



مدل‌سازی عددی برش سنگ با جت آب ساینده به منظور تعیین محدوده بهینه پارامترهای مؤثر بر عمق و حجم برش

ستار مهدوری^{*}، پدram بختیاری هفت‌لنگ^۱، حبیب‌الله سایه‌وند^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

کلمات کلیدی:

جت آب ساینده
برش سنگ
روش اجزاء محدود
روش هیدرودینامیک ذرات روان

خلاصه: در این تحقیق به منظور افزایش راندمان و بهبود کیفیت برش سنگ‌ها توسط جت آب ساینده، محدوده بهینه پارامترهای مؤثر بر برش از طریق مدل‌سازی جریان پر سرعت دوفازی (آب و ساینده) بررسی شده است. فرآیند برش سنگ توسط جت آب ذره‌ای به روش اجزاء محدود- هیدرودینامیک ذرات روان شبیه‌سازی شده است. برای این منظور اثر پارامترهای سرعت، زمان توقف، تغییر غلظت حجمی و تغییر قطر ذرات ساینده بر روی عمق و حجم برش سنگ‌های سیلت‌استون و شیل بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، مقدار عمق و حجم برش سنگ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان توقف، انرژی مصرفی جت آب برای برش سنگ بیشتر می‌شود که منجر به افزایش عمق و حجم برش خواهد شد. با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده تا ۳ درصد، عمق و حجم برش با شیب ملایم افزایش یافته و بعد از آن بهبود چشم‌گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمی‌شود. با افزایش قطر ذرات ساینده تا ۱/۲۵ میلی‌متر برای سیلت‌استون و ۱ میلی‌متر برای شیل عمق و حجم برش زیاد شده و بعد از آن عمق و حجم برش ثابت مانده و یا کاهش می‌یابد.

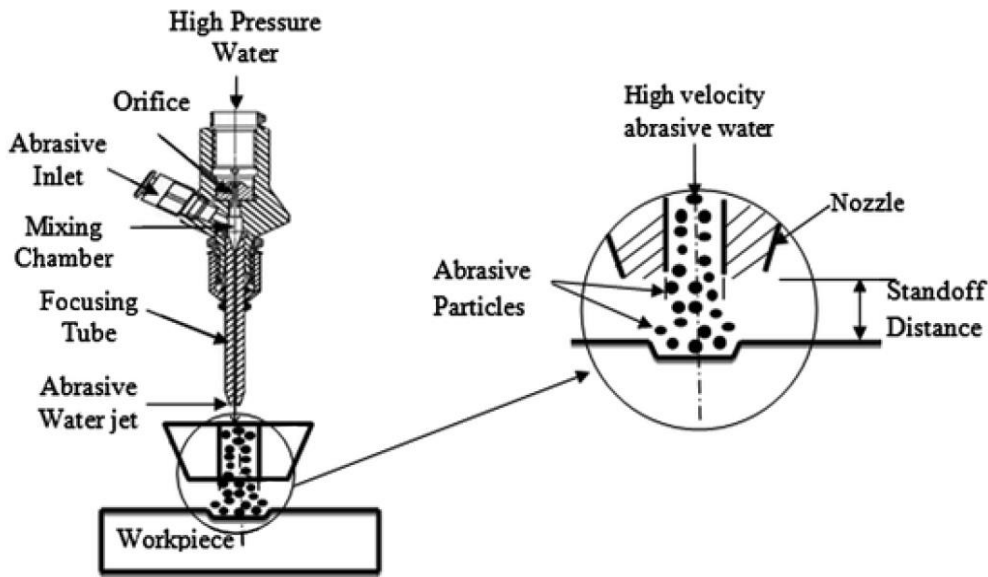
۱- مقدمه

باریک با سرعت زیاد به یک جسم جامد برخورد کرده و منجر به برش آن می‌شود. نخستین کاربرد صنعتی برش مواد با جت آب در دهه ۱۹۳۰ برای برش کاغذ توسعه داده شد [۲]. در سال‌های بعد غالباً از جت آب برای برش مواد نرمی نظیر کاغذ و لاستیک استفاده شد. بیلی شواخا این روش را برای برش مواد سخت‌تری نظیر فولاد ضد زنگ، ورق‌های لانه زنبوری، سنگ و فلز توسعه داد [۳، ۴]. در سال ۱۹۶۸ فناوری ماشین‌کاری مدرن با جت آب توسط فرانتس ابداع و سپس برای برش فلز، شیشه و کامپوزیت‌ها نیز توسعه داده شد. در سال ۱۹۸۰ با افزودن مواد ساینده به جت آب، جت آب ساینده^۱ برای برش مواد صنعتی مانند فولاد، شیشه و بتن ابداع شد [۵] که در سال‌های بعد به طور گسترده برای برش طیف وسیعی از مواد مهندسی مورد استفاده قرار گرفت [۶].

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اجزای اصلی یک دستگاه جت آب شامل واحد تأمین جریان آب، پمپ، سیستم کنترل، سیستم تنظیم، محفظه اختلاط، اوریفیس، نازل، لوله تمرکز و لوله تزریق ساینده است. در

امروزه با توجه به کاربرد گسترده انواع سنگ‌های تزئینی و نما و لزوم دقت در برش کاری آنها، از روش‌های مختلفی از قبیل جت آب، جت شعله، امواج ماکروویو و غیره برای برش دقیق سنگ‌ها استفاده می‌شود که در این میان هزینه برش با جت آب کمتر و استفاده از آن راحت‌تر و ایمن‌تر می‌باشد [۱]. از مزیت‌های جت آب عدم ایجاد تنش پسماند و عدم ایجاد تنش حرارتی بعد از ماشین‌کاری است. در جت آب، جریانی از آب یا جریانی از آب و ذرات ساینده با سرعت زیاد از یک نازل خارج شده و اقدام به برش یک جسم جامد می‌کند. ویژگی‌های برش اجسام جامد با جت آب ساینده عبارتند از: عدم ایجاد ناحیه متأثر از گرما، دقت در خط برش، نرخ برش بالا، برش اشکال هندسی پیچیده، کاهش میزان خطا و غیره که باعث کاربرد گسترده جت آب برای برش انواع فلزات و آلیاژها، شیشه‌ها، مواد کامپوزیتی، انواع سنگ‌ها و سطوح بتنی با ضخامت‌های کمتر از ۲۵ سانتی‌متر شده است. در فرآیند برش با جت آب، جریانی از آب تحت فشار از طریق یک نازل





شکل ۱. جت آب ساینده به همراه اجزای آن [۱۰]

Fig. 1. Abrasive water jet along with its components [10]

همچنین مدت زمانی که جریان خروجی از جت آب بر روی نمونه توقف می‌کند، به زمان توقف^۲ معروف است. اگر جت آب حرکت افقی هم داشته باشد به جای زمان توقف، پارامتر سرعت عبور^۳ تعریف می‌گردد. زمان توقف بر حسب ثانیه و سرعت عبور بر حسب میلی‌متر مکعب بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. به حد فاصل بین انتهای نازل تا ابتدای نمونه نیز فاصله کانونی^۴ گفته می‌شود.

در این پژوهش به منظور تعیین پارامترهای بهینه برای برش سنگ با جت آب ساینده از مدل‌سازی عددی استفاده شده است. برای این منظور با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، ماده ۱۴۵ در نرم‌افزار LS-DYNA^۵ برای مدل‌سازی دو نمونه سنگ سیلت‌استون (لای سنگ) و شیل انتخاب شده است. برای مدل‌سازی فرآیند برش از یک ستون بلند حاوی ذرات آب و ساینده که در مدت زمان اجرای نرم‌افزار تمام نمی‌شود، استفاده شده است. با بهره‌گیری از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان برش سنگ با جت آب را بهبود و ضایعات ناشی از فرآیند برش را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

جت آب ساینده، ذرات ساینده به درون جریان آب تحت فشار تزریق شده و پس از انتقال ممتوم بین ذرات ساینده و جریان پر سرعت آب در نازل، جریان دوفازی (آب و ساینده) یا سه فازی (آب و ساینده و مقداری هوا) آماده برش نمونه است. انواع مختلفی از ساینده‌ها نظیر گارنت، آلومینای ذوب شده سفید، آلومینای ذوب شده قهوه‌ای، سیلیکون کاربید، دانه‌های شیشه‌ای و پودر زمرد در جت‌های آب استفاده می‌شود [۷]. در ۸۰ درصد کاربردهای صنعتی از گارنت (ساینده طبیعی) استفاده می‌شود [۸].

کارایی برش متأثر از اندازه، شکل و سختی ذرات ساینده خواهد بود. اگر جت آب بدون ذرات ساینده باشد، به آن جت آب خالص می‌گویند و برای برش مواد نرم نظیر چوب، لاستیک و کاغذ مناسب است. در مقابل، جت آب ساینده برای برش مواد سخت مثل فلز، سنگ و بتن به کار می‌رود. یکی از انواع جت آب ساینده، جت آب ذره‌ای^۱ است که مکانیزم آن مشابه جت آب ساینده است. با این تفاوت که به جای ذرات ریز و پرتعداد ساینده از ذرات درشت (۰/۵ تا ۵ میلی‌متر) با غلظت کم (۱ تا ۵ درصد) استفاده می‌شود [۹]. در جت آب ساینده، سرعت خروجی جت در هنگام خروج از نازل یکی از پارامترهای اصلی است که معمولاً بر حسب متر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود.

2 Dwell time
3 Traverse speed
4 Standoff distance
5 LS-DYNA

1 Particle Waterjet (PWJ)

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

در سال ۱۹۸۴ برش فلز با جت آب ساینده به علت شتاب ذرات معلق درون آب تحت فشار مورد توجه محققین قرار گرفت [۱۱]. در سال ۱۹۸۹ مدلی برای تعیین عمق برش در ماشین کاری جت آب ساینده به صورت تابعی از تنش جریان پویا^۱ و سرعت بحرانی ارائه شد که بر اساس نتایج آن مدول الاستیسیته بیشترین تأثیر را بر روی عمق برش دارد [۱۲]. در سال ۱۹۹۳ فرآیند برش مواد توسط جت آب خالص و جت آب ساینده مقایسه شد و بر اساس نتایج آن در هر دو روش تنش پسماند مشاهده نشد ولی جت آب ساینده در مقایسه با جت آب خالص، کارآمدتر است [۱۳]. حشیش و همکاران [۱۴] در سال ۱۹۹۷ جت آب با فشار فوق‌العاده بالا (تا ۶۹۰ مگاپاسگال) را به روش تجربی مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد که جت آب با فشار فوق بالا، به صورت مؤثری می‌تواند ورق‌های ضخیم فلزی (تا ۱/۶ میلی‌متر) را با سرعت عبور ۴/۲۳ متر بر ثانیه برش دهد. همچنین افزایش فشار منجر به افزایش کیفیت سطوح برش، کاهش مصرف ذرات ساینده، کاهش عرض برش و عدم لایه‌لایه شدن ورق‌های کامپوزیتی شده است. مومبر و کواکویچ [۱۵] در سال ۱۹۹۷ اثر پارامترهای مختلف در جت آب ساینده را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد سنگی که مقاومت فشاری و مدول یانگ بیشتری داشته باشد، عمق برش کمتری خواهد داشت. همچنین از آنجا که سرعت انتشار ترک یکی از پارامترهای مهم برای توصیف مقاومت برشی است، یک رابطه چندجمله‌ای مرتبه دوم برای معرفی ارتباط بین عمق برش و سرعت انتشار ترک در سنگ تحت شرایط مختلف برش ارائه شده است. نتایج پژوهش مومبر در سال ۱۹۹۸ نشان می‌دهد با افزایش عمق برش، انرژی جنبشی ذرات ساینده به صورت خطی کاهش می‌یابد [۱۶]. کولکچی در سال ۲۰۰۲ با هدف بررسی پارامترهای جت آب صنعتی در تحقیق خود نتیجه گرفت با افزایش قطر ذرات ساینده تا ۲۰۰ میکرون عملکرد برش زیاد می‌شود ولی برای ذرات ساینده با قطر بیشتر به علت افزایش جرم ذرات و کاهش شتاب اولیه آنها، عملکرد برش کاهش خواهد یافت [۱۷].

در سال ۲۰۰۷ مانیاداکی و همکاران [۱۸] روش اجزاء محدود را برای مدل‌سازی جت آب خالص به کار بردند. نتایج نشان می‌دهد که عبور جریان آب از درون نازل، رفته‌رفته به یک جریان توسعه یافته با پروفیل سرعت یکنواخت تبدیل می‌شود. شاهوردی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۱ برش جت آب ساینده را با روش هیدرودینامیک ذرات روان (اس‌پی‌اچ)^۲ و روش

اویلر-لاگرانژ دلخواه (ای‌ال‌ای)^۳ شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش فشار در هر سه روش آزمایشگاهی، اس‌پی‌اچ و ای‌ال‌ای، عمق برش نیز زیاد می‌شود. همچنین با افزایش سرعت عبور جت آب، عمق برش کم می‌شود. آنها نتیجه گرفتند اعتبار روش اس‌پی‌اچ نسبت به روش ای‌ال‌ای بیشتر است. زیرا در روش اس‌پی‌اچ هر ذره به عنوان یک توده جرمی مستقل در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در روش ای‌ال‌ای تمام ذرات ساینده در آب حل می‌شوند. ونجون و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۱ روش ای‌ال‌ای را برای شبیه‌سازی ماشین کاری جت آب ساینده به کار بردند. نتایج نشان می‌دهد با رسیدن زمان خاتمه به یک مقدار مشخص، عمق برش ثابت می‌شود و دیگر تغییر نمی‌کند. جنت و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۲ برش مواد شکل‌پذیر توسط جت آب را بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهند در دبی‌های مشخص، ذرات با قطر بیشتر و تعداد کمتر سریعتر از ذرات با قطر کمتر و تعداد بیشتر، فرآیند برش را انجام می‌دهند. همچنین ذرات زاویه‌دار در مقایسه با ذرات کروی، نرخ برش بهتری دارند. هسو و همکاران [۲۲] نیز در سال ۲۰۱۳ برخورد جت آب را در نرم‌افزار آباکوس با روش کوپل شده اویلری-لاگرانژی شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فشار در منطقه مرکزی برخورد (محل بیشترین سرعت) رخ می‌دهد. در شبیه‌سازی به روش کوپل شده اس‌پی‌اچ-اف‌ای‌ام توسط گو و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۶ مشاهده شد که با افزایش فشار، عمق برش زیاد می‌شود. همچنین با کاهش سرعت عبور، عمق برش نیز افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ اثر پارامترهای جت آب ذره‌ای بر روی برش سنگ را بررسی کردند. برای شبیه‌سازی ذرات آب و ساینده از روش اس‌پی‌اچ و برای شبیه‌سازی سنگ از روش اف‌ای‌ام استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد هر چقدر سرعت جت آب خروجی از نازل بیشتر باشد، عمق و حجم برش بیشتر می‌شود و با افزایش زمان توقف جت روی سنگ، عمق و حجم برش افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران [۴۲] نیز در سال ۲۰۱۲ برش سنگ تحت ضربه جت آب را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی سنگ و ذرات ساینده از روش اف‌ای‌ام و برای ذرات آب از روش اس‌پی‌اچ استفاده کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عمق و حجم برش بی‌بعد در سرعت‌های مختلف با افزایش زمان و سرعت، در ابتدا زیاد شده و سپس ثابت می‌ماند. همچنین با افزایش غلظت حجمی ذرات تا ۲/۵ درصد، در ابتدا عمق برش و حجم برش افزایش می‌یابد ولی در ادامه روند کاهشی خواهد داشت. چن و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۸ برش فولاد با جت آب تحت تأثیر زوایا و فشار مختلف

1 Dynamic flow stress

2 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

3 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

را با روش *اس پی ایچ-اف ای ام* شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد رابطه بین فشار و عمق برش خطی است و یک فشار آستانه در حین برش جت آب ساینده وجود دارد، که برای فولاد در محدوده ۱۵ تا ۱۷ مگاپاسکال قرار دارد. زاویه بهینه جت برای این نوع آلیاژ نیز حدود ۸۰ درجه است. پاسکن و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۸ برش دو نوع صفحه فلزی با جت آب خالص را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند. در شبیه‌سازی آنها برای ذرات آب از روش *اس پی ایچ* استفاده شده است. پاسکن و همکاران از سرعت ۱۲۵۰ متر بر ثانیه، برای سرعت دادن به ذرات *اس پی ایچ* آب استفاده کردند. برای صفحه آلومینیومی، بیشینه تنش فون میزس حدود ۲۰۰ مگاپاسکال است که خیلی نزدیک به مقاومت نهایی این آلیاژ است. اما برای آلیاژ تیتانیومی بیشینه تنش فون میزس حدود ۴۲۰ مگاپاسکال و معادل نصف مقاومت نهایی این آلیاژ است. از این رو صفحه آلومینیومی نرخ و عمق برش بیشتری نسبت به صفحه سخت‌تر تیتانیومی دارد. فنگ و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۹، اثر شکل ذره روی راندمان برش آلیاژ تیتانیوم با روش *اس پی ایچ* را بررسی کردند. نتایج گویای آن است که شکل ذره به عنوان یک پارامتر مهم، در برش مؤثر است. از بین سه نوع شکل گرد، مثلثی و چهار ضلعی، ذرات مثلثی بهترین کارایی برش را دارند. لیو و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۹ برش سنگ توسط جت آب ساینده را در فشارهای مختلف به روش *اس پی ایچ-اف ای ام* شبیه‌سازی کردند. بر این اساس افزایش فشار جت آب باعث کاهش نیروی برش و بهبود برش سنگ شده است. آیدین و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹، اثر نوع ساینده را بر روی عملکرد برش سنگ با جت آب مطالعه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که خواص فیزیکی ذرات ساینده همچون سختی و چگالی اثر مستقیمی بر روی عملکرد برش سنگ و عمر نازل دارد. سیلیکون کاربید و آلومینای ذوب شده عمق برش بیشتر و زاویه برش کمتری دارند؛ در حالیکه دانه‌های شیشه‌ای سطح برش نرم‌تری ایجاد می‌کنند. بلجاسم و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۰ روش *اس پی ایچ-اف ای ام* را تحت ضربه جت آب پر سرعت، شبیه‌سازی کردند و نشان دادند روش *اس پی ایچ-اف ای ام* به واقعیت نزدیک بوده و کارآمد است. لیو و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۲۱، مکانیزم برش مواد سرامیکی توسط جت آب ساینده را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم برش سرامیک‌ها ترکیبی از برش مواد سخت و پلاستیک است. همچنین با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده، عمق برش زیاد می‌شود. در حالی که با افزایش سرعت عبور، عمق برش کاهش می‌یابد. یو و همکاران [۳۱] نیز در سال ۲۰۲۱ شکست بتن توسط جت آب ساینده را به روش *اس پی ایچ-اف ای ام* شبیه‌سازی کردند. طبق نتایج حاصل با فرض

یک قطر ثابت برای نازل جت آب، هنگامی که سرعت ضربه جت آب از سرعت بحرانی بیشتر شود، ترک‌های جانبی در داخل بتن ایجاد می‌شوند که قابلیت جت آب را به طور قابل توجهی افزایش داده و موجب تخریب بتن می‌شود. اگر سرعت جت آب از سرعت بحرانی کم‌تر شود، ناحیه برش به همسایگی دهانه برش و ترک‌های اصلی محدود شده و به صورت فرسایشی در سطح ظاهر می‌شود. مهمان‌نواز و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۲۱ نفوذ خرج گود در بتن را بررسی کردند. آنها در پژوهش خود اشاره می‌کنند که در روش *ای ال ای* با تغییر شکل یافتن المان‌ها، زمان حل مسئله نسبت به روش اولیری کاهش می‌یابد. همچنین نرم افزار *ال اس داین* با تقسیم دامنه محاسباتی مدل اجزاء محدود به قسمت‌های کوچکتر و حل معادلات حاکم با رعایت شرایط مرزی باعث کاهش زمان محاسبات و در نتیجه عمق نفوذ بیشتر در بتن می‌شود. واسودوان و همکاران [۳۳] نیز در سال ۲۰۲۲ با استفاده از روش کوپل شده *اس پی ایچ-اف ای ام*، زاویه قرارگیری ۹۰ درجه، سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه و فاصله کانونی ۲ میلی‌متر را به عنوان مقادیر بهینه در فرآیند سوراخ‌کاری با جت آب ساینده معرفی کردند. وانگ و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۲۳، برای بررسی مکانیسم آسیب سنگ حاوی ترک، تحت ضربه جت آب با ذرات فولادی از روش کوپل شده *اس پی ایچ-اف ای ام* استفاده کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که دلیل مسدود شدن انتشار موج تنش توسط ترک‌ها، ناحیه فروپاشی در بالای ترک ظاهر و سپس تخریب در داخل منطقه فروپاشی رفته‌رفته زیاد می‌شود. علاوه بر این، حجم سوراخ ایجاد شده به طور غیرخطی با طول ترک افزایش می‌یابد در حالی که عمق سوراخ اساساً بدون تغییر باقی می‌ماند. ژائو و همکاران [۳۵] نیز در سال ۲۰۲۳، با هدف بهبود پارامترهای جت آب ساینده و افزایش سرعت حفاری در سنگ سخت در مطالعه‌ای به روش *اس پی ایچ-اف ای ام* برش جت آب ساینده را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که غلظت جرمی بهینه برای جت آب ساینده ۱۵٪ است و نازلی با قطر ۱/۶ میلی‌متر بهترین عملکرد را دارد. با افزایش فشار، عمق شکاف‌های بریده شده در سنگ به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. سرعت برخورد بیشترین تأثیر را بر انتشار ترک‌های مرکزی دارد؛ درحالی که تأثیر این پارامتر روی ترک‌های شعاعی نسبتاً کم است. همچنین تنش معادل ناشی از ضربه، دلیل اصلی شکست المان‌های سنگ در محل مرکزی برخورد است و ترک‌های سنگ عمدتاً توسط تنش کششی ایجاد می‌شوند.

۳- تئوری شبیه‌سازی عددی

به طور کلی معادلات حاکم بر پدیده‌های فیزیکی، معادلات دیفرانسیلی

عبارت است از [۳۷]:

$$\Delta t \leq \frac{l}{c_w} \quad (1)$$

که در آن l مربوط به کوچکترین اندازه المان است و c_w سرعت انتشار موج تنش در المانها است. پارامتر Δt باید به اندازه کافی کوچک باشد به طوری که اطلاعات یک المان در یک بازه زمانی مشخص، مستقل از سایر المانها باشد. این امر می‌تواند با افزایش سطح گسسته‌سازی، باعث افزایش زمان حل عددی شود. این موضوع در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا که از روش تفاضل مرکزی استفاده می‌کند، به وسیله جابه‌جایی‌های الاستیک قبلی (قبل از گام زمانی فعلی) و مشتق آنها انجام می‌شود [۳۷]:

$$\dot{u}_{t_{n+\frac{1}{2}}} = \dot{u}_{t_{n-\frac{1}{2}}} + \Delta t_n M^{-1} \times (f_{ext,t_n} - \oint B^T \sigma_{t_n} dv) \quad (2)$$

$$u_{t_{n+1}} = u_{t_n} + \Delta t_{n+\frac{1}{2}} \dot{u}_{t_{n+\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

$$u_{t_{n+1}} = f(u_{t_n}, \dot{u}_{t_n}, \ddot{u}_{t_n}, u_{t_{n-1}}) \quad (4)$$

که در آن بردار نیروهای خارجی f_{ext,t_n} با شرایط مرزی و نیروی حجمی در گام زمانی t_n مرتبط می‌شود. M ماتریس جرم و عبارت انتگرالی بیانگر بردار نیروهای داخلی است. به این ترتیب در هر گام زمانی، سرعت و جابه‌جایی به‌روز می‌شوند. پس از به‌روزرسانی جابه‌جایی‌ها، می‌توان کرنش، سپس تنش و نهایتاً نیروها در هر گره را محاسبه کرد.

۳-۲- روش هیدرودینامیک ذرات روان

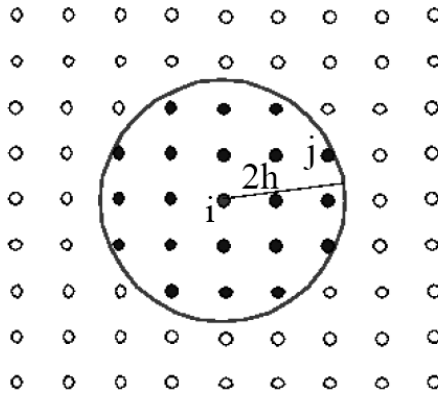
در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان آب و ذرات ساینده از روش اس‌پی‌اچ استفاده شده است که یک تکنیک عددی نسبتاً جدید برای ادغام تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی است. این روش، یک روش لاگرانژی بدون شبکه است که از درون‌یابی شبه‌ذره برای محاسبه متغیرهای میدان محاسباتی استفاده می‌کند. در دیدگاه لاگرانژی، دامنه مسأله می‌تواند به

هستند که به دو دسته معادلات دیفرانسیل معمولی^۱ و معادلات دیفرانسیل جزئی^۲ تقسیم می‌شوند. در شبیه‌سازی فرآیند برش سنگ با جت آب، معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی (معمولاً معادلات ناویر-استوکس) حاکم است [۳۶] که این معادلات دیفرانسیل باید به همراه شرایط مرزی و شرایط اولیه مناسب به صورت عددی حل شوند تا مدل جبری حاکم بر پدیده فیزیکی تعیین شود. در این پژوهش برای شبیه‌سازی جت آب ساینده و برش سنگ، روش عددی اس‌پی‌اچ-اف‌ای‌ام به کار گرفته شده است. به این ترتیب که ذرات ساینده و آب به روش اس‌پی‌اچ و سنگ به روش اف‌ای‌ام مدل شده‌اند. در ادامه این بخش تئوری روش اجزاء محدود، روش هیدرودینامیک ذرات روان و تماس بین اجزاء محدود-هیدرودینامیک ذرات روان به طور خلاصه ارائه می‌شود.

۳-۱- روش اجزاء محدود

روش اجزاء محدود به طور گسترده در شاخه‌های مختلف مهندسی از هوا و مکانیک تا معدن و پزشکی استفاده می‌شود. این روش به دلیل توانایی حل معادلات دیفرانسیل خطی و غیرخطی، حل معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی، تحلیل مسائل دینامیکی، حل مسائلی با شرایط مرزی پیچیده و مسائلی با هزاران درجه آزادی، روش قابل اعتمادی برای شبیه‌سازی برش سنگ است [۳۷]. برای حل یک مسئله به روش اجزاء محدود معمولاً لازم است از یک فرآیند گام‌به‌گام پیروی شود که این مراحل به طور کامل در مرجع [۳۸] آمده است و برای رعایت اختصار از ذکر مجدد روابط خودداری می‌شود. به طور کلی در شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود دو نوع مسأله صریح و ضمنی وجود دارد. حل مسائل پیچیده با روش اجزاء محدود ضمنی به علت وارون کردن ماتریس سختی برای حل مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی با درجات آزادی زیاد و هزاران گام محاسباتی روشی گران و پرهزینه است. از آنجا که حل عددی مسائل مهندسی به روش اجزاء محدود صریح به صورت المان به المان و بدون تغییر در ماتریس سختی کل به دست می‌آید، رویکرد صریح برای حل مدل‌های سه‌بعدی (با هزاران درجه آزادی) ارجحیت دارد. علاوه بر آن پیاده‌سازی ساده، دقت و پوشش معادلات غیرخطی از سایر مزیت‌های رویکرد صریح است. با این حال روش صریح به شرطی پایدار است که از گام‌های زمانی کوچک استفاده شود. برای محاسبات پایدار، گام زمانی انتخابی در روش حل عددی برای مسائل نامیرا^۳

- 1 Ordinary Differential Equations (ODE)
- 2 Partial Differential Equations (PDE)
- 3 Undamped



شکل ۲. مجموعه‌ای از ذرات همسایه (i مختصات ذره اصلی و j مختصات ذرات متغیر) [۴۰]

Fig. 2. A set of neighboring particles (i and j are respectively coordinates of reference and variable particles) [40]

ذرات باشد. همچنین یکی از مراحل محاسبات هیدرودینامیک ذرات روان، جستجوی ذرات واقع در همسایگی ذره اصلی است (شکل ۲). این مرحله به ویژه در جریان مایعات، در هر تکرار عددی تأثیر مستقیمی بر زمان محاسبات دارد.

در روش اس‌پی‌اچ، دامنه محاسباتی به نقاط گسسته تبدیل می‌شود؛ بنابراین برای تعیین مقدار تابع f در نقاط دامنه، خصوصیات فیزیکی نقطه اصلی i توسط مجموعه‌ای از نقاط همسایه j تعیین می‌شود. با ادغام در معادله کرنل خواهیم داشت [۳۹]:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h) \quad (6)$$

که در آن چگالی، m_j جرم ذرات همسایه و مقدار N نیز تعداد کل ذرات در همسایگی نقطه اصلی را نشان می‌دهد. در این پژوهش از کرنل اسپلاین مکعبی استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۹]:

تعداد محدودی از ذرات تبدیل شود. سپس مختصاتی به مرکز جرم هر ذره داده می‌شود تا موقعیت ذره در فضا را توصیف کند و خصوصیات فیزیکی ذرات را نیز در هر لحظه از زمان به دست آورد. روش لاگرانژی نسبت به روش اویلری نیاز به مش‌بندی مجدد در هر تکرار عددی ندارد و برای توصیف هندسه‌های پیچیده، هزینه محاسباتی کمتری دارد. امروزه با کمک واحدهای پردازش گرافیکی قدرتمند، می‌توان از میلیون‌ها ذره‌ی لاگرانژی برای گسسته‌سازی دامنه محاسباتی استفاده کرد [۳۹]. در روش اس‌پی‌اچ برای تقریب دامنه متغیرها در هر نقطه از دامنه محاسباتی، به جای شبکه از درون‌یابی کرنل^۱ (هسته) استفاده می‌شود. تابع تقریب کرنل طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود که در آن مقدار تابع $f(x)$ در مکان x به صورت پیوسته توسط انتگرالی از حاصلضرب تابع و یک تابع کرنل تخمین زده می‌شود [۳۹]:

$$\langle f(x) \rangle = \int f(x') W(x - x', h) dx' \quad (5)$$

در این رابطه، عبارت $W(x - x', h)$ تابع کرنل و پارامتر طول هموار^۲ یا h محدوده دامنه پشتیبانی شده را مشخص می‌کند. همچنین x موقعیت نقطه ثابت و x' موقعیت نقطه متغیر را نشان می‌دهند. تابع کرنل باید به نحوی انتخاب شود که بیانگر بهترین تقریب از خواص فیزیکی

1 Kernel interpolation
2 Smoothing length

برای فرسایش سنگ نیز هنگامی که کرنش پلاستیک معادل^۱ از حداقل کرنش پلاستیک معادل فراتر رود المان‌های سنگ شروع به حذف شدن می‌کنند [۴۱].

۴- شبیه‌سازی عددی برش سنگ با جت آب ساینده

در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی برش سنگ با جت آب ساینده از روش اس‌پی‌اچ-اف‌ای‌ام در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داینما استفاده شده است. مدل‌سازی سنگ با روش اف‌ای‌ام و مدل‌سازی ذرات ساینده و آب با روش اس‌پی‌اچ انجام شده است. از آنجا که هوا انرژی جنبشی کمی برای برش سنگ دارد، از اثر هوا در ترکیب ذرات ساینده و آب، همچنین اثر هوا روی سنگ چشم‌پوشی شده است [۹]. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هندسه مش‌بندی سنگ به صورت یک شبکه ۲۵ در ۲۵ در محیط نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. در گوشه‌ی این پوسته، یک ربع‌دایره با شعاع ۱۸ میلی‌متر ایجاد شده است. المان‌هایی که در ربع‌دایره قرار دارند، کوچک‌ترند و برای ایجاد شبکه‌بندی مناسب‌تر در نرم‌افزار از تنظیمات محور-مرکزی^۲ استفاده شده است. این قسمت مستقیماً در تعامل با جت آب است. در مرحله بعد، این پوسته در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما فراخوانی شده و به آن بُعد داده می‌شود.

هندسه سنگ با ۱۵۰ میلی‌متر طول، ۷۵ میلی‌متر عرض و ۷۵ میلی‌متر ارتفاع طراحی شده است. که نیم دایره واقع در مرکز هندسه سنگ با ستون آب و ذرات ساینده در تماس است. به طور همزمان برای ایجاد شبکه ذرات اس‌پی‌اچ آب، نیم‌استوانه‌ای به قطر ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما ایجاد شده است (شکل ۴). در مجموع تعداد ۱۴۰۰۰ ذره اس‌پی‌اچ به عنوان آب انتخاب شده است. انتخاب تعداد ذرات ساینده، به پارامترهای مختلفی همچون غلظت حجمی، قطر ذرات ساینده، پیچیدگی مسأله، سخت‌افزار رایانه و غیره بستگی دارد. اگر تعداد ذرات خیلی زیاد باشد، ممکن است حل عددی نرم‌افزار بسیار طولانی شود و نتیجه‌ای حاصل نشود. از طرف دیگر اگر ذرات به تعداد کم انتخاب شوند، برش مطلوب میسر نمی‌شود. طول ۲۰۰ میلی‌متری در نظر گرفته شده برای جت آب، منجر به افزایش تعداد ذرات و افزایش مدت زمان اجرای نرم‌افزار می‌شود. این انتخاب باعث می‌شود که نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر شوند؛ زیرا این ستون در فرآیند مدل‌سازی عددی بر اساس سرعت‌ها و زمان‌های مفروض تمام نمی‌شود.

$$W(x-x', h) = \alpha_D \begin{cases} \left(\frac{2}{3} - q^2 + \frac{1}{2}q^3\right), & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2-q)^3, & 1 < q \leq 2 \\ 0 & \text{other wise} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن $q = \frac{|(x-x', h)|}{h}$ و D بعد مسأله را نشان می‌دهد. همچنین برای مسائل سه‌بعدی $\alpha_D = \frac{3}{2\pi h^3}$ ، برای مسائل دوبعدی $\alpha_D = \frac{15}{7\pi h^2}$ می‌باشد.

۳-۳- تماس بین اف‌ای‌ام و اس‌پی‌اچ

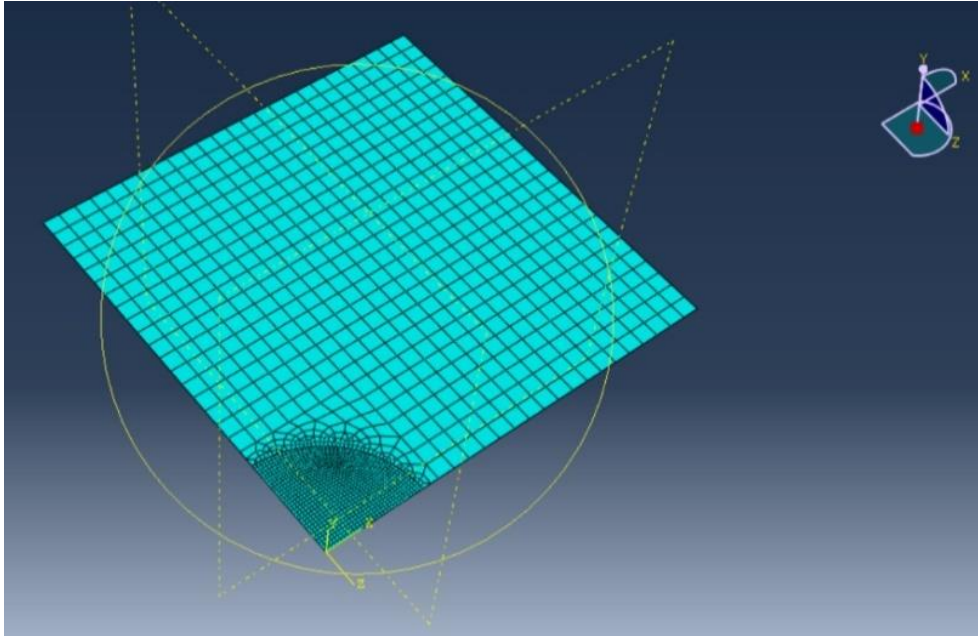
به منظور مدل‌سازی برش سنگ با جت آب در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما، ذرات آب و ساینده به سنگ برخورد می‌کنند و در طی این فرآیند در هر گام محاسباتی المان‌های سنگ فرسایش می‌یابند. برای شبیه‌سازی این پدیده، دستور تماس بین ذرات اس‌پی‌اچ و اف‌ای‌ام تعریف می‌شود. یک روش برای محاسبه بردار نیروی تماس بین اس‌پی‌اچ و اف‌ای‌ام در نظر گرفتن گره‌ها به عنوان ذرات اس‌پی‌اچ و تعریف الگوریتم تماس بین آنها است. یعنی تعریف الگوریتم تماس بین ذره اس‌پی‌اچ با ذره اس‌پی‌اچ که می‌تواند در مسائلی مانند ضربه استفاده شود. هر ذره اس‌پی‌اچ یا گره‌ای که از ذره اصلی x_i کمتر از $2h$ فاصله داشته باشد، در الگوریتم جستجوی همسایه به لیست همسایه‌های ذره اصلی آن اضافه می‌شود. به این ترتیب خواهیم داشت [۴۱]:

$$F_c(x_i) = \sum_j^{NCNBR} \frac{m_j}{\rho_j} \frac{m_i}{\rho_i} \times Kn \frac{W(x_i - x_j)^{n-1}}{W(h_{avg})^n} \nabla_{x_i} W(x_i - x_j) \quad (8)$$

که در آن $NCNBR$ تعداد کل گره‌ها یا ذراتی است که در تماس با همسایگی ذره اصلی x_i فهرست شده‌اند و h_{avg} مقدار متوسط h است که از دو ذره یا دو گره گرفته شده است. با محاسبه بردار نیروی تماس، گره‌ها به عنوان ذرات اس‌پی‌اچ در نظر گرفته می‌شوند و طول صاف h بر اساس اندازه المان مجاور به هر یک از گره‌ها اختصاص می‌یابد. نیروی تماس F_c نیز به معادله ممتوم گره‌ها و حل ذرات اس‌پی‌اچ اضافه می‌شود. برای محاسبه نیروهای تماس فقط جرم گره، چگالی و موقعیت گره لازم است.

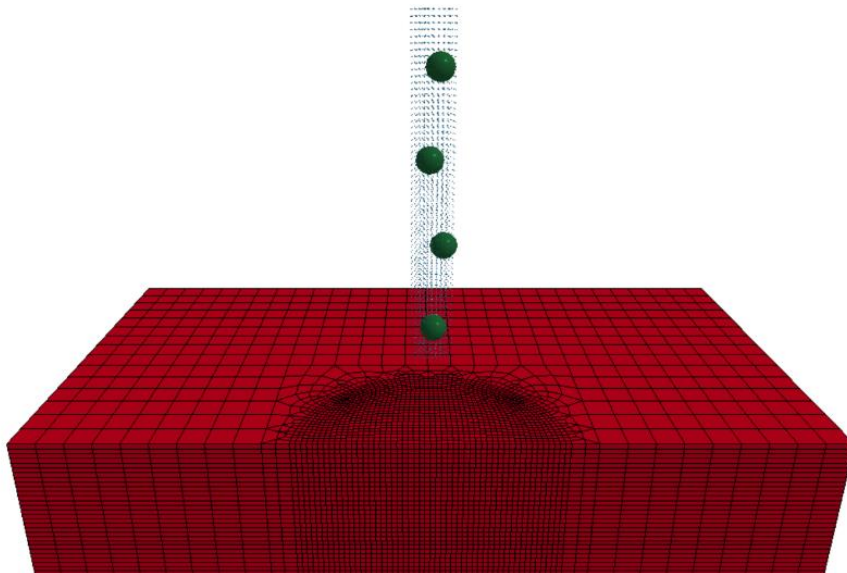
1 Equivalent plastic strain

2 Medial-axis



شکل ۳. پوسته و شبکه ایجاد شده در نرم افزار آباکوس برای مش بندی سنگ

Fig. 3. Shell and grid created in ABAQUS software for rock meshing



شکل ۴. مدل سازی ذرات اسپ پی ایچ آب و ساینده برای برش سنگ

Fig. 4. SPH modeling of water and abrasive particles for rock cutting

جدول ۱. مشخصه‌های ژئومکانیکی نمونه‌های سنگ سیلت‌استون و شیل

Table 1. Geomechanical characteristics of siltstone and shale rock samples

سنگ	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	UCS (MPa)	E (GPa)	ν
سیلت‌استون	۲۷۳۰	۴۴/۴	۳/۳	۰/۲۶
شیل	۲۹۰۰	۸۵	۱۶/۵	۰/۱۵

جدول ۲. چگالی آب و ضرایب معادله حالت گرون‌آیزن در شبیه‌سازی عددی [۹]

Table 2. Water density and coefficients of Gruneisen equation of state in numerical simulation [9]

ماده	C ($\frac{m}{s}$)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	S ₁	S ₂	S ₃	γ_0	α
آب	۱۴۸۰	۱۰۰۰	۲/۵۶	-۱/۹۸۶	۰/۲۲۸۶	۰/۴۹	۱/۳۹۷

به صورت $\bar{\tau}^{\pm} = \sqrt{\sigma_{ij} : \epsilon_{ij}}$ تعریف می‌شود. پارامتر r_0^{\pm} آستانه آسیب^۳ را نشان می‌دهد. پارامترهای بی‌بعد A^{\pm} و پارامترهای B^{\pm} از مرتبه‌ی $1/\sqrt{F/L^2}$ بوده که برای توصیف آسیب به کار می‌روند. برای تعیین همه پارامترهای ماده ۱۴۵، باید مشخصه‌های ژئومکانیکی سنگ شامل چگالی، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و مدول یانگ تعیین شوند. این مشخصه‌ها برای ۲۰ نمونه سنگ سیلت‌استون و شیل در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه بوعلی سینا با تست نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه و میانگین نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است.

همچنین معادله حالت گرون‌آیزن که طبق رابطه (۱۰) توصیف می‌شود، برای آب استفاده شده است. پارامترها و مشخصات آب در جدول ۲ خلاصه شده است [۹، ۴۸].

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E' \quad (10)$$

برای انتخاب مواد در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا باید خواص ماده شامل سنگ، ذرات آب و ذرات ساینده از کتابخانه مواد این نرم‌افزار انتخاب شود. به این ترتیب ماده ۱۴۵ از کتابخانه نرم‌افزار که توسط اشویر و مورای^۱ پیشنهاد شده است [۴۶-۴۲]، به عنوان ماده مناسب برای جزء المان محدود سنگ انتخاب شده است. این مدل رفتار مکانیکی مواد جامدی همچون سنگ، بتن و خاک را به خوبی توصیف می‌کند. پارامترهای کالیبره شده برای ماده ۱۴۵ برای تخریب شکننده (d^+) و تخریب شکل‌پذیر (d^-) به صورت زیر تعریف شده است [۴۷]:

$$d^{\pm} = G(\bar{\tau}^{\pm}) = 1 - \frac{r_0^{\pm}}{\bar{\tau}^{\pm}} (1 - A^{\pm}) - A^{\pm} \cdot \exp^{B^{\pm} (r_0^{\pm} - \bar{\tau}^{\pm})} \quad (9)$$

$$0 \leq r_0^{\pm} \leq \bar{\tau}^{\pm}$$

که در آن $\bar{\tau}^{\pm}$ نرم انرژی آسیب ندیده^۲ در فضای تنش مؤثر است و

3 Damage threshold

1 Schwer-Murray Cap (Continuous Surface Cap)
2 Undamaged energy norm

جدول ۳. پارامترهای ماده الاستیک برای فولاد

Table 3. Elastic material parameters for steel

ماده	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	ν	$E (GPa)$
فولاد	۷۸۰۰	۰/۳	۲۰۰

حجم و عمق برش هر دو نمونه مطالعه شده است. همچنین اثر تغییر غلظت حجمی ذرات ساینده در قطر ثابت ۱ میلی‌متر و اثر تغییر قطر ذرات ساینده در غلظت حجمی ثابت ۱ درصد برای سرعت‌های ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه بر روی عمق و حجم برش نمونه‌ها بررسی و تفسیر شده است. در کل فرآیند شبیه‌سازی عددی، فاصله کانونی برابر مقدار ثابت ۱۰ میلی‌متر فرض شده است.

انرژی جنبشی جت آب ذره‌ای مستقیماً به سرعت جریان خروجی از نازل برشی بستگی دارد. انتظار می‌رود با افزایش سرعت جریان، انرژی جنبشی بیشتر و در نتیجه عمق و حجم برش نمونه‌های سنگی بیشتر شود. نتایج اثر سرعت روی عمق برش برای هر دو سنگ در شکل ۵ و اثر سرعت روی حجم برش برای هر دو سنگ در شکل ۶ آمده است. همانطور که از شکل ۵ پیدا است با افزایش سرعت، عمق برش در سیلت‌استون و شیل افزایش می‌یابد. افزایش انرژی ذرات آب باعث می‌شود سنگ سریع‌تر شکسته شود، بنابراین با افزایش سرعت، حجم برش در هر دو سنگ نیز افزایش می‌یابد (شکل ۶). در شکل ۵ با افزایش سرعت، عمق برش سیلت‌استون و شیل افزایش می‌یابد. در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه اختلاف عمق برش دو سنگ برابر ۹/۶ میلی‌متر، در دو سرعت ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۱۳/۸ و ۱۶/۸ میلی‌متر و در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه این اختلاف به ۲۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد. بنابراین اختلاف عمق برش بین سنگ نرم با سنگ سخت با افزایش سرعت، زیاد می‌شود.

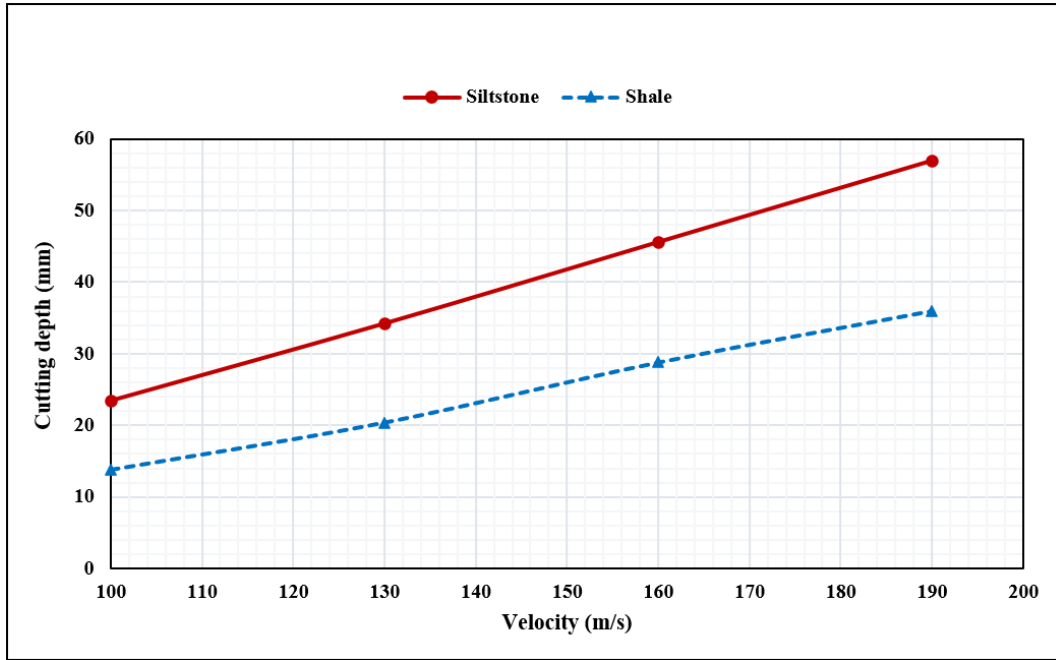
با توجه به شکل ۶ حجم برش دو سنگ در سرعت‌های ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۷۴۷، ۹۵۸، ۱۳۴۰ و ۱۴۶۶ میلی‌متر مکعب اختلاف دارد، یعنی اختلاف حجم کنده شده نیز با افزایش سرعت زیاد می‌یابد. بنابراین به طور کلی با افزایش سرعت، حجم و عمق برش در هر دو سنگ زیاد می‌شود. ژائو و همکاران [۹] نیز در تحقیق خود، اثر افزایش سرعت بر روی حجم و عمق برش را افزایشی گزارش کرده‌اند اما در تحقیق آنها با افزایش سرعت، حجم برش با نرخ بیشتری نسبت به عمق افزایش می‌یابد. طبق جدول ۱ مقاومت فشاری تک محوره برای سیلت‌استون و شیل به ترتیب برابر ۴۴/۴ و ۸۵ مگاپاسکال، مدول یانگ نیز به ترتیب برابر ۳/۳ و ۱۶/۵ گیگاپاسکال است. بنابراین به طور میانگین عمق برش سیلت‌استون ۶۴ درصد و حجم برش آن ۴۰ درصد بیشتر از شیل به دست آمده است که بیانگر کاهش عمق و حجم برش در سنگ مقاوم‌تر (مدول یانگ و مقاومت فشاری تک محوره بیشتر) می‌باشد. مومبر و کواکویچ [۱۵] نیز در تحقیق خود نتیجه گرفتند، سنگی که مقاومت فشاری تک محوره و مدول یانگ

که در آن فشار، $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ، انرژی درونی به ازای حجم واحد، C قاطع منحنی ρ_0 چگالی، S_1 ، S_2 و S_3 ضرایب شیب منحنی $u_s - u_p$ ، γ_0 ثابت معادله و α ضریب اصلاح حجم می‌باشد [۴۸].

برای مدل‌سازی ذرات ساینده نیز از ذرات فولادی کرومی-شکل استفاده شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش اثر تغییر جنس ذرات ساینده بررسی نشده است و فقط اثر تغییر تعداد و قطر این ذرات بر روی عمق و حجم برش بررسی شده است. از این رو با فرض عدم تغییر شکل‌پذیری ذرات فولادی، پارامترهای ماده الاستیک مطابق جدول ۳ برای شبیه‌سازی ذرات ساینده انتخاب شده است. همچنین تماس بین ذرات ساینده و سنگ و نیز شبیه‌سازی فرسایش المان‌های جامد سنگ در نرم‌افزار اِل‌اس‌دینا به صورت تماس‌های فرسایشی^۱ انتخاب شده است [۴۹]. به طوری که تمام المان‌های آب و ذرات ساینده به عنوان یک مجموعه گره در نظر گرفته شده‌اند. هنگامی که ذرات آب و ساینده به سنگ برخورد می‌کنند، سرعت ذرات رفته‌رفته کم می‌شود. برای شبیه‌سازی این پدیده در نرم‌افزار از دستور سرعت‌دهی اولیه به منظور اعمال سرعت اولیه به ذرات اِس‌پی‌اچ آب و ساینده استفاده شده است.

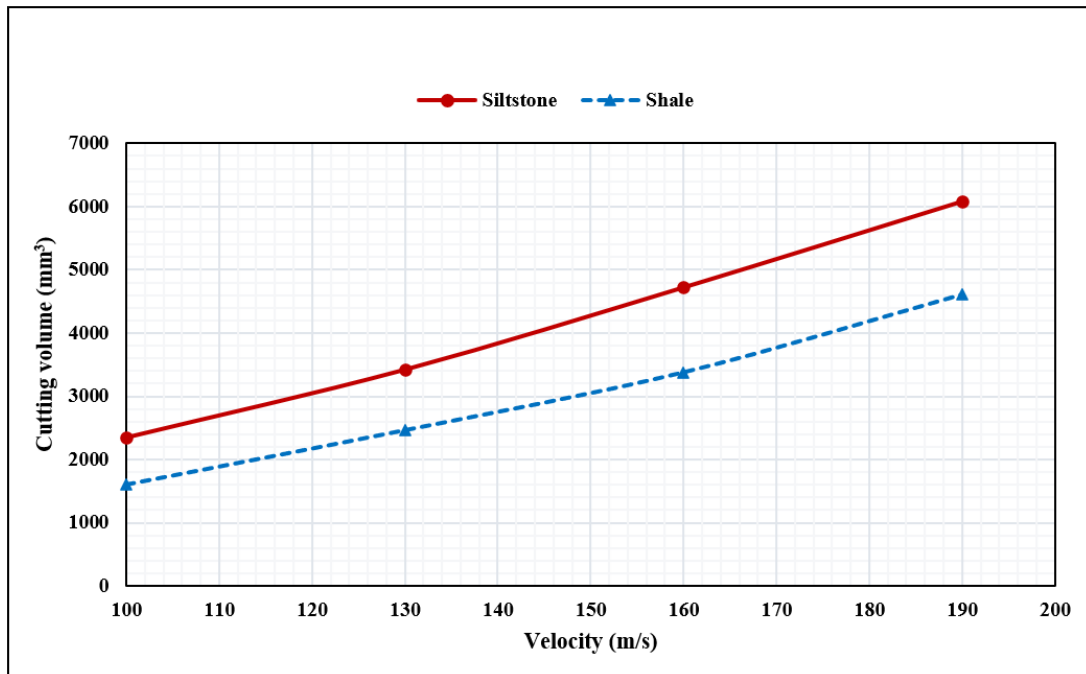
۵- نتایج و بحث

با توجه به مفروضات مطرح شده، اثر پارامترهای سرعت، زمان توقف، غلظت حجمی و قطر ذرات ساینده بر روی حجم و عمق برش دو نمونه سنگ شیل و سیلت‌استون بررسی شده است. اثر تغییر سرعت و اثر زمان توقف در چهار سرعت مختلف ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه بر روی



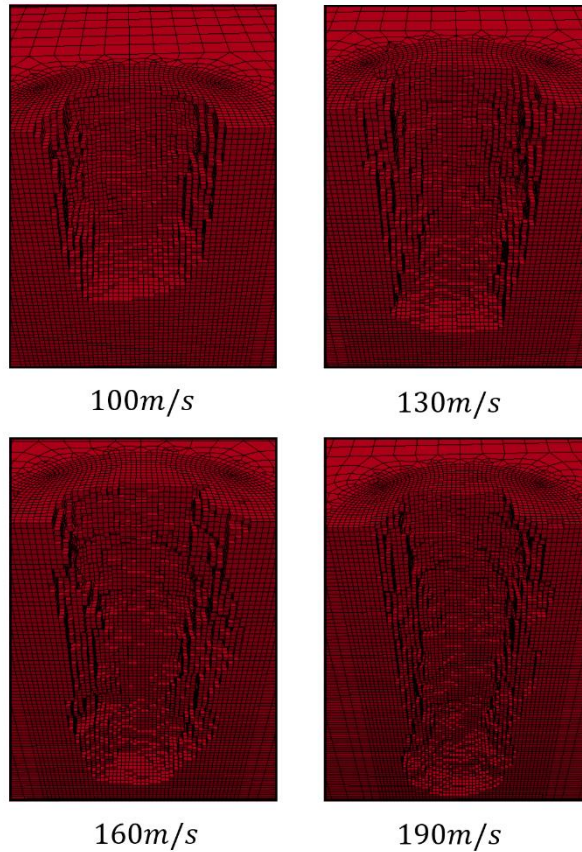
شکل ۵. اثر سرعت بر روی عمق برش سیلت‌استون و شیل (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 5. The effect of velocity on the cutting depth of siltstone and shale (the volume concentration of abrasive particles is 1%, the diameter of abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)



شکل ۶. اثر سرعت بر روی حجم برش سیلت‌استون و شیل (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 6. The effect of velocity on the cutting volume of siltstone and shale (the volume concentration of abrasive particles is 1%, the diameter of abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)



شکل ۷. هندسه مقطع برش سیلتاستون در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 7. Geometry of siltstone cutting section at different velocities (the volume concentration of abrasive particles is 1%, the diameter of abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)

بیشتری داشته باشد، عمق برش کمتری دارد.

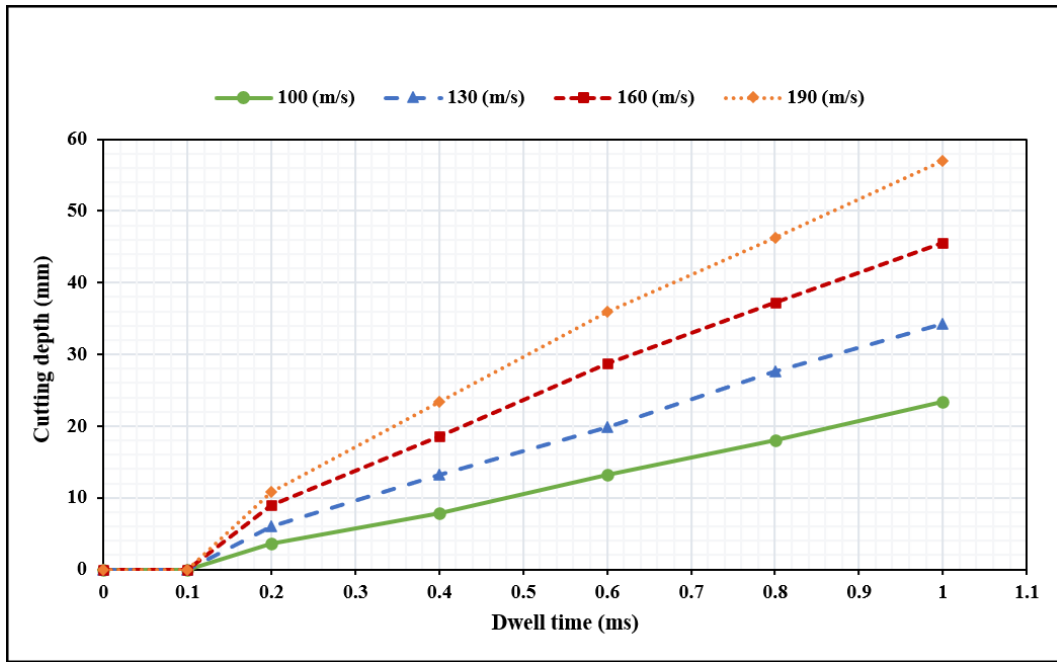
در شکل ۷، هندسه مقطع برش در سرعت‌های مختلف برای سیلتاستون آمده است. در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه در کنار عمق و حجم برش کمتر، شکل برش نیز مطلوب نیست. بعد از سرعت گرفتن ذرات ساینده و آب، با افزایش انرژی ذرات، عمق و حجم برش رفته‌رفته افزایش یافته و شکل برش به یک مخروط نزدیک می‌شود. در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه مقطع ورودی برش سنگ بزرگتر از مقطع خروجی است و شبیه به مخروط ناقص است؛ ولی هر چه سرعت کمتر می‌شود این مخروط وضوح کمتری دارد.

زمان توقف پارامتر مهم دیگری است که به انرژی کل جت آبی که به سنگ برخورد می‌کند، مرتبط است. در شکل ۸ اثر زمان توقف روی عمق برش سیلتاستون و در شکل ۹ اثر زمان توقف روی عمق برش شیل آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان توقف، عمق برش خورده سنگ افزایش می‌یابد. در زمان‌های ابتدایی عمق برش بسیار کم است. با

افزایش زمان سریعاً عمق برش زیاد می‌شود.

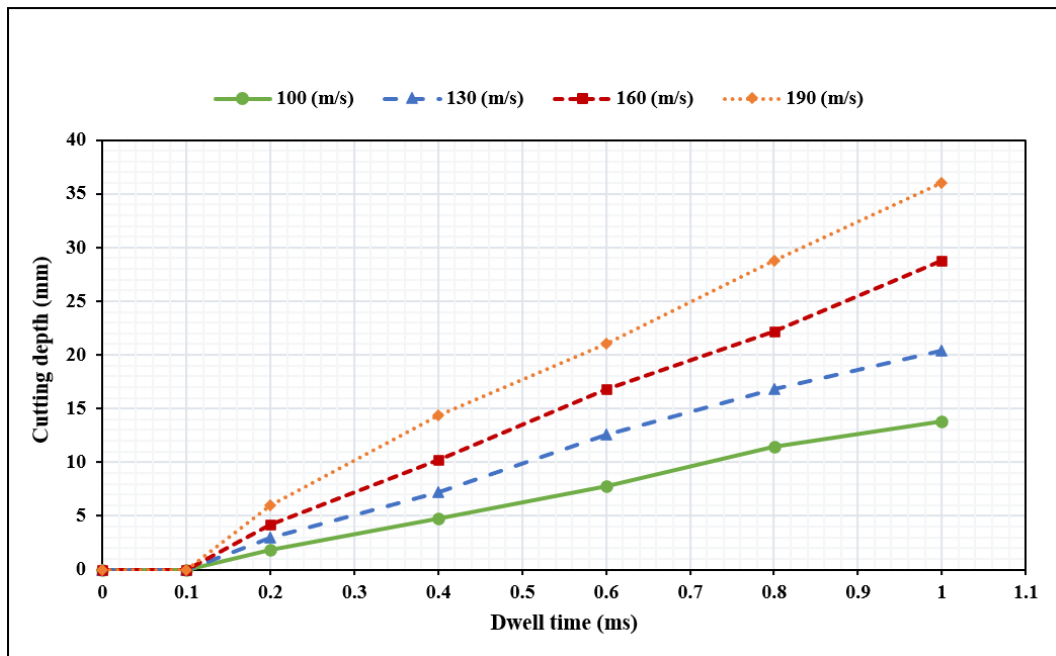
اختلاف بین عمق برش بیشترین و کمترین سرعت در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه برای سیلتاستون و شیل به ترتیب برابر ۴/۲ و ۷/۲ میلی‌متر است و این اختلاف در زمان ۱ میلی‌ثانیه برای سیلتاستون به ۳۳/۶ میلی‌متر و برای شیل به ۲۲/۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد، یعنی شیب منحنی عمق برش با افزایش زمان زیاد می‌شود. در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه، عمق برش هر دو سنگ اختلاف زیادی با سرعت‌های ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه می‌گیرد؛ زیرا در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه انرژی خیلی زیادی دارند و از سویی انرژی جنبشی با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد که همین امر باعث می‌شود در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه انرژی ذرات بسیار بالا رفته و عمق برش سریعاً افزایش یابد.

اثر زمان توقف بر روی حجم برش نیز در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان توقف، حجم برش



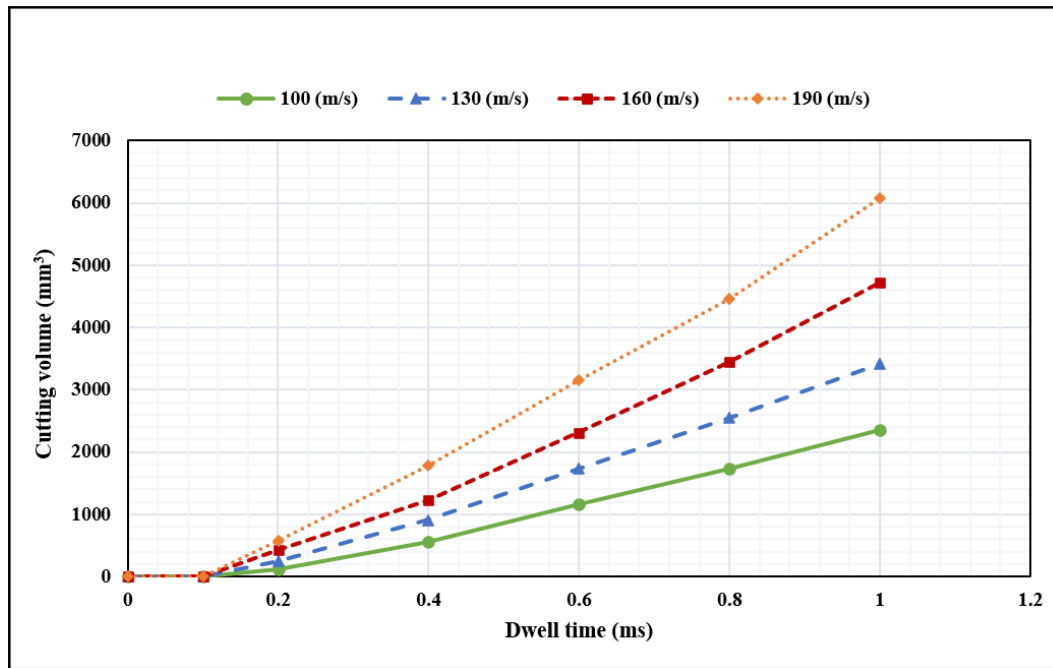
شکل ۸. اثر زمان توقف روی عمق برش سیلت استون در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر)

Fig. 8. The effect of dwell time on the cutting depth of siltstone at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and diameter of abrasive particles is 1 mm)



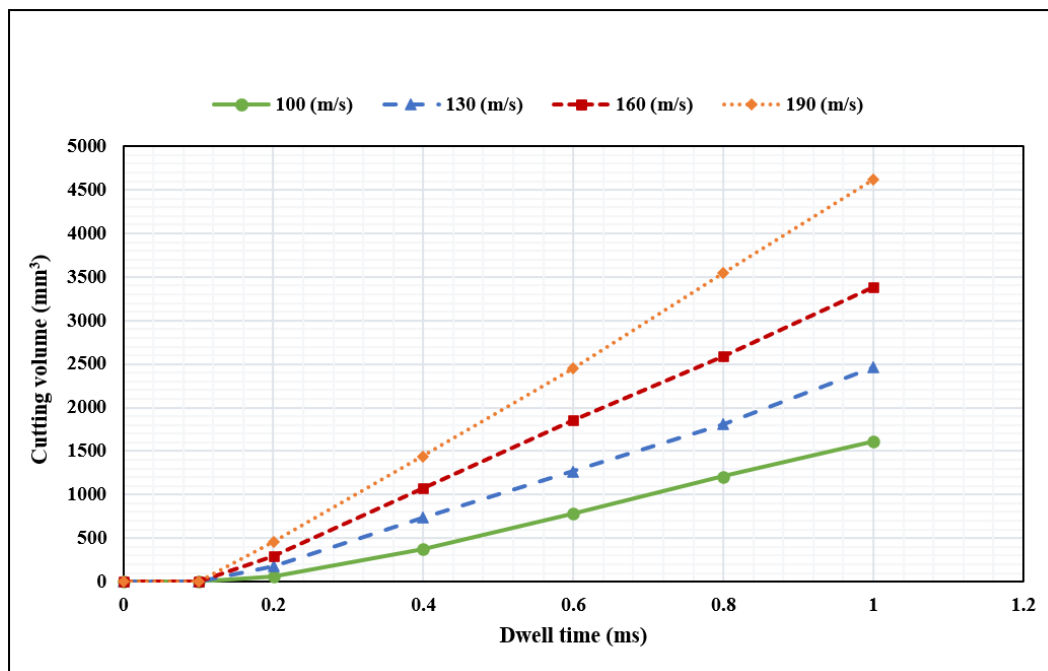
شکل ۹. اثر زمان توقف روی عمق برش شیل در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر)

Fig. 9. The effect of dwell time on the cutting depth of shale at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and diameter of abrasive particles is 1 mm)



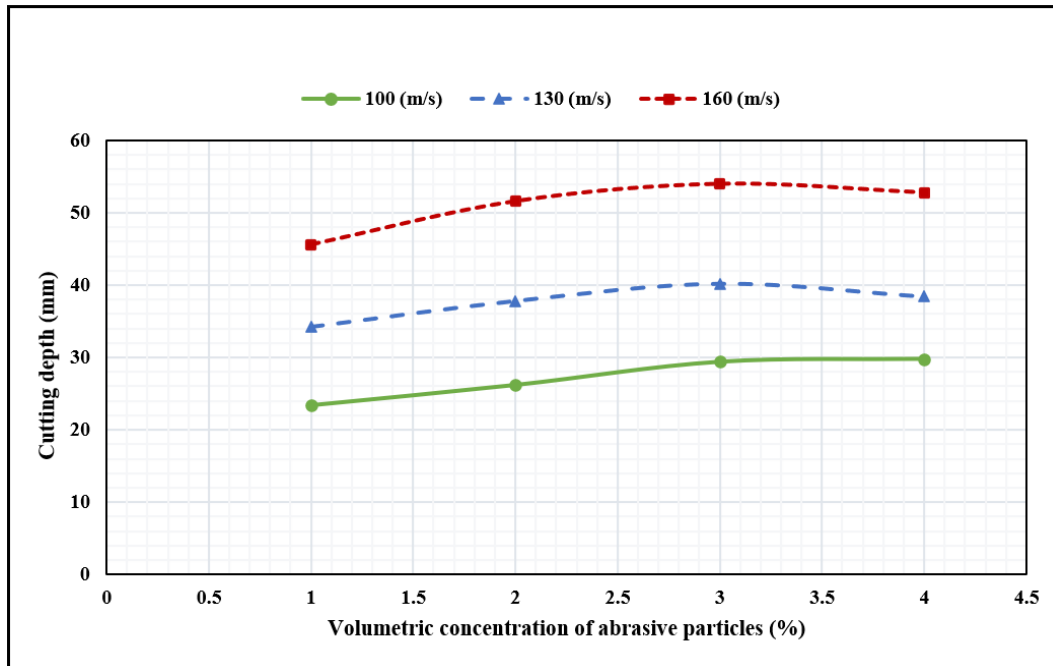
شکل ۱۰. اثر زمان توقف روی حجم برش سیلت استون در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر)

Fig. 10. The effect of dwell time on the cutting volume of siltstone at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and diameter of abrasive particles is 1 mm)



شکل ۱۱. اثر زمان توقف روی حجم برش شیل در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر)

Fig. 11. The effect of dwell time on the cutting volume of shale at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and diameter of abrasive particles is 1 mm)



شکل ۱۲. اثر تغییر غلظت حجمی ذرات ساینده روی عمق برش سیلت‌استون در سرعت‌های مختلف (قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

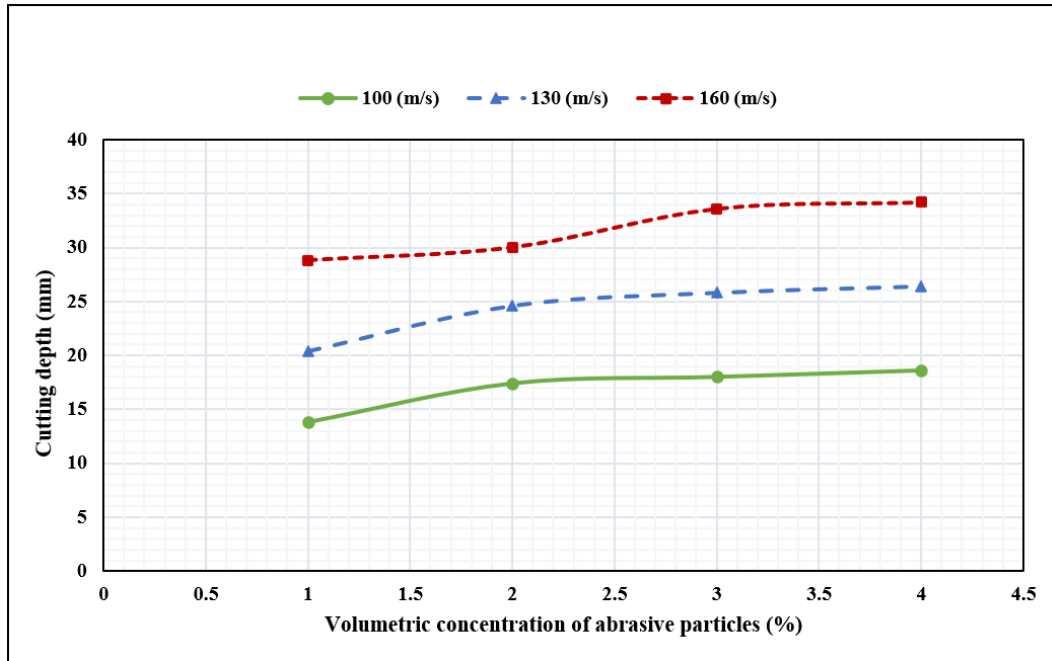
Fig. 12. The effect of changing the volume concentration of abrasive particles on the cutting depth of siltstone at different velocities (the diameter of the abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)

می‌توان اینگونه استنباط کرد که با کاهش سرعت عبور، یعنی زمان توقف بیشتر، عمق و حجم برش زیاد می‌شود. به طور مشابه مومبر و کواکویچ [۱۵] نتیجه گرفتند که با کاهش سرعت عبور، عمق برش زیاد خواهد شد.

اثر غلظت حجمی ذرات ساینده بر روی عمق و حجم برش نمونه‌های سیلت‌استون و شیل با فرض قطر ثابت ۱ میلی‌متر برای ذرات ساینده، در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ آمده است. به طور کلی با افزایش غلظت ذرات ساینده، عمق و حجم برش با شیب ملایم افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی عمق برش سیلت‌استون آورده شده است، در این نمودار با افزایش غلظت ذرات تا ۳ درصد، عمق برش زیاد شده و بعد از آن عمق برش خورده در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه ثابت می‌ماند ولی در دو سرعت ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه عمق برش کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳ اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی عمق برش شیل آورده شده است، در این نمودار با افزایش غلظت ذرات تا ۳ درصد، عمق برش زیاد شده و بعد از آن تغییر چشم‌گیری در عمق برش خورده مشاهده نمی‌شود. میانگین تغییرات عمق

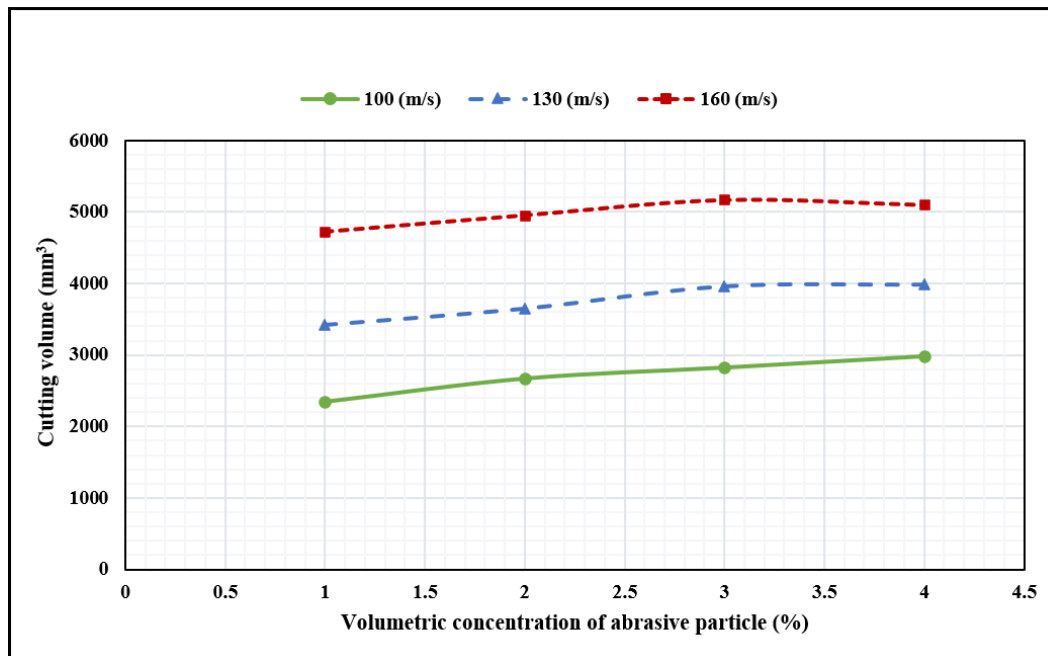
خورده افزایش می‌یابد. اختلاف بین حجم برش بیشترین و کمترین سرعت در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه برای سیلت‌استون ۴۶۰ و برای شیل ۳۹۷ میلی‌متر مکعب است و این اختلاف در زمان ۱ میلی‌ثانیه به ترتیب برابر ۳۷۳۰ و ۳۰۰۰ میلی‌متر مکعب است. بنابراین شیب منحنی حجم برش با افزایش زمان توقف زیاد می‌شود. همانند اثر زمان توقف بر روی عمق برش، در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه و زمان توقف نهایی ۱ میلی‌ثانیه، حجم برش خورده اختلاف زیادی با سرعت‌های پایین‌تر دارد.

بنابراین با افزایش زمان توقف، عمق و حجم برش افزایش می‌یابد. توجه به پژوهش ژائو و همکاران [۹]، حجم برش با افزایش زمان توقف زیاد می‌شود ولی نرخ برش عمق تا یک زمان مشخص، سریع و بعد از آن با نرخ کمتری افزایش می‌یابد. در تحقیق وانگ و همکاران [۲۴] نیز اثر افزایش زمان روی حجم و عمق برش بی‌بعد را تا زمان مشخصی افزایشی و بعد از آن ثابت نتیجه گرفته‌اند. اثر زمان توقف را می‌توان به پارامتر سرعت عبور مرتبط دانست، هر چند در این شبیه‌سازی سرعت افقی برای جت تعریف نشده است.



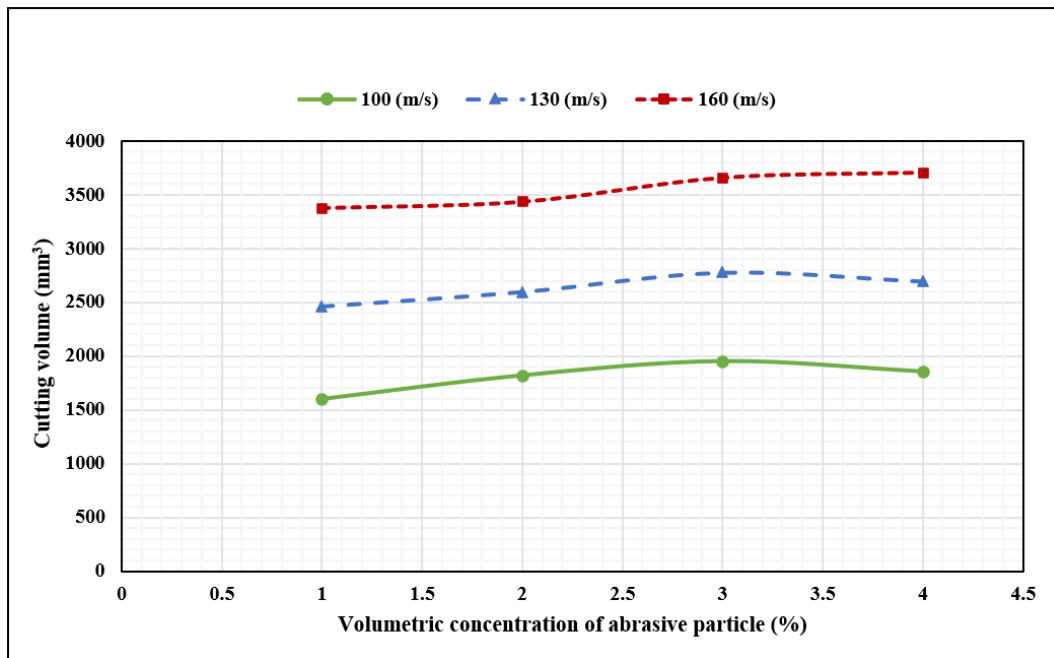
شکل ۱۳. اثر تغییر غلظت حجمی ذرات ساینده روی عمق برش شیل در سرعت‌های مختلف (قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 13. The effect of changing the volume concentration of abrasive particles on the cutting depth of shale at different velocities (the diameter of the abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)



شکل ۱۴. اثر تغییر غلظت حجمی ذرات ساینده روی حجم برش سیلت‌استون در سرعت‌های مختلف (قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 14. The effect of changing the volume concentration of abrasive particles on the cutting volume of siltstone at different velocities (the diameter of the abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)



شکل ۱۵. اثر تغییر غلظت حجمی ذرات ساینده روی حجم برش شیل در سرعت‌های مختلف (قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 15. The effect of changing the volume concentration of abrasive particles on the cutting volume of shale at different velocities (the diameter of the abrasive particles is 1 mm, and the dwell time is 1 ms)

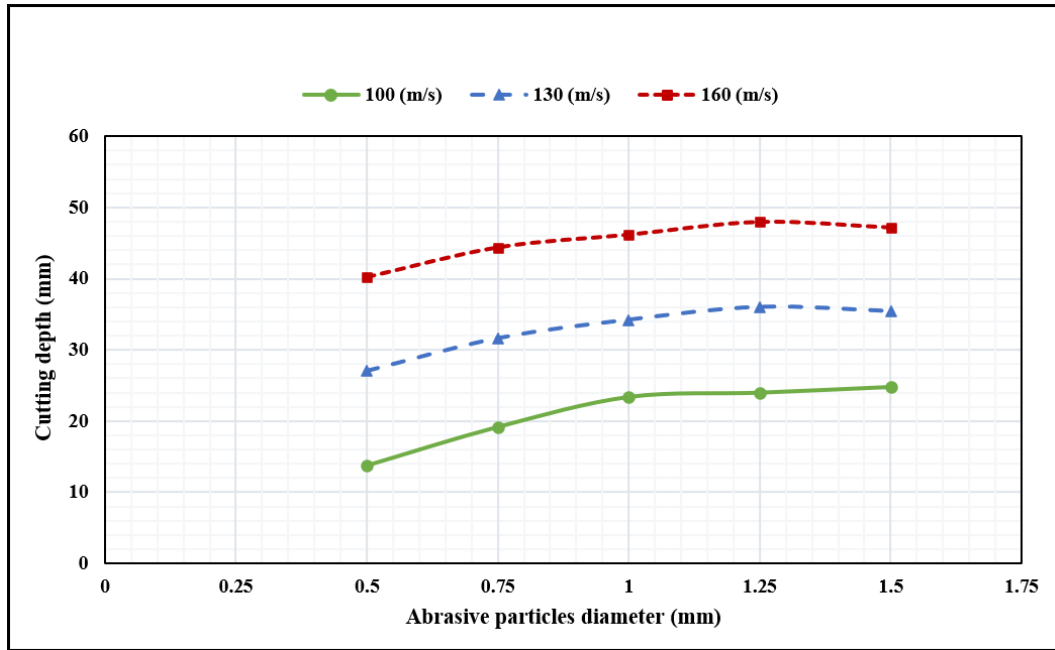
می‌توان یک غلظت مطلوب فرض کرد. چرا که عمق و حجم برش اختلاف چندانی با عمق و حجم برش غلظت ۴ درصدی ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یک غلظت یا دبی بهینه برای ذرات ساینده وجود دارد که طبق نتایج این تحقیق برای سیلت‌استون و شیل می‌توان غلظت ۳ درصد را یک غلظت مطلوب در نظر گرفت که منجر به کاهش هزینه ناشی از افزایش تعداد ذرات ساینده خواهد شد. اگر چه افزایش تعداد ذرات ساینده باعث افزایش عمق و حجم برش می‌شود، اما طول عمر نازل و سر برشی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. همچنین استفاده از ذراتی با غلظت کمتر از ۵ درصد، باعث بهبود عمر نازل می‌شود. در پژوهش وانگ و همکاران [۲۴] نیز با افزایش غلظت حجمی ذرات تا ۲/۵ درصد، عمق و حجم برش بی‌بعد زیاد شده و بعد از آن کاهش می‌یابد.

نتایج اثر تغییر قطر ساینده بر روی عمق و حجم برش هر دو سنگ در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ آمده است. در این تحقیق اثر تغییر قطر ذرات ساینده برای غلظت ثابت ۱ درصد بررسی شده است. چون غلظت حجمی ثابت است، با افزایش قطر ذرات ساینده، جرم ذرات افزایش و تعداد ذرات ساینده

برش از غلظت ۱ درصد تا غلظت ۴ درصد برای سیلت‌استون برابر ۶ میلی‌متر و برای شیل برابر ۵/۴ میلی‌متر است؛ در نتیجه با افزایش دبی ذرات ساینده، شیب افزایش عمق برش ملایم‌تر خواهد شد.

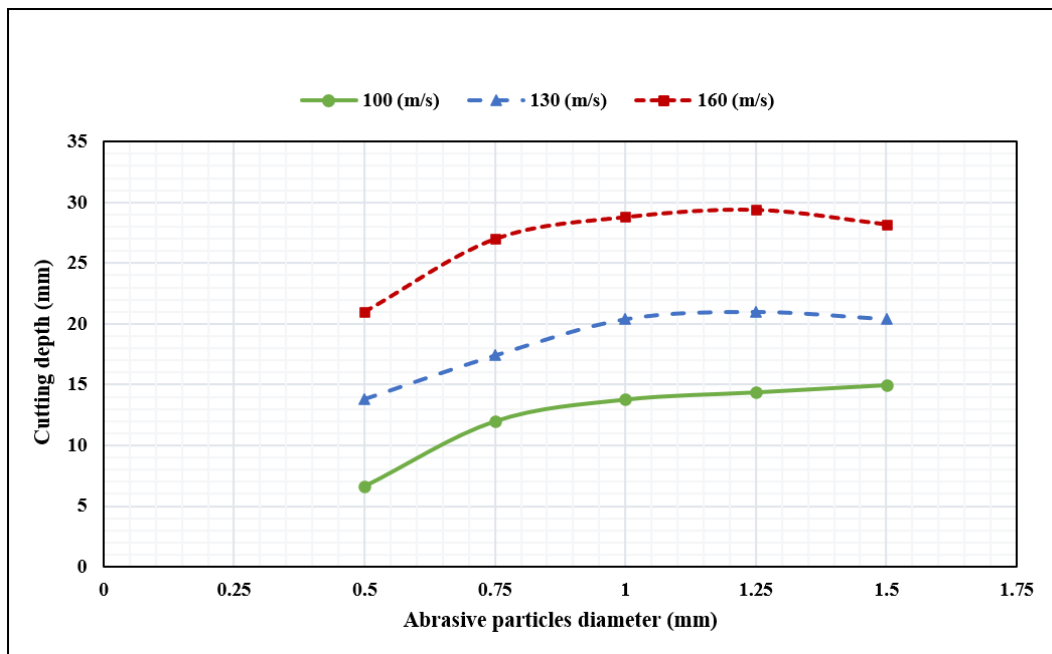
اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی حجم برش سیلت‌استون در شکل ۱۴ آمده است. در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه حجم برش غلظت ۴ درصدی نسبت به غلظت ۳ درصدی، ۱۵۰ میلی‌متر مکعب افزایش نشان می‌دهد. ولی در سرعت‌های ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه، حجم برش خورده با شیب ملایم تا غلظت ۳ درصد حجمی افزایش می‌یابد و بعد از آن تغییر چشم‌گیری در افزایش حجم برش مشاهده نمی‌شود. اثر تغییر غلظت ذرات ساینده بر روی حجم برش شیل نیز در شکل ۱۵ آمده است. برای سنگ شیل در سرعت ۱۰۰ و ۱۳۰ متر بر ثانیه تا غلظت حجمی ۳ درصد، حجم برش خورده افزایش ولی در غلظت ۴ درصد کاهش یافته است. در سرعت بالاتر ۱۶۰ متر بر ثانیه، افزایش غلظت بیش از ۳ درصد، تأثیر چندانی بر روی حجم برش خورده ندارد.

با توجه شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ برای هر دو نمونه سنگی، غلظت ۳ درصد را



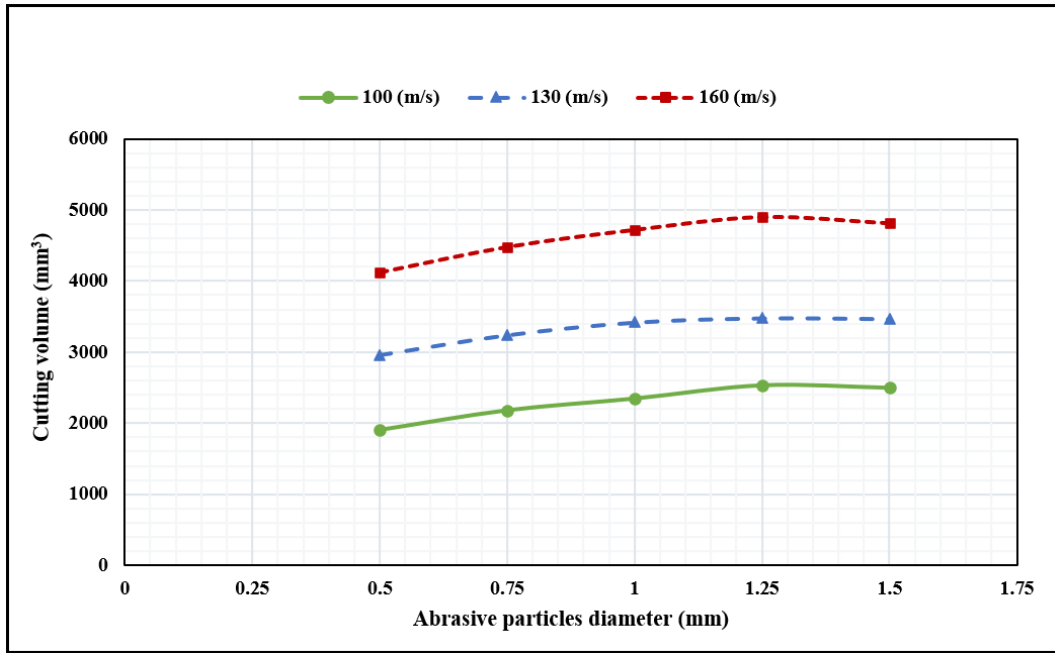
شکل ۱۶. اثر تغییر قطر ذرات ساینده روی عمق برش سیلت‌استون در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 16. The effect of changing the diameter of abrasive particles on the cutting depth of siltstone at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and dwell time is 1 ms)



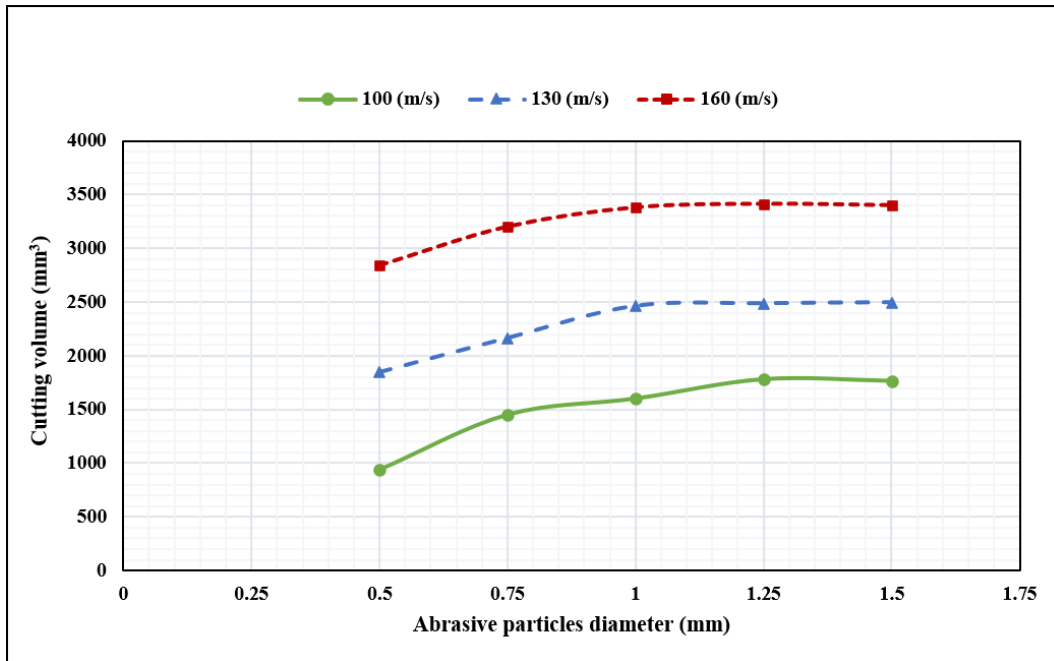
شکل ۱۷. اثر تغییر قطر ذرات ساینده روی عمق برش شیل در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد و زمان توقف ۱ میلی‌ثانیه)

Fig. 17. The effect of changing the diameter of abrasive particles on the cutting depth of shale at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and dwell time is 1 ms)



شکل ۱۸. اثر تغییر قطر ذرات ساینده روی حجم برش سیلت‌استون در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد و زمان توقف ۱ میلی ثانیه)

Fig. 18. The effect of changing the diameter of abrasive particles on the cutting volume of siltstone at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and dwell time is 1 ms)



شکل ۱۹. اثر تغییر قطر ذرات ساینده روی حجم برش شیل در سرعت‌های مختلف (غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد و زمان توقف ۱ میلی ثانیه)

Fig. 19. The effect of changing the diameter of abrasive particles on the cutting volume of shale at different velocities (volume concentration of abrasive particles is 1%, and dwell time is 1 ms)

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به قابلیت‌های گسترده جت‌های آب در برش سنگ‌های تزئینی و نما، از مدل‌سازی عددی برای بررسی اثر پارمترهای مؤثر بر کیفیت عمق و حجم برش با هدف بهبود فرآیند برش سنگ استفاده شده است. به این ترتیب مدل‌سازی عددی با استفاده از روش $IS-PI-IC-FAI-AM$ در دو نمونه سنگ سیلت‌استون و شیل انجام شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق به صورت زیر خلاصه شده است.

➤ با افزایش سرعت جت آب، انرژی جنبشی جت دوفازی افزایش یافته و عمق و حجم برش افزایش می‌یابد.

➤ هر چقدر زمان توقف جت روی نمونه‌های سنگی افزایش یابد، عمق و حجم برش زیاد می‌شود.

➤ با افزایش غلظت حجمی ذرات تا یک مقدار مشخص، عمق و حجم برش با شیب ملایم افزایش یافته و بعد از آن بهبود چشم‌گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمی‌شود. با توجه به نتایج، برای سیلت‌استون و شیل این غلظت مشخص حدود ۳ درصد است.

➤ هر چقدر قطر افزایش یابد، انرژی جنبشی ذرات بیشتر می‌شود و نهایتاً حجم و عمق برش هم زیاد خواهد شد. ولی این افزایش قطر محدود به قطر نازل و لوله تمرکز است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات تا یک قطر معین، عمق و حجم برش زیاد می‌شود ولی بعد از آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اثر افزایش جرم ذرات تا یک مقدار معین با تعداد کم‌تر، بر افزایش تعداد ذرات با جرم کم غالب است. این قطر معین برای سیلت‌استون در حدود ۱/۲۵ میلی‌متر و برای شیل در حدود ۱ میلی‌متر است.

در عمل با بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی که در موارد فوق به آنها اشاره شد، می‌توان برش سنگ توسط جت آب ساینده را بهبود و ضایعات ناشی از فرآیند برش را تا حد قابل‌توجهی کاهش داد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

پارامتر آسیب	A^{\pm}
پارامتر آسیب	B^{\pm}
قاطع منحنی $u_s - u_p$	C
سرعت انتشار موج تنش در المان‌ها	c_w
تخریب شکننده	d^+

(در ستون ثابت فرض شده برای ذرات آب) کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۸ شیب نمودار عمق و حجم برش از ۰/۵ تا ۱/۲۵ میلی‌متر برای سیلت‌استون، سریعاً زیاد شده و سپس ثابت می‌شود. ذرات پر تعداد ۰/۵ میلی‌متر با جرم کم، در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه انرژی لازم برای برش سیلت‌استون را ندارند و به تدریج با افزایش سرعت در قطر ۰/۵ میلی‌متر، عمق و حجم برش خورده افزایش می‌یابد و ذرات ۰/۵ میلی‌متری انرژی جنبشی لازم برای حذف المان‌های سنگ را پیدا می‌کنند. ولی همچنان اثر افزایش جرم ذرات با تعداد کم، بر افزایش تعداد ذرات با جرم کم غالب است. از سویی عمق و حجم برش سیلت‌استون در قطر ساینده ۱/۵ میلی‌متر نسبت به قطر ۱/۲۵ میلی‌متر کم می‌شود. در ابتدا اثر افزایش جرم ذرات بر اثر تعداد ذرات غالب است، اما از یک تعدادی به بعد با افزایش جرم ذرات، بعد از برخورد ذرات سنگین به سنگ سرعت زیادی از دست می‌دهند و نمی‌توانند باعث افزایش عمق و حجم برش سنگ شوند. باید در نظر داشت برای افزایش قطر ذرات نیز محدودیت‌هایی وجود دارد، از جمله قطر نازل، قطر لوله تمرکز و غیره. لذا می‌توان برای سیلت‌استون قطر ۱/۲۵ میلی‌متر را به عنوان قطر مطلوب در نظر گرفت.

شکل‌های ۱۷ و ۱۹ برای شیل نیز همانند سیلت‌استون نتایج مشابهی به دست می‌دهند. ذرات پر تعداد ۰/۵ میلی‌متر با جرم کم، توان غلبه بر مقاومت بالای شیل را ندارند، به همین علت شیب نمودار عمق و حجم برش از ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر برای شیل، سریعاً زیاد شده و سپس ثابت می‌شود. بر خلاف سیلت‌استون اختلاف بین عمق و حجم برش شیل در قطر ساینده ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر تفاوت چندانی ندارد. اختلاف بین عمق برش دو قطر ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر در تمام سرعت‌ها حدود ۰/۶ میلی‌متر و برای حجم برش به طور میانگین ۱۱۶ میلی‌متر مکعب است. لذا می‌توان برای شیل قطر ۱ میلی‌متر را به عنوان قطر مطلوب در نظر گرفت. از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز می‌توان نتیجه گرفت با افزایش قطر ذرات ساینده تا یک مقدار مشخص، عمق و حجم برش زیاد می‌شود و از قطر معینی به بعد، این روند کاهش می‌یابد. این قطر معین برای سیلت‌استون ۱/۲۵ میلی‌متر و برای شیل ۱ میلی‌متر است. در پژوهش وانگ و همکاران [۲۴] نیز با افزایش قطر ذرات ساینده تا مقدار ۱/۲۵ میلی‌متر، عمق و حجم برش بی‌بعد افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد.

زیرنویس

مقدار متوسط	<i>avg</i>
موقعیت ذره اصلی	<i>i</i>
موقعیت ذره همسایه	<i>j</i>

منابع

[1] N. Asadi, and A. Shafiei, Simulation of water jet cutting for granite by using smoothed particle hydrodynamics, Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 10(23), (2020) 53-63. (in Persian)

[2] C. A. Furness, C. M. Pearson, Paper metering cutting and reeling, US Patent 2,006,499, (1933).

[3] B.G. Schwacha, Liquid cutting of hard materials, US Patent 2,985,050, (1958) 1-4.

[4] D. R. Jenkins, T. Landis, Valkyrie: north american's mach 3 superbomber, Specialty Press, (2004).

[5] N.C. Franz, High velocity liquid jet, US Patent 3,524,367, (1968).

[6] X. Liu, Z. Liang, G. Wen, X. Yuan, Waterjet machining and research developments: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(5-8) (2019) 1257-1335.

[7] G. Aydin, S. Kaya, I. Karakurt, Effect of abrasive type on marble cutting performance of abrasive waterjet, Arabian Journal of Geosciences, 12(11) (2019).

[8] Y. Natarajan, P.K. Murugesan, M. Mohan, S.A. Liyakath Ali Khan, Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review, Journal of Manufacturing Processes, 49 (2020) 271-322.

[9] J. Zhao, G. Zhang, Y. Xu, R. Wang, W. Zhou, L. Han, Y. Zhou, Mechanism and effect of jet parameters on particle waterjet rock breaking, Powder Technology, 313 (2017) 231-244.

[10] J.A.R. Sumit Bhowmik, Abrasive water jet machining of composite materials, Advanced Manufacturing Technologies, (2017) 77-97.

[11] M. Hashish, A Modeling Study of Metal Cutting With

تخریب شکل پذیر	d^-
مدول یانگ	E
انرژی درونی به ازای واحد حجم	E'
نیروی تماس	F_c
مقدار تابع	f
بردار نیروهای خارجی	f_{ext,t_n}
طول هموار	h
کوچکترین اندازه المان	l
ماتریس جرم	M
جرم	m
تعداد کل گره‌ها یا ذراتی که در تماس با همسایگی ذره اصلی هستند	$NCNBR$
تعداد کل ذرات در همسایگی نقطه اصلی	n
فشار	P
آستانه آسیب	r_0^\pm
شیب منحنی $u_s - u_p$	S_1
شیب منحنی $u_s - u_p$	S_2
شیب منحنی $u_s - u_p$	S_3
موقعیت نقطه ثابت	x
موقعیت نقطه متغیر	x'
علائم یونانی	
چگالی	ρ
نرم انرژی آسیب ندیده در فضای تنش مؤثر	τ^\pm
ثابت معادله گرون آیزن	γ_0
نسبت پواسون	ν
اصلاح حجم	α
گام زمانی	Δt
ویسکوزیته	μ

- Experimental evaluation of the physical properties required of abrasives for optimizing waterjet cutting of ductile materials, *Wear*, 284-285 (2012) 43-51.
- [22] C.-Y. Hsu, C.-C. Liang, T.-L. Teng, A.-T. Nguyen, A numerical study on high-speed water jet impact, *Ocean Engineering*, 72 (2013) 98-106.
- [23] S.D. Lianhuan Guo, Xin Yang, Numerical simulation of abrasive water jet cutting chemical pipeline based on SPH coupled FEM, *The Italian Association of Chemical Engineering* 51 (2015) 73-78.
- [24] F. Wang, R. Wang, W. Zhou, G. Chen, Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting, *International Journal of Impact Engineering*, 102 (2017) 169-179.
- [25] X. Chen, J. Guan, S. Deng, Q. Liu, M. Chen, Features and mechanism of abrasive water jet cutting of Q345 steel, *International Journal of Heat and Technology*, 36(1) (2018) 81-87.
- [26] M.M. Gregory Pasken, J. Ma, and Muhammad P. Jahan Numerical modeling of a pure water jet machining of Ti-6Al-4V and Al 6061-T6 using abaqus and smoothed particle hydrodynamics, *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc*, 2 (2018) 1-6.
- [27] L. Feng, G.R. Liu, Z. Li, X. Dong, M. Du, Study on the effects of abrasive particle shape on the cutting performance of Ti-6Al-4V materials based on the SPH method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(9-12) (2018) 3167-3182.
- [28] S. Liu, Y. Cui, Y. Chen, C. Guo, Numerical research on rock breaking by abrasive water jet-pick under confining pressure, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 120 (2019) 41-49.
- [29] H.K. I. Ben Belgacem, L. Cheikh, E. M. Barhoumi, and W. Ben Salem, Comparison Between Two Numerical Methods SPH/FEM and CEL by Numerical Simulation Abrasive Waterjets, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(1) (1984) 88-100.
- [12] M. Hashish, A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 111(2) (1989) 154-162.
- [13] M. Ramulu, Dynamic photoelastic investigation on the mechanics of waterjet and abrasive waterjet machining, *Optics and Lasers in Engineering*, 19(1-3) (1993) 43-65.
- [14] M. Hashish, D.E. Steele, D.H. Bothell, Machining with super-pressure (690 MPa) waterjets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(4) (1997) 465-479.
- [15] A.W. Momber, R. Kovacevic, Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(1) (1997) 17-25.
- [16] A.W. Momber, The kinetic energy of wear particles generated by abrasive-water-jet erosion, *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3) (1998) 121-126.
- [17] M.K. Kulekci, Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12) (2002) 1297-1306.
- [18] K. Maniadaki, T. Kestis, N. Bilalis, A. Antoniadis, A finite element-based model for pure waterjet process simulation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(9-10) (2006) 933-940.
- [19] H. Shahverdi, M. Zohoor, S. M. Mousavi, Numerical simulation of abrasive water jet cutting process using the SPH and ALE methods, *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, 117 (2011) 43-50.
- [20] G. Wenjun, W. Jianming, G. Na, Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4) (2010) 247-253.
- [21] M. Gent, M. Menéndez, S. Torno, J. Toraño, A. Schenk,

- hydrodynamics: fundamentals and basic applications in continuum Mechanics, Springer, (2019).
- [40] R. Vignjevic, Review of development of the smooth particle hydrodynamics (SPH) method, *Crashworthiness, Impact and Structural Mechanics (CISM)*, (2009).
- [41] T. De Vuyst, R. Vignjevic, J.C. Campbell, Coupling between meshless and finite element methods, *International Journal of Impact Engineering*, 31(8) (2005) 1054-1064.
- [42] L.E. Schwer, Y.D. Murray, A three-invariant smooth cap model with mixed hardening, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(10) (2005) 657-688.
- [43] L.E. Schwer, Viscoplastic augmentation of the smooth cap model, *Nuclear Engineering and Design*, 150(2-3) (1994) 215-223.
- [44] Y.D. Murray, B.A. Lewis, Numerical simulation of damage in concrete. Technical Report Submitted to the Defense Nuclear Agency by APTEK, (1995).
- [45] L.E. Schwer, Demonstration of the continuous surface cap model with damage: concrete unconfined compression test calibration, *Ls-dyna Geomaterial Modeling Short Course Notes*, (2001).
- [46] L.E. Schwer, Y.D. Murray, Continuous surface cap model for geomaterial modeling: A new ls-dyna material type, in: *Proceedings of Seventh international Ls-dyna User Conference*, (2002).
- [47] H. Jiang, J. Zhao, Calibration of the continuous surface cap model for concrete, *Finite Elements in Analysis and Design*, 97 (2015) 1-19.
- [48] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Material models in Ls-dyna, *Ls-dyna Keyword User's Manual Vol II*, (2012).
- [49] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Contact modeling in Ls-dyna, *Ls-dyna Keyword User's Manual Vol I*, (2012).
- of an Impacting Water Jet, *Lect. Notes Mech. Eng.*, (2020) 50–60.
- [30] D. Liu, C. Huang, J. Wang, H. Zhu, Material removal mechanisms of ceramics turned by abrasive waterjet (AWJ) using a novel approach, *Ceramics International*, 47(11) (2021) 15165-15172.
- [31] R. Yu, X. Dong, Z. Li, M. Du, Q. Zhang, SPH-FEM simulation of concrete breaking process due to impact of high-speed water jet, *AIP Advances*, 11(4) (2021).
- [32] A.R. Hossein Mehmnavaz, Gholamhossain Liaghat, Hamid fazeli, Mohsen Rouhbakhsh, Numerical analysis of shaped charge jet penetration into discrete concrete targets using Ls-dyna and Ansys-Autodyn, *Amirkabir J. Mech. Eng.* (53(Special Issue 6)) (2021) 939-942. (in Persian)
- [33] B. Vasudevan, Y. Natarajan, R. Pavan Kumar, K. Umesh Chandra, D. Sikder, Simulation of AWJ drilling process using the FEA coupled SPH models: A preliminary study, *Materials Today: Proceedings*, 62 (2022) 6022-6028.
- [34] Z. Wang, X. Lei, W. Zhou, Y. Wang, J. Cao, L. Li, G. Chen, C. Wang, Numerical simulation of the damage process of rock containing cracks by impacts of steel-particle water jet, *Powder Technology*, 422 (2023).
- [35] H. Zhao, H. Jiang, S. Warisawa, H. Li, Numerical study of abrasive water jet rotational slits in hard rock using a coupled SPH-FEM method, *Powder Technology*, 426 (2023).
- [36] S. Budaraju, Numerical modelling of the abrasive waterjet (AWJ) cutting process using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, *University of British Columbia Library*, (2019).
- [37] L. Vinet, A. Zhedanov, A 'missing' family of classical orthogonal polynomials, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8) (2011).
- [38] S.S. Rao, *The finite element method in engineering*, Elsevier, (2011).
- [39] C.A. Dutra Fraga Filho, *Smoothed particle*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Mahdevari, P. Bakhtiari HaftLang, H. Sayehvand, Numerical modeling of rock cutting with abrasive waterjet to determine the optimal parameters affecting cutting depth and volume, Amirkabir J. Mech Eng., 55(8) (2023) 971-994.

DOI: [10.22060/mej.2023.22439.7619](https://doi.org/10.22060/mej.2023.22439.7619)

