

بررسی عددی تأثیر خصوصیات توده سنگ و نوع ماده منفجره در آسیب انفجار به شیب‌های سنگی

علی حق‌نژاد^۱؛ کاوه آهانگری^{۱*}؛ پرویز معارف‌وند^۲؛ کامران گشتاسبی^۳

۱- دکتری مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱

دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۱

چکیده

انفجار، منجر به اغتشاش در توده سنگ و آسیب آن می‌شود. در این بررسی تلاش شده تا با استفاده از مدل‌سازی عددی المان مجزای سه‌بعدی دو شیب تقریباً مشابه، آسیب انفجار ناشی از دو ماده منفجره آنفو و امولایت ارزیابی گردد. در این راستا از ۴ خصوصیت متفاوت توده سنگ و دو حالت ناپیوستگی با امتدادهای مخالف و موافق رویه شیب در مدل‌سازی استفاده شد. آسیب انفجار توسط زون‌های احتمالی شکست نرم‌افزار 3DEC بررسی کیفی و با استفاده از مقادیر حداکثر سرعت ذرات که طی انفجارها ثبت شده است، ارزیابی کمی گردید. براین اساس، مشخص شد که ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی باعث کنترل جریان پلاستیک شکست‌های کششی و برشی می‌گردند. البته ناپیوستگی‌های با راستای موافق رویه شیب نقش مؤثرتری در کاهش آسیب انفجار بازی می‌کنند. با افزایش مقاومت توده سنگ و با ناپیوستگی‌هایی موافق رویه شیب، تأثیر انفجار امولایت از ۱۰ متری دهانه چال کمتر از انفجار آنفو می‌گردد. با توجه به تأثیر ناپیوستگی‌ها در کنترل آسیب، استفاده از ناپیوستگی‌های مصنوعی مانند آنچه در انفجار پیش‌شکافی توسعه می‌یابد، روش مناسبی برای کاهش آسیب و جلوگیری از ایجاد ناپایداری در شیب‌ها خواهد بود.

واژگان کلیدی

ناپیوستگی توده سنگ، آسیب انفجار، خصوصیات توده سنگ، آنفو، امولایت، 3DEC

۱- مقدمه

انفجار، فرآیندی شیمیایی- فیزیکی- مکانیکی است که بررسی‌های پیشین تلاش نموده‌اند تا هر یک، جزئی از این فرآیندها را تأیید و یا اصلاح نمایند [۱]. اما گستردگی و پیچیدگی آن‌ها، همچنان که هوک پس از بررسی‌های خود اعلام نموده، مانع از آشکارسازی فرآیند انفجار و نقش آن در

ایجاد ناپایداری دیواره‌های معدن شده است [۲]. بر اساس منابع بررسی‌کننده آسیب انفجار، پارامترهای (۱) خصوصیات توده سنگ؛ (۲) طرح انفجاری؛ و (۳) خصوصیات مواد منفجره به‌عنوان عوامل مؤثر در انفجار تعیین شده‌اند [۳].
نجم و همکاران به بررسی لرزش زمین به‌عنوان یکی از تأثیرات جانبی انفجار پرداخته‌اند. از دیدگاه آن‌ها لرزش زمین می‌تواند باعث اتلاف انرژی مواد منفجره، کاهش میزان تولید و حتی

*ایران، تهران، انتهای بزرگراه ستاری، میدان دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن؛
کد پستی: ۱۴۷۷۸۹۲۸۵۵، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵/۴۹۳۳ و ۱۴۵۱۵/۷۷۵؛ شماره تلفن: ۰۹۱۲۴۵۹۸۲۱۴؛ شماره دورنگار: ۰۲۱۴۴۸۶۸۴۲۱؛
پست الکترونیکی: kaveh.ahangari@gmail.com

بر اساس نتایج بررسی‌های پیشین سه خصوصیت توده‌سنگ، ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی و ماده منفجره جهت ارزیابی آسیب انفجار موردنظر قرار گرفته و با توجه به اینکه اکثر پارامترهای یادشده توسط کونیا و والتر به‌جز این سه پارامتر ثابت می‌باشند، اثر آن‌ها در این بررسی اعمال نشده است. این ارزیابی بر اساس پیشنهاد هوک که مدل‌سازی عددی را ابزار مناسبی در تخمین آسیب انفجار اعلام نموده [۲]، توسط المان مجزای سه‌بعدی (3DEC) انجام شده است. در این خصوص یک شیب ساده با دو حالت ناپیوستگی زمین‌شناسی متفاوت نسبت به سطح شیب دیواره در نظر گرفته شد. هر یک از این حالت‌ها بر اساس خصوصیات توده‌سنگ‌های قوی و متوسط تقسیم‌بندی شده و سپس فشار گمانه‌ای به آن‌ها اعمال گردید. با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فیث، ثبت PPV در راستای یک خط که از دهانه چال آغاز و تا انتهای طولی مدل تعریف شده، امکان ارزیابی کمی آسیب انفجار فراهم شد. از شاخص‌گذاری زون‌های احتمالی شکست نرم‌افزار 3DEC نیز برای ارزیابی کیفی آسیب استفاده گردید. شبیه‌سازی‌ها ابتدا بر اساس دو حالت یادشده و ۴ مدل برای انفجار آنفو انجام گردید. در ادامه، جهت شناسایی تأثیر نوع ماده منفجره از شبیه‌سازی انفجار امولایت استفاده و آسیب آن نیز ثبت شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- هندسه مدل

نخست دو شیب تقریباً مشابه با سه پله ۱۵ متری و شیب پله‌ای 55° بر اساس پیشنهاد وایلی و ماه [۹] با ابعاد (۰ الی ۱۵۰)، (۰ الی ۵۰) و (۰ الی ۹۵) به‌ترتیب در راستای محورهای X ، Y و Z توسعه یافت. مطابق روابط پیشنهادی هاسترولید، بارسنگ چال‌ها ۴ m، فاصله‌داری ۵ m و اضافه حفاری آنها ۳ m محاسبه شد [۳]. فشار دینامیکی انفجار در سه چال با قطر ۲۰۰ mm، طول خرج‌گذاری (۳+۹) m و گل‌گذاری ۶ m با خصوصیات ماده منفجره آنفو اعمال گردیده است. انفجار هر سه چال هم‌زمان بوده و فشار دینامیکی معادل ۶۶۰ kg آنفو (و سپس امولایت) تعیین گردید.

سه ناپیوستگی با فاصله‌داری ۱۵ m توسعه‌یافته و در سطح پله کاری به‌ترتیب در فاصله ۱۰ m، ۲۵ و ۴۰ جانمایی شد (شکل ۱). تنها تفاوت دو مدل در راستای ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی نسبت به شیب است. در شکل ۱-الف ناپیوستگی‌ها دارای زاویه

تنزل و کاهش در فعالیت‌های توسعه‌ای معادن شود. بر اساس نتایج آن‌ها، ارتباط غیرخطی میان مقدار خرج مصرف‌شده با حداکثر سرعت ذرات (PPV) وجود داشته و ماده منفجره آنفو در مقایسه با امولان لرزش زمین کمتری ایجاد می‌نماید [۴].

حسینی و سن به‌منظور بررسی شدت لرزش زمین از آنالیز سه روش انفجاری و دو نوع ماده منفجره مختلف در یک معدن روباز زغال‌سنگ استفاده نموده‌اند. آن‌ها اعلام نموده‌اند، نرخ کاهش لرزش با افزایش فاصله مقیاس‌دار (نسبت فاصله از محل انفجار به مجذور خرج انفجاری) و یا مواد منفجره با انرژی لرزشی بالاتر، از شدت کمتری برخوردار است. همچنین تأثیر نوع مواد منفجره بر روی کاهش لرزش در محدوده‌های پایین‌تر فاصله مقیاس‌دار، افزایش می‌یابد [۵].

کونیا و والتر از بارسنگ، فاصله‌داری، اضافه حفاری، طول گل‌گذاری، نوع گل‌گذاری، ارتفاع پله، تعداد سطح آزاد، هندسه خرج، طول ستون خرج، تعداد پرایمر، ترکیب پرایمر، تعداد و نوع بوستر، تعداد چال در هر ردیف، تعداد ردیف‌ها، نوع آغازگرها، تأخیر ردیف به‌ردیف، تأخیرهای درون چال، دقت آغازگرها، فاصله تا سازه، زاویه سطح انفجاری نسبت به سازه، نوع سنگ، عوامل زمین‌شناسی و انرژی انفجار به‌عنوان عوامل مؤثر در لرزش زمین یاد نموده‌اند [۶].

آک و کونوک معتقدند معادلات تجربی پیش‌بینی‌کننده لرزش زمین ناشی از انفجار (معادله (۱)) در شرایطی که خرج انفجاری (Q) و یا فاصله از محل انفجار (R) متغیر می‌باشد، رویه مناسبی برای پیش‌بینی لرزش زمین هستند؛ اما آن‌ها مهم‌ترین نقص این معادلات را عدم در نظر گرفتن تأثیر ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی اعلام نموده‌اند. لذا با برداشت زمین‌شناسی ناپیوستگی‌های دارای بازشدگی بیش از ۲ ms در پله‌های انفجاری در یک معدن سطحی در ترکیه، تأثیرات فراوانی ناپیوستگی‌ها (λ) در انتشار لرزش‌های زمین را تحلیل نموده‌اند. پس از آنکه تأثیرات اولیه ناپیوستگی‌ها مشخص شده، این موضوع به‌صورت پارامتری در معادله نیکولز و همکاران به‌صورت معادله (۲) اضافه شد [۷].

$$PPV = k(R/Q^{0.5})^{-b} \quad (1)$$

$$PPV = 245.975(SD)^{-1.473} \times \lambda^{-0.305} \quad (2)$$

که k پارامتر زمین‌شناسی (شامل بافت سنگ و ساختارهای زمین‌شناسی و غیره) و b پارامتر طرح انفجار (شامل بارسنگ، فاصله‌داری و غیره) در هر سایت می‌باشند [۸].

رفتاری ناپیوستگی ها نیز الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است.

۲-۳- حل استاتیکی

پس از ساخت هندسه ها، هر مدل بر اساس جدول ۱ حل استاتیکی گردید تا به تعادل اولیه برسد. ابعاد مش مدل بر اساس پژوهش های وی- هونا و همکاران [۱۲] و عزیزآبادی و همکاران [۱۳] معادل یک دهم کوچک ترین طول موج و برابر با ۲ m در نظر گرفته شد.

مرزهای مدل به جز در طول بارسنگ، کل عرض مدل و ارتفاع چال انفجاری، ثابت گردید تا تنها امکان انبساط در راستای محور X یا سطح آزاد وجود داشته باشد.

۲-۴- شبیه سازی فشار گمانه ای

با توجه به معایب معادلات حالت و توابع فشار ساده که توسط ایلماز و اونلو [۱۴] بیان گردیده، شبیه سازی فشار گمانه ای توسط تابع فشار- افت صورت پذیرفت. جهت اطمینان از صحت شبیه سازی فشار، ابتدا فشار گمانه ای ناشی از انفجار آنفو در چالی با قطر ۲۰۰ mm و طول ۱۵ m مبنای انتخاب تابع فشار- افت مناسب قرار گرفت. زیرا بررسی مکنزی در شرایط تقریباً مشابه نشان داده انفجار آنفو فشاری معادل ۲/۶ GPa ایجاد می نماید [۱۵].

توابع جانگ و همکاران [۱۶] و یانگ و همکاران [۱۷] مقادیر کمتر از ۲/۶ GPa را نشان داده اند اما در نهایت با استفاده از تابع مورد استفاده علی آبادیان و شرفی صفا [۱۸] حداکثر فشار گمانه ای ۲/۵ GPa کسب شد. مزیت این تابع نسبت به توابع پیشین استفاده از پارامترهای چگالی، مدول حجمی، مدول برشی و سرعت امواج P سنگ می باشد که باعث می گردد، تابع افت فشار به شرایط سنگ نیز وابسته باشد. لذا معادله های (۷) الی (۱۱) برای شبیه سازی فشار گمانه ای استفاده شد.

$$PD = 432 \times 10^{-6} \frac{\rho_e V_d^2}{1 + 0.8 \rho_e} \quad (7)$$

$$PE = \frac{1}{2} PD \quad (8)$$

$$PW = PE \left(\frac{r_h}{r_e} \right)^{-qk} \quad (9)$$

$$P(t) = PW \frac{8\rho_r C_p}{\rho_r C_p + V_d \rho_e} \left[e^{(-Bt/\sqrt{2})} - e^{(-\sqrt{2}Bt)} \right] \quad (10)$$

$$C_p = \sqrt{(K + 4G/3)/\rho} \quad (11)$$

که PD فشار انفجار (MPa)، ρ_e چگالی ماده منفجره

۴۵ در جهت خلاف رویه شیب (آزیموت ۹۰ درجه) می باشد. در سوی دیگر، ناپیوستگی های شکل ۱-ب از همین زاویه اما در راستای رویه شیب (آزیموت ۲۷۰ درجه) برخوردارند.

۲-۲- خصوصیات توده سنگ

معیار شکست هوک-براون به عنوان مدل رفتاری توده سنگ (معادله های (۳) الی (۶)) و خصوصیات شاخصی که توسط هوک و براون برای سنگ های متوسط و قوی به کاررفته، به عنوان خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در نظر گرفته شده اند [۱۰].

خصوصیات سنگ بکر به همراه مقادیر GSI در نرم افزار RocLab استفاده شد تا برای دو مقدار متفاوت D (۰ و ۱) خصوصیات توده سنگ تخمین گردد (جدول ۱). دلیل انتخاب دو مقدار D، تاثیرسنجی گسترش آسیب انفجار در دو حالت مختلف توده سنگ بوده است. مشابه حالت قبل، خصوصیات دینامیکی توده سنگ نیز در نرم افزار RocLab تخمین و در جدول ۲ اشاره شده است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_b C_o \sigma_3 + s C_o^2} \quad (3)$$

$$m_b = m_i \exp(GSI - 100 / (28 - 14D)) \quad (4)$$

$$s = \exp(GSI - 100 / (9 - 3D)) \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (6)$$

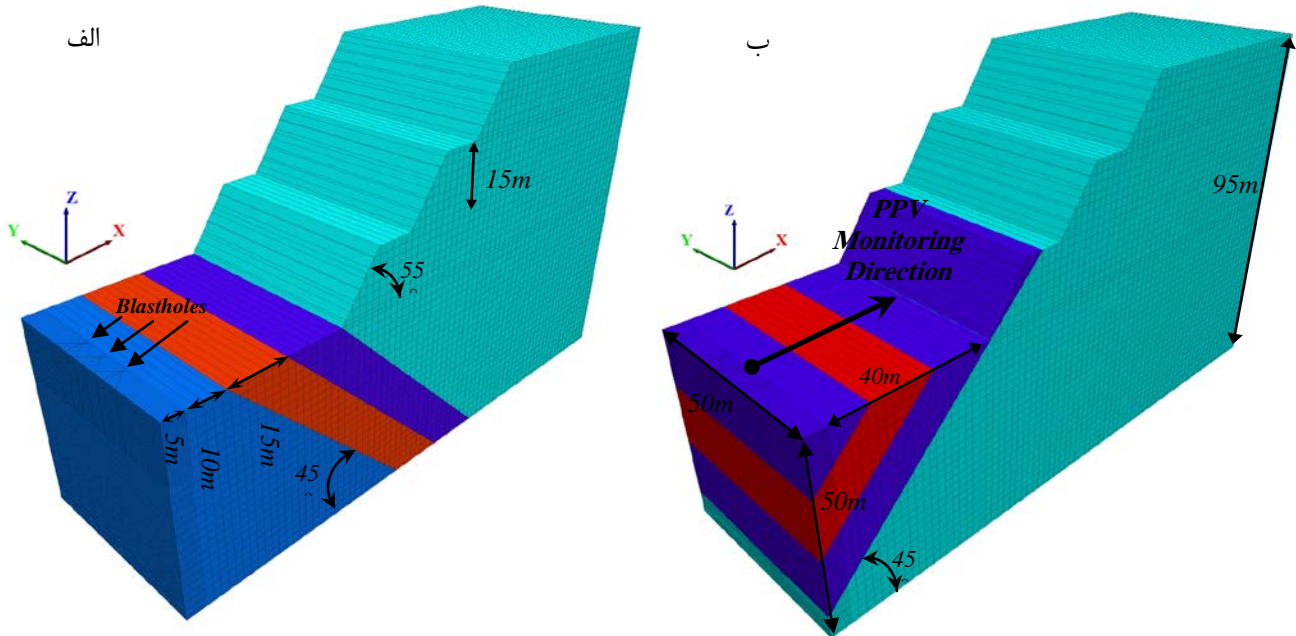
σ_1 و σ_3 تنش های اصلی حداکثر و حداقل در زمان شکست، C_o مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، m_i پارامتر برازش منحنی به دست آمده از آزمون های سه محوری سنگ بکر، m_b مقدار کاهش یافته m_i و نشان دهنده تأثیر کاهش مقاومت تحت شرایط توده سنگ، a و s ثابت های تجربی بدون بعد و D فاکتور آسیب انفجار.

در جداول ۱ و ۲ توده سنگ هایی که دارای مقادیر GSI یکسان می باشند از خصوصیات سنگ بکر مشابه برخوردارند ولی به ازای تغییرات D، پارامترهای مقاومتی توده سنگ متفاوت وجود دارد. لذا در نام گذاری مدل ها از این دو خصوصیت استفاده گردید. به طور مثال مدل GSI75-D0 نشان دهنده خصوصیات توده سنگ قوی با GSI و D به ترتیب معادل ۷۵ و ۰ می باشد.

بابانوری و همکاران [۱۱] بر اساس ضخامت پرشدگی های رسی، طبقه بندی برای خصوصیات ناپیوستگی ها ارائه نموده اند. مقادیر میانی طبقه بندی که برای پرشدگی با ضخامت ۱۰-۲۰ mm می باشد، مطابق جدول ۳ برای این بررسی انتخاب گردید. مدل

سرعت موج P V_d ، (m/s)، سرعت انفجاری t ، (m/s)، زمان s ،
 K مدول حجمی دینامیکی (Pa) و G مدول برشی دینامیکی
 (Pa) می‌باشند.

q ، (gr/cm³)، ضریب حرارت ویژه، k فاکتور شکل ماده منفجره
 (۳ برای خرج‌های سیلندری)، شعاع چال انفجاری r_e ، (mm)،
 شعاع خرج انفجاری r_f ، (mm)، چگالی سنگ ρ_r ، (gr/cm³)، C_p



شکل ۱: جزییات ژئومتری شیب‌ها؛ الف: ناپیوستگی‌های ۴۵° خلاف روبه شیب و ب: ناپیوستگی‌های ۴۵° در راستای روبه شیب

جدول ۱: جزییات خصوصیات استاتیکی سنگ بکر و توده‌سنگ دو طبقه‌بندی متوسط و قوی

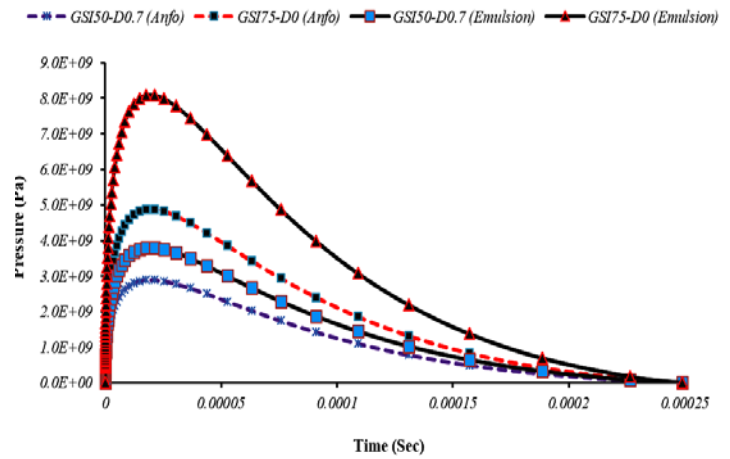
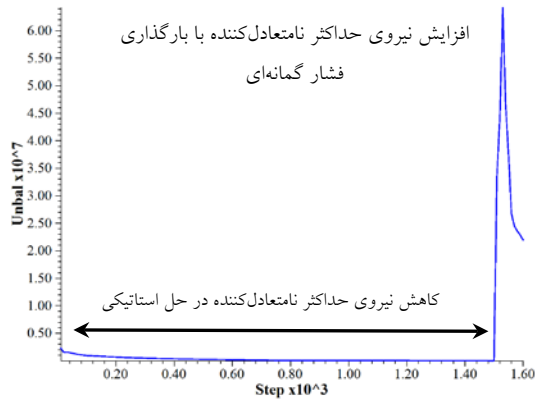
توده‌سنگ														سنگ بکر			خصوصیات لیتولوژی نمونه
G (MPa)	K (MPa)	Erm (MPa)	sigcm (MPa)	sigt (MPa)	Phi (°)	C (MPa)	a	s	mb	Slope Height	D	GSI	mi	Es (MPa)	UCS (MPa)	Den. (gr/cm ³)	
۰.۷۰۰	۰.۹۰۰	۰.۰۰۰	۶۹	۰/۹۱	۶۳	۴/۱	۱۵۰.۱	$۶/۲ \times 10^{-۲}$	۱/۲	۱۰۰	۰	۷۵	۲۵	۰.۷۵۰	۱۵۰	۲/۷	گرانیت
۷.۲۰۰	۹.۶۰۰	۰.۲۰۰	۴۳	۰/۱۵۵	۵۸	۲/۵	۱۵۰.۱	$۱/۶ \times 10^{-۲}$	۴/۲	۱۰۰	۱	۷۵	۲۵	۰.۷۵۰	۱۵۰	۲/۷	گرانیت
۲.۷۰۰	۴.۵۰۰	۶.۷۰۰	۱۷	۰/۱۲	۵۲	۱/۱	۱۵۰.۶	$۳/۹ \times 10^{-۳}$	۲/۵	۱۰۰	۰	۵۰	۱۵	۰.۰۰۰	۸۰	۲/۵	ماسه‌سنگ
۶۰۰	۱۰۰۰	۱.۵۰۰	۷	۰/۰۵	۳۸	۰/۵	۱۵۰.۶	$۲/۴ \times 10^{-۴}$	۰/۴	۱۰۰	۱	۵۰	۱۵	۰.۰۰۰	۸۰	۲/۵	ماسه‌سنگ

جدول ۲: جزییات خصوصیات دینامیکی سنگ بکر و توده‌سنگ

توده‌سنگ														سنگ بکر			خصوصیات لیتولوژی نمونه
G (MPa)	K (MPa)	Erm (MPa)	sigcm (MPa)	sigt (MPa)	Phi (°)	C (MPa)	a	s	mb	Slope Height	D	GSI	mi	Es (MPa)	UCS (MPa)	Den. (gr/cm ³)	
۰.۰۰۰	۰.۳۰۰	۰.۶۰۰	۱۲۸	۱/۶۹	۶۶	۶/۹	۱۵۰.۱	$۶/۲ \times 10^{-۲}$	۱/۲	۱۰۰	۰	۷۵	۲۵	۱۰۰	۲۷۸	۲/۷	گرانیت
۰.۲۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۸۰	۱/۰۳	۶۱	۴/۱	۱۵۰.۱	$۱/۶ \times 10^{-۲}$	۴/۲	۱۰۰	۱	۷۵	۲۵	۱۰۰	۲۷۸	۲/۷	گرانیت
۴.۳۰۰	۷.۲۰۰	۰.۷۰۰	۳۲	۰/۲۳	۵۶	۱/۵	۱۵۰.۶	$۳/۹ \times 10^{-۳}$	۲/۵	۱۰۰	۰	۵۰	۱۵	۳۵	۱۴۹	۲/۵	ماسه‌سنگ
۹۰۰	۱.۵۰۰	۲.۳۰۰	۱۳	۰/۰۸	۴۳	۰/۷	۱۵۰.۶	$۲/۴ \times 10^{-۴}$	۰/۴	۱۰۰	۱	۵۰	۱۵	۳۵	۱۴۹	۲/۵	ماسه‌سنگ

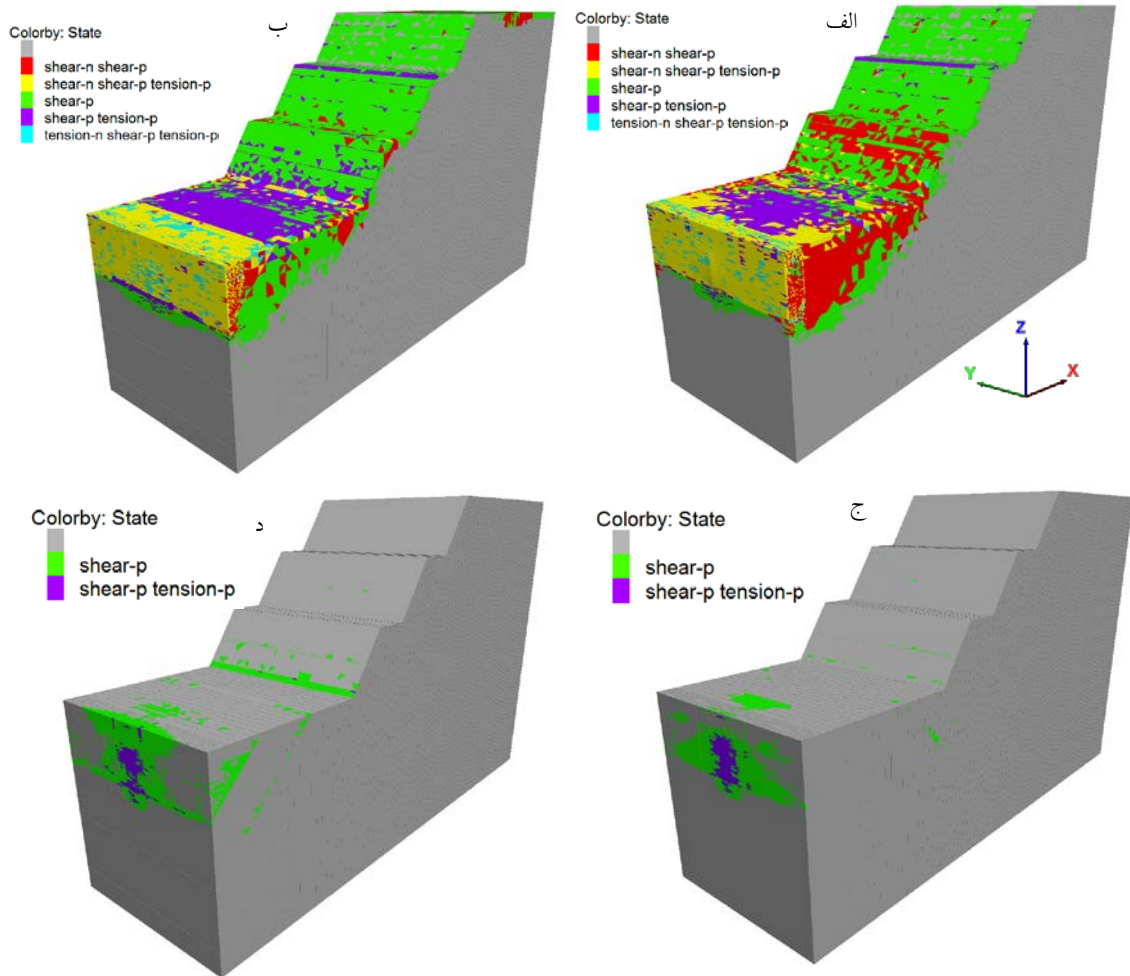
جدول ۳: جزییات خصوصیات پرشدگی ناپیوستگی‌ها [۱۱]

خصوصیات	اصطکاک (زاویه)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	سختی برشی (گیگاپاسکال بر متر)	سختی نرمال (گیگاپاسکال بر متر)
مقدار	۳۰	۱۵	۰/۲۵	۰/۵



شکل ۳: نمودار نیروی حداکثر نامتعادل کننده مدل GSI50-D0.7

شکل ۲: تغییرات فشار گمانه‌ای برای دو ماده منفجره آنفو و امولایت



شکل ۴: زون‌های شکست شبیه‌سازی انفجار آنفو با راستای ناپوستگی‌های زمین‌شناسی مخالف و موافق رویه شیب پس از ۰/۲ ثانیه از آغاز انفجار در مدل‌های: الف) GSI50-D0.7؛ ب) GSI50-D0.7(1)؛ ج) GSI75-D0؛ و د) GSI75-D0(1)

شود. به عبارت دیگر محور پایش مقادیر به صورت $m = 150$ تا $X = 0$ ، $Y = 25$ m و $Z = 60$ m (شکل ۱) تعریف گردیده تا به توان لرزش ایجادشده در سطح پله کاری مدل را ثبت نمود.

۲-۶- شبیه‌سازی دینامیکی

مرزبندی دینامیکی مدل همان‌طور که در بررسی ایلماز و اونلو [۱۴] استفاده‌شده از نوع جذب‌کننده در طرفین (به‌استثناء سطح آزاد) و پایین مدل تعریف گردید. این‌گونه مرزبندی مانع از انعکاس امواج فشاری به درون مدل می‌گردد. میرایی مدل نیز بر اساس پیشنهاد ایلماز و اونلو [۱۴] از نوع میرایی محلی به مقدار ۵٪ در نظر گرفته شد. زیرا استفاده از میرایی رایلی در مصالح با رفتار پلاستیسیته اهمیت چندانی ندارد. شبیه‌سازی دینامیکی با اعمال فشارهای گمانه‌ای متناسب با مدل به دیواره چال‌های انفجار آغاز گردید. این شبیه‌سازی به صورت اعمال فشار گمانه‌ای هم‌زمان در سه چال تقسیم‌بندی شده‌اند. بر اساس Fish توسعه‌یافته، مقادیر PPV ناشی از فشار دینامیکی انفجار در طی شبیه‌سازی انفجار همواره ثبت گردیده است. لازم به ذکر است، پیش از اعمال فشار از وضعیت تعادل مدل بر اساس نمودار حداکثر نیروی نامتعادل‌کننده اطمینان حاصل شد. در شکل ۳ نمونه‌ای از نمودار نیروی حداکثر نامتعادل‌کننده مدل GSI50-D0.7 ارائه‌شده است.

۳- نتیجه‌گیری و بحث

۳-۱- زون‌های شکست در انفجار آنفو

شاخص‌گذاری پلاستیک شکست 3DEC بر اساس افزایش جریان پلاستیک انواع تنش بر روی زون‌بندی‌ها، معیار تسلیم‌شوندگی احتمالی را به صورت الگوهای ارائه می‌نماید [۲۲]. در شکل ۴ زون‌های شکست مدل‌ها (شبیه‌سازی انفجار آنفو) با راستای ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی متفاوت نسبت به رویه شیب در مقابل یکدیگر ارائه‌شده تا بتوان نقش ناپیوستگی‌ها در کنترل گسترش انواع شکست برشی و کششی به سمت شیب را مقایسه نمود. وضعیت هر یک از شکست‌ها با دو پسوند p و n مشخص‌شده که به ترتیب نمایانگر شکست پایان‌یافته و شکست فعلی می‌باشند.

در شکل ۴-الف شکست Shear-p بر اثر فشار دینامیکی ابتدایی انفجار در مدل به شکل پیش‌رونده از ابتدا تا انتهای مدل گسترش و سپس پایان‌یافته است. شکست Shear-n Shear-p

مطابق معادله‌های (۷) الی (۱۱)، فشار گمانه‌ای به خصوصیت سنگ و ماده منفجره وابسته است، بنابراین برای دو نوع توده‌سنگ و دو نوع ماده منفجره فشار گمانه‌ای مختلف شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ تغییرات فشارهای گمانه‌ای برای آنفو (چگالی 780 kg/m^3 و سرعت انفجاری 4052 m/s) و امولایت (چگالی 1250 kg/m^3 و سرعت انفجاری 5580 m/s) ارائه‌شده است.

شبیه‌سازی سه مکانیسم عمده انفجار جهت مدل‌سازی یکی از تأثیرگذارترین عوامل در مدل‌سازی دقیق انفجار می‌باشد. جهت شبیه‌سازی (۱) انبساط فشار گاز، مش‌بندی مدل در طول بارسنگ، کل عرض مدل و ارتفاع چال انفجاری امکان انبساط در راستای X یا سطح آزاد را دارند؛ (۲) موج تنش دینامیکی انفجار به صورت تنش فشاری اعمال شد. با توجه به نتایج ثبت‌شده برخی پژوهشگران که قطر چال در میزان وزن ماده منفجره و نهایتاً مقدار فشار انفجار تولیدی مؤثر می‌باشد [۱۹] از روش بارگذاری در سرتاسر استوانه چال استفاده شد؛ و (۳) انعکاس امواج فشاری با استفاده از قابلیت‌های 3DEC و آزادسازی مرز در سطح آزاد (بدون مرزهای جذب‌کننده) در هر سه جهت مختصاتی امکان انعکاس موج فشاری به درون توده فراهم گردید.

۲-۵- پارامترهای تخمین آسیب

۱- لیو [۲۰] و دوکووانی و همکاران [۲۱] فشار یا تنش اعمال‌شده را به علت سازگاری با رفتار مکانیکی سنگ به‌عنوان پارامتر بحرانی تعریف‌کننده آسیب برگزیده‌اند. با قابلیت نرم‌افزار 3DEC در تعیین زون‌های احتمالی شکست [۲۲]، زون‌های شکست به‌عنوان پارامتر تخمین کیفی آسیب در نظر گرفته شده و برای تحلیل کیفی انفجار آنفو بکار رفت.

۲- پیرسون و همکاران [۲۳] و هاسترولید و همکاران [۲۴] از PPV به علت سهولت اندازه‌گیری به‌عنوان پارامتر بحرانی ارزیابی آسیب استفاده نموده‌اند. بیهاندری [۲۵] جهت کاهش ریسک آسیب، آستانه لرزش ایمن 50 mm/s را پیشنهاد نموده که همین مقدار به‌عنوان پارامتر تخمین کمی آسیب در انفجارهای آنفو و امولایت استفاده شد.

جهت مونیتور مقادیر PPV از Fish نویسی استفاده‌شده و کدهای آن در محیط 3DEC بارگذاری شد تا مقادیر در راستای طولی از دهانه چال مرکزی تا انتهای طول مدل ثبت

۳-۲- تغییرات PPV در انفجار آنفو

با توجه به اینکه تفاوت دو مدل در راستای ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی نسبت به رویه شیب می‌باشد، لذا نمودارهای تغییرات PPV در انفجار آنفو برای هر دو حالت ناپیوستگی‌ها در کنار یکدیگر قرار داده شده تا امکان مقایسه وجود داشته باشد. در شکل ۵-الف هر یک از ناپیوستگی‌ها باعث کاهش مقدار PPV و یا به عبارت دیگر، کاهش فشار دینامیکی انفجار شده‌اند. البته هرچند ناپیوستگی‌ها باعث کاهش این فشار شده‌اند، اما با توجه به اینکه غالباً خود ناپیوستگی‌ها ضعیف‌ترین بخش توده سنگ می‌باشند، در مکان‌هایی که فشار دینامیکی انفجار به آن‌ها رسیده، مقدار PPV به‌طور موضعی افزایش یافته است. این موضوع در محل ناپیوستگی‌های دوم و سوم مشاهده می‌شود.

در شکل ۵-ب وضعیت کلی تغییرات PPV با مدل GSI50-D0.7 تفاوت چندانی ندارد. مهم‌ترین اختلاف آن‌ها در مقادیر روی سطح ناپیوستگی‌ها می‌باشد. در شکل ۵-ب افزایش PPV به شکل صعودی قبل از رسیدن فشار به سطح ناپیوستگی‌ها تدریجی فزونی یافته است.

در شکل ۵-ج با افزایش مقاومت توده سنگ، مقادیر PPV ثبت شده به‌طور کلی نسبت به مدل GSI50-D0.7 کاهش یافته است. همچنین برخلاف مدل یاد شده، افزایش PPV بر روی سطح ناپیوستگی‌های دوم و سوم مشاهده نمی‌گردد. اما در روند جدیدی، تأثیر ناپیوستگی اول در کاهش PPV (یا فشار دینامیکی انفجار) بیشتر شده و به‌طور شدیدتری توانسته مقدار PPV را نسبت به دو ناپیوستگی بعدی کاهش دهد.

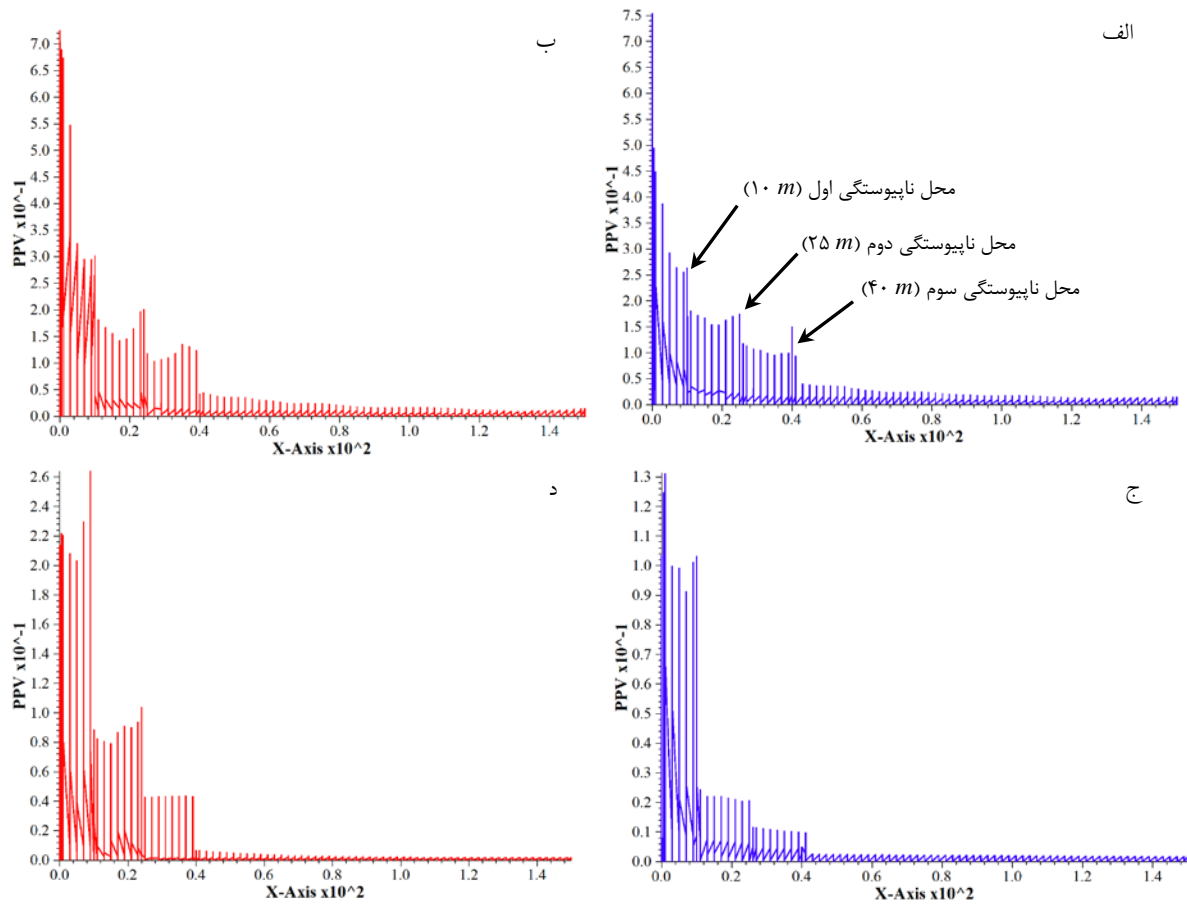
در شکل ۵-د همان کاهش مقادیر PPV با افزایش مقاومت توده سنگ قابل‌رؤیت می‌باشد. نسبت به شکل ۵-ب نیز افزایش تدریجی PPV از سطح ناپیوستگی‌ها، قابل‌رؤیت است. مقایسه مقادیر PPV در شکل ۵-د نسبت به مدل GSI75-D0 نشان می‌دهد در شرایطی که ناپیوستگی‌ها موافق رویه شیب می‌باشند، مقادیر بالاتری ثبت شده است.

نشان‌دهنده جریان دوم شکست برشی توسعه‌یافته (Shear-n) در مدل است که پس از شکست برشی اولیه پایان‌یافته (Shear-p) در حال توسعه است. شکست Shear-n Shear-p Tension-p به جریان پیچیده‌ای اشاره نموده که بیشتر در فاصله بار سنگ گسترش یافته است. این شکست در ابتدا به صورت کشش و سپس برش پایان‌یافته و در زمان ۰/۲ ثانیه پس از انفجار همچنان شکست برشی جدیدی را در حال توسعه دارد. احتمالاً تعدد (۱) انتقال امواج به سطح آزاد، (۲) انعکاس مجدد به توده سنگ و (۳) انتقال مجدد به سطح آزاد در اثر خردایش‌های جدید مهم‌ترین دلیل این شکست‌های پیچیده باشد. شکست دیگری که به صورت عقب‌زدگی نمایان است با Shear-p Tension-p شاخص‌گذاری شده و به شکست کششی پایان‌یافته‌ای که از تئوری تبدیل امواج فشاری به کششی در اثر انعکاس امواج در سطح آزاد تبعیت می‌نماید و شکست برشی که در اثر فشار دینامیکی مستقیمی که از انفجار ایجاد می‌گردد، اشاره نموده است.

در شکل ۴-ب با تغییر راستای ناپیوستگی‌ها، تأثیر ناپیوستگی‌ها آشکارتر شده و ناپیوستگی اول به خوبی توانسته شکست‌های Shear-n Shear-p Tension-p و Shear-n را کنترل و shear-p و ناپیوستگی دوم نیز شکست Shear-p را کنترل نماید. در مقایسه با شکل ۴-الف به علت شکل ناپیوستگی‌ها، شکست Shear-n Shear-p از گسترش کمتری در عمق پله و به سوی شیب برخوردار است.

در شکل ۴-ج نسبت به مدل GSI50-D0.7 که اختلاف توده سنگ آن‌ها ناشی از مقادیر متفاوت GSI و D می‌باشد، کاهش کمی و کیفی شکست‌ها با افزایش مقاومت توده سنگ مشهود است. در این خصوص شکست Shear-n Shear-p نیز از گسترش اندکی برخوردار است. همچنین پیشروی سطحی شکست Shear-p بر روی پله‌ها نیز کاهش یافته است و مقدار ناچیزی از آن در سطح ناپیوستگی سوم قابل‌رؤیت می‌باشد.

در شکل ۴-د همان نسبت کاهش کمی و کیفی شکست‌ها با افزایش مقاومت توده سنگ مشهود است. البته با توجه به راستای ناپیوستگی‌ها نسبت به مدل GSI75-D0(1)، شکست Shear-p در نهایت تا ناپیوستگی دوم گسترش یافته است که نشان‌دهنده نقش این نوع از ناپیوستگی‌ها در کنترل بهتر شکست می‌باشد.



شکل ۵: تغییرات PPV در راستای محور پایش $X=0$ to 150 m, $Y=25$ m و $Z=50$ m در مدل‌های الف) GSI50-D0.7؛ ب) GSI50-؛ ج) D0.7(1)؛ د) و د) GSI75-D0(1)؛ و د) GSI75-D0

جدول ۴- مقادیر حداکثر PPV در بالای دهانه چال و سطح ناپیوستگی‌ها در هر دو حالت ناپیوستگی‌ها برای انفجار آنفو

PPV Max (mm/s)				فاصله از دهانه چال (m)
GSI75-D0(1)	GSI50-D0.7(1)	GSI75-D0	GSI50-D0.7	
۲۲۱/۸۹	۷۲۴/۸۴	۱۳۱/۲۵	۴۰۵/۸۷	۰
۸۸/۸۹	۳۰۳/۱۳	۱۰۳/۲۹	۲۶۴/۲۳	۱۰
۴۳/۱۱	۱۱۸/۴۱	۲۰/۶۸	۱۷۵/۶	۲۵
۷/۰	۴۳/۶۷	۵/۰۲	۱۴۵/۷	۴۰

جدول ۵: مقادیر حداکثر PPV در بالای دهانه چال و سطح ناپیوستگی‌ها در هر دو حالت ناپیوستگی‌ها برای انفجار امولایت

PPV Max (mm/s)				فاصله از دهانه چال (m)
GSI75-D0(1)	GSI50-D0.7(1)	GSI75-D0	GSI50-D0.7	
۲۳۹/۷۷	۱۳۳۰/۱۵	۱۱۳۲/۵۸	۱۱۴۳/۷۶	۰
۱۱۵/۳۷	۳۶۹/۳۶	۱۶۱/۷۹	۲۸۱/۸۹	۱۰
۴۲/۹۴	۱۳۳/۸۶	۲۵/۵۶	۱۸۰/۴۴	۲۵
۶/۵۲	۴۹/۱۶	۵/۳۸	۱۶۴/۱۲	۴۰

جهت کنکاش این موضوع از وضعیت زون‌های شکست استفاده شده و مشخص گردید قسمتی از فشار دینامیکی پس از برخورد به ناپیوستگی‌ها به سطح پله منتقل شده‌اند که این شرایط در ناپیوستگی‌های مخالف رویه شیب چندان آشکار نیست.

۳-۳- تغییرات PPV در انفجار امولایت

همان‌طور که در بخش "شبیه‌سازی فشار گمانه‌ای" اشاره شد، خصوصیات ماده منفجره در فشار اعمالی به دیواره گمانه مؤثر است. مقایسه تغییرات فشارهای گمانه‌ای ماده منفجره آنفو و امولایت در شکل ۲ مؤید همین موضوع است. جهت اثرسنجی این اختلاف، نتایج ثبت‌شده در راستای محور ثبت‌کننده پیشین برای هر دو حالت ناپیوستگی‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. مقایسه مقادیر PPV بر روی سطح ناپیوستگی‌ها در شکل ۶ با شکل ۵ به‌خوبی نقش تغییر ماده منفجره و تأثیرات آن را نشان می‌دهد. در شکل ۶-الف نسبت به شکل ۵-الف، تأثیر ناپیوستگی اول در کنترل آسیب ناچیز بوده و این تأثیر از ناپیوستگی دوم خودنمایی می‌کند؛ اما با افزایش مقاومت توده سنگ (شکل ۶-ج) این تأثیر مجدد آشکار می‌گردد. همچنین این مقادیر در دو حالت شکل ۶ نسبت به شکل‌های ۵-الف و ب افزایش یافته است. با تغییر راستای ناپیوستگی‌ها، ناپیوستگی‌ها در شکل ۶-ب در کنترل آسیب موفق بوده‌اند. مقایسه مقادیر PPV در سطح ناپیوستگی‌های شکل‌های ۶-ب و د با شکل‌های ۵-ب و د افزایش آسیب ناشی از ماده منفجره قوی‌تر را نمایش می‌دهد.

۳-۵- بررسی آماری انفجار امولایت

بررسی گسترش زون آسیب انفجار در مدل‌های GSI50-D0.7(1) تا فاصله ۲۵ m گسترش داشته است. مقایسه GSI75-D1 و GSI75-D0.7 با GSI75-D1(1) و GSI75-D0.7(1) نتایج تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد. در مدل‌های GSI75-D0 و GSI75-D0(1) آسیب در ۱۰ m خلاصه شده و نسبت به دو مدل ضعیف‌تر مقادیر ثبت‌شده کاهش یافته است. البته مقادیر PPV در فاصله ۱۰ m مدل GSI75-D0(1) کمتر از GSI75-D0 می‌باشد. این نشان‌دهنده نقش بهتر ناپیوستگی دوم با راستای رویه شیب در کنترل آسیب می‌باشد.

۳-۵- بررسی آماری انفجار امولایت

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود در مدل‌های ضعیف‌تر، ناپیوستگی‌های موافق با رویه شیب کنترل بهتری بر روی آسیب داشته‌اند. این موضوع در توده سنگ قوی‌تر اختلاف کمتری دارد.

لازم به ذکر است، به‌طور کلی با افزایش فشار گمانه‌ای ناشی از امولایت، مقادیر PPV ثبت‌شده افزایش یافته و این موضوع منطقی، تثبیت‌کننده صحت شبیه‌سازی عددی صورت گرفته می‌باشد. از نتایج بررسی آماری برای تعیین میزان تغییرات ایجادشده در اثر انفجار امولایت نسبت به آنفو استفاده شد. براین اساس مقادیر حداکثر PPV بر روی سطح ناپیوستگی‌ها در جدول ۵ نسبت به جدول ۴ مقایسه و خلاصه نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

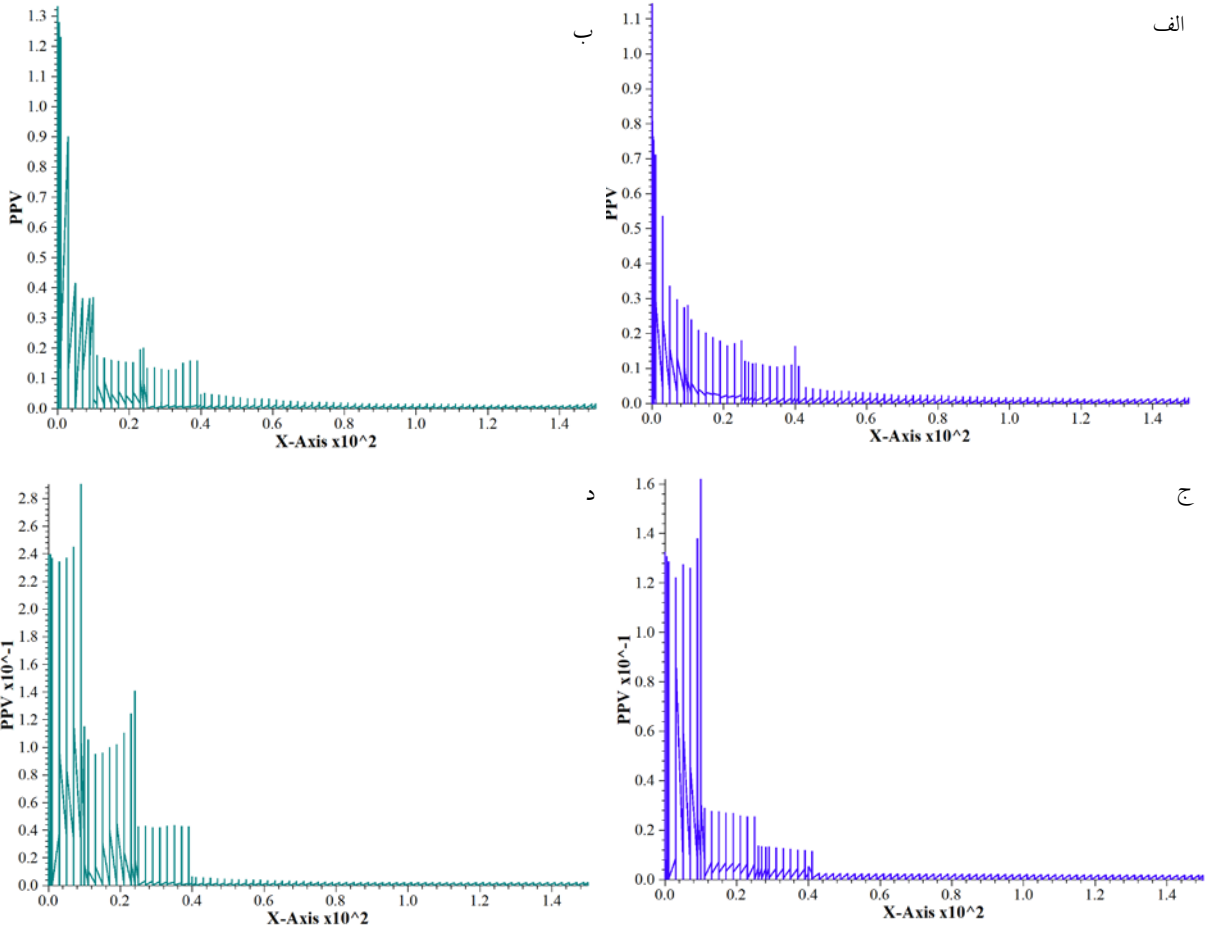
قابلیت‌های دینامیکی روش المان مجزای سه‌بعدی امکان بررسی گسترش زون آسیب انفجار در توده سنگ و به‌روزرسانی جدول راهنمای تخمین D را فراهم نموده است. مهم‌ترین نتایج کسب‌شده از این بررسی به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

در بررسی زون‌های احتمالی شکست مشخص شد ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی باعث کنترل جریان پلاستیک شکست‌های کششی و برشی می‌شوند. در این راستا با افزایش مقاومت سنگ، نقش ناپیوستگی‌ها پررنگ‌تر می‌باشد.

۳-۴- بررسی آماری انفجار آنفو

در شکل‌های ۵ و ۶ نقش ناپیوستگی‌ها و خصوصیات توده سنگ در تغییرات PPV مشخص گردید. جهت بررسی بیشتر حداکثر مقدار PPV بر روی سطح ناپیوستگی‌ها یعنی در فواصل ۱۰، ۲۵ و ۴۰ m گزینش شده و به همراه مقدار مشابه در دهانه چال برای هر دو حالت ناپیوستگی‌ها در جدول ۴ ارائه شد. هدف دیگر از این انتخاب، تعیین گسترش آسیب انفجار در هر مدل می‌باشد. مقادیر فراتر از ۵۰ mm/s که نشان‌دهنده آسیب توده سنگ می‌باشد به‌صورت پررنگ و مایل شاخص‌گذاری شده است.

مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در مدل GSI50-D0.7 که ناپیوستگی‌ها در راستای مخالف رویه شیب می‌باشند



شکل ۶: تغییرات PPV در انفجار امولایت برای مدل‌های الف) GSI50-D0.7؛ ب) GSI50-D0.7(1)؛ ج) GSI75-D0 و د) GSI75-D0(1)

جدول ۶: میزان درصد افزایش PPV در اثر انفجار امولایت نسبت به انفجار آنفو

PPV Max (mm/s)				
GSI75-D0(1)	GSI50-D0.7(1)	GSI75-D0	GSI50-D0.7	فاصله از دهانه چال (m)
۲۹/۸	۲۱/۸	۵۶/۶	۶/۷	۱۰
-۰/۴	۱۳	۲۳/۶	۲/۸	۲۵
-۶/۵۹	۱۲/۶	۷/۱	۱۲/۶	۴۰

GSI75-D0(1) می‌باشد. بر اساس نتایج تغییرات حداکثر PPV این مدل، آسیب انفجار ناشی از امولایت تا ۱۰ m پشت چال بیشتر از مقدار مشابه نسبت به آنفو می‌باشد؛ اما در ۲۵ و ۴۰ m پس از آن آسیب آنفو به مقدار کمتر، افزایش می‌یابد. این موضوع شاید به انبساط فشار گاز ناشی از انفجار آنفو مربوط می‌باشد.

علی‌رغم این‌که ضریب k (معادله (۱)) در معادلات تجربی نماینده خصوصیات زمین‌شناسی می‌باشد، نتایج نشان داد این معادلات نمی‌تواند به‌خوبی تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی را آشکار نمایند.

نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده قابلیت 3DEC در بررسی فرآیند پیچیده انفجار می‌باشد.

با توجه به تأثیر ناپیوستگی‌ها در کنترل آسیب، استفاده از ناپیوستگی‌های مصنوعی مانند آنچه در انفجار پیش‌شکافی توسعه می‌یابد، روش مناسبی برای کاهش آسیب و جلوگیری از ایجاد ناپایداری در شیب‌ها خواهد بود.

در این بررسی دو حالت ایده‌آل از ناپیوستگی‌ها و همچنین طرح انفجاری ساده برای بررسی استفاده شد تا بررسی‌های پیشین تکمیل گردد. لذا در نظر گرفتن حالت‌های دیگری از خصوصیات توده سنگ، ناپیوستگی‌ها و طرح‌های انفجاری می‌تواند به آشکارسازی بیشتر آسیب انفجار کمک نماید.

استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ به‌علت در نظر گرفتن اطلاعات توده سنگ، ابزار مناسبی برای پیش‌بینی آسیب انفجار می‌باشد. ارتباط GSI در بررسی وضعیت شکست با PPV مؤید این موضوع است.

در توده سنگ‌های دارای GSI پایین، کاهش آسیب انفجار از شدت بیشتری برخوردار است و نقش ناپیوستگی‌ها کم‌رنگ‌تر می‌شود.

مطابق جداول ۴ و ۵ حداکثر آسیب انفجار تا کمی بیشتر از ۴۰ m از دهانه چال گسترش می‌یابد. در همین راستا چنانچه ناپیوستگی‌ها از امتداد موافق رویه شیب برخوردار باشد، کنترل بیشتری بر روی کاهش آسیب انفجار ایجاد می‌نمایند.

بررسی حداکثر مقادیر PPV قبل و بعد از ناپیوستگی‌های اول، دوم و سوم (فواصل ۱۰، ۲۵ و ۴۵ m) در انفجار آنفو با امتداد ناپیوستگی مخالف با رویه شیب، متوسط کاهش ۴۳٪ آسیب به ازای هر ناپیوستگی را نشان می‌دهد. متوسط این کاهش به ازای هر ناپیوستگی به شرح زیر می‌باشد:

- ناپیوستگی اول: ۲۸٪
- ناپیوستگی دوم: ۵۶٪
- ناپیوستگی سوم: ۴۶٪

در شرایط مشابه اما با ناپیوستگی‌های با راستای موافق رویه شیب، متوسط کاهش ۶۲٪ آسیب به ازای هر ناپیوستگی رؤیت گردید. متوسط این کاهش به ازای هر ناپیوستگی به شرح زیر می‌باشد:

- ناپیوستگی اول: ۵۹٪
- ناپیوستگی دوم: ۵۶٪
- ناپیوستگی سوم: ۷۳٪

با توجه به این‌که در هر حالت از ناپیوستگی مدل‌های یادشده مقدار GSI و D متفاوت بوده، لذا نقش این دو پارامتر در پیش‌بینی آسیب حائز اهمیت می‌باشد.

ناپیوستگی‌های با راستای موافق رویه شیب نقش مفیدتری در کاهش آسیب انفجار بازی می‌کنند.

مقایسه حداکثر مقدار PPV بر روی سطح ناپیوستگی‌ها در انفجار امولایت نسبت به انفجار آنفو نشان می‌دهد چنانچه ناپیوستگی‌ها مشابه امتداد رویه شیب باشند، حساسیت کمتری به افزایش فشار گمانه‌ای ماده ناشی از ماده منفجره قوی‌تر دارند. مطابق جدول ۶ نکته حائز اهمیت‌تر در خصوص استفاده از امولایت به‌جای آنفو، در مقادیر منفی مربوط به مدل

۵- مراجع

- Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses. *Computers and Geotechnics*, 61, 42-49.
- [14] Yilmaz, O., & Unlu, T. (2013). Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 266-278.
- [15] Mckenzie, C. (1993). *Comprehensive rock engineering: excavation, support and monitoring* (Vol. 4). (I. Hudson, Ed.) Pergamon Press.
- [16] Jong, Y., Lee, C., Jeon, S., Cho, Y., & Shim, D. (2005). Numerical modeling of the circular-cut using particle flow code. *1st Annular Conference of Explosives and Blasting Technique*. Orlando.
- [17] Yang, J., Lu, W., Jiang, Q., Yao, C., & Jiang, S. (2016). A study on the vibration frequency of blasting excavation in highly stressed rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2825-2843.
- [18] Aliabadian, Z., & Sharafisafa, M. (2014). Numerical modeling of presplitting controlled method in continuum rock masses. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 5005-5020.
- [19] Resende, J. (2010). *An investigation of stress wave propagation through rock joints and rock masses*. Portugal: Ph.D. Thesis, Universidade do Porto.
- [20] Liu, Q. (2002). Estimation of dynamic pressure around of fully loaded blasthole in rock. *Fragblast-7*, 267-272.
- [21] Drukovanyi, M., Kravtsov, V., Chernyavskii, Y., Reva, V., & Zerkov, S. (1976). Calculation of fracture zones created by exploding cylindrical charges in ledge rocks. *Soviet Mining Science*, 12(3), 292-295.
- [22] Itasca Consulting Group Inc. (2013). *3DEC Ver. 5.2 user's guide*.
- [23] Persson, P., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock blasting and explosive engineering*. London, United Kingdom: CRC Press.
- [24] Hustrulid, W., Bennett, R., Ashland, F., & Lenjani, M. (1992). A new method for predicting the extent of blast damage zone. Gyttop: Nitro Nobel: Proc Blasting Conference paper No 3.
- [25] Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*. CRC Press, Balkema.
- [1] Rustan, A. (2011). *Mining and rock construction technology*. CRC Press, Balkema.
- [2] Hoek, E. (2012). *Blast damage factor D*. Technical Note for Rocscience.
- [3] Hustrulid, W. (1999). *Blasting principles for open pit mining- general design concept* (Vol. 1). CRC Press, Balkema.
- [4] Najm, K., Javaherian, A., & Amnieh, H. (2002). Study of blasting vibrations in sarcheshmeh copper mine. *Acta Seismologica Sinica*, 15, 683-690.
- [5] Hossaini, S., & Sen, G. (2006). A study of the influence of different blasting modes and explosive types on ground vibrations. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction, Engineering*, 30, No. B3.
- [6] Konya, C., & Walter, E. (1991). *Rock blasting and over break control*. Washington, DC, USA.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration Office of Implementation.
- [7] Ak, H., & Konuk, A. (2008). The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 28, 686-694.
- [8] Ainalis, D., Kaufmann, O., Tshibangu, J., & Verlin, G. (2016). Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast-induced ground vibrations: A review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1), 171-193.
- [9] Wyllie, D., & Mah, C. (2004). *Rock slope engineering- civil and mining* (4th ed.). New York, USA: Taylor & Francis.
- [10] Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.
- [11] Babanouri, N., Mansouri, H., Karimi-Nasab, S., & Bahaadini, M. (2013). A coupled method to study blast wave propagation in fractured rock masses and estimate unknown properties. *Computers and Geotechnics*, 49, 134-142.
- [12] Wei-hua, W., Xi-bing, L., Yu-jun, Z., & Zi-long, Z. (2006). 3DEC modeling on effect of joints and interlayer on wave propagation. *Transactions of Nonferrous Metal Sciety of China*, 16, 728-734.
- [13] Azizabadi, H., Mansouri, H., & Fouché, O. (2014).