

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(8) (2023) 201-204 DOI: 10.22060/mej.2023.22439.7619



# Numerical modeling of rock cutting with abrasive waterjet to determine the optimal parameters affecting cutting depth and volume

S. Mahdevari<sup>1\*</sup>, P. Bakhtiari HaftLang<sup>2</sup>, H. Sayehvand<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran <sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

ABSTRACT: In this research, the optimal parameters have been investigated with the aim of increasing

the efficiency and improving the quality of rock cutting using an Abrasive Water Jet (AWJ) through

**Review History:** 

Received: Jun. 03, 2023 Revised: Nov. 22, 2023 Accepted: Nov. 22, 2023 Available Online:Dec. 05, 2023

#### **Keywords:**

Abrasive waterjet Rock cutting Finite Element Method (FEM) Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

the modeling of high-velocity two-phase flow (water and abrasive). The rock-cutting process by AWJ has been simulated using the combined finite element method-smoothed particle hydrodynamics in LS-DYNA software. For this purpose, the effect of parameters of jet velocity, dwell time, changes in volumetric concentration, and changes in the diameter of abrasive particles on the cutting depth and cutting volume of siltstone and shale rock specimens have been investigated. Numerical modeling results showed that with increasing velocity, the cutting depth and cutting volume increased. As the dwell time increases, the energy used by the AWJ to cut the rock increases, which would lead to an increase in the depth and volume of the cut. By increasing the volumetric concentration of abrasive particles up to 3%, the depth and volume of the cut increased with a gentle slope, and after that, no significant improvement was observed. Also, by increasing the diameter of the abrasive particles up to 1.25 mm for siltstone and 1 mm for shale, the depth and volume of the cut increased at first, and after that, they remained constant or decreased.

### **1-Introduction**

Nowadays, owing to the widespread use of decorative stones, and the need for precision in their cutting, various methods are used for precise cutting of rocks, among which waterjet is more attractive due to its lower cost, easier usage and safer operations. One of the advantages of waterjet is making a smooth cut without creating residual and thermal stresses after machining. In a waterjet, a stream of water or a stream of water and abrasive particles exits from a nozzle at a high speed which can cut a solid object.

If the waterjet can operate without abrasive particles, it is called pure waterjet, which is suitable for cutting soft materials such as wood, rubber, and paper. On the other hand, an Abrasive Water Jet (AWJ) is used to cut hard materials such as metal, rock, and concrete. Garnet (natural abrasive) is used in 80% of industrial applications [1].

In the AWJ, abrasive particles are injected into the water flow, and by the momentum transfer between the abrasive particles and the high-speed water flow in the nozzle, a twophase flow (water and abrasive) or a three-phase flow (water, abrasive and air) is ready to cut a solid sample. One of the AWJs is the particle water jet whose mechanism is similar to AWJ with the difference that instead of numerous fine abrasive particles, coarse particles (0.5 to 5 mm) with a low concentration (1 to 5%) are used [2].

In this research, numerical modeling has been used to determine the optimal parameters for rock cutting with AWJ. For this purpose, according to the physical and mechanical properties of the rock, material 145 in the LS-DYNA software has been selected to model two samples of siltstone and shale. The results of this research may be helpful in improving rock cutting with waterjet and reducing the waste caused by the cutting process to a significant extent.

### 2- Methodology

In this research, the SPH-FEM numerical method is used to simulate the rock cutting by AWJ. In this way, abrasive particles and water are modeled by the SPH method, and rock is modeled by the FEM method.

The rock geometry is designed with 150 mm length, 75 mm width, and 75 mm height. The column of water and abrasive particles is created as a semi-cylindrical with a diameter of 4 mm and a length of 200 mm, which leads to an increase in the number of particles and an increase in the duration of the software execution, which results in more aureate modeling [3]; since the modeled column is not run out during the process of numerical modeling (Figure 1).

In our modeling, the effect of air in the combination of particles, as well as the effect of air on the rock, has been ignored, due to its insignificant kinetic energy in the cutting

\*Corresponding author's email: satar.mahdevari@aut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. SPH particle modeling of water and abrasive

Table 1. Geomechanical characteristics of rock samples

Rock	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	E(GPa)	UCS (MPa)	V
Siltstone	2730	3.3	44.4	0.26
Shale	2900	16.5	85	0.15



Fig. 2. Cutting geometry at different velocities

process [2]. Material 145 is selected from the software library as a suitable material for the finite element component of rock, which was proposed by Schwer and Murray [4, 5] and is called the Schwer-Murray Cap or Continuous Surface Cap. This model can properly describe many important mechanical behaviors of rock, concrete, and soil [6]. To determine the parameters of Material 145, the geomechanical characteristics of the rock including density, uniaxial compressive strength, Poisson's ratio, and Young's modulus should be determined. These characteristics are determined for 20 samples of siltstone and shale in the Rock Mechanics Laboratory of Bu-Ali Sina University, and the average results are summarized in Table 1.

For water, the material MAT\_NULL and the Gruneisen equation of state have been selected from the software library [7]. Also, spherical steel particles have been used to model the abrasive particles by the MAT\_ELASTIC material in the software, assuming that the steel particles are not deformable.

The command Contact\_Eroding\_Nodes\_To\_Surface in LS-DYNA software is used to define the contact between abrasive particles and rock. When water and abrasive particles hit the rock, the velocity of the particles gradually decreases. To simulate this phenomenon, the Initial\_Velocity\_Generation command has been used to apply the initial velocity to SPH particles of water and abrasive.

#### **3- Results and Discussion**

According to the results, by increasing the jet velocity, the kinetic energy of particles grows, and this makes the rocks to break faster. Moreover, as the dwell time increases, the depth and volume of the cut may also increase by a low rate at first, and then they increase quickly. Figure 2 shows the cutting geometry at different velocities for siltstone. At velocity of 100 m/s, the shape of the cut is not favorable. By rising the velocity to 190 m/s, the depth and volume of the cut gradually increase, and the shape of the cut approaches a cone. The results of the effect of velocity on the cutting depth and volume for both rocks are respectively shown in Figure 3.

In general, by increasing the concentration of abrasive particles, the depth and volume of the cut will increase with a gentle slope, and the concentration of 3% can be considered an optimal value. The results of the effect of changing the abrasive diameter on the cutting depth and volume of both rocks for a constant concentration of 1% show that by increasing the diameter of the abrasive particles up to a certain value (1.25 mm for siltstone and 1 mm for shale), the depth and volume of the cut increase at first, and after that the trends will decrease.

#### **4-** Conclusions

In this research, due to the extensive capabilities of waterjets in cutting decorative stones, the SPH-FEM numerical modeling has been used to investigate the effect of parameters affecting the quality of cutting depth and volume in two samples of siltstone and shale. The results are summarized as follows: (I) As the velocity of the water jet increases, the kinetic energy of the two-phase jet increases, and the depth and volume of the cut will increase. (II) The longer the dwell time on rock samples, the depth and volume of the cut will increase the volumetric of the cut will increase.



Fig. 3. Effect of jet velocity on the cutting depth and cutting volume

concentration of abrasive particles up to a specified value of 3%, the depth and volume of the cut increased with a slight slope, and after that, no significant improvement was observed. (IV) The effect of increasing the mass of abrasive particles up to a certain value with a smaller particles prevails over the increase in the number of particles with a lower mass. This specific diameter is about 1.25 mm for siltstone and about 1 mm for shale. References

- 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] H. Jiang, J. Zhao, Calibration of the continuous surface cap model for concrete, Finite Elements in Analysis and Design, 97 (2015) 1-19.
- [7] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Material models in Ls-dyna, Ls-dyna Keyword User's Manual Vol II, (2012).

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 201-204.



**DOI:** 10.22060/mej.2023.22439.7619

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۸، سال ۱۴۰۲، صفحات ۹۷۱ تا ۹۹۴ DOI: 10.22060/mej.2023.22439.7619



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

ستار مهدوری\*٬ پدرام بختیاری هفتلنگ٬ حبیبالله سایهوند

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

باریک با سرعت زیاد به یک جسم جامد برخورد کرده و منجر به برش آن

می شود. 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 سخت تری نظیر فولاد ضد زنگ، ورق های لانه زنبوری، سنگ

و فلز توسعه داد [۳, ۳]. در سال ۱۹۶۸ فناوری ماشین کاری 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 ۲ 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

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، اجزای اصلی یک دستگاه

جت آب شامل واحد تأمين جريان آب، پمپ، سيستم كنترل، سيستم تنظيم،

محفظه اختلاط، اوريفيس، نازل، لوله تمركز و لوله تزريق ساينده است. در

**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 ذرمای 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 می یابد. همچنین با افزایش زمان توقف، انرژی مصرفی جت آب برای برش سنگ بیشتر میشود که منجر به افزایش عمق و حجم برش سنگ افزایش می یابد. همچنین با افزایش زمان توقف، مدلسازی مصرفی جت آب برای برش سنگ بیشتر میشود که منجر به افزایش عمق و حجم برش خواهد شد. با افزایش غلظت حجمی مرات ساینده تا ۳ درصد، عمق و حجم برش با شیب ملایم افزایش یافته و بعد از آن بهبود چشم گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمیشود. با افزایش قطر ذرات ساینده تا ۲۰/۱ میلی متر برای سیلتاستون و ۱ میلیمتر برای شیل عمق و حجم برش زیاد مشاهده نمیشود. با افزایش حمق و یا کاهش می یابد.

### ۱- مقدمه

امروزه با توجه به کاربرد گسترده انواع سنگهای تزئینی و نما و لزوم دقت در برشکاری آنها، از روشهای مختلفی از قبیل جت آب، جت شعله، امواج ماکروویو وغیره برای برش دقیق سنگها استفاده میشود که در این میان هزینه برش با جت آب کمتر و استفاده از آن راحت و ایمن تر می باشد [۱]. از مزیتهای جت آب عدم ایجاد تنش پسماند و عدم ایجاد تنش حرارتی بعد از ماشین کاری 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 می کند. 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 وغیره 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

در فرآیند برش با جت آب، جریانی از آب تحت فشار از طریق یک نازل

\* نویسنده عهدهدار مکاتبات: satar.mahdevari@aut.ac.ir

مورد استفاده قرار گرفت [۶].

<sup>1</sup> Abrasive Waterjet (AWJ)



شکل ۱. جت آب ساینده به همراه اجزای آن [۱۰] Fig. 1. Abrasive water jet along with its components [10]

جت آب ساینده، ذرات ساینده به درون جریان آب تحت فشار تزریق شده و پس از انتقال ممنتوم 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].

کارآیی 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<sup>۱</sup> است که مکانیزم آن مشابه جت آب ساینده است. با این تفاوت که بهجای 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 اندازه گیری میشود.

1 Particle Waterjet (PWJ)

همچنین مدت زمانی که جریان خروجی از جت آب بر روی نمونه توقف میکند، به زمان توقف<sup>۲</sup> معروف است. اگر جت آب حرکت افقی هم داشته باشد بهجای زمان توقف، پارامتر سرعت عبور<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> 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 ال اسداینا<sup>ه</sup> برای مدلسازی دو نمونه سنگ سیلتاستون (لایسنگ) 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 نمی شود، استفاده شده است. با بهره گیری از نتایج حاصل از این تحقیق می توان برش سنگ با جت آب را بهبود و ضایعات ناشی از فرآیند برش را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

<sup>2</sup> Dwell time

<sup>3</sup> Traverse speed

<sup>4</sup> Standoff distance

<sup>5</sup> LS-DYNA

# 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 یویا و سرعت بحرانی ارائه شد که بر اساس نتایج آن مدول الاستيسيته بيشترين تأثير را بر روى عمق برش دارد [١٢]. 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 فوق العاده بالا (تا ۶۹۰ مگاپاسگال) را به روش تجربي مطالعه كردند. نتايج نشان ميدهد كه جت آب با فشار فوق بالا، به صورت مؤثری می تواند ورق های ضخیم فلزی (تا ۱/۶ میلی متر) 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 لایه لایه شدن ورق های 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 می یابد [۱۶]. کولکچی در سال ۲۰۰۲ با هدف بررسی پارامترهای جت آب صنعتی در تحقیق خود نتيجه گرفت با افزايش قطر ذرات ساينده تا ۲۰۰ ميكرون عملكرد برش زیاد می شود ولی برای ذرات ساینده با قطر بیشتر به علت افزایش جرم ذرات و كاهش شتاب اوليه آنها، عملكرد برش كاهش خواهد يافت [١٧].

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 (اِسپی اِچ)<sup>۲</sup> و روش

اویلر-لاگرانژ دلخواه (ایالای) شبیه سازی کردند. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش فشار در هر سه روش آزمایشگاهی، اس پی اچ و ای ال ای، عمق برش نیز زیاد می شود. همچنین با افزایش سرعت عبور جت آب، عمق برش کم می شود. آنها نتیجه گرفتند اعتبار روش اس پی چ نسبت به روش ای ال ای بیشتر است. زیرا در روش اس پی چ هر ذره به عنوان یک توده جرمی مستقل در نظر گرفته می شود، در حالی که در روش ای ال ای تمام ذرات ساینده در آب حل می شوند. ونجون و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۱ روش ای ال ای 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 می شود و دیگر تغییر نمی کند. جنت و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۲ برش مواد شکل پذیر 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 شبیه سازی به روش کوپل شده اس پی چ اف ای ام توسط گو و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۶ مشاهده شد که با افزایش فشار، عمق برش زیاد می شود. همچنین با کاهش سرعت عبور، عمق برش نیز افزایش می یابد. 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 اس پی چ و برای شبیهسازی سنگ از روش افای ام استفاده شده است. نتایج حاصل نشان میدهد هر چقدر سرعت جت آب خروجی از نازل بیشتر باشد، عمق و حجم برش بیشتر می شود و با افزایش زمان توقف جت روی سنگ، عمق و حجم برش افزایش می یابد. وانگ و همکاران [۴۲] نیز در سال ۷۱۰۲ 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 اس پی اچ 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 می یابد ولی در ادامه روند کاهشی خواهد داشت. چن و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۸ برش فولاد با جت آب تحت تأثير زوايا و فشار مختلف

<sup>1</sup> Dynamic flow stress

<sup>2</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

<sup>3</sup> Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

یک قطر ثابت برای نازل جت آب، هنگامی که سرعت ضربه جت آب از سرعت بحرانی بیشتر شود، ترکهای جانبی در داخل بتن ایجاد می شوند که قابلیت جت آب را به طور قابل توجهی افزایش داده و موجب تخریب بتن می شود. اگر سرعت جت آب از سرعت بحرانی کم تر شود، ناحیه برش به همسایگی دهانه برش و ترکهای اصلی محدود شده و به صورت فرسایشی در سطح ظاهر می شود. مهمان نواز و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۲۱ نفوذ خرج گود در بتن را بررسی کردند. آنها در پژوهش خود اشاره میکنند که در روش اىالاى با تغييرشكل يافتن المانها، زمان حل مسئله نسبت به روش اويلرى كاهش مى يابد. همچنين نرم افزار ال اسداينا با تقسيم دامنه محاسباتى 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 می شود. واسودوان و همکاران [۳۳] نیز در سال ۲۰۲۲ با استفاده از روش کوپل شده اس پی چ اف ای ام، زاویه قرار گیری ۹۰ درجه، سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه و فاصله کانونی ۲ میلیمتر را به عنوان مقادیر بهینه در فرآیند سوراخ کاری 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 اچ-اف ای ام استفاده كردند. نتايج آنها نشان ميدهد به دليل مسدود شدن انتشار موج تنش توسط ترکها، ناحیه فروپاشی در بالای ترک ظاهر و سپس تخریب در داخل منطقه فروپاشی رفته رفته زیاد می شود. 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 اچ-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 می یابد. 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 المان های سنگ در محل مرکزی برخورد است و ترکهای سنگ عمدتاً توسط تنش کششی ایجاد می شوند.

# ۳- تئوری شبیهسازی عددی

به طور کلی معادلات حاکم بر پدیدههای فیزیکی، معادلات دیفرانسیلی

را با روش اس پی چ-اف ای ام شبیه سازی کردند. نتایج نشان می دهد 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 اچ استفاده شده است. پاسکن و همکاران از سرعت ۱۲۵۰ متر بر ثانیه، برای سرعت دادن به ذرات اس پی اچ آب استفاده کردند. برای صفحه ألومينيومي، بيشينه تنش فون ميزس حدود ٢٠٠ مكاپاسكال است كه 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 پیاچ 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 کارآیی برش را دارند. لیو و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۹ برش سنگ توسط جت آب ساینده را در فشارهای مختلف به روش اس پی اچ – اف ای ام شبيهسازى كردند. بر اين اساس افزايش فشار جت آب باعث كاهش نيروى 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. نتايج أنها نشان مىدهد كه خواص فيزيكي ذرات ساينده همچون سختى 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 چ-اف ای ام را تحت ضربه جت آب پر سرعت، شبیهسازی کردند و نشان دادند روش اس پیاچ-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 می شود. در حالی که با افزایش سرعت عبور، عمق برش کاهش می یابد. یو و همکاران [۳۱] نیز در سال ۲۰۲۱ شکست بتن توسط جت آب ساینده را به روش اس پی چ اف ای ام شبیه سازی کردند. طبق نتایج حاصل با فرض

هستند که به دو دسته معادلات دیفرانسیل معمولی<sup>۱</sup> و معادلات دیفرانسیل جزئی<sup>۲</sup> 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 اس پی[چ – فای ام به کار گرفته شده است. به این ترتیب که ذرات ساینده و آب به روش اس پی[چ و سنگ به روش اف ای ام 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 فضا و مکانیک تا معدن و پزشکی استفاده می شود. 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 گامبه گام پیروی شود که این مراحل به طور کامل در مرجع [۳۸] آمده است و برای رعایت اختصار از ذکر مجدد روابط خودداری می شود. به طور کلی در شبیه سازی به روش اجزاء محدود دو نوع مسأله صريح و ضمني وجود دارد. حل مسائل پيچيده با روش اجزاء محدود ضمنی به علت وارون کردن ماتریس سفتی 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 صريح به صورت المان به المان و بدون تغيير در ماتريس سفتى کل به دست میآید، رویکرد صریح برای حل مدل های 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

$$\Delta t \le \frac{l}{c_w} \tag{1}$$

که در آن I مربوط به کوچکترین اندازه المان است و  $C_w$  سرعت انتشار موج تنش در المانها است. پارامتر  $\Delta t$  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 گسسته سازی، باعث افزایش زمان حل عددی شود. این موضوع در نرمافزار ال اس داینا که از روش تفاضل مرکزی استفاده می کند، به وسیله جابه جایی های الاستیک قبلی (قبل از گام زمانی فعلی) و مشتق آنها انجام می شود [۳۷]:

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

$$(f)$$

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

$$u_{t_{n+1}} = f(u_{t_n}, \dot{u}_{t_n}, \ddot{u}_{t_n}, u_{t_{n-1}})$$
<sup>(\*)</sup>

که در آن بردار نیروهای خارجی  $f_{ext,t_n}$  با شرایط مرزی و نیروی حجمی در گام زمانی  $t_n$  مرتبط میشود. Mماتریس 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 شبیه سازی جریان آب و ذرات ساینده از روش اِس پی اِچ 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 شبه ذره برای محاسبه متغیرهای میدان محاسباتی استفاده می کند. در دیدگاه لاگرانژی، دامنه مسأله می تواند به

<sup>1</sup> Ordinary Differential Equations (ODE)

<sup>2</sup> Partial Differential Equations (PDE)

<sup>3</sup> Undamped

٥	٥	0	0	0	0	0	0	0
٥	۰	0	•	0	0	0	0	•
0	0	0	•	•	•	0	0	0
0	٥	6	٠	• ,	1	j <b>ð</b>	0	0
0	0	•	٠	i•	•	•	0	0
0	0	6	٠	•	٠	1	0	0
0	٥	0	•	٠	•	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
٥	0	0	0	0	0	0	0	0

شکل ۲. مجموعهای از ذرات همسایه (i مختصات ذره اصلی و j مختصات ذرات متغیر) [ $\mathfrak{t}$  -

#### 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 اِس پی اِچ، دامنه محاسباتی به نقاط گسسته تبدیل می شود؛ بنابراین برای تعیین مقدار تابع f در نقاط دامنه، خصوصیات فیزیکی نقطه اصلی i توسط مجموعه ای از نقاط همسایه j تعیین می شود. با ادغام در معادله کِرنِل خواهیم داشت [۳۹]:

$$< f(x_i) > = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h)$$
 (8)

که در آن  $\rho_j \in M$  چگالی،  $m_j \in m$  جرم ذرات همسایه و مقدار N نیز تعداد کل ذرات در همسایگی نقطه اصلی را نشان میدهد. در این پژوهش از کِرنِل 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 می شود 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 مش بندی مجدد در هر تکرار عددی ندارد و برای توصیف هندسه های پیچیده، هزینه محاسباتی کمتری دارد. امروزه با کمک واحدهای پردازش گرافیکی قدرتمند، می توان از میلیون ها ذره ی لاگرانژی برای گسسته سازی دامنه محاسباتی استفاده کرد [۳۹]. در روش اِس پی اِچ برای تقریب دامنه متغیرها در هر نقطه از دامنه محاسباتی، به جای شبکه از درون یابی کِرنِل <sup>(</sup> (هسته) استفاده می شود. تابع تقریب کِرنِل طبق رابطه (۵) محاسبه می شود که در آن مقدار تابع (x) در مکان x به صورت پیوسته توسط انتگرالی از حاصل و یک تابع کرنل تخمین زده می شود [۳۹]:

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

در این رابطه، عبارت W(x - x', h) تابع کِرنِل و پارامتر طول هموار<sup>۲</sup> یا h محدوده دامنه پشتیبانی شده را مشخص می کند. همچنین x موقعیت نقطه ثابت و x موقعیت نقطه متغیر را نشان می دهند. تابع کِرنِل باید به نحوی انتخاب شود که بیانگر بهترین تقریب از خواص فیزیکی

<sup>1</sup> Kernel interpolation

<sup>2</sup> Smoothing length

$$W(x - x', h) = \alpha_D \begin{bmatrix} (\frac{2}{3} - q^2 + \frac{1}{2}q^3), & 0 \le q \le 1 \\ \frac{1}{6}(2 - q)^3, & 1 < q \le 2 \\ 0 & \text{other wise} \end{bmatrix}$$
(Y)

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

# ٣- ٣- تماس بين افاىام و اسپىاچ

به منظور مدلسازی برش سنگ با جت آب در نرمافزار ال اسداینا، 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 اس پیاچ و افای ام تعریف میشود. یک روش برای محاسبه بردار نیروی تماس بین اس پی چ و افای ام در نظر گرفتن گرهها به عنوان ذرات اس پی چ و تعریف الگوریتم تماس بین آنها است. یعنی تعریف الگوریتم تماس بین ذره اس پی چ با ذره اس پی چ که میتواند در مسائلی مانند ضربه استفاده شود. هر ذره اس پی چ یا گرهای که از ذره اصلی  $x_i$ کمتر از h فاصله داشته باشد، در الگوریتم جستجوی همسایه به لیست همسایههای ذره اصلی آن اضافه میشود. به این ترتیب خواهیم داشت [۴۱]:

$$F_{c}(x_{i}) = \sum_{j}^{NCNBR} \frac{m_{j}}{\rho_{j}} \frac{m_{i}}{\rho_{i}} \times Kn \frac{W(x_{i} - x_{j})^{n-1}}{W(h_{avg})^{n}} \nabla_{x_{i}} W(x_{i} - x_{j})$$
(A)

که در آن NCNBR تعداد کل گرهها یا ذراتی است که در تماس با همسایگی ذره اصلی  $_i x$  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 اِسپیاِچ در نظر گرفته میشوند و طول صاف h بر اساس اندازه المان مجاور به هر یک از گرهها اختصاص مییابد. نیروی تماس اندازه المان مجاور به هر یک از گرهها اختصاص مییابد. نیروی تماس محاسبه نیروهای تماس فقط جرم گره، چگالی و موقعیت گره لازم است.

برای فرسایش سنگ نیز هنگامی که کرنش پلاستیک معادل<sup>۱</sup> 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 اِس پی اِچ –اِف ای اِم در محیط نرمافزار اِل اِس داینا استفاده شده است. مدل سازی سنگ با روش اِف ای اِم و مدل سازی ذرات ساینده و آب با روش اِس پی اِچ 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 چشم پوشی شده است [۹]. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هندسه مش بندی سنگ به صورت یک شبکه ۲۵ در ۲۵ در محیط است، هندسه مش بندی سنگ به صورت یک شبکه ۲۵ در ۲۵ در محیط شعاع ۱۸ میلی متر ایجاد شده است. در گوشهی این پوسته، یک ربعدایره با کوچکترند و برای ایجاد شده است. المان هایی که در ربعدایره قرار دارند، مرکزی<sup>۲</sup> استفاده شده است. این قسمت مستقیماً در تعامل با جت آب است. در مرحله بعد، این پوسته در نرمافزار اِل اِس داینا فراخوانی شده و به آن بُعد در مرحله بعد، این پوسته در نرمافزار اِل اِس داینا فراخوانی شده و به آن بُعد در مرحله می شود.

هندسه سنگ با ۱۵۰ میلی متر طول، ۷۵ میلی متر عرض و ۷۵ میلی متر 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 اس پی اِچ آب، نیم استوانه ای به قطر ۴ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر در نرم افزار ال اِس داینا ایجاد شده است (شکل ۴). در مجموع تعداد ۱۴۰۰۰ ذره اِس پی اِچ به عنوان آب انتخاب شده است. انتخاب تعداد ذرات ساینده، به پارامترهای مختلفی همچون غلظت حجمی، قطر ذرات ساینده، پیچیدگی مسأله، سخت افزار رایانه وغیره بستگی دارد. اگر تعداد ذرات ساینده، پیچیدگی مسأله، سخت افزار رایانه وغیره بستگی دارد. اگر تعداد ذرات ساینده، میویدگی از طرف دیگر اگر ذرات به تعداد کم انتخاب شوند، برش مطلوب میسر نمی شود. طول ۲۰۰ میلی متری در نظر گرفته شده برای جت آب، منجر به افزایش تعداد ذرات و افزایش مدت زمان اجرای نرم افزار می شود. این انتخاب باعث می شود که نتایج مدل سازی به واقعیت نزدیکتر شوند؛ زیرا این ستون در فرآیند مدل سازی عددی بر اساس سرعتها و زمان های مفروض تمام نمی شود.

<sup>1</sup> Equivalent plastic strain

<sup>2</sup> Medial-axis



شکل ۳. پوسته و شبکه ایجاد شده در نرمافزار أباکوس برای مش بندی سنگ

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



شکل ۴. مدلسازی ذرات اِس پی اِچ 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

V	E (GPa)	UCS (MPa)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	سنگ
۰/۲۶	$\mathfrak{r}/\mathfrak{r}$	**/*	۲۷۳۰	سيلتاستون
۰/۱۵	۱۶/۵	٨۵	79	شيل

Table 1. Geomechanical characteristics of siltstone and shale rock samples

## جدول ۲. چگالی آب و ضرایب معادله حالت گرون آیزن در شبیهسازی عددی [۹]

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

α	${\gamma_0}$	$S_3$	$S_{2}$	$S_1$	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	$C(\frac{m}{s})$	مادہ
١/٣٩٧	٠/۴٩	•/7788	-1/9 <b>\</b> 8	۲/۵۶	1	148.	آب

برای انتخاب مواد در نرمافزار ال اس داینا 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<sup>(</sup> پیشنهاد شده است [۴۲–۴۶]، 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]:

$$d^{\pm} = G(\tau^{\pm}) = 1 - \frac{r_0^{\pm}}{\tau^{\pm}} (1 - A^{\pm}) - A^{\pm} \cdot \exp^{B^{\pm}(r_0^{\pm} - \tau^{\pm})}$$
(9)  
$$0 \le r_0^{\pm} \le \tau^{\pm}$$

که در آن
$$\stackrel{- au}{ au}$$
 نُرم انرژی آسیب ندیده<sup>۲</sup> در فضای تنش مؤثر است و

به صورت  $\overline{\tau}^{\pm} = \sqrt{\sigma_{ij}}$  آستانه آسیب  $\overline{\tau}^{\pm} = \sqrt{\sigma_{ij}}$  آستانه آسیب  $\overline{\tau}^{\pm}$  و پارامتر های  $B^{\pm}$  از مرتبه ی را نشان میدهد. پارامترهای بی بعد  $A^{\pm}$  و پارامترهای  $B^{\pm}$  از مرتبه ی همه پارامترهای ماده که برای توصیف آسیب به کار میروند. برای تعیین همه پارامترهای ماده ۱۴۵، باید مشخصه های ژئومکانیکی سنگ شامل چگالی، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و مدول یانگ تعیین شوند. این مشخصه ها برای ۲۰ نمونه سنگ سیلت استون و شیل در آزمایشگاه محاسبه و میانگین نتایج آن در جدول ۲ خلاصه شده است.

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

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

3 Damage threshold

<sup>1</sup> Schwer-Murray Cap (Continuous Surface Cap)

<sup>2</sup> Undamaged energy norm

#### جدول ۳. پارامترهای ماده الاستیک برای فولاد

Table 3. Elastic material parameters for steel

E (GPa)	V	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	ماده
۲	۰/٣	۷۸۰۰	فولاد

که در آن P فشار،  $P = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  انرژی درونی به ازای حجم واحد، P قاطع منحنی  $P_0$   $u_s - u_p$  چگالی،  $S_1$  ،  $S_2$  و  $S_3$  ضرایب واحد، C قاطع منحنی  $u_s - u_p$  می اسد شیب منحنی  $u_s - u_p$  ثابت معادله و  $\alpha$  ضریب اصلاح حجم می باشد [۴۸].

برای مدلسازی ذرات ساینده نیز از ذرات فولادی کروی-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 تغییرشکل پذیری 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 ال اسداینا به صورت تماسهای فرسایشی<sup>۱</sup> 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 می کنند، سرعت فرات رفتهرفته کم میشود. برای شبیهسازی این پدیده در نرمافزار از دستور سرعتدهی اولیه به منظور اعمال سرعت اولیه به ذرات اس پی چ 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

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 ذرمای 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 ۶/۹ میلیمتر، در دو سرعت ۱۳۰ و ۱۶۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۱۳/۸ و ۱۸/۸ میلیمتر، در دو سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه این اختلاف به ترتیب ۱۳/۸ افزایش مییابد. بابراین 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، ۲۰۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۷۴۷، ۸۵۸، ۱۳۴۰ و ۱۴۶۶ میلیمتر مکعب اختلاف دارد، یعنی اختلاف حجم کنده شده نیز با افزایش سرعت زیاد می ابد. بنابراین به طور کلی با افزایش سرعت، حجم و عمق برش در هر می یابد. بنابراین به طور کلی با افزایش سرعت، حجم و عمق برش در هر سرعت بر روی حجم و عمق برش را افزایشی گزارش کردهاند اما در تحقیق 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 می یابد. طبق جدول ۱ مقاومت فشاری تک محوره برای سیلت استون و شیل به ترتیب برابر ۴۰/۴ و ۸۵ مگاپاسکال، مدول یانگ نیز به ترتیب برابر ۳/۳ به ترتیب برابر ۱۶/۴ و ۸۵ مگاپاسکال، مدول یانگ نیز به ترتیب برابر ۳/۳ به 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) می باشد. مومبر و کواکویچ [۵۵] نیز در تحقیق فشاری تک محوره و مدول یانگ

<sup>1</sup> Eroding



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)





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 ۲، 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 رفته رفته افزایش یافته و شکل برش به یک مخروط نزدیک می شود. 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 می شود 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 ۲/۲ میلی ثانیه برای سیلتاستون و شیل به ترتیب برابر ۲/۲ و ۲/۲ میلی متر است و این اختلاف در زمان ۱ میلی ثانیه برای سیلتاستون به ۳۳/۶ میلی متر و برای شیل به ۲۲/۲ میلی متر افزایش می یابد، یعنی شیب منحنی عمق برش با افزایش زمان زیاد می شود. در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه، عمق برش هر دو سنگ اختلاف زیادی با سرعتهای ۱۹۰۰ متر بر ثانیه، عمق برش او یویی نیرا در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه ذرات انرژی خیلی زیادی دارند و از سویی انرژی جنبشی با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد که همین امر باعث می شود در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه انرژی ذرات بسیار بالا رفته و عمق برش سریماً افزایش یابد.

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



شکل ۸. اثر زمان توقف روی عمق برش سیلتاستون 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 سیلتاستون 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)

خورده افزایش مییابد. اختلاف بین حجم برش بیشترین و کمترین سرعت در زمان ۰/۲ میلی ثانیه برای سیلت استون ۴۶۰ و برای شیل ۳۹۷ میلی متر مکعب است و این اختلاف در زمان ۱ میلی ثانیه به ترتیب برابر ۳۷۳۰ و ۳۰۰۰ میلی متر مکعب است. بنابراین شیب منحنی حجم برش با افزایش زمان توقف زیاد می شود. همانند اثر زمان توقف بر روی عمق برش، در سرعت ۱۹۰ متر بر ثانیه و زمان توقف نهایی ۱ میلی ثانیه، حجم برش خورده اختلاف زیادی با سرعت های یایین تر دارد.

بنابراین با افزایش زمان توقف، عمق و حجم برش افزایش مییابد. با 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 بی بعد 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 شبیه سازی سرعت افقی برای جت تعریف نشده است.

می توان اینگونه استنباط کرد که با کاهش سرعت عبور، یعنی زمان توقف بیشتر، عمق و حجم برش زیاد می شود. به طور مشابه مومبر و کواکویچ [1۵] 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 غلظت ذرات ساینده روی عمق برش کاهش مییابد. در شکل ۱۳ اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی عمق برش کاهش مییابد. در شکل ۱۳ اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی عمق برش کاهش مییابد. در شکل ۱۳ اثر تغییر نمودار با افزایش غلظت ذرات تا ۳ درصد، عمق برش زیاد شده و بعد از آن غییر غلظت ذرات ساینده روی مق برش کاهش مییابد. در شکل ۱۳ اثر تغییر با افزایش غلظت ذرات تا ۳ درصد، عمق برش زیاد شده و بعد از آن تغییر



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 میلی ثانیه)

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)

می توان یک غلظت مطلوب فرض کرد. چرا که عمق و حجم برش اختلاف چندانی با عمق و حجم برش غلظت ۴ درصدی ندارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که یک غلظت یا دبی بهینه برای ذرات ساینده وجود دارد که طبق نتایج این تحقیق برای سیلت استون و شیل می توان 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 می شود، اما طول عمر نازل و سر برشی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. همچنین استفاده از ذراتی با غلظت کمتر از ۵ با افزایش غلظت حجمی ذرات تا ۲/۵ درصد، عمق و حجم برش بی بعد زیاد شده و بعد از آن کاهش می یابد.

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 میلی متر و برای شیل برابر ۵/۴ میلی متر است؛ در نتیجه با افزایش دبی ذرات ساینده، شیب افزایش عمق برش ملایم تر خواهد شد.

اثر تغییر غلظت ذرات ساینده روی حجم برش سیلتاستون در شکل ۱۹ 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 چشم گیری 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)





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

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)





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)



(در ستون ثابت فرض شده برای ذرات آب) کاهش می یابد. با توجه به شکلهای ۱۶ و ۱۸ شیب نمودار عمق و حجم برش از ۰/۵ تا ۱/۲۵ میلی متر برای سیلتاستون، سریعاً زیاد شده و سپس ثابت می شود. 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 المان های 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 می شود. 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 نمی توانند باعث افزایش عمق و حجم برش سنگ شوند. باید در نظر داشت برای افزایش قطر ذرات نیز محدویتهایی وجود دارد، از جمله قطر نازل، قطر لوله تمرکز و غیره. لذا می توان برای سیلت استون قطر ۱/۲۵ میلی متر 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 ۵/۰ میلیمتر با جرم کم، توان غلبه بر مقاومت بالای شیل را ندارند، به همین علت شیب نمودار عمق و حجم برش از ۵/۰ 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 ۶/۰ 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 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 میابد. این

# 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 اس پی اِچ –افای اِم در دو نمونه سنگ سیلت استون 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 می شود.

 با افزایش غلظت حجمی ذرات تا یک مقدار مشخص، عمق و حجم برش با شیب ملایم افزایش یافته و بعد از آن بهبود چشم گیری در افزایش عمق و حجم برش مشاهده نمی شود. با توجه به نتایج، برای سیلت استون و شیل این غلظت مشخص حدود ۳ درصد است.

هر چقدر قطر افزایش یابد، انرژی جنبشی ذرات بیشتر می شود و نهایتاً حجم و عمق برش هم زیاد خواهد شد. ولی این افزایش قطر محدود به قطر نازل و لوله تمرکز است. نتایج نشان می دهد با افزایش قطر ذرات تا یک قطر معین، عمق و حجم برش زیاد می شود ولی بعد از آن کاهش می یابد. به عبارت دیگر اثر افزایش جرم ذرات تا یک مقدار معین با تعداد کم تر، بر افزایش تعداد ذرات با جرم کم غالب است. این قطر معین برای سیلت استون در حدود ۱/۲۵ میلی متر و برای شیل در حدود ۱ میلی متر است.

در عمل با بهره گیری از نتایج شبیهسازی که در موارد فوق به آنها اشاره شد، می توان برش سنگ توسط جت آب ساینده را بهبود و ضایعات ناشی از فرآیند برش را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

المانها

# ۷- فهرست علائم

# علائم انگلیسی

پارامتر اسیب	$A^{\pm}$
پارامتر آسیب	$B^{\pm}$
قاطع منحنی <sub>p</sub>	С
سرعت انتشار موج تنش در	C <sub>w</sub>

تخريب شكننده d<sup>+</sup>

	زيرنويس	تخريب شكلپذير	$d^{-}$
مقدار متوسط	avg	مدول یانگ	E
موقعیت ذرہ اصلی	i	انرژی درونی به ازای واحد حجم	E
موقعيت ذره همسايه	j	نیروی تماس	F <sub>c</sub>
		مقدار تابع	f

س با

### منابع

- 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. Fourness, 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

n	طول هموار
l	كوچكترين اندازه المان
М	ماتریس جرم
m	جرم
NCNBR	تعداد کل گرهها یا ذراتی که در تما
	همسایگی ذرہ اصلی هستند

بردار نيروهاي خارجي

- تعداد کل ذرات در همسایگی نقطه اصلی n فشار P آستانه آسیب $r_0^{\pm}$ 
  - $u_s u_p$  شيب منحنى  $S_1$  $u_s - u_p$  شيب منحنى  $S_2$  $u_s - u_p$  شيب منحنى  $S_3$ 
    - موقعیت نقطه ثابت موقعیت نقطه متغیر

## علائم يونانى

 $f_{ext,t_n}$ 

چگالی	ρ
نُرم انرژی آسیب ندیده در فضای تنش مؤثر	$\overline{ au}^{\pm}$
ثابت معادله گرون آیزن	$\gamma_0$
نسبت پواسون	V
اصلاح حجم	α
گام زمانی	$\Delta t$
ويسكوزيته	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, andW. 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 Mehmannavaz, 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 steelparticle 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 ار جاع 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