

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری

یوسف عظیمی^{۱*}؛ مرتضی رحیمی دیزجی^۲؛ حمید سرخیل^۱

۱- استادیار؛ گروه محیط زیست انسانی، دانشکده‌ی محیط زیست

۲- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر، کارشناس شرکت مهندسی سپاسد شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۱۱/۰۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2016.789

واژگان کلیدی	چکیده
انبار زیرزمینی مدل‌سازی انفجار <i>Flac 3D</i> حداکثر سرعت ذره‌ای (PPV) خرابی مواد ناریه سد بختیاری	در ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد پر انرژی مانند مواد ناریه، گاز و نفت، اگر فاصله جانبی و عمق مجموعه انبارهای زیرزمینی کم باشد، در اثر وقوع انفجار غیر منتظره در یکی از انبارها انفجار به سایر انبارهای مجاور منتقل شده و در نتیجه باعث وقوع حوادث فاجعه‌بار گسترده‌ای در سطح و زیر زمین می‌شود. در این مقاله از یک مدل الاستو-پلاستیک کالیبره شده در نرم‌افزار <i>FLAC3D</i> برای شبیه‌سازی عددی انفجار انبار زیرزمینی استفاده شده است. میزان گسترش خرابی در مدل‌ها توسط دو معیار حداکثر سرعت ذره‌ای (PPV) آستانه خرابی و گسیختگی پلاستیک اندازه‌گیری شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زون خرابی بر اساس معیار <i>PPV</i> نسبت به گسیختگی پلاستیک دارای محدوده بزرگ‌تری است. پاسخ سیستم نگهداری بتنی در انبار مجاور انفجار منفجر شده، حاکی از وقوع گسیختگی‌های کششی در اثر انعکاس امواج از دیوارها است. این می‌تواند باعث انتقال انفجار شود، حتی در شرایطی که زون خرابی حاصل از انفجار در توده سنگ به نزدیکی انبار مجاور هم نرسیده باشد. در این مقاله همچنین فاصله جانبی و عمق ایمن برای سه انبار زیرزمینی مواد ناریه پروژه سد بختیاری بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی برای ضعیف‌ترین مستحکم‌ترین توده سنگ ساختگاه به ترتیب برابر ۴۰ و ۴۵ و ۶۰ متر پیشنهاد شده است.

۱- پیش‌گفتار

استفاده از فضاهای زیرزمینی به عنوان انبار ذخیره‌سازی علاوه بر آزادسازی اراضی سطحی، در دراز مدت از لحاظ ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی گزینه مناسب‌تری نسبت به تاسیسات روباز است. در این میان مواد ناریه با مصارف معدنی و عمرانی از جمله مواردی است که از نقطه نظر دلایل ذکر شده برای ذخیره‌سازی در فضاهای زیرزمینی بسیار مناسب هستند؛ اما یکی از نکات مهم در ارتباط با انبارهای زیرزمینی مواد ناریه، جانمایی صحیح و بهینه مجموعه تاسیسات زیرزمینی ذخیره‌سازی است. به طوری که اگر جانمایی مجموعه تاسیسات زیرزمینی نسبت به هم و سطح زمین صحیح و

اصولی نباشد، در اثر انفجار غیر منتظره یکی از انبارها، امواج تشریحی ناشی از انفجار توانایی انتقال انفجار به انبارهای مجاور را داشته، در نتیجه منجر به انفجار هم‌زمان و انهدام کل تاسیسات زیرزمینی و احتمالاً تاسیسات سطحی خواهد شد. از این رو در جانمایی انبارهای زیرزمینی، تعیین حداقل عمق بهینه و حداقل فاصله جانبی بین محفظه‌های زیرزمینی از جمله مواد بسیار مهم است.

بدین منظور استانداردهای مختلفی به منظور جانمایی ایمن انبارهای زیرزمینی و تعیین آسیب وارده به توده سنگ مجاور در صورت وقوع انفجار، بر اساس مقدار مواد ناریه ذخیره شده و کیفیت تو صیفی سنگ دربرگیرنده ارائه شده

* البرز؛ کرج؛ میدان استاندارد؛ دانشکده محیط زیست؛ گروه محیط زیست انسانی، گرایش معدن - محیط زیست؛ طبقه اول؛ صندوق پستی: ۱۱۸-۳۱۷۴۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۹۱۴۱۰۸۶۵۲۲؛ رایانامه: yoosfazimi@gmail.com

زیرزمینی، شرایط چفت شدگی و نحوه چیدمان مواد ناریه را بر میزان فشار دینامیک وارده بر دیواره‌های فضای زیرزمینی و گسترش زون خرابی در اطراف انبار را بررسی کرده‌اند (Ma, Hao & Hao, 2011). ژیا و همکاران (۲۰۱۳) در آزاد راه داماشون چین میزان خرابی در سنگ و سیستم نگهداری در تونل مجاور به یک تونل در حال حفر با مواد منفجره را با ثبت آزمون‌های صحرایی و شبیه‌سازی عددی در نرم افزار UDEC بر اساس معیار حداکثر سرعت ذره‌ای (PPV) مورد بررسی و کنترل قرار داده‌اند (Xia, et al., 2013). ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) برای بهینه کردن پارامترهای انفجار در کنترل مرز کارگاه استخراج به روش استخراج از طبقات فرعی، با به کارگیری یک مدل ساختاری خرابی بر اساس مکانیک شکست آماری در نرم‌افزار FLAC3D محدوده زون خرابی حاصل از انفجارات معدن زیرزمینی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان برای شبیه‌سازی امواج انفجاری در شرایط مختلف از نرم‌افزار LSDYNA استفاده کرده‌اند (Jiang, et al., 2015). تیواری و همکاران (۲۰۱۶) تاثیر انفجار در یکی از تونل‌های دوقلو با سیستم نگهداری بتن مسلح در محیط خاکی را با انجام شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، میزان تخریب در سیستم نگهداری تونل مجاور و خاک، وابسته به میزان خرج و فاصله بین دو تونل است (Tiwari, Chakraborty & Matsagar, 2016).

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D از یک مدل الاستو-پلاستیک کالیبره شده برای مدل‌سازی انبار زیرزمینی مواد ناریه با هدف بررسی تاثیر شرایط جانمایی انبارها و بارگذاری انفجار استفاده شده است. به دلیل محدودیت نرم‌افزار FLAC3D در مدل‌سازی رشد و ایجاد ترک تأثیر موج ضربه و فشار گاز حاصل از انفجار با یکدیگر ادغام شده و بارگذاری انفجار به شکل یک پالس مثلثی و به مدل‌ها اعمال شده است. برای تعیین زون شکست پلاستیک در توده سنگ از مدل رفتاری موهر کلمب استفاده شده است. همچنین از شاخص PPV به عنوان معیار دیگر در تعیین گسترش زون خرابی انفجار استفاده شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق فرض شده هیچ یک از انبارهای زیرزمینی، توسط تونل مستقیماً به هم وصل نباشند، از این‌رو بحث مربوط به دما بالای ناشی از انفجار در

است (Odello, 1980)، (DoD, 2004) و (NATO, 1993). این استانداردها که عموماً بر اساس نتایج حاصل از مشاهده‌ها و اندازه‌گیری‌ها از آزمایش‌های انفجار در مقیاس‌های واقعی هستند، بسیاری از عوامل موثر مانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد ناریه، نحوه ذخیره‌سازی، حجم و هندسه انبار زیرزمینی، خصوصیات مکانیکی و دینامیکی توده سنگ در برگیرنده، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه و رژیم تنش در منطقه را در جانمایی انبارهای زیرزمینی مد نظر قرار نداده‌اند. از این‌رو با توجه به توانایی مدل‌سازی عددی در شبیه‌سازی شرایط مرزی پیچیده، رفتار غیر خطی مواد، رفتار دینامیکی مواد و هندسه غیر خطی در مسایل مهندسی سنگ، روش‌های عددی ابزاری مفید در بررسی و تفسیر فرآیند انفجار و شکست در سنگ هستند. در سال‌های اخیر بسیاری از محققان روش‌های عددی مختلفی را به منظور مدل‌سازی فرآیند انفجار و آسیب وارده به توده سنگ توسعه داده‌اند. یانگ و همکاران با توسعه یک مدل خرابی تجمعی ناهمسانگرد در نرم‌افزار ABAQUS، میزان گسترش خرابی حاصل از انفجار تک چال در سطح زمین را مدل‌سازی کرده و نتایج حاصل از آزمایش میدانی آن را ارزیابی کرده‌اند (Yang, Bawden & Katsabanis, 1996). ما و همکاران با استفاده از روش المان محدود انتشار امواج ضربه (انفجاری) ناشی از انفجار زیرزمینی را محیط توده سنگی شبیه‌سازی کرده‌اند (Ma, Hao, & Zhou, 1998). هاو و وو در سال ۲۰۰۱، وو و همکارانش در سال ۲۰۰۴ و وو و هاو در سال ۲۰۰۶ با توسعه مدل رفتاری خرابی تجمعی همسانگرد به مدل ناهمسانگرد، تاثیر دانسیته بارگذاری، نحوه چیدمان مواد ناریه در انبار و هندسه و حجم فضای زیرزمینی را در انتشار امواج تنش حاصل از انفجار و پیش‌بینی زون خرابی در توده سنگ گرانبی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Hao & Wu, 2001)، (Wu, Lu & Hao, 2004) و (Wu & Hao, 2006). همچنین بر اساس یافته‌های خود فاصله جانبی و عمق ایمن برای انبارهای زیرزمینی مواد ناریه پیشنهاد کرده‌اند. وی و همکارانش (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-LSDYNA تاثیر کیفیت توده سنگ بر اساس پارامتر RMR و وزن ماده ناریه را بر میزان گسترش زون خرابی بر اثر انفجار زیرزمینی بررسی کرده‌اند (Wei, Zhao & Gu, 2009). ما و همکارانش (۲۰۱۱) تاثیر هندسه فضای

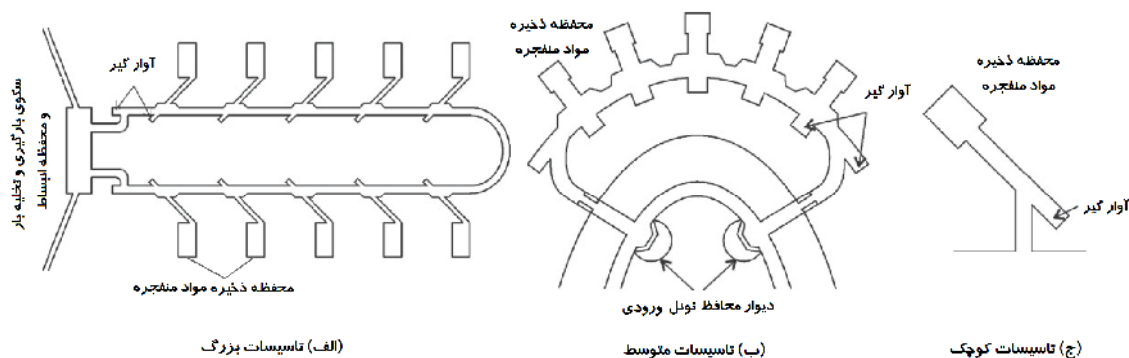
۲- انبارهای زیرزمینی مواد ناریه و استانداردهای

ارائه شده برای جانمایی و چیدمان انبارها

در شکل ۱ الگوهای مختلف از جانمایی و چیدمان تاسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد ناریه نشان داده شده است. جدا از مزیت‌های انبار زیرزمینی مواد ناریه، موارد مخاطره‌انگیز در ارتباط با این انبارها، انفجار انبار و به دنبال آن لرزش شدید زمین، انتشار امواج انفجاری، انفجار هوا و آسیب سازه‌های زیرزمینی و سطحی است (Goel, Singh & Zhao, 2012). در جدول ۱ تا جدول ۳ استاندارد موجود در ارتباط با جانمایی و چیدمان فضایی انبارهای زیرزمینی مواد ناریه ارائه شده است. در استانداردهای ارائه شده Q ، وزن TNT معادل ماده ناریه ذخیره شده بر حسب کیلوگرم است. همچنین در کشور سوئد حداقل عمق ایمن برابر $۱۰ \times Q^{0.3}$ و در کشور سوئیس حداقل عمق ایمن بر اساس رابطه $۱۱ \times V^{0.44} \times Q^{0.139}$ محاسبه می‌شود که در آن V حجم محفظه انبار بر حسب متر مکعب است (Odello, 1980)، (DoD, 2004)، (Goel, Singh & Zhao, 2012) و (1993).

محاسبات جانمایی انبارهای زیرزمینی مد نظر قرار نگرفته است.

در این تحقیق در ابتدا توضیح مختصری در ارتباط با چیدمان و جانمایی انبارهای زیرزمینی مواد ناریه و استانداردهای مرتبط ارائه شده است. سپس مدل‌سازی‌های عددی در دو بخش انجام شده است. در بخش اول پارامترهای ژئومکانیکی مدل عددی انبار زیرزمینی بر اساس اطلاعات انفجار تک چال در سایت انفجار دانشگاه گوئینز کانادا (Yang, et al., 1994)، کالیبره شده، سپس بر اساس پارامترهای کالیبره شده مطالعه پارامتریک بر روی میزان گسترش زون خرابی در توده سنگ در برگیرنده نسبت به وزن ماده ناریه، و تاثیر حضور یا عدم حضور فضاهای زیرزمینی مجاور بر گسترش خرابی صورت گرفته است. همچنین با توجه به پاسخ دینامیکی سیستم نگهداری انبار مجاور به بار دینامیکی انفجار، امکان انتقال انفجار در اثر خرابی و فرو ریختن سیستم نگهداری بررسی شده است. در بخش دوم با مد نظر قرار دادن اطلاعات ژئومکانیکی ساختگاه سد بختیاری، سه انبار زیرزمینی مواد ناریه مدل‌سازی شده و بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها حداقل فاصله افقی و عمق ایمن انبارها برای پروژه سد بختیاری پیشنهاد شده است.



شکل ۱- طرح تاسیسات زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد ناریه (Goel, Singh & Zhao, 2012)

جدول ۱- استاندارد ارائه شده توسط اودلو برای تعیین فاصله مجاز بین انبارهای مواد ناریه مجاور (Odello, 1980)

حداقل فاصله لازم	برای جلوگیری از انتقال انفجار به انبار مجاور
$۰.۶ \times Q^{0.33}$	در اثر ضربه حاصل از ریزش سنگ
$۲.۵ \times Q^{0.33}$	در اثر ورقه ورقه شدن سنگ دیواره انبار

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱-۱۹

خرابی ناشی از انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو بر مبنای حداکثر سرعت ذره‌ای در آستانه خرابی معیارهای خرابی تجربی متعددی ارائه شده است، که می‌توان به تحقیقات لانگفورس (۱۹۷۳)، هندرون (۱۹۷۷)، استاندارد مهندسی ارتش آمریکا از سال ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲، پرسن (۱۹۹۷) و سینک (۲۰۰۲) اشاره کرد (Langefors & Persson, 1978) (Kihlström, 1978) (Hendron, 1978) و (1997). بر اساس تحقیقات کندورسکی و جوود (۱۹۷۳) حداکثر سرعت ذره‌ای لازم برای ایجاد شکست متناوب در سنگ، ۰/۴۶ (متر بر ثانیه)، و توسعه ترک در پوشش شاکریت تونل در حدود ۱/۲۲ (متر بر ثانیه) گزارش شده است (Singh, 2002) و (Kendorski, Jude, & Duncan, 1973). معیار خرابی بر حسب *PPV* در آستانه خرابی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که علاوه بر معیار *PPV* آستانه خرابی، از گسیختگی پلاستیک توده سنگ اطراف انبار زیرزمینی بر اساس معیار شکست موهر کلمب نیز برای بیان میزان گسترش خرابی در اثر انفجار استفاده شده است.

جدول ۴- معیار حداکثر سرعت ذره‌ای آستانه خراب (Wei, Zhao, & Gu, 2009)

حد آستانه خرابی بر اساس <i>PPV</i> (متر بر ثانیه)	<i>RMR</i> سنگ
۰/۵	$RMR < ۶۰$
۰/۷	$۶۰ < RMR < ۸۰$
۰/۹	$RMR > ۸۰$

۳-۲- محاسبه فشار انفجار

فرآیند انفجار غیر منتظره در انبارهای زیرزمینی مواد ناریه در زمره انفجارهای محبوس است. در انفجار محبوس به دلیل بسته بودن فضای انفجار، محیط در برگیرنده، در مرحله اول تحت فشار بسیار بالای ناشی از امواج ضربه‌ای (انفجار)، که دما و فشار بسیار بالایی دارند و به سرعت مستهلک می‌شود، قرار می‌گیرد. قبل از این که فشار انفجار به طور کامل از بین برود فشار حاصل از گازهای انفجار به محیط اعمال می‌شود که در مقایسه این گازها از فشار و دمای بسیار کمتری برخوردار هستند، ولی به مراتب مدت زمان تداوم بیشتری

جدول ۲- استاندارد وزارت دفاع ایالات متحده برای تعیین فاصله مجاز بین انبارهای مواد ناریه مجاور (DoD, 2004)

فاصله لازم مجاور	برای جلوگیری از انتقال انفجار به انبار	حداقل فاصله لازم
خطرناک در تونل مجاور	برای جلوگیری از ریزش	$۱/۰ \times Q^{۰/۳۳}$
سنگ (بدون سازه محافظ)	جلوگیری از انتقال انفجار در اثر ریزش	$۰/۶ \times Q^{۰/۳۳}$
ریزش سنگ (با سازه محافظ)	جلوگیری از انتقال انفجار در اثر	$۰/۳ \times Q^{۰/۳۳}$

جدول ۳- استاندارد NATO، برای تعیین حداقل عمق ایمن احداث انبار زیرزمینی مواد ناریه (NATO, 1993)

توضیحات	حداقل عمق
برای سنگ‌های نرم	$۲/۰ \times Q^{۰/۳}$
برای سنگ‌های سخت	$۱/۲ \times Q^{۰/۳}$

۳- روش تحقیق

به طوری که پیش‌تر اشاره شد، در این تحقیق از نرم افزار *FLAC3D*، که از پرکاربردترین نرم‌افزارها در زمینه مدلسازی مسایل غیرخطی ژئومکانیک است، برای مدل‌سازی استفاده شده است. نرم افزار *FLAC3D* یک برنامه تفاضل محدود صریح سه بعدی بر پایه تحلیل لاگرانژی است. برای تحلیل دینامیکی دو روش متداول خطی معادل و غیر خطی وجود دارد که این نرم‌افزار از روش غیر خطی استفاده می‌کند. بر خلاف روش خطی معادل در روش غیر خطی فیزیک کلی سیستم به دقت مدلسازی می‌شود، اما در مقایسه این روش نسبتاً پیچیده‌تر بوده و نیازمند دانش عمیق‌تری نسبت به مسایل دینامیکی دارد (Itasca, 1997).

۳-۱- معیار خرابی ناشی از انفجار

معیارهای خرابی برای سنجش خرابی‌های ناشی از انفجار بیشتر بر مبنای سه دسته پارامتر دامنه، محتوی فرکانس و زمان ارائه شده اند؛ اما به علت حساسیت کمتر سرعت نسبت به امواج با محتوی فرکانس بالا (مثل امواج ناشی از انفجار) در مقایسه با پارامتر شتاب، در پروژه‌های اجرایی، معیار خرابی *PPV* در آستانه خرابی به صورت گسترده‌ای برای بیان میزان

است. در جدول ۵ مقدار ماده ناریه بر حسب تن و Pr و tr به ترتیب بر حسب گیگا پاسکال و میلی ثانیه است. لازم به ذکر است که برای محاسبه مشخصات بار دینامیکی انفجار تک چال انفجار مدل کالیبراسیون، از تحقیق *Fathi & Mortazavi* (۲۰۱۰) استفاده شده است.

جدول ۵ - مشخصات فشار دینامیکی متناظر با مواد ناریه ذخیره شده

ماده ناریه	P_r	t_r	ماده ناریه	P_r	t_r
(کیلوگرم)	(گیگا پاسکال)	(میلی ثانیه)	(کیلوگرم)	(گیگا پاسکال)	(میلی ثانیه)
۱۰۰	۰٫۲۵	۱۰	۸۰۰	۱٫۰۰	۱۳
۲۰۰	۰٫۴۰	۱۱	۹۰۰	۱٫۱۰	۱۳
۳۰۰	۰٫۵۳	۱۱	۱۰۰۰	۱٫۱۲	۱۳
۴۰۰	۰٫۶۵	۱۲	۱۱۰۰	۱٫۱۳	۱۳
۵۰۰	۰٫۷۶	۱۲	۱۲۰۰	۱٫۱۴	۱۳
۶۰۰	۰٫۸۶	۱۲	۱۳۰۰	۱٫۵	۱۴
۷۰۰	۰٫۹۵	۱۳	-	-	-

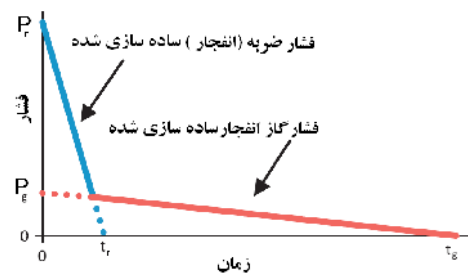
۴- مدل سازی عددی انبار زیرزمینی مواد ناریه

۴-۱- کالیبراسیون مدل سازی عددی

امروزه روش‌های عددی در کنار روش‌های تحلیلی، ابزاری مهم و کارا در حل مسائل مهندسی هستند، به خصوص مسائلی که دارای هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی پیچیده‌ای باشند. برای این‌که نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی از اعتبار عملی برخوردار باشند لازم است که پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات حاصل از آزمایش‌های میدانی کالیبره شوند. در این شرایط مدل عددی ابزاری مناسب برای انجام مطالعات پارامتری، بررسی و پیش‌بینی اثر عوامل دخیل بر رفتار سیستم مدل‌سازی شده خواهند بود.

در این تحقیق در بخش اول، برای کالیبره کردن مدل عددی و اعتبارسنجی نتایج، از اطلاعات آزمایش انفجار تک چال در سایت انفجار دانشگاه کوئینز کانادا که توسط یانگ و کاتسابانیس (۱۹۹۴) انجام شده، استفاده شده است. علت انتخاب این آزمایش دسترسی به اطلاعات کامل از آزمایش انفجار و داده‌های ثبت شده است (*Yang, et al., 1994*). نمایی کلی این آزمایش شامل محل چال انفجاری و چال‌های

دارند (شکل ۲). البته زمان تداوم فشار گازهای انفجار به شدت به ابعاد و کارایی سیستم تهویه تعبیه شده در انبارها بستگی دارد (*UFC-3-340-02, 2008*). این گازها با اعمال فشار به سطوح داخلی درزه و ترک‌های موجود و ایجاد شده توسط امواج ضربه‌ای موجب گسترش و رشد این درزه‌ها و ترک‌ها می‌شود. در شکل ۲ فرم ساده سازی شده‌ای از تاریخچه بارگذاری انفجار محبوس نشان داده شده است، که در آن Pr و Pg حداکثر فشار ضربه و فشار گاز و tr و tg به ترتیب زمان به صفر رسیدن فشار ضربه و فشار گاز است. بر مبنای محاسبات تئوریک و مجموعه وسیعی از داده‌های میدانی، در دستورالعمل *UFC-3-340-02* ارتش ایالات متحده، نمودارهایی بر حسب میزان و محل قرارگیری ماده ناریه، دانسیته بارگذاری و هندسه فضای محبوس برای محاسبه پارامترهای مدل ساده شده فشار انفجار محبوس (شکل ۲) ارائه شده است (*Dragos, Wu, & Oehlers, 2013*).



شکل ۲- مدل ساده سازی شده فشار دینامیکی حاصل از انفجار محبوس (*UFC-3-340-02, 2008*) و (*Dragos, Wu, & Oehlers, 2013*).

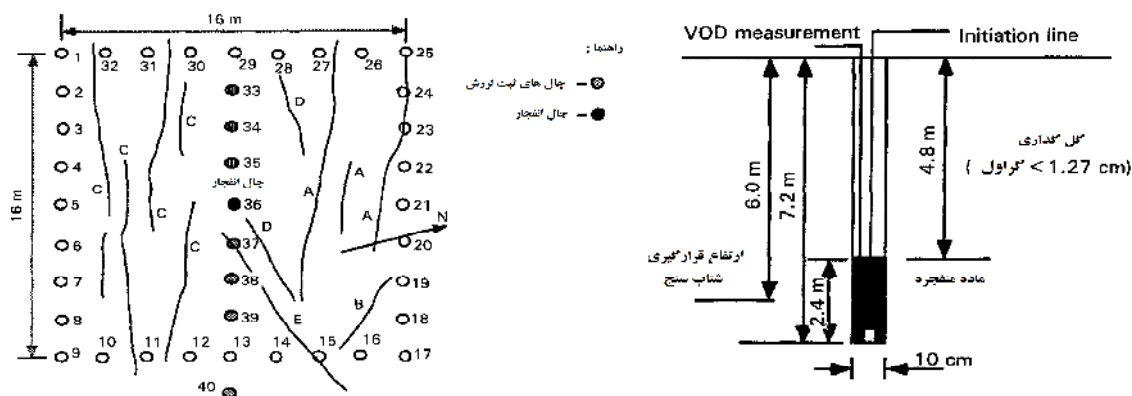
با توجه به محدودیت نرم‌افزار *FLAC3D* در مدل‌سازی معادله حالت (*EOS*) مربوط به مواد ناریه و این‌که *FLAC3D* توانایی مدل‌سازی ایجاد و رشد ترک را ندارد، در این تحقیق تأثیر موج ضربه و فشار گاز حاصل از فرآیند انفجار با یکدیگر ادغام گردیده و تاریخچه بارگذاری انفجار به شکل یک پالس مثلث قائم ساده‌سازی و به مدل‌ها اعمال شده است. از این‌رو حداکثر فشار انفجار و زمان به صفر رسیدن فشار دینامیکی متناظر با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ تن *TNT* ذخیره شده انبار زیرزمینی بر اساس دستورالعمل *UFC-3-340-02* محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱۹-۱

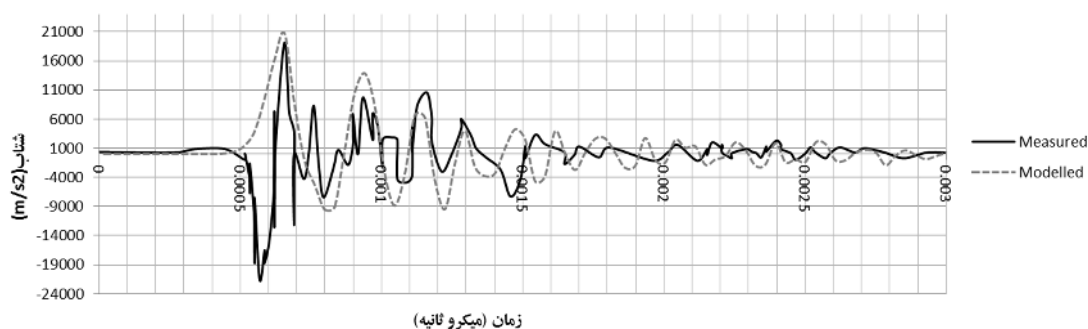
شاهد در مطابقت با تاریخچه شتاب ثبت شده در آزمایش انفجار با شد. از این رو با اجرای مدل عددی به دفعات متعدد و تنظیم پارامترهای دینامیکی، کالیبراسیون مدل عددی انجام شده است. در شکل ۴ تاریخچه شتاب اندازه‌گیری شده در چال شماره ۳۷ به فاصله ۴ متری از چال انفجاری و تاریخچه شتاب شبیه‌سازی شده متناظر، در مدل عددی کالیبره شده نشان داده شده است. بر اساس مدل کالیبره شده پارامترهای دینامیکی کالیبره شده به این شرح است که مدول تغییر شکل پذیری برابر ۶۷ گیگاپاسکال، ضریب پواسن برابر ۰٫۳، چسبندگی برابر ۱۱٫۳ مگا پاسکال، زاویه اصطکاک برابر ۵۰ درجه است.

ثبت داده، در شکل ۳ نشان داده شده است. سنگ ساختگاه از گرانبه با کیفیت خوب است، که متوسط مدول تغییر شکل‌پذیری آن برابر ۵۱ گیگاپاسکال، ضریب پواسن برابر ۰٫۳۳، متوسط مقاومت تک محوری برابر ۲۱۵ مگاپاسکال و متوسط دانسیته توده سنگ برابر با ۲٫۵۵ تن بر مترمکعب است. از امولسیون با سرعت انفجاری ۵۵۰۰ متر بر ثانیه و دانسیته ۱٫۳ گرم بر سی‌سی برای انفجار چال استفاده شده است (Yang, et al., 1994).

در مدل عددی با توجه به تقارن هندسه مدل و جلوگیری از محاسبات غیر ضروری فقط یک چهارم تک چال مدل‌سازی شده است. برای کالیبراسیون مدل عددی سعی شده است که تاریخچه شتاب شبیه‌سازی شده در نقطه



شکل ۳- نمایی کلی از چال انفجار و چال‌های اندازه‌گیری در سایت دانشگاه کوئینز (Yang, et al., 1994)



شکل ۴- مقایسه نتایج تاریخچه شتاب ثبت شده و مدل کالیبره شده در فاصله ۴ متری از چال انفجار

PPV در نرم‌افزار *FLAC3D* از زبان برنامه‌نویسی *FISH* استفاده شده است. در شکل ۵ هندسه مدل تک چال و همچنین گستره زون خرابی در اطراف چال انفجاری بر

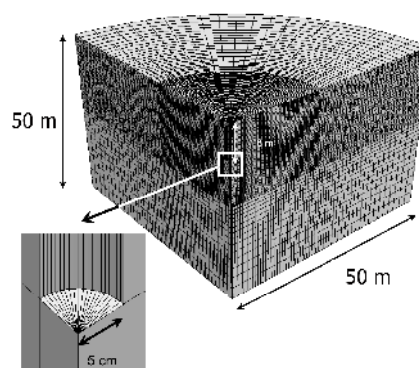
برای جلوگیری از انعکاس ناخواسته موج از مرزهای مدل دینامیکی، در مدل‌سازی‌ها از مرزهای جاذب استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای تهیه خطوط هم مقدار

۴-۲- گسترش زون خرابی حاصل از انفجار یک انبار بدون حضور فضاهای زیرزمینی مجاور

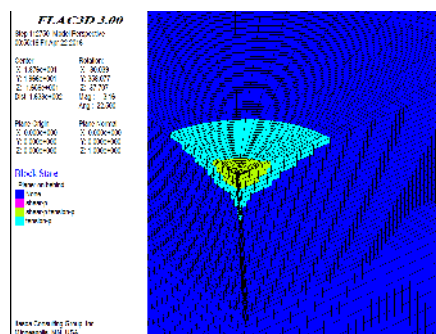
در این بخش با استفاده از پارامترهای دینامیکی کالیبره شده مدل عددی انبار زیرزمینی به شکل مکعبی و به ابعاد ۱۰ متر در عمق ۴۰ متری از سطح زمین که توسط پوشش یک متری از بتن مسلح نگهداری شده، مدل‌سازی شده است. برای آنالیز دینامیکی خصوصیات پوشش بتنی ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر استاتیکی لحاظ شده (Jiang & Zhou, 2012)، بر این اساس در مدل عددی مدول بالک و مدول برشی بتن به ترتیب برابر با ۲۳/۳ و ۱۴ گیگاپاسکال و دانسیته آن ۲/۵ تن بر مترمکعب لحاظ شده است. با توجه به تقارن مدل و همچنین کاهش محاسبات غیر ضروری یک چهارم انبار مدل‌سازی شده است. به منظور بررسی تاثیر مقدار ماده ناریه بر میزان گسترش زون خرابی توده سنگ در برگیرنده، فرض شده که انبار با ماده ناریه از نوع TNT با مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ تن منفجر شده است. بار دینامیکی معادل با مقادیر مختلف ماده ناریه در جدول ۵ ارائه شده است.

بر این اساس ۱۳ مدل عددی از انبار زیرزمینی در نرم‌افزار FLAC3D برای شبیه‌سازی گسترش زون خرابی حاصل از انفجار انبار در زیرزمین اجرا شد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش ماده منفجر شده، زون خرابی افزایش پیدا می‌کند و بالعکس. نمونه‌ای از زون خرابی شبیه‌سازی شده بر اساس دو معیار PPV و گسیختگی پلاستیک در شکل ۶ نشان داده شده است. از شکل ۶-ج و د مشاهده می‌شود، که در اثر انفجار ۱۳۰۰ تن ماده ناریه، زون خرابی به نزدیکی سطح زمین رسیده که به دلیل انعکاس امواج از سطح زمین است. در شکل ۷ روند تغییرات اندازه زون خرابی مدل‌های عددی در راستاهای قائم و افقی نسبت به ماده ناریه منفجر شده نشان داده شده است. همچنین آن‌جا که در این تحقیق هدف تعیین فاصله جانبی مناسب بین انبارهای زیرزمینی مجاور هم است، اندازه‌گیری‌های افقی و قائم در راستای مرکز حجم انبار صورت انجام شده است.

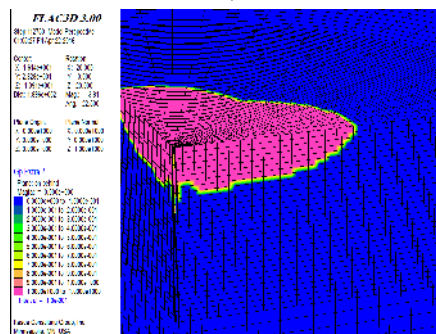
اساس معیار گسیختگی پلاستیک و PPV برای مدل کالیبره شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به کیفیت توده سنگ اطراف انبار و جدول ۴، PPV آستانه خرابی برابر با ۰/۹ متر بر ثانیه لحاظ شده است.



الف



ب



ج

شکل ۵- مدل عددی تک چال در نرم‌افزار FLAC3D،

(الف) هندسه مدل

(ب) گستره زون خرابی بر اساس گسیختگی پلاستیک

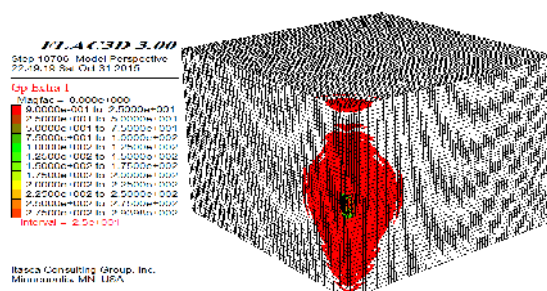
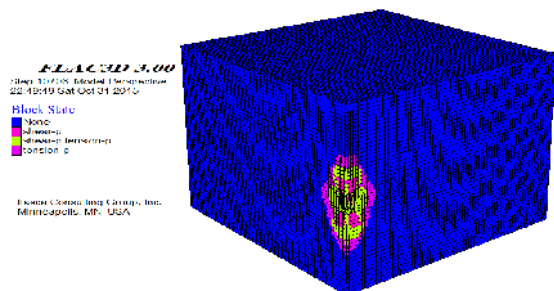
(ج) گستره زون خرابی بر اساس حداکثر سرعت ذره‌ای

آستانه خرابی (متر بر ثانیه) $PPV=0.9$

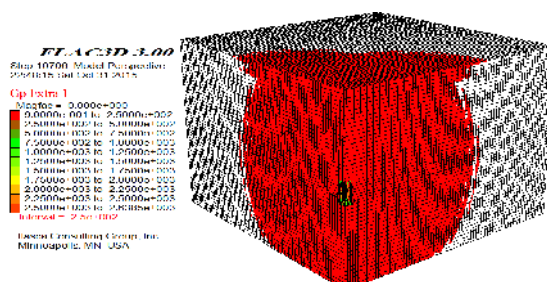
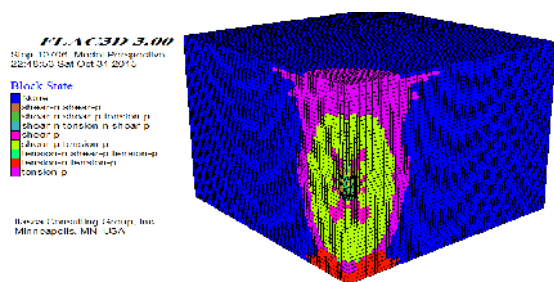
جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱-۱۹

ناریه ذخیره شده بیشتر از ۶۰۰ تن، زون خرابی به نزدیکی سطح زمین رسیده است. همچنین روند تغییرات زون خرابی نشان می‌دهد که اندازه گسترش زون خرابی بر اساس معیار PPV بیشتر از معیار گسیختگی پلاستیک است.

از شکل ۷ مشاهده می‌شود که بر اساس معیار گسیختگی پلاستیک، گسترش زون خرابی در راستای قائم بیشتر از راستای افقی است، ولی برعکس بر اساس معیار PPV گسترش زون خرابی در راستای افقی بیشتر از راستای قائم است. بر اساس معیار گسیختگی پلاستیک برای مواد

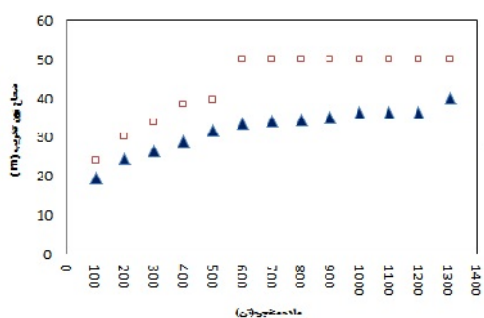


الف

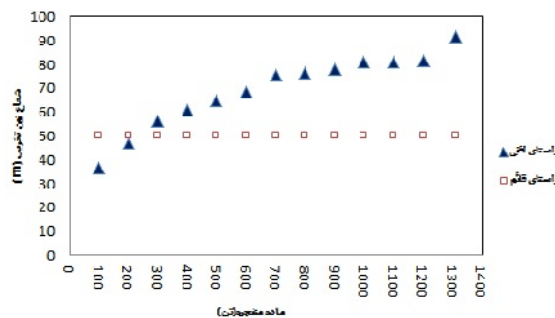


ب

شکل ۶- گسترش زون خرابی در اطراف انبار زیرزمینی مواد ناریه برای میزان ماده ناریه ذخیره شده (سمت راست بر اساس) بر نائیه) $PPV = 0.9$ سمت چپ بر اساس گسیختگی پلاستیک)، (الف) ۱۰۰ تن (ب) ۱۳۰۰ تن



ب



الف

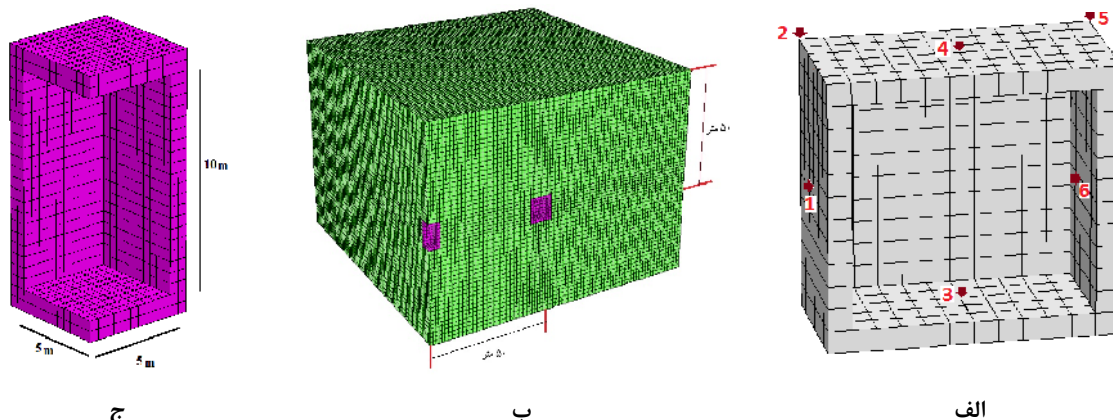
شکل ۷- تغییرات زون خرابی نسبت به میزان ماده ناریه ذخیره بر اساس (الف) معیار PPV (ب) گسیختگی پلاستیک

است. به منظور امکان مقایسه پاسخ توده سنگ و سیستم نگهداری فضای زیرزمینی به بار دینامیکی، شش جفت نقطه ناظر بر روی سیستم نگهداری و توده سنگ در مجاورت سیستم نگهداری در نظر گرفته شد. در این مدل‌ها انبارها به شکل مکعبی به ابعاد ۱۰ متر در عمق ۵۰ متری و به فاصله ۵۰ متر از همدیگر قرار دارند و ضخامت پوشش بتنی انبارها یک متر در نظر گرفته شده است.

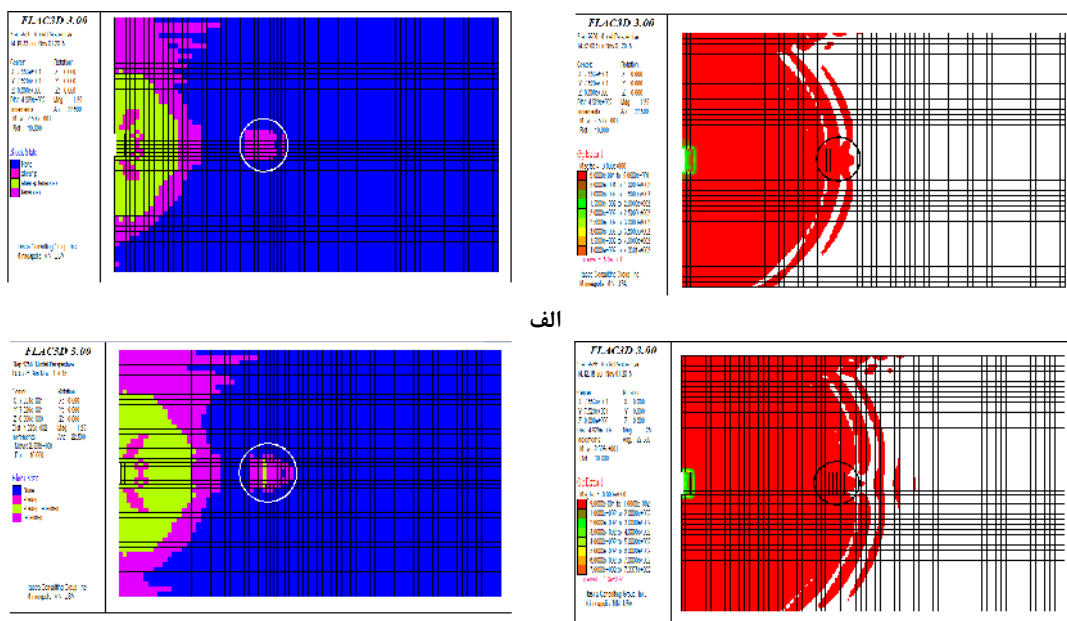
در شکل ۹ نمونه‌ای از نتایج گسترش زون خرابی بر اساس دو معیار خرابی مذکور نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح داخلی انبار مجاور به عنوان سطح آزاد عمل کرده و باعث انعکاس مجدد امواج کششی به محیط می‌شوند. به طوری که با توجه به شکل ۹ با وجود این که فاصله بین دو فضای زیرزمینی مجاور به طور پیوسته و کامل تخریب نشده است، ولی سیستم نگهداری و توده سنگ در نزدیکی انبار دوم بر اساس دو معیار PPV و گسیختگی پلاستیک تخریب شده‌اند. علت این پدیده گسترش ترک‌های کششی در اثر انعکاس امواج انفجاری از سطح دیوار داخلی انبار دوم است.

۳-۴- بررسی تاثیر فضاهای زیرزمینی مجاور بر گسترش زون خرابی حاصل از انفجار یک انبار

بیشتر تاسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد ناریه متشکل از چندین فضای زیرزمینی مجاور هم هستند. از این رو یکی از موارد مهم در طراحی انبارهای زیرزمینی تعیین فاصله بهینه بین فضاهای زیرزمینی مجاور است. این فاصله باید بگونه‌ای باشد که علاوه بر تامین ملاحظات پایداری استاتیکی، در اثر منفجر شدن یکی از انبارها از انتقال انفجار به انبارهای مجاور نیز جلوگیری کند. انتقال انفجار می‌تواند به طور مستقیم در اثر رسیدن زون شکسته حاصل از انفجار به انبار مجاور باشد، یا در اثر زیرش سیستم نگهداری یا بلوک‌های سنگی در اثر ارتعاش حاصل از انفجار بر روی مواد ناریه ذخیره صورت گیرد (Goel, Singh & Zhao, 2012).
به این منظور برای بررسی تاثیر حضور فضای زیرزمینی مجاور و پاسخ سیستم نگهداری فضای زیرزمینی مجاور به ارتعاشات حاصل از انفجار، ۱۳ مدل جدید شبیه‌سازی شدند. نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده در شکل ۸ نشان داده شده



شکل ۸- هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC3D برای انبارهای زیرزمینی مواد ناریه مجاور هم (الف) پوشش بتنی و نقاط شاهد بر روی آن، (ب) کل مدل، (ج) ابعاد پوشش



الف

ب

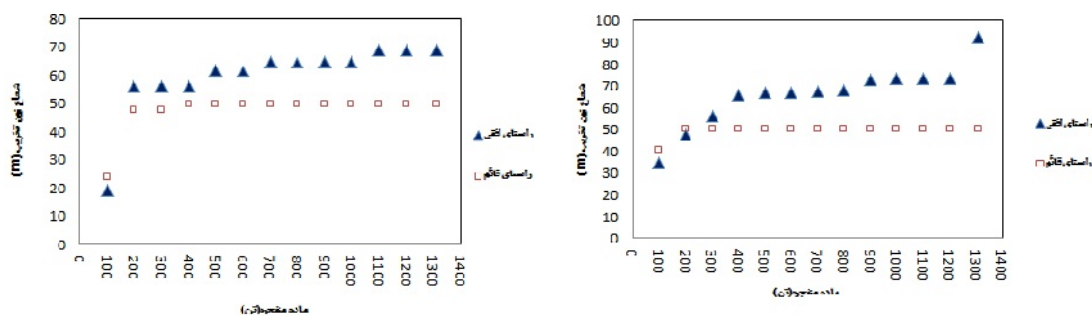
شکل ۹ - زون خرابی در اطراف انبار زیرزمینی منفجر شده بر اساس دو معیار (متر بر ثانیه) $PPV = 0/9$ و گسیختگی پلاستیک (الف) ۸۰۰ تن ماده ناریه، (ب) ۱۳۰۰ تن ماده ناریه

سنگ قرار دارند. از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، به دلیل انعکاس امواج انفجاری از دیواره‌های انبار با وجود فاصله بیشتر نقطه ناظر بر روی سیستم نگهداری از منبع انفجار، اندازه سرعت ذره‌ای و جابجایی در سیستم نگهداری بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از توده سنگ است. از طرف دیگر، با وجود روند یکسان تاریخچه تنش اصلی حداکثر در هر دو نقطه ناظر، سطح تنش اصلی حداکثر در سیستم نگهداری به مراتب کمتر از توده سنگ است. سیستم نگهداری به دلیل محصور نبودن در راستای افقی آزادی حرکت بیشتری داشته، و مقداری از انرژی وارد بر آن به صورت انرژی جنبشی در آن مستهلک می‌شود. لذا سیستم نگهداری از سطح تنش و انرژی ذخیره شده کمتری نسبت به توده سنگ در برگیرنده برخوردار است. در این مقاله PPV آستانه خرابی برای سیستم نگهداری بتنی برابر با ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (Zhao, 2012). بر اساس توزیع PPV در پوشش بتنی انبار دوم مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌ها بدون اینکه زون خرابی به انبار دوم برسد، سیستم نگهداری در انبار مجاور در اثر انعکاس امواج کششی دچار تخریب شده است.

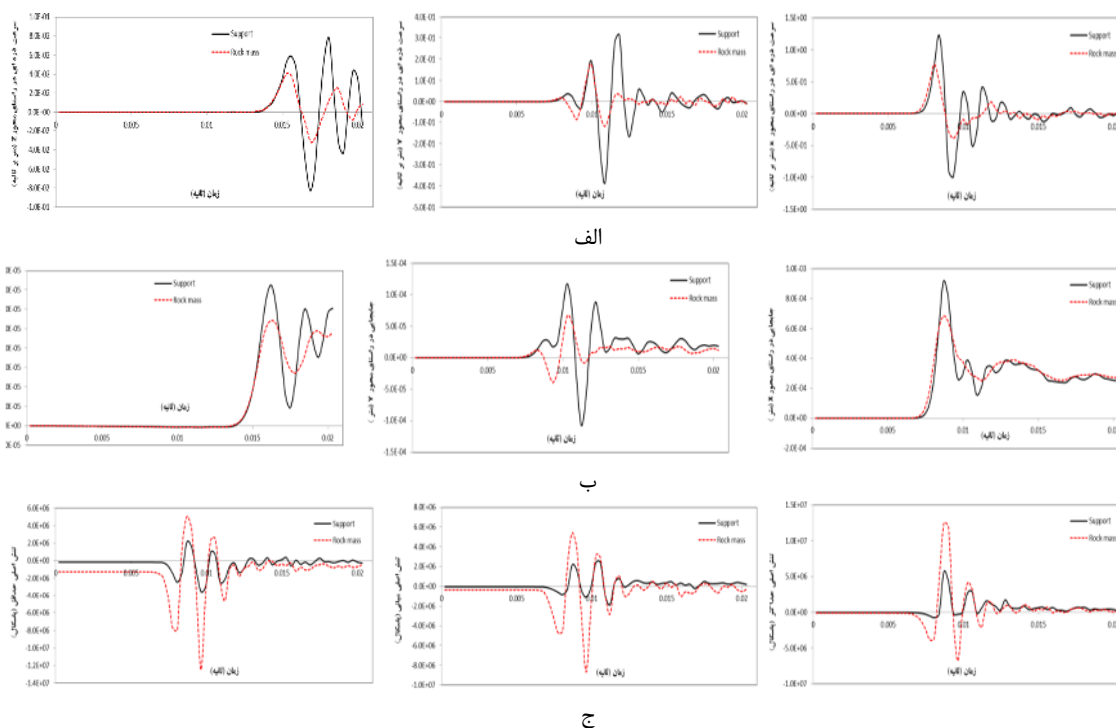
در شکل ۱۰ روند تغییرات اندازه زون خرابی در راستاهای قائم و افقی در حضور فضای زیرزمینی مجاور نسبت به مقدار ماده ناریه ذخیره شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات شعاع زون خرابی در هر دو نمودار در راستای افقی دارای یکسری جهش‌های غیر معمول است، که نشان دهنده اثر انعکاس امواج انفجاری از سطح آزاد فضای زیرزمینی مجاور است. مقایسه نتایج این بخش با بخش پیشین نشان می‌دهد، حضور فضاهای زیرزمینی در مجاورت انبار منفجر شده در مدل، باعث افزایش محدوده زون خرابی حاصل از انفجار می‌شود. از این‌رو در روند مدل‌سازی‌ها برای شبیه‌سازی تاثیر انعکاس امواج انفجاری ناشی از سطوح آزاد زیرزمینی و تعیین فاصله بهینه بین انبارها، شبیه‌سازی فضاهای زیرزمینی مجاور در ساخت مدل عددی ضروری است.

در شکل ۱۱ تاریخچه زمانی تغییرات سرعت ذره‌ای، جابجایی و تنش اصلی حداکثر در سه راستای اصلی X ، Y و Z برای جفت نقطه شماره ۱ در دیواره سمت چپ انبار دوم نشان داده شده است. جفت نقطه شماره ۱ به فاصله ۲ متری از هم، یکی بر روی سیستم نگهداری و دیگری بر روی توده

دوفصل‌نامه‌ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره‌ی ۴؛ شماره‌ی ۱؛ تابستان ۱۳۹۵



شکل ۱۰- تغییرات زون خرابی نسبت به میزان ماده نارینه ذخیره بر اساس (الف) معیار PPV، (ب) گسیختگی پلاستیک



شکل ۱۱- تاریخچه زمانی جفت نقطه شاهد ۱ در سه راستا (الف) سرعت ذره‌ای (ب)، جابجایی (ج) تنش اصلی

شکل ۶ نشان می‌دهد که نتایج حاصل از استاندارد ایالات متحده هم خوانی بهتری با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی دارد. در نهایت بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای انبارهای مورد مطالعه در عمق ۵۰ متری، حداقل فاصله جانبی ایمن برابر با ۶۰ متر و حداکثر مقدار مجاز برای ذخیره سازی مواد نارینه ۲۰۰ تن پیشنهاد می‌شود.

خطوط هم اندازه PPV در سیستم نگهداری بتنی برای بارگذاری معادل با انفجار ۲۰۰، ۸۰۰ و ۱۳۰۰ تن ماده نارینه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. فاصله ایمن بین دو انبار بر اساس استانداردهای ادلو و ایالات متحده برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی در شکل ۶ ارائه شده است. در استاندارد ادلو و ایالات متحده به ترتیب از رابطه $0.16 \times Q^{0.33}$ و $Q^{0.33}$ برای محاسبه فاصله جانبی استفاده شده است.

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱-۱۹

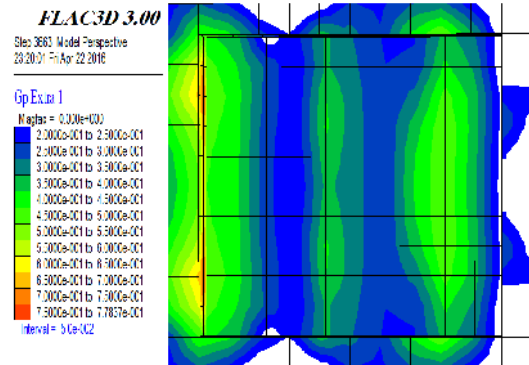
جدول ۶- فاصله ایمن بین انبارهای مواد ناریه بر اساس استانداردهای تجربی

شماره	ماده ناریه (تن)	فاصله جانبی (متر)	
		اودلو	ایالات متحده
۱	۱۰۰	۲۷,۸۴	۴۶,۴۱
۲	۲۰۰	۳۵,۰۸	۵۸,۴۸
۳	۳۰۰	۴۰,۱۶	۶۶,۹۴
۴	۴۰۰	۴۴,۲۰	۷۳,۶۸
۵	۵۰۰	۴۷,۶۲	۷۹,۳۷
۶	۶۰۰	۵۰,۶۰	۸۴,۳۴
۷	۷۰۰	۵۳,۲۷	۸۸,۷۹
۸	۸۰۰	۵۵,۶۹	۹۲,۸۳
۹	۹۰۰	۵۷,۹۲	۹۶,۵۴
۱۰	۱۰۰۰	۶۰	۱۰۰
۱۱	۱۱۰۰	۶۱,۹۳	۱۰۳,۲۲
۱۲	۱۲۰۰	۶۳,۷۵	۱۰۶,۲۶
۱۳	۱۳۰۰	۶۵,۶۵	۱۰۹,۴۱

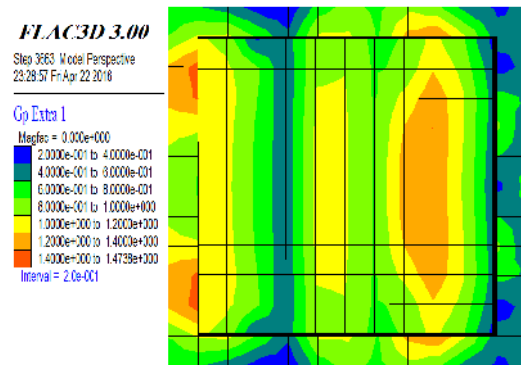
۵- جانمایی انبارهای زیرزمینی مواد ناریه

برای پروژه سد بختیاری

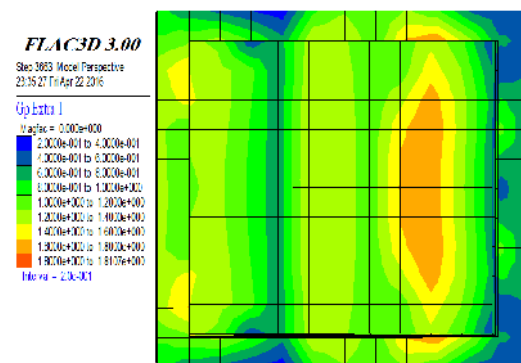
در این بخش حداقل فاصله جانبی و عمق ایمن انبارهای زیرزمینی مواد ناریه برای پروژه سد بختیاری با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار عددی *FLAC3D* محاسبه شده است. سد بختیاری سد بتنی دوقوسی است که بر روی رودخانه سزار از سرشاخه‌های رود دز احداث خواهد شد. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی ساختمان سد بختیاری عمدتاً از نهشته‌های آهکی سروک تشکیل شده که بر اساس ضخامت لایه‌ها و وجود گرهک‌های سیلتی و محتوی آن تقسیم‌بندی شده‌اند. از دیدگاه مکانیک سنگی ساختمان سد بختیاری به شش واحد توده سنگی تقسیم‌بندی شده است. از میان این شش واحد، واحد ۱ و ۳، ضعیف‌ترین و مستحکم‌ترین شرایط ژئومکانیکی را دارند. به طور کلی توده سنگ ساختمان سد بختیاری تحت تاثیر چهار سیستم ناپیوستگی قرار گرفته است که شامل یک لایه‌بندی و ۳ سیستم دسته درزه است که هر کدام بر حسب فراوانی و شیب به دو زیر دسته تقسیم شده‌اند (*IWPC, 2009*). برخی از مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها



الف - ۲۰۰ تن



ب - ۸۰۰ تن



ج - ۱۳۰۰ تن

شکل ۱۲- توزیع PPV بالای آستانه خرابی ((متر بر ثانیه) در سیستم نگهداری انبار دوم برای مقادیر مختلف ماده ناریه ($PPV > 0/2$))

دوفصل‌نامه‌ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره‌ی ۴؛ شماره‌ی ۱؛ تابستان ۱۳۹۵

در جدول ۷ ارایه شده است. در جدول ۸ پارامترهای مقاومتی و مکانیکی واحدهای ۱ و ۳ ارائه شده است. احداث چنین سد بزرگی مستلزم حفارهای با حجم بالا است، که برای تامین مواد ناریه مورد نیاز برای حفاری‌ها در طرح سد و نیروگاه بختیاری سه انبار مجاور هم با ابعاد ۵×۹×۶ متر و ظرفیت ۴۰ تن ماده ناریه امولایتی پیش‌بینی شده است.

جدول ۷- خصوصیات هندسی سطوح ناپیوستگی در ساختگاه سد بختیاری (IWPC, 2009)

سیستم درزه			لایه بندی	مقدار / توصیف	خصوصیات
J3	J2	J1			
۴۵	۱۲۵	۳۱۰	۳۰	زیر دسته ۱	شیب (درجه)
۴۵	۱۲۵	۳۱۰	۲۱۵	زیر دسته ۲	
۱۵	۳۵	۷۰	۵۰	زیر دسته ۱	جهت شیب (درجه)
۱۵	۷۰	۴۰	۷۵	زیر دسته ۲	
۶	۳	۲٫۵	۱٫۵	۲-۶	درزه داری (سانتی متر) (%)
۲۵	۵۲	۴۸٫۵	۴۷	۶-۲۰	
۶۲٫۵	۴۳٫۵	۴۵	۴۴٫۵	۲۰-۶۰	
۶٫۵	۱٫۵	۴	۳٫۵	۶۰-۲۰۰	
.	.	.	۳٫۵	۲۰۰-۶۰۰	
.	.	.	۳٫۵	۲۰۰-۶۰۰	

جدول ۸- پارامترهای مکانیک سنگی واحدهای توده سنگی ۱ و ۳ در ساختگاه بختیاری (IWPC, 2009)

خصوصیات مکانیکی			معیار شکست موهر کلمب		GSI	واحد توده سنگی
σ_{cm} [MPa]	[GPa] Gm	Em [GPa]	ϕ	C [MPa]		
۱۱٫۳۴	۲٫۰۱	۵٫۲۳	۳۱٫۱۴	۳٫۱۹	۴۲٫۵	۱
۲۶٫۹۹	۴٫۴۴	۱۱٫۵۴	۳۴٫۱۴	۷٫۱۵	۵۲٫۵	۳

کالیبراسیون پارامترهای دینامیکی، خصوصیات دینامیکی توده سنگ در برگیرنده و پوشش بتنی در مدل‌ها ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر استاتیکی آنها لحاظ شده است (Jiang & Zhou, 2012). برای ضریب اطمینان بالاتر، قدرت نسبی وزنی امولایت نسبت به تی.ان.تی برابر ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده و فشار موج انفجار و زمان مستهلک شدن آن بر اساس دستور العمل UFC-3-340-02 ارتش ایالات متحده محاسبه شده است. نتایج مربوط شبیه‌سازی‌ها برای دو واحد توده سنگی در جدول ۹ ارائه شده است.

۵-۱- تعیین حداقل فاصله جانبی ایمن برای احداث انبارها

مدل‌های ساخته شده در این بخش شامل دو انبار با فواصل جانبی ۲۲، ۳۳، ۴۱، ۵۰، ۶۰ و ۶۵ متر در عمق ثابت ۴۰ متری است. با توجه به خصوصیات مکانیک سنگی واحدهای توده سنگی ۱ و ۳ بر اساس جدول ۴، حداکثر سرعت آستانه خرابی برای این دو واحد به ترتیب برابر با ۰٫۷ و ۰٫۵ متر بر ثانیه، و برای سیستم نگهداری برابر با ۰٫۲ متر بر ثانیه، در نظر گرفته شده است. به دلیل عدم اطلاعات لازم برای

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱-۱۹

جدول ۹ - نتایج شبیه‌سازی انبارهای زیرزمینی مواد ناریه سد بختیاری

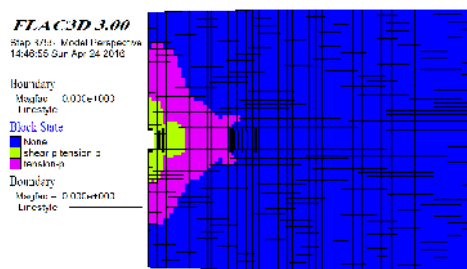
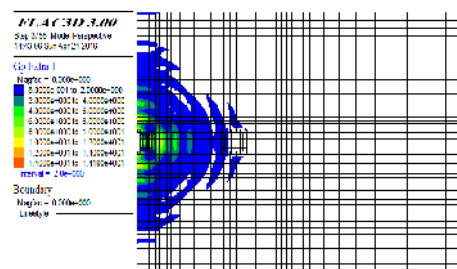
واحد زمین‌شناسی ۳			واحد زمین‌شناسی ۱			فاصله بین دو انبار (متر)
خرابی در نگهداری	شعاع زون خرابی (متر)		خرابی در نگهداری	شعاع زون خرابی (متر)		
	گسیختگی PPV > ۰٫۲ (متر بر ثانیه)	گسیختگی PPV > ۰٫۷ (متر بر ثانیه)		گسیختگی PPV > ۰٫۲ (متر بر ثانیه)	گسیختگی PPV > ۰٫۵ (متر بر ثانیه)	پلاستیک
بلی	۲۶٫۷۴	۳۲٫۰۶	بلی	۳۰	۳۴٫۷۰	۲۲
بلی	۳۷٫۱۰	۳۸٫۰۸	بلی	۳۷٫۰۸	۳۸٫۰۸	۳۳
بلی	۲۴٫۵۰	۲۶٫۴۷	خیر	۲۶٫۵۳	۲۶٫۶۸	۴۱
بلی	۲۴٫۵۰	۲۶٫۴۷	خیر	۲۶٫۵۳	۲۶٫۶۸	۵۰
خیر	۲۴٫۵۰	۲۶٫۴۷	-	-	-	۶۰
خیر	۲۴٫۵۰	۲۶٫۴۷	-	-	-	۶۵

خرابی سیستم نگهداری در انبار مجاور، حداقل فاصله جانبی ایمن در واحدهای توده سنگی ۱ و ۳ به ترتیب برابر با ۴۰ و ۶۰ متر است. مشاهده می‌شود با وجود این که واحد ۳ از کیفیت ژئومکانیکی بهتری برخوردار است ولی فاصله جانبی ایمن در این واحد برای این که سیستم نگهداری دچار تخریب نشود بیشتر است. دلیل این امر استهلاک بیشتر انرژی امواج انفجاری در توده سنگ ضعیف‌تر نسبت به توده سنگ مقاوم‌تر است. در توده سنگ ضعیف‌تر بیشتر انرژی امواج انفجاری صرف ایجاد گسیختگی پلاستیک و تغییر شکل پلاستیک در محیط سنگی می‌شود، در صورتی که در توده سنگ مستحکم‌تر قسمت اعظم انرژی امواج انفجاری به صورت الاستیک (بدون اتلاف انرژی) در محیط منتشر می‌شود. در این شرایط در توده سنگ مستحکم‌تر امواج انفجاری که به سیستم نگهداری می‌رسند و از آن منعکس می‌شوند از سطح انرژی و قدرت تخریب بیشتری برخوردار خواهند بود.

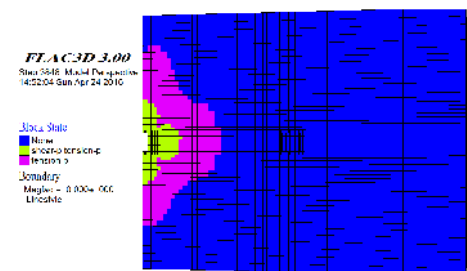
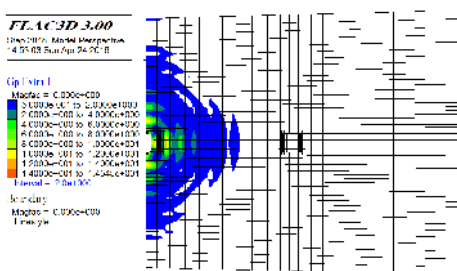
در شکل ۱۳ نمونه‌ای از نتایج گسترش زون خرابی بر اساس دو معیار خرابی در واحد زمین‌شناسی ۱ و ۳ برای فواصل ۲۲ و ۳۳ متری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بر اساس هر دو معیار خرابی، برای فاصله کم بین دو انبار (۲۲ متری) شعاع زون خرابی تحت تاثیر انعکاس امواج انفجاری از سطح داخلی انبار مجاور افزایش می‌یابد. در صورتی که با افزایش فاصله بین دو انبار (فاصله ۳۳ متری) این تاثیر از بین رفته و برای فواصل بیشتر شعاع زون خرابی به یک مقدار ثابت کاهش می‌یابد.

از جدول ۹ مشاهده می‌شود که بر حسب انتظار، گسترش زون خرابی در واحد توده سنگی ۱، که از شرایط ژئومکانیکی ضعیف‌تری برخوردار است، نسبت به واحد توده سنگی ۳ بیشتر است. اما در شرایط یکسان بارگذاری انفجار، سیستم نگهداری در انبار مجاور در واحد توده سنگی ۱ پایدارتر و ایمن‌تر از واحد توده سنگی ۳ است. از این رو با مبنا قرار دادن

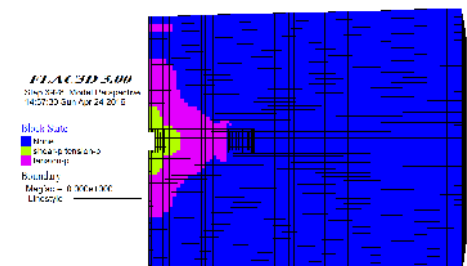
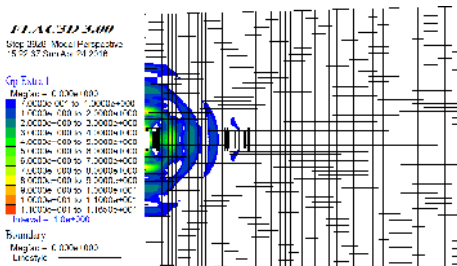
دوفصل‌نامه‌ی علمی-پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی؛ دوره‌ی ۴؛ شماره‌ی ۱؛ تابستان ۱۳۹۵



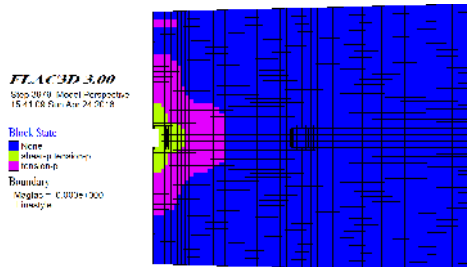
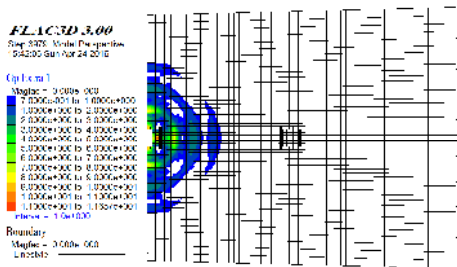
الف



ب



ج



د

شکل ۱۳. روند تغییرات زون خرابی در اطراف انبار زیرزمینی منفجر شده در ساختگاه سد بختیاری، شکل‌های سمت راست بر اساس گسیختگی پلاستیک و سمت چپ بر اساس معیار PPV برابر ۰/۵ و ۰/۷ متر بر ثانیه، به ترتیب برای واحد زمین‌شناسی ۱ و ۳. (الف) واحد ۱، فاصله ۲۲ متری (ب) واحد ۱، فاصله ۳۳ متری (ج) واحد ۳، فاصله ۲۲ متری (د) واحد ۳، فاصله ۳۳ متری

نشان می‌دهد که در مدل‌های ساخته شده برای واحد توده سنگی ۳ محدوده خرابی حاصل از انفجار به سطح زمین نرسیده ولی در مدل‌های واحد توده سنگی ۱، محدوده خرابی حاصل از انفجار به سطح زمین رسیده است. از این‌رو

۵-۲- تعیین حداقل عمق ایمن برای احداث انبارها

در بخش قبل حداقل فاصله جانبی ایمن در واحدهای توده سنگی ۱ و ۳ با فرض عمق ثابت ۴۰ متری مورد محاسبه قرار گرفت. بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های بخش قبل

جانمایی بهینه انبار ناریه زیرزمینی - مطالعه موردی انبارهای ذخیره‌سازی مواد ناریه پروژه سد بختیاری : ص ۱-۱۹

برای تعیین عمق بهینه انبارها در هر دو واحد، مدل انبارها برای واحد توده سنگی ۱ و ۳ به ترتیب در اعماق ۴۵ و ۵۰ متر و ۳۰ و ۳۵ متری مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. خلاصه نتایج حاصله در .
ایمن برای احداث انبار مواد ناریه در واحدهای توده سنگی ۳ و ۱ به ترتیب برابر با ۴۵ و ۴۰ متر پیشنهاد می‌شود.

جدول ۱۰- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تعیین عمق بهینه انبارهای مواد ناریه

عمق	واحد زمین‌شناسی ۱		واحد زمین‌شناسی ۲	
	شعاع زون خرابی در راستای قائم (متر)	گسیختگی پلاستیک	شعاع زون خرابی راستای قائم (متر)	گسیختگی پلاستیک
	$PPV > 0.15$ (متر بر ثانیه)		$PPV > 0.17$ (متر بر ثانیه)	
۳۰	-	-	۳۲,۰۶	۲۶,۷۴
۳۵	-	-	۳۸,۰۸	۳۷,۱۰
۴۵	۳۲	۳,۰۰۲	-	-
۵۰	۳۱,۵۷	۳,۰۰۲	-	-

۵-۳- مقایسه نتایج مدلسازی عددی با نتایج

استانداردهای تجربی

بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی حداقل فاصله جانبی عمق ایمن برای احداث انبار مواد ناریه در سد بختیاری برای واحد توده سنگی ۱ به ترتیب برابر ۴۰ و ۴۵ متر و برای واحد توده سنگی ۳ به ترتیب برابر ۶۰ و ۴۰ متر پیشنهاد می‌شود. برای انجام مقایسه بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با استانداردهای تجربی، در جدول ۱۱ حداقل فاصله جانبی و عمق ایمن در ساختگاه سد بختیاری ارائه شده است. ۴۰ تن اموالیت در هر انبار ذخیره شده است که مانند مدل‌های عددی برای ضریب اطمینان بالاتر، قدرت نسبی وزنی اموالیت

به تی.ان.تی برابر ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است. بررسی نتایج در جدول ۱۱ نشان می‌دهد که استانداردهای مختلف نتایج متفاوتی نسبت به هم ارائه می‌کنند، که البته تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج استانداردها نیز وجود ندارد. این نتیجه کاملاً منطقی است، چون در اکثر استانداردها که عموماً بر اساس توصیف کیفی توده سنگ و وزن مواد ناریه می‌باشند، بسیاری از عوامل موثر مانند خصوصیات مکانیکی و دینامیکی توده سنگ، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، رژیم تنش در منطقه، حجم و هندسه و چیدمان انبار زیرزمینی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد ناریه در جانمایی انبارهای زیرزمینی مد نظر قرار نگرفته است.

جدول ۱۱- فاصله جانبی و عمق بهینه برای انبارهای مواد ناریه سد بختیاری بر اساس استانداردهای موجود

عمق	فاصله جانبی		
	مقدار محاسبه شده (متر)	رابطه مورد استفاده	استاندارد
۴۱,۰۴	۲,۰ × Q ^{۰.۳۳}	۲۰,۵۲	۰,۶ × Q ^{۰.۳۳}
	۱,۲ × Q ^{۰.۳۳}	۸۵,۵۰	۲,۵ × Q ^{۰.۳۳}
۳۴,۲۰	۱,۰ × Q ^{۰.۳۳}	۳۴,۲۰	۱,۰ × Q ^{۰.۳۳}
		۲۰,۵۲	۰,۶ × Q ^{۰.۳۳}
۱۲۴,۷	۱۳,۹ × Q ^{۰.۳۳} × V ^{۰.۱۱}	۱۰,۲۶	۰,۳ × Q ^{۰.۳۳}

۶- نتیجه‌گیری

انعکاس امواج سطوح آزاد ایجاد می‌شود، در صورتی که زون خرابی حاصل از انفجار حتی به نزدیکی فضای زیرزمینی مجاور هم نرسیده است. در بخش دوم فاصله جانبی و عمق ایمن برای انبارهای زیرزمینی مواد ناریه پروژه سد بختیاری با استفاده از مدل‌سازی عددی برای واحد توده سنگی ۱ (ضعیف‌ترین توده سنگ ساخته‌گاه) به ترتیب برابر ۴۰ و ۴۵ متر و برای واحد توده سنگ ۳ (مستحکم‌ترین توده سنگ ساخته‌گاه) به ترتیب برابر ۶۰ و ۴۰ متر پیشنهاد می‌شود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، در توده سنگ‌های مستحکم‌تر گسترش شعاع زون خرابی کمتر است، ولی به دلیل توانایی میراکنندگی کمتر، امواج تنشی انتشار یافته در چنین محیط‌هایی دارای سطح انرژی بالاتری هستند و بر عکس این حالت برای توده سنگ‌های ضعیف صادق است. در نهایت از آنجا که در مدل‌سازی عددی، بسیاری از عوامل موثر در شکل‌گیری زون خرابی، مانند خصوصیات قدرتی ماده ناریه، دانسیته بارگذاری، ماهیت دینامیکی بارگذاری، هندسه انبار و خصوصیات دینامیکی توده سنگ ساخته‌گاه در نظر گرفته می‌شوند، نتایج به دست آمده نسبت به استانداردهای تجربی از دقت و اطمینان بالاتری برخوردار هستند.

در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی انفجار انبار زیرزمینی مواد ناریه، میزان گسترش زون خرابی، پاسخ سیستم نگهداری به بار ناشی از انفجار، حداقل فاصله جانبی و عمق ایمن تاسیسات ذخیره‌سازی از سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از کالیبره کردن پارامترهای دینامیکی توده سنگ بر اساس نتایج آزمایش انفجار در سایت انفجار دانشگاه کوئینز، در بخش اول تاثیر میزان وزن مواد ذخیره شده و همچنین حضور یا عدم حضور فضاهای زیرزمینی مجاور در مدل عددی بر گسترش زون خرابی حاصل از انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، به دلیل انعکاس امواج تنشی از سطوح داخلی فضاهای زیرزمینی مجاور خرابی حاصل از انفجار و شعاع زون خرابی افزایش پیدا می‌کند؛ لذا در بررسی اثرات حاصل از بارگذاری دینامیکی در محیط‌های زیرزمینی برای این که تاثیر انعکاس امواج از سطوح آزاد فضاهای زیرزمینی مجاور در مدل عددی دیده شود، ضروری است که فضاهای زیرزمینی مجاور نیز در مدل عددی گنجانده شوند. همچنین بررسی پاسخ سیستم نگهداری در فضای زیرزمینی مجاور نسبت به بار دینامیکی انفجار نشان می‌دهد، یک سری گسیختگی‌های کششی در سیستم نگهداری بتنی در اثر

۷- مراجع

- DoD. (2004). Department of Defense ammunition and explosives safety standards. DoD 6055.9-STD.
- Dragos, J., Wu, C., & Oehlers, D. (2013). Simplification of fully confined blasts for structural response analysis. *Engineering Structures*, 56, 312-326.
- Fathi, E., & Mortazavi, A. (2010). Investigation of Presplitting Blasting Using Analytical Equations and Numerical Modelling. First Conference of Blasting and Its Role in Reconstruction in Iran (pp. 153-162). Amirkabir University of Technology, Tehran: Investigation of Presplitting Blasting Using Analytical Equations and Numerical Modelling.
- Goel, R. K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). *Underground Infrastructures Planning, Design, and Construction*. Elsevier.
- Hao, H., & Wu, C. (2001). Scaled-distance relationships for chamber blast accidents in underground storage of explosives. *Fragblast*, 5(1-2), 57-90.
- Hendron, A. J. (1978). Engineering of rock blasting on civil projects: Structural and Geotechnical Mechanics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(3), 242-277.

- Iran Water and Power Resources Development Co. (IWPC), (2009), Bakhtiary Dam and Hydroelectric Power Project, Engineering Geology and Rock Mechanics Report, report on compilation of site investigations phase I & II.
- Itasca, C. (1997). FLAC3D user's manual.
- Jiang, N., & Zhou, C. (2012). Blasting Vibration Safety Criterion for a Tunnel Liner Structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 52-57.
- Jiang, N., Zhou, C., Luo, X., & Lu, S. (2015). Damage characteristics of surrounding rock subjected to VCR mining blasting shock. *Shock and Vibration*, 2015, 1-8.
- Kendorski, F., Jude, C., & Duncan, W. (1973). Effect of Blasting on Shortcrete Drift Linings. *Mining Eng*, 25(12), 38-41.
- Langefors, U., & Kihlström, B. (1978). *The Modern Technique of Rock Blasting*. Wiley.
- Lu, Y., Wang, Z., & Chong, K. (2005). A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(4), 275-288.
- Ma, G., Hao, H., & Wang, F. (2011). Simulations of explosion-induced damage to underground rock chambers. *J Rock Mech Geotech Eng*, 3(1), 19-29.
- Ma, G., Hao, H., & Zhou, Y. (1998). *Comput Geotech*, 22(3-4), 283-303.
- North Atlantic Treaty Organization. (1993). *Manual on NATO Safety Principles for the Storage of Ammunition and Explosives*. Bonn, Germany.
- Odello, R. J. (1980). *Origins and Implications of Underground Explosives Storage Regulations*. Technical. USA: Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme.
- Persson, P. A. (1997). The Relationship Between Strain Energy, Rock Damage, Fragmentation, and Throw in Rock Blasting. *Fragblast*, 1(1), 99-110.
- Singh, P. (2002). Blast Vibration Damage To Underground Coal Mines From Adjacent Open-Pit Blasting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39(8), 959-973.
- Tiwari, R., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2016). Dynamic Analysis of a Twin Tunnel in Soil Subjected to Internal Blast Loading. *Indian Geotech J*, 1-12.
- UFC-3-340-02. (2008). *Structures to resist the effect of accidental explosions*. US Department of the Army, Navy and Air Force Technical Manual.
- Wei, X., Zhao, Z., & Gu, J. (2009). Numerical Simulations of Rock Mass Damage Induced By Underground Explosion. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46(7), 41206-1213.
- Wu, C., & Hao, H. (2006). Numerical Prediction of Rock Mass Damage Due To Accidental Explosions in an Underground Ammunition Storage Chamber. *Shock Waves*, 15(1), 43-54.

- Wu, C., Lu, Y., & Hao, H. (2004). Numerical prediction of blast induced stress wave from large scale underground explosion. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(1), 93-109.
- Xia, X., Li, H. B., Li, J. C., Liu, B., & Yu, C. (2013). A case study on rock damage prediction and control method for underground tunnels subjected to adjacent excavation blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 1-7.
- Yang, R. L., Rocque, P., Katsabanis, P. D., & Bawden, W. F. (1994). Measurement and Analysis of Near-Field Blast Vibration and Damage. *Geotechnical and Geological Engineering*, 12(3), 169-182.