

## تحلیل عددی تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج حاصل از انفجار در ماده بسپاری پلکسی گلاس

حسن بخشنده امنیه<sup>۱\*</sup> و عبدالرحیم جواهریان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه معدن، دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان، ایران

<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و استاد بازنشسته، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۸/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

### چکیده

در این تحقیق تأثیر ضخامت ماده پُرکننده یک ناپیوستگی قائم بر انتشار امواج حاصل از انفجار ماده منفجره پتن (PETN) در ماده بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس با برنامه رایانه‌ای UDEC شبیه‌سازی شده است. برای این منظور فشار دینامیکی نرمال و یکنواخت ۱۱ گیگاپاسکال روی دیواره چال انفجاری به قطر ۵/۰۸ میلی‌متر اعمال شد. ماده پُرکننده از نوعی رزین مخصوص انتخاب شد. مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی ذره، حداکثر سرعت ذره و تنش‌های ایجاد شده در طرفین ماده پُرکننده در حالت رفتار کشسان محیط برآورد شد. ضریب بازتاب به‌دست آمده از این روش انطباق خوبی را با نتایج حاصل از روش تحلیلی نشان می‌دهد. هنگامی که ضخامت ماده پُرکننده از ۵ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد ضریب عبور انرژی از ۲۸٪ به ۸/۷٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین رابطه‌نمایی ضریب عبور انرژی حاصل از روش عددی به تحلیلی براساس ضخامت ماده پُرکننده با ضریب همبستگی ۰/۹۹۶۲ برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عددی، ماده پُرکننده، انتشار امواج، انفجار، پلکسی گلاس

## Investigating the effect of filling material thickness on blast-induced stress wave in plexiglass by numerical analysis

Bakhshandeh Amnieh, H.<sup>1</sup> and Javaherian, A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran,

<sup>2</sup> Presently Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology and Formerly Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 09 Nov 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

### Abstract

In blasting operations different proportions of the energy released are consumed in fragmenting the rock mass, heating up the surrounding and some portion of it is used in propagating blast waves, causing vibration of the particles in the nearby environment. However, reflections, transmissions and absorptions lead the attenuation of these waves. The influence of the extent of rock-mass discontinuities and different thickness of layers in fragmentation efficiency and stability of the mine steps are important for controlling the ground vibrations in the vicinity of blast holes. Hence, predicting the influence of blast-induced waves on the surrounding should be carried out prior to the operation for safety concerns. The main criterion for evaluating the damage caused by the blasting includes the particle displacement analysis, peak particle velocity, particle acceleration, changes in the applied stress waves and frequency contents. Research activities in this

area could be classified into the followings: field studies, experimental investigations, analytical and numerical methods; the first two are expensive, and the analytical methods are often based on the unrealistic simplifications with respect to the rockmass behavior. However, the numerical methods by far offer a cost effective, speedy and reliable analysis. In this article, the effect of filling material thickness on the wave propagation of PETN blasting in a vertical discontinuity in plexiglass has been investigated using UDEC simulation. For this purpose, a uniform normal pressure dynamic of 11.0GPa was applied on a 5.08mm diameter blasthole wall. This dynamic pressure was obtained using a semi-empirical Liu and Tidman correlation. The shockwave caused by the blasting was assumed to be a triangular pulse, having a 0.05ms duration. A polymeric plexiglass, with dimensions of 230×114.3 mm was used for this study. Super glue was used as the filling material. Having considered the fixed geometrical involved, the influence of the filling material thickness (5, 10, 15, 20 and 25 mm) were investigated in a cylindrical blasthole vertically drilled (with large length to diameter ratio and complete decoupling). Peak particle horizontal displacement, peak particle velocity and induced stresses on either sides of the vertical discontinuity were measured in the elastic behaviour mode of the surrounding media. The energy reflection coefficient (ERC) and the energy transmission coefficient (ETC) obtained from the numerical analysis showed a good agreement with those of the analytical ones. However, the ETC in the numerical method decreased from 28% to 8.7% when filling material thickness increased from 5 to 25 mm, while this remained constant at 50 % for analytical method. An exponential correlation has been proposed showing the relationship between the ETC obtained from the numerical and analytical methods, with a correlation coefficient of 0.9962. Increased filling material thickness led to nonlinear reduction of both PPV and stress wave, and considering the constant reflection coefficient, it also led to the transmission coefficient being reduced exponentially while energy absorption increased exponentially, too.

**Key words:** Numerical analysis, Filling material, Blast wave propagation, Plexiglass

## ۱ مقدمه

سنگ ناشی از انفجار، پایداری و ناپایداری پله‌های معادن و کنترل میزان ارتعاش‌ها و لرزش‌های زمین در مناطق نزدیک و دور از انفجار حائز اهمیت است. به‌همین دلیل به‌منظور کنترل عملیات انفجار، باید قبل از عملیات انفجار، پیش‌بینی اثر امواج حاصل از انفجار در محیط صورت گیرد. مهم‌ترین معیار ارزیابی و پیش‌بینی مقدار خسارت ناشی از لرزش بررسی تغییرات جابه‌جایی ذره، حداکثر سرعت ذره، شتاب ذره، تغییرات تنش‌های اعمال شده به محیط و محتوی بسامدی است. فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه را می‌توان در چهار بخش اندازه‌گیری‌های میدانی، آزمایشگاهی، روش‌های تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی کرد. اندازه‌گیری‌های صحرائی و

در اثر انفجار ماده منفجره بخشی از انرژی ماده منفجره صرف خردشدن محیط دربرگیرنده ماده منفجره می‌شود، بخشی نیز به‌صورت گرما و گاز در محیط منتشر می‌شود و بخش زیادی از آن به‌صورت امواج منتشر شده و ذرات محیط را به ارتعاش در می‌آورد. اما بازتاب‌ها و عبورهای متعدد موج و جذب انرژی در فصل مشترک سطوح منجر به تضعیف انتشار موج می‌شوند (کای و زاو، ۲۰۰۰). بنابراین در طراحی و حفاظت سازه‌های سطحی و زیرزمینی، بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار و ساختارهای گوناگون زمین اهمیت فراوانی دارند (ژیائو و زاو، ۲۰۰۴). فهم اثرات و نقش ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ و تغییر ضخامت لایه‌های توده‌سنگ در بازدهی خردشدگی

خشک است و رفتار تغییر شکل کشسان خطی دارد. هو و همکاران (۲۰۰۲) از مفهوم مکانیک شکست در بررسی پاسخ دینامیکی یک منطقه گرانیتهی به امواج ناشی از انفجار استفاده کردند و اثرات درزه‌ها و ترک‌های توده‌سنگ بر انتشار امواج را با استفاده از خصوصیات معادل ماده سنگ مورد بررسی قرار دادند. لیو و همکاران (۲۰۰۴) پاسخ دینامیکی شیب سنگی فسفریتی و درزه‌دار به امواج ناشی از انفجار را به روش عددی شبیه‌سازی کردند. در این تحقیقات مقادیر جابه‌جایی ذره، حداکثر سرعت دره و تنش وارد شده به شیب شبیه‌سازی و با نتایج اندازه‌گیری شده صحرائی مقایسه شده است. بخشنده و همکاران (b و ۱۳۸۴a) سازوکار انتشار امواج حاصل از انفجار را در یک توده‌سنگ گرانیتهی و در محیط‌های سنگی دارای صفحات لایه‌بندی بررسی کردند. بخشنده و جواهریان (۱۳۸۶) تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی ناشی از انفجار را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق چگونگی انتشار و اثر امواج ضربه‌ای حاصل از انفجار یک چال استوانه‌ای به قطر ۵/۰۸ میلی‌متر و انفجار محیط بسیاری پلکسی‌گلاس در محدوده‌ای به ابعاد ۲۳۰ میلی‌متر در ۱۱۴/۳ میلی‌متر شامل یک ناپیوستگی چسبیده شده با نوعی رزین و با استفاده از نرم‌افزار المان مجزا (Universal Distinct Element Code) UDEC که دارای قابلیت تحلیل دینامیکی است بررسی و با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) مقایسه شد. اختلاف مقادیر حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۱/۶ میلی‌متری قبل و بعد از ناپیوستگی به روش آزمایشگاهی و روش عددی مقایسه شد. با توجه به مقادیر ضرایب بازتاب، عبور و جذب قبل و بعد از ناپیوستگی، بیشتر انرژی جبهه موج طولی حاصل از انفجار ماده منفجره پتن از ناپیوستگی عبور کرده است.

آزمایشگاهی در بررسی مسائل دینامیکی و غیرخطی انتشار امواج تنش حاصل از انفجار هزینه‌بر و گران است و روش‌های تحلیلی نیز بر فرضیات و ساده‌سازی‌های غیرواقعی از شرایط توده‌سنگ مبتنی است.

روزمانیس و همکاران (۱۹۹۴) با روش تفاضل محدود اندرکنش امواج کشسان با سطح تماس دو ماده غیر یکسان را مورد تحقیق قرار دادند و گسترش تخریب سطح تماس آن را بررسی کردند. هان (۱۹۹۵) به‌جای مدل کردن مستقیم درزه و ترک‌های توده‌سنگ، اثرات آنها را با استفاده از نیروی گره‌ای معادل جایگزین و تحت امواج صفحه‌ای بررسی کرد. بنابراین وابستگی مدل به توزیع مش‌ها که از معایب روش‌های عددی مانند مدل المان درزه‌دار است، حذف شد. فن و همکاران (۱۹۹۶) روی امواج سطح مشترک یک شکستگی با استفاده از روش المان مرزی تحقیق کردند. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی حضور هر دو نوع موج ریلی و فشاری را نشان دادند. خوشرو و موهانتی (۱۹۹۶) تأثیر ناپیوستگی‌ها روی میدان تنش ناشی از انفجار کنترل شده روی سطح دیواره همچنین در اطراف چال‌های انفجار و اثرات آنها روی توزیع تنش را با استفاده از روش عددی بررسی کردند. برای این منظور مدل دو بُعدی المان محدود تهیه و اثر یک سطح آزاد، یک درزه عمود و موازی نسبت به سطح آزاد بررسی شد. چن و زاو (۱۹۹۸) امکان استفاده از روش المان مجزا به منظور مدل کردن انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده‌سنگ درزه‌دار خشک را بررسی کردند. کای و زاو (۲۰۰۰) اثرات شکستگی‌های متوالی و موازی صفحه‌ای روی میرایی امواج کشسان یک بُعدی و عمود بر صفحات را بررسی کردند. در این مقاله اثر زاویه برخورد حذف شده و روی اثرات سختی، فاصله و تعداد شکستگی‌ها تمرکز شده است. محدودیتی از نظر فاصله بین شکستگی‌ها وجود نداشته است و در تحلیل‌ها فرض شده که شکستگی

از ویژگی‌های ماده بسپاری پلکسی گلاس و ماده منفجره برای محاسبه فشار انفجار استفاده شده است.

$$P_m = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left( \frac{\rho_p \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right)^{0.25} \quad (1)$$

که  $\rho_e$  چگالی ماده منفجره بر حسب  $gr/cm^3$ ،  $VOD$ ، سرعت انفجار ماده منفجره بر حسب  $km/s$ ،  $\rho_p$  چگالی پلکسی گلاس بر حسب  $gr/cm^3$ ،  $V_p$ ، سرعت موج طولی بر حسب  $km/s$  و  $P_m$ ، حداکثر فشار دینامیکی روی دیواره چال بر حسب  $kbar$  است.

مقادیر عددی چگالی، سرعت موج تراکمی و مقاومت لرزه‌ای محیط پلکسی گلاس به ترتیب برابر  $1.19 gr/cm^3$ ،  $2249 m/s$  و  $10^6 kg/m^2 \cdot s$ ،  $2/68$  است (فورنی و همکاران، ۱۹۷۸). مقادیر عددی چگالی، سرعت موج تراکمی و مقاومت لرزه‌ای محیط رزین به ترتیب برابر  $1.07 gr/cm^3$ ،  $830 m/s$  و  $10^6 kg/m^2 \cdot s \times 0.89$  است (کوپر، ۱۹۹۹). خصوصیات ماده منفجره پتن و هندسه چال انفجاری در جدول ۱ بیان شده است. با قرار دادن این مقادیر در معادله (۱) مقدار حداکثر فشار دینامیکی (فشار انفجار) برابر ۱۱ گیگاپاسکال می‌شود. موج ضربه‌ای ناشی از انفجار به صورت یک تب (پالس) مثلثی ساده شده با طول زمانی  $0.05$  میلی‌ثانیه که حاصل از حداکثر فشار انفجار معادل ۱۱ گیگاپاسکال است به دیواره یک چال انفجاری به قطر  $5/08$  میلی‌متر وارد شده است.

## ۲-۱ هندسه مدل و شرایط مرزی

ماده بسپاری پلکسی گلاس مدل‌سازی شده برای تحلیل تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج حاصل از انفجار در محدوده‌ای به ابعاد  $230$  میلی‌متر در  $152$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. خرج انفجاری پتن به صورت استوانه‌ای در پلکسی گلاس جانمایی و با توجه به طول

در این مقاله، با در نظر گرفتن شرایط هندسی ثابت در ماده بسپاری پلکسی گلاس، تأثیر ضخامت ماده پُرکننده از جنس نوعی رزین مخصوص به ابعاد  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  میلی‌متر با استفاده از نرم‌افزار UDEC بررسی شده است. در این مدل عملکرد امواج حاصل از انفجار یک خرج استوانه‌ای شامل تغییرات جابه‌جایی افقی ذره، تغییرات حداکثر سرعت ذره نسبت به زمان، تغییرات تنش‌های اعمال شده به محیط بر اثر عبور جبهه موج فشاری و ضرایب بازتاب، عبور و جذب واقع در طرفین ماده پُرکننده در محدوده انفجار در محیط پلکسی گلاس به‌طور مجزا بررسی شده است.

## ۲ تحلیل عددی تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج

به منظور حل عددی تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج حاصل از انفجار، یک نمونه بسپاری از نوع آکریلیک به نام پلکسی گلاس با نوعی رزین مخصوص در حکم ماده پُرکننده در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی ماده پُرکننده با ضخامت‌های  $5$ ،  $10$ ،  $15$  و  $20$  میلی‌متر استفاده شده است. فرض بر این است که در این نمونه یک چال استوانه‌ای به صورت قائم با نسبت طول به قطر بسیار زیاد و جفت‌شدگی کامل حفر و با ماده منفجره پتن خرج‌گذاری شود. مشخصات چال و خرج مورد استفاده آن در جدول ۱ آورده شده است.

اندازه‌گیری مستقیم فشار انفجار غیرممکن بود و محققان و شرکت‌های زیادی از جمله لیو، تیدمان، شرکت اطلس و انجمن ملی راه‌روابطی را با استفاده از معادلات تعادل شیمیایی مواد منفجره پیشنهاد کرده‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۰۷). حداکثر فشار دینامیکی اعمال شده بر دیواره محفظه انفجار (فشار انفجار) با استفاده از رابطه نیمه‌تجربی لیو و تیدمان (۱۹۹۵) ارزیابی شد. در این رابطه

بین  $\frac{1}{8}$  تا  $\frac{1}{10}$  طول موج منتشر شده در محیط باشد.

$$\frac{\lambda}{10} \leq \Delta l \leq \frac{\lambda}{8} \quad (2)$$

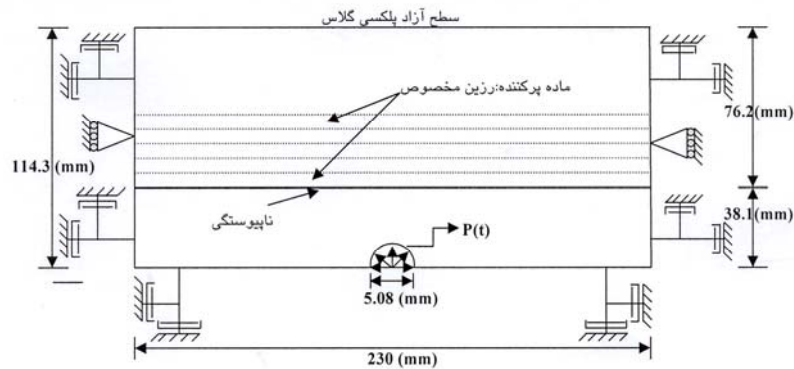
که در آن،  $\lambda$ ؛ طول موج ورودی است. با توجه به خصوصیات کشسان محیط، سرعت موج طولی در محیط پلکسی گلاس برابر  $2249 \text{ m/s}$  محاسبه و به منظور یکنواختی توزیع مش در مدل هندسی، اندازه مش معادل  $1 \text{ mm}$  انتخاب شد. رفتار ماده بسپاری پلکسی گلاس برای محدوده مورد بررسی تحت عملکرد انفجار به صورت کشسان بررسی شده است.

### ۳ نتایج تحلیل عددی تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج

نتایج تحلیل عددی حاصل از تأثیر ضخامت ماده پُرکننده ناپیوستگی بر انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط پلکسی گلاس با استفاده از مدل رفتاری کشسان شامل تغییرات حداکثر جابه‌جایی افقی ذره، حداکثر سرعت ذره نسبت به فاصله از محل انفجار، تغییرات تنش‌های اعمال شده به مدل بر اثر عبور جبهه موج فشاری، برآورد ضرایب بازتاب و عبور و برآورد مقدار انرژی بازتابی و عبوری از ماده پُرکننده است. این نتایج حاصل اجرای برنامه از زمان صفر (شروع فرایند) تا  $57/89$  میکروثانیه است که درباره آنها بحث می‌شود.

زیاد چال انفجاری نسبت به قطر آن، مسئله به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات و در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی، محدوده‌ای به ابعاد  $230$  میلی‌متر در  $114/3$  میلی‌متر شبیه‌سازی و با توجه به ماهیت مسئله یک مقطع دو بُعدی در میان ارتفاع چال در نظر گرفته شد. موقعیت ماده پُرکننده در ماده بسپاری در فاصله  $38/1$  میلی‌متری از مرکز چال قرار گرفته و با نوعی رزین به هم متصل شده و به طور مشابه مواد پُرکننده به ضخامت  $5$ ،  $10$ ،  $15$ ،  $20$  و  $25$  میلی‌متر ناپیوستگی را پُر کرده است. ابعاد مدل با اعمال شرایط مرزی محدود و برای جلوگیری از بازتاب ناخواسته امواج از مرزهای مدل به داخل آن، از نوع مرزهای میراگر انتخاب شده است (گروه آیتاسکا، ۲۰۰۰). بنابراین شرایط مرزی میراگر برای مرزهای دو طرف مدل و مرز پایینی مدل اعمال شد. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های بُرشی مرزهای دو طرف مدل ثابت شده‌اند. برای بررسی اثر بازتاب از سطح آزاد، مرز بالایی مدل فاقد هرگونه محدودیتی است. در شکل ۱ هندسه مدل شامل ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، موقعیت ناپیوستگی با مواد پُرکننده و شرایط مرزی آورده شده است.

کولمیر و لیسمر (۱۹۷۳) روشن ساختند که برای تحلیل درست و منطقی انتشار موج به روش عددی، اندازه المان استفاده شده برای مش‌بندی محیط،  $\Delta l$ ، بایستی



شکل ۱. هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت چال، ابعاد چال، موقعیت ناپیوستگی و مواد پُرکننده و شرایط مرزی.

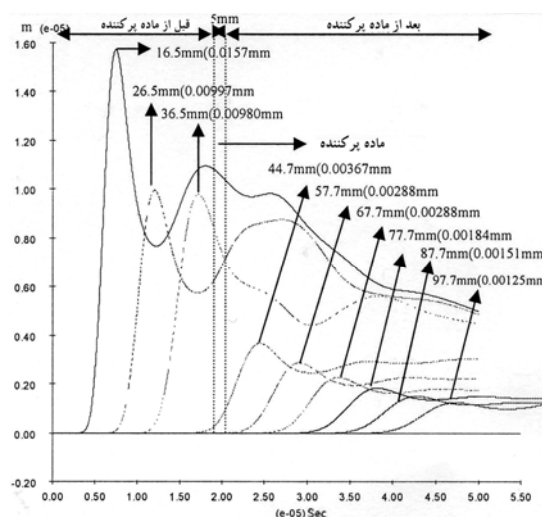
جدول ۱. خصوصیات ماده منفجره پتن و هندسه چال انفجاری (اخوان، ۱۹۹۸).

ردیف	خصوصیات	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی ماده منفجره پتن	$(\rho_e)$	۱/۶	$(gr/cm^3)$
۲	سرعت انفجار پتن	$(VOD)$	۷۹۲۰	$(m/s)$
۳	شعاع چال انفجاری	$(b)$	۲/۵۴	$(mm)$

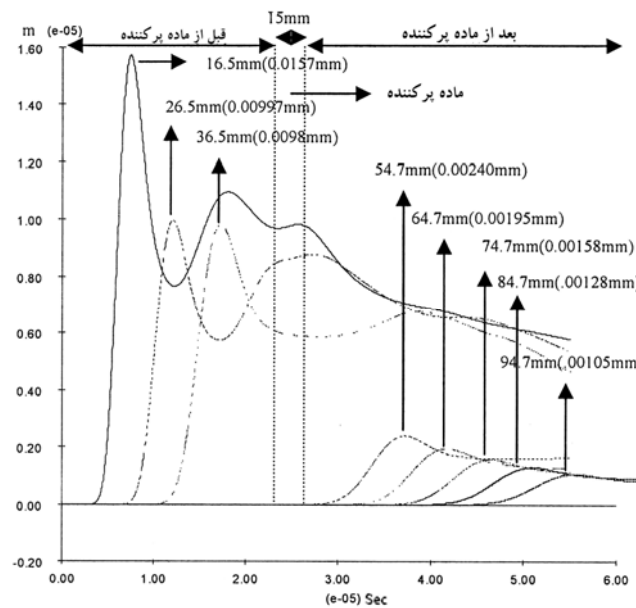
است. به دلیل تأثیر بازتاب موج از ماده پُرکننده و ایجاد اغتشاش در مدل شیب نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره نسبت به زمان پس از عبور جبهه موج قبل از ماده پُرکننده بیشتر از شیب نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره برای فواصل دور و بعد از ماده پُرکننده است. با انتشار جبهه موج طولی در محیط و برخورد آن به ماده پُرکننده، با توجه به ضرایب مقاومت لرزه‌ای محیط‌های اول و دوم و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محیط دوم، بخش زیادی از انرژی موج طولی جذب و بازتاب می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با دور شدن از محل انفجار، مقدار حداکثر جابه‌جایی ذره کاهش یافته است.

۱-۳ تغییرات جابه‌جایی افقی ذره بر اثر عبور جبهه موج از ماده پُرکننده

با انفجار ماده منفجره و انتشار موج در مدل، جابه‌جایی افقی ذره در فاصله ۳۶/۵ میلی‌متری از مرکز چال یا ۱/۶ میلی‌متری قبل از ماده پُرکننده برابر ۰/۰۰۹۸ میلی‌متر می‌شود. پس از عبور جبهه موج از ماده پُرکننده با ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر، مقدار جابه‌جایی افقی ذره به ترتیب برابر ۰/۰۰۳۶۷، ۰/۰۰۲۹۷، ۰/۰۰۲۴۰، ۰/۰۰۱۷۴ و ۰/۰۰۱۴۲ میلی‌متر کاهش یافته است. نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره در ماده بسپاری پلکسی‌گلاس با ماده پُرکننده از جنس رزین مخصوص با ضخامت‌های ۵ و ۱۵ میلی‌متر در فاصله ۱۶/۵ میلی‌متری تا ۹۷/۷ میلی‌متری در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده



شکل ۲. نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی افقی ذره در محیط پلکسی‌گلاس برای فواصل ۱۶/۵ تا ۹۷/۷ میلی‌متری از مرکز چال با ماده پُرکننده به ضخامت ۵ میلی‌متر در حالت کشسان.



شکل ۳. نمودار تغییرات حداکثر جابه‌جایی افقی ذره در محیط پلکسی‌گلاس برای فواصل ۱۶/۵ تا ۹۴/۷ میلی‌متری از مرکز چال با ماده پُرکننده به ضخامت ۱۵ میلی‌متر در حالت کشسان.

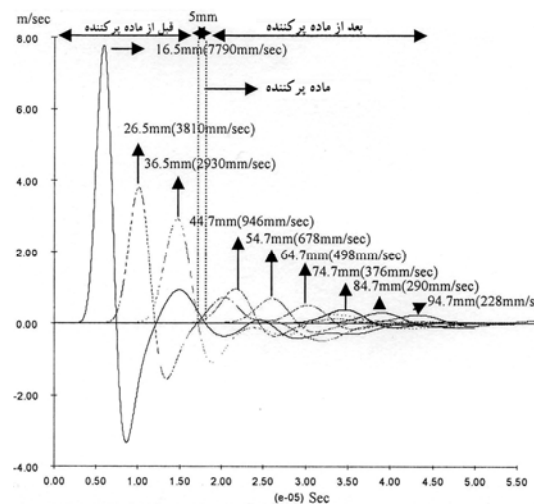
سرعت ذره به‌طور نمایی کاهش یافته است. توزیع حداکثر سرعت ذرات و نحوه انتشار جبهه موج در اطراف چال انفجاری و چگونگی برخورد، بازتاب و عبور جبهه موج از ماده پُرکننده پس از گذشت زمان‌های ۱۵/۷۹، ۲۶/۳۱ و ۵۷/۸۹ میکروثانیه از لحظه انفجار و برای ضخامت‌های ۵ و ۱۵ میلی‌متر در شکل‌های ۶ تا ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، پس از برخورد جبهه موج فشاری به ماده پُرکننده از جنس رزین مخصوص در محیط پلکسی‌گلاس، به‌دلیل تغییر مقاومت لرزه‌ای دو محیط بخشی از انرژی موج طولی در فصل مشترک دو محیط بازتاب می‌یابد و بخشی نیز عبور می‌کند و جذب می‌شود. با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود که جبهه موج طولی پس از رسیدن به فصل مشترک دو محیط در زمان ۱۵/۷۹ میکروثانیه ماده پُرکننده به ضخامت ۵ میلی‌متر را طی کرده و از آن خارج شده است. اما در همین زمان در حال عبور از ماده پُرکننده با ضخامت ۱۵ میلی‌متر در محیط پلکسی‌گلاس است. با توجه به شکل ۱۰ جبهه موج طولی در ماده بسپاری

### ۲-۳ تغییرات حداکثر سرعت ذره‌ای بر اثر عبور جبهه موج از ماده پُرکننده

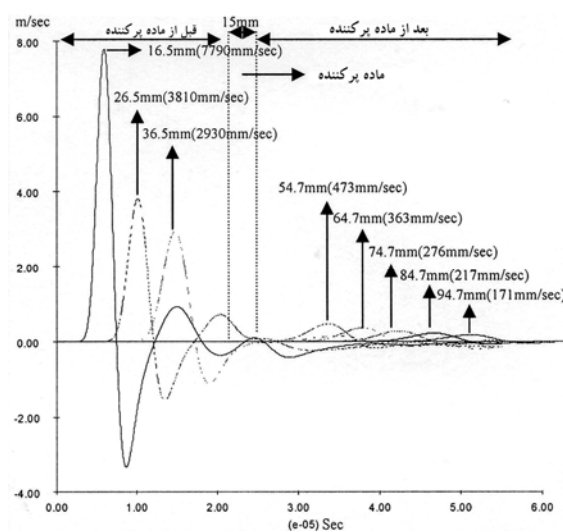
با شروع انفجار پس از تشکیل جبهه موج ضربه‌ای و انتشار آن در محیط پلکسی‌گلاس، حداکثر سرعت ذره در فاصله ۱/۶ میلی‌متری قبل از ماده پُرکننده برابر ۲۹۳۰ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شد. پس از عبور جبهه موج طولی از ماده پُرکننده با ضخامت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر مقدار حداکثر سرعت ذره‌ای به ترتیب به ۹۴۶، ۶۵۱، ۴۷۳، ۳۲۸ و ۲۴۴ میلی‌متر بر ثانیه کاهش یافته است. تغییرات حداکثر سرعت ذره پس از عبور جبهه موج طولی در محیط مدل‌سازی شده پلکسی‌گلاس با ماده پُرکننده از جنس رزین مخصوص با ضخامت‌های ۵ و ۱۵ میلی‌متر برای فواصل ۱۶/۵ میلی‌متری تا ۹۴/۷ میلی‌متری در زمان ۷۰/۱۷ میکروثانیه از لحظه انفجار در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با عبور جبهه موج از میان ماده پُرکننده بخش زیادی از انرژی موج طولی جذب و بخش کمی از آن عبور کرده است. با افزایش فاصله از محل انفجار، حداکثر

موج طولی از ماده بسیاری پلکسی گلاس با ماده پُرکننده با ضخامت ۵ میلی متری عبور کرده است این در حالی است که جبهه موج طولی در همین زمان در حال عبور از ماده پُرکننده با ضخامت ۱۵ میلی متر در محیط پلکسی گلاس است. شکل انتشار جبهه‌های موج بازتابی و عبوری پس از برخورد به ماده پُرکننده منظم است. با انتشار جبهه موج در محیط پلکسی گلاس و برخورد آن به سطح آزاد، به دلیل تغییر مقاومت لرزهای محیط، بخشی از انرژی موج در سطح آزاد جذب و بخشی از آن بازتاب می‌شود.

پلکسی گلاس با ضخامت ۵ میلی متری در زمان ۵۷/۸۹ میکروثانیه به سطح آزاد رسیده و جبهه موج بازتابی در حال برگشت به ماده پلکسی گلاس است. بزرگ‌نمایی برخورد جبهه موج بازتاب و عبور از فصل مشترک ماده بسیاری پلکسی گلاس و ماده پُرکننده رزین مخصوص با ضخامت ۵ میلی متر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل دامنه موج ورودی بزرگ‌تر از دامنه موج عبوری است. همچنین به دلیل کاهش سرعت انتشار موج در ماده پُرکننده در زمان ۲۱/۰۵ میکروثانیه جبهه



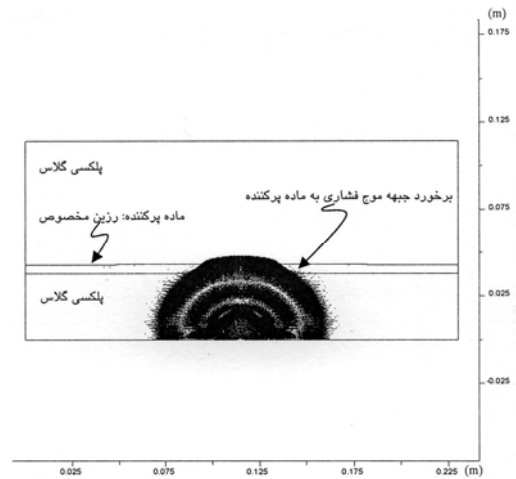
شکل ۴. نمودار تغییرات حداکثر سرعت ذره پلکسی گلاس با ماده پُرکننده با ضخامت ۵ میلی متر در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۴/۷ میلی متری در حالت کشسان.



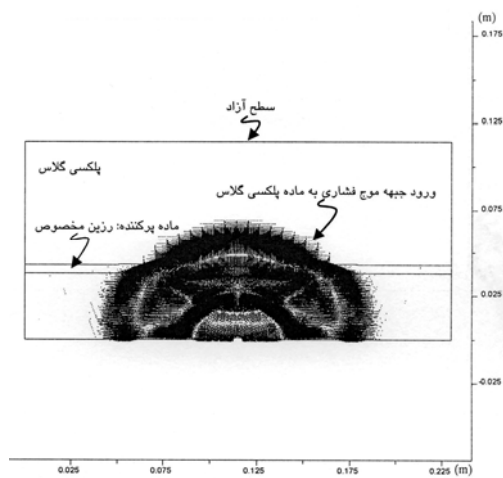
شکل ۵. نمودار تغییرات حداکثر سرعت ذره پلکسی گلاس با ماده پُرکننده با ضخامت ۱۵ میلی متر در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۴/۷ میلی متری در حالت کشسان.



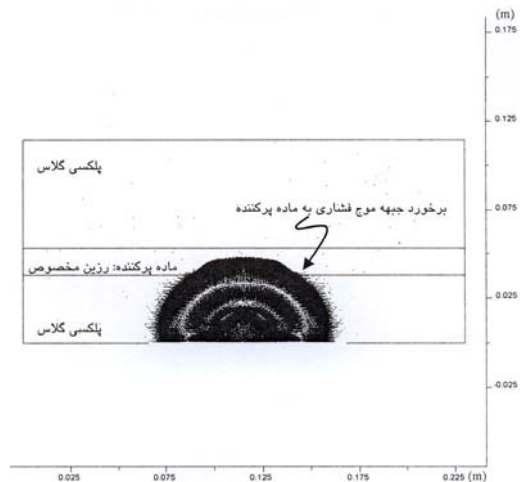
فاصله ۱/۶ میلی‌متری قبل و بعد از ماده پُرکننده از ۴/۹ مگاپاسکال به ۲/۶۶ و ۱/۸۳ مگاپاسکال کاهش یافته، درحالی‌که مقدار فشار اولیه وارد بر دیواره چال ۱۱ گیگاپاسکال بوده است. در اثر عبور جبهه موج از یک نقطه، تنش فشاری ایجاد می‌شود و تغییر شکل‌های کشسان ایجاد شده بعد از عبور جبهه از آن نقطه تقریباً برگشت پذیرند که این نشان‌دهنده وجود تنش کششی در آن نقطه است.



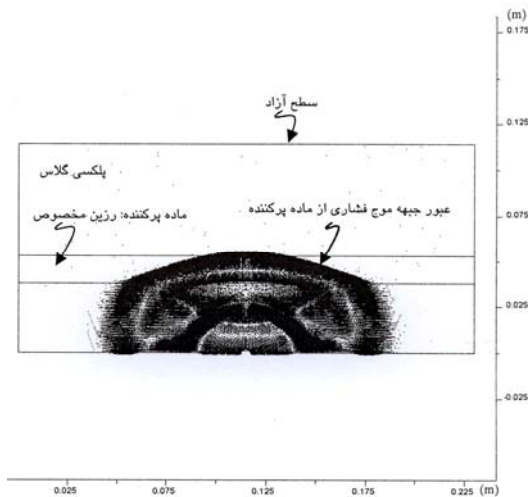
شکل ۶. توزیع بُردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۱۵/۷۹ میکروثانیه برای ماده پُرکننده با ضخامت ۵ میلی‌متر.



شکل ۸. توزیع بُردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۲۶/۳۱ میکروثانیه برای ماده پُرکننده با ضخامت ۵ میلی‌متر.



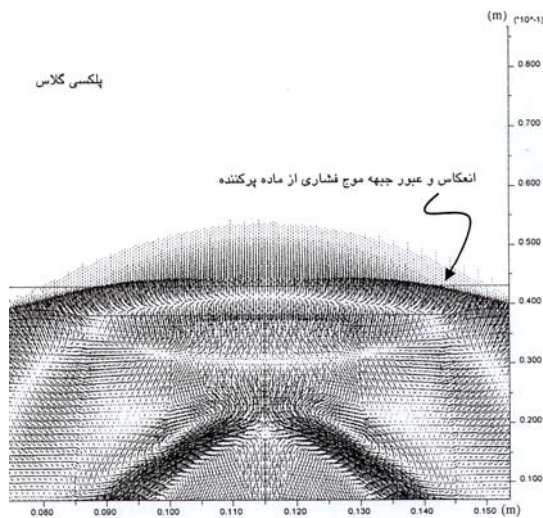
شکل ۷. توزیع بُردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۱۵/۷۹ میکروثانیه برای ماده پُرکننده با ضخامت ۱۵ میلی‌متر.



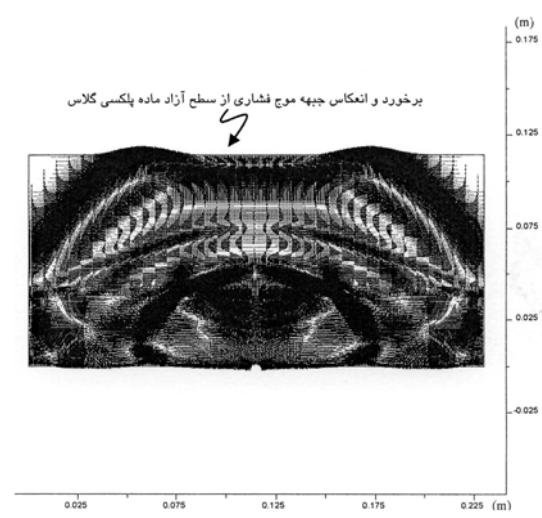
شکل ۹. توزیع بُردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۲۶/۳۱ میکروثانیه برای ماده پُرکننده با ضخامت ۱۵ میلی‌متر.

### ۳-۳ تغییرات تنش‌های اعمال شده در مدل بر اثر عبور جبهه موج از ماده پُرکننده

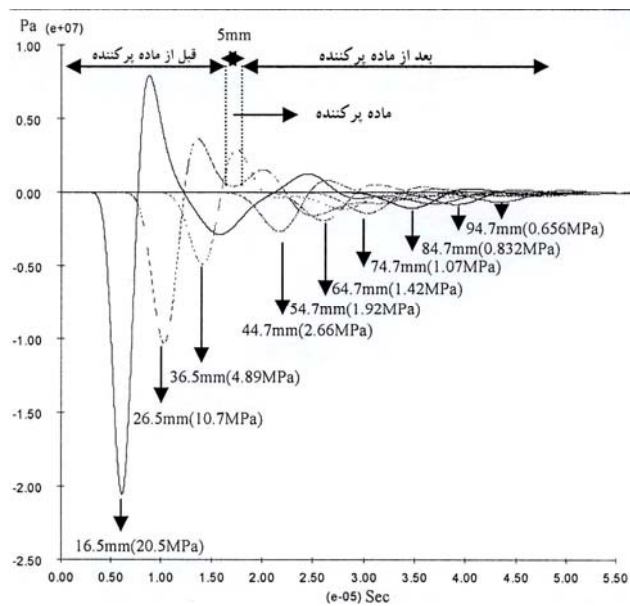
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات تنش فشاری اعمال شده در محیط پلکسی‌گلاس با ماده پُرکننده به ضخامت‌های ۵ و ۱۵ میلی‌متری در اثر عبور جبهه موج در فاصله ۱۶/۵ میلی‌متری تا ۹۴/۷ میلی‌متری از مرکز چال انفجاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در حالت کشسان مقدار حداکثر تنش فشاری به ترتیب در



شکل ۱۱. بزرگ‌نمایی بازتاب و عبور جبهه موج طولی از ماده پُرکننده به ضخامت ۵ میلی‌متر در زمان ۲۱/۰۵ میکروثانیه.



شکل ۱۰. توزیع بُردار حداکثر سرعت ذره در اطراف چال انفجاری در زمان ۵۷/۸۹ میکروثانیه برای ماده پُرکننده با ضخامت ۵ میلی‌متر.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۴/۷ میلی‌متری از محل انفجار در محیط پلکسی‌گلاس با ماده پُرکننده رزین با ضخامت ۵ میلی‌متر در حالت کشسان.

بخش دیگری از این انرژی را در طی مسیر انتشار موج، محیط و فصل مشترک جذب می‌کند و مابقی نیز به محیط دوم وارد می‌شود. دامنه‌های امواج بازتاب شده و عبور کرده در فصل مشترک دو لایه با معادلات زوپریتز (Zoeppritz) تعیین می‌شود. در حالت کشسان در برخورد

### ۳-۴ مقایسه نتایج حاصل از روش‌های عددی المان

#### مجزا، آزمایشگاهی و تحلیلی

هنگامی که جبهه موج به صورت نرمال به فصل مشترک دو محیط برخورد می‌کند، به‌علت تغییر ناگهانی در خواص کشسان محیط، بخشی از انرژی موج بازتاب می‌شود.

شده ( $E_R$ ) و انرژی عبور کرده ( $E_T$ ) از فصل مشترک دو محیط از روابط زیر به دست می آید.

$$E_R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (9)$$

$$E_T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (10)$$

در این محیط مجموع انرژی‌های بازتابی و عبوری و جذب شده در فصل مشترک دو محیط برابر واحد است (شریف و گلدارت، ۱۹۹۵).

در جدول ۲ مقادیر حداکثر سرعت ذره قبل از ناپیوستگی به روش آزمایشگاهی و همچنین مقادیر عددی حداکثر سرعت ذره و تنش‌های اعمال شده قبل و بعد از ماده پُرکننده برای پنج ضخامت ماده پُرکننده نشان داده شده است. مقادیر ضریب بازتاب و عبور برای دو محیط بسیاری پلکسی گلاس و رزین برای روش‌های عددی و تحلیلی در جدول ۳ و مقادیر شار انرژی ورودی، بازتابی، عبوری و درصدهای انرژی بازتابی و عبوری در جدول ۴ آورده شده است.

نرمال جبهه موج به فصل مشترک روابط زیر حاکم است (شریف و گلدارت، ۱۹۹۵):

$$A_1 + A_2 = A_0 \quad (3)$$

$$Z_1 A_1 - Z_2 A_2 = -Z_1 A_0 \quad (4)$$

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

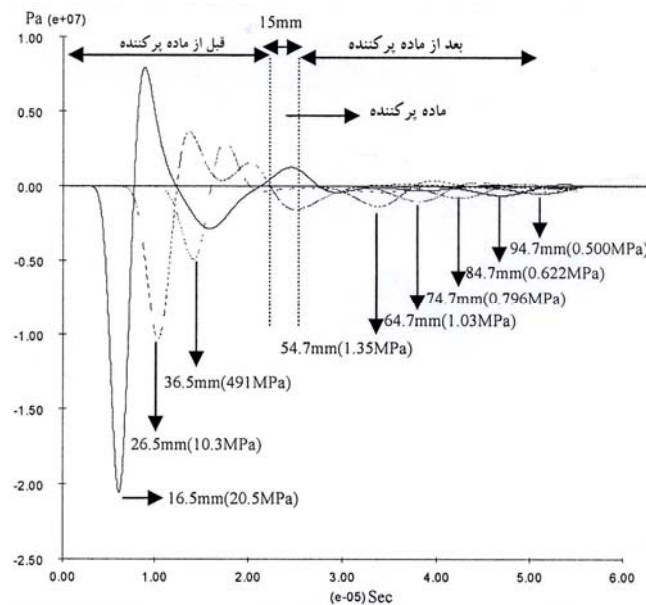
$$T = \frac{A_2}{A_0} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

که  $A_2$ ,  $A_1$ ,  $A_0$  به ترتیب دامنه‌های امواج طولی ورودی، بازتاب شده و عبور کرده هستند و  $Z_2$ ,  $Z_1$  به ترتیب مقاومت‌های لرزه‌ای محیط اول و محیط دوم اند که از روابط (۷) و (۸) به دست می آید.

$$Z_1 = \rho_1 \cdot C_{P1} \quad (7)$$

$$Z_2 = \rho_2 \cdot C_{P2} \quad (8)$$

$\rho_1$  و  $\rho_2$  به ترتیب چگالی محیط‌های اول و دوم و  $C_{P1}$  و  $C_{P2}$  سرعت امواج کشسان در محیط‌های اول و دوم هستند. در یک محیط کشسان، درصد انرژی بازتاب



شکل ۱۳. نمودار تغییرات تنش فشاری در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۴/۷ میلی متری از محل انفجار در محیط پلکسی گلاس با ماده پُرکننده رزین با ضخامت ۱۵ میلی متر در حالت کشسان.

جدول ۲. مقدار حداکثر سرعت ذره قبل از ناپیوستگی به روش آزمایشگاهی و مقادیر سرعت ذره و تنش‌های اعمال شده قبل و بعد از ماده پُرکننده به روش عددی.

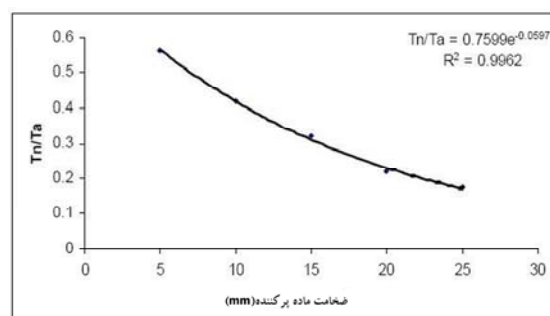
ردیف	روش آزمایشگاهی		روش عددی			
	حداکثر سرعت ذره (mm/sec)	ضخامت ماده پُرکننده (mm)	تنش‌های اعمالی (MPa)		حداکثر سرعت ذره (mm/sec)	
			قبل از ماده پُرکننده	بعد از ماده پُرکننده	قبل از ماده پُرکننده	بعد از ماده پُرکننده
۱	۲۲۷۰	۵	۴/۹	۲/۶۶	۲۹۳۰	۹۴۶
۲	۲۱۹۰	۱۰	۴/۹	۱/۸۳	۲۹۳۰	۶۵۱
۳	-	۱۵	۴/۹	۱/۳۵	۲۹۴۰	۴۷۳
۴	-	۲۰	۵	۰/۹۵۸	۲۹۲۰	۳۲۸
۵	-	۲۵	۴/۴۵	۰/۷۱۴	۲۹۲۰	۲۴۴

ضریب عبور حاصل از روش عددی و  $Ta$  ضریب انتقال حاصل از روش تحلیلی است. شکل ۱۴ رابطه‌نمایی ضریب عبور با ضخامت ماده پُرکننده را نشان می‌دهد. با توجه به جدول‌های ۳ و ۴ با افزایش ضخامت ماده پُرکننده مقدار حداکثر سرعت ذره و تنش‌های عبور کرده به‌طور غیرخطی کاهش یافته است و با توجه به ثابت بودن ضریب بازتاب، ضریب عبور نیز به‌طور نمایی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش ضخامت ماده پُرکننده با توجه به ثابت بودن درصد انرژی بازتابی، درصد انرژی جذب شده در محیط به‌طور نمایی افزایش پیدا می‌کند.

ضریب بازتاب تابعی از اختلاف خواص کشسان دو محیط است. درحالی‌که ضریب عبور به‌دلیل اثر ضخامت محیط در فرایند جذب انرژی علاوه بر اختلاف خواص کشسان به ضخامت محیط انتشار نیز وابسته است. با مقایسه ضریب عبور به‌دست آمده از حل عددی برای ضخامت‌های متفاوت ماده پُرکننده (لایه دوم) و ضریب عبور به‌دست آمده از روش تحلیلی معادله (۱۲) با ضریب همبستگی ۹۹۶۲٪ حاصل می‌شود.

$$\frac{Tn}{Ta} = 0.7599e^{-0.0597d} \quad (12)$$

که  $d$  ضخامت ماده پُرکننده برحسب میلی‌متر،  $Tn$



شکل ۱۴. رابطه‌نمایی ضریب عبور با ضخامت ماده پُرکننده.

جدول ۳. مقادیر ضرایب بازتاب و عبور در فصل مشترک پلکسی گلاس و رزین به روش عددی و تحلیلی.

ردیف	نوع محیط	خصوصیات فیزیکی		ضخامت ماده پُرکننده (mm)	روش عددی		روش تحلیلی	
		چگالی ( $gr/cm^3$ )	سرعت موج ( $m/sec$ )		ضریب بازتاب	ضریب عبور	ضریب بازتاب	ضریب عبور
۱	پلکسی گلاس	۱/۱۹	۲۲۴۹	۵	۵۷٪	۲۸٪	۵۰٪	۵۰٪
۲	رزین	۱/۰۷	۸۳۰	۱۰	۵۷٪	۲۱٪	۵۰٪	۵۰٪
۳	-	-	-	۱۵	۵۷٪	۱۶٪	۵۰٪	۵۰٪
۴	-	-	-	۲۰	۵۷٪	۱۱٪	۵۰٪	۵۰٪
۵	-	-	-	۲۵	۵۷٪	۸/۷٪	۵۰٪	۵۰٪

جدول ۴. مقادیر شار انرژی ورودی، عبوری، بازتابی و درصد انرژی عبوری، بازتابی و جذب شده از فصل مشترک پلکسی گلاس و رزین به روش عددی.

ردیف	ضخامت ماده پُرکننده (mm)	شار انرژی ورودی ( $\frac{j}{m^2 \cdot sec}$ )	شار انرژی عبوری ( $\frac{j}{m^2 \cdot sec}$ )	شار انرژی بازتابی ( $\frac{j}{m^2 \cdot sec}$ )	درصد انرژی عبوری	درصد انرژی بازتابی	درصد انرژی جذب شده
۱	۵	۷۰/۳	۵/۵	۲۲/۶	۷/۸٪	۳۲٪	۶۰/۲٪
۲	۱۰	۷۰/۳	۳/۱	۲۲/۷	۴/۴٪	۳۲٪	۶۳/۶٪
۳	۱۵	۷۰/۳	۱/۷۴	۲۳/۶	۲/۴٪	۳۳٪	۶۴/۶٪
۴	۲۰	۶۹/۵	۰/۹۱	۲۲/۷	۱/۳٪	۳۳٪	۶۵/۷٪
۵	۲۵	۷۱	۰/۵۵	۲۳/۷	۰/۷۷٪	۳۳٪	۶۶/۹٪

## ۴ نتیجه گیری

۱- شیب نمودار حداکثر جابه‌جایی افقی ذره و سرعت

ذره قبل از ماده پُرکننده بیشتر از شیب این نمودارها بعد از ماده پُرکننده است که دلیل آن بازتاب یافتن جبهه موج از ماده پُرکننده و ایجاد اغتشاش در مدل هندسی است.

۲- شکل انتشار جبهه موج بازتابی و جبهه موج عبوری پس از برخورد به ماده پُرکننده منظم است.

۳- با افزایش ضخامت ماده پُرکننده مقادیر حداکثر سرعت ذره و تنش‌های عبوری به‌طور غیرخطی کاهش

در این مقاله، تأثیر ضخامت ماده پُرکننده با نوعی رزین مخصوص بر انتشار امواج حاصل از انفجار ماده منفجره پتن در محیط بسپاری پلکسی گلاس با استفاده از روش عددی المان مجزا و با کاربرد نرم‌افزار UDEC مدل‌سازی شده است. نتایج روش عددی تأثیر ضخامت ماده پُرکننده بر انتشار امواج حاصل از انفجار با روابط تحلیلی مقایسه شد. نتایج حاصل به شرح زیر است:

- Fordyce, D. L., Fourney, V., and Wang, X. J., 1993, Effect of joints on stress wave transmission, *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema Rotterdam, 211-219.
- Fourney, W. L., Dally, J. W., and Holloway, D. C., 1978, Controlled blasting with ligamented charge holders, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **15**, 121-129.
- Han, S., 1995, Equivalent mechanical effect of joint under wave loads, *Fractured and Jointed Rock Mechanics*, Balkema Rotterdam, 335-340.
- Hao, H., Wu, C., and Zhou, Y., 2002, Numerical analysis of Blast – Induced stress waves in a rock mass with anisotropic continuum damage model Part 1: Equivalent Material Property Approach, *Rock Mech. Rock Engng*, 79-94.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2000, *Universal Distinct Element Code, Version 3.01*, Minneapolis, Minnesota.
- Jiao, Y. Y., and Zhao, J., 2004, On using DEM for simulating response of jointed rock to underground explosion, *Chines J. Rock Mech. Eng.*, **23**, 936-940.
- Khoshrou, S. H., and Mohanty, B., 1996, Role of discontinuity on stress field in wall control blasting, *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema Rotterdam, 207-215.
- Kim, D., Noh, S., Lee, S., Park, B., and Jeon, S., 2007, Development of a new center-cut method: SAV-CUT (Stage Advance V-CUT), *Underground Space—the 4<sup>th</sup> Dimension of Metropolises Barton, Hrdina, Romancov & Ziamal (eds)*, Taylor & Francis Group, London, 493-499.
- Kuhlemeyer, R. L., and Lysmer, J., 1973, Finite element accuracy for wave propagation problems, *J. Soil Mech. and Foundations*, Div ASCE, **99**(SM5), 421-427.
- Liu, Y. Q., Li, H. B., Zhao, J., Li, J. R., and Zhou, Q. C., 2004, UDEC simulation for dynamic response of a rock slope subject to explosions, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **41**, 1-6.
- Liu, Q., and Tidman, P., 1995, Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole, [http://www.nrcan.gc.ca, CANMET/MRL Experimental Mine](http://www.nrcan.gc.ca/CANMET/MRL/ExperimentalMine), 1-12.
- Rossmannith, H. P., Groschupf, K., and Knasmillner, R. E., 1994, Numerical simulation of stress wave interaction with cracks in layered rock, *Rock Mechanics*, Balkema Rotterdam, 697-703.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995, *Exploration seismology*, second edition, The Press Syndicate of the University of Cambridge, 33-84.
- می‌یابد و با توجه به ثابت بودن ضریب بازتاب، ضریب عبور به‌طور نمایی کاهش می‌یابد و درصد انرژی جذب شده به‌طور نمایی افزایش پیدا می‌کند.
- ۴- با انتشار جبهه موج طولی در محیط پلکسی گلاس و برخورد آن به سطح آزاد به دلیل تغییر مقاومت لرزه‌ای محیط، بخشی از انرژی موج در سطح آزاد جذب و بخشی از آن بازتاب می‌شود.
- ### منابع
- بخشنده امنیه، ح.، مرتضوی، ع.، و نجم، ک.، ۱۳۸۴ا، تحلیل عددی مکانیزم انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده سنگ گرانیتی، نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر، ۶۲، ۲۳-۱۳.
- بخشنده امنیه، ح.، مرتضوی، ع.، و جواهریان، ع.، ۱۳۸۴ب، تحلیل عددی سازوکار انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط‌های سنگی دارای صفحات لایه‌بندی، فصلنامه علمی و پژوهشی شریف، ۳۲، ۶۴-۵۷.
- بخشنده امنیه، ح.، و جواهریان، ع.، ۱۳۸۶، تحلیل عددی تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در ماده بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس، *مجله ژئوفیزیک ایران* ۱۱(۱)، ۱-۱۱.
- Akhavan, J., 1998, *The chemistry of explosives*, The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Cambridge.
- Cai, J. G., and Zhao, J., 2000, Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **37**, 661-682.
- Chen, S. G., and Zhao, J., 1998, A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, **35**, 93-99.
- Cooper, M., 1999, *Adhesive Focus*, <http://www.on-d.com/ADHFOCUSWinter1999.html>, Electronic Issue of Glu Gurutms Quarterly Newsletter, **5**(1).
- Fan, J., Gu, B., Nihei, K. T., Cook, N. G. W., and Myer, L. R., 1996, Experimental and numerical investigation of fracture interface waves, *Rock Mechanics*, Balkema Rotterdam, 845-851.