

مدل‌سازی عددی برش سنگ با استفاده از جت آب فشار قوی

ستار مهدوری^{۱*}؛ حبیب‌الله سایه‌وند^۲؛ پدram بختیاری هفت‌لنگ^۳

۱- استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار، عضو هیأت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا
۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵

چکیده

جت آب فشار قوی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف برای برش انواع مواد فلزی، چوبی، کاغذی، بتنی و سنگی دارد. در این تحقیق فرآیند برش سنگ توسط جت آب فشار قوی با هدف تعیین پارامترهای بهینه و بهبود راندمان فرآیند برش سنگ با استفاده از مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی شده است. در مدل عددی ذرات ساینده به همراه جریان آب تحت فشار با سرعت زیاد از نازل جت آب خارج شده و المان‌های سنگ را برش می‌دهند. فرآیند برش سنگ توسط جت آب به روش عددی اجزاء محدود- هیدرودینامیک ذرات روان در نرم‌افزار *LS-DYNA* شبیه‌سازی شده است. اثر پارامترهای سرعت، زمان توقف، غلظت حجمی و قطر ذرات ساینده بر روی عمق و حجم برش سنگ بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جت آب، عمق و حجم برش سنگ افزایش می‌یابد. با افزایش زمان توقف جت آب روی سنگ، انرژی بیشتری برای برش صرف می‌شود که منجر به افزایش عمق و حجم برش سنگ می‌شود. همچنین با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده تا ۳ درصد، عمق و حجم برش سنگ با شیب ملایم افزایش می‌یابد ولی بعد از آن بهبود چشم‌گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمی‌شود. با افزایش قطر ذرات ساینده تا ۱ میلی‌متر نیز عمق و حجم برش سنگ افزایش می‌یابد ولی بعد از آن عمق و حجم برش ثابت مانده یا کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور بهبود کیفیت برش سنگ مورد مطالعه در این تحقیق، در کنار سایر مفروضات غلظت حجمی ذرات ساینده حدود ۳ درصد و قطر ذرات ساینده حدود ۱ میلی‌متر توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی

برش سنگ، جت آب ساینده، مدل‌سازی عددی، روش اجزاء محدود، روش هیدرودینامیک ذرات روان.

۱- مقدمه

برای برش اجسام با استفاده از جت آب، جریان آب از طریق یک نازل باریک تحت فشار زیاد، با سرعت بالا بر جسم برخورد نموده و سبب بریده شدن محل مورد نظر می‌شود. این فناوری در دهه ۱۹۳۰ برای برش اجسام با استفاده از جت‌های آب ابداع شد. نخستین بار این فناوری برای برش مواد نرم نظیر کاغذ، چوب و لاستیک به کار برده شد [۱] و سپس در سال‌های بعد برای برش مواد سخت مثل فولاد، سنگ، بتن، شیشه، کامپوزیت و غیره توسعه داده شد [۲،۳]. اولین کاربرد صنعتی جت آب برای برش لوله‌های کاغذی چندلایه در

سال ۱۹۷۱ اجرا شد. سپس در سال ۱۹۸۰ برای اولین بار با افزودن مواد ساینده به جت آب و ابداع جت آب ساینده یا *AWJ (Abrasive Water Jet)* امکان برش مواد سخت مانند فولاد، شیشه و بتن نیز فراهم شد [۴،۵]. ایده افزودن ذرات ساینده به جریان آب در جت آب ساینده با استقبال صنایع مختلف و گسترش کاربرد آن برای برش طیف وسیعی از مواد مواجه شد [۶]. امروزه انواع مختلفی از ساینده‌ها نظیر گارنت، آلومینای ذوب شده، سیلیکون کاربید، دانه‌های شیشه‌ای و پودر زمرد در جت‌های آب استفاده می‌شود [۷]. با این حال در ۸۰ درصد کاربردهای صنعتی جت آب از گارنت (ساینده طبیعی) استفاده

* نویسنده مسئول: استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
پست الکترونیک: satar.mahdevari@aut.ac.ir

۲- مروری بر سابقه تحقیق

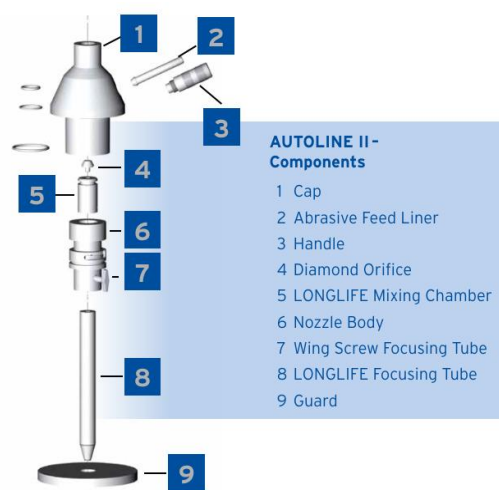
اولین مطالعات برای بررسی توانایی جت آب ساینده در برش فلزات به سال ۱۹۸۴ برمی‌گردد [۱۰]. در واقع ذرات ساینده تحت فشار آب، شتاب بسیار زیادی پیدا کرده و اجسام را با سرعت زیاد برش می‌دهد. در اولین مدلی که برای برش با جت آب ساینده ارائه شد، دو پارامتر جت آب شامل تنش جریان پویا (*Dynamic Flow Stress*) و سرعت بحرانی به همراه مدول الاستیسیته جسم به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر کیفیت برش معرفی شدند [۱۱]. نتایج مطالعات تجربی نیز حاکی از اهمیت مدول الاستیسیته جسم در کارایی جت آب ساینده در برش اجسام سخت است [۱۲]. همچنین بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی فرآیند برش مواد شکل‌پذیر همراه با تغییر شکل پلاستیک است؛ در حالی که در مواد شکننده، انتشار ترک نقش اصلی را در برش دارد [۱۳].

سرعت انتشار ترک یکی از پارامترهای مهم برای توصیف مقاومت برشی سنگ در حین برش با جت آب ساینده است. از طرف دیگر با افزایش مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ، عمق برش کمتر می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی از وجود یک رابطه چندجمله‌ای مرتبه دوم بین سرعت انتشار ترک و عمق برش حکایت دارد [۱۴]. همچنین با افزایش عمق برش، انرژی جنبشی ذرات ساینده به صورت خطی کاهش می‌یابد [۱۵]. با افزایش قطر ذرات ساینده گارنت تا $200 \mu m$ عملکرد برش زیاد می‌شود. از آنجا که ذرات گارنت با قطر بیش از $200 \mu m$ جرم بیشتری دارند و دیرتر شتاب می‌گیرند، عملکرد برش کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با کاهش سرعت عبور، عمق برش زیاد و کیفیت برش سطح نیز افزایش می‌یابد [۱۶].

در سال ۲۰۰۷ روش عددی اجزاء محدود برای مدل‌سازی فرآیند برش جت آب خالص (بدون وجود ذرات ساینده) به کار گرفته شد که بر اساس نتایج آن با عبور جریان آب از درون نازل، یک جریان توسعه‌یافته با پروفیل سرعت یکنواخت شکل می‌گیرد [۱۷]. در سال ۲۰۱۱ نیز دو مدل عددی برای شبیه‌سازی برش با جت آب ساینده به روش هیدرودینامیک ذرات روان یا *SPH* (Smoothed Particle Hydrodynamics) و روش اویلر-لاگرانژ دلخواه یا *ALE* (Arbitrary Lagrangian Eulerian) ارائه شد و نتایج آن با مطالعات آزمایشگاهی مقایسه شد [۱۸]. بر اساس نتایج حاصل، در هر سه روش آزمایشگاهی، *SPH* و *ALE* با افزایش فشار، عمق برش نیز افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت عبور جت آب، عمق برش کم می‌شود. همچنین روش *SPH* نسبت به روش *ALE* اعتبار بیشتری دارد؛ زیرا در روش *SPH* هر ذره به عنوان یک توده جرمی مستقل در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در روش *ALE* تمام ذرات ساینده در آب حل می‌شوند [۱۸]. همچنین در روش *ALE* با رسیدن زمان

می‌شود [۱۸]. ابعاد، شکل، سختی، غلظت حجمی و قطر ذرات ساینده روی کارایی برش اثر دارد.

همانطور که در شکل یک مشاهده می‌شود، دستگاه‌های جت آب از دو بخش اصلی به نام‌های واحد تأمین جریان آب فشار قوی و سر برش (*Cutting Head*) تشکیل شده‌اند. واحد تأمین جریان آب فشار قوی شامل پمپ، سیستم کنترل، سیستم جمع‌آوری و سیستم تنظیم نازل می‌باشد. سر برش نیز شامل محفظه اختلاط، اوریفیس، نازل، لوله تمرکز و لوله تزریق ساینده می‌باشد. در قسمت سر برش نیز ذرات ساینده به جریان آب فشار قوی افزوده شده و پس از انتقال ممنوم بین ذرات ساینده و جریان پر سرعت آب، جریان دوفازی (آب و ساینده) یا سه‌فازی (آب، ساینده و هوا) برای برش نمونه مورد نظر تشکیل می‌شود.



شکل ۱- سر برش در جت آب به همراه اجزای آن [۹]

هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی عددی برش سنگ با استفاده از جت آب ساینده به منظور تعیین پارامترهای بهینه متناسب با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها است. به این ترتیب به منظور افزایش بهره‌وری جت آب برای برش سنگ، پارامترهایی همچون سرعت خروج آب از سر برش (m/s)، زمان توقف (*Dwell time*) جریان خروجی از جت آب روی نمونه (S)، سرعت عبور (*Traverse speed*) یا حرکت افقی جت آب (mm^3/min) و فاصله کانونی (*Standoff Distance*) یا حداقل بین انتهای سر برش و نمونه سنگ اهمیت بسزایی در کیفیت و بهره‌وری برش دارند.

در این تحقیق ابتدا جت‌های آب و تاریخچه آنها معرفی می‌شوند. سپس سابقه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بررسی می‌شود. در بخش مبانی و اصول مدل‌سازی، تئوری روش اجزاء محدود و روش هیدرودینامیک ذرات روان شرح داده می‌شود. در نهایت شبیه‌سازی عددی برش سنگ با استفاده از نرم‌افزار *LS-DYNA* و نتایج حاصل تشریح خواهند شد.

توقف به یک مقدار مشخص، عمق برش ثابت می‌شود و تغییر نمی‌کند [۱۹]. البته در مواد شکل‌پذیر، ذرات با قطر بیشتر و تعداد کمتر سریعتر از ذرات با قطر کمتر و تعداد بیشتر عملیات برش را انجام می‌دهند. همچنین ذرات زاویه‌دار در مقایسه با ذرات کروی، نرخ برشی بهتری دارند [۲۰].

مطالعات تجربی برش سنگ‌های گرانیتی با استفاده از جت آب ساینده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت عبور جت آب و کاهش قطر ذرات ساینده، عمق برش کاهش می‌یابد [۲۱]. همانطور که قبلاً اشاره شد، عمق برش تحت تأثیر مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته و سختی سنگ است. نتایج نصب جت آب بر روی سرمته‌های مخروطی (*Single conical cutter*) نیز نشان می‌دهد که اگر جت آب در پشت سرمته‌های مخروطی نصب شود، نیروی برش کمتر و کیفیت بهتری برای برش سنگ خواهد داشت [۲۲].

شبیه‌سازی عددی جت آب ساینده برای برش خط لوله با روش *SPH-FEM* نیز حاکی از افزایش عمق برش تحت تأثیر افزایش فشار جت آب است. همچنین با کاهش سرعت عبور جت آب، عمق برش افزایش ولی کارایی برش کاهش می‌یابد [۲۳].

۳- تئوری

در این پژوهش برای شبیه‌سازی عددی جت آب ساینده به منظور برش سنگ، از روش ترکیبی *SPH-FEM* استفاده شده است. به این ترتیب که در مدل عددی ذرات ساینده و آب به روش هیدرودینامیک ذرات روان و سنگ به روش عددی اجزاء محدود شبیه‌سازی شده‌اند. در ادامه روش اجزاء محدود، روش هیدرودینامیک ذرات روان و نحوه تماس بین روش‌های اجزاء محدود-هیدرودینامیک ذرات روان به طور خلاصه بیان می‌شوند.

۳-۱- تئوری روش اجزاء محدود (FEM)

روش اجزاء محدود یا المان محدود به طور گسترده در شاخه‌های مختلف مهندسی نظیر مهندسی معدن، مکانیک، عمران، هوا و فضا، الکترونیک و پزشکی برای حل مسائل پیچیده کاربرد دارد. این روش به دلیل توانایی حل معادلات دیفرانسیل خطی و غیرخطی، تحلیل مسائل دینامیکی، حل مسائلی با شرایط مرزی پیچیده و مسائلی با درجه آزادی بسیار زیاد، روش قابل اعتمادی برای شبیه‌سازی برش سنگ با استفاده از جت آب فشاری قوی می‌باشد [۳۱].

اولین و مهمترین گام در روش اجزاء محدود، گسسته‌سازی دامنه محاسباتی است. در مسائل مهندسی مقادیر تنش، فشار، سرعت و جابه‌جایی را می‌توان با مجزاسازی دامنه محاسباتی به راحتی به دست آورد. در فرآیند گسسته‌سازی دامنه، کل دامنه به زیردامنه‌هایی به نام المان (جزء) تبدیل می‌شود. در حقیقت دامنه محاسباتی با درجه آزادی نامحدود به یک سیستم با درجه آزادی محدود تبدیل می‌شود. شکل، اندازه، تعداد و پیکربندی المان‌ها باید به دقت انتخاب شود تا زمان و حجم محاسبات کاهش یابد. بر اساس شکل المان‌ها، هر المان تعداد معینی گره دارد که به وسیله آنها به یکدیگر متصل می‌شوند [۳۲]. به این ترتیب به متغیرهای گره‌ای مختص یک المان، درجه آزادی المان گفته می‌شود. اندازه المان‌ها نیز مستقیماً بر همگرایی حل روش عددی اثر می‌گذارد. المان‌های

در سال ۲۰۱۷ ژاؤ و همکاران [۲۴] اثر پارامترهای مختلف جت آب ذره‌ای بر روی برش سنگ را بررسی کردند. طبق نتایج حاصل، با افزایش سرعت آب خروجی از نازل جت آب، عمق و حجم برش نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان توقف جت بر روی سنگ، عمق و حجم برش افزایش خواهد یافت. در پژوهش دیگری وانگ و همکاران [۲۵] محدوده تخریب سنگ تحت تأثیر پرتاب ذرات ساینده جت آب در حین برش را از طریق روش عددی مطالعه کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که عمق و حجم برش با افزایش زمان توقف و سرعت، در ابتدا زیاد شده و سپس ثابت می‌ماند. از طرف دیگر با افزایش غلظت حجمی ذرات تا ۲/۵ درصد، عمق برش و حجم برش در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش قطر ذرات ساینده تا ۱/۲۵ میلی‌متر، عمق و حجم برش افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی عددی برش زغال‌سنگ با استفاده از جت آب نشان می‌دهد که به علت وزن مخصوص کم زغال‌سنگ، محدوده برش این سنگ با استفاده از جت آب بیشتر تحت تأثیر تنش‌های فشاری و کششی است [۲۶]. همچنین نتایج مدل‌سازی عددی ذرات ساینده گرد، مثلثی و چهارگوش نشان می‌دهد که ذرات ساینده مثلثی بهترین کارایی را در برش اجسام سخت با استفاده از جت آب دارند [۲۷]. بررسی تأثیر ذرات ساینده جت آب برای برش مواد شبه‌سنگ نیز نشان می‌دهد که با افزایش قطر ذرات ساینده، عمق و حجم برش مستقیماً زیاد می‌شود. همچنین زمانی که چگالی و سختی ذره زیاد می‌شود، عمق برش افزایش می‌یابد [۲۸]. بررسی تأثیر نوع ذرات ساینده جت آب بر روی عملکرد برش سنگ حاکی از تأثیر مستقیم خواص فیزیکی ذرات ساینده مثل سختی و چگالی بر روی عملکرد

پیچیده هستند، با توسعه فناوری‌های رایانه‌ای امکان مدل‌سازی این مسائل در نرم‌افزارهای عددی به صورت شبیه‌سازی صریح یا ضمنی وجود دارد. فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای عددی نیز شامل سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش (حل عددی) و پس‌پردازش می‌باشد.

۳-۲- روش هیدرودینامیک ذرات روان (SPH)

برای شبیه‌سازی جریان آب و ذرات ساینده در این پژوهش، از روش هیدرودینامیک ذرات روان یا SPH استفاده شده است. این روش امروزه برای شبیه‌سازی انواع جامدات و سیالات در مسائل مهندسی به صورت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک استفاده می‌شود. در تئوری این روش دامنه مسأله می‌تواند به تعداد محدودی از ذرات تبدیل شود. سپس مختصات فضایی مرکز جرم هر ذره که موقعیت ذره در فضا را توصیف می‌کند، تعیین می‌شود. به این ترتیب می‌توان خصوصیات فیزیکی ذرات را در هر زمان به دست آورد. در روش لاگرانژی برخلاف روش اولی‌نیازی به ایجاد مش مجدد در هر تکرار نیست و برای توصیف هندسه‌های پیچیده، سادگی و هزینه محاسباتی کمتری دارد. در روش هیدرودینامیک ذرات روان برای تقریب دامنه متغیرها در هر نقطه از دامنه محاسباتی، از درون‌یابی کرنل استفاده می‌شود. تقریب هسته یا تقریب کرنل طبق معادله زیر انجام می‌شود [۳۳]:

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

که در آن h محدوده دامنه پشتیبانی شده، X موقعیت نقطه ثابت، X' موقعیت نقطه متغیر و $W(X - X', h)$ تابع کرنل می‌باشد. برای حل هر مسأله باید تابع کرنل مناسب انتخاب شود تا بهترین تقریب از خواص فیزیکی ذرات را ارائه دهد. یکی از توابع کرنل متداول تابع کرنل اسپلاین مکعبی است که به صورت گسترده برای حل مسائل مهندسی استفاده می‌شود [۳۳]:

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

$$q = \frac{|(X - X', h)|}{h}$$

$$\alpha_D = \frac{3}{2\pi h^3} \quad \text{در مسائل سه‌بعدی}$$

$$\alpha_D = \frac{15}{7\pi h^2} \quad \text{در مسائل دوبعدی}$$

همانطور که اشاره شد، در روش هیدرودینامیک ذرات روان دامنه محاسبات به نقاط گسسته تبدیل می‌شود. بنابراین لازم است مقدار تابع f در برخی از نقاط دامنه محاسبه شود. برای این منظور خصوصیات فیزیکی نقطه اصلی (i) توسط مجموعه‌ای از نقاط همسایه (j) تعیین می‌شود که در شکل دو به صورت شماتیک نشان داده شده است:

کوچکتر جواب‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهند، اما زمان انجام محاسبات نیز افزایش می‌یابد. در برخی از مدل‌های عددی به منظور کاهش زمان محاسبات، هندسه مدل از المان‌هایی با اندازه‌های مختلف ایجاد می‌شود. تعداد المان‌های انتخابی به دقت حل، اندازه المان‌ها و درجات آزادی وابسته است. به طور کلی با افزایش تعداد المان‌ها دقت حل افزایش می‌یابد؛ اما با رسیدن تعداد المان‌ها به یک مقدار مشخص، دقت نتایج بهبود قابل‌توجهی نخواهد داشت [۳۲]. نحوه پیکربندی المان‌ها نیز بر زمان انجام محاسبات مؤثر است. اگر پیکربندی بر اساس تقارن باشد، می‌توان نصف یا بخشی از یک هندسه یا مسأله را مدل کرد. بنابراین نیمی از ضرایب ماتریس سختی مقادیر صفر خواهند داشت و زمان انجام محاسبات کاهش می‌یابد [۳۲].

گام بعدی در روش اجزاء محدود، انتخاب مدل درون‌یابی یا جابه‌جایی مناسب مسأله است. برای توصیف رفتار حل هر المان، یک تابع استفاده می‌شود که به آن تابع درون‌یابی یا تابع تقریب می‌گویند. متداول‌ترین تابع برای تقریب حل مسأله، درون‌یابی چندجمله‌ای است. با تعریف Φ به عنوان میدان متغیر، بردار جابه‌جایی گره‌های مجهول برای المان e ، به صورت زیر بیان می‌شود [۳۲]:

$$\vec{\Phi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} \Phi(\text{at node } 1) \\ \vdots \\ \Phi(\text{at node } M) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن $\vec{\Phi}^{(e)}$ به عنوان ماتریس گره‌های مجهول استخراج می‌شود. در مرحله بعد باید ماتریس سختی $[K^{(e)}]$ و بردار نیروی $\vec{P}^{(e)}$ برای المان‌های e از مدل جابه‌جایی مفروض، استخراج و جفت شوند. با استفاده از روش‌هایی مانند رویکرد مستقیم، رویکرد واریانس و رویکرد وزن باقیمانده، ماتریس $[K^{(e)}]$ و بردار $\vec{P}^{(e)}$ برای مدل جابه‌جایی گره‌ها محاسبه می‌شوند [۳۲]. در نهایت با کنار هم قرار دادن معادلات هر المان، معادلات کلی تعادل به دست می‌آیند که باید به صورت زیر تنظیم شوند:

$$[K] \vec{\Phi} = \vec{P} \quad (2)$$

که در آن $[K]$ ماتریس سختی تجمعی، $\vec{\Phi}$ بردار جابه‌جایی گره‌ها و $\vec{P}$ بردار نیروی گره‌ها است. با اعمال شرایط مرزی، معادلات تعادل کلی به شکل زیر تبدیل می‌شوند:

$$[K] \vec{\Phi} = \vec{P} \quad (3)$$

به این ترتیب با حل معادلات تعادل، جابه‌جایی گره‌های مجهول به دست خواهند آمد:

$$[A] \vec{X} = \vec{b} \quad (4)$$

این سیستم معادلات با روش‌های مستقیم یا تکراری حل می‌شود. نهایتاً با استفاده از جابه‌جایی گره‌های مجهول، کرنش‌ها و تنش‌های المان‌ها محاسبه می‌شوند. اگر چه بیشتر مسائل مهندسی غیرخطی و

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

که در آن $NCNBR$ تعداد کل گره ها یا ذراتی است که در تماس با همسایگی ذره اصلی X_i فهرست شده اند و h_{avg} مقدار میانگین h بین دو ذره یا دو گره می باشد.

با محاسبه بردار نیروی تماس، گره های FE به عنوان ذرات SPH در نظر گرفته می شوند و محدوده دامنه پشتیبانی شده h بر اساس اندازه المان مجاور به هر یک از گره های FE اختصاص می یابد. در نهایت نیروی تماس f_c باید به معادله ممنوم گره های FE و حل ذرات SPH اضافه شود. برای محاسبه نیروهای تماس نیز فقط جرم، چگالی و موقعیت گره لازم است [۳۵].

۴- شبیه سازی عددی برش سنگ با جت آب

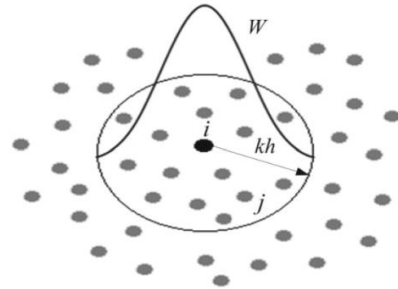
در این تحقیق به منظور شبیه سازی عددی جت آب ساینده و برخورد آن به سنگ، نرم افزار $LS-DYNA$ و روش $SPH-FEM$ به کار گرفته شده است. برای مدل سازی سنگ از روش FEM و برای ذرات ساینده و آب از روش SPH استفاده شده است. از آنجا که هوا انرژی جنبشی کمی برای برش سنگ سخت دارد، از اثر هوا در ترکیب ذرات ساینده و آب و همچنین اثر هوا بر روی برش سنگ چشم پوشی شده است [۲۴]. در ادامه ابتدا مدل سازی عددی سنگ و سپس مدل سازی عددی ذرات ساینده تشریح می شود.

همانطور که در شکل سه مشاهده می شود، به علت صرفه جویی در زمان و حجم محاسبات، شبکه مش بندی سنگ به صورت متقارن طراحی شده است. طول، عرض و ارتفاع هندسه سنگ به ترتیب ۱۵۰، ۷۵ و ۷۵ میلی متر در نظر گرفته شده است که دارای ۳۸۹۷۵۰ المان است. برای افزایش دقت مدل سازی، در محدوده ای از سنگ که با ستون آب و ذرات ساینده در تماس است (وسط مدل)، مش بندی ریزتری به صورت نیم استوانه به شعاع ۱۸ میلی متر طراحی شده است. همچنین برای ایجاد شبکه ذرات هیدرودینامیک روان آب در نرم افزار $LS-DYNA$ یک نیم استوانه به قطر ۴ میلی متر با تعداد ۱۴۰۰۰ ذره هیدرودینامیک روان به عنوان آب لحاظ شده است (شکل چهار).

انتخاب تعداد ذرات ساینده، به پارامترهای غلظت حجمی و قطر ذرات ساینده بستگی دارد. اگر تعداد ذرات خیلی زیاد در نظر گرفته شوند، ممکن است زمان و حجم محاسبات عددی در نرم افزار بسیار طولانی شود و یا امکان حل مسئله فراهم نشود. از طرف دیگر اگر ذرات به تعداد خیلی کم انتخاب شوند، برش مطلوب میسر نمی شود.

$$f_i = \sum_{j=1}^n m_j \frac{f_j}{\rho_j} W(X_i - X_j, h) \quad (9)$$

که در آن f_i مقدار تابع در موقعیت ذره اصلی، f_j مقدار تابع در موقعیت ذرات همسایه، ρ_j چگالی ذرات همسایه، m_j جرم ذرات همسایه و n تعداد کل ذرات در همسایگی نقطه اصلی می باشد.



شکل ۲- دامنه ذرات و مختصات نقاط در تابع کرنل [۳۳]

در مرحله جستجوی ذرات همسایه، از ذرات واقع در همسایگی ذره اصلی استفاده می شود. این مرحله به ویژه در جریان مایعات، در هر تکرار عددی تأثیر مستقیمی بر زمان محاسبات دارد. روش های مختلفی از جمله روش مستقیم و روش الگوریتم مرتب سازی سبد برای جستجوی ذرات همسایه ارائه شده است. در روش مستقیم، ابتدا ذره اصلی i ثابت می شود و سپس تمام ذرات همسایه که در دامنه پشتیبانی شده kh قرار دارند، محاسبه شده و در ماتریس قرار می گیرند. روش الگوریتم مرتب سازی سبد که در نرم افزار $LS-DYNA$ نیز وجود دارد، نسبت به روش مستقیم کارایی بیشتری دارد. اگر تعداد کل ذرات N فرض شود، زمان محاسبات در روش مستقیم N^2 خواهد بود؛ در حالی که این زمان در الگوریتم مرتب سازی سبد به $N \log N$ کاهش می یابد [۳۳، ۳۴].

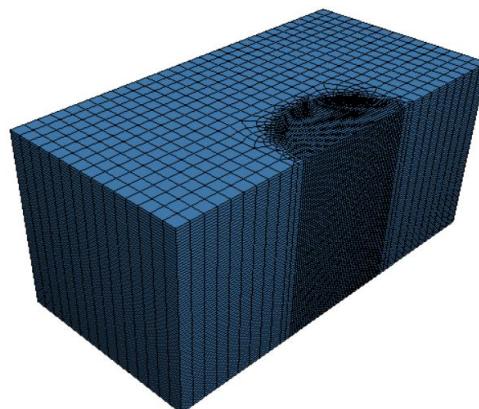
۳-۳- تماس بین FEM-SPH

برای مدل سازی تماس بین خروجی جت آب و سنگ توجه به این نکته ضروری است که در طی فرآیند برخورد ذرات آب و ساینده (SPH) به سنگ (FEM)، در هر گام محاسباتی المان های سنگ فرسایش می یابند. برای شبیه سازی این پدیده، دستور تماس بین ذرات SPH و FEM تعریف می شود. یک روش برای محاسبه بردار نیروی تماس بین SPH و FEM در نظر گرفتن گره های FE به عنوان ذرات SPH و تعریف الگوریتم تماس بین آنها است. یعنی تعریف الگوریتم تماس بین ذره SPH با ذره SPH که می تواند در مسائلی مانند ضربه استفاده شود. هر ذره SPH یا گره FE که از ذره اصلی X_i کمتر از $2h$ فاصله داشته باشد، در الگوریتم جستجوی همسایه به لیست همسایگان ذره اصلی آن اضافه می شود [۳۵]. به این ترتیب بردار نیروی تماس طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

برای X_0, D_1, D_2 و W و S وجود دارد که باید کالیبره شوند [۴۱]. برای این منظور باید مشخصه‌های اصلی سنگ از قبیل چگالی، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت پواسون و مدول یانگ تعیین شوند. این مشخصه‌ها برای نمونه‌های سنگ شیل مورد مطالعه در این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه بوعلی سینا از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی محاسبه و نتایج آن در جدول یک خلاصه شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های ژئومکانیکی سنگ شیل

نوع سنگ	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$E (Gpa)$	$f_c (Mpa)$	ν
شیل	۲۹۰۰	۱۶/۵	۸۵	۰/۱۵



شکل ۳- هندسه و شبکه مش‌بندی سنگ

برای آب، ماده MAT_NULL از کتابخانه نرم‌افزار $LS-DYNA$ انتخاب شده است. همچنین معادله حالت گرون‌آیزن که طبق رابطه (۱۰) توصیف می‌شود، برای آب استفاده شده است. پارامترها و مشخصات آب در جدول دو خلاصه شده است.

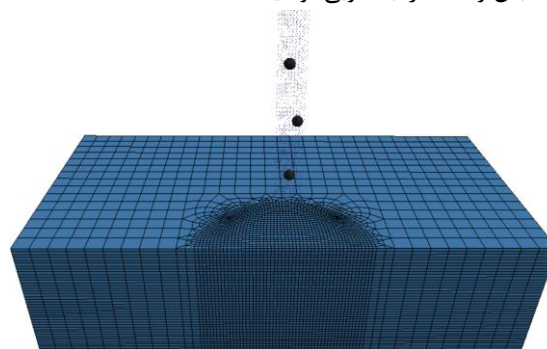
$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + \alpha \mu) E} \quad (10)$$

که در آن P فشار، ρ_0 چگالی، C قاطع منحنی $u_s - u_p$ ، μ معادل $\frac{P}{\rho_0} - 1$ ، γ_0 ثابت معادله، a پارامتر اصلاح حجم، پارامترهای S_1, S_2 و S_3 ضرایب شیب منحنی $u_s - u_p$ و E انرژی درونی به ازای واحد حجم می‌باشند.

برای مدل‌سازی ذرات ساینده نیز از ذرات فولادی کروی شکل استفاده شده است. با فرض عدم تغییر شکل‌پذیری ذرات فولادی، ماده $MAT_ELASTIC$ در نرم‌افزار $LS-DYNA$ انتخاب شده است. بر این اساس پارامترهای ماده الاستیک فولادی در جدول سه ارائه شده است.

پس از تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ، آب و ذرات ساینده و نیز فراخوانی مدل‌های رفتاری در نرم‌افزار $LS-DYNA$ به منظور تعریف تماس بین ذرات ساینده و سنگ و نیز شبیه‌سازی فرسایش سنگ در حین برش توسط جت آب، از دستور $Contact_Eroding_Nodes_To_Surface$ استفاده شده است [۴۲]. برای استفاده از این دستور، تمام ذرات آب و ساینده باید به عنوان یک مجموعه گره در نظر گرفته شوند. از طرف دیگر هنگامی که ذرات آب و ساینده به سنگ برخورد می‌کنند، سرعت ذرات رفته رفته کم می‌شود. برای شبیه‌سازی این پدیده از دستور سرعت‌دهی اولیه یا $Initial_Velocity_Generation$ به منظور اعمال سرعت اولیه به ذرات هیدرودینامیک روان آب و ساینده استفاده شده است.

برای انتخاب مواد در نرم‌افزار $LS-DYNA$ باید ماده متناسب با هر قسمت از مدل اعم از سنگ، آب و ذرات ساینده، از کتابخانه مواد این نرم‌افزار انتخاب شود. به منظور انتخاب سنگ ماده ۱۴۵ از کتابخانه نرم‌افزار برای جزء المان محدود انتخاب شده است. این ماده که به $Schwer\ Murry\ Cap$ یا $Continuous\ Surface\ Cap$ معروف است، توسط اشویر و موری برای مواد سنگی پیشنهاد شده است [۳۶، ۴۰]. این مدل قادر است بسیاری از رفتارهای مهم مکانیکی سنگ، بتن و خاک را به خوبی توصیف کند.



شکل ۴- ذرات SPH آب و ساینده روی سنگ

برای کالیبره کردن و تخمین پارامترهای این مدل رفتاری، برای تخریب شکننده (d^+) و تخریب شکل‌پذیر (d^-) خواهیم داشت [۴۱]:

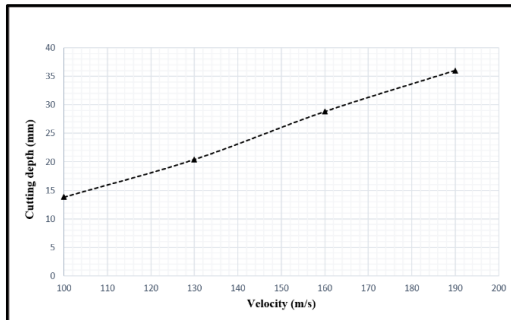
$$d^\pm = G(\bar{\tau}^\pm) = 1 - \frac{r_0^\pm}{\bar{\tau}^\pm} (1 - A^\pm) - A^\pm \cdot \exp^{\beta^\pm (r_0^\pm - \bar{\tau}^\pm)} \quad (9)$$

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

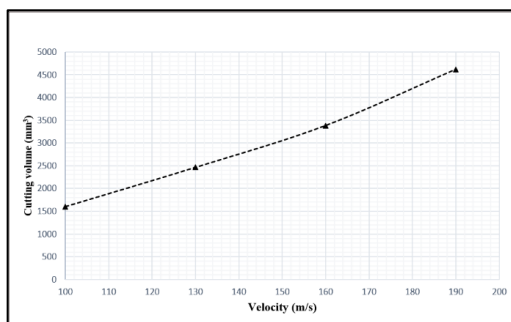
که در آن $\tau^\pm$ انرژی آسیب ندیده در فضای تنش مؤثر است و به صورت $\bar{\tau}^\pm = \sqrt{\bar{\sigma}_{ij} : \bar{\epsilon}_{ij}}$ تعریف می‌شود. همچنین $r_0^\pm$ آستانه آسیب را نشان می‌دهد و پارامترهای بی‌بعد $A^\pm$ و $B^\pm$ که از مرتبه‌ی $1/\sqrt{F/L^2}$ می‌باشند، نوع آسیب را توصیف می‌کنند.

در مجموع در این مدل هشت پارامتر مرتبط با شکست برشی شامل $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ و θ_i ($i = 1, 2$) و چهار پارامتر مربوط به سطح شامل

ذرات ساینده ۱ درصد، نتایج اثر سرعت بر روی عمق برش در شکل ۵ و اثر سرعت بر روی حجم برش در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۵- اثر سرعت بر روی عمق برش سنگ



شکل ۶- اثر سرعت بر روی حجم برش سنگ

همانطور که از شکل ۵ پیدا است، با افزایش سرعت، عمق برش شیل نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که انرژی جنبشی جت آب مستقیماً به سرعت جریان خروجی از نازل بستگی دارد، انتظار می‌رود با افزایش سرعت جریان خروجی از نازل، انرژی جنبشی نیز افزایش یابد و در نتیجه عمق و حجم برش سنگ نیز بیشتر شود. از طرف دیگر افزایش انرژی ذرات آب نیز منجر به تسریع شکست سنگ می‌شود. بنابراین همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت جریان خروجی از نازل، حجم برش سنگ نیز افزایش می‌یابد.

بنابراین همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت جریان خروجی از نازل، حجم و عمق برش سنگ نیز افزایش می‌یابد؛ هر چند تغییرات حجم برش نسبت به عمق برش با نرخ افزایشی بیشتری همراه است. هندسه مقطع برش سنگ نیز در سرعت‌های مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه در کنار عمق و حجم برش کمتر، شکل برش نیز مطلوب نیست. با افزایش سرعت ذرات ساینده و آب، انرژی جنبشی ذرات نیز افزایش یافته و به تبع آن عمق و حجم برش سنگ نیز به آرامی افزایش خواهد یافت. در سرعت‌های بالاتر شکل برش نیز تکمیل شده و به یک مخروط نزدیک می‌شود.

جدول ۲- مشخصات آب و ضرایب معادله گرون آیزن [۲۴]

نام پارامتر	مقدار
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	۱۰۰۰
$C \left(\frac{m}{s} \right)$	۱۴۸۰
S_1	۲/۵۶
S_2	-۱/۹۸۶
S_3	۰/۲۲۸۶
a	۱/۳۹۷
γ_0	۰/۴۹

جدول ۳- پارامترهای ماده الاستیک برای فولاد

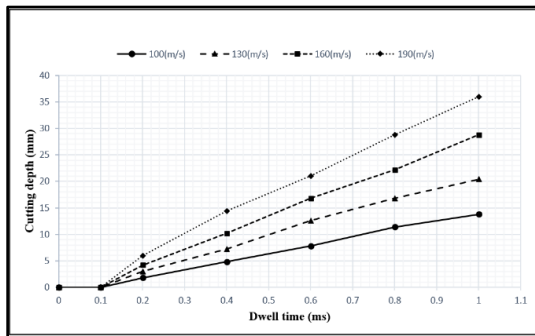
نام پارامتر	مقدار
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	۷۸۰۰
ν	۰/۳
$E (Gpa)$	۲۰۰

برای مدلسازی اندرکنش بین سیال و ذرات ساینده، در ابتدا به مرکز جرم هر ذره SPH آب و ذرات ساینده، یک مختصات سه بعدی در فضا داده می‌شود. سپس بر اساس اصول مذکور، اندرکنش بین سیال و ذرات جامد در مدل هیدرودینامیک ذرات روان محاسبه می‌شود. در این صورت در محاسبات الگوریتم جستجوی همسایه، ذره سیال یا جامدی که در همسایگی ذره اصلی "i" قرار داشته باشد، در نظر گرفته می‌شود.

۵- نتایج و بحث

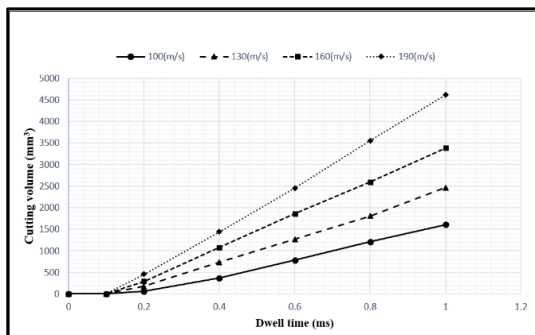
با توجه به اصول و فرضیات مطرح شده در بخش قبل، مدلسازی عددی در نرم‌افزار LS-DYNA به نحوی انجام شده است تا اثر پارامترهای سرعت، زمان توقف، غلظت حجمی ذرات ساینده و قطر ذرات ساینده مورد بررسی قرار گیرد. اثر تغییرات سرعت و زمان توقف در چهار سرعت مختلف ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه بر روی حجم و عمق برش سنگ بررسی شده است. تغییرات غلظت حجمی ذرات ساینده نیز با فرض ثابت بودن قطر ذرات ساینده بررسی شده است. همچنین با فرض غلظت حجمی ثابت ۱ درصد، اثر تغییر قطر ذرات ساینده در سرعت‌های ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه بر روی عمق و حجم برش بررسی و تفسیر شده است. فاصله قانونی نیز در کل فرآیند شبیه‌سازی برابر ۱۰ میلی‌متر فرض شده است.

به این ترتیب با فرض قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و غلظت حجمی



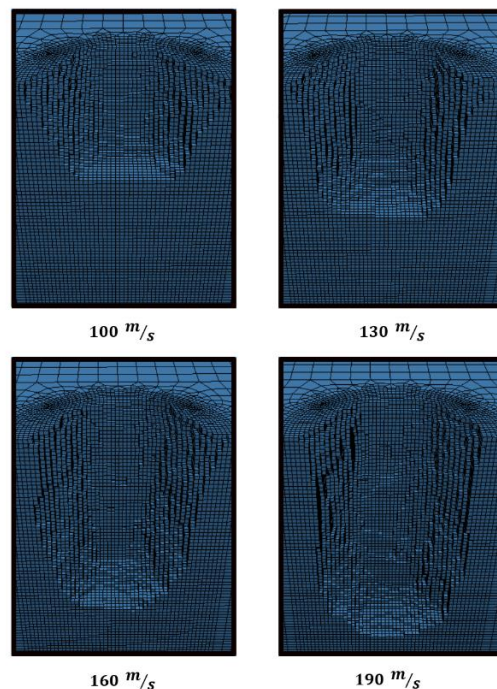
شکل ۸- اثر زمان توقف بر روی عمق برش در سرعت‌های مختلف

در شکل ۹ نیز اثر زمان توقف جت آب بر روی سنگ با فرض قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان توقف، حجم برش نیز افزایش می‌یابد. در این حالت نیز اختلاف بین حجم برش در سرعت‌های بیشینه و کمینه در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه معادل ۴۸۰ میلی‌متر مکعب و در زمان ۱ میلی‌ثانیه برابر ۳۴۵۰ میلی‌متر مکعب می‌باشد. بنابراین شیب منحنی حجم برش با افزایش زمان توقف زیاد می‌شود. طبق نتایج حاصل با افزایش زمان توقف، عمق و حجم برش افزایش می‌یابد. در این مورد نیز همانند اثر زمان توقف بر روی عمق برش، در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه و زمان توقف نهایی ۱ میلی‌ثانیه، حجم برش سنگ اختلاف زیادی با سرعت‌های پایین‌تر دارد. از طرف دیگر می‌توان اثر زمان توقف را به پارامتر سرعت عبور مرتبط دانست. اگر چه در تحقیق حاضر سرعت افقی برای جت آب تعریف نشده است، ولی می‌توان این گونه استنباط کرد که با کاهش سرعت عبور جت آب، زمان توقف بیشتر می‌شود و به تبع آن عمق و حجم برش سنگ افزایش می‌یابد [۱۴].



شکل ۹- اثر زمان توقف بر روی حجم برش در سرعت‌های مختلف

اثر غلظت حجمی ذرات ساینده بر روی عمق و حجم برش سنگ با فرض قطر ثابت ۱ میلی‌متر برای ذرات ساینده، در شکل ۹ و شکل ۱۰ آمده است. به طور کلی با افزایش غلظت ذرات ساینده، عمق و حجم برش سنگ با شیب ملایم افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده تا

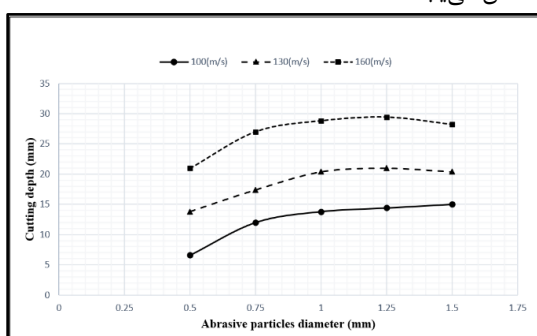


شکل ۷- هندسه مقطع برش سنگ در سرعت‌های مختلف

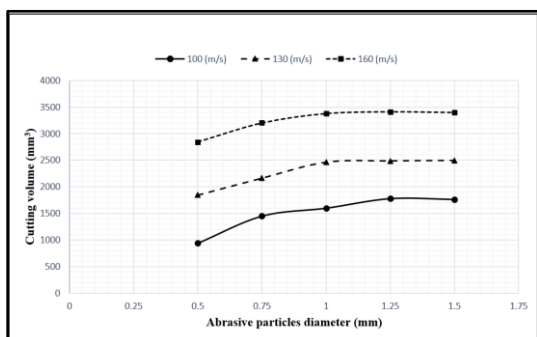
یکی دیگر از پارامترهای مهم در برش سنگ، زمان توقف است که به انرژی کل جت آب در لحظه برخورد به سنگ بستگی دارد. با افزایش زمان توقف جت آب ذره‌ای، عمق برش سنگ نیز بیشتر می‌شود. اثر زمان توقف جت آب بر روی سنگ در مدل عددی توسعه داده شده در این تحقیق، در شکل ۸ با فرض قطر ذرات ساینده ۱ میلی‌متر و غلظت حجمی ذرات ساینده ۱ درصد، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان توقف جت آب بر روی سنگ، عمق برش نیز افزایش یافته است. به این صورت که در زمان‌های ابتدایی، عمق برش بسیار کم است ولی با افزایش زمان عمق برش به سرعت زیاد می‌شود. طبق نتایج حاصل، اختلاف بین عمق برش در سرعت‌های بیشینه و کمینه در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه برابر ۶/۶ میلی‌متر است؛ در حالی که این اختلاف در زمان ۱ میلی‌ثانیه به ۲۹/۴ میلی‌متر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه، عمق برش سنگ به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد؛ زیرا انرژی جنبشی ذرات ساینده و آب با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد. بنابراین افزایش سرعت باعث افزایش انرژی جنبشی و به تبع آن افزایش عمق برش سنگ شده است.

اگر چه افزایش تعداد ذرات ساینده جت آب باعث افزایش عمق و حجم برش سنگ می شود، اما طول عمر سر برشی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. از طرف دیگر عملکرد و طول عمر بهینه نازل جت آب در غلظت های کمتر از ۵ درصد محقق خواهد شد. بنابراین غلظت حجمی ۳ درصد علاوه بر ایجاد برش مطلوب در سنگ، از هزینه های ناشی از آسیب به نازل جلوگیری خواهد کرد.

برای بررسی اثر تغییر قطر ذرات ساینده بر روی عمق و حجم برش سنگ، نتایج مدل سازی عددی برای غلظت حجمی ثابت ۱ درصد، در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ارائه شده است. از آنجا که غلظت حجمی ذرات آب و ساینده ثابت فرض شده است، با افزایش قطر ذرات ساینده، جرم ذرات افزایش و در نتیجه تعداد ذرات ساینده در ستون جت آب کاهش می یابد.



شکل ۱۲- اثر تغییر قطر ذرات ساینده بر روی عمق برش

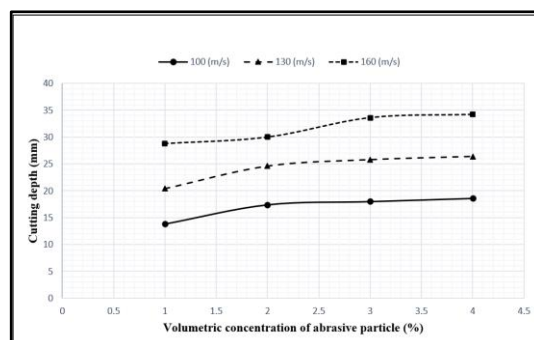


شکل ۱۳- اثر تغییر قطر ذرات ساینده بر روی حجم برش

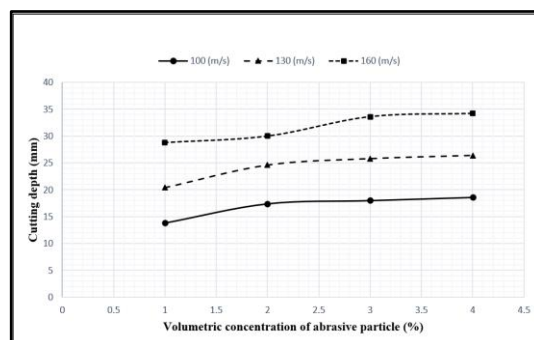
نتایج حاصل نشان می دهد با افزایش قطر ذرات ساینده از ۰/۵ تا ۱ میلی متر، شیب نمودار عمق و حجم برش سنگ به صورت ناگهانی افزایش می یابد ولی بعد از آن با افزایش قطر، عمق و حجم برش سنگ تقریباً ثابت می ماند. در شرایطی که قطر ذرات ساینده ۰/۵ میلی متر و سرعت جت آب ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد، ذرات ساینده (پرتعداد ولی کم جرم) توان غلبه بر مقاومت بالای سنگ را ندارند. با افزایش سرعت ذرات ۰/۵ میلی متری، انرژی جنبشی لازم برای حذف المان های سنگ فراهم می شود و به تبع آن عمق و حجم برش افزایش می یابد. با این وجود همچنان اثر افزایش جرم ذرات کم تعداد

۳ درصد، عمق برش سنگ زیاد می شود ولی بعد از آن تغییر چشم گیری در عمق برش مشاهده نمی شود. میانگین تغییرات عمق برش سنگ از غلظت حجمی ۱ درصد تا غلظت حجمی ۴ درصد، حدود ۵/۴ میلی متر است. همچنین با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده، شیب افزایش عمق برش ملایم است.

طبق شکل ۱۱ نیز با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده، حجم برش سنگ با شیب ملایم تا غلظت ۳ درصد افزایش می یابد و بعد از آن در سرعت ۱۰۰ و ۱۳۰ متر بر ثانیه حجم برش در غلظت ۴ درصد کاهش می یابد. نتایج حاصل نشان می دهد در سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه و از غلظت حجمی ۲ درصد به بالا، افزایش غلظت اثر چندانی روی عمق و حجم برش سنگ ندارد و حتی در غلظت ۴ درصد حجم برش کاهش یافته است. در سرعت های ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه نیز با افزایش غلظت ذرات، عمق برش بعد از غلظت ۳ درصد ثابت می شود و در مقابل حجم برش کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که یک غلظت بهینه برای ذرات ساینده جت آب وجود دارد. برای سنگ شیل طبق مفروضات و شرایط مدل سازی در این تحقیق، غلظت ۳ درصد را می توان یک غلظت مطلوب برای برش سنگ در نظر گرفت. چرا که عمق برش بعد از این غلظت، ثابت یا حتی کم می شود و حجم برش نیز اختلاف چندانی با حجم برش غلظت ۴ درصد نخواهد داشت.



شکل ۱۰- اثر غلظت حجمی بر عمق برش در سرعت های مختلف



شکل ۱۱- اثر غلظت حجمی بر حجم برش در سرعت های مختلف

جت آب، انرژی جنبشی در حالت دوفازی افزایش یافته و به تبع آن عمق و حجم برش افزایش می‌یابد. همچنین هر چقدر زمان توقف جت آب روی سنگ افزایش یابد، عمق و حجم برش نیز زیادتر می‌شود. با افزایش غلظت حجمی ذرات ساینده تا یک مقدار مشخص، عمق و حجم برش سنگ در ابتدا با شیب ملایم افزایش می‌یابد ولی بعد از آن بهبود چشم‌گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمی‌شود. بر این اساس برای سنگ شیل محدوده بهینه غلظت حدود ۳ درصد برآورد شده است. از طرف دیگر نتایج حاصل نشان می‌دهد که برای برش سنگ توسط جت آب ساینده، استفاده از ذراتی با قطر زیاد و تعداد کم نتیجه بهتری دربر خواهد داشت. با افزایش قطر ذرات ساینده تا یک قطر معین، عمق و حجم برش سنگ زیاد می‌شود و بعد از آن ثابت مانده یا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اثر افزایش جرم ذرات تا یک مقدار معین، بر اثر افزایش تعداد ذرات غالب است. این قطر معین برای سنگ مورد مطالعه در این تحقیق حدود ۱ میلی‌متر به دست آمده است. در عمل با بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی عددی می‌توان برش انواع سنگ توسط جت آب فشار قوی را بررسی نمود و پارامترهای تأثیرگذار را به منظور بهبود فرآیند برش شناسایی و بهینه کرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی برای توسعه مدل‌سازی جت آب ساینده با هدف برش سنگ، علاوه بر در نظر گرفتن مفروضات این تحقیق، سایر محدودیت‌ها نظیر زاویه قرارگیری جت آب، تأثیر فاصله کانونی، وضعیت قرارگیری سنگ و غیره نیز بررسی شوند.

بر اثر افزایش تعداد ذرات کم‌جرم غالب است. از طرف دیگر اختلاف بین عمق برش و حجم برش سنگ با استفاده از ذرات ساینده با قطر ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر تفاوت چندانی ندارد. اختلاف بین عمق برش در دو قطر ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر در تمام سرعت‌ها حدود ۰/۶ میلی‌متر و اختلاف بین حجم برش به ترتیب از کمترین به بیشترین سرعت برابر ۲۴، ۲۸۰ و ۳۳ میلی‌مترمکعب است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر چه اثر افزایش جرم ذرات بر اثر افزایش تعداد ذرات غالب است، اما از یک جرم بحرانی به بعد با افزایش جرم ذرات، عمق و حجم برش سنگ ثابت می‌ماند؛ زیرا ذرات سنگین‌تر با برخورد به سنگ سرعت بیشتری از دست می‌دهند و قادر به افزایش عمق و حجم برش سنگ نخواهند بود. البته افزایش قطر ذرات ساینده تابع محدودیت‌های دیگری از جمله قطر نازل، قطر لوله تمرکز و غیره نیز می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی جت آب و بهبود فرآیند برش سنگ استفاده شده است. برای مدل‌سازی فرآیند برش سنگ توسط جت آب فشار قوی از روش عددی *SPH-FEM* استفاده شده است. فرآیند مدل‌سازی با انتخاب مواد مناسب برای شبیه‌سازی سنگ، ذرات آب و ذرات ساینده و نیز تعریف نحوه تماس صحیح بین المان‌های اجزای محدود و هیدرودینامیک ذرات روان انجام شده است. طبق نتایج حاصل از این تحقیق با افزایش سرعت

۷- منابع

- [1] C. A. Fourness and C. M. Pearson, "Paper Metering, Cutting, and Reeling - US2006499A," US Pat., vol. 2,006,499, 1935, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US2006499>.
- [2] B. G. Schwacha, "Liquid cutting of hard materials," US Pat. Off., vol. 2.985.050, no. N 766.952, pp. 1-4, 1958.
- [3] D. Howard, "Valkyrie: North American's Mach 3 Superbomber," Air Sp. Power J., vol. 19, no. 2, p. 123, 2005.
- [4] Pang KL, Nguyen T, Fan JM, Wang J (2012) Modelling of the micro-channeling process on glasses using an abrasive slurry jet. Int J Mach Tools Manuf 53:118-126
- [5] Escobar-Palafox GA, Gault R, Ridgway K (2012) Characterisation of abrasive waterjet process for pocket milling in Inconel. Procedia CIRP 718:404-408.
- [6] Escobar-Palafox GA, Gault R, Ridgway K (2012) Characterisation of abrasive waterjet process for pocket milling in Inconel. Procedia CIRP 718:404-408.
- [7] G. Aydin, S. Kaya, and I. Karakurt, "Effect of abrasive type on marble cutting performance of abrasive waterjet," Arab. J. Geosci., vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.1007/s12517-019-4475-0.
- [8] Y. Natarajan, P. K. Murugesan, M. Mohan, and S. A. Liyakath Ali Khan, "Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review," J. Manuf. Process., vol. 49, no. November 2019, pp. 271-322, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030.
- [9] "KMT WATERJET PARTS CATALOG FALL 2016," 2016.
- [10] M. Hashish and M. P. du Plessis, "Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand off distance and multipasses," J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME, vol. 101, no. 3, pp. 311-318, 1979, doi: 10.1115/1.3439512.
- [11] T. Division, "A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining," vol. 111, 2016.
- [12] M. Ramulu, "Dynamic photoelastic investigation on the mechanics of waterjet and abrasive waterjet machining," Opt. Lasers Eng., vol. 19, no. 1-3, pp. 43-65, 1993, doi: 10.1016/0143-8166(93)90035-J.
- [13] G. S. Choi and G. H. Choi, "Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 37, no. 3, pp. 295-307, 1997, doi: 10.1016/S0890-6955(96)00049-1.
- [14] A. W. Momber and R. Kovacevic, "Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 34, no. 1, pp. 17-25, 1997, doi: 10.1016/S1365-1609(97)80030-5.
- [15] A. W. Momber, "The kinetic energy of wear particles generated by abrasive-water-jet erosion," J. Mater. Process. Technol.,

- vol. 83, no. 1–3, pp. 121–126, 1998, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00050-8.
- [16] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 12, pp. 1297–1306, 2002, doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [17] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 12, pp. 1297–1306, 2002, doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [18] H. Shahverdi, M. Zohoor, and S. M. Mousavi, "Numerical Simulation of Abrasive Water Jet Cutting Process Using the Sph and Ale Methods," *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, vol. 5, no. 117, pp. 43–50, 2011.
- [19] G. Wenjun, W. Jianming, and G. Na, "Numerical simulation for abrasive water jet machining based on ALE algorithm," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 1–4, pp. 247–253, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2836-7.
- [20] M. Gent, M. Menéndez, S. Torno, J. Toraño, and A. Schenk, "Experimental evaluation of the physical properties required of abrasives for optimizing waterjet cutting of ductile materials," *Wear*, vol. 284–285, pp. 43–51, 2012, doi: 10.1016/j.wear.2012.02.012.
- [21] G. Aydin, I. Karakurt, and K. Aydin, "Prediction of the cut depth of granitic rocks machined by abrasive waterjet (AWJ)," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 5, pp. 1223–1235, 2013, doi: 10.1007/s00603-012-0307-1.
- [22] S. Liu, Z. Liu, X. Cui, and H. Jiang, "Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 42, pp. 78–86, 2014, doi: 10.1016/j.tust.2014.02.002.
- [23] L. Guo, S. Deng, and X. Yang, "Numerical simulation of abrasive water jet cutting chemical pipeline based on SPH coupled FEM," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 51, pp. 73–78, 2016, doi: 10.3303/CET1651013.
- [24] J. Zhao et al., "Mechanism and effect of jet parameters on particle waterjet rock breaking," *Powder Technol.*, vol. 313, pp. 231–244, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.03.026.
- [25] F. Wang, R. Wang, W. Zhou, and G. Chen, "Numerical simulation and experimental verification of the rock damage field under particle water jet impacting," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 102, pp. 169–179, 2017, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.12.019.
- [26] Y. Xue, H. Si, Z. Yang, and D. Xu, "Microscopic damage field in coal induced by water jets," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 56, no. August, pp. 300–315, 2018, doi: 10.1016/j.jlpl.2018.09.002.
- [27] L. Feng, G. R. Liu, Z. Li, X. Dong, and M. Du, "Study on the effects of abrasive particle shape on the cutting performance of Ti-6Al-4V materials based on the SPH method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, no. 9–12, pp. 3167–3182, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-3119-y.
- [28] Y. Cha, T. M. Oh, and G. C. Cho, "Waterjet erosion model for rock-like material considering properties of abrasive and target materials," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 20, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/app9204234.
- [29] H. Li, S. Liu, J. Jia, F. Wang, and C. Guo, "Numerical simulation of rock-breaking under the impact load of self-excited oscillating pulsed waterjet," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 96, no. November 2019, p. 103179, 2020, doi: 10.1016/j.tust.2019.103179.
- [30] D. Liu, C. Huang, J. Wang, and H. Zhu, "Material removal mechanisms of ceramics turned by abrasive waterjet (AWJ) using a novel approach," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 11, pp. 15165–15172, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.02.076.
- [31] L. Vinet and A. Zhedanov, "A 'missing' family of classical orthogonal polynomials," *J. Phys. A Math. Theor.*, vol. 44, no. 8, pp. 1689–1699, 2011, doi: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.
- [32] S. S. Rao, *The finite element method in engineering*, Fifth Edit. 2017.
- [33] C. A. Dutra Fraga Filho, *Smoothed Particle Hydrodynamics*. 2019.
- [34] S. Hiermaier, "Predictive modeling of dynamic processes: A tribute to Professor Klaus Thoma," *Predict. Model. Dyn. Process. A Tribut. to Profr. Klaus Thoma*, no. December, pp. 1–460, 2009, doi: 10.1007/978-1-4419-0727-1.
- [35] T. De Vuyst, R. Vignjevic, and J. C. Campbell, "Coupling between meshless and finite element methods," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 8, pp. 1054–1064, 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2004.04.017.
- [36] L. E. Schwer and Y. D. Murray, "A three-invariant smooth cap model with mixed hardening," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 18, no. 10, pp. 657–688, 1994, doi: 10.1002/nag.1610181002.
- [37] L. E. Schwer, "Viscoplastic augmentation of the smooth cap model," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 150, no. 2–3, pp. 215–223, 1994, doi: 10.1016/0029-5493(94)90138-4.
- [38] Y. D. Murray and B. a Lewis, "Numerical Simulation of Damage in Concrete," p. 90, 1995, [Online]. Available: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA301935>.
- [39] L. E. Schwer, "Demonstration of the continuous surface cap model with damage: concrete unconfined compression test calibration," *LS-DYNA Geomaterial Model. Short Course Notes*, 2001.
- [40] L. E. Schwer and Y. D. Murray, "Continuous surface cap model for geomaterial modeling: A new LS-DYNA material type," *7th Int. LSDYNA Users Conf.*, no. 2, pp. 35–50, 2002, [Online]. Available: http://www.dynalook.com/international-conf-2002/Session_16-3.pdf.
- [41] H. Jiang and J. Zhao, "Calibration of the continuous surface cap model for concrete," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 97, pp. 1–19, 2015, doi: 10.1016/j.finel.2014.12.002.
- [42] L. Dyna, "Contact Modeling in LS-DYNA," *Lstc*, 2001. <https://www.dynasupport.com/tutorial/lstc-dyna-users-guide/contact-modeling-in-ls-dyna>.