و پایین که از ۱۲۰+ تا ۱۵۰- در نوسان است (عدم امکان استفاده از طیف قابل توجهی از مواد که خواص خود را در این دماها از دست می‌دهند از جمله قطعات پلاستیکی و انواع روغن و...).
  - امکان ضربه توسط اشیاء فضایی و سنگ‌های آسمانی.
  - وجود تشعشعات کیهانی که در کار وسایل الکترونیکی اختلال ایجاد می‌کند.
  - کاهش شتاب ثقلی و نیاز به استفاده از اجرام بزرگ‌تر برای دستیابی به نیروهای عکس‌العملی مورد نیاز.
  - نبود منابع انرژی برای استفاده از ماشین‌های قوی‌تر.
  - محدود بودن امکان تعمیرات و بازدید توسط اپراتورها.
  - مشکلات ناشی از غبار و تعلیق آن در فضا و اثرات سایشی آنها
  - هزینه‌های بسیار بالا برای حمل وسایل به سطح ماه (با تکنولوژی موجود، در حدود ۲۰۰ هزار دلار برای هر کیلوگرم)
- با توجه به این موارد، طراحی سیستم‌های حفاری و عملیاتی که بتوانند در چنین شرایطی عملکرد قابل قبولی داشته باشند، مشکل بوده و نیاز به مطالعات و برنامه‌ریزی‌های دقیقی دارد. در مورد

مصالح نرم‌تر و با مواد مقاوم‌تری که خرد یا شکسته شده باشند مناسب هستند، ولی برای کار در شرایط سنگی یا خاک یخ زده کارایی ندارند. در این حالت به سیستم‌های حفاری که فاصله‌داری ابزار حفاری در آن متغیر باشد نیاز است تا اجازه‌ی فعالیت در مصالح مختلف را بدهد. این ماشین می‌تواند در معدن‌کاری و همچنین حفاری‌های سطحی در شرایط مختلف و برای کاربردها و اهداف متنوع استفاده شود.

به منظور ساخت سیستم حفاری با مته‌هایی که فاصله‌ی قابل تغییر دارند، لازم است تا خواص رگولیت و مشخصات مکانیکی آن در سطح و عمق شناخته شود. همچنین لازم است تا رفتار رگولیت یخ زده، ابزار برش، طراحی کله‌ی حفاری در شرایط مختلف کاری، طراحی سیستم حفاری و زیر شاخه‌های آن، سیستم باربرداری و به طور کلی مفاهیم اصلی طراحی دستگاه مورد بررسی دقیق قرار گیرد. برای این منظور آزمایش‌های گسترده‌ای در طی سه سال گذشته به عنوان بخشی از مطالعات مربوط به این موضوع برای سازمان هوا و فضای آمریکا، ناسا<sup>(۱)</sup>، انجام شده است. این مقاله ویژگی‌های خاک ماه و همچنین چگونگی آزمایش‌ها و نتایج مطالعات، شامل آزمایش‌های مقیاس واقعی و طراحی یک کله‌ی حفاری جدید برای حفاری در ماه را توضیح می‌دهد.

## ۲- هدف و مسایل جانبی معدن‌کاری در سطح ماه

هدف از استخراج و معدن‌کاری در ماه تأمین مواد اولیه‌ی مورد نیاز پایگاه‌های پشتیبانی بوده و از این لحاظ، اولین و مهم‌ترین ماده معدنی برای استفاده در سطح ماه، آب است. آب علاوه بر مصرف مستقیم در کارهای روزانه، از طریق تجزیه به اکسیژن و هیدروژن برای تهیه‌ی سوخت، مورد مصرف قرار خواهد گرفت. این دو ماده مبنای اصلی سوخت راکت‌های فضایی هستند. بنابراین اطلاعات در دسترس، آب موجود در سطح ماه می‌تواند به صورت یخ جذب شده در خاک مناطق قطبی و قسمت تاریک ماه، باشد. درجه حرارت در این مناطق بسیار پایین و در حد ۷۰- تا ۱۲۰- درجه سانتیگراد تخمین زده شده است.

1-NASA

میزان استخراج مواد معدنی، حجم تولید در نظر گرفته شده در حد چند تن در روز بوده که برای شروع فعالیت‌ها مناسب تشخیص داده شده است. ولی برای تولید همین مقدار هم باید دستگاه‌های جدیدی طراحی شوند که با حداقل وزن و توان بتوانند به کار تولید بپردازند. بنابراین، مطالعه روش‌ها و سیستم‌های حفاری که قادر باشند در شرایط مختلف و تا حدی غیر قابل پیش بینی، کارکرد مناسبی را ارائه نمایند، جزو الویت‌های پژوهشی مربوط به استقرار پایگاه‌های فضایی قرار گرفته است. پروژه حاضر از جمله این مطالعات است که برای توسعه ماشین حفاری سبک، انعطاف پذیر، و با قابلیت حفر در محدوده وسیعی از مواد در حال انجام است. این پروژه توسط تیمی از متخصصین در رشته‌های مختلف تحت مدیریت شرکت اوربیتک<sup>(۱)</sup> انجام شده و نتایج اولیه‌ی آن در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳- خواص سنگ و خاک

اطلاعات موجود در مورد زمین شناسی و خواص مواد سطحی و عمقی کره‌ی ماه خیلی محدود بوده و غالباً از طریق دورسنجی انجام شده است. سفرها و بازدیدها از سطح این کره به موارد کمی خلاصه شده و مقدار ناچیزی نمونه از سطح ماه در اختیار است که برای مطالعات زمین شناسی و تعیین کانی‌ها و دانه بندی خاک ماه استفاده شده است. به طور خلاصه، کار اکتشافی خاصی بر روی ماه انجام نشده و اندازه‌گیری‌های موجود برای بررسی سیستم‌های حفاری و یا مطالعات مربوط به معدن‌کاری باید با توجه به این محدودیت‌ها انجام گیرد. خواص فیزیکی خاک خشک ماه و سیاره زهره، یا به طور مستقیم اندازه‌گیری شده و یا از طریق اندازه‌گیری‌ها تخمین زده شده است. خلاصه‌ای از خواص فیزیکی مهم اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای رگولیت توسط Gertsh و همکارانش در سال ۲۰۰۸ محاسبه و منتشر شده است [۱].

برخی از اطلاعات مخلوط یخ و خاک سطح ماه را می‌توان از تجربه‌های سطح زمین و خاک‌های یخ زده<sup>(۲)</sup> به دست آورد. بسیاری از اطلاعات موجود در مورد مشخصات فیزیکی خاک‌های

یخ زده در زمین، برای فعالیت‌های ساختمانی در زمین‌های یخ‌زده انجام شده‌اند. از آنجا که محدوده‌ی دماهای مطالعه و آزمایش شده به طور معمول گرم‌تر از مقدار تخمین زده شده برای ماه است و همچنین، میزان آب یخ زده‌ی موجود در این آزمایش‌ها بیشتر از مقداری است که برای ماه تصور می‌شود، نتایج این مطالعات نمی‌تواند به طور مستقیم برای ارائه سیستم حفاری در معدن‌کاری ماه مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه، برخی از داده‌های موجود آزمایش‌های خاک‌های یخ زده می‌توانند به دما و آب محتوای مورد نظر در ماه تعمیم داده شوند.

به طور کلی مشخصات فیزیکی خاک‌های یخ زده به عوامل مختلف زیر حساس است:

۱- درصد رطوبت یا آب موجود در خاک

۲- دمای خاک یخ زده

۳- نوع خاک (توزیع دانه بندی)

با توجه به عدم دسترسی به مقدار خاک لازم برای آزمایش‌های طراحی سیستم حفاری، انواع مختلفی از خاک بازسازی یا شبیه‌سازی شده‌ی ماه تهیه شد و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پژوهش ارائه شده در این مقاله بر روی نوع خاک شبیه سازی شده JSC-1 است.

برای مشخص نمودن خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها و رگولیت‌های یخ زده و یا تحکیم یافته مرتبط با قابلیت حفاری آزمایش‌هایی انجام شد که به عنوان نقطه‌ی شروع برای طراحی دستگاه حفاری به آنها نیاز بود. برای درک بهتر محدوده‌ی بالقوه‌ی خواص فیزیکی که ممکن است در حین عملیات حفاری با آن مواجه شویم، ترکیب‌های متفاوتی از یخ و خاک شبیه سازی شده، آماده شد و مقاومت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، یک سری آزمایش نفوذ<sup>(۳)</sup> انجام شد تا رفتار مکانیکی خاک یخ زده تحت بار نقطه‌ای با سایر مواد در دسترس و اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های حفاری، مقایسه شود. نتایج این آزمایش‌ها در تشخیص بهتر رفتار مخلوط خاک یخ زده‌ی ماه و انتخاب ابزار حفاری مناسب در مقایسه مستقیم با سایر مواد حفاری شده در موارد مشابه و با ماشین‌های متداول حفاری کمک

1-Orbital Technologies Inc (Orbitec)

2-Permafrost

3-Punch test

نیست. این نتیجه‌گیری توسط نیروهای نفوذ خیلی پایین و نیز عمق نفوذ نسبتاً بالای گسیختگی اولیه‌ی نمونه‌های خشک مورد تأیید قرار گرفت.

نمونه‌هایی که به‌طور استاتیکی و یا با لرزش متراکم شده بودند به دلیل قفل شدگی دانه‌ها، رفتاری شبیه سنگ داشتند. گسیختگی در مخلوط‌هایی که دارای یخ بودند بیشتر رفتار شکستگی ترد داشت. مخلوط خاک شبیه‌سازی شده‌ی یخ زده‌ی اشباع همانند سنگ عمل کرده و در مقابل فشار، مقاوم ولی در مقابل کشش، مقاومت کمی دارد.

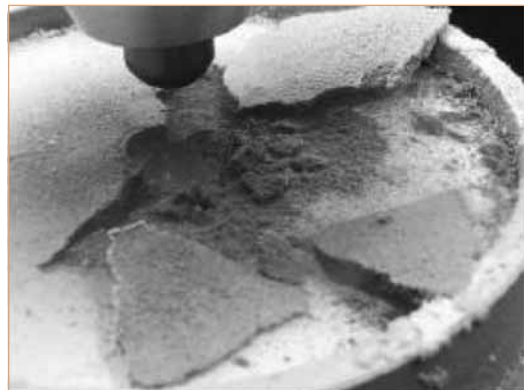
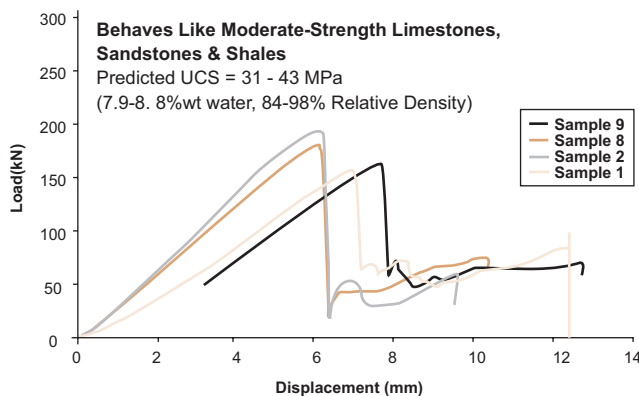
یکی از متداول‌ترین اندیس‌های اندازه‌گیری و مشخصات سنگ به منظور ارزیابی سیستم حفاری مکانیکی، اندازه‌گیری مقاومت تک محوره فشاری یا UCS سنگ است. از این آزمایش جهت انتخاب ابزار و سیستم حفاری مناسب برای انواع مختلف سنگ معلوم استفاده می‌شود. آزمایش مشخص کرد که UCS نمونه‌ی اشباع JSC-1 از رگولیت شبیه‌سازی شده‌ی ماه می‌تواند مقاومتی در حد ۱۰۲ تا ۱۰۴ مگاپاسکال داشته باشد که این با مقدار UCS پیش بینی شده از آزمایش نفوذ و مقدار SP محاسبه شده تطابق داشت.

منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های یخ زده نشان داد که می‌توان شکست مخلوط‌های یخ زده را به عنوان رفتار و شکست ترد در نظر گرفت. با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها مشخص شد، نوع ابزار مناسب برای حفاری مواد یخ زده، مته‌های مخروطی است و مته‌های خاصی برای ادامه‌ی آزمایش‌های حفاری انتخاب

نموده و امکان بهینه‌سازی کله‌ی حفاری را فراهم می‌کند. با مخلوط کردن مکانیکی مقادیر مختلف آب با خاک خشک شبیه‌سازی شده ماه JSC-1، نمونه‌هایی با درصد رطوبت کمتر از ۱٪ تا کاملاً اشباع تهیه شد. بازرسی‌های بعدی مشخص نمود که نمونه‌ها همگن هستند. نمونه‌ها با روش‌های متفاوتی متراکم شدند. رسیدن به تراکم بالاتر از آن جهت مورد نظر است که می‌تواند محدوده‌ی بالایی مقاومت مخلوط یخ‌زده را تعیین نماید.

به منظور تعیین نفوذ ویژه (SP) و انرژی ویژه (SE) آزمایش‌های نفوذ بر روی نمونه‌ها انجام شد. آزمایش نیرو - نفوذ (یا بار - نفوذ) در حالت استاندارد عبارت است از فشردن یک ابزار مخروطی شکل از سطح به داخل نمونه با نرخ تقریباً معادل نرخ کرنش در ابزار برش واقعی و ثبت نیروی لازم به عنوان تابع مقدار نفوذ [۳ و ۴]. نفوذ ویژه [۴] مقدار نیروی لازم برای نفوذ به میزان معین، برای ایجاد تراشه‌های حفاری است. انرژی ویژه، مقدار انرژی لازم برای حفاری یا برش واحد حجم ماده است.

گسیختگی در نمونه متراکم شده‌ی خشک، از نوع انعطاف پذیر با ایجاد حالت گنبدی شکل مواد در اطراف محل نفوذ است. این موضوع مشخص می‌کند که نیروی زیادی برای نفوذ لازم نبوده و این نوع مواد، توسط لودر، بیل مکانیکی یا سایر دستگاه‌های عملیات خاکی، که نیروی متمرکز زیادی برای برش ندارند، قابل حفاری و بارگیری هستند و نیازی به کله‌ی حفاری



شکل (۱) - تصویر آزمایش و منحنی نیرو - نفوذ برای نمونه با درصد رطوبت حدود ۸٪.

شد. سپس با انجام آزمایش های برش مقیاس واقعی در مخلوط مورد نظر نیروهای برشی اندازه گیری و برای طراحی تفصیلی کله ی حفاری مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۴- آزمایش های برش و حفاری مقیاس واقعی

فرآیند حفاری و خردایش سنگ پدیده ای است که تاکنون پیش بینی آن بر اساس آزمایش های مقیاس کوچک آن موفق نبوده است. این بدان معنی است که آزمایش های مقیاس کوچک، درک دقیق و کاملی از چگونگی فرآیند خردایش و ایجاد تراشه را نشان نمی دهند. این موضوع در مورد مدل سازی این فرآیند نیز صادق است. حتی با روش های مدل سازی قوی امروزی هنوز مدل سازی برش سنگ در مراحل اولیه ی توسعه ی خود است. بخشی از مشکل به دلیل آن است که مدل ها توانایی در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر بر گسیختگی سنگ به هنگام برش را ندارند. این پارامترها شامل مقاومت، رفتار کشسانی، تردی، اثر ساختار سنگ و سایر موارد مشابه است.

بنابراین برای طراحی تفصیلی سیستم حفاری بهینه، لازم است آزمایش هایی در مقیاس واقعی انجام گیرد تا با اندازه گیری نیروهای وارد شده بر ابزار حفاری، در حین خردایش سنگ، انتخاب مشخصات هندسی صورت پذیرد. همچنین به وسیله ی این آزمایش، سطح مورد برش مورد بررسی دقیق تری قرار می گیرد و اثر ابزار حفاری در طول مسیر برش به منظور جلوگیری از ایجاد زواید ارزیابی شود. یکی از بزرگ ترین نتایج آزمایش در مقیاس واقعی، بررسی تأثیر تغییر هندسه ی برش (فاصله داری بین برش ها و میزان نفوذ) بر کارکرد ابزار حفاری است. اطلاعات به دست آمده از این آزمایش ها به طراح اجازه می دهد تا ابزار و هندسه ی مناسب برش را انتخاب کند که این موارد پارامترهای اولیه ی مورد نیاز برای انتخاب مقطع یا پروفیل و توزیع ابزارها<sup>(۱)</sup> به روی کله ی حفاری است. این مورد، برای طراحی کله ی حفاری در سطح ماه و یا سایر کرات جهت دستیابی به طراحی مناسب و کاهش اندازه و وزن کله ی حفاری بسیار مهم تر از موارد عادی است.

طراحی ساختار کله ی حفاری به اندازه گیری دقیق نیروهای برش در هر سه جهت عمود بر سطح، نیروی برشی یا مقاومت سنگ در جهت برش و نیروهای جانبی<sup>(۲)</sup> نیاز دارد. این موضوع شامل برآورد مقدار متوسط و حداکثر نیروها است تا پایه ابزار حفاری و سازوکار نصب آن بر روی کله ی حفاری، توانایی لازم جهت عکس العمل به چنین نیروهایی را داشته باشد. روش معمول در طراحی ماشین های معدن کاری آن است که از یک پوسته ی سنگین استفاده می شود و پایه ها بر روی آن جوش کاری می شوند و بر نیرو و گشتاور مورد نیاز ماشین اضافه می شود تا نیروهای لازم برش را تأمین کند. اما، به دلیل اهمیت بالای وزن ماشین در این کاربرد و هزینه های فوق العاده بالای حمل بار در سفینه های فضایی، این روش مناسب و قابل استفاده نبوده و اجزای ساختاری باید به گونه ای طراحی شوند که نیروی لازم را اعمال کنند ولی بیش از حد نیاز طراحی نشده باشند تا وزن کلی دستگاه به حداقل برسد. از این رو، لازم است تا آزمایش ها در مقیاس واقعی صورت گیرند تا اندازه گیری دقیق نیروها برای طراحی بهینه کله ی حفاری دستگاه حفاری برای استفاده در ماه انجام شود و از کاربرد ضرایب اطمینان بیش از حد جلوگیری به عمل آید.

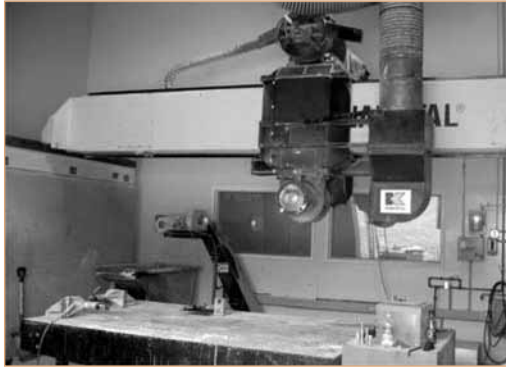
آزمایش های برش نمونه ها در مقیاس واقعی در آزمایشگاه حفاری کارخانه ی کنامتال<sup>(۳)</sup> در شهر لتروب پنسیلوانیا<sup>(۴)</sup> انجام شد. دو نوع مته حفاری برای اولین بخش از آزمایش ها انتخاب شد. یکی از آنها مدل RL-11 است که دارای قطر محور ۱۸ میلی متری است و در دستگاه های آسفالت بر کاربرد دارد و دیگری U43-k150 از نوع مته های مخروطی شکل با همان محور ولی بالبه باریک تر و تیزتر است. سرمته های کوچک، به دلیل ملاحظه وزن کلی سیستم و همچنین توجه به حجم تولید نسبتاً پایین مورد نیاز در عملیات معدن کاری در ماه که در حد تولید چند تن در روز است، انتخاب شدند. شکل (۲) این ابزارها را نشان می دهد. از آنجا که آزمایش در مقیاس واقعی بر روی بلوک یخ زده ی رگولیت در دمای مورد نظر قابل انجام نبود، سعی شد تا بهترین سنگ یا مواد معادل آن برای آزمایش ها در درجه حرارت عادی

1-Lacing

2-Normal, Drag and side force

3-Kennametal Inc

4-Latrobe Pennsylvania



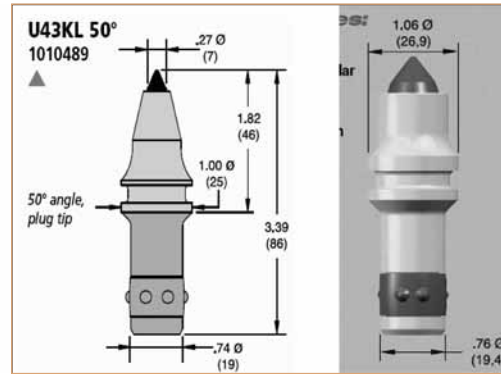
شکل (۳) - نمایی از دستگاه حفاری در شرکت کنا متال، لتروپ

دستگاه و نیروی لازم برای برش سطح مقطع مورد نظر ابزار در درون ماده مورد برش یا همان رگولیت یخ زده است. آزمایش‌های برش در فاصله ابزار ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر و مقدار نفوذ ۲/۵، ۵/۰ و ۷/۵ میلی‌متر انجام و نیروهای برشی مورد نظر در هر یک از این شرایط اندازه‌گیری شد. همچنین سطح برش مورد بررسی ظاهری قرار گرفت و نمونه‌های معرف از ماده‌ی خرد شده برای اندازه‌گیری دانه‌بندی محصول خرد شده جمع‌آوری شد (شکل‌های ۴ و ۵).

فاصله‌ی بهینه‌ی ابزار توسط نتایج آزمایش برش خطی تخمین زده شد. فاصله‌ی داری بهینه به نیروهای برشی و انرژی ویژه (SE) خردشدگی بستگی دارد. نسبت بهینه فاصله به نفوذ (نسبت S به P) نفوذ مورد نیاز برای حفاری کامل سنگ بین خطوط برش با حداقل صرف انرژی تعریف می‌شود. این آزمایش‌ها مشخص نمودند که S/P بهینه برای این ابزار و در این ماده، تقریباً ۵ است. به این معنی که اگر نفوذ حداکثر مورد انتظار ۷/۵ تا ۱۰ میلی‌متر باشد، برای کارایی بهینه برش، فاصله‌ی داری مرتبط با آن باید در محدوده‌ی ۳۷ تا ۵۰ میلی‌متر باشد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، اندازه‌گیری‌های انرژی ویژه روند خوبی از کاهش آن را همراه با افزایش نفوذ نشان می‌دهد.

#### ۲-۴- آزمایش برش چرخشی

به منظور بررسی تأثیر شکل هندسی کله‌ی حفاری و جانمایی ابزارها، تأثیر متقابل ابزارها بر یکدیگر، پارامترهای برش و عوامل عملیاتی دستگاه و فرآیند خردایش، یک سری آزمایش‌های برش

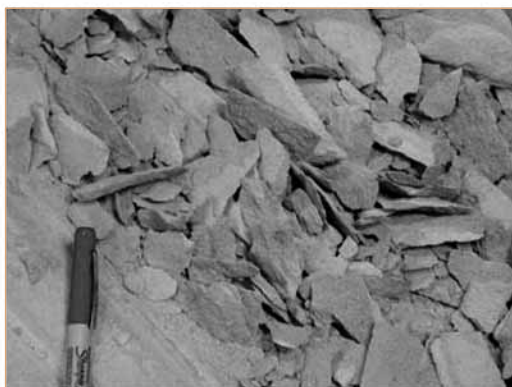


شکل (۲) - مته‌های مخروطی استفاده شده در آزمایش‌های مقیاس واقعی

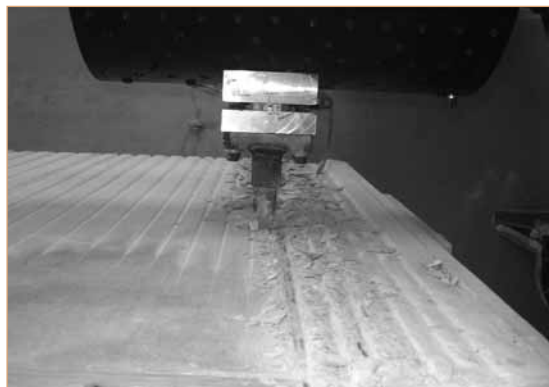
انتخاب شود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط Gertsch در سال ۲۰۰۰ بانک اطلاعاتی بزرگی از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و آزمایش نفوذ برای انواع مختلف سنگ به وجود آمده است [۴]. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده‌ی یخ‌زده و سنگ‌های بانک اطلاعاتی نشان داد که سنگ آهک مخصوصی از ایالت ایندیانا می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای رگولیت یخ زده با ۸ در صد رطوبت (که به نظر می‌رسد حداکثر درصد رطوبت احتمالی در سطح ماه باشد) مورد استفاده قرارگیرد. این سنگ، مرز بالایی مقاومت موادی را مشخص می‌سازد که برای معدن‌کاری یخ توسط این ماشین مورد حفاری قرار خواهند گرفت. سنگ آهک انتخاب شده مقاومت فشاری در حدود ۵۰ مگا پاسکال و SE و SP در حد نمونه یخ زده دارد. همچنین به منظور شبیه‌سازی درصد آب پایین‌تر، بلوک‌های سیمانی سفارش داده شدند. این بلوک‌های سیمانی مقاومتی در حدود ۳/۵ تا ۱۰ مگا پاسکال داشتند. ابعاد بلوک‌های استفاده شده برای آزمایش ۱/۸×۱/۲×۱/۶ متر بودند. شکل (۳) تصویری از ماشین استفاده شده برای آزمایش در مقیاس واقعی را نشان می‌دهد. یک سری از آزمایش‌های برش خطی و دورانی برای اندازه‌گیری نیروهای برشی و بررسی هندسه‌های مختلف برش انجام شد.

#### ۱-۴- آزمایش برش خطی

پایه‌ی محاسبات پارامترهای عملیاتی دستگاه حفاری شامل نیروی نفوذ یا عمود بر سطح، نیروی دورانی و میزان کل توان



شکل (۵) - گسیختگی شاخص به هنگام دستیابی به نفوذ مورد نظر  $S/P=3.3$



شکل (۴) - آزمایش برش خطی سرمته مخروطی بر روی سنگ آهک سلم شکل

دورانی در مقیاس واقعی نیز انجام شد. مجموعه‌ی اولیه‌ی آزمایش‌ها بر روی کله‌ی حفاری صلب موجود در آزمایشگاه با قطر ۵۰۰ میلی‌متر و حفاری در سنگ آهک انجام شد. شکل (۶) نمایی از آزمایش حفاری و برش دورانی با استفاده از کله‌ی حفاری را نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها بر روی کله‌ی حفاری جدید طراحی شده برای این پروژه، ادامه یافت. هدف از این آزمایش‌ها بررسی تأثیر مشخصات هندسی برش از جمله فاصله ابزارها، مقدار نفوذ، عمق برش و سرعت حفاری مختلف بر کارکرد کله‌ی حفاری بود و اندازه‌گیری‌های مهمی در این زمینه انجام شد. همچنین مشاهده‌های حین آزمایش در تصمیم‌گیری برای شکل هندسی بهینه برای حفاری و فاصله‌ی بهینه ابزارها مورد استفاده قرار گرفت. از جمله این مشاهده‌ها ایجاد زوایید و یا

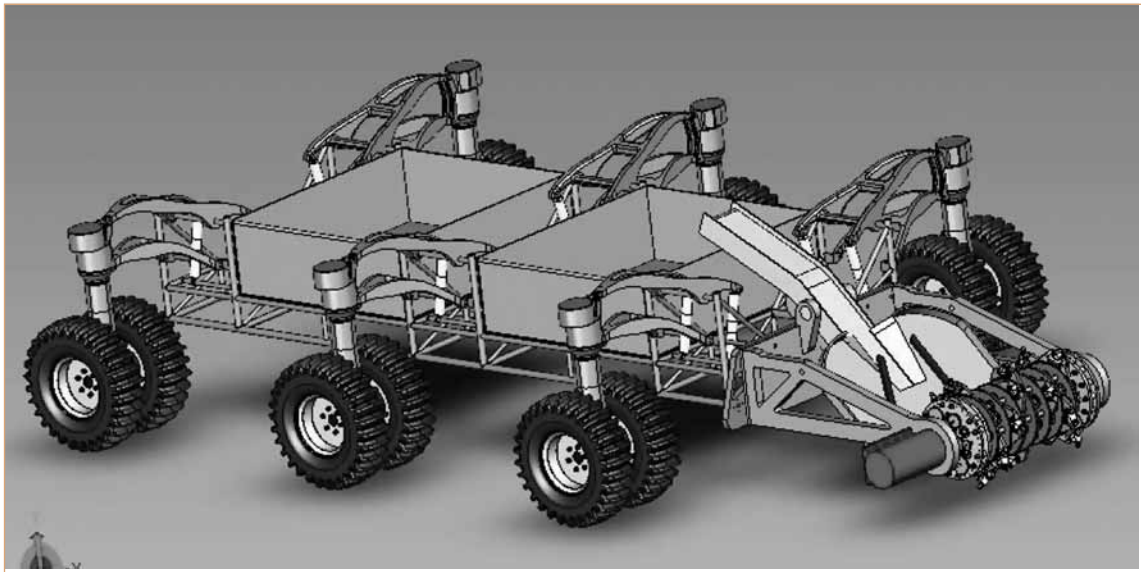
قسمت‌های باقی مانده مابین برش‌ها بود که در صورت داشتن ارتفاع بلند نامناسب می‌تواند برای ماشین حفاری مشکل ساز باشد. این سیستم جدید که اولین کله‌ی حفاری با قابلیت تغییر فاصله ابزار حفاری است، در نمونه‌های سنگ‌های آهک و دبلوک سیمانی مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش به ترتیب با تغییر در فاصله داری ابزار از ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر به ترتیب در سنگ آهک و نمونه‌ی سیمانی ۳/۵ مگاپاسکالی انجام گرفت. دوران کله‌ی حفاری به میزان ۶۰ دور در دقیقه انتخاب شد و عمق برش از ۲۵ تا ۶۳ میلی‌متر و سرعت برش از ۰/۳ تا ۶ متر در هر دقیقه تغییر داشت. شکل (۷) تصویری از آزمایش کله‌ی حفاری جدید است. نتایج آزمایش‌ها خارج از محدوده‌ی مورد بحث در این مقاله است



شکل (۷) - آزمایش برش دورانی با کله‌ی حفاری جدید (چپ) و کله‌ی حفاری صلب (راست)



شکل (۶) - آزمایش برش دورانی با کله‌ی حفاری صلب (راست) و کله‌ی حفاری جدید (چپ)



شکل (۷) - طراحی اولیه وسیله نقلیه چند منظوره فضایی که به کله‌ی حفاری مجهز شده، برای انجام عملیات حفاری در سطح ماه

مطالعه‌ها و آزمایش‌های اولیه نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند حجم تولید بالایی را در مواد نسبتاً کم مقاومت و نرم‌تر داشته و در صورت برخورد با لایه‌های مقاوم‌تر، با تغییر شکل کله و جانمایی ابزارها، قادر به حفاری آنها نیز باشد. لذا با توجه به محدودیت اطلاعات موجود در مورد مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و مواد متراکم شده در سطح ماه، این سیستم امکان کار در محدوده‌ی وسیعی از این مواد را به اپراتورها می‌دهد. بررسی و محاسبات اولیه نشان می‌دهد که سیستم حفاری مشابه ماشین‌های آسفالت بر می‌تواند برای استخراج مواد معدنی در سطح ماه و یا عملیات خاک برداری و یا ترانشه برداری مورد استفاده قرار گیرد. برآورد مقدماتی سرعت حفاری ماشین برای سیستمی که توانایی اعمال یک تن نیرو به کله‌ی حفاری و توان نصب شده‌ای معادل  $7/5$  کیلووات را داشته باشد، در حدود ۱ تا ۱۴ تن در ساعت است. حجم و سرعت حفاری تابع مقاومت مواد حفاری شده است. وزن این ماشین برای حمل و نقل کمتر از یک تن و در حالت عملیاتی در حدود ۱۰-۱۵ تن است که توسط بارگیری از خاک‌های سطحی ماه به این وزن خواهد رسید. مطالعه‌ها در مورد شاسی ماشین، نحوه‌ی بارگیری آن، و سایر مسایل جانبی استخراج و یا حفاری توسط این ماشین و همچنین ترابری بین

و در مقاله‌های بعدی بررسی خواهد شد. این کله‌ی حفاری دارای قطر ۵۰۰ میلی‌متر بوده و طول آن می‌تواند از ۳۵۰ میلی‌متر تا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر افزایش یابد. این کله در شکل فعلی دارای ۱۸ ابزار برشی مخروطی است و می‌توان در آن از انواع مته‌های دارای محور ۱۸ میلی‌متری استفاده کرد و فاصله ابزارهای آن می‌تواند از ۲۵ تا حدود ۱۰۰ میلی‌متر تغییر کند.

طراحی کله‌ی حفاری (برای کله‌ی حفاری صلب و کله‌ی حفاری جدید) بر اساس نتایج آزمایش برش خطی و مدل‌های کامپیوتری است. این مدل‌ها در خلال سال‌ها توسعه یافته و قابلیت تعمیم نتایج آزمایش‌های مقیاس واقعی را برای حالت‌های گوناگون برش دارند. اساس و پایه و کاربرد این مدل‌ها در مقاله دیگری مورد بررسی قرار گرفته است [۳، ۵]. برای بهینه کردن طراحی کله‌ی حفاری و ایجاد توزیع مناسب ابزار حفاری از مدل‌سازی کله‌ی حفاری استفاده شد. مدل‌ها هم‌چنین برای ایجاد منحنی سرعت تولید دستگاه در شرایط مختلف برش استفاده شدند. مزیت اصلی این سیستم در کاربردهای حفاری در ماه و یا در صنعت معدن و پروژه‌های عمرانی روی زمین امکان تغییر فاصله ابزارها و در نتیجه امکان حفاری بهینه در موادی با مشخصات متفاوت و در حال تغییر است.



ماشین و کارخانه فرآوری در حال انجام است. شکل (۷) طراحی مفهومی کله‌ی حفاری جدید را که بر روی ماشین چند منظوره<sup>(۱)</sup> فضایی نصب شده است نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین هدف از معدن‌کاری در سطح ماه استخراج آب از خاک‌هایی است که در اثر برودت زیاد، رطوبت موجود در جو ماه را جذب نموده و به صورت منجمد در آمده‌اند. بر پایه‌ی مجموعه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه، خواص کلی خاک ماه (رگولیت) در شرایط خشک و یخ زده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که حتی با درصدهای پایین رطوبت، رفتار رگولیت به طور قابل توجهی تغییر خواهد کرد و به نظر می‌رسد که شروع تغییر رفتار مواد یخ زده، در رطوبت حدود ۱/۵ درصد است. با فرض مراحل از متراکم تا تحکیم شدن خاک، چه با ضربه اشیا فضایی یا فشار روباره، مقاومت نمونه‌ی یخ زده با افزایش درصد آب تا حالت کاملاً اشباع افزایش می‌یابد. مقاومت نمونه‌ی یخ زده در حالت کاملاً اشباع می‌تواند تا ۱۰۰ مگاپاسکال برسد. همچنین

آزمایش‌های نفوذ در رگولیت یخ زده نشان داد که این ماده تقریباً رفتار سنگ ترد را از خود نشان می‌دهد.

آزمایش‌های مقیاس واقعی برش همچنین نشان داد که نسبت فاصله داری به نفوذ بهینه برای رگولیت در حدود ۵ است. عمق نفوذ با نیروی برش و خواص ماده به دست می‌آید و فاصله داری بهینه احتمالی این ماده ۵ برابر عمق نفوذ قابل دستیابی در آن است. با توجه به مقاومت پایین تر مخلوط خاک یخ زده با درصدهای پایین تر آب، عمق نفوذ برای نیروی برش ثابت اعمال شده، بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که فاصله داری برش به منظور دستیابی به کار آیی بهینه دستگاه باید افزایش یابد. در این مطالعه یک کله‌ی حفاری جدید که قادر به تغییر فاصله‌ی ابزارهای برشی خود است، ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌های کامل تری بر روی این کله‌ی حفاری در حال انجام است تا بر اساس آن یک سیستم حفاری کامل برای ماه که دارای کار آیی بهینه در شرایط مختلف باشد، طراحی شود.

## منابع

- 1-Gertsch, L., Rostami, J., Gustafson, R., 2008 "Review of Lunar Regolith Properties for Design of Low Power Lunar Excavators", Proceedings of 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008.
- 2-Dollinger, G.L., H.J. Handewith, C.D. Breeds [1998] "Use of the Punch Test for Estimating TBM Performance," Tunnelling and Underground Space Tech incorporating Trenchless Tech Research, Vol 13 (4) pp. 403-408.
- 3-Rostami, J. Ozdemir, L. 1996, "Computer Modeling of Mechanical Excavators Cutterhead", Proceedings of the World Rock boring Association 1996 Conference, "Mechanical Excavation s Future Role in Mining", Sep.17-19, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada
- 4-Gertsch, R.E. [2000] Rock Toughness and Disc Cutting. Ph.D. dissertation, University of Missouri-Rolla,
- 5-Rostami, Jamal, 2008, " Hard Rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction", Rolla MO 65401 Geomechanik und Tunnelbau, Ernst & Sohn, (Austrian Journal of Geotechnical Eng.), January 2008.