



## بررسی عددی عملکرد فشار گاز حاصل از خرجهای انفجاری مختلف در آتشباری کنترل شده پیش شکافی به روش XFEM

مجید گودرزی<sup>۱</sup>، سهیل محمدی<sup>۲</sup>، احمد جعفری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران

Mgoodarzi64@ut.ac.ir

### خلاصه

در این مطالعه الگوریتمی جهت بررسی عددی عملکرد فشار گاز حاصل از انفجار در توسعه ترکهای موجود در اطراف چال انفجاری ارائه شده است. روش المان محدود توسعه یافته به منظور مدلسازی ترک و تحلیل محیط جامد استفاده شده است، همچنین بمنظور بررسی امکان رشد ترک، از روش انتگرال ل<sub>۲</sub> ضریب شدت تنش محاسبه می گردد و بعنوان معیاری برای گسترش ترک بکار می رود. جریان گاز در ترک بصورت یک جریان یک بعدی فرض شده و معادلات آن که با در نظر داشتن پایستاری جرم و اینرسی بدست آمده است، به روش تفاضل محدود حل میگردد. جهت برآورد فشار گازهای حاصل از انفجار از معادله حالت JWL استفاده شده که مقادیر فشار در مراحل انبساط گاز را نیز بخوبی تخمین میزند. در این الگوریتم مسئله برای زمان محدودی برای برنامه گاز حل میگردد و سپس فشار محاسبه شده درون ترک بصورت شرایط مرزی به برنامه المان محدود توسعه یافته منتقل میگردد. در صورت بیشتر بودن فاکتور شدت تنش از حد بحرانی ترک رشد میکند. نتایج این الگوریتم با دادهای آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است و در پایان قابلیت نسبی گاز تولیدی از انفجار خرجهای انفجاری پتن، تی ان تی، اسلاری و امولسیون، در گسترش دادن ترکهای موجود در اطراف چال، با هم مقایسه میگردد. نتایج این مطالعه نشان می دهد که پارامتر بسیار مهم در قدرت گاز ضرایب معادله حالت خرج انفجاری است و نه صرفاً چگالی آن.

کلمات کلیدی: المان محدود توسعه یافته، تفاضل محدود، فشار گاز، انفجار.

### ۱. مقدمه

امواج تنشی و گازهای حاصل از انفجار هر دو نقش مهمی را در تولید ترک در مواد جامد دارند. عملکرد امواج تنشی تولید ترکهای اولیه اطراف چال می باشد و عملکرد فشار گاز توسعه این ترکهای اولیه است. ساسا<sup>۱</sup> و همکاران [۱] در مورد مکانیزم خردایش مواد ترد تحت تاثیر مواد منفجره با سرعت انفجار پایین، بصورت عددی و آزمایشگاهی بحث کردند. آنها نشان دادند که طول نهایی ترکها وابسته به فشار و عمق نفوذ گاز میباشد و همچنین عمق نفوذ گاز تعداد ترکها را تعیین میکند. مکهاک<sup>۲</sup> [۲] بیان کرد که نتایج تستهای آزمایشگاهی نشان میدهد که اثر فشار گاز ممکن است بر اثر امواج تنشی غالب باشد. نیلسون<sup>۳</sup> و همکاران [۳] معادلات لازم جهت تحلیل حرکت گاز در ترک را توسعه دادند. داهنکا<sup>۴</sup> و همکاران [۴] گزارش دادند که امواج تنشی بسرعت از ترکها سبقت میگیرند و عمده عملیات خردایش در اثر فشار گاز تولید میشود. منجیژا<sup>۵</sup> و همکاران [۵] از روش المان محدود-مجزا را برای تحلیل ترک خوردگی محیط استفاده کردند. آنها فشار گاز را درون بخش خاصی از ترکها در نظر گرفتند و سعی کردند مدل فشار گاز ساده و

<sup>۱</sup> Sasa

<sup>۲</sup> McHugh

<sup>۳</sup> Nilson

<sup>۴</sup> Daehnke

<sup>۵</sup> Munjiza



کم هزینه باشد. محمدی<sup>۱</sup> و به‌بم‌زاده<sup>۲</sup> [۶] الگوریتمی را برای برهم کنش گاز-جامد بر اساس دو مش بندی مجزا، برای فاز گاز و فاز جامد، توسعه دادند. محمدی و پولادی<sup>۳</sup> [۷] بر همین اساس جریان گاز در حالت آتروپی ثابت را در محیط جامد ترک خورده مدلسازی نمودند. این دو الگوریتم در یک کد المان محدود-مجزا بکار رفته است. چو<sup>۴</sup> و همکاران [۸] آزمایشی انجام دادند و جریان گاز در ترک را در آن مطالعه کردند. همچنین آنها در سال ۲۰۰۴ [۹] از معادلات نیلسون برای ارزیابی فشار گاز در ترک استفاده کردند و نتایج را به یک کد المان محدود دینامیکی جهت تحلیل ترک خوردگی محیط منتقل می‌کردند.

در این مقاله، ابتدا الگوریتمی جهت بررسی توسعه ترک اطراف چال انفجاری ارائه می‌گردد، سپس نتایج برنامه توسط داده‌های آزمایشگاهی و حل‌های تحلیلی ارزیابی میشود و در نهایت قابلیت فشار گاز حاصله از انفجار مواد انفجاری مانند: تی ان تی<sup>۵</sup>، پتن<sup>۶</sup>، اسلاری<sup>۷</sup> و امولسیون<sup>۸</sup> در گسترش ترک، بررسی میگردد. این الگوریتم شامل دو برنامه مجزای، المان محدود توسعه یافته و تفاضل محدود میباشد که فقط فاز دوم انفجار، یعنی نفوذ گاز در ترک‌های موجود را بصورت یک پدیده شبه استاتیکی مدلسازی میکند. روش المان محدود توسعه یافته بدلیل مدل کردن ترک بطور مستقل از مش بندی، نیازی به مش بندی مجدد در هر مرحله از رشد ترک نداشته و سرعت حل را افزایش میدهد. همچنین برای در نظر گرفتن جریان گاز در ترک، مدل جریان یک بعدی ناپایدار که از قانون بقای جرم و اینرسی بدست آمده [۳]، استفاده شده است. این معادلات توسط روش تفاضل محدود حل میگردد و سپس درون ترک موجود، مش یک بعدی تفاضل محدود تشکیل میشود و در هر مرحله اطلاعات کامل ترک، شامل طول و بازشدگی آن، به این مش منتقل شده و نتایج حاصل از آن که فشار گاز در طول ترک است، به کد المان محدود توسعه یافته رفته و بصورت نیرو در سطح ترک اعمال میگردد. بررسی پتانسیل گسترش ترک توسط مقایسه ضریب شدت تنش با چقرمگی سنگ انجام میشود که روش انتگرال J به منظور محاسبه ضریب شدت تنش به خدمت گرفته شده است.

## ۲. مدلسازی عددی گسترش ترک در اثر نفوذ گازهای حاصل از انفجار

### ۲-۱. روش المان محدود توسعه یافته

روش المان محدود بعنوان یکی از روشهای بسیار قوی در مسائل مختلف مهندسی بکار میرود. یکی از کاربردهای این روش تحلیل ترک در محیط های جامد است. روشهای معمول جهت مدلسازی ترک در محیط المان محدود، این کار را بصورت فیزیکی و با تغییر مش بندی انجام میدهند. در حقیقت مش متناسب با موقعیت ترک ایجاد میگردد و مرز ترک، مرز المانها هم هست. این روشها نیاز داشتند که بعد از رشد ترک مجدداً المان بندی صورت بگیرد که این کار زمان بر میباشد. روش المان محدود توسعه یافته<sup>۹</sup> با ارتقاء توابع شکل در المانهایی که با ترک درگیر میشوند، ترک را مستقل از مش بندی اولیه و در واقع بطور مجازی در محیط مدلسازی میکند [۱۰]. به این ترتیب بعد از هر مرحله رشد ترک نیازی به مش بندی مجدد نمیشد و فقط المانهای جدیدی که با ترک درگیر هستند، به منظور ارتقاء توابع شکل، شناسایی میشوند. در این روش دو نوع تابع ارتقاء وجود دارد که شامل توابع ارتقاء نوک ترک و توابع ارتقاء ناپیوسته بمنظور مدلسازی طول ترک میباشد. وقتی المانی با ترک درگیر است، جابجایی بصورت زیر، برای آن المان، ارتقاء داده میشود:

$$u^h(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x)u_j + \sum_{h=1}^m N_h(x)H(\xi(x))a_h + \sum_{k=1}^{mt} N_k(x) \left( \sum_{l=1}^{mf} F_l(x)b_{lk} \right) \quad (1)$$

<sup>۱</sup> Mohammadi

<sup>۲</sup> Bebamzadeh

<sup>۳</sup> Pooladi

<sup>۴</sup> Cho

<sup>۵</sup> TNT

<sup>۶</sup> PETN

<sup>۷</sup> Slurry

<sup>۸</sup> Emulsion

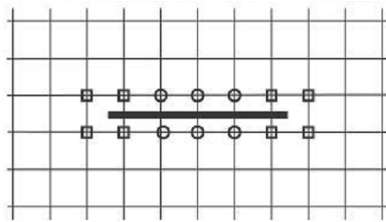
<sup>۹</sup> XFEM



در این رابطه  $n$  تعداد گرهای المان است و  $m$  تعداد گرهای از المان است که با طول ترک در گیر هستند،  $mt$  تعداد گره هایی است که با نوک ترک مرتبط هستند و  $mf$  تعداد توابع لازم جهت ارتقاء المان نوک ترک میباشد،  $N$  تابع شکل معمول المان محدود است،  $a$  و  $b$  درجات آزادی اضافه شده به گرها میباشد،  $H$  تابع هویساید، و توابع  $F$  که از حل تحلیلی میدان جابجایی در نوک ترک بدست آمده اند، جنس میدان را در اطراف نوک ترک تولید میکنند:

$$F_{\alpha}(r, \theta) = \left\{ \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right\} \quad (2)$$

نحوه ارتقاء گرها نسبت به موقعیت ترک در شکل زیر آورده شده است (شکل (۱)).



شکل ۱- نحوه انتخاب گرها برای ارتقاء، مربعها ارتقاء نوک ترک و دایرهها ارتقاء توابع هویساید را نشان میدهند [۱۰].

## ۲-۲. مدلسازی نفوذ گاز به درون ترکها ۱-۲-۲. معادلات حاکم بر حرکت گاز در ترک

در این مطالعه، حرکت گاز درون ترکها بصورت یک جریان یک بعدی در نظر گرفته شده است. این معادلات که با در نظر داشتن پایداری جرم و اینرسی بدست آمده، در حالت جریان یک بعدی به صورت زیر نوشته میشود [۳]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 h)}{\partial x} = -\rho h \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \psi \right) \quad (4)$$

در این معادلات  $\rho$  چگالی،  $v$  سرعت، و  $P$  فشار گاز میباشد. انتقال گرما بدلیل انبساط بی دررو گاز، ناچیز فرض شده است. پارامتر  $\psi$  برای دو حالت جریان آرام (۵a) و مغشوش (۵b) بصورت زیر تعریف میگردد:

$$\psi = \frac{12\mu v}{\rho h^2} \quad (5a)$$

$$\psi = a \left( \frac{\varepsilon}{h} \right)^b \frac{v^2}{h} \quad (5b)$$

$\mu$  ویسکوزیته سیال است،  $a$  و  $b$  ثابتهای تجربی هستند که بترتیب برابر ۰.۱ و ۰.۵ می باشند [۱۰] و  $h$  بازشدگی ترک است. نیلسون [۳] نشان داده است برای شرایط حاکم در پدیده انفجار، میتوان از طرف چپ معادله (۴) صرف نظر کرد، همچنین مطالعات تجربی وی نشان داد جریان گاز درون ترکها از نوع مغشوش است. با تعریف پارامتر فاکتور اصطکاک بصورت  $f = a(\varepsilon/h)^b$ ، جایگذاری معادله (۵b) در معادله (۴) و حذف سمت چپ تساوی و باز نویسی آن بر حسب سرعت داریم:

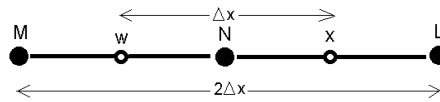
$$v = \sqrt{\frac{h}{f\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} \right)} \quad (6)$$



با قرار دادن این معادله در معادله پیوستگی (معادله (۳)) و منقطع سازی آن بصورت صریح روی مش شکل (۲) خواهیم داشت:

$$\rho_N^{t+\Delta t} - \rho_N^t = -\frac{2\Delta t}{\Delta x(h_w + h_x)} \left( h_x \sqrt{-\rho_x' \frac{h_x (P_L' - P_N')}{\Delta x}} - h_w \sqrt{-\rho_w' \frac{h_w (P_N' - P_M')}{\Delta x}} \right) \quad (7)$$

چگالی در روی المانها بصورت متوسط چگالی گره‌ی در نظر گرفته میشود.



شکل ۲- مش تفاضل محدود.

البته در کد عددی بدلیل اینکه ممکن است نتوان مش یکنواخت در داخل ترک ایجاد کرد، طول هر المان محاسبه و ذخیره می‌گردد و در محاسبات اعمال می‌شود.

### ۲-۲-۲ معادله حالت گاز

زمانی که با استفاده از معادله (۷) چگالی گاز در مش تفاضل محدود محاسبه شد، با استفاده از آن، فشار گاز پیش بینی می‌گردد. برای پیش بینی فشار حاصل از گازهای انفجاری، معمولاً از معادله حالت JWLE استفاده میگردد. این معادله حالت صورت زیر نوشته میشود [۱۲]:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (8)$$

در این معادله A, B, C, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, E و ω ثابتهای ماده منفجره هستند، V چگالی نسبی است که نسبت بین چگالی اولیه ماده منفجره به چگالی فعلی گاز می‌باشد. مقادیر ثابتها برای چند ماده منفجره در جدول زیر آورده شده است. این معادله در واقع حداکثر فشار گاز ممکن، از انفجار یک ماده منفجره در حالتی که کاملاً ماده محدود شده باشد (V=1) را پیش بینی میکند و کاهش آن را در اثر انبساط بدست می‌دهد.

### ۲-۳ نحوه اتصال کد جریان گاز و کد المان محدود توسعه یافته

جهت اعمال تاثیر فشار گاز انفجار در گسترش ترکها نیاز است بطور مرتب فشار محاسبه شده بصورت شرایط مرزی روی ترک اعمال گردد و همچنین تغییرات احتمالی ترک مانند گسترش و تغییر در بازشدگی آن، در محاسبات گاز وارد گردد. در این مطالعه به دلیل اینکه مسئله شبه استاتیکی در نظر گرفته شده، برنامه گاز زمان محدودی حل میشود و بعد از آن نتایج جهت تحلیل استاتیکی وارد بخش المان محدود توسعه یافته می‌گردد. در صورت رشد ترک مش تفاضل محدود بطور مناسب تغییر میابد. باز شدگی جدید ترک نیز به برنامه گاز رفته و فشارها متناسب با بازشدگی جدید و همچنین فشار درون چال متناسب با جرم گاز نفوذ کرده در ترک، به روز می‌شوند. در ابتدای کار بازشدگی اولیه ای برای ترک باید در نظر گرفته شود که این مقدار حدود یک میلیمتر فرض شده است [۹].

### ۲-۴ نتایج عددی

جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، دو بخش اصلی برنامه، شامل بخش فشار گاز و بخش المان محدود توسعه یافته، را بطور مجزا ارزیابی میکنیم.

جدول ۱- پارامترهای معادله حالت JWL برای چهار خرج انفجاری مختلف [۱۲].

پارامتر	$A(GPa)$	$B(GPa)$	$E(GJ / Kg)$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho_0 (Kg / m^3)$
تی ان تی	۳۷۱.۲۱۳	۳.۲۳۰۶	۷	۴.۱۵	۰.۹۵	۰.۳	۱۶۳۰
پتن	۳۷۳.۸	۳.۶۴۷	۷	۴.۲	۱.۱	۰.۳	۱۴۸۰
اسلاری	۱۷.۰۵	۰.۷۲۲	۳.۲	۴.۲	۰.۹	۰.۰۲	۱۵۴۰
امولسیون	۲۱۴.۴	۰.۱۸۲	۳.۷۴	۴.۲	۰.۹	۰.۱۵	۱۳۱۰

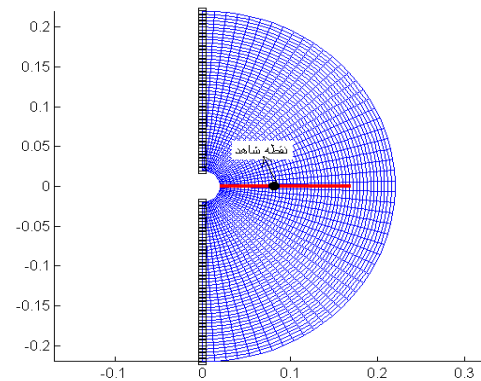
### مثال ۱:

چو در سال ۲۰۰۲ آزمایشی طراحی کرد و در آن یک نمونه سنگ را که دارای یک چال شکاف دار بود توسط یک چاشنی انفجاری پتن تحت بار انفجار قرار داد و سرعت گاز را در نقاط شاهدهی درون ترک اندازه گرفت. قطر چال و قطر خرج در این آزمایش به ترتیب ۴۰ و ۶.۶ میلیمتر بوده است. همچنین این تست در یک استوانه به قطر ۴۰ سانتی متر انجام گرفته است (شکل (۳)). مشخصات سنگ بکارفته در آزمایش در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- پارامترهای سنگ در آزمایش چو [۹].

پارامتر	چگالی ( $Kg/m^3$ )	سرعت امواج P (m/s)	سرعت امواج S (m/s)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (Gpa)	چقرمگی ( $MPa.m^{1/2}$ )
مقادیر	۲۱۷۰	۴۰۰۰	۲۱۴۰	۰.۱۸	۳۱.۶	۳.۱۳

این آزمایش نشان داد که در این مسئله خاص سرعت گاز در فاصله ۳ تا ۹ سانتی متری از لبه چال بطور متوسط حدود ۱۷۸ متر در ثانیه می باشد. این آزمایش توسط کد عددی تهیه شده شبیه سازی شد و نمودار سرعت گاز برای نقطه ای در ۷ سانتی متری چال در شکل (۴) آورده شده است. میانگین سرعت در حل عددی حدود ۱۸۲.۵ متر بر ثانیه می باشد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- نمودار سرعت گاز در نقطه شاهد تا ۹۰۰ میکرو ثانیه بعد از انفجار.

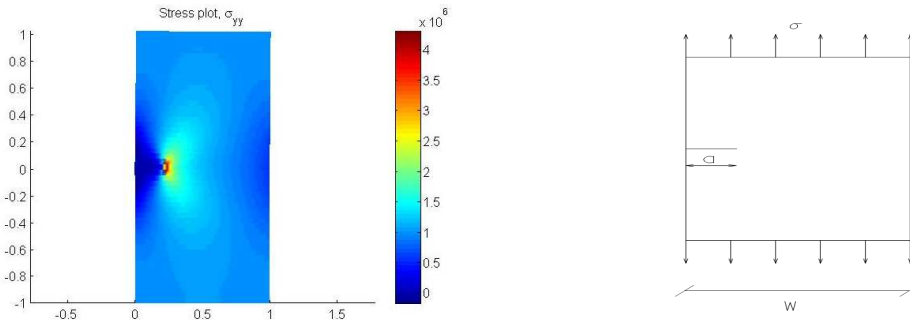
شکل ۳- مدل عددی ساخته شده از آزمایش.

### مثال ۲:

بمنظور بررسی قابلیت برنامه المان محدود تهیه شده جهت تولید صحیح میدانهای جابجایی در اطراف ترک، جواب حاصل از برنامه عددی را با حلهای تحلیلی موجود مقایسه میکنیم. در این برنامه جهت برآورد فاکتور شدت تنش در نوک ترک از محاسبه انتگرال J استفاده شده است. ضریب شدت تنش برای ترک لبه ای در یک صفحه تحت کشش، نامحدود در جهت y، از رابطه ۹ محاسبه میشود. پارامترهای لازم در شکل (۵) مشخص شده اند [۱۳].

$$K_I = \left[ 1.12 - 0.23 \left( \frac{a}{w} \right) + 10.56 \left( \frac{a}{w} \right)^2 - 21.74 \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 30.42 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right] \sigma \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

این مسئله برای صفحه ای با عرض (w) ۱۰۰ و طول ترک (a) ۲۰ سانتی متر تحت بار یک مگا پاسکال در کشش قرار گرفت. جواب حل تحلیل عددی برای ضریب شدت تنش به ترتیب برابر ۱.۱۹۸۵۶ و ۱.۲۰۶۵۶ میباشند که خطایی حدود ۰.۶۶ درصد تولید میکند و کاملاً قابل قبول است. همچنین تنشهای عمودی تولید شده در اطراف ترک در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- هندسه مسئله مثال ۲.

شکل ۶- تنشهای عمودی تولید شده در مدل عددی در اطراف ترک بر حسب پاسکال.

### ۳. بررسی قابلیت فشار گاز چند خرج انفجاری مختلف

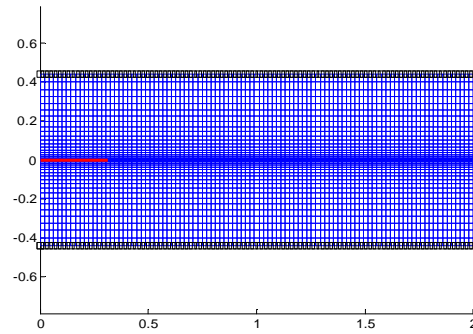
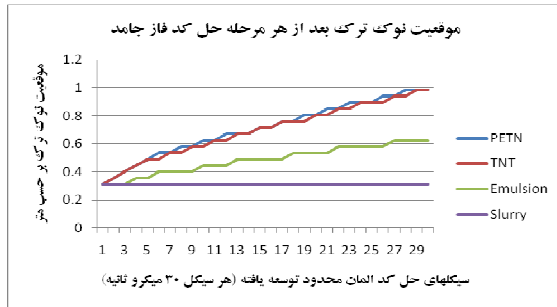
در مسائلی مانند آتشباری به روش پیش شکافی نیاز است که ترکهای خاصی در جهت مشخصی گسترش یابد تا یک سطح جدایش قبل از انفجار اصلی ایجاد شود و سنگ اصلی را از منطقه تحت انفجار جدا کند، در این صورت آسیب کمتری به سنگ بکر وارد میشود. در این حالت بهتر است که ماده منفجره داری قدرت زیادی نباشد. در واقع در این نوع مسائل انفجار بهتر است موج ضربه ضعیفی تولید شود تا به دیواره ها آسیب نرسد، و ترجیح داده میشود تا از فشار گاز برای رشد ترک استفاده شود.

در این بخش به کمک الگوریتم پیشنهاد شده به بررسی قابلیت گاز تولیدی از چهار خرج انفجاری ذکر شده در جدول (۱)، در توسعه ترک میپردازیم. به دلیل این که هدف از این بخش مقایسه ای بین چند ماده است، جهت کاهش زمان حل، یک مسئله ساده طراحی شده است و از مدل کردن هندسه چال صرف نظر شده است، هندسه مسئله در شکل (۷) آورده شده است. قطر چال انفجاری و ماده منفجره به ترتیب ۴ و ۲ سانتی متر فرض شده است همچنین با توجه به اینکه مسئله بصورت شبه استاتیکی میباشد زمانی برای توسعه گاز در ترک در نظر گرفته میشود، سپس در برنامه المان محدود توسعه یافته وضعیت تنشها بررسی میگردد و با محاسبه ضریب شدت تنش وضعیت رشد ترک مشخص میشود. در این مثال زمان توسعه گاز در ترک حدود ۳۰ میکرو ثانیه در نظر گرفته شده است. چون در فرایند انفجار گل گذاری روی چال مدت کوتاهی میتواند فشار چال را حفظ کند و بعد از مدتی از بین میرود و گاز چال از بالا به سرعت تخلیه میگردد، بنابراین برای کل فرایند انفجار، باید زمان موثری را در نظر داشت. این مدت حدود ۹۰۰ میکرو ثانیه فرض میشود [۹]. گسترش ترک نیز در مد یک شکست در نظر گرفته شده است، بنابراین ترک در جهت اولیه خود گسترش میابد. در مسائل مربوط به گسترش ترک باید برای این پدیده علاوه بر جهت گسترش، سرعت آن را نیز داشت. سرعت رشد ترک وابسته به نوع ماده و عوامل گسترش میباشد. در پدیده انفجار سرعت رشد ترکها برابر ۰.۳۸ سرعت عبور امواج طولی در محیط در نظر گرفته میشود [۱۴]. با توجه به اینکه خواص سنگ برای این بخش، خواص ذکر شده در جدول (۲) میباشد، سرعت رشد ترک ۱۵۰۰ متر بر ثانیه فرض میشود. البته باید توجه داشت که این سرعت مربوط به کل پدیده انفجار، شامل عبور موج ضربه از محیط نیز میباشد.

با توجه به توضیحات بالا نتایج چهار ماده منفجره ذکر شده در شکل (۸) آورده شده است. در این شکل موقعیت نوک ترک در طول زمان حل دیده میشود. در واقع هر یک بار که بخش المان محدود توسعه یافته حل شده است، بخش گاز اطلاعات جدید شامل طول و بازشدگی ترک را دریافت کرده و به اندازه ۳۰ میکرو ثانیه نفوذ گاز در ترک را حل کرده است.

با توجه به شکل دو ماده منفجره پتن و تی ان تی دارای قدرت مشابهی در تولید گاز در فرایند انفجار میباشند، اما چگالی خرج تی ان تی حدود ۱۰ درصد بیشتر میباشد. همچنین در مقایسه دو ماده ضعیفتر امولسیون و اسلاری بر خلاف ظاهر که خرج اسلاری دارای چگالی حدود ۱۷.۵ درصد بیشتر

میباشد، در این مسئله خاص گاز تولیدی آن توان گسترش ترک موجود را ندارد، اما خرج امولسیون عملکرد بهتری داشته است. البته در فرایند انفجار هر دو عامل فشار گاز و موج ضربه عمل میکنند و تحلیل کامل اثر یک ماده منفجره و مقایسه جامع بین آنها نیازمند در نظر داشتن هر دو عامل است. اما نتایج این تحقیق در بررسی آتشباری کنترل شده پیش شکافی<sup>۱</sup> و روش ترک گاز پر انرژی<sup>۲</sup> که در صنایع نفت و گاز برای بالا بردن راندمان چاههای استخراج گاز طبیعی و نفت بکار میرود، قابل کاربرد است.



شکل ۷- هندسه مثال حل شده، طول اولیه ترک ۳۰ سانتی متر. شکل ۸- نمودار موقعیت نوک ترک در هر گام زمانی از حل فاز جامد.

با توجه به فرض زمانی برای توسعه گاز در ترکها به ازای هر سیکل حل فاز جامد نیاز است مسئله نسبت به این پارامتر تحلیل حساسیت شود، چون این متغیر میزان رشد ترک را هم تحت تاثیر قرار میدهد. بنابراین مسئله قبل برای خرج تی ان تی در چهار حالت ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۱۰۰ میکرو ثانیه حل میگردد. نتایج این حالتها در جدول (۳) آورده شده است. بین گام زمانی در نظر گرفته شده و محدوده اطراف آن تفاوت چندانی وجود ندارد البته با تغییر آن به ۱۰۰ میکرو ثانیه جواب تغییر خواهد کرد. در واقع این موضوع به این دلیل مهم است که در لحظه رشد ترک یک فاصله بین جبهه گاز و نوک ترک ایجاد میگردد که بعد از چند گام زمانی از حل، گاز دوباره به نوک ترک میرسد. با توجه به اینکه مطالعات پاین<sup>۳</sup> [۱۵] نشان داد که جبهه گاز توسط نوک ترک به دام می افتد، بهتر است گام زمانی طوری باشد که این فاصله زیاد بزرگ نباشد تا مسئله به شرایط واقعی نزدیکتر شود. واضح است که هرچقدر مسئله به بازه های کوچکتری تقسیم شود جوابها به مقدار واقعی خود نزدیکتر میشوند ولی زمان حل به شدت افزایش میابد.

جدول ۳- تحلیل حساسیت نتایج نسبت به زمان در نظر گرفته شده برای هر مرحله حل شبه استاتیکی.

مقادیر نهایی موقعیت نوک ترک	گام زمانی حل شبه استاتیکی (μs)
۱	۲۰
۰.۹۸۵	۳۰
۰.۹۸۵	۴۰
۰.۸۳۵	۱۰۰

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله اثر گاز حاصل از انفجار در گسترش ترک در اطراف چال، بصورت شبه استاتیکی، بررسی شد. به این منظور معادلات گاز بصورت تفاضل محدود حل شده و فاز جامد نیز با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته تحلیل میگردد. همچنین نتایج برنامه گاز با استفاده از داده های تجربی موجود مقایسه شد که نتایج قابل قبولی را نشان می دهد. از این الگوریتم به منظور مقایسه خرجهای مختلف شامل پتن، تی ان تی، امولسیون و اسلاری استفاده گردید و نتایج نشان داد قابلیت مواد منفجره در تولید گاز بیشتر وابسته به پارامترهای معادله حالت آنها است و چگالی ماده نشان دهنده قابلیت آن

<sup>۱</sup> Pre-Splitting Control Blasting

<sup>۲</sup> High Energy Gas Fracturing

<sup>۳</sup> Pianе



در تولید گاز نیست. همچنین با توجه به شبه استاتیکی بودن مسئله، تاثیر گام زمانی برای هر مرحله حل استاتیکی بر میزان گسترش ترک مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد در صورت زیاد نبودن خلا تولید شده در نوک ترک در اثر رشد ترک، تاثیری قابل ملاحظه‌ای در جوابها ندارد.

## ۱۲. مراجع

۱. Sasa, K., Ito, I., and Hanasaki, K., (۱۹۷۱), "Breakage of brittle material by quasi-static pressure of explosive gas," *Journal of the Japan Explosive Society* ۳۲(۱): ۹-۱۶.
۲. McHugh, S., (۱۹۸۳), "Crack extension caused by internal gas pressure compared with extension caused by tensile stress", *Int. J. of Fracture* ۲۱: ۱۶۳-۱۷۶.
۳. Nilson, R.H., Proffer, W. J., and Duff, R.E., (۱۹۸۵), "Modeling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole," *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science* ۲۲(۱): ۳-۱۹.
۴. Daehnke, A., Rossmannith, H.P., and Napier A.L., (۱۹۹۷), "Gas pressurization of blast-induced conical cracks," *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science* ۳۴(۳-۴): ۲۶۳.
۵. Munjiza, A., Latham, J.P., and Andrews K.R.F., (۲۰۰۰), "Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation," *Int. J. for Numerical Methods in Engineering* ۴۹: ۱۴۹۵-۱۵۲۰.
۶. Mohammadi, S., Bebamzadeh, A., (۲۰۰۵) "A coupled gas-solid interaction model for FE/DE simulation of explosion," *Finite element in analysis and design*, ۴۱: ۱۲۸۹-۱۳۰۸
۷. Mohammadi, S., Pooladi, A., (۲۰۰۷) "Non-uniform isentropic gas flow analysis of explosion in fractured solid media," *Finite Elements in Analysis and Design* ۴۳: ۴۷۸ - ۴۹۳, ۲۰۰۷
۸. Cho, S. H., Risei, K., Kato, M., Nakamura, Y., and Kaneko, K., (۲۰۰۲) "Development of numerical simulatin method for dyanmic fracture propagation due to gas pressurization and stress wave," *ISRM Regional Sym.(۳rd Korea-Japan Joint Symposium) on Rock Engineering Problem and Approaches in Underground Construction*, Jul. ۲۲-۲۴, Seoul, Korea, pp. ۷۵۵-۷۶۲.
۹. Cho, S.H., Nakamura, Y., and Kaneko, K., (۲۰۰۴) "Dynamic fracture process analysis of rock subjected to stress wave and gas pressurization," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, Vol. ۴۱, No. ۳, CD-ROM, Paper ۲A۲۰.
۱۰. Mohammadi, S., (۲۰۰۸) "Extended finite element method for fracture analysis of structure," Blackwell Publishing.
۱۱. Huitt, J. L., (۱۹۵۶) "Fluid flow in simulated fractures" *A.I.Ch.Jl* ۲(۲): ۲۵۹-۲۶۴
۱۲. Yang, R., Bawden, W.F., Katsabanis, P.D., (۱۹۹۶) "A new constitutive model for blast damage," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech*, Vol. ۳۳, pp. ۲۴۵-۲۵۴.
۱۳. Broek, D., (۱۹۸۸) "The practical use of fracture mechanics," Kluwer Academic Publishers.
۱۴. Minchinton, A., Lynch, P.M., (۱۹۹۶) "Fragmentation and heave modellign using a coupled discrete element gas flow code," ۵<sup>th</sup> international conference of rock fragmentation, ISBN ۹۰۵۴۱۱۰۸۲۴ X.
۱۵. Paine, A.S., Please, C.P., (۱۹۹۴) "An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting-some analytical results," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech*, Vol. ۳۱, pp. ۶۹۹-۷۰۶.