

استفاده از یک مدل اندرکنش جریان گاز - فاز جامد برای شبیه سازی انفجار در محیطهای سنگی

سهیل محمدی

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

تلفن: ۶۱۱۲۲۵۸، فکس: ۶۴۰۳۸۰۸، Email: smoham@ut.ac.ir

آرمین به بزم زاده

کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده:

در این مقاله یک الگوریتم المانهای مجزا برای تحلیل دینامیکی رفتار توده‌های سنگی ترک خورده تحت اثر انفجار ارایه می‌یابد. مدل پیشنهادی اندرکنش گاز - سازه امکان لحاظ نمودن خطوط وجوه یا اجسام جدید ایجاد شده در مدل اولیه ناشی از ترک خوردگی و قطعه قطعه شدن را دارا می‌باشد. یک معادله بنیادی رفتاری برای محاسبه ارتباط گاز انفجار و ترک خوردگی سنگ انتخاب شده است و برای تعیین فشار گاز انفجار بکار می‌رود. مدل بکار رفته برای جریان گاز انفجار به یک الگوریتم منطقی برای محاسبه توزیع فشار گاز انفجار در محیط انجامیده است. مدل رفتاری پلاستیسیته نرم شدگی رانکین (Rankine strain softening) به شکل موثری برای مدلسازی سنگ در مسائل انفجار بکار گرفته شده است. نتایج این تحقیق عددی میتواند بصورت راهنمایی در مسائل انفجار و تخریب مورد استفاده قرار گرفته، ابزاری مطمئن را برای تحلیل مسائل پیچیده مرتبط با اثر انفجار بر سازه‌ها ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی:

جریان گاز، المانهای مجزا، المانهای محدود، اندرکنش گاز سازه

۱- مقدمه

انفجار یکی از ساده ترین روشهای ایجاد قطعات کوچکتر از توده‌های بزرگ مواد است. بعنوان نمونه، با انفجار مواد منفجره در چالهای حفر شده، قطعات بزرگ سنگ ترک خورده و به قطعات کوچک تقسیم می‌شوند. در مقابل، مدلسازی عددی یک محیط سالم یا ترک خورده در برابر بارهای دینامیکی ناشی از انفجار، یکی از سخت‌ترین مسائل محاسباتی است که در آن چندین موضوع مستقل مکانیکی نظیر پلاستیسیته، مکانیک شکست، دینامیک گازها و رفتار شیمیایی مکانیکی انفجار دخالت دارند.

همچنین یک تقابل قوی مابین فازهای گاز و جامد وجود دارد. انفجار سبب تغییر فاز ماده منفجره به یک گاز با فشار و دمای بالا می‌شود. انبساط گاز و جریان آن در بازشدگیهای ناشی از ترک خوردگی به همراه جذب انرژی تغییر شکل جسم جامد سبب کاهش فشار گاز خواهد شد.

مدلهای متعددی در سالهای اخیر برای تعیین فشار گاز پیشنهاد شده است [۱-۴]. ساده ترین مدل مبتنی بر استفاده از یک منحنی فشار - زمان است که توسط کاربر تعریف می‌شود. این مدل فاقد هرگونه رفتار اندرکنشی است و نتیجه تحلیل ترک خوردگی به انتخاب کاربر وابسته خواهد بود. از طرف دیگر، چندین مدل جریان گاز نیز پیشنهاد شده است که به نحوی جریان گاز انفجار را در بازشدگی ترکها منظور می‌نمایند [۳-۴].

در این مقاله، روش توأم المانهای محدود / المانهای مجزا با معادلات دینامیک گاز و محیطهای متخلخل ترکیب شده است تا رفتار دینامیکی توده‌های سنگی ترک خورده را در مکانیسم انفجار مدلسازی نماید [۴-۶]. قانون پلاستیسیته نرم شونده رانکین برای مدلسازی ایجاد و گسترش ترک خوردگی در سنگ بکار می‌رود که برای مدلسازی انفجار در سنگ کاملاً مناسب می‌باشد. نتایج این مطالعه عددی می‌تواند بصورت راهنما در مسائل انفجار و تخریب مورد استفاده قرار گیرد.

۲- محیطهای متخلخل

معادله بقای جرم برای فازهای جامد یا گاز یک محیط متخلخل با دیدگاه میکروسکوپی بصورت زیر قابل بیان می‌باشد [۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{r}) = 0 \quad (1)$$

که ρ چگالی فاز و \mathbf{r} سرعت آن می‌باشد. در صورتیکه این معادله در دیدگاه ماکروسکوپی برای فاز جامد بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{D^s(1-n)\rho^s}{Dt} + \rho^s(1-n)\text{div}\bar{\mathbf{V}}^s = 0 \quad (2)$$



که \bar{V}^g سرعت متوسط جسم جامد و ρ^g چگالی متوسط فاز معادل می‌باشد. بطور مشابه برای فاز گاز،

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho^g) + \text{div}(n\rho^g \mathbf{V}^g) = 0 \quad (3)$$

معادله ماکروسکوپی بقا ممتنم خطی عبارت است از:

$$\eta^\pi \mathbf{V}^\pi = \frac{\mathbf{k}k^{\pi g}}{\mu^\pi} [-\text{grad}p^\pi + \rho^\pi (\mathbf{g} - \mathbf{a}^s - \mathbf{a}^\pi)] \quad (4)$$

که η^π نسبت حجمی، μ^π ویسکوزیته دینامیکی، \mathbf{a}^π شتاب نسبی، \mathbf{k} تانسور نفوذپذیری محیط و $k^{\pi g}$ پارامتر نفوذپذیری نسبی است.

با صرف نظر کردن از شتابهای نسبی و فاز جامد، معادله (۴) به معادله مشهور دارسی تبدیل می‌شود. همچنین با صرف نظر کردن از شتاب ثقل \mathbf{g} و $\mathbf{V}_s = 0$ ،

$$n\mathbf{V}^g = \frac{\mathbf{k}k^{rg}}{\mu^g} (-\text{grad}p^g) \quad (5)$$

در نهایت با ترکیب معادلات جرم و مومنتوم خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho^g) + \text{div}\left[\frac{\mathbf{k}k^{rg}\rho^g}{\mu^g}(-\text{grad}p^g)\right] = 0 \quad (6)$$

۳- تقابل دوگانه اندرکنش گاز- سازه

در این بخش، یک روش نسبتاً ساده که نخستین بار توسط مونیزا [۵] پیشنهاد شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر مبنای این روش، فشار گاز در داخل چال انفجار و سطوح ترک خورده محیط جامد اطراف آن در هر لحظه مقدار ثابتی فرض می‌شود و فقط تابعی از حجم چال و الگوهای ترک خوردگی

جره به یک
دگی بهمراه

مدل مبتنی
هرگونه رفتار
نیگر، چندین
ترکها منظور

ای متخلخل
لسازی نماید
گی در سنگ
دی می‌تواند

ورت زیر قابل

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}$

ویی برای فاز

$\frac{D^s(1-n)}{Dt}$

متناظر آن می‌باشد. فشار گاز فقط بر گره‌های محیط جامد که بصورت مستقیم با گاز مرتبطاند (که با توجه به حجم گاز تعیین می‌گردند) اعمال می‌شود.

انرژی داخلی یک گاز کامل U ، فقط تابعی از حرارت می‌باشد؛ به بیان دیگر:

$$T = a \left(\frac{U}{M} \right)^b = aQ^b \quad (7)$$

که T دمای گاز، M جرم گاز و a و b ثوابت گاز می‌باشند. با استفاده از قانون عمومی گازهای کامل و با توجه به $\rho = M/V$:

$$P = \bar{R}\rho T = \bar{R}T \frac{M}{V} \quad (8)$$

و صرف نظر کردن از هرگونه انرژی حرارتی ورودی به سیستم، معادله اساسی محاسبه فشار گاز پس از انجام یکسری محاسبات جبری بدست می‌آید (۴):

$$\ln p = \ln p_r + b \left[\ln \left(\frac{Q}{Q_r} \right) - \frac{1}{\bar{R}a(1-b)} Q_r^{1-b} \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_r} \right)^{1-b} \right] \right] \quad (9)$$

که P_r, Q_r مقادیر اولیه P, Q می‌باشند.

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف، یک مخزن صلب که از مواد منفجره پر شده است در نظر گرفته می‌شود. ماده منفجره پس از انفجار به گازی با چگالی ρ تبدیل می‌شود. مقدار جرمی که از مخزن خارج می‌شود عبارت است از:

$$\Delta M = AV\Delta t\rho \quad (10)$$

و معادله بقاء ممنتوم مخزن،



$$PA = \int_A \int V(\rho V \cdot dA) \quad (11)$$

که با احتساب تغییرات تدریجی از صفر به یک مقدار حداکثر، به معادله زیر منجر می‌شود:

$$PA = \frac{1}{2} \rho V^2 A, \quad U = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (12)$$

جرم گاز خروجی ΔM و کار انجام شده توسط آن ΔW ، که سبب حرکت مخزن در جهت مخالف می‌گردد، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta M = A \Delta t \sqrt{2P\rho} \quad (13)$$

$$\Delta W = Q \Delta M = Q A \Delta t \sqrt{2P\rho} \quad (14)$$

جدول ۱، الگوریتم پیشنهادی را بصورت یک روند گام به گام ارائه می‌دهد.

جدول ۱- الگوریتم محاسبه فشار گاز

<p>۱- برای یک زمان معین t و جرم مشخص M_t، حجم V_t، چگالی $\rho_t = M_t / V_t$، انرژی U_t و $Q_t = U_t / M_t$</p> <p>۲- محاسبه فشار p در زمان t</p> $Lnp = Lnp_r + b \left(\ln \left(\frac{Q}{Q_r} \right) - \frac{1}{Ra(1-b)} Q_r^{1-b} \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_r} \right)^{1-b} \right] \right)$ <p>۳- محاسبه کار ΔW_t گاز و اعمال فشار بر روی مدل اجزاء محدود جسم جامد به منظور محاسبه تغییر مکانها در گام زمانی بعدی $t + \Delta t$</p> <p>۴- محاسبه جرم خارج شده از سیستم $M_{t+\Delta t} = M_t - A \sqrt{2P_t \rho_t} \cdot \Delta t$</p> <p>۵- محاسبه انرژی داخلی گاز $U_{t+\Delta t} = U_t - \Delta W_t - Q_t (M_{t+\Delta t} - M_t)$</p> <p>۶- محاسبه حجم در زمان $t + \Delta t$، $V_{t+\Delta t} = V_t - \frac{\Delta W_t}{P_t}$</p> <p>بازگشت به گام ۱ با شرط $t = t + \Delta t$</p>
--

ا گاز مرتبطاند (که با

$$T = a \left(\frac{U}{M} \right)^b =$$

عمومی گازهای کامل

$$P = \bar{R} \rho T = \bar{R}$$

ه فشار گاز پس از

$$Lnp = Lnp_r +$$

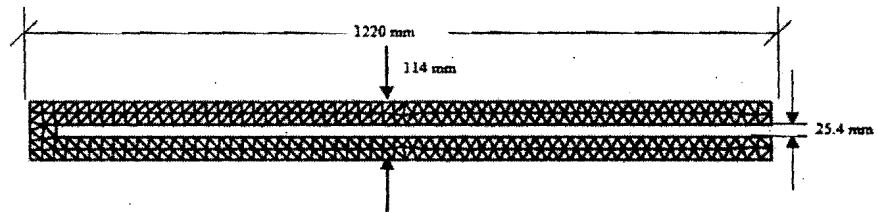
ه است در نظر گرفته
نرمی که از مخزن

$$\Delta M = AV \Delta t f$$

۴- مدل‌سازی‌های عددی

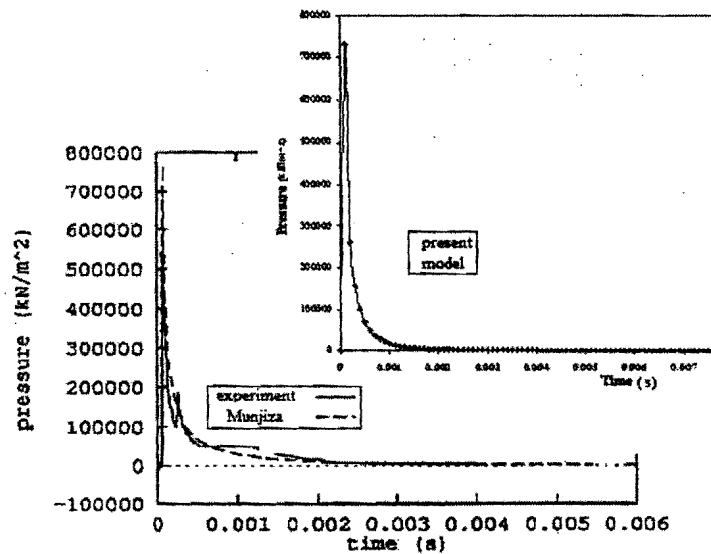
۴-۱- مثال ۱

یک مخزن سخت که با یک نوع ماده منفجره با جرم کل $m = 0.148 \text{ kg}$ ، چگالی $\rho = 240 \text{ kg/m}^3$ و سرعت انفجار $VOD = 1725 \text{ m/s}$ پر شده است در شکل ۱ دیده می‌شود.



شکل ۱- مدل‌سازی اجزاء محدود یک مخزن انفجاری

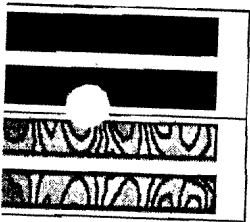
شکل ۲، نتایج تاریخچه فشار ناشی از انفجار که بوسیله مونیزا [۵] ارائه شده است را با نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی این مقاله مقایسه می‌نماید و تطابق خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مقایسه تاریخچه فشار محاسبه شده با نتایج مرجع [۵]

استفاده از یک مدل اندرکنده
سهیل محمدی، آرمین بهیم زاد

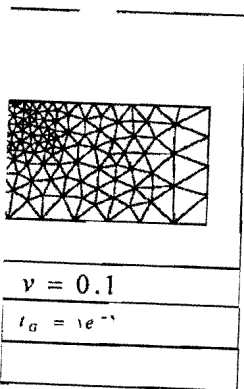
شکل ۳، کنتورهای تنش
انتهای آزاد مخزن، حباب
می‌کند.



شکل ۳- کنته

۴-۲- مثال ۲

بعنوان یک مثال عملی تر،
مدلسازی می‌گردد. مشخص
مختلف روند انفجار سنگ
شده، با ترک خوردگی در
می‌پذیرد.



شکل ۴

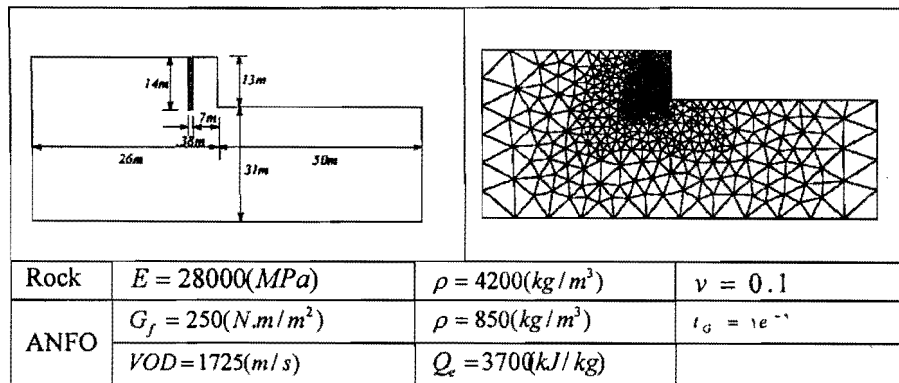
شکل ۳، کنتورهای تنش موثر را در چند زمان متوالی نشان می‌دهد. با تکمیل انفجار مواد به سمت انتهای آزاد مخزن، حباب تنش بصورت پیوسته از انتهای بسته مخزن به سمت انتهای آزاد آن حرکت می‌کند.



شکل ۳- کنتورهای تنش موثر در زمانهای مختلف +۳/ و +۹/ میلی ثانیه

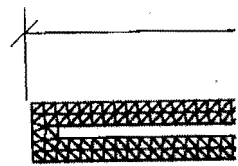
۲-۴- مثال ۲

بعنوان یک مثال عملی تر، یک تست انفجار در یک پله سنگی مطابق شکل ۴ بوسیله مش اجزاء محدود مدلسازی می‌گردد. مشخصات مواد سنگی و انفجاری ANFO مطابق شکل ۴ می‌باشد. شکل ۵ مراحل مختلف روند انفجار سنگ را در زمانهای مختلف نشان می‌دهد؛ به صورتیکه با انفجار ماده منفجره شروع شده، با ترک خوردگی در سنگ ادامه یافته و با ریزش و پخش مواد سنگی در نواحی اطراف پایان می‌پذیرد.



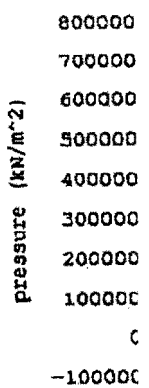
شکل ۴- هندسه مسئله، مش اجزاء محدود و مشخصات مواد

$m = 0.148kg$ چگالی
ت در شکل ۱ دیده می‌شود.



باری

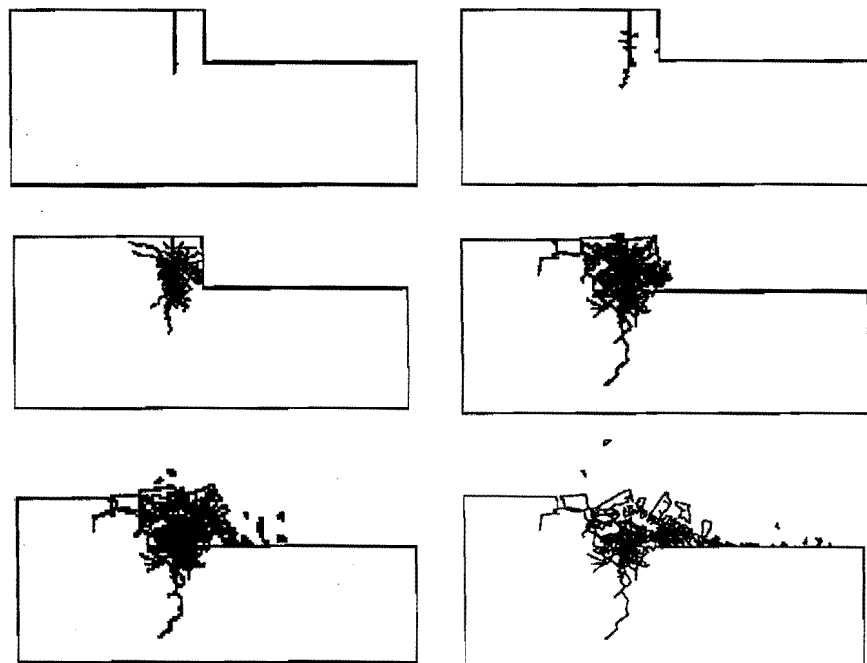
ه است را با نتایج حاصل از
..



رجع [۵]

۶- مراجع

open pit mining,
lands
(3); Coupled gas
to bench blast
(7); (dynamic
ournal of blasting
(00); Detonation
at simulation of
al for numerical
ent dynamics of
s Swansea.
ics Using Finite
; Finite Element
nd Consolidation



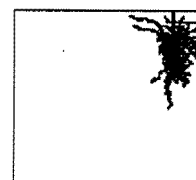
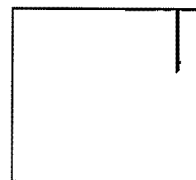
شکل ۵- ترک خوردگی و گسیختگی در زمانهای ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۵/۰۰۱ ثانیه

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل اندرکنش گاز حاصل از انفجار با محیط جامد ترک خورده توسعه یافته، در یک بستر المانهای محدود/ المانهای مجزاء برنامه نویسی شده است. این مدل به منظور بررسی رفتار پیچیده انفجار در محیطهای سنگی که در آن ترک خوردگی و قطعه قطعه شدن گستردهای بروز می کند، بکار می رود. روش پیشنهادی امکان پیش بینی الگوهای ترک خوردگی و قطعه قطعه شدن و محدوده پخش قطعات سنگی را فراهم می سازد. مدلسازی های عددی تطابق مناسبی را با اطلاعات و داده های موجود نشان داده است. اگرچه در نمونه های حل شده از وجود ترک و درزه اولیه در توده سنگ صرف نظر شده است، ولی همین الگوریتم می تواند بدون تغییر و فقط در صورت تعریف درزه ها در مدل هندسی اولیه بکار رود. الگوریتم پیشنهادی می تواند بعنوان راهنماهای عددی برای مسائل انفجار سنگ در معادن باز، تونلسازی و غیره بکار رود.

۶- مراجع

- [1] Hustrulid, W.; (1999); "Blasting principles for open pit mining, Theoretical Foundations", 2, A. A. Balkema, Netherlands
- [2] Preece, D. S. , Burchell, S. L. , Scovira, D. S, (1993); Coupled gas flow and rock motion modeling with comparison to bench blast field data. In Proceedings Fragblast-4; 239-247
- [3] Daehnke, A. , Rossmanith, H. , Schatz, J. F.; (1997); On dynamic gas pressure induced fracturing. International journal of blasting and fragmentation; 1:59-73
- [4] Monjiza, A. , Latham, J. P. , Andrews K. F. (2000); Detonation gas model for combined finite-discrete element simulation of fracture and fragmentation", International journal for numerical methods in engineering. 49:1495-1520
- [5] Munjiza, A. (1992); "Discrete elements in transient dynamics of fractured media". Ph. D. thesis, University of Wales Swansea.
- [6] Mohammadi, S. (2003); "Discontinuum Mechanics Using Finite and Discrete Elements", WIT Press, UK
- [7] Lewis, R. W. , Schrefeler, B. A. (1998); "The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media", Second edition. England



۰/۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ ثانیه

سعه یافته، در یک بستر
رفتار پیچیده انفجار در
کنده، بکار می‌رود. روش
پخش قطعات سنگی را
نشان داده است. اگرچه
ت، ولی همین الگوریتم
ود. الگوریتم پیشنهادی
تغیره بکار رود.