

تحلیل عددی تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در ماده بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس

حسن بخشنده امنیه^۱ و عبدالرحیم جواهریان^۲

^۱ استادیار، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، ایران

^۲ عضو هیئت علمی مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران (e-mail: javaheri@ut.ac.ir)

(دریافت: ۸۵/۰۵/۲۳، پذیرش نهایی: ۸۶/۰۱/۲۲)

چکیده

در این مقاله تأثیر عوارض ساختاری قائم بر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در ماده بسپاری پلکسی گلاس با استفاده از روش المان مجزا و برنامه رایانه‌ای UDEC تحلیل شده است. موج ضربه‌ای ناشی از انفجار به صورت یک تپ (پالس) مثلثی ساده شده که مشخصه انفجاری با فشار حداکثر ۱۱ گیگاپاسکال است به دیواره یک چال انفجاری به قطر ۵/۰۸ میلی‌متر وارد شده است. فشار دینامیکی اعمال شده روی دیواره چال انفجاری به صورت شعاعی و به طور یکنواخت بر آن اعمال شده است. مقادیر بیشینه جابه‌جایی افقی ذره، بیشینه سرعت ذره، تنش‌های اعمالی واقع در طرفین عارضه ساختاری، ضرایب عبور، انعکاس و جذب برای رفتار کشتان برآورد، و با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) مقایسه شده است. نتایج، انطباق خوبی را بین مقادیر حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل عددی، انتشار موج تراکمی، انفجار، پلکسی گلاس، روش المان مجزا

۱ مقدمه

تحت تأثیر قرار می‌دهد. جذب انرژی و توزیع متعدد موج در فصل مشترک سطوح منجر به تضعیف انتشار موج می‌شود (کای و ژاو، ۲۰۰۰). بنابراین در طراحی و حفاظت سازه‌های سطحی و زیرزمینی، بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار و ساختارهای متفاوت توده‌سنگ اهمیت فراوانی دارند. فهم اثرات و نقش عوارض ساختاری موجود در توده‌سنگ در بازدهی عملیات انفجار در معادن، پایداری سازه‌های سطحی و زیرزمینی مانند مغارها و سدها، حرکت سطوح لغزش تحت بارگذاری‌های عملیات انفجار، پایداری و ناپایداری پله‌های حین کار و نهایی معادن روباز و کنترل میزان ارتعاش‌ها و لرزش‌های زمین در مناطق نزدیک و دور از انفجار، حائز اهمیت است. به همین دلیل به منظور کنترل عملیات انفجار، پیش‌بینی اثر امواج حاصل از انفجار در توده‌سنگ باید قبل

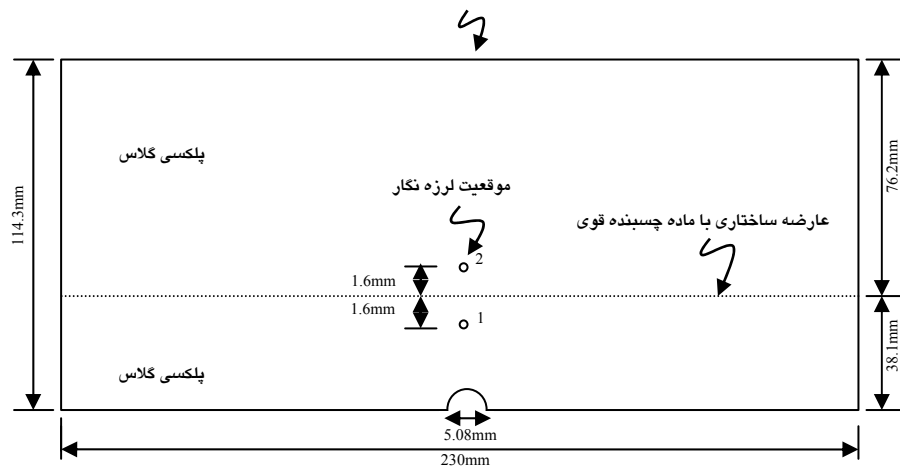
در اثر انفجار ماده منفجره در داخل یک توده‌سنگ، در زمانی کوتاه، انرژی قابل توجهی آزاد می‌شود. بخشی از انرژی ماده منفجره صرف خرد شدن توده‌سنگ می‌شود و بخشی از آن به صورت امواج لرزه‌ای در درون توده‌سنگ منتشر می‌شود و ذرات محیط را به ارتعاش در می‌آورد. در بررسی‌های مربوط به تأثیر انفجار بر سازه‌ها، توده‌سنگ به مثابه محیط انتقال دهنده امواج، بارهای ضربه‌ای را به سازه‌های سنگی، سامانه‌های نگهدارنده، مناطق مسکونی و تأسیسات منتقل می‌کند (جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵). به طور کلی از نقطه نظر طراحی ژئومکانیکی، توده‌سنگ دارای عوارض ساختاری و اغلب ناهمگن و دارای خواص ناهمسانگرد است. طبیعت و توزیع عوارض ساختاری در داخل توده‌سنگ مانند لایه‌بندی، گسل و دسته درزه‌ها پاسخ توده‌سنگ به بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی را

۲ بررسی آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی، نمونه بسپاری پلکسی گلاس (فوردیس و همکاران، ۱۹۹۳) در نظر گرفته شد. فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) با مجموعه مدل سازی های دوبعدی و سه بعدی، تأثیر عوارض ساختاری بر انتقال موج تراکمی را بررسی کردند. مدل دوبعدی آنها از جنس پلکسی گلاس و همولیت ۱۰۰ (Homolite 100) و مدل سه بعدی آنها از جنس گچ زودگیر ساخته شده بود. برای ایجاد درزه از چسب لاستیک، رزین مخصوص (Super Glue)، روغن و نوار استفاده کردند. نیمی از هندسه دوبعدی مدل پلکسی گلاس در شکل ۱ همراه با موقعیت دستگاه های اندازه گیری سرعت ذرات نشان داده شده است. آنها در این آزمایش از ۲۰۰ میلی گرم ماده منفجره پتن (PETN) برای چال طراحی شده با قطر ۵/۰۸ میلی متر استفاده کردند. ضخامت عارضه ساختاری در آزمایش اول ۱۲۷/ میلی متر و در آزمایش دوم ۲۵۴/ میلی متر در نظر گرفته شده است. براساس نتایج حاصل از دو آزمایش آنها، ماده چسبنده فوق تأثیر چندانی در انتقال انرژی موج ندارد (جدول ۱).

از عملیات انفجار صورت گیرد. مهم ترین معیارها برای ارزیابی و پیش بینی مقدار خسارت ناشی از لرزش، بررسی تغییرات جابه جایی ذرات، بیشینه سرعت ذرات (Peak Particle Velocity)، تغییرات تنش های اعمالی به محیط و بسامد (فرکانس) است. فعالیت های صورت گرفته در این زمینه را می توان در چهار بخش اندازه گیری های صحرائی، بررسی های آزمایشگاهی، روش های تحلیلی و روش های عددی تقسیم بندی کرد.

در این مقاله، با استفاده از نتایج بررسی های آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳)، چگونگی انتشار و اثر موج تراکمی حاصل از انفجار در یک محیط بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس (Plexiglass) با روش المان مجزا بررسی شده است. در این روش عملکرد موج تراکمی حاصل از انفجار یک خرج استوانه ای، شامل تغییرات جابه جایی افقی ذره، تغییرات بیشینه سرعت ذرات نسبت به زمان، تغییرات تنش های اعمالی به محیط بر اثر عبور جبهه موج تراکمی و ضرایب بازتاب، عبور و جذب واقع در طرفین عارضه ساختاری در محدوده انفجار در محیط پلکسی گلاس بررسی شده است.



شکل ۱. بخشی از هندسه مدل فیزیکی دوبعدی استفاده شده فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) در آزمایش بررسی اثر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی در محیط پلکسی گلاس همراه با موقعیت عارضه ساختاری نسبت به محل انفجار و لرزه نگارها.

که در آن، ω_{max} بیشینه بسامد مشخصه سامانه و λ کسری از میرایی بحرانی در این بسامد است. این مقادیر با توجه به مشخصات سامانه، با برنامه برآورد می‌شود. در تحلیل دینامیکی محیط‌های کشسان از میرایی رایلی استفاده می‌شود. معادلات میرایی در این روش بصورت ماتریسی بیان می‌شود. ماتریس میرایی، C ، جمع مؤلفه‌های متناسب با ماتریس جرم، M و ماتریس سختی، K است.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

که در آن، α ثابت میرایی متناسب با جرم و β ثابت میرایی متناسب با سختی است (آیتاسکا، ۲۰۰۰).

از آنجایی که این نرم‌افزار دارای قابلیت شبیه‌سازی همه فرایندهای انفجار نیست، لذا اطلاعات اولیه شرایط انفجار باید با دیگر روشها پیش‌بینی شود. در این مدل، اطلاعات ورودی انفجار که بخشی از آن موج ضربه است به صورت یک تپ (پالس) مثالی با حداکثر فشار دینامیکی وارد بر دیواره چال (فشار انفجار) و زمان اعمال فشار در نظر گرفته شده است. فشار دینامیکی اعمال شده روی دیواره چال به صورت شعاعی و به طور یکنواخت بر آن اعمال 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 شده است و با ماده منفجره پتن خرج‌گذاری شود. همچنین انفجار در سراسر طول خرج استوانه‌ای به صورت هم‌زمان فرض می‌شود. اطلاعات فیزیکی و مکانیکی پلکسی گلاس و رزین مخصوص در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. مشخصات چال که در این مقاله انتخاب شده است و مشخصات خرج که از آزمایش‌های فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) گرفته شده است در جدول ۴ آورده شده است.

حداکثر فشار دینامیکی اعمالی بر دیواره محفظه انفجار (فشار انفجار) را می‌توان با استفاده از رابطه نیمه تجربی لیو و تیدمان (۱۹۹۶) ارزیابی کرد. در این رابطه از

جدول ۱. نتایج آزمایش انفجار ۲۰۰ میلی‌گرم ماده منفجره پتن در چالی به قطر ۵/۰۸ میلی‌متر در ماده بسپاری پلکسی گلاس (فوردیس و همکاران، ۱۹۹۳).

آزمایش	قطر چال	موقعیت لرزه‌نگار (mm)		بیشینه سرعت ذره (mm/sec)	
		قبل از درزه	بعد از درزه	قبل از درزه	بعد از درزه
۱	۵/۰۸	۱/۶	۱/۶	۲۳۷۰	۱۹۷۰
۲	۵/۰۸	۱/۶	۱/۶	۲۱۹۰	۱۹۷۰

۳ تحلیل عددی

از آنجایی که ماده بسپاری پلکسی گلاس، محیطی پیوسته است و هدف تحقیق نیز بررسی سازوکار انتشار و انتقال انرژی موج از یک محیط کشسان به یک محیط غیرکشسان دارای عارضه ساختاری (رزین) در نظر گرفته شده، بنابراین، مدل آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) انتخاب شد. به منظور تحلیل عددی تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلکسی گلاس و رزین مخصوص در نقش اطلاعات ورودی به نرم‌افزار المان مجزای UDEC (Universal Distinct Element Code) در نظر گرفته شد. این نرم‌افزار دارای قابلیت تحلیل دینامیکی است. روش تحلیل دینامیکی در این نرم‌افزار در حوزه زمان و به صورت کرنش صفحه‌ای یا تنش صفحه‌ای است و معادلات سامانه با استفاده از روش تفاضل محدود صریح (Explicit Finite Difference) قابل حل است. تحلیل دینامیکی سامانه بلوک‌های حاوی ناپیوستگی، با در نظر گرفتن جرم بلوک‌های صلب یا جرم نقاط گره‌ای و برآورد مقادیر نیروها، سرعت و جابه‌جایی‌ها صورت می‌گیرد. ساختار و فرمول‌بندی روش تفاضل محدود در این برنامه به گونه‌ای است که گام زمانی، Δt ، بر اساس رابطه پیشنهادی بلیچکو (۱۹۸۳) با در نظر گرفتن اثر میرایی متناسب با سختی برآورد می‌شود (بلیچکو، ۱۹۸۳).

$$\Delta t_{\beta} = \left\{ \frac{2}{\omega_{max}} \right\} \left(\sqrt{1 + \lambda^2} - \lambda \right) \quad (1)$$

عددی پارامترهای فوق به مثابه خصوصیات محیط دربرگیرنده چال و ماده منفجره در جدول‌های ۲ و ۴ آورده شده است. نحوه مدل‌سازی بارگذاری انفجاری با قرار دادن مقادیر فوق در معادله (۱) مقدار حداکثر فشار دینامیکی (فشار انفجار) برابر ۱۱ گیگاپاسکال صورت گرفت. موج ضربه‌ای (Impulse) ناشی از انفجار نیز به صورت یک تپ (پالس) مثلثی ساده شده که حاصل از حداکثر فشار انفجار معادل ۱۱ گیگاپاسکال است به دیواره یک چال انفجاری به قطر ۵/۰۸ میلی‌متر وارد شده است.

مطابق مدل فیزیکی آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳)، ماده بسپاری پلکسی‌گلاس مدل‌سازی شده برای تحلیل تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در محدوده‌ای به ابعاد ۲۳۰ میلی‌متر در ۱۵۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در تحلیل عددی به منظور کاهش زمان و حجم محاسبات و همچنین رعایت شرایط آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) مدلی به ابعاد ۲۳۰ میلی‌متر در ۱۱۴/۳ میلی‌متر انتخاب شد و با توجه به ماهیت مسئله یک مقطع دوبعدی در میانه ارتفاع چال در نظر گرفته شد. عارضه ساختاری در ماده بسپاری در فاصله ۳۸/۱ میلی‌متری از مرکز چال قرار گرفته و قطعات دو طرف آن با نوعی رزین مخصوص به هم متصل شده است. خرج انفجاری پتن به صورت استوانه‌ای در پلکسی‌گلاس جانمایی شده و با توجه به طول زیاد چال انفجاری نسبت به قطر آن، مسئله به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل شده است. برای تحلیل هر قطعه ماده بسپاری پلکسی‌گلاس تحت بارگذاری، رفتار کشسان در نظر گرفته شده است. مدل کشسان ساده‌ترین شکل رفتار ماده را نشان می‌دهد و برای مواد همگن، همسانگرد و پیوسته، معتبر است. مدل رفتاری استفاده شده برای عارضه ساختاری (رزین) مدل لغزشی کولمب (Coulomb slip model) است.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلکسی‌گلاس (فورنی و همکاران، ۱۹۷۸).

ردیف	خصوصیات	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی	(ρ_p)	۱/۱۹	(gr/cm^3)
۲	مدول یانگ	(E_p)	۳/۱	(GPa)
۳	نسبت پواسون	(ν)	.۳۵	-
۴	مدول حجمی	(K)	۴/۵۴	(GPa)
۵	مدول برشی	(G)	۱/۱۵	(GPa)
۶	مقاومت کششی	(σ_t)	۵۴	(MPa)
۷	سرعت موج تراکمی	(C_p)	۲۲۴۹	(m/s)

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی رزین مخصوص (کوپر، ۱۹۹۹).

ردیف	خصوصیات	نماد	مقدار	واحد
۱	چگالی	(ρ_g)	۱/۰۷	(gr/cm^3)
۲	مدول یانگ	(E_g)	۶۹۰	(MPa)
۳	نسبت پواسون	(ν)	.۱۵	-
۴	مدول حجمی	(K)	۳۳۰	(MPa)
۵	مدول برشی	(G)	۳۰۰	(MPa)
۶	مقاومت کششی	(σ_t)	۲۰	(MPa)
۷	سرعت موج تراکمی	(C_p)	۸۳۰	(m/s)
۸	چسبندگی	(C_c)	۱۳	(MPa)

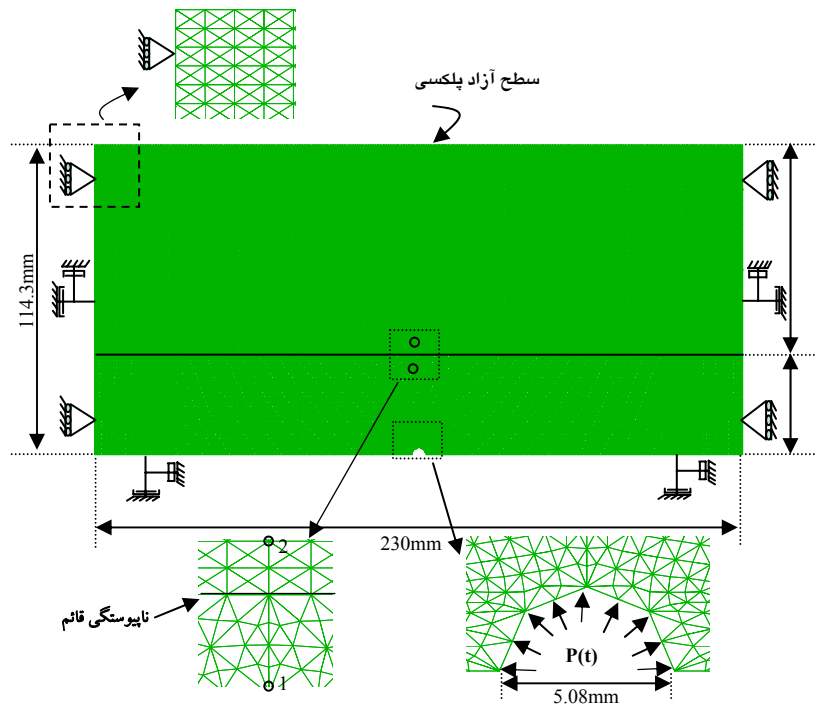
جدول ۴. خصوصیات ماده منفجره پتن و هندسه چال انفجاری (اخوان، ۱۹۹۸).

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

ویژگی‌های ماده بسپاری پلکسی‌گلاس و ماده منفجره برای محاسبه فشار انفجار استفاده شده است.

$$P_m = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left(\frac{\rho_p \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right)^{0.25} \quad (3)$$

که در آن، ρ_e چگالی ماده منفجره برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، VOD سرعت انفجار ماده منفجره برحسب کیلومتر بر ثانیه، ρ_p چگالی پلکسی‌گلاس برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، V_p سرعت موج تراکمی برحسب کیلومتر بر ثانیه و P_m حداکثر فشار دینامیکی روی دیواره چال برحسب کیلو بار است. مقادیر



شکل ۲. هندسه مدل شامل نحوه سلول‌بندی، ابعاد مدل، موقعیت نقاط اندازه‌گیری نسبت به چال و عارضه ساختاری، ابعاد چال، موقعیت عارضه ساختاری و شرایط مرزی (بخشنامه امنیه، ۱۳۸۵). خرج انفجاری پتن به صورت استوانه‌ای در پلکسی گلاس جانمایی شده است. با توجه به طول زیاد چال انفجاری نسبت به قطر آن، مسئله به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل شده است.

محیط باشد.

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

که در آن، λ طول موج غالب ورودی است. سرعت موج تراکمی از رابطه زیر به دست می‌آید.

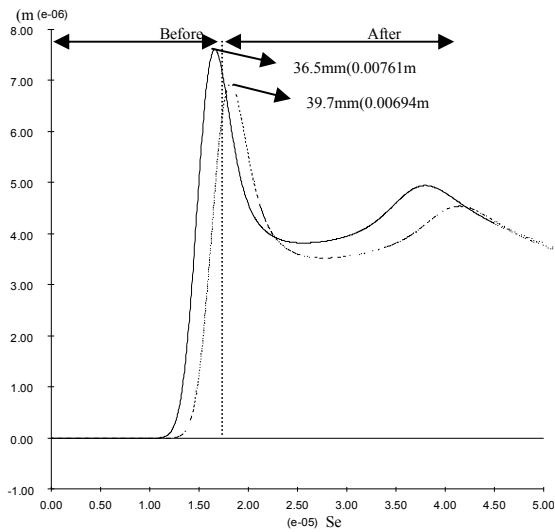
$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (3)$$

که در آن، K مدول حجمی، G مدول برشی و ρ چگالی محیط پلکسی گلاس است. با توجه به خصوصیات کشسان محیط، سرعت موج تراکمی در محیط پلکسی گلاس برابر ۲۲۴۹ متر بر ثانیه محاسبه و اندازه سلول ۱ میلی‌متر انتخاب شد. با توجه به اندازه مدل تعداد ۱۸۵۷۸۸ سلول از نوع مثلثی انتخاب و مدل با ۴۰۰۰۰ تکرار همگرا و حل شد.

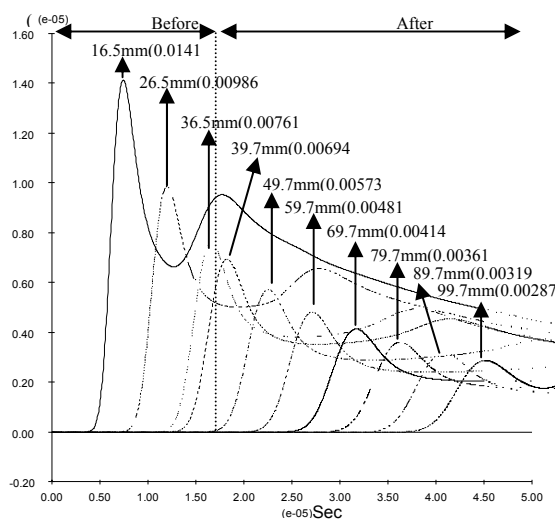
برای جلوگیری از انعکاس ناخواسته امواج از مرزهای جانبی و پایینی به داخل مدل، از مرزهای ویسکوز استفاده شده است (آیتاسکا، ۲۰۰۰). بنابراین شرایط مرزی ویسکوز برای مرزهای دو طرف مدل و مرز پایینی مدل اعمال شده است. برای جلوگیری از جابه‌جایی‌های برشی مرزهای دو طرف مدل ثابت شده‌اند. برای بررسی اثر بازتاب از سطح آزاد، مرز بالایی مدل فاقد هرگونه محدودیتی است. در شکل ۲ هندسه مدل شامل ابعاد مدل، موقعیت چال، ابعاد چال، موقعیت عارضه ساختاری و شرایط مرزی آورده شده است.

کولمبیر و لایزمر (۱۹۷۶) نشان دادند که برای تحلیل درست و منطقی انتشار امواج به روش عددی، اندازه المان استفاده شده برای سلول‌بندی محیط، Δl ، بایستی کوچک‌تر از 0.1 تا 0.125 طول موج منتشر شده در

۴ بحث



شکل ۳. تغییرات جابه‌جایی افقی ذره در فاصله ۱/۶ میلی‌متری قبل و بعد از رزین مخصوص در حالت کشسان برای شکل ۲.



شکل ۴. تغییرات جابه‌جایی افقی ذره در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۹/۷ میلی‌متری از محل انفجار در حالت کشسان برای شکل ۲.

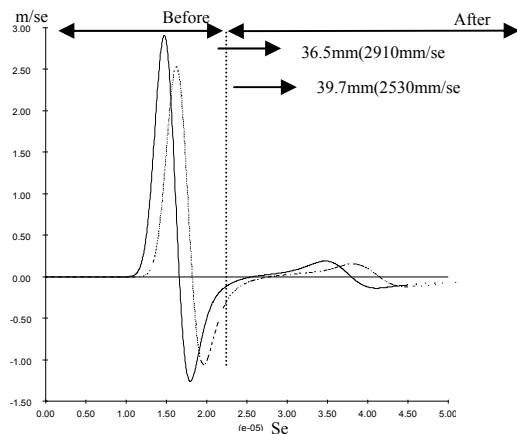
۲-۴ تغییرات بیشینه سرعت ذره

نمودار بیشینه سرعت ذره در بلوک مدل‌سازی شده در فواصل ۱/۶ میلی‌متری قبل و بعد از عارضه ساختاری برای حالت کشسان در شکل ۵ آورده شده است. پس از انفجار با تشکیل جبهه موج ضربه‌ای و انتشار آن در محیط پلکسی‌گلاس، بیشینه سرعت ذره برای نقاط در نظر گرفته

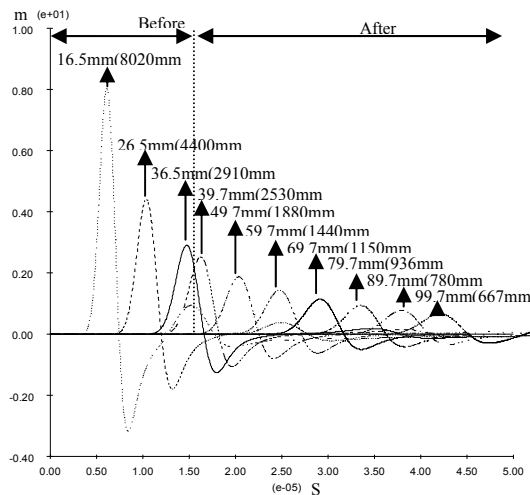
نتایج به دست آمده از تحلیل عددی تأثیر عوارض ساختاری (با استفاده از مدل رفتاری کشسان) شامل تغییرات بیشینه جابه‌جایی افقی ذره، تغییرات بیشینه سرعت ذره نسبت به فاصله از محل انفجار، تغییرات تنش‌های اعمالی به مدل بر اثر عبور جبهه موج تراکمی، برآورد ضرایب بازتاب و عبور و برآورد مقدار انرژی بازتابی و عبوری از عارضه ساختاری است. این نتایج، حاصل اجرای برنامه از زمان صفر (شروع فرآیند) تا ۷۰ میکروثانیه است که درباره آنها بحث می‌شود.

۱-۴ تغییرات جابه‌جایی افقی ذره

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 عارضه ساختاری افزایش می‌یابد و مقدار آن ۰/۰۰۷۶۱ میلی‌متر می‌شود. پس از عبور جبهه موج از عارضه ساختاری، مقدار جابه‌جایی افقی ذره در فاصله ۳۹/۷ میلی‌متری از مرکز چال یا ۱/۶ میلی‌متری بعد از عارضه ساختاری به ۰/۰۰۶۹۴ میلی‌متر کاهش یافته است. نمودار بیشینه جابه‌جایی افقی ذره در ماده بسپاری مورد نظر در فاصله ۱۶/۵ میلی‌متری تا ۹۹/۷ میلی‌متری از مرکز چال و به فواصل ۱۰ میلی‌متر در جهت شعاعی برای زمان ۵۷ میکروثانیه در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. به دلیل نمودار بیشینه جابه‌جایی افقی ذره نسبت به زمان، قبل از عارضه ساختاری بیشتر از شیب نمودار بیشینه جابه‌جایی افقی ذره برای فواصل دور و بعد از عارضه ساختاری است. با عبور جبهه موج از محیط و برخورد آن به عارضه ساختاری که با نوعی رزین متصل شده است، بخش زیادی از انرژی موج تراکمی منتقل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، با دور شدن از محل انفجار، مقدار بیشینه جابه‌جایی ذره کاهش یافته است.



شکل ۵. تغییرات بیشینه سرعت ذره در پلکسی گلاس برای فواصل ۱/۶ میلی متری قبل و بعد از عارضه ساختاری در حالت کشسان برای شکل ۲.



شکل ۶. تغییرات بیشینه سرعت ذره در پلکسی گلاس برای فواصل ۱/۶ تا ۹۹/۷ میلی متری از مرکز چال در حالت کشسان برای شکل ۲.

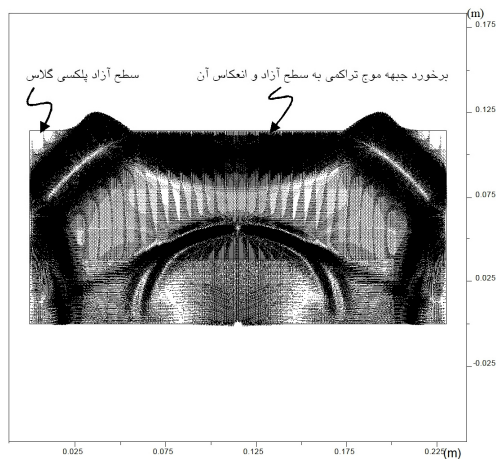
تغییر شکل‌های برگشتی نشان دهنده وجود تنش کششی در آن نقطه است. شکل ۱۱ تغییرات تنش فشاری اعمال شده به محیط پلکسی گلاس در اثر عبور جبهه موج در فاصله ۱/۶ میلی متری تا ۹۹/۷ میلی متری از مرکز چال انفجاری را نشان می‌دهد.

۵ مقایسه نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی و تحلیل عددی
به منظور بررسی تأثیر عوارض ساختاری بر انتقال امواج

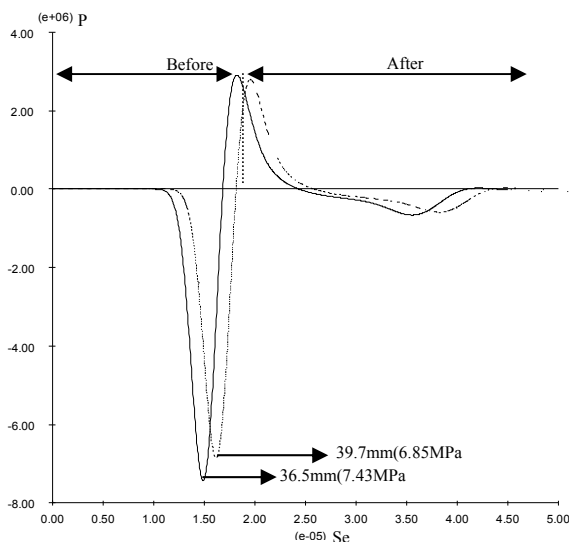
شده از ۲۹۱۰ میلی متر بر ثانیه به ۲۵۳۰ میلی متر بر ثانیه کاهش یافته است. با توجه به شکل، با عبور جبهه موج از عارضه ساختاری، بخش زیادی از انرژی موج تراکمی منتقل شده است. شکل ۶ نیز تغییرات بیشینه سرعت ذره پس از عبور جبهه موج تراکمی برای فواصل ۱۶/۵ میلی متری تا ۹۹/۷ میلی متری در زمان ۶۸/۸ میکروثانیه از لحظه انفجار را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها با افزایش فاصله از محل انفجار، بیشینه سرعت ذره به طور نمایی کاهش یافته است. توزیع بیشینه سرعت ذرات و نحوه انتشار جبهه موج در اطراف چال انفجاری پس از گذشت زمان‌های ۱۰/۳ و ۱۵/۷ میکروثانیه از لحظه انفجار در شکل ۷ و ۸ آمده است. همان‌طور که از این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، به دلیل اینکه مرز پایینی مدل ویسکوز است، بنابراین هیچگونه بازتابی از این مرز به داخل مدل وجود ندارد. شکل انتشار جبهه موج بازتابی و عبوری پس از برخورد به عارضه ساختاری منظم می‌باشد. با توجه به شکل ۹ در اثر برخورد و بازتاب جبهه موج تراکمی از سطح آزاد، تنش‌های فشاری به تنش‌های کششی تبدیل می‌شود. با توجه به نتایج حاصل، سرعت انتشار موج در محیط پلکسی گلاس ۲۳۵۲ متر بر ثانیه برآورد شد.

۳-۴ تغییرات تنش‌های اعمالی در مدل

شکل ۱۰ تغییرات تنش فشاری اعمال شده در فاصله ۱/۶ میلی متری قبل و بعد از عارضه ساختاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در حالت کشسان مقدار حداکثر تنش فشاری به ترتیب در فاصله ۱/۶ میلی متری قبل و بعد از عارضه ساختاری از ۷/۴۳ مگاپاسکال به ۶/۸۵ مگاپاسکال کاهش می‌یابد در حالی که 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 پذیر است.

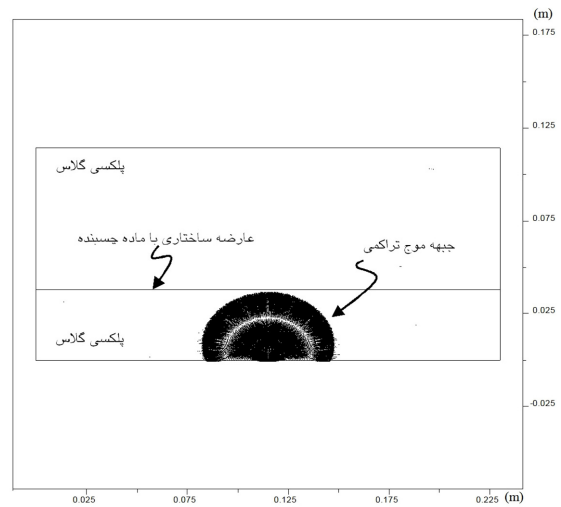


شکل ۹. انتشار جبهه موج تراکمی و برخورد موج به سطح آزاد در زمان ۵۷/۸ میکروثانیه برای شکل ۲.

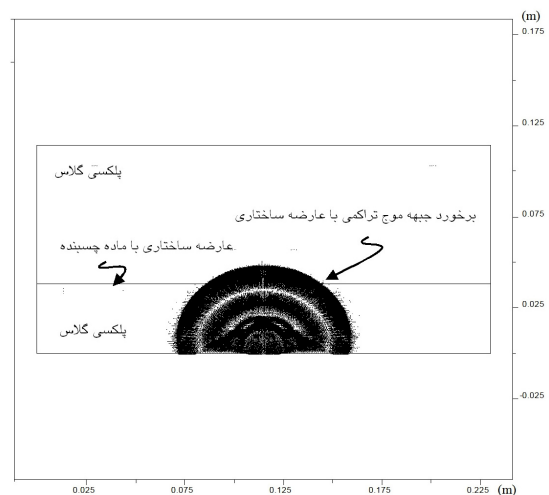


شکل ۱۰. تغییرات تنش فشاری در فاصله ۱/۶ میلی متری قبل و بعد از عارضه ساختاری در حالت کشسان.

قابلیت‌های موجود در نرم‌افزار UDEC صورت گرفته است و تأثیر عارضه ساختاری بر انتشار امواج حاصل از انفجار ماده منفجره پتن در محیط پلکسی کلاس شبیه‌سازی و با نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. مبنای مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی معیار بیشینه سرعت ذره است. مقادیر بیشینه سرعت ذره قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش عددی و آزمایشگاهی در جدول ۵ آورده شده



شکل ۷. انتشار جبهه موج تراکمی در اطراف چال انفجاری در زمان ۱۰/۳ میکروثانیه برای شکل ۲. مرز پایینی مدل ویسکوز در نظر گرفته شده است بنابراین هیچگونه بازتابی از این مرز در مدل وجود ندارد.



شکل ۸. انتشار جبهه موج تراکمی در اطراف چال انفجاری در زمان ۱۵/۸ میکروثانیه برای شکل ۲.

حاصل از انفجار، اطلاعات اولیه و شرایط نمونه مورد آزمایش در آزمایشگاه از جمله مشخصات و نوع ماده منفجره، حداکثر فشار دینامیکی اعمال شده به دیواره چال انفجاری و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی محیط انتشار امواج، استخراج شده و مبنای تحلیل عددی قرار گرفته است. تحلیل عددی با روش المان مجزا و به کمک

جدول ۵. مقایسه مقادیر بیشینه سرعت ذرات در فاصله ۱/۶ میلی متری قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش آزمایشگاهی و عددی در پلکسی گلاس.

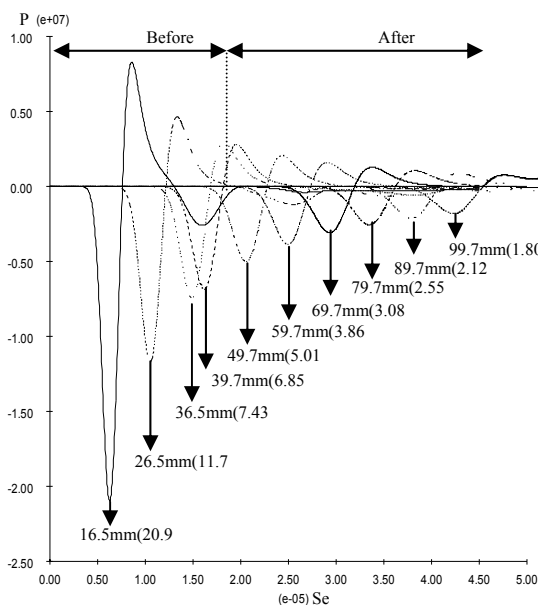
روش عددی (mm/sec)			روش آزمایشگاهی (mm/sec)			تعداد آزمایش
اختلاف سرعت	بعد از عارضه ساختاری	قبل از عارضه ساختاری	اختلاف سرعت	بعد از عارضه ساختاری	قبل از عارضه ساختاری	
۳۸۰	۲۵۳۰	۲۹۱۰	۳۰۰	۱۹۷۰	۲۲۷۰	۱
			۲۲۰	۱۹۷۰	۲۱۹۰	۲

جدول ۶. مقادیر ضرایب عبور، بازتاب و جذب قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش عددی در پلکسی گلاس.

ضریب جذب	ضریب بازتاب	ضریب عبور	مقاومت لرزه‌ای محیط (kg/m ² .sec)	خصوصیات فیزیکی	
				سرعت موج تراکمی (mm/sec)	چگالی (gr/cm ³)
٪۴۱	٪۴۶	٪۷۸	۲/۶۷*۱۰ ^۸ ۶	۲۲۴۹	۱/۱۹

جدول ۷. مقادیر شار انرژی ورودی، عبوری و بازتابی و درصد‌های انرژی عبوری، بازتابی و جذب قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش عددی در پلکسی گلاس.

درصد انرژی جذب شده	درصد انرژی بازتابی	درصد انرژی عبوری	شار انرژی انعکاسی (j/m ² .sec)	شار انرژی عبوری (j/m ² .sec)	شار انرژی ورودی (j/m ² .sec)
٪۱۷	٪۲۱	٪۶۲	۱۵/۱	۴۳/۳	۷۰/۵



شکل ۱۱. تغییرات تنش فشاری در فاصله ۱۶/۵ تا ۹۹/۷ میلی متری از محل انفجار در حالت کشسان.

است. همانطور که در این جدول ملاحظه می شود، متوسط اختلاف مقادیر سرعت ذره‌ای بیشینه قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش عددی معادل ۳۸۰ میلی متر بر ثانیه محاسبه شده و بر اساس نتایج آزمایشگاهی ۲۶۰ میلی متر بر ثانیه به دست آمده است. اختلاف مقادیر متوسط سرعت ذره‌ای بیشینه حاصل از نتایج تحلیل عددی، به دلیل اعمال فرض کشسان بودن برای محدوده مورد بررسی در محیط پلکسی گلاس است. مقادیر ضرایب بازتاب، عبور و جذب در عارضه ساختاری به روش عددی در جدول ۶ و مقادیر شار انرژی ورودی، بازتابی و عبوری و درصد‌های انرژی بازتابی و عبوری در جدول ۷ ارائه شده است.

مقدار شار انرژی ورودی به عارضه ساختاری برابر ۷۰/۵ ژول بر متر مربع در ثانیه و مقدار شار انرژی عبوری

مثابه عامل اتصال در ماده بسپاری پلکسی گلاس، به گونه‌ای است که بیشتر انرژی جبهه موج تراکمی از عارضه ساختاری عبور می‌کند.

۴- به دلیل تأثیر بازتاب موج از عارضه ساختاری در مدل، شیب نمودار بیشینه جابه‌جایی افقی ذره و بیشینه سرعت ذره قبل و بعد از عارضه ساختاری و در فواصل دور بیشتر است.

۵- نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که دامنه جبهه موج عبوری کمتر از دامنه جبهه موج ورودی است و شکل جبهه موج بازتابی و عبوری پس از برخورد به عارضه ساختاری منظم است.

منابع

- بخشنده‌امنیه، ح.، ۱۳۸۵، تحلیل عددی تأثیر ناپوستگی‌های اصلی توده‌سنگ بر انتشار امواج حاصل از انفجار، رساله دکتری معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- Akhavan, J., 1998, The chemistry of explosives. The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Cambridge.
- Belytschko, T., 1983, An overview of semidiscretization and time integration procedures. Computational Methods for Transient Analysis, **1**, 1-65.
- Cooper, M., 1999, Adhesive Focus. Electronic issue of Glue Gurutms Quarterly Newsletter, 5, issue 1, <http://www.on-hand.com/ADHFOCUSWinter1999.html>.
- Fordyce, D. L., Fourney, R. D. and Wang, X. J., 1993, Effect of joints on stress wave transmission. Rock Fragmentation by Blasting, A. A. 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., & Geomech., **15**, 121-129.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2000, Universal Distinct Element Code. Version 3.01, Minneapolis, Minnesota.
- Jimeno, C. L. and Jimeno, E. L., 1995, Drilling and blasting of rocks. A. A. Balkema, Rotterdam, 333-365.

از عارضه ساختاری برابر $43/3$ ژول بر متر مربع در ثانیه است؛ بدین معنی که 62% انرژی از عارضه ساختاری عبور کرده و 21% آن به محیط اولیه برگشته و باقی‌مانده انرژی نیز در عارضه ساختاری و در فاصله نقاط اندازه‌گیری جذب شده است. به عبارتی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی رزین مخصوص در میان محیط پلکسی گلاس به گونه‌ای است که بیشتر انرژی جبهه موج تراکمی حاصل از انفجار ماده منفجره پتن از عارضه ساختاری عبور کرده است.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله، سازوکار انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار در ماده بسپاری پلکسی گلاس شامل یک عارضه ساختاری که با نوعی رزین مخصوص به هم متصل شده‌اند با استفاده از روش عددی المان مجزای UDEC مدل‌سازی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی (فوردریس و همکاران، ۱۹۹۳) با تحلیل عددی را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- ۱- اختلاف مقادیر بیشینه سرعت ذرات قبل و بعد از عارضه ساختاری به روش عددی با اختلاف مقادیر متناظر حاصل از روش آزمایشگاهی به میزان قابل قبولی به هم نزدیک است. اختلاف بین مقادیر یاد شده در روش تحلیل عددی و آزمایشگاهی، به دلیل فرض کشسان بودن محدوده مدل‌سازی شده است.
- ۲- سرعت انتشار جبهه موج تراکمی در محیط بر اساس نتایج تحلیل عددی برابر 2352 متر بر ثانیه محاسبه شده است که به سرعت انتشار اندازه‌گیری شده موج در مطالعات آزمایشگاهی ماده پلکسی گلاس 2249 متر بر ثانیه نزدیک است.
- ۳- براساس نتایج تحلیل عددی، مقادیر شار انرژی ورودی، بازتابی و عبوری، نشان می‌دهد که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی رزین مخصوص به

Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J., 1973, Finite element accuracy for wave propagation problems. J. Soil Mech. & Foundations, Div ASCE, **99** (SM5), 421- 427.

Liu, Q. and Tidman, P., 1995, Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blasthole., Canmet/Mrl Experimental Mine, <http://www.nrcan.gc.ca>.