

## تحلیل عددی انفجار و تشکیل جت در خرج گود

علی علوی نیا\*، حسین احمدی کیا و اصغر حجتی

همدان - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی مکانیک

### چکیده

در این مقاله ضمن معرفی خرج گود و توضیح اجمالی روش های تحلیل آن، فرایند های انفجار، فروپاشی لاینر و تشکیل جت با استفاده از نرم افزار LSDYNA960 شبیه سازی گردیده است. پس از اطمینان از صحت فرایند شبیه سازی و نتایج حاصل از آن، تاثیر عوامل مختلف بر روی ویژگی های جت خرج گود مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، با کاهش زاویه راس لاینر و افزایش سرعت انفجار خرج، سرعت جت خرج گود افزایش می یابد. همچنین، کاهش ضخامت لاینر در بخش های نزدیک به راس منجر به افزایش سرعت جت می گردد. وجود یک پوسته مناسب در خرج گود نیز موجب افزایش سرعت جت به میزان تقریبی ده درصد خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی ها انطباق خوبی را با نتایج تحلیلی و نیز نتایج ارائه شده در یکی از مراجع نشان می دهد.

واژه های کلیدی: خرج گود، انفجار، لاینر، شبیه سازی، LSDYNA

### ۱. مقدمه

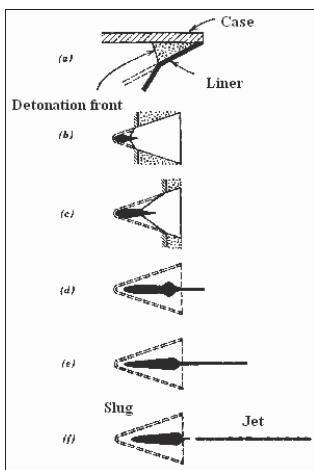
یک استوانه از ماده منفجره با یک حفره خالی در یک انتها و یک چاشنی در انتهای دیگر آن خرج گود نامیده می شود. حفره خالی، که می تواند اشکال هندسی مختلفی از جمله نیمکره یا مخروط داشته باشد، باعث می شود که انرژی ناشی از انفجار بر روی محور تمرکز یابد. این تمرکز می تواند فشارهای بسیار بزرگی در بخش توخالی خرج ایجاد نماید و چنانچه یک بلوک فلزی در مقابل حفره و در معرض این فشار متمرکز قرار گیرد، تا عمق قابل توجهی سوراخ می شود. سوراخ ایجاد شده به وسیله یک خرج حفره دار از خرج بدون حفره ای که جرم بیشتری هم دارد، عمیق تر است. چنانچه سطح این حفره

توسط یک آستر فلزی (به نام لاینر<sup>۱</sup>) پوشانیده شود، در اثر انفجار خرج و فروپاشی لاینر، جریانی از فلز به نام جت تشکیل می شود که با سرعت بسیار زیادی (چند کیلومتر بر ثانیه)، حرکت می کند و می تواند در هر مانعی نفوذ نماید. بخشی از مواد لاینر پس از فروپاشی با سرعت کمتری و به دنبال جت حرکت می نماید که به آن اسلاگ<sup>۲</sup> می گویند. قرار گرفتن هدف در فاصله مشخصی از خرج گود (به نام فاصله توقف) موجب افزایش نفوذ می گردد (شکل ۱).

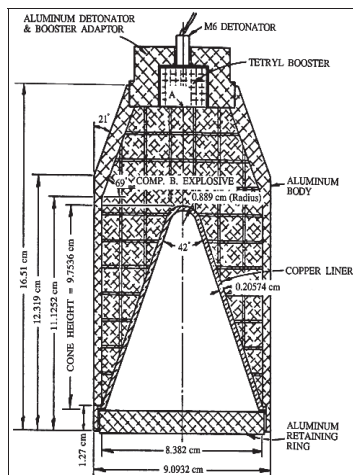
1- Liner  
2- Slug  
\* E-mail: alavi1338@Yahoo.com

این پدیده در آمریکا و انگلستان به اثر مونرو<sup>۱</sup> و در اروپا به اثر نیومن<sup>۲</sup> معروف است. در شکل (۲) مراحل مختلف فروپاشی لاینر و تشکیل جت دیده می شود. اجزای مختلف خرج گود استاندارد (شامل لاینر، خرج انفجار، پوسته، چاشنی و بوستر) نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. تمام اجزای خرج گود بر روی عملکرد آن تأثیر می گذارند، اما هندسه لاینر، ضخامت و زاویه راس آن بیشترین اثر را دارند. بررسی نحوه انفجار و تشکیل جت و محاسبه سرعت آن و عوامل مؤثر بر نفوذ جت، از جنبه های مختلف قابل بررسی می باشند.

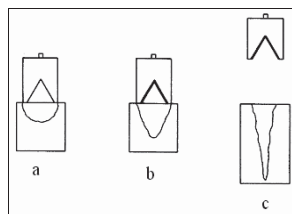
کارلسون نحوه شتاب گیری و تغییر شکل لاینر در خرج گودهای با زاویه باز را با استفاده از نرم افزار Toody مورد بررسی قرار داد [۲]. او سپس به ارائه یک مدل اصلاحی به منظور افزایش سرعت پرتابه حاصل از خرج گود پرداخت. کارلتون و همکارانش اثر بخش اولیه لاینر را بر روی تشکیل جت به صورت تجربی و تحلیلی بررسی نموده و نشان دادند که قسمت های نزدیک به راس لاینر بر روی طول جت تأثیر نداشته و باعث متراکم شدن بخش قابل توجهی از ماده لاینر در نوک جت می گردند [۳]. هیرش برای تخمین زمان تکه تکه شدن جت رابطه ای را ارائه نمود [۴]. مانفرد هلد اثر فاصله توقف را بر روی عملکرد خرج گود به صورت تجربی مورد بررسی قرار داد [۵]. بر اساس تجربیات او با افزایش فاصله توقف تا حد مشخصی میزان نفوذ جت در هدف افزایش یافته ولی پس از آن، قدرت نفوذ جت کاهش خواهد یافت. هنگامی و همکارش نیز نحوه فروپاشی لاینر را به صورت تحلیلی مطالعه نمودند [۶]. در مورد تحلیل خرج گود و محاسبه سرعت های جت و اسلاک، تا کنون مقالات زیادی منتشر گردیده است [۷-۱۵]. نظریه بیرهوف<sup>۳</sup> [۱۶] و نظریه پر<sup>۴</sup> [۱۷] از مهم ترین نظریه هایی هستند که تا کنون در این مورد منتشر شده اند. این نظریات به صورت مختصر در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرند.



شکل ۲- مراحل مختلف فروپاشی لاینر و تشکیل جت [۱]



شکل ۳- خرج گود استاندارد [۱۸]



شکل ۴- نمایش تأثیر آستری و فاصله توقف بر نفوذ جت در هدف [۱]

- 1- Munroe effect
- 2- Noman effect
- 3- Birkhoff
- 4- PER

## ۲. تحلیل های نظری

### ۲-۱- نظریه بیرهوف

بیرهوف در سال ۱۹۴۸ اولین تئوری تشکیل جت خراج گود با آستری مخروطی را ارائه کرد [۱۶]. این تئوری با این فرض به وجود آمد که فشار محصولات انفجار و موج حاصل از آن به قدری زیاد است که از مقاومت ماده تشکیل دهنده لاینر در برابر آن می توان صرف نظر نمود. در حقیقت لاینر را پس از فروپاشی می توان مانند یک سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفت. در این تئوری جریان فروپاشی لاینر در حالت دائم در نظر گرفته می شود. یکی دیگر از فرض های این مدل این است که المان های لاینر فوراً شتاب گرفته و به سرعت نهایی فروپاشی خود می رسند. استفاده از مدل حالت دائم، منجر به تشکیل جتی می شود که دارای طولی ثابت و برابر با یال مخروط آستری است و به همین دلیل تفاوت محسوس با واقعیت دارد.

### ۲-۲- نظریه پر

اصلاحات مهم در مدل حالت دائم بیرهوف توسط پاگ<sup>۱</sup>، ایشلبرگر<sup>۲</sup> و روستوکر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۵ انجام گرفته است [۱۷]. این روش به تئوری پر معروف است. این تئوری بر پایه مفاهیم تئوری بیرهوف بنا شده است، با این تفاوت که سرعت فروپاشی المان های مختلف لاینر یکسان نیست و تغییرات این سرعت به موقعیت اولیه المان ها بستگی دارد. بنابراین، سرعت فروپاشی به طور بیوسسته از راس مخروط به طرف قاعده آن کاهش می یابد و این تغییر سرعت به نوبه خود باعث افزایش طول جت می شود. در لحظه ای که موج انفجار به لاینر مخروطی برخورد می کند، فرض می شود که فشار اعمال شده بر تمام سطح لاینر مساوی است و دیواره های لاینر با سرعت ثابت  $V_0$  به سمت داخل متلاشی می شوند. زاویه  $2\beta$  که بین دیواره های در حال فروپاشی تشکیل می شود، از زاویه راس مخروط ( $2\alpha$ ) بیشتر است. شکل (۴) فرآیند فروپاشی لاینر را نشان می دهد. بر اساس این تئوری سرعت های جت و اسلاگ به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند [۱۷]:

$$V_r = V_0 \csc \frac{\beta}{2} \cos \left( \alpha - \frac{\beta}{2} + \sin^{-1} \frac{V_0}{2U} \right) \quad (1)$$

$$V_s = V_0 \sec \frac{\beta}{2} \sin \left( \alpha - \frac{\beta}{2} + \sin^{-1} \frac{V_0}{2U} \right) \quad (2)$$

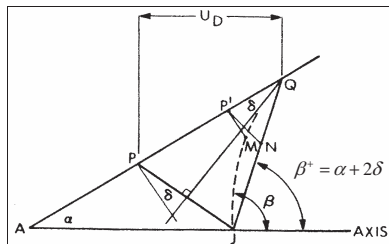
در این روابط،  $V_r$ ،  $V_s$ ،  $V_0$  و  $U$  به ترتیب سرعت جت، سرعت اسلاگ، سرعت فروپاشی لاینر و سرعت انفجار خراج می باشند.

## ۳. شبیه سازی عددی

برای اطمینان از نتایج شبیه سازی ها، ابتدا خراج گود مورد بحث در مرجع [۲] با استفاده از نرم افزار LSDYNA960 مدل سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج ارائه شده در این مرجع مقایسه گردیده اند (این خراج گود در شکل (۵) نشان داده شده است). پس از حصول اطمینان نسبت به صحت نتایج، مطالعه پارامتریک خراج گود انجام گردیده است. هرچند در مرجع [۲]، تحلیل ها با استفاده از نرم افزار Toody و به روش تفاضل محدود<sup>۴</sup> و در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار LS-DYNA و به صورت اجزاء محدود<sup>۵</sup> انجام شده است، اما در صورت دستیابی به نتایج یکسان در مقایسه دو تحلیل، می توان الگوریتم عددی انتخاب شده برای حل مسئله را معتبر دانست و از آن در مدل سازی های بعدی استفاده نمود.

تمام شبیه سازی ها در محیط پیش پردازشگر نرم افزار FEM27 صورت گرفته و سپس در محیط LS-DYNA به روش لاگرانژی مورد تحلیل قرار می گیرد، با توجه به تقارن هندسی و بارگذاری در خراج گود، از مدل متقارن محوری<sup>۶</sup> در شبیه سازی ها استفاده شده است. طبیعی است که در این نوع مدل سازی، هم حافظه مورد نیاز در کامپیوتر و هم زمان اجرای برنامه نسبت به حالت سه بعدی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

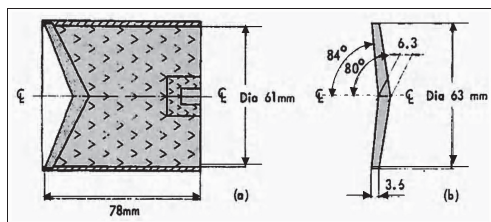
این خراج گود دارای لاینر مسی بوده و ماده منفجره آن از جنس ترکیب B می باشد (RDX/TNT 60/40). بین آستری و ماده منفجره تماس از نوع CONTACT\_2D\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TITLE تعریف شده و مرکز قاعده ماده منفجره به عنوان نقطه شروع انفجار در نظر گرفته شده است. زمان کل فرایند نیز برابر ۵۰ میکرو ثانیه تعیین شده است. این زمان برای تکمیل فرایند انفجار و فروپاشی آستری و تشکیل جت کافی می باشد.



شکل ۴- فرایند فروپاشی لاینر [۱۷]

- 4-Finite-difference
- 5- Finite-element
- 6- Axisymmetric

- 1- Pugh
- 2 Eichelberger
- 3- Rostoker



شکل ۵- مدل پیشنهادی خرج گود ارائه شده در مرجع [۲]

### ۳-۱- خواص مکانیکی و فیزیکی

خواص مکانیکی لاینر باید با توجه به تغییر شکل آن در حین تحول تشکیل جت تعریف شود. برای بیان رفتار ماده در حین بارگذاری انفجاری که با تغییر شکل های زیاد و نرخ کرنش بالا همراه می باشد، از مدل جانسون-کوک<sup>۱</sup> استفاده شده است. جدول (۱) خواص فیزیکی لاینر و ضرایب جانسون-کوک را برای آن نشان می دهد. در این جدول  $n$ ,  $C$ ,  $B$ ,  $A$  و  $m$  ضرایب معادله جانسون کوک بوده و  $E$ ,  $\rho$  و  $T_{melt}$  به ترتیب چگالی، ضریب یانگ و دمای ذوب مس می باشند. خواص مکانیکی اصلی مواد انفجاری شامل سرعت انفجار ( $D$ ), چگالی ( $\rho$ ) و فشار انفجار ( $P_{CJ}$ ) می باشند. این کمیت ها برای ماده منفجره ترکیب B در جدول (۲) ارائه گردیده اند. در این جدول انرژی داخلی اولیه بر واحد جرم می باشد.

### ۳-۲- خواص ترمودینامیکی

برای بیان خواص ترمودینامیکی از معادله حالت<sup>۲</sup> استفاده می شود. با توجه به اینکه فشارهای حاصل از فرایند انفجار بسیار زیاد می باشند، فرض ثابت بودن حجم در تغییر شکل های خمیری معتبر نمی باشد. در این شرایط از معادله حالت برای بیان تغییر حجم بر حسب فشار استفاده می شود. برای مواد مختلف، معادله حالت های مختلفی پیشنهاد گردیده است. در این تحلیل، برای لاینر از معادله حالت گرونیزن<sup>۳</sup> و برای خرج انفجاری از معادله حالت JWLS استفاده شده است. معادله حالت گرونیزن رابطه بین فشار، حجم و انرژی داخلی فلزات را در حالت خمیری در دو حالت تراکمی و انبساطی بیان می کند. در حالتی که ماده تحت فشار باشد این معادله به صورت زیر بیان می شود.

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

و در حالت انبساطی رابطه زیر برای آن ارائه گردیده است:

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E_{int} \quad (4)$$

در این روابط:  $P$  فشار،  $E_{int}$  انرژی داخلی،  $C$  فاصله از مبدا منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات،  $\rho_0$  چگالی ماده منفجره،  $\mu$  حجم نسبی،  $\gamma_0$  ضریب گامای گرونیزن،  $a$  ضریب تصحیح حجم مرتبه اول و  $S_1, S_2, S_3$  ضرایب شیب منحنی سرعت شوک بر حسب سرعت ذرات می باشند. معادله حالت JWLS رابطه ای بین حجم، فشار و انرژی داخلی ماده منفجره برقرار می سازد. شکل کلی این معادله به صورت زیر می باشد [۲۰]:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

در این رابطه  $V$  حجم نسبی،  $E$  انرژی اولیه و ضرایب  $\omega, R_2, R_1, B, A$  ثابت های معادله محسوب و با توجه به نوع ماده منفجره تعیین می شوند. از این معادله برای تعیین فشار در محصولات انفجار استفاده می شود. ضرایب معادلات حالت برای مس و ماده منفجره، به ترتیب در جداول شماره (۳) و (۴) داده شده اند.

- 1- Johnson-Cook
- 2- Equation of state
- 3- Gruneisen

جدول ۱- خواص فیزیکی و ضرایب جاسون- کوک مس [۱۹]

$T_{melt}$ (k)	E (GPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	m	C	n	B (MPa)	A (MPa)	جنس لاینر
۱۰۸۳	۱۳۸	۸/۹۶	۱/۰۹	۰/۰۲۵	۰/۳۱	۲۹۱	۸۶	مس

جدول ۲- خواص ماده منفجره ترکیب B [۲۰]

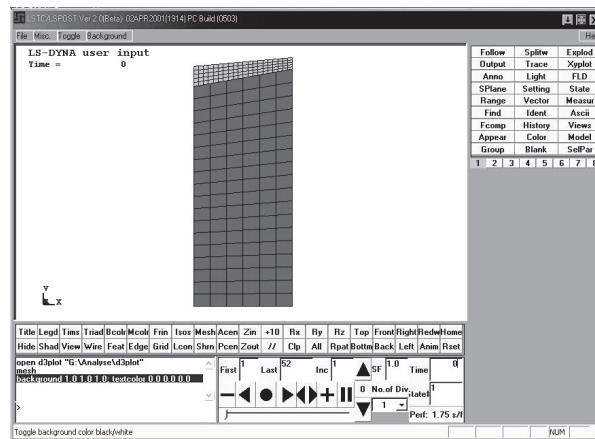
$P_{CJ}$ (GPa)	E0 (GPa)	D (km/s)	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	ماده منفجره
۲۹/۵	۸/۵	۷/۹۸	۱/۷۱۷	RDX/TNT 60/40

جدول ۳- ضرایب معادله حالت برای مس [۱۹]

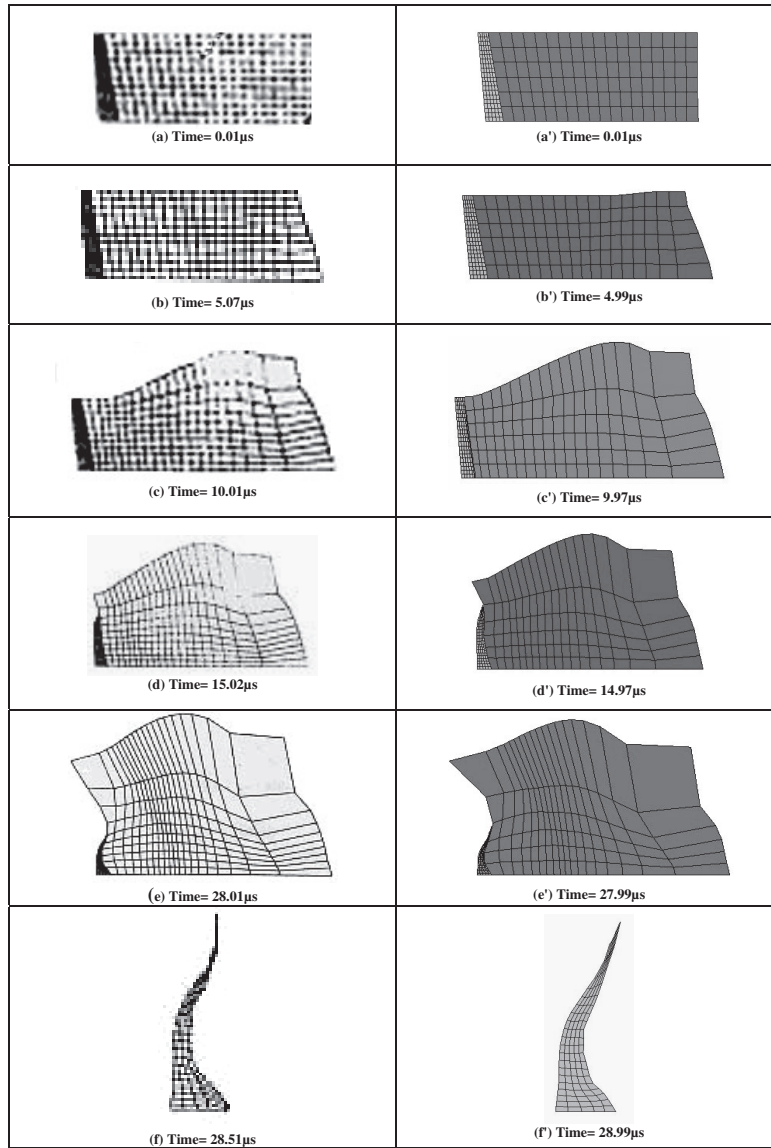
$\gamma_0$	s3	s2	s1	C0 (cm. $\mu$ s-1)	جنس لاینر
۲/۰۲	.	.	۱/۴۸۹	۰/۳۹۴	مس

جدول ۴- ضرایب معادله حالت برای ماده منفجره [۲۰]

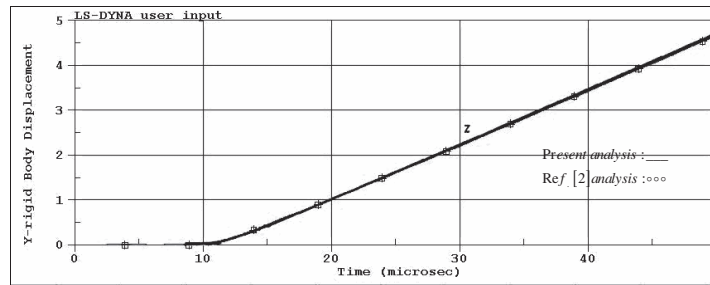
$\omega$	R2	R1	B (GPa)	A (GPa)	ماده منفجره
۰/۳۴	۱/۱	۴/۲	۷/۶۷	۵۵۲/۴	RDX/TNT 60/40



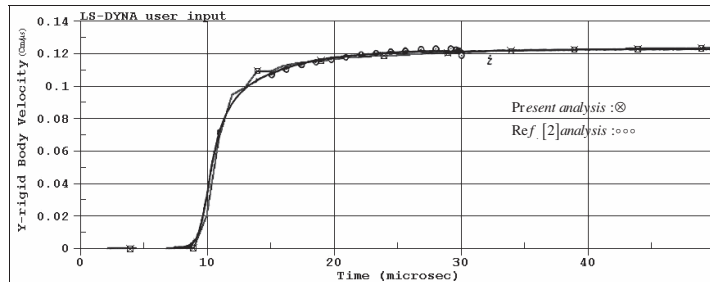
شکل ۶- محیط LS-DYNA و خروجی مدل سازی شده



شکل ۷- مقایسه تغییر شکل های حاصل از شبیه سازی خروج گود با استفاده از نرم افزار LS-DYNA (ستون سمت راست) با نتایج ارائه شده در مرجع [۲] (ستون سمت چپ) ، در زمان های مختلف



شکل ۸- مقایسه جابجایی مرکز جرم لاینر حاصل از تحلیل حاضر و تحلیل مرجع [۲]



شکل ۹- مقایسه سرعت مرکز جرم لاینر حاصل از تحلیل حاضر و تحلیل مرجع [۲]

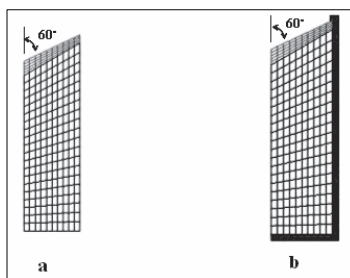
شده است. همان گونه که جدول (۵) نشان می دهد، اختلاف سرعت به دست آمده برای دو مدل با توجه به تغییر تعداد المان ها حداکثر ۴٪ می باشد که البته با تغییر تعداد المان های ردیف سوم به ۴×۲۰ شاهد کاهش این اختلاف به ۲٪ هم خواهیم بود. لذا می توان نتیجه گرفت که ماکزیمم سرعت جت در مدل بدون پوسته در حدود ۲/۳ (Km/s) و در مدل دارای پوسته در حدود ۲/۶ (Km/s) می باشد. در شکل (۱۱) نمودار سرعت جت در این دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل، منحنی خط چین مربوط به خرج گود دارای پوسته (WC) و منحنی دوم مربوط به خرج گود بدون پوسته (WOC) می باشد. از این شکل مشاهده می شود که وجود پوسته موجب افزایش سرعت جت می شود. بنابراین، در انتخاب پوسته در طراحی خرج گود دقت زیادی به عمل می آید. این افزایش سرعت در مدل شبیه سازی شده حدود ۱۰٪ می باشد. افزایش سرعت جت در اثر وجود پوسته به علت محدودیت انبساط محصولات انفجار و در نتیجه عدم کاهش فشار بر روی آستری می باشد.

#### ۴. بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی ویژگی های جت خرج گود

با توجه به نتایج بخش قبل و اطمینان نسبت به صحت الگوریتم اختیار شده، اکنون اثر پارامترهای مختلف بر روی ویژگی های جت خرج گود مورد بررسی قرار می گیرد.

##### ۴-۱- اثر پوسته

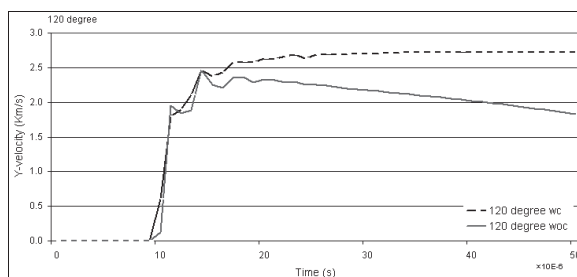
برای بررسی اثر وجود پوسته بر روی عملکرد خرج گود، از پوسته ای فولادی با ضخامت ۲/۵ میلیمتر برای خرج گود با زاویه لاینر ۱۲۰ درجه استفاده شده و سرعت جت به عنوان پارامتر اصلی در دو نمونه مورد مقایسه قرار می گیرد. مدل اجزاء محدود هر دو نمونه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به منظور بررسی تعداد المان های لاینر و تاثیر آن در همگرایی مسئله، در هر دو مدل از ۳ نوع مش بندی استفاده شده و سپس رابطه بین تعداد المان های لاینر با سرعت جت برای هر دو مدل در جدول (۵) نشان داده



شکل ۱۰- a: مدل خرج گود با زاویه راس  $120^\circ$  بدون پوسته،  
b: مدل خرج گود با زاویه راس  $120^\circ$  دارای پوسته

جدول ۵- مقایسه سرعت جت در دو مدل دارای پوسته و بدون پوسته در خرج گود با زاویه راس  $120^\circ$

ردیف	تعداد المان های لاینر طول عرض	سرعت جت در مدل بدون پوسته (km/s)	سرعت جت در مدل دارای پوسته (km/s)
۱	۵×۱۰	۲/۳۲	۲/۶۱
۲	۵×۲۰	۲/۳۸	۲/۶۳
۳	۳×۲۰	۲/۲۷	۲/۵۰



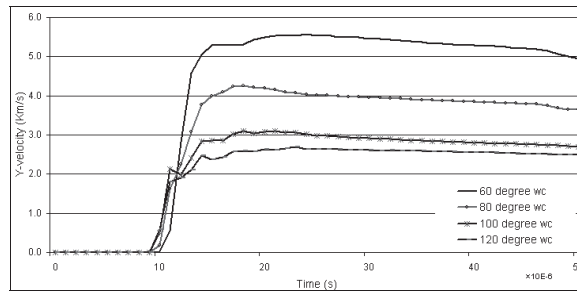
شکل ۱۱- مقایسه نمودار سرعت جت در مدل  $120^\circ$  در دو حالت با پوسته (WC) و بدون پوسته (WOC)

#### ۴-۲- اثر زاویه راس لاینر

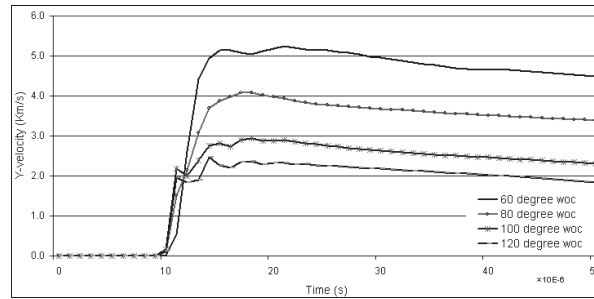
پوسته به ترتیب در شکل های (۱۲) و (۱۳) رسم گردیده اند. همان گونه که از این شکل ها ملاحظه می شود، با کاهش زاویه راس لاینر، سرعت جت افزایش می یابد. این نتیجه با توجه به رابطه (۱) قابل توجیه است. در شکل (۱۴) نیز تغییرات سرعت ماکزیمم جت (سرعت نوک جت)، بر حسب زاویه راس لاینر برای مدل های دارای پوسته رسم شده است.

به منظور بررسی اثر تغییرات زاویه راس لاینر بر روی سرعت جت، خرج گود های با زوایای  $120^\circ$ ،  $100^\circ$ ،  $80^\circ$  و  $60^\circ$  درجه شبیه سازی شده اند. در همه این مدل ها، سایر خواص خرج گود ثابت نگه داشته شده است. نمودار سرعت جت بر حسب زمان، برای مدل های دارای پوسته و بدون

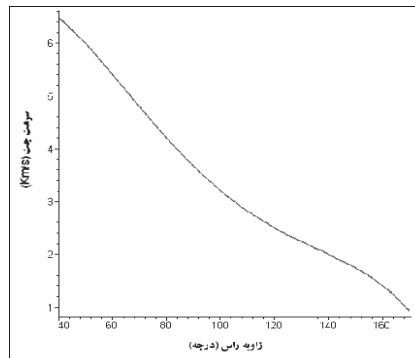




شکل ۱۲- مقایسه تغییرات سرعت جت در مدل های دارای پوسته با زوایای رأس مختلف



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات سرعت جت در مدل های بدون پوسته با زوایای رأس مختلف



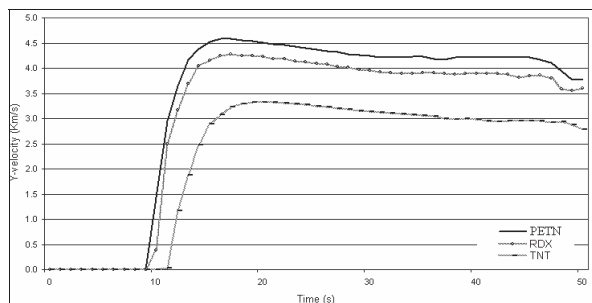
شکل ۱۴- نمودار سرعت ماکزیمم جت برحسب زوایای مختلف لاینر برای مدل دارای پوسته

جدول ۶- خواص مواد منفجره مورد استفاده در شبیه سازی برای بررسی اثر نوع ماده منفجره [۲۰]

ماده منفجره	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	D (km/s)	$E_0$ (GPa)	$P_{CJ}$ (GPa)
TNT	۱/۶۳۰	۶/۹۳	۷/۰۰	۳۱/۴
RDX/TNT 60/40	۱/۷۱۷	۷/۹۸	۸/۵۰	۳۰/۱
PETN	۱/۷۷۰	۸/۳۰	۱۰/۱۰	۳۴/۲

جدول ۷- ضرایب معادله حالت JWL برای مواد منفجره مورد استفاده در شبیه سازی برای بررسی اثر نوع ماده منفجره [۲۰]

ماده منفجره	A (GPa)	B (GPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$
TNT	۳۷۱/۲	۳/۲۳۱	۴/۱۵	۰/۹۵	-۰/۳۰
RDX/TNT 60/40	۵۵۲/۴	۷/۶۷۰	۴/۳۰	۱/۱۰	-۰/۳۴
PETN	۶۱۷/۰	۱۶/۹۲۶	۴/۳۰	۱/۲۰	-۰/۲۵



شکل ۱۵- نمودار سرعت نوک جت برحسب زمان با استفاده از مواد منفجره مختلف

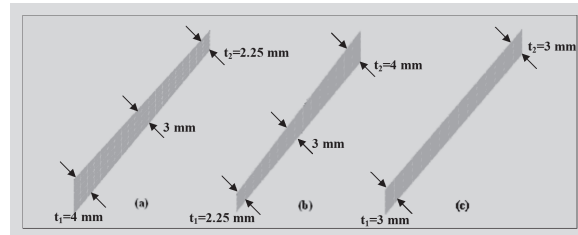
#### ۴-۳- اثر نوع ماده منفجره

نوع ماده منفجره در شکل گیری جت و سرعت آن نقش بسزایی دارد. در این بخش با استفاده از سه نوع ماده منفجره که مشخصات آن ها در جداول (۶) و (۷) ارائه گردیده، شبیه سازی ها صورت گرفته و این موضوع مورد بررسی واقع شده است. این مقایسه بر روی یکی از مدل های ارائه شده در بخش قبل انجام شده است. برای این منظور از مدل خرج گود با زاویه رأس  $80^\circ$  استفاده گردیده

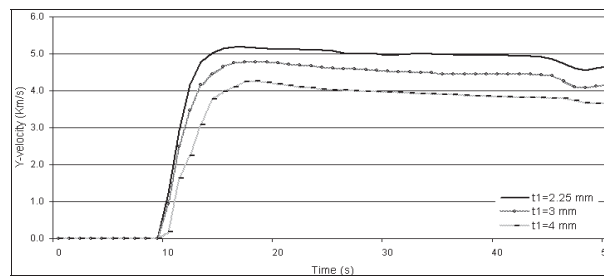
است. شکل (۱۵) سرعت نوک جت در مدت  $50 \mu s$  بعد از شروع انفجار را برای سه نوع ماده منفجره نشان می دهد. توجه به نمودار فوق، سرعت جت در سه مدل ارائه شده در زمان  $20 \mu s$  مطابق با جدول (۸) به دست می آید. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش سرعت انفجار، چگالی و انرژی داخلی ماده منفجره، سرعت نوک جت افزایش می یابد، زیرا با افزایش سرعت انفجار و انرژی ماده منفجره، فشار اعمال شده بر سطح لاینر و در نتیجه سرعت جت افزایش خواهد یافت.

جدول ۸- نتایج به دست آمده از شبیه سازی برای سرعت نوک جت برای مواد منفجره مختلف

ماده منفجره	سرعت جت در زمان $20 \mu s$ (km/s)
TNT	۳/۳۲
RDX/TNT 60/40	۴/۲۰
PETN	۴/۵۰



شکل ۱۶- مدل های پیشنهادی جهت بررسی اثر ضخامت لایتر



شکل ۱۷- مقایسه سرعت نوک جت در مدل هایی با ضخامت های متفاوت

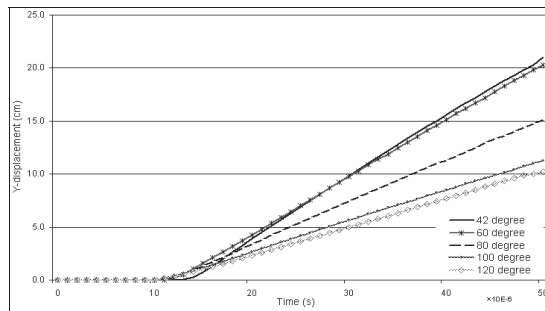
#### ۴-۴- اثر ضخامت لایتر

ضخامت لایتر می تواند یکی از عوامل تاثیرگذار در کارایی خرج گود باشد. جهت بررسی این مسئله خرج گودهایی که مقطع دیواره آن ها به صورت سه مدل a, b و c در شکل (۱۶) می باشند شبیه سازی شده اند. در این شکل،  $t_1$  ضخامت نوک مخروط،  $t_2$  ضخامت انتهای مخروط و  $L$  طول لایتر می باشد. قابل ذکر است که طول لایتر در تمام مدل ها ثابت در نظر گرفته شده است. پس از شبیه سازی این سه نوع خرج گود، سرعت نوک جت در طی فرایند برای هر سه مدل به دست آمده و در شکل (۱۷) نشان داده شده

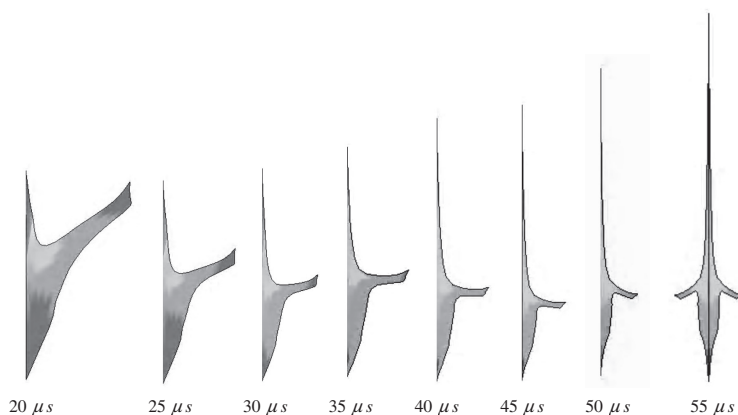
است. با توجه به نمودار فوق سرعت نوک جت در زمان  $20 \mu s$  برای مدل های مختلف مطابق با جدول (۹) به دست می آید. ملاحظه می شود که با کاهش مقدار  $t_1$  (ضخامت رأس لایتر)، سرعت نوک جت افزایش می یابد. دلیل کاهش سرعت در مدل هایی با ضخامت اولیه بیشتر، تلفات بسیار زیاد انرژی در فرایند فروپاشی آستری می باشد. لذا مدل لایتر نشان داده شده در شکل (b) (۱۶)، می تواند گزینه مناسبی در طراحی لایتر جهت دستیابی به جتی سریع تر باشد.

جدول ۹- مقایسه سرعت نوک جت به دست آمده از شبیه سازی ها برای ضخامت های مختلف لاینر

نوع لاینر	سرعت نوک جت در زمان $20 \mu s$ (km/s)
لاینر شکل (۱۶ a)	۴/۲
لاینر شکل (۱۶ b)	۵/۱
لاینر شکل (۱۶ c)	۴/۷



شکل ۱۸- مقایسه تغییرات طول جت بر حسب زمان برای خروج گودهای با زاویه راس متفاوت



شکل ۱۹- نحوه شکل گیری جت در زمان های مختلف برای خروج گود با زاویه راس ۶۰ درجه

#### ۴-۵- بررسی تأثیر زاویه راس آستری بر طول جت ایجاد شده

با استفاده از شبیه سازی های انجام شده، تغییرات طول جت بر حسب زمان برای مدل های  $120^\circ$ ،  $100^\circ$ ،  $80^\circ$  و  $60^\circ$  در شکل (۱۸) ارائه شده است. همان گونه که از این شکل ملاحظه می شود، با کاهش زاویه راس لاینر، طول جت افزایش می یابد. دلیل این افزایش طول، وجود گرادیان سرعت در دو ناحیه ابتدایی و انتهایی جت می باشد. با توجه به این که این گرادیان سرعت با کاهش زاویه راس لاینر بیشتر می شود، بنابراین، در زاویه های کوچک تر راس لاینر، جت تشکیل شده دارای طول بیشتری خواهد بود. نحوه شکل گیری جت در زمان های مختلف برای خرج گود با زاویه راس  $60^\circ$  درجه در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

#### ۵. نتایج و بحث

در این تحقیق، ضمن اشاره به مدل های تحلیلی بیرهوف و پرو، مساله انفجار در خرج گود و تشکیل جت با استفاده از نرم افزار LS-DYNA شبیه سازی گردید. همچنین، تأثیر عوامل مختلف مانند زاویه راس لاینر و ضخامت آن و نیز نوع ماده منفجره بر ویژگی های جت خرج گود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی ها به صورت زیر می باشد:

یکی از عوامل اصلی در افزایش کارایی خرج گود سرعت انفجار است. با افزایش سرعت انفجار، فشار انفجار نیز افزایش خواهد یافت و این افزایش فشار موجب افزایش نیروی وارد بر اجزاء لاینر و در نتیجه افزایش شتاب آن ها در هنگام فروپاشی و آن هم به نوبه خود سبب افزایش سرعت جت خرج گود می شود. در بعضی از روش های تحلیل خرج گود که از فشار انفجار به عنوان پارامتر اصلی جهت تحلیل فرآیند فروپاشی خرج گود استفاده می شود، رابطه بین افزایش فشار و تغییر پارامترهای خرج گود به خوبی مشهود است. کاهش زاویه راس لاینر موجب افزایش سرعت جت می شود، اما عملاً زاویه راس لاینر در محدوده  $40^\circ$  تا  $70^\circ$  درجه انتخاب می شود، زیرا کاهش بیش از حد زاویه راس باعث میل کردن جرم جت به سمت صفر شده و در نتیجه انرژی جنبشی جت کاهش یافته و از نظر کاربردی جت ایجاد شده، نمی تواند به حد کافی در نفوذ نقش موثری ایفا نماید.

استفاده از یک پوسته مناسب در خرج گود، افزایش سرعتی در حدود  $10\%$  الی  $15\%$  درصد را ایجاد خواهد نمود. دلیل این امر محصور شدن محصولات انفجار در یک فضای محدود و جلوگیری از کاهش فشار و هدر رفتن انرژی آن ها

می باشد. لذا با انتخاب جنس و ضخامت مناسب برای پوسته می توان سرعت جت را افزایش داد.

کاهش ضخامت لاینر در قسمت رأس، موجب می شود که جت ایجاد شده دارای سرعت بیشتری باشد. هرچند در این صورت نوک جت جرم کمتری داشته و عملاً میزان نفوذ این جت در هدف ها زیاد نخواهد بود.

علاوه بر عوامل مورد بررسی در این مقاله، عوامل دیگری نیز بر کیفیت و کارایی خرج گود موثر می باشند که در تحقیقات دیگر به آن ها اشاره شده است. به عنوان مثال، افزایش چگالی ماده منفجره و نیز افزایش طول بخشی از ماده منفجره که قبل از لاینر قرار دارد موجب افزایش کارایی جت می شود. در خاتمه باید به این نکته اشاره نمود که تحلیل مسئله خرج گود تابع پارامترهای زیادی می باشد که بررسی تأثیر هرکدام از این پارامترها در تشکیل جت و نفوذ آن مستلزم تحقیقات گسترده و آزمایش های متعدد می باشد. در ضمن، هدف نهائی در خرج گود نفوذ در اهداف مختلف است و بررسی مساله نفوذ مستلزم تحلیل جت و تعیین ویژگی های آن می باشد. تحقیق حاضر به عنوان مقدمه ای ضروری برای تحلیل فرآیند نفوذ بوده و برخی مسائل مانند میزان انرژی جنبشی جت و شکسته شدن آن به قطعات متعدد که تأثیر قابل توجهی در قابلیت نفوذ آن دارند در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته اند.

#### ۶. مراجع

- Walters, W.P. and Zukas, J.A., Fundamentals of shaped charges, John Wiley & Sons Inc, (1989).
- Karlsson, H., Computer calculation of wide-angle shaped charge liner acceleration and deformation, Alternate, pp. IV-257 – IV-270.
- Carleone, J., Jameson, R. and Chou, P. C., The tip origin of a shaped charge jet, Propellants and Explosives, Vol. 2, pp. 126-130, (1977).
- Hirsch, E., A formula for the shaped charge jet breakup-time, Propellants and Explosives, Vol. 4, pp. 89-94, (1979).
- Held, M., Characterizing shaped charge performance by stand-off behavior, MBB Report, pp. 331-339, (1982).
- Hennequin, E. M., Analytical model of the shaped charge liner collapse, Aerospace/Engines Techniques, pp. 525-533, (1983).
- Huerta, M. and Vigil, M. G., Design, analyses, and field test of a 0.7 m conical shaped charge, International Journal of Impact Engineering, pp. 1-13, (2004).

- [8]. Molinari, J. F., Finite element simulation of shaped charges, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, pp. 921-936, (2002).
- [9]. Katayama, M. and Kibe, S., Numerical study of the conical shaped charge for space debris impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 357 – 368, (2001).
- [10]. Haufe, A. and Franz, U., On the simulation of out-of-position load cases with the ALE-Method, 7<sup>th</sup> symposium and exhibition on sophisticated safety systems, pp. 1-12, (2004).
- [۱۱]. رشیدی، م.، بررسی تئوری انفجار و شکل دهی موج در خرج های گود، پایان نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی قدیری دهکردی، ب.، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۵.
- [۱۲]. اطمینان بخش، م.، بررسی عملکرد سرچنگی خرج گود و ارائه مدلی برای اثر شکل دهنده موج، پایان نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی فرشچی، م.، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۳.
- [13]. Barlow, A., ALE methods solving shock hydrodynamics problems, *Discovery*, pp. 10 – 17, (2001).
- [14]. Katayama, M., Kibe, S. and Yamamoto, T., Numerical and experimental study on the shaped charge for space debris assessment, *Acta Astronautica*, Vol. 48, No. 5-12, pp. 363 – 372, (2001).
- [15]. Peery, J. S., Budge, K. G., Wong, M. K. W. and Trukano, T. G., RHALE: A 3-D MMALE code for unstructured grids, Sandia national laboratories, pp. 1-16, (2002).
- [16]. Birkhoff, G., MacDougall, D., Pugh, E. and Taylor, G., Explosives with lined cavities, *J. Applied Physics*, Vol. 19, No. 6, pp. 563-582, (1948).
- [17]. Pugh, E., Eichelberger, R. and Rostoker, N., Theory of jet formation by charges with lined cavities, *J. Applied Physics*, Vol. 23, No. 5, pp. 532-536, (1952).
- [18]. Lee, W. H. and Painter, J. W., Material void-opening computation using particle method, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-22, (1999).
- [19]. Raczy, A., Altenhof, W. J. and Alpos, A. T., An Eulerian finite element model of the metal cutting process, 8<sup>th</sup> international LS-DYNA users conference, Dearborn, (2004).
- [20]. Wilkins, M. L., *Computer simulation of dynamic phenomena*, Springer, (1999).