Download is permitted to HPC-Lab members and for educational purposes only

ارائه مدل عددی اندرکنش گاز و محیط ترک خورده پیرامونی در شبیه سازی انفجار با استفاده از روش Finite/Discrete Element

احمد پولادی هروی ، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه ، دانشگاه تهران

سهیل محمدی ، استاد یار گروه عمران دانشکده فنی ، دانشگاه تهران*

آرمین به بم زاده، کارشناسی ارشد عمران- سازه ، دانشگاه تهران

تلفن : ۶۱۱۲۲۵۸-۰۲۱ نمابر: ۶۴۰۳۸۰۸-۰۲۱ ، پست الکترونیکی : smoham@ut.ac.ir

چکیده :

در این مطالعه سعی بر آن است، تا با تکیه بر مسئله اندرکنش گاز و محیط ترک خورده، و با بهره گیری از مبانی مکانیک شکست و مکانیک تماس مدل نسبتا کاملی که توانایی شبیه سازی وقوع انفجار و انهدام محیط اطراف را داشته باشد، ارائه گردد.در این راستا برای مطالعه فاز گاز از اصول و قوانین ترمودینامیک و برای مطالعه فاز جامد از روش Finite/Discrete Element استفاده شده است.

کلید واژه ها : *شبیه سازی ، انفجار ، اندرکنش ، گاز ، محیط ترک خورده ، المان های مجزا*

۱- مقدمه:

در سالهای اخیر همزمان با پیشرفت تکنولوژی در زمینه علوم رایانه ای و توانایی انجام محاسبات سنگین توسط ریز پردازنده ها ، روشهای عددی نیز در عرصه های مختلف علمی به عنوان روشهایی به صرفه و قابل اطمینان در حل مسائل و بخصوص شبیه سازی پدیده ها ی پیچیده مورد توجه قرارگرفته اند. یکی از این پدیده ها، انفجار می باشد که تا چندی پیش تنها رویکرد ممکن به آن رویکرد تجربی یا تحلیلی بود؛ ولی در چند سال اخیر با توجه به افزایش توان محاسباتی رایانه ها، روشهای عددی در این زمینه مورد توجه قرار گرفته اند. تا کنون مدلهای عددی متعددی برای بررسی انفجار ارائه شده اند که بسته به نحوه مدل سازی فرایند انفجار و روشهای بکار رفته در تحلیل محیط دارای تفاوت هایی با یکدیگر هستند[۱و۲].در این مقاله نیزسعی بر آن بوده، تا با تکیه بر مسئله اندرکنش گاز و محیط ترک خورده، مدل نسبتا کاملی که توانایی شبیه سازی وقوع انفجار و انهدام محیط اطراف را داشته باشد، ارائه گردد.انفجار یک فعل و انفعال حرارت زا است که تقریباً آنی و در زمانی بسیار کوتاه صورت می گیرد و در نتیجه آن انرژی بسیار زیادی در کسری از ثانیه آزاد می گردد. این انرژی باعث ایجاد شتاب، تغییر شکل و نهایتا ترک خوردگی در محیط جامد پیرامونی می گردد. با گسترش ترکها و شکستگی ها،گاز تولید شده افزایش حجم یافته و نفوذ آن در ترکها و خلل و فرج ایجاد شده و همچنین کار انجام شده بر روی محیط جامد سبب کاهش فشار می شود. بنابر این پدیده انفجار یک مساله بهم پیوسته و در حقیقت اندرکنشی می باشد که ترک خوردگی و تلاشی محیط جامد را از یک سو و انبساط گاز تحت فشار و حرارت بسیار بالا را از سوی دیگر در بر می گیرد؛ [۱].

۲- فرایند انفجار:

انفجار فعل و انفعالی است که طی آن ماده منفجره در اثر یک واکنش شیمیایی توأم با تولید گرما و فشار زیاد، در زمانی بسیار کوتاه از یک حالت ملکولی ناپایدار به وضعیتی پایدار می رسد. با اینکه مدت زمان انفجار بسیار کوتاه (چند هزارم ثانیه) است باز هم مراحل مشخصی دراین فاصله زمانی وجود دارند. همزمان با تحریک مواد منفجره فعل و انفعالات مربوط به انفجار آغاز می شوند. سرعت این فعل و انفعالات در ابتدا پایین است، اما پس از اندکی سرعت این فعل و انفعالات بیشتر می شود. موج انفجار در شروع این حالت با سرعتی بیش از سرعت صوت در ماده منفجره حرکت می کند و سبب انفجار کامل آن می گردد. فعل و انفعالات فوق باعث آزاد شدن انرژی بسیار زیادی می شود که این انرژی موجب بروز ترک و شکست در محیط پیرامون خود می شود. انرژی حاصل از انفجار به دو صورت خودنمایی می کند؛ انرژی موج ضربه و انرژی ناشی از گازهای تولید شده. انرژی موج ضربه[۱] که آن را انرژی فشار انفجار[۲] نیز می نامند، ناشی از انتشار موج انفجار در ستون ماده منفجره می باشد. فشار موج، ضربه ای گذرا است که سبب شکاف ها و شکست های اولیه می شود اما تاثیر چندانی در تلاشی محیط ندارد. مقدار این انرژی به سرعت انفجار، چگالی و اجزاء تشکیل دهنده ماده منفجره بستگی دارد. انبساط گازهای حاصل از انفجار فشار زیادی را بر محیط پیرامون وارد می کند که همین فشار سبب گسستگی و پراکنش و انهدام می شود. مقدار انرژی و فشار این گاز تابع مقدار و دمای گاز تولید شده است؛[۳ و ۴] .

۳- الگوریتم :

از آنجا که انفجار یک مسئله اندرکنشی می باشد، معادلات آن بصورت ضمنی[۳] خواهند بود که حل عددی آن معمولا بسیار دشوار می باشد. برای حل این مشکل در مدل ارائه شده از روش نیمه ضمنی[۴] استفاده می کنیم. در این روش برای گام های زمانی بقدر کافی کوچک (نسبت به زمان کل انفجار)در هر مرحله ابتدا محیط جامد را بطور مستقل، تحت فشار گاز ناشی از انفجار تحلیل می کنیم. در مرحله بعد برای اعمال برهم کنش گاز و محیط ترک خورده پیرامونی، باید براساس حل بدست آمده برای محیط جامد مشخصات گاز را در شرایط جدید محاسبه کنیم و با اعمال نیروهای جدید حل مسئله برای گامهای بعدی ادامه می یابد.

۴ - روش تحلیل محیط انفجار:

انفجار رخدادی است که در آن با فرایند هایی نظیر شکست، ترک خوردگی و خرد شدن محیط اطراف روبرو هستیم؛ لذا برای مدلسازی چنین پدیده ای بایستی قادر به شبیه سازی عددی ترک خوردگی، انتشار ترک و شکست باشیم. در میان روشهای مختلف، روش ترکیبی Finite/Discrete Element

---

[۱] Shock Energy
[۲] Detonation Energy
[۳] Coupled
[۴] Semi-Coupled

که در سال های اخیر نظر بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است، با استفاده از المان های مجزا آزادی بیشتری برای مدل سازی و شبیه سازی محیط های ناپیوسته ای همچون محیط ترک خورده ناشی از انفجار را بدست می دهد.

در روش Finite/Discrete Element با بهره گیری از الگوریتم های " Contact Detection " امکان برخورد و تماس بین دو المان مجزا ارزیابی و با استفاده از الگوریتم های " Contact Interaction " نیروی تماس بین المان های مجزا اعمال می شود؛ بنابراین علاوه بر اندرکنش گاز با محیط خرد شده پیرامونی، اندرکنش قطعات خرد شده با یکدیگر نیز لحاظ می شود و نهایتا تصویر کاملی از فرایند وقوع انفجار و انهدام خواهیم داشت؛ [۵ و ۶] .

با توجه به مقیاس بزرگ مسائل انفجار و ترک خوردگی، پیچیدگی و حجم بالای داده ها و محاسبات از میان روشهای مختلف تحلیل دینامیکی غیر خطی، روش تفاضل مرکزی[۱] با گام های زمانی نا برابر بکار گرفته می شود؛ این روش امکان استفاده از گام های زمانی بسیار کوچک، جهت مدلسازی تماس و شکست در لحظه برخورد را فراهم می سازد. البته باید دانست که روش مذکور بصورت مشروط پایدار می باشد و لذا بایستی با کنترل گام های زمانی از ناپایدار شدن پاسخ ها جلوگیری نمود؛ [۵ و ۶] .

۵ - مدل رفتاری محیط انفجار:

رفتار مکانیکی سازه ها تا حد زیادی متاثر از مصالح مورد استفاده در آنها می باشد. رفتار محیط انفجار یعنی فاز جامد مسئله در مطالعه حاضر شبه شکننده در نظر گرفته شده که مصالحی نظیر سنگ و بتن را شامل می شود.رفتار چنین مصالحی تحت تنش های کششی شامل یک رفتار ذاتی غیر خطی قبل از رسیدن به تنش حد نسبی و سپس ایجاد و گسترش ریز ترک ها می باشد که حاصل آن بصورت پدیده نرم شدگی کرنش قابل مشاهده است. در تنش نهایی f_t این ترک ها بصورت بحرانی پخش شده و باز می شوند، یعنی شکست اتفاق می افتد.برای مدل کردن چنین رفتاری بایستی از مدل هایی استفاده کنیم که توانایی مدل کردن ترک خوردگی و همچنین وقوع شکست و باز شدگی را داشته باشند. از طرف دیگر شکست سازه ها بخصوص در مورد سازه هایی که مصالح آنها از نوع شکننده یا شبه شکننده می باشند، علاوه بر مصالح تا حد زیادی وابسته به هندسه سازه نیز می با شد، و می توان گفت در این حالت مکانیزم شکست بوسیله انرژی کشسانی مستهلک شده در سازه قابل تعریف است. بنا بر این با توجه به موارد فوق برای مدل کردن رفتار فاز جامد از مدل ترک مجزا[۲] در مکانیک شکست استفاده می گردد. در این مدل فرض می شود که ترک اولیه در حد نسبی شروع به باز شدن می کند و تا تنش نهایی که عملا ترک باز می شود ادامه می یابد.

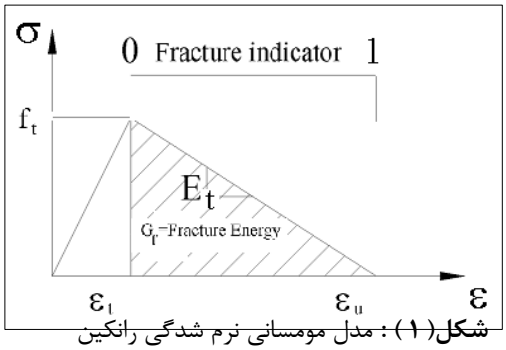
ایده اصلی مدل تنش ـ کرنش نرم شدگی، وابسته به انرژی شکست آن است که انرژی آزاد شده شکست، G_f، یک خاصیت مصالح است نه یک مشخصه از منحنی تنش ـ کرنش موضعی. فرض

---

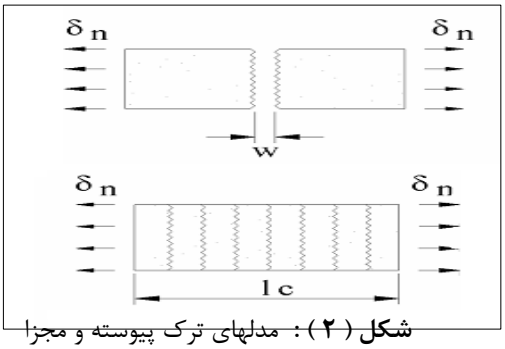
[۱] Explicit Central Difference Method

[۱] Discrete Cracks

ثابت = G_f نشان دهنده این مطلب است که رابطه نرم شدگی موضعی کرنش به یک منطقه شکست با طول مشخصه l_c که به مش اجزای محدود وابسته است، بستگی دارد.بنابر این ایده انرژی شکست یک شکل غیرموضعی برای رابطه نرم شدگی معادل ارائه می دهد که با شکلهای بنیادین نرم شدگی کرنش موضعی در تئوری مومسانی و شکست محیط های پیوسته متفاوت است.یکی از مدل هایی که در آن بوسیله یک روش ساده میتوان منطقه موضعی نرم شدگی کرنش[۱] را شبیه سازی کرد، مدل مومسانی نرم شدگی رانکین[۲] است که یک مدل نرم شدگی موضعی دو خطی می باشد؛ شکل(۱).
تعریف مقدار l_c نتیجه بیان انرژی شکست مدل ترک پیوسته بوسیله مدل ترک مجزا می باشد؛ شکل(۲) .



شکل(۱) : مدل مومسانی نرم شدگی رانکین



شکل (۲) : مدلهای ترک پیوسته و مجزا

در حالت کلی l_c مربوط به یک المان است و ازآنجاییکه وضعیت تنشی که باعث ایجاد ترک در مدل ترک مجزا می شود نسبت به محور المان اجزای محدود مایل خواهد بود، l_c برابر عرض المان نیست. با یک تقریب مناسب l_c برحسب سطح (مدل دوبعدی) یا حجم (مدل سه بعدی) المان تعریف می شود. با
داشتن l_c مدول نرم شدگی (شکل (۱)) بصورت زیر تعریف می شود:
(۱)

$$E_t = \frac{f_t^2 l_c}{2G_f}$$

همچنین، محل نقطه تنش روی شاخه نرم شدگی (شکل (۱)) که شاخص شکست نامیده می شود، در هر
نقطه میزان متلاشی شدن مصالح در آن نقطه را نشان می دهد.هنگام باز شدن ترک و وقوع شکست مقدار مشخصی انرژی در نوک ترک آزاد می شود؛ [۵ و ۶] .

۶- اندرکنش گاز و محیط ترک خورده :

[۲] Localization Zone
[۳] Rankine Softening Plastic Model

فرآیند انفجار باعث تغییر فاز مواد منفجره به یک گاز با فشار و دمای بالا می شود. انرژی موجود در این گاز باعث ترک خوردن و متلاشی شدن محیط پیرامون انفجار می شود؛ از سوی دیگر انبساط گاز و نفوذ آن در ترک ها و شکستگی های محیط، باعث کاهش فشار و دمای آن می گردد؛ [۱].

فرآیند توأمان ترک خوردگی محیط و انبساط و انتشار گاز در این محیط یک مسئله اندرکنشی و بهم پیوسته را نتیجه می دهد که آنالیز کامل آن یکی از مسائل پیچیده در روش های عددی است و نیاز به هزینه محاسباتی بسیار زیادی دارد. در مدل حاضر برای کاهش زمان محاسباتی در تحلیل رفتار گاز از یک مدل ساده شده استفاده می گردد. بدین ترتیب که برای اعمال اندرکنش در هر مرحله از تحلیل پس از آنالیز محیط ترک خورده و مشخص شدن وضعیت جدید محیط پیرامون انفجار، فشار گاز با استفاده از اصول اولیه ترمودینامیک برای شرایط جدید محاسبه می شود. فشار گاز محاسبه شده در هر مرحله ثابت است و بستگی به حجم محدوده مؤثر انفجار (محدوده ای مشخص پیرامون مرکز انفجار که فشار گاز در آن قابل توجه است) و ترک های ایجاد شده در این محدوده دارد و در بقیه نقاط فشار گاز صفر فرض می شود. فشار گاز محاسبه شده در هر مرحله ثابت است و بستگی به حجم محدوده مؤثر انفجار (محدوده ای مشخص پیرامون مرکز انفجار که فشار گاز در آن قابل توجه است) و ترک های ایجاد شده در این محدوده دارد و در بقیه نقاط فشار گاز صفر فرض می شود.در مدل حاضر برای محاسبه تغییرات فشار گاز در محیط، با فرض شرایط بی دررو و برگشت پذیری فرایند، از معادله حالت تصحیح شده گاز کامل استفاده می گردد. همانطور که می دانیم معادله حالت گاز کامل بصورت زیر بیان می شود:

(۲)

$$Pv^{\gamma'} = \text{Constant}$$

از آنجا که در انفجار با یک گاز با فشار و دمای بسیار زیاد سر و کار داریم، فرض گرمای ویژه ثابت و قانون عمومی گازها دچار تغییراتی می گردند؛ برای فشار و دمای بالای محصولات انفجار قانون عمومی گازها در شکل معمول آن بصورت:

(۳)

$$Pv = nRT$$

قابل استفاده نمی باشد و باید ضریب تصحیح α در این رابطه به شکل زیر اعمال گردد:

(۴)

$$P(v-\alpha) = nRT$$

$$\alpha = Co_Volume$$

با تصحیح فوق و میانگین گیری پارامترهای وابسته به دما، معادله حالت گاز در دما و فشار بالا را میتوان بصورت زیر بیان نمود:

$$Pv^{\gamma} = \text{Constan} \qquad (۵)$$

یعنی تاثیر دما و فشار بالای گاز در توان γ نمودار می شود. پارامتر γ از ویژگی های ترمودینامیکی یک گاز می باشد که برای گاز کامل بشکل $\gamma' = \left(\frac{C_p}{C_v}\right)$ و در مورد گازهای داغ حاصل از انفجار میتوان این پارامتر را میانگینی از γ' در معادله حالت گاز کامل تعبیر نمود؛ [۱ و ۳].

از آنجا که هدف از این پژوهش ارائه مدلی برای شبیه سازی انفجار و مطالعه اندرکنش گاز و محیط ترک خورده ناشی از انفجار می باشد، به محاسبات مربوط به ویژگی ها و شرایط گاز، حین انفجار و بلافاصله پس از آن نمی پردازیم؛ بنابر این در این مدل پارامترهایی نظیر جرم، دانسیته، γ و همچنین تغییرات فشار گاز حین وقوع انفجار جزء داده های مسئله فرض می شوند.

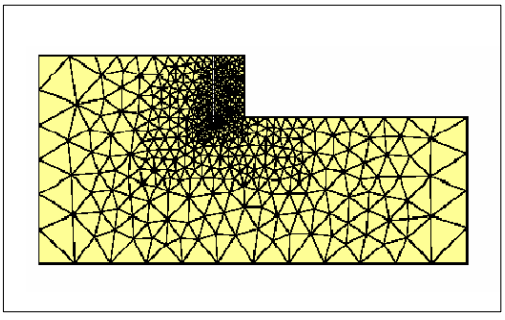
با محاسبه فشار گاز ناشی از انفجار در هر مرحله از تحلیل، این فشار با استفاده از الگوریتمی روی سطوح المان های مجزا اعمال و با نیروهای حاصل از تماس و اندرکنش المان ها جمع می گردد و محیط ترک خورده در مرحله بعد تحت این نیروها تحلیل شده و محاسبات ادامه می یابد.

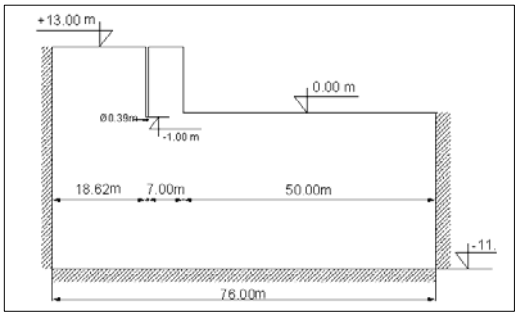
۷- شبیه سازی انفجار سنگ :

در این قسمت نمونه ای از کاربرد این مدل در شبیه سازی انفجار یک بلوک سنگی بررسی می شود. علی رغم اینکه اصولا انفجار پدیده ای سه بعدی می باشد در مدل مطالعاتی حاضر از یک مدل دو بعدی برای شبیه سازی استفاده می گردد، که شکل و ابعاد آن در شکل (۳) مشاهده می شود. بلوک سنگی مورد نظر دارای ارتفاع ۱۳ و عرض ۷ متر می باشد؛ برای انفجار این بلوک از یک سری چال های انفجاری به عمق ۱۴ و قطر ۰/۳۸ متر در فواصل ۷ متری استفاده می شود؛ هر یک از این چال ها محتوی ۹ متر $ANFO$ با دانسیته ۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشند که با سرعتی معادل ۱۷۲۵ متر بر ثانیه منفجر و فشاری برابر با $۳/۴ * ۱۰^{۸} Pa$ درون چال ایجاد می کنند. همچنین مشخصات مکانیکی ماده سنگی عبارتند از: $E = 28000MPa$,

$$\nu = 0.1, \rho = 4200\ kg/m^3, G_f = 250\ N.m/m^2$$

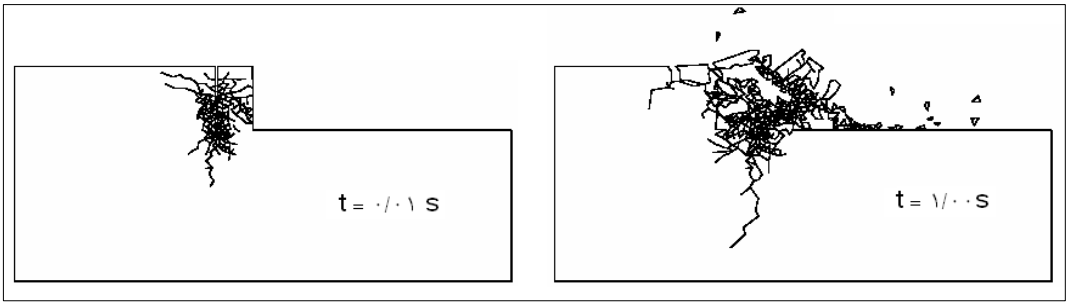
در مش بندی و حل مسئله، از روش تحلیل تطبیقی "adaptive" استفاده شده که مش بندی مربوط به آن در شکل (۴) ، در لحظه $t = 0$ sec نشان داده شده است. در شکل های (۵) و (۶) نتایجی از این شبیه سازی، شامل الگوی شکست و تخریب بلوک و توزیع تنش در آن بصورت گرافیکی مشاهده می شود. پاسخ های بدست آمده برای تغییرات فشار گاز داخل چال انفجار(شکل(۷)) تطبیق خوبی با نتایج بدست آمده از مدل های مشابه مرجع [۲]، (شکل(۸)). داردکه این امر نشان دهنده صحت پاسخ های بدست آمده می باشد.



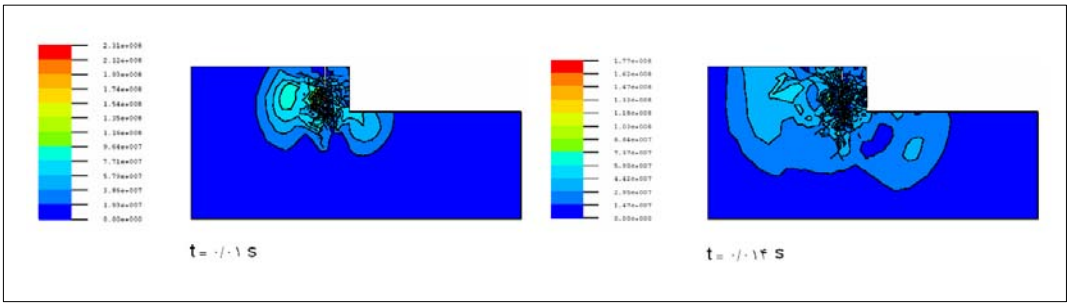


شکل (۳) : ابعاد بلوک سنگی

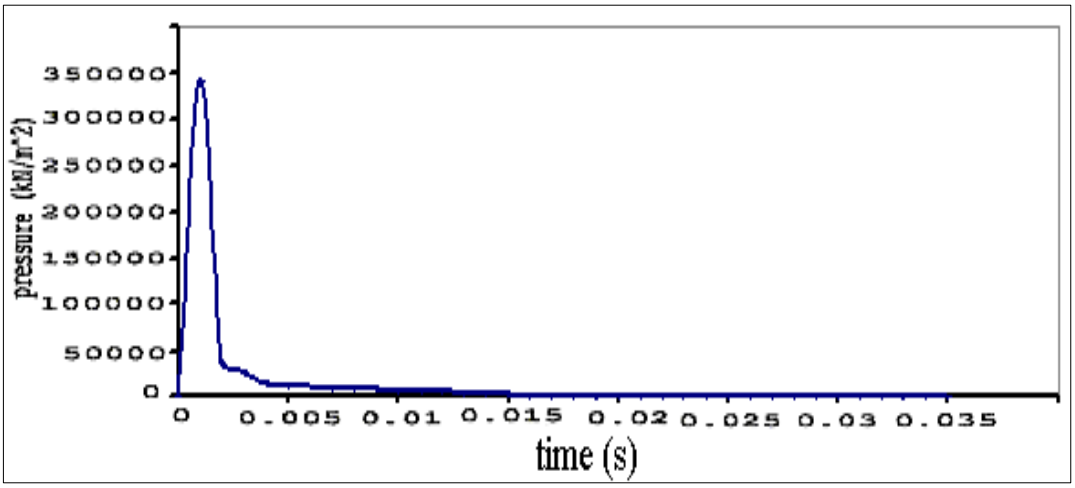
شکل (۴) : مش بندی بلوک سنگی



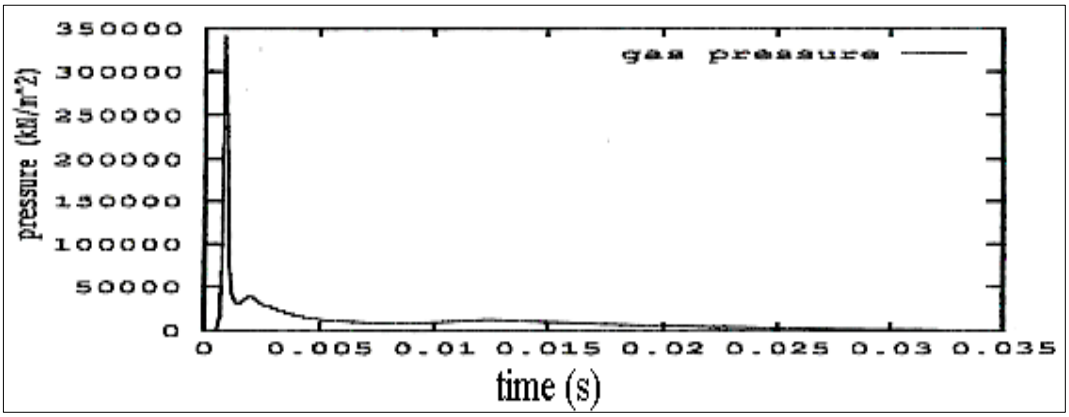
شکل (۵) : الگوی ترک خوردگی و شکست در لحظات مختلف



شکل (۶) : تنش مؤثر در لحظات مختلف



شکل (۷) : تغییرات فشار گاز داخل چال انفجار بر حسب زمان در مدل ارائه شده



شکل (۸) : تغییرات فشار گاز داخل چال انفجار بر حسب زمان در مدل مرجع [۲]

۸ - نتیجه گیری :

در این مطالعه سعی بر آن بود تا با تکیه بر اندرکنش گاز و محیط ترک خورده پیرامون آن، و با بهره گیری از مبانی مکانیک شکست و مکانیک تماس مدل نسبتا کاملی که توانایی شبیه سازی وقوع انفجار و انهدام محیط اطراف را داشته باشد، ارائه گردد.در این راستا برای مطالعه فاز گاز از اصول و قوانین ترمودینامیک و برای مطالعه محیط پیرامون انفجار از روش Finite/Discrete Element و الگوریتم های " Contact Detection "و " Contact Interaction " استفاده شده است.

در این مدل روند شروع، گسترش و پیشرفت احتراق در داخل مواد منفجره تا انفجارکامل همه مواد، بطور کامل شبیه سازی می شود. علاوه بر این با استفاده از این مدل می توان تأخیرهای زمانی مابین انفجارها در یک سری انفجار متوالی، با مواد منفجره متفاوت را شبیه سازی نمودکه از این ویژگی می توان در تخریب های کنترل شده، بررسی رفتار سازه های زیر زمینی از قبیل تونل ها و پناهگاه ها در برابر انفجار و شبیه سازی عملیات آتشکاری معادن بهره برد.

مراجع:

[۱] به بم زاده، آرمین، "بررسی اندرکنش گاز و سازه در محیط ترک خورده ناشی از انفجار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

[2] Munjiza.A, " Discrete Elements in transient dynamics of fractured media", Ph.D.thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Wales Swansea UK, 1992.

[3] William Hustrulid, " Blasting Principles for open pit mining, Theoretical Foundations,V 2", Published by A.A.Balkema , Rotterdam in Netherlands.

[۴] استوار، رحمت ا... ،" آتش کاری در معادن (جلد اول و دوم)" ، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر .

[5] Mohammadi.S, "Computational Contact Mechanics", Lecture notes, Dept. of Civil Engineering, University of Tehran, 2001.

[6] Mohammadi.S, "Discontinume Mechanics by Finite and Discrete Elements", WIT Press, 2003.

[7] Munjiza.A, Owen.D.R.J,Bicanic.N.A, "combined Finite-discrete element method in transient dynamics of facturing solids", International journal of engineering computations, V 12, 1995, pp 145-174.