

# مدل سازی اجزای محدود برش ماده فولادی با جت آب دارای ذرات برنده

مهدی تکفلی<sup>۱</sup> و عقیل یوسفی کما<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری مکانیک دانشگاه رابرسون - تورنتو، کانادا

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۴/۲۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۱۸، تاریخ تصویب ۸۸/۶/۱۷)

## چکیده

مدل سازی عددی روش‌های ماشین کاری در تحلیل پارامتری و بهینه سازی این روش‌ها سودمند هستند. در این مقاله با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی، مدلی عددی از فرایند برش یک ماده فولادی با استفاده از جت آب دارای ذرات برنده<sup>۱</sup> (AWJ) ارائه می‌شود. با استفاده از این مدل، اندرکنش جامد-جامد (اندرکنش بین ذره برنده و ماده هدف) و اندرکنش سیال-جامد (اندرکنش بین جت آب، ذره برنده و ماده هدف) مورد بررسی قرار می‌گیرد. از المان‌های اویلری برای مدل سازی جت آب و از المان‌های لاگرانژی برای مدل سازی ذره برنده و ماده هدف استفاده می‌شود. اندرکنش دینامیکی بین جت آب با ذره برنده و ماده هدف با استفاده از کوپلینگ اویلری-لاگرانژی تعریف می‌شود. همچنین برخورد ذره برنده کروی با ماده هدف با استفاده از الگوریتم‌های تماسی مدل سازی می‌شود. برای شبیه سازی سایش ماده هدف به واسطه برخورد، روش حذف المان بر اساس یک کرنش بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل حاضر، عمق برش برای فشارهای مختلف جت آب به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در فشارهای بالا، فرض کروی بودن ذره برنده در شبیه سازی AWJ نتایج بهتری را در مقایسه با فشارهای پایین ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جت آب دارای ذرات برنده، روش اجزای محدود، اندرکنش سیال و جامد، دینامیک ضربه

## مقدمه

ذرات برنده و سربرش<sup>۲</sup> که در آن جت آب از طریق نازل ایجاد می‌شود و ذرات برنده به واسطه اندرکنش با جت آب شتاب می‌گیرند<sup>۳</sup> سیستم کامپیوتری کنترل کننده برای حرکت سربرش<sup>۴</sup> می‌راکننده<sup>۳</sup> که انرژی باقیمانده در جت پس از عبور از ضخامت قطعه را می‌راند [۱].

ارائه مدل‌های تحلیلی و عددی از فرایندهای ماشین کاری از آن رو که به فهمی کامل و دقیق از مکانیزم‌های حاکم بر فرایند نیاز دارد، کاری مشکل و پیچیده است. اما این مدل‌ها می‌توانند در تحلیل پارامتری، پیش‌بینی عملکرد و بهینه سازی فرایند، مفید و سودمند باشند.

روش اجزای محدود، از جمله روش‌هایی است که می‌تواند در مدل سازی برش AWJ مورد استفاده قرار گیرد. آنچه موضوع AWJ را پیچیده می‌کند، تنوع مسائل و زمینه‌های تحقیقاتی موجود طی این فرایند است که برخی از آنها عبارتند از: اندرکنش ذرات برنده و جت آب، اندرکنش ذرات برنده و ماده هدف، اندرکنش ذرات برنده با همدیگر و اندرکنش جت آب و ماده هدف. تنوع مسائل موجود در برش AWJ ایجاب می‌کند که از نرم‌افزارهای

تنوع مواد مورد استفاده در صنعت با استحکام‌های مختلف و رفتارهای متفاوت در مقابل بارگذاری‌های دینامیکی و حرارتی، به توسعه روش‌های مختلفی برای ماشین کاری و شکل دهی مواد انجامیده است. در میان فناوری‌های ماشین کاری مدرن، فناوری جت آب، ویژگی‌های منحصر به فردی را همچون حذف اثرات حرارتی بر قطعه کار و تنوع کار بالا از نظر مواد قابل ماشین کاری دارد.

در صنعت ماشین کاری و برش، از دو نوع جت آب استفاده می‌شود: جت آب خالص (WJ) و جت آب همراه با ذرات برنده (AWJ). زمینه‌های کاربردی فناوری WJ شامل برش پلاستیک، کاغذ، پارچه، لاستیک، چرم، گوشت، چوب و مواد مشابه است. از AWJ برای برش ورق‌های فلزی از جنس تیتانیوم، آلومینیوم، انواع فولادها و... برش انواع شیشه، برش مواد کامپوزیتی، سرامیکی و مغناطیسی و برش مواد ساختمانی همچون بتن و سنگ استفاده می‌شود.

یک سیستم برش AWJ معمولی چهار بخش دارد: (۱) پمپ که آب با فشار بالا را فراهم می‌کند (۲) سیستم تزریق

AWJ به عنوان بارگذاری در مدل تعریف شده است [۴]. البته در تحلیل فرایند پوشش‌زدایی به کمک جت آب خالص، مدل‌های اجزای محدودی بر پایه قابلیت کوپلینگ اویلری-لاگرانژی توسعه پیدا کرده‌اند [۵-۷].

Hassan and Kosmol [۲] تحلیل اجزای محدودی از فرایند AWJ را ارائه داده‌اند. در مدل آنها ماده هدف به صورت یک ماده الاستیک-پلاستیک با قابلیت سخت شدن کرنشی خطی تعریف شده و ذره برنده نیز به صورت یک ماده الاستیک خطی مدل شده است. شکل ذره مکعب مستطیلی در نظر گرفته شده است. با تعریف المان‌های تماسی بین ذره و ماده هدف، برخورد بین این دو با استفاده از یک تحلیل غیرخطی در نرم‌افزار ALGOR شبیه‌سازی شده است. برای حرکت دادن ذره به جای تعریف سرعت ورودی، فشار سیال به صورت دینامیکی به مقطع بالای ذره وارد شده تا برخورد بین ذره و ماده هدف ایجاد شود. عمق برش پیش‌بینی‌شده در مدل اجزای محدود با عمق برش حاصل از آزمایش مقایسه شده است. Junkar et al. [۳] فرایند AWJ را از روش اجزای

محدود شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها حضور جت را در مدل در نظر نگرفته و فقط اثر برخورد یک تک ذره کروی شکل را روی ماده هدف با استفاده از نرم‌افزار ANSYS/LS-DYNA تحلیل کرده‌اند. در مدل اجزای محدود ارائه شده، رفتار الاستیک-پلاستیک ماده هدف که از جنس فولاد ضد زنگ است، با تعریف نقاطی از نمودار تنش-کرنش واقعی آن مدل شده است. اثر دو عامل، یکی سرعت برخورد ذره و دیگری زاویه برخورد در شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. معیار مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی کروییت حفره‌ای<sup>۱۱</sup> که به واسطه برخورد در سطح قطعه ایجاد می‌شود، انتخاب شده است.

Guo and Ramulu [۴] سوراخ‌کاری یک نمونه پلی-کربنات با AWJ را از طریق یک نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی کرده‌اند. برای ماده هدف، تنها رفتار الاستیک در نظر گرفته شده است. آنها بر اساس روشی معکوس و با کمک میدان جابه‌جایی به دست آمده از روش نوری موری<sup>۱۲</sup>، بارگذاری داخل سوراخ که از جت بر سطوح اعمال می‌شود را آنقدر تغییر داده‌اند تا میدان جابه‌جایی شبیه‌سازی با آزمایش تطابق پیدا کند. در مدل سه‌بعدی اولیه یک سوراخ با پروفیل هاپریولیک ایجاد شده است.

اجزای محدودی استفاده شود که قابلیت حل همزمان مسائلی چون اندرکنش دینامیکی جامد-جامد و سیال-جامد را دارد. LS-DYNA از جمله این نرم‌افزارها است که در حل بسیاری از مسائل پیچیده دینامیکی و شبه-استاتیکی کاربرد دارد. این نرم‌افزار این ویژگی‌ها را دارد:

۱. از الگوریتم‌های انتگرال‌گیری زمانی صریح<sup>۴</sup> استفاده می‌کند. در انتگرال‌گیری صریح، بر خلاف روش انتگرال‌گیری ضمنی<sup>۵</sup> برای محاسبه شتاب در هر گام زمانی به استفاده از روش‌های عددی تکرارشونده<sup>۶</sup> نیازی نیست. در نتیجه حجم محاسبات کاهش می‌یابد و مشکلاتی همچون نبود همگرایی جواب‌ها به وجود نمی‌آید. به واسطه این ویژگی‌ها، انتگرال‌گیری صریح در حل مسائل دینامیکی و غیرخطی کاربرد گسترده‌ای دارد.

۲. دارای مدل‌های متنوعی از مواد است که از آنها می‌توان برای تعریف مواد مختلفی همچون فلزات، پلیمرها، بتن، مواد منفجره، سیالات و غیره استفاده کرد.

۳. دارای فرمولاسیون‌های متنوعی برای المان‌ها است. در کنار فرمولاسیون لاگرانژی<sup>۷</sup> که بقیه نرم‌افزارهای اجزای محدود برای تحلیل سازه‌ها از آن استفاده می‌کنند. دو فرمولاسیون اویلری<sup>۸</sup> و ALE<sup>۹</sup> نیز در این نرم‌افزار وجود دارد. با استفاده از این فرمولاسیون‌ها می‌توان از محدودیت‌های مدل‌های لاگرانژی در حل مسائلی که تغییر شکل‌های بزرگ در آنها روی می‌دهد رهایی یافت. همچنین از المان‌های اویلری و ALE می‌توان برای مدل‌سازی سیالات استفاده کرد.

۴. امکان متصل کردن مش لاگرانژی (سازه) را به مش اویلری (سیال) فراهم می‌کند. با استفاده از این قابلیت، می‌توان مسائل اندرکنش جامد و سیال<sup>۱۰</sup> (FSI) را شبیه‌سازی کرد.

۵. بر پایه فرمولاسیون، اجزای محدود غیرخطی عمل می‌کند. در نتیجه از آن می‌توان برای مدل‌سازی مسائلی با جابه‌جایی‌ها یا کرنش‌های بزرگ استفاده کرد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در همه شبیه‌سازی‌هایی که از برش AWJ با استفاده از روش اجزای محدود انجام گرفته است، یا فقط برخورد ذره برنده با هدف مدل‌سازی شده [۲ و ۳] و یا فقط فشار حاصل از

ذرات برنده با مش شماره ۸۰، حدود  $190 \mu\text{m}$  است. ۳. از خرد شدن ذرات طی مرحله شتاب‌گیری صرف‌نظر شده است.

۴. شکل ذره، کروی در نظر گرفته شده است. هر چند شکل واقعی ذره از کروی بودن انحراف دارد، اما بررسی‌ها در [۳] نشان می‌دهد که خرد شدن ذرات طی مرحله شتاب‌گیری باعث افزایش کرویت ذرات می‌شود.

۵. سرعت جت به شکل یکنواخت بر سطح مقطع آن تعریف شده و از شکل واقعی پروفیل سرعت جت هنگام خروج از نازل صرف‌نظر شده است.

۶. سرعت جت از رابطه زیر که با نوشتن قانون برنولی برای ورودی و خروجی نازل و در نظر گرفتن افت فشار در نازل به دست می‌آید، محاسبه می‌شود [۸]:

$$v_J = 40.24 p^{1/2} \quad (1)$$

در این رابطه  $v_J$ ، سرعت جت، بر حسب  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  و  $p$ ، فشار جت قبل از ورود به نازل، بر حسب MPa است.

۷. سرعتی که ذره در اثر اندرکنش با جت آب می‌گیرد، از این رابطه محاسبه می‌شود [۸]:

$$v_A = 0.7 \cdot \frac{v_J}{1 + (\dot{m}_A / \dot{m}_W)} \quad (2)$$

که  $\dot{m}_W$  و  $\dot{m}_A$  به ترتیب دبی جرمی ذرات و آب است.

۸. فرض می‌شود جت آب پس از ورود به هوا تا مرحله رسیدن به ماده هدف در ناحیه هسته جت قرار دارد و هنوز جت آب وارد مرحله‌ای که در آن شکل‌گیری قطره‌های آب و حباب‌های هوا حاکم است، نشده است. در ناحیه هسته جت، خواص جریان مانند فشار سکون در راستای محور جت ثابت است. طول ناحیه هسته یک جت آب،  $x_c$ ، به طور میانگین از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{x_c}{d_N} = 100 \quad (3)$$

که  $d_N$  قطر جت است. با توجه به فاصله سربرش تا ماده هدف در آزمایش [۲] ( $0.1 \text{ mm}$ ) و قطر جت ( $0.3 \text{ mm}$ )، فرض در نظر گرفته در مورد جت صحیح است.

فشار اعمالی از راه جت به صورت سه مؤلفه در داخل این سوراخ وارد شده است: (۱) فشار جت اعمالی بر ناحیه پایینی سوراخ، (۲) برش ناشی از جریان برگشتی، (۳) فشار نرمال اعمالی بر سطح سوراخ. با تغییر مقادیر این مؤلفه‌های فشار، بارگذاری بهینه حاصل شده است.

همان گونه که مشاهده شد، در هیچ یک از مدل‌های ارائه شده برای AWJ اثر همزمان جت آب و ذرات برنده روی ماده هدف در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این جریان، جت آب ایجاد شده روی سطح ماده هدف، می‌تواند بر چگونگی برخورد ذرات برنده با ماده تأثیر قابل توجهی بگذارد. بنابراین لازم است مدلی برای AWJ توسعه یابد تا بتواند اثر همزمان این فرایندها را در نظر بگیرد.

در این مقاله مدلی از برش AWJ با ترکیب دو موضوع اندرکنش جامد-جامد و اندرکنش سیال-جامد توسعه یافته است. توانایی مدل اجزای محدود ایجاد شده در پیش‌بینی میزان تغییرات عمق برش با فشار جت بررسی شده است. نتایج عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

## تحلیل عددی

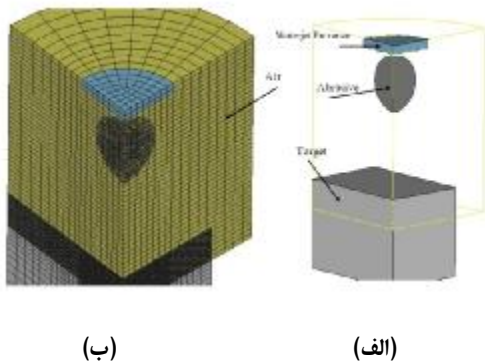
در این بخش، برخورد یک ذره کروی در داخل یک جت آب با یک ماده هدف فولادی تحلیل می‌شود. مدل ارائه شده، تبیینی از فرایند برش AWJ را ارائه می‌دهد.

## الف- فرضیه‌ها

در انجام مدل‌سازی و تحلیل، فرضیه‌های زیر مدنظر بوده است:

۱. در تحلیل حاضر تنها حضور یک ذره برنده در جریان جت آب در نظر گرفته شده است. با توجه به سرعت بالای عبور نازل از روی سطح (حدود  $12 \text{ m/min}$  در کاربردهای عملی از AWJ سرعت عبوری حدود  $0.5 \text{ m/min}$  انتخاب می‌شود) در آزمایشی [۲] که نتایج آن برای تأیید اعتبار کردن مدل اجزای محدود استفاده شده است، فقط تعداد بسیار معدودی از ذرات روی یک ناحیه از سطح هدف برخورد می‌کنند و باعث سایش می‌شوند، بنابراین مدل تک‌ذره می‌تواند در تحلیل حاضر قابل قبول باشد.

۲. اندازه ذره بر اساس شماره مش<sup>۱۳</sup> ذرات برنده مورد استفاده در آزمایش [۲] تعیین شده است. قطر متوسط



شکل ۱: الف- مدل هندسی ب- مدل مش بندی شده.

### ج - مدل های مواد

#### الف- ذره برنده

ذره برنده از جنس گارنت است. گارنت از جمله مواد پرکاربرد در AWJ است که از بستر رودخانه ها به دست می آید. خواص مکانیکی گارنت [۲] در جدول (۱) آمده است. برای ذره تنها رفتار الاستیک تعریف شده است.

جدول ۱: خواص ذره برنده از جنس گارنت.

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elasticity Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
4000	248	0.27

#### ب- ماده هدف

ماده هدف از جنس فولاد نرم است. با استفاده از مدل ماده شماره ۳ یعنی MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC رفتار الاستیک- پلاستیک فولاد تعریف می شود. با استفاده از این مدل، می توان رفتار ماده را به صورت یک منحنی دوخطی با دو شیب  $E$  و  $E_t$  تعریف کرد. برای در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش روی تنش تسلیم ماده از مدل Cowper-Symonds استفاده می شود. در این مدل، تنش تسلیم از راه رابطه زیر به نرخ کرنش وابسته می شود [۸]:

$$\sigma = \sigma_0 \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{c} \right)^n \right) \quad (4)$$

که  $\sigma_0$  تنش تسلیم استاتیکی ماده،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش و  $c$  و  $n$  عوامل این مدل هستند.

یکی از قابلیت هایی که در نرم افزار LS-DYNA تعریف شده است، امکان حذف المان<sup>۱۶</sup> در حین حل مسئله است. این قابلیت، حل برخی مسائل با تغییر شکل-

۹. در تحلیل حاضر، فقط برش زمانی کوتاهی از اندرکنش ذره برنده و جت آب شبیه سازی شده است و کل فرایند شتاب گیری ذرات پس از تزریق در محفظه اختلاط، مورد توجه قرار نگرفته است. برای تحلیل کل فرایند شتاب گیری لازم است محفظه اختلاط و لوله متمرکزکننده<sup>۱۴</sup> نیز در مدل وارد شوند. در اینجا، شده است که در ابتدای تحلیل، ذره به سرعتی نزدیک به سرعت محاسبه شده از رابطه (۲) رسیده است و در این لحظه جتی با سرعت محاسبه شده از رابطه (۱) با آن برخورد می کند.

### ب - فرمولاسیون های المانی

در مدل سازی مسائل مربوط به دینامیک سیالات یا مکانیک جامدات غیرخطی، یکی از مهم ترین موضوع ها، انتخاب توصیف سینماتیکی<sup>۱۵</sup> مناسب برای محیط پیوسته است. منظور از توصیف سینماتیکی، تعیین رابطه بین محیط تغییر شکل دهنده با شبکه یا مش است. در تحلیل حاضر از دو نوع فرمولاسیون لاگرانژی و اویلری استفاده شده است.

در فرمولاسیون لاگرانژی هر گره از شبکه، ذره مادی را دنبال می کند. توصیف لاگرانژی، امکان ردیابی ساده تداخل و اندرکنش مواد مختلف را فراهم می کند. ضعف این مدل به ناتوانی شبکه در دنبال کردن تغییر شکل های زیاد در ماده مربوط می شود.

در فرمولاسیون اویلری که بیشتر در دینامیک سیالات به کار می رود، مش ثابت است و محیط، پیوسته نسبت به شبکه حرکت می کند. از این رو تغییر شکل های بزرگ در ماده بر ساختار مش تأثیر نمی گذارد.

در شکل (۱) مدل هندسی در کنار مدل مش- بندی شده نشان داده شده است. به دلیل تقارن، تنها یک چهارم از مسئله مدل سازی شده است. این مدل، ورودی جت آب، هوا، ذره برنده و ماده هدف را شامل می شود. قطر جت  $300 \mu\text{m}$  است. با تعریف یک منبع ورودی برای آب، امکان تزریق پایدار جت در طول تحلیل فراهم می شود. ماده هدف و ذره برنده با المان های لاگرانژی مش بندی شده اند. از المان های اویلری برای مدل سازی آب استفاده شده است. کل فضایی که احتمال حضور جریان جت در آنجا وجود دارد، با المان های اویلری هوا پوشانده شده اند.

مدل‌ها، مؤلفه فشاری تنش کل، تنها بر اساس کرنش حجمی محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، برای ماده الاستیک،  $p = Ke$ ، که  $K$  مدول حجمی و  $e = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  است که  $\rho$  و  $\rho_0$  به ترتیب چگالی لحظه‌ای و اولیه ماده هستند. مدل‌های ماده‌ای که به EOS نیاز دارند (مانند MAT\_NULL)، تنها مؤلفه انحرافی تنش را محاسبه می‌کنند، در حالی که EOS مؤلفه فشاری را تعیین می‌کند.

۳. در صورتی که ویسکوزیته برای ماده تعریف شود، تنش‌های انحرافی لزج محاسبه می‌شوند:

$$\sigma'_{ij} = \mu \dot{\epsilon}'_{ij} \quad (5)$$

که  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی و  $\dot{\epsilon}'_{ij}$  نرخ کرنش انحرافی است.

۴. در حالت کلی، تنش‌های المان برای این نوع ماده به این شکل بیان می‌شود:

$$\sigma = 2\mu D - PI \quad (6)$$

که  $\sigma$ ،  $D$ ،  $P$ ،  $I$  و  $\mu$  به ترتیب تانسور تنش، تانسور نرخ تغییر شکل، ویسکوزیته دینامیکی، فشار و ماتریس واحد است.

معادله حالت، رابطه بین فشار و چگالی و انرژی داخلی ماده را می‌دهد. اگر از معادله حالت چندجمله‌ای (EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL) استفاده شود داریم [۱۱]:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (7)$$

که  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  و  $E$  انرژی داخلی ماده است.

برای رسیدن به یک رفتار حجمی ساده با استفاده از معادله حالت چندجمله‌ای خطی، باید  $C_1$  را برابر مدول بالک و بقیه ضرایب را برابر صفر قرار داد. استفاده از این مدل در نرخ کرنش‌های پایین و متوسط مناسب است. مقادیر در نظر گرفته شده برای تعریف رفتار آب در مدل نول و معادله حالت، به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است.

برای تعریف هوا از معادله حالتی با ضرایب زیر بهره می‌بریم:

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0 \\ C_4 = C_5 = \gamma - I \quad (8)$$

های بزرگ را از راه فرمولاسیون لاگرانژی فراهم می‌کند و مشکل منفی شدن حجم المان که در حل این گونه مسائل بروز می‌یابد را از بین می‌برد. مبنای استفاده از این روش آن است که المان‌هایی که به میزان شدیدی تغییر شکل داده باشند، اغلب واماندگی و ضعیف شدن ماده را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که در آن ناحیه، ماده توانایی حمل بار اندکی دارد. تداوم حضور این المان‌ها در مدل سبب می‌شود که گام‌های زمانی، خیلی کوچک شوند و هزینه‌های تحلیل را بالا ببرند [۹]. بنابراین بسیاری از مدل‌های ماده در نرم‌افزار، معیارهای واماندگی دارند که بر اساس آنها المان‌ها از مدل حذف می‌شوند. یکی از معیارهای حذف المان، بر اساس یک کرنش پلاستیک بحرانی تعریف می‌شود.

مقادیر وارد شده در مدل ماده برای قطعه هدف در جدول (۲) ارائه شده‌اند. این مقادیر بر اساس خواص به دست آمده از آزمایش کشش [۲] تعیین شده‌اند.

جدول ۲: خواص مکانیکی ماده هدف از جنس فولاد.

Density (RO) kg/m <sup>3</sup>	7850
Elasticity modulus (E) GPa	207
Poisson's ratio (PR)	0.3
Yield stress (SIGY) MPa	207
Tangent modulus (ETAN) MPa	1100
Hardening parameter (BETA)	0
Strain rate parameter (c)	40.4
Strain rate parameter (n)	5
Failure strain (FS)	0.65

### ج- سیالات (آب و هوا)

برای مدل‌سازی سیالات می‌توان از مدل ماده MAT\_NULL به همراه یک معادله حالت<sup>۱۷</sup> (EOS) استفاده کرد. ماده MAT\_NULL این ویژگی‌ها را دارد [۱۰]:

۱. این ماده هیچ‌گونه استحکام تسلیمی ندارد؛ پس همانند سیال عمل می‌کند و ویژگی آنها را که نبود مقاومت در مقابل برش است، دارد.

۲. تنش کلی که در یک سازه ایجاد می‌شود، مجموع تنش انحرافی و تنش هیدرواستاتیکی (فشار) است. مدل‌های ماده‌ای که از EOS استفاده نمی‌کنند، به طور مستقیم تنش کل را محاسبه می‌کنند. در این

یکی از روش‌های محاسبه سختی فنر در نرم‌افزار، روش پنالتی است. در این روش، سختی فنرها بر اساس خواص موادی که با هم تماس پیدا می‌کنند تعیین می‌شود. در هر گام زمانی، بر اساس میزان نفوذ نوده‌های برده در داخل المان‌های ارباب و سختی فنرهای تماسی، نیروی تماسی محاسبه می‌شود. از طریق ضریب پنالتی، می‌توان سختی تماسی که توسط نرم‌افزار به صورت اتوماتیک محاسبه می‌شود را کنترل کرد.

در تحلیل حاضر از راه دستور

CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID

کوپلینگ بین مجموعه حجم‌های لاگرانژی یعنی هدف و ذره با حجم‌های اویلری یعنی آب و هوا برقرار می‌شود.

ضریب پنالتی برابر ۰.۰۱ تعریف شده است. با بررسی تغییرات انرژی کل سیستم در طول زمان حل مسئله، اطمینان حاصل می‌شود که انرژی غیرفیزیکی که به واسطه روش پنالتی به سیستم اضافه می‌شود، در مقایسه با انرژی کرنشی قابل اغماض است.

هـ - تماس بین ذره با قطعه هدف

با استفاده از دستور

CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURF

ACE تماس بین ذره با ماده هدف تعریف می‌شود. از طریق این دستور این امکان فراهم می‌شود که در صورت حذف المان‌ها، سطوح تماس تجدید شوند.

که  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$  (نسبت گرماهای ویژه) است. در نهایت معادله حالت، به صورت زیر در می‌آید که مشابه رفتار گاز کامل است:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (9)$$

مقادیر واردشده در مدل نول و معادله حالت برای هوا به ترتیب در جداول (۳) و (۴) آمده‌اند.

د- کوپلینگ اویلری-لاگرانژی

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های نرم‌افزار LS-DYNA که در تحلیل حاضر برای مدل‌سازی فرایند AWJ مورد استفاده قرار گرفته است، امکان اتصال مش لاگرانژی سازه به مش اویلری سیال در یک مدل واحد است. برای جلوگیری از نفوذ سازه و سیال در همدیگر، مش لاگرانژی باید ریزتر از مش سیال انتخاب شود.

در مسائل تماسی، دو سطح یکی ارباب<sup>۱۸</sup> و دیگری برده<sup>۱۹</sup> تعریف می‌شوند. در تماس لاگرانژی-اویلری، المان‌های سیال به عنوان ارباب و المان‌های جسم جامد به عنوان برده تعریف می‌شوند. هر الگوریتم تماس پس از تشخیص وجود تماس بین دو قطعه، باید به گونه‌ای مانع نفوذ اجسام در همدیگر شود. در الگوریتم تماس لاگرانژی-اویلری این کار با قرار دادن فنرهای خطی بین گره‌های برده و قطعه ارباب انجام می‌گیرد. سختی فنرها نیرویی را که به گره‌های برده و ارباب وارد می‌شود، تعیین می‌کند.

جدول ۳: خواص آب و هوا در مدل نول.

Fluid	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Cut-off pressure (Pa)	Dynamic viscosity (Pa.s)
Water	1000	-10 <sup>5</sup>	10 <sup>-3</sup>
Air	1.29	-10	10 <sup>-5</sup> × 1.67

جدول ۴: ثابت‌های معادله حالت چندجمله‌ای خطی برای آب و هوا.

	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	E <sub>0</sub>
Water	0	10 <sup>9</sup> × 2.2	0	0	0	0	0	0
Air	0	0	0	0	0.4	0.4	0	10 <sup>6</sup> × 0.25

## و - گام زمانی

برای پایدار ماندن روش انتگرال‌گیری صریح که در LS-DYNA مورد استفاده قرار می‌گیرد، گام زمانی باید از یک مقدار بحرانی کوچک‌تر انتخاب شود. علاوه بر این، به این دلیل که در روش انتگرال‌گیری صریح فرض می‌شود که شتاب در هر فاصله زمانی ثابت باقی می‌ماند، لازم است اندازه گام زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا این فرض خطای محاسبات را افزایش ندهد. مقدار گام زمانی به صورت اتوماتیک توسط نرم‌افزار بر اساس خواص مواد و اندازه المان‌ها محاسبه می‌شود. تغییر عوامل الگوریتم تماس نیز بر مقدار این گام زمانی تأثیر می‌گذارد. در مسئله حاضر گام زمانی برابر  $6 \times 10^{-8}$  محاسبه شده است.

## ز - سرعت اولیه

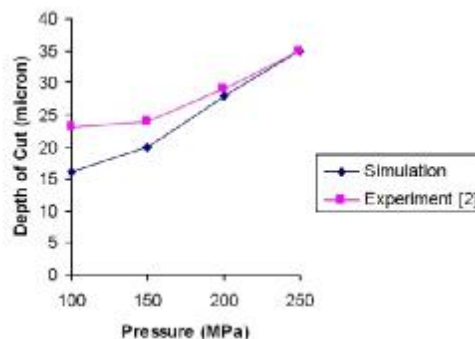
مقادیر سرعت اولیه تعریف شده برای جت آب و ذره برنده بر اساس فشارهای مختلف آزمایش در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

جدول ۵: مقادیر سرعت اولیه جت و ذره برنده در فشارهای مختلف.

Pressure (MPa)	Jet Velocity (m/s)	Particle Velocity (m/s)
100	403	276
150	493	338
200	570	392
250	636	438

## نتایج

در شکل (۲) روند تغییر عمق برش با فشار جت آب نشان داده شده است. نتایج آزمایشگاهی [۲] نیز در کنار نتایج عددی رسم شده است.



شکل ۲: تغییرات عمق برش بر حسب فشار جت آب.

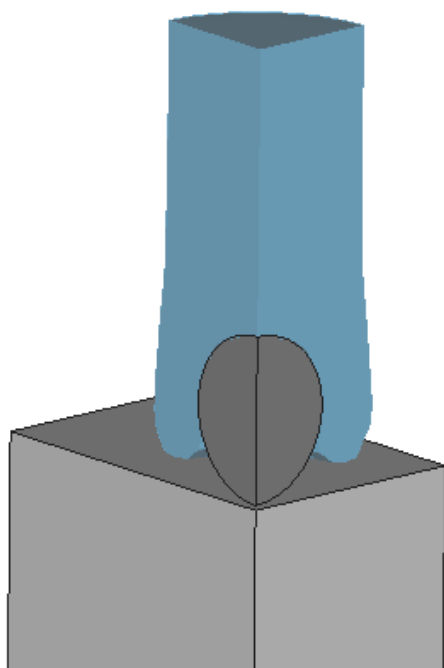
با افزایش فشار جت، عمق برش ایجاد شده در ماده هدف بیشتر می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل عددی به خوبی توانسته است روند تغییرات عمق برش را پیش-بینی کند. در فشارهای بالاتر درستی پیش‌بینی‌های مدل عددی ارائه شده، افزایش می‌یابد و نزدیکی بیشتری بین نتایج عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود. در تبیین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی این نکات قابل طرح است:

۱. برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی بر تنش تسلیم از مدل کوپر-سیموندز استفاده شده است؛ می‌توان این احتمال را داد که در محدوده فشارها و سرعت‌های پایین، مدل کوپر-سیموندز، تنش تسلیم ماده را به میزان بیشتری از رفتار واقعی آن در محدوده نرخ کرنش مورد نظر افزایش می‌دهد و در نتیجه ماده را در مقابل تغییر شکل پلاستیک، مقاوم‌تر می‌کند.

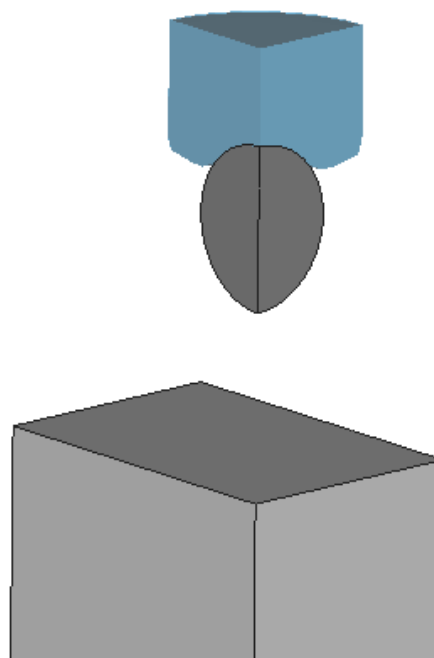
۲. از نتایج آزمایشگاهی در [۳] نتیجه می‌شود که هر چه فشار جت آب افزایش می‌یابد، کرویت حفره‌ای که در اثر برخورد AWJ با سطح ماده ایجاد می‌شود، بیشتر می‌شود. یعنی در فشارهای بالا شبیه‌سازی فرایند بر اساس فرض برخورد ذره کروی، به واقعیت نزدیک‌تر است. بر همین اساس نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در فشارهای بالا به نتایج آزمایشگاهی، نزدیکی بیشتری دارد.

۳. مدل در نظر گرفته شده برای واماندگی ماده در حین برخورد، فقط بر اساس کرنش پلاستیک بحرانی تعریف شده است. برای رسیدن به یک شبیه‌سازی بهتر از رفتار سایشی ماده در حین برش AWJ، لازم است از مدل‌های واماندگی پیچیده‌تری استفاده شود.

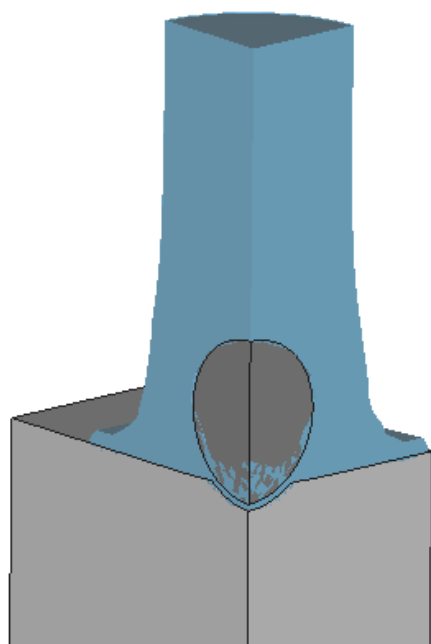
در شکل (۳) مراحل مختلف شبیه‌سازی برش AWJ نشان داده شده است. در این تصاویر اندرکنش بین جت آب، ذره برنده و ماده هدف در فشار ۲۰۰ MPa تا مرحله برگشت ذره پس از برخورد با قطعه، قابل مشاهده است. در مراحل اولیه برخورد جت با ذره برنده از راه انتخاب گام زمانی مناسب و ریزتر کردن مش لاگراژی در مقایسه با مش اوپلری، نفوذ سیال در داخل ذره کنترل شده است. در مراحل پایانی برخورد، مقداری از سیال در داخل ذره نفوذ می‌کند که نشان می‌دهد کوپلینگ اوپلری-لاگراژی نتوانسته به خوبی بین ذره و جت آب برقرار بماند.



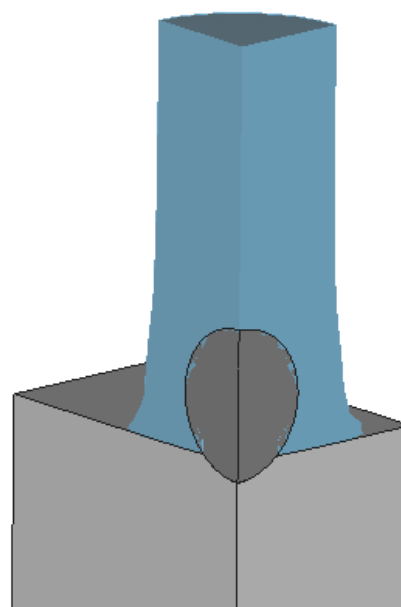
(ب)



(الف)



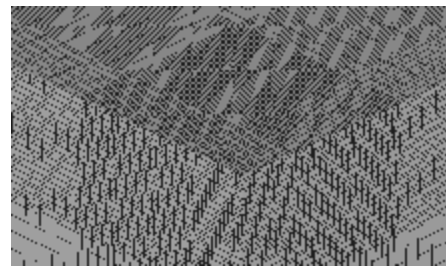
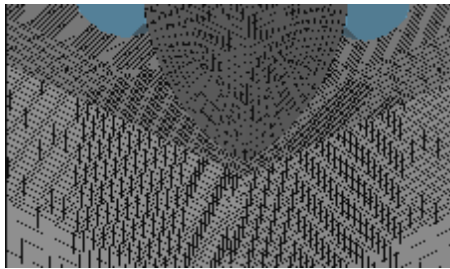
(د)



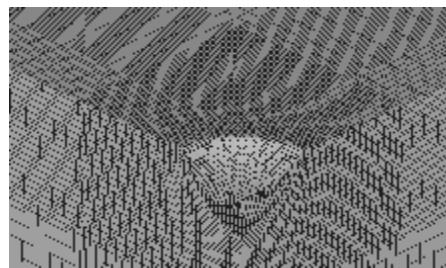
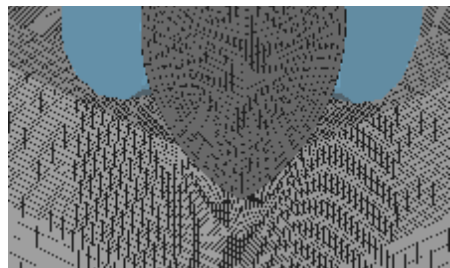
(ج)

شکل ۳: مراحل مختلف اندرکنش جت آب، ذره برنده و ماده هدف.

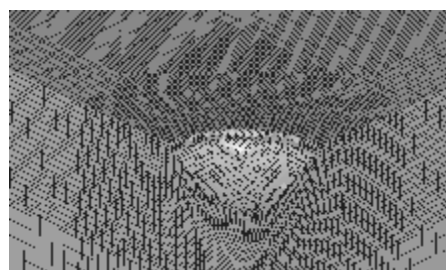




(الف)



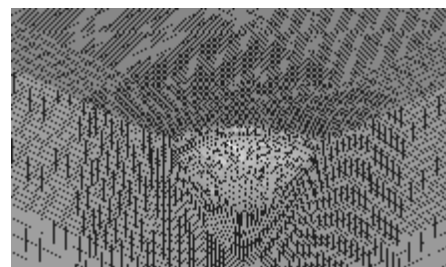
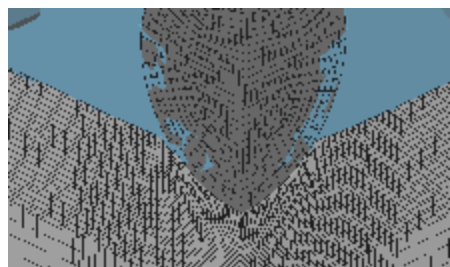
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۴: مراحل مختلف سایش ماده هدف در اثر برخورد ذره برنده.

سازگاری دارد. با توجه به اینکه تغییر شکل در ماده تنها در محدوده کوچکی از آن ایجاد شده است، یکی از مزیت‌های روش AWJ که موضعی بودن تغییرشکل‌ها است، قابل مشاهده است.

### نتیجه‌گیری

۱. بر اساس تحلیل انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش ارائه‌شده توانایی شبیه‌سازی فرایند AWJ را دارد. با توجه به اینکه حل مسئله اندرکنش سیال و جامد تا کنون محدود به بررسی برش WJ بوده است، بر اساس تحلیل انجام‌شده در این مقاله، می‌توان نتیجه گرفت که این روش قادر به شبیه‌سازی فرایند AWJ نیز هست.
۲. خواص دینامیکی ماده هدف، شکل ذرات، سرعت ذرات و سرعت جت از جمله عواملی هستند که باعث ایجاد خطا در تحلیل عددی می‌شوند.
۳. روند تغییرات عمق برش پیش‌بینی شده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.
۴. در فشارهای بالا فرض کروی بودن ذره برنده در شبیه‌سازی AWJ نتایج بهتری را در مقایسه با فشارهای پایین می‌دهد.

برای جلوگیری از نفوذ سیال در سازه، پس از برخورد ذره و جت با سطح ماده هدف، لازم است بررسی‌های بیشتری روی عوامل الگوریتم کوپلینگ یا چگالی مش‌بندی ذره انجام گیرد.

در شکل (۴) تغییر شکل و سایش ماده هدف هنگام برخورد ذره برنده و جت آب در فشار ۲۰۰ MPa نشان داده شده است. هنگامی که ذره برنده به سطح هدف برخورد می‌کند، انرژی جنبشی آن به ماده هدف انتقال می‌یابد و صرف تغییر شکل پلاستیک و ایجاد امواج تنش می‌شود. البته بخشی از انرژی نیز باعث تغییر شکل الاستیک ذره می‌شود. در مراحل اولیه برخورد تنها تغییر شکل‌های پلاستیک در قطعه ایجاد می‌شود. با رسیدن کرنش پلاستیک در المان‌ها به مقدار بحرانی مرحله حذف المان آغاز می‌شود و عمق برش افزایش می‌یابد. در فشارهای ۱۰۰ MPa و ۱۵۰ MPa، کرنش‌های پلاستیک به حد بحرانی نمی‌رسند و در نتیجه در مراحل مختلف برخورد، هیچ المانی از مدل حذف نمی‌شود و تنها تغییر شکلی دائمی در سطح ماده ایجاد می‌شود (مشابه شکل ۴ب). با توجه به اشکال نشان‌داده‌شده در شکل ۴، عمق برش در مرکز برخورد بیشترین مقدار خود را دارد. شکل حفره ایجادشده در ماده هدف، به واسطه برخورد با شکل ذره

### مراجع

- 1 - Kulekci, M. K. (2002). "Process and apparatus developments in industrial waterjet applications." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 12, PP. 1297-1306.
- 2 - Hassan, A. I. and Kosmol, J. (2001). "Dynamic elastic-plastic analysis of 3D deformation in abrasive waterjet machining." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, PP. 337-341.
- 3 - Junkar, M., Jurisevic, B., Fajdiga M. and Grah, M. (2006). "Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, PP. 1095-1112.
- 4 - Guo, Z. and Ramulu, M. (2001). "Investigation of displacement fields in an abrasive waterjet drilling process: part 2. numerical analysis." *Experimental Mechanics*, Vol. 41, No. 4, PP. 388-402.
- 5 - Mabrouki, T., Raissi, K. and Cornier, A. (2000). "Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterJet and targets: contribution to investigate the decoating process." *Wear*, Vol. 239, No. 2, PP. 260-273.
- 6 - Mabrouk, T., Raissi, K. (2002). "Striping process modeling: interaction between a moving waterjet and coated target." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 11, PP. 1247-1258.
- 7 - Mainiadaki, K., Kestis, T., Bilalis, N. and Antoniadis, A. (2007). "A finite element-based model for pure waterjet process simulation." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 9-10, PP. 933-940.
- 8 - Momber, A. W. (2003). *Hydroblasting and coating of steel structures*, Elsevier, UK.

- 
- 9 - Lin, J. I. (1999). *DYNA3D: User Manual*, Livermore Software.
- 10 - Hanssen, A.G., Girard, Y., Olovsson, L., Berstad, T. and Langseth, M. (2006). "A numerical model for bird strike of aluminum foam-based sandwich panels." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, PP. 1127-1144.
- 11 - *LS-DYNA Keyword User's Manual (2001)*, Vol. I. Livermore Software, California.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 
- 1- Abrasive Water jet Cutting
  - 2 - Cutting Head
  - 3 - Catcher
  - 4 - Explicit
  - 5 - Implicit
  - 6 - Iterative
  - 7 - Lagrangian Formulation
  - 8 - Eulerian
  - 9 - Arbitrary Lagrangian Eulerian
  - 10 - Fluid-Structure Interaction
  - 9 - Crater Sphericity
  - 12 - Moiré
  - 13 - Mesh#
  - 14 - Focusing Tube
  - 15 - Kinematical Description
  - 16 - Element Deletion or Element Erosion
  - 17 - Equation of State
  - 18 - Master
  - 19 - Slave