

بررسی الزامات فنی، مهندسی و پدافندی بهره‌برداری از معادن زیرزمینی نمک منطقه سردره گرمسار به عنوان سازه‌های استراتژیک

مهدی نوروزی^{۱*}؛ سید حسین میرزینلی یزدی^۲؛ مهدی نجفی^۳

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیرعامل، پژوهشکده سازه‌های امن، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.4010.1256

واژگان کلیدی	چکیده
فضاهای زیرزمینی	فضاهای زیرزمینی حفر شده به منظور استخراج ذخایر معدنی، گزینه‌ای مناسبی برای ایجاد سازه‌های امن محسوب می‌شوند. زمانی که سازه زیرزمینی دارای اهمیت استراتژیک است، علاوه بر پایداری سازه تحت بارهای استاتیکی، تحلیل پایداری دینامیکی سازه نیز باید مد نظر قرار گیرد. در این حالت از دیدگاه پدافند غیرعامل بررسی پایداری سازه تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله در ابتدا بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای، برداشت‌های صحرائی و در نظر گرفتن معیارهای فنی و هندسی به بررسی استفاده از معادن زیرزمینی نمک منطقه سردره گرمسار و اولویت‌بندی آنها جهت کاربری‌های استراتژیک پرداخته شده است. بر این اساس، معدن کوه‌دشت کهن به عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است. در ادامه به منظور بررسی ملاحظات پدافندی، پایداری دینامیکی معدن زیرزمینی مناسب انتخاب شده، تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه‌های <i>GBU-28</i> با استفاده از روش‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از ترکیب روش تجربی برای محاسبه بار انفجار و روش عددی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی فرآیند انفجار استفاده می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که بخش‌هایی از فضای زیرزمینی معدن کوه‌دشت کهن واقع در اعماق بیش از ۶۰ متر، تحت بارهای ناشی از انفجار پرتابه پایدار است و قابلیت استفاده مجدد به عنوان سازه پدافند غیرعامل را داراست.

۱- مقدمه

عنوان سازه‌های استراتژیک برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، انبارسازی مهمات و جنگ‌افزار، پناهگاه، استقرار کارخانجات نظامی، دفن پسماندها و ذخیره‌سازی مواد خوراکی استفاده نمود. ارزش اقتصادی فضای زیرزمینی ایجاد شده توسط معدنکاری را می‌توان از مهمترین دلایل علاقه‌مندی به کاربری ثانویه معادن متروک دانست. به عبارت دیگر بهره‌برداری از معادن زیرزمینی می‌تواند هزینه‌های احداث فضا را بطور قابل توجهی کاهش دهد. امروزه معادن متروکه به عنوان یک فضای بزرگ زیرزمینی در سطح گسترده

مکان‌های مختلف زیرزمینی مانند تونل‌های شهری، عوارض طبیعی و مخصوصاً معادن زیرزمینی توانایی عملکرد به عنوان سازه‌های پدافند غیرعامل را دارا هستند. مشخصات مکانیکی و هندسی فضاهای زیرزمینی حفر شده به منظور استخراج ذخایر معدنی، به ویژه معادنی که با روش‌های همراه با نگهداری طبیعی استخراج شده‌اند، امکان دستیابی به فضاهای امن و بزرگ پایدار زیرزمینی را فراهم می‌کنند (*Eftekhari, et al., 2011*). از این فضاهای بزرگ زیرزمینی می‌توان به

* سمنان، شاهرود، میدان هفت تیر، بلوار دانشگاه، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، طبقه دوم، کد پستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱، صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳۳۲۳۹۲۲۰۴ داخلی ۲۵۷۹؛ آدرس پست الکترونیک: mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir

است. موریس (Morris) و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی پایداری فضاها بزرگ مقیاس زیرزمینی در برابر بارگذاری ناشی از انفجار سطحی با استفاده از برنامه المان مجزای *LDEC (Livermore Distinct Element Code)* پرداختند (Morris, et al., 2004). حسینی رنجبر و اسماعیلی در سال ۱۳۸۹ انتشار امواج فشاری ناشی از برخورد پرتابه و نفوذ آن در سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از نرم‌افزار *UDEC* شبیه‌سازی کردند و شرایط پایداری پوشش تونل راه‌آهن محور اردبیل-میانه را به عنوان مورد مطالعاتی، مورد بررسی قرار دادند (Hoseini Ranjbar & Esmaeili, 2010). میرزینی و همکاران در سال ۱۳۸۹ روشی ابتکاری جهت تعیین فشار میدان آزاد در خاک در اثر انفجار پرتابه‌ی *GP-2000* به کمک نرم افزار *FLAC* ارائه دادند (Mirzeinali Yazdi, et al., 2010). خیراندیش و علیزاده صوری در سال ۱۳۹۵ پایداری یک تونل فرضی واقع در عمق-های مختلف را در مقابل انفجار پرتابه *GBU-28* با استفاده از نرم افزار *UDEC* مورد بررسی قرار دادند (Kheirandish & Alizadeh Sevari, 2016). رضایی در سال ۱۳۹۵ با استفاده از نرم افزار *UDEC* به مطالعه بارگذاری، انفجار و میرایی موج ناشی از انفجارهای سطحی و تاثیر آن بر پایداری سازه‌های زیرزمینی بر روی یک تونل فرضی پرداخت (Rezaee, 2017).

در این مقاله، سعی بر این است که امکان استفاده از معادن زیرزمینی نمک منطقه گرمسار به عنوان سازه‌های پدافند غیر عامل جهت ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، انبارسازی مهمات و جنگ‌افزار، پناهگاه و استقرار کارخانجات نظامی بررسی و معرفی شود. بدین منظور پس از انجام مطالعات میدانی از معادن هدف، این معادن از لحاظ دارا بودن الزامات فنی و هندسی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. سپس جهت بررسی ملاحظات پدافندی، تحلیل دینامیکی معدن زیرزمینی مناسب انتخاب شده بر اساس ملاحظات فنی و مهندسی تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه‌ی *GBU-28* مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور تلفیقی از روش‌های تجربی و عددی با استفاده از نرم افزار *FLAC* با توجه به پیوسته بودن محیط بکار برده خواهد شد. تحلیل عددی اطلاعات با ارزشی در خصوص پایداری این فضای زیرزمینی تحت بارگذاری‌های دینامیکی حاصل از انفجار فراهم می‌کند.

برای انواع کاربری‌ها در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ghafarzadeh, 2003). دولت‌های مختلف در آسیا، اروپا و آمریکا اقدام به استفاده‌ی بهینه از این معادن متروک در زمینه‌های نظامی، استراتژیک، تجاری و فرهنگی کرده‌اند که گزیده‌ای از آن در جدول ۱ درج شده است.

در ایران نیز وجود معادن زیرزمینی متروکه که امکان کاربرد به عنوان سازه‌های پدافند غیرعامل را داشته باشند، غیرمحمول نیست (Jalali & Eftekhari, 2008). این معادن به صورت گسترده و به وفور و با مشخصات مختلف در جای‌جای کشور وجود دارند، ولی تاکنون هیچ‌گونه فعالیت متمرکزی در زمینه‌ی استفاده‌ی استراتژیک از این فضاها متروک انجام نشده است.

با در نظر گرفتن حضور ایران در منطقه پرتنش خاورمیانه، می‌توان برای حفظ شرایط دفاعی کشور در سطحی مناسب و تأمین تدارکات و تسلیحات در هنگام بروز هرگونه خطر نظامی احتمالی، به انبارسازی مناسب و علمی تجهیزات نظامی که یکی از نیازهای حساس و حیاتی کشور به حساب می‌آید، پرداخت (Noroozi & Mirzeinali Yazdi, 2013). از طرفی دیگر، هم اکنون، نفت خام و مواد هیدروکربوری از مهم‌ترین منابع استراتژیک ایران است و بخش بزرگی از درآمدهای کشور توسط صادرات این مواد حاصل می‌شود. در عین حال مخازن فعلی کشور عموماً در سطح قرار دارند و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به آفند هوایی احتمالی دشمن، به شدت آسیب‌پذیر خواهند بود.

زمانی که فضای زیرزمینی دارای اهمیت استراتژیک باشد، حفاظت و ایمنی این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایمنی و پایداری فضاها زیرزمینی اغلب می‌تواند توسط بارهای دینامیکی تحت تاثیر قرار گیرد. بار دینامیکی می‌تواند توسط عوامل مختلفی چون زلزله، انفجارهای اتفاقی، روش استخراج حفاری و آتشیاری و اصابت موشک‌های نظامی ایجاد شود (Wei, et al., 2009). انتشار امواج ناشی از انفجارهای شدید در توده‌سنگ که طبیعت ناپیوسته و رفتار متغیر دارد، بسیار پیچیده است (Kuzmenkove, et al., 1993). به همین لحاظ تحلیل دینامیکی سازه زیرزمینی بسیار پیچیده می‌شود، به ویژه زمانی که فرآیند بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار باشد.

تاکنون، برخی مطالعات در این زمینه صورت گرفته

جدول ۱- گزیده‌ای از کاربری‌های معادن زیرزمینی متروکه (Peila & Pelizza, 1995)

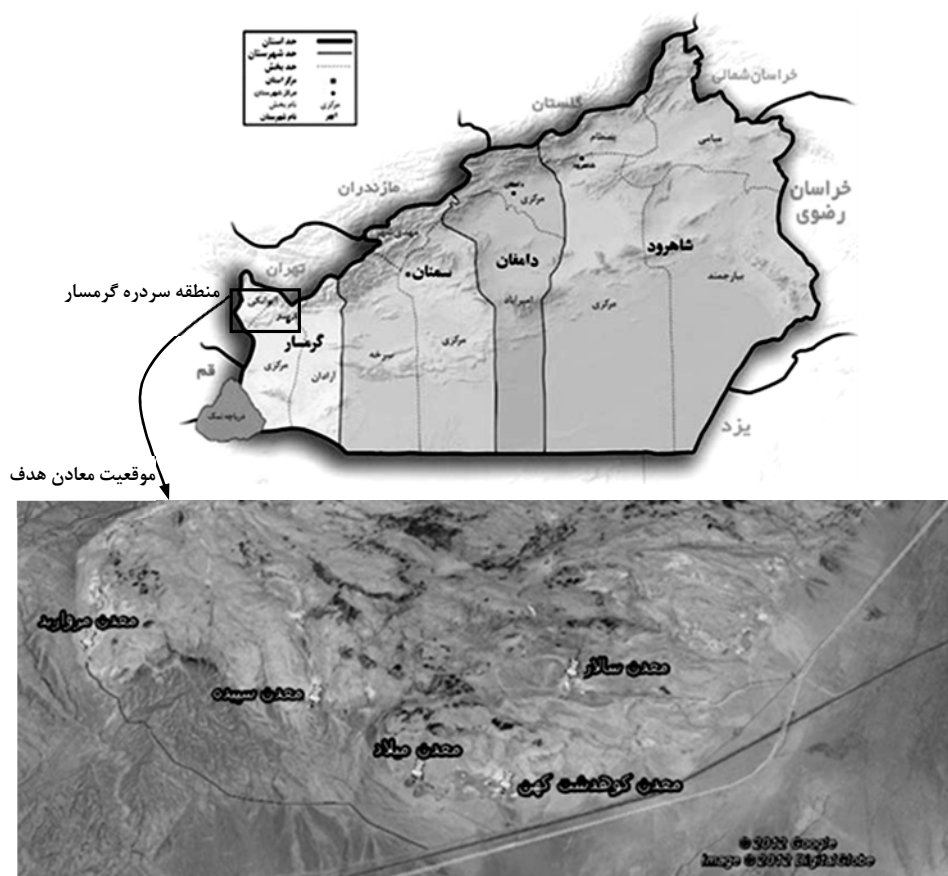
ردیف	نوع کاربری	کشور	نام معدن	جنس سنگ	روش معدنکاری
۱		ایتالیا	<i>Traversella</i>	سنگ آهن	---
۲		ژاپن	<i>Kamasaishi</i>	سنگ آهک	مغار
۳	انبارسازی تجهیزات	ایالات متحده	<i>Kansas City</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۴		ایالات متحده	<i>Western Pennsylvania</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۵		ایالات متحده	<i>Boyce</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۶		فرانسه	<i>May-Sur-Orne</i>	سنگ آهن	---
۷		سوئد	<i>Harsbacka</i>	فلوئوریت	---
۸		کانادا	<i>Wabana</i>	سنگ آهن	---
۹	ذخیره‌سازی نفت خام	ایالات متحده	<i>Weeks Island</i>	سنگ نمک	اتاق و پایه
۱۰		ایالات متحده	<i>Cote Blanche</i>	سنگ نمک	اتاق و پایه
۱۱		ایالات متحده	<i>Central Rock</i>	سنگ آهک	---
۱۲		ایالات متحده	<i>Iconton</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۱۳		ایالات متحده	<i>Lime Field</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۱۴		فرانسه	<i>Joseph-Else</i>	پتاس	---
۱۵		ایتالیا	<i>Codana</i>	ژبیس	اتاق و پایه
۱۶		ژاپن	<i>Nakatatsu</i>	سرب و روی	---
۱۷		ژاپن	<i>Shin-Yakuki</i>	سنگ آهک	استخراج از طبقات فرعی
۱۸	دفن پسماندها	هند	<i>Korba</i>	زغال سنگ	جبهه کار بلند
۱۹		رومانی	<i>Verkhnekamsoye</i>	پتاس	اتاق و پایه
۲۰		انگلیس	<i>Walsall Wood</i>	زغال سنگ	---
۲۱		آلمان	<i>Asse</i>	سنگ نمک	اتاق و پایه
۲۲		آلمان	<i>Konrad</i>	سنگ آهن	اتاق و پایه
۲۳		فرانسه	<i>Joseph-Else</i>	پتاس	---
۲۴		ژاپن	<i>Ohya</i>	سنگ ساختمانی	اتاق و پایه
۲۵		سوئد	<i>Dannemora</i>	سنگ آهن	اتاق و پایه
۲۶	استقرار کارخانجات	ایالات متحده	<i>Zenith</i>	سنگ آهن	تخریب طبقات فرعی
۲۷		ایالات متحده	<i>Randolph</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۲۸		ایالات متحده	<i>Pixley Co.</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۲۹		ایالات متحده	<i>Louisville</i>	سنگ آهک	---
۳۰		مجارستان	<i>Fertorakos</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۳۱		ایتالیا	<i>Cogne</i>	سنگ آهن	---
۳۲	پناهگاه و بیمارستان	هلند	<i>Valkenburg</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۳۳		لهستان	<i>Wieliczka</i>	سنگ نمک	اتاق و پایه
۳۴		رومانی	<i>Slanic Prahova</i>	سنگ نمک	اتاق و پایه
۳۵		رومانی	<i>Berezniki-I</i>	پتاس	اتاق و پایه
۳۶		مجارستان	<i>Budapest</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه
۳۷		ایتالیا	<i>Olloment</i>	مس	تونل‌های معدنی
۳۸	ذخیره‌سازی مواد	سوئد	<i>Kirunavaara</i>	سنگ آهن	---
۳۹	خوراکی	رومانی	<i>Verkhnekamsoye</i>	پتاس	اتاق و پایه
۴۰		ایالات متحده	<i>Springfield</i>	سنگ آهن	تونل‌های معدنی
۴۱		ایالات متحده	<i>Southwest Lime</i>	سنگ آهک	اتاق و پایه

۲- معادن نمک منطقه سردره گرمسار

منطقه سردره گرمسار در نزدیکی شهر گرمسار در استان سمنان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از نظر جغرافیایی در حاشیه جنوبی البرز و در حاشیه شمالی کویر مرکزی قرار گرفته است. بعلاوه موقعیت خاص جغرافیایی، دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل می‌باشد. روند عمومی و ساختمانی منطقه شرقی- غربی است و قسمت زیادی از منطقه توسط دیپایر پوشیده شده است. سازندهای این منطقه به ترتیب شامل سازند کرج، سازند کند، سازند قرمز زیرین، سازند قم، سازند قرمز فوقانی، کنگلومرای بختیاری و رسوبات عهد حاضر است. بطور کلی این منطقه از دو سازند نمکی مختلف یکی به سن ائو - الیگوسن و دیگری میوسن تشکیل شده است (Nazeriani, 2007).

نهشته‌های رسوبی لایه‌بندی شده‌ی بزرگی از نمک در

ناحیه کوهستانی منطقه وجود دارند که در نتیجه تخییر دریاها و قدیمی واقع در منطقه بوجود آمده‌اند. این لایه‌های نسبتاً ضخیم عمدتاً افقی و در بعضی مکان‌ها دارای شیب خیلی اندکی هستند. از زمان‌های قدیم استخراج نمک در این ناحیه انجام می‌شده است اما استخراج مدرن آن از حدود ۵۰ سال پیش شروع شده است. در ابتدا استخراج نمک توسط معدنکاری روباز انجام می‌شد. پس از مدتی کم و بیش طولانی بدلیل کاهش در بازدهی و سود و همچنین فقدان شرایط مناسب برای معدنکاری روباز، روش معدنکاری کارگاه جایگزین آن شد. جهت عملیات آتشیاری ابتدا در سقف کارگاه توسط حفر چال‌های افقی و کاربرد آنفو و چاشنی‌های تأخیری، پله استخراجی احداث می‌شود. سپس با استفاده از آتشیاری عمودی سنگ نمک استخراج و توسط لودر و کامیون‌ها بارگیری و باربری می‌شود. به منظور کاربرد ماشین-آلات روباز، اتاق‌های عریض با ارتفاع زیاد احداث شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه سردره گرمسار و معادن مورد نظر

نواری و عکس‌برداری‌های مختلف از تمام فضاها انجام می‌شود. مشخصات محیطی با استفاده مشاهدات عینی از دیوارها و پایه‌های معدنی و همچنین رخدادهای سطحی موجود در منطقه در صورت وجود انجام می‌شود. بدین ترتیب پارامترهایی چون درزه‌داری، وجود گسل و جریان آب زیرزمینی بدست می‌آیند.

۳-۱- توزیع جهت یافتگی

تجمع شوراب در گودال‌های سطحی در نتیجه شکاف‌های ایجاد شده توسط عملیات معدنکاری در نمک که در طی سال‌های بسیار بدلیل خزش توسعه یافته‌اند، ایجاد می‌شوند. این شکاف‌ها سبب نشت آب تازه به داخل فضای معدن می‌شوند و سرانجام موجب انحلال لایه‌های نمکی بالایی و ریزش روباره به داخل فضای معدنکاری شده می‌شود.

بر اساس مطالعات صحرایی انجام شده هیچگونه پدیده‌ای که بیانگر ایجاد گودال‌های سطحی تجمع شوراب در منطقه مورد مطالعه باشد مشاهده نشده است. همچنین هیچ‌گونه گزارشی مبنی بر وجود چنین گودال‌هایی به سازمان‌های مربوطه ارائه نشده است. از این حیث می‌توان نتیجه گرفت عملیات معدنکاری طی سالیان گذشته بر توده‌سنگ اطراف معدن تاثیر چندانی نداشته و بنابراین از این نظر معدن مورد بررسی منطقه هدف، به منظور انبارسازی مناسب تشخیص داده می‌شوند.

۳-۲- وجود یا عدم وجود جریان آب زیرزمینی

آب می‌تواند مشکل جدی‌ای برای فضای زیرزمینی محسوب شود. عدم کنترل این مشکل می‌تواند موجب مشکلات پایداری و تخریب ناحیه شود. معدن مورد مطالعه در منطقه فاقد جریان آب زیرزمینی بوده و یا در صورت مشاهده بسیار ناچیز و قابل اغماض بوده است. بنابراین از این نظر معدن هدف برای کاربری فضای استراتژیک، مناسب تشخیص داده شده‌اند.

۳-۳- وجود ضخامت ایمن (ارتفاع روباره)

وجود ضخامت ایمن در دیواره‌ها و سقف فضای زیرزمینی استراتژیک حیاتی است. این ضخامت ایمن بسته به نوع کاربری فضا متفاوت است. به عنوان مثال در مورد ذخیره‌سازی نفت، موسسه DOE پیشنهاد نمود که مینیمم فاصله ۹۰ تا ۱۱۰ متری بین ناحیه معدنکاری که در حال عملیات آتشباری است و مخزن ذخیره‌سازی نفت در نظر گرفته شود (Lu, 2010).

منطقه سردره گرمسار در نزدیکی شهر گرمسار، در حاشیه جنوبی البرز و حاشیه شمالی کویر مرکزی واقع شده است. بطور کلی این منطقه از دو سازند نمکی مختلف یکی به سن ائو - الیگوسن و دیگری میوسن تشکیل شده است. نهشته‌های رسوبی لایه‌بندی شده‌ی بزرگی از نمک در ناحیه کوهستانی منطقه وجود دارند که در نتیجه تبخیر دریاهای قدیمی واقع در منطقه بوجود آمده‌اند. این لایه‌های نسبتاً ضخیم عمده‌تاً افقی و در بعضی مکان‌ها دارای شیب خیلی اندکی هستند (Nazeriani, 2007).

در حدود ۴۰ معدن فعال در منطقه وجود دارد که یا به روش زیرزمینی استخراج می‌شوند و یا در حال تغییر به روش زیرزمینی هستند. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری و مستندسازی شده از وضعیت معادن و زمین‌شناسی منطقه، غربالگری اولیه‌ای از معادن منطقه صورت گرفت. در این مرحله بر اساس جاده‌های دسترسی و حجم عملیات معدنکاری که تاکنون انجام شده گزینه‌های امیدبخش از سایر موارد تفکیک شدند. بر اساس اطلاعات موجود معدنی در منطقه وجود دارند که فقط شامل یک اتاق با ابعاد کوچک (کمتر از ۱۲۰ متر مکعب) هستند که در این مرحله حذف شدند. در نهایت بر اساس حداقل الزامات فنی، مشخصات هندسی و ژئومکانیکی معادن منطقه، پنج عدد از معادن شامل سالار، طلای سفید زمر، سپیده، کوه دشت کهن و میلاد برای بررسی دقیق‌تر انتخاب شدند. موقعیت این معادن در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- ملاحظات فنی و مهندسی

به منظور بررسی امکان‌پذیری کاربرد مجدد معادن در خصوص مشخصات ژئومکانیکی و هندسی، بر اساس اطلاعات صحرایی برداشت شده، معدن هدف از پنج منظر تحت بررسی قرار می‌گیرد:

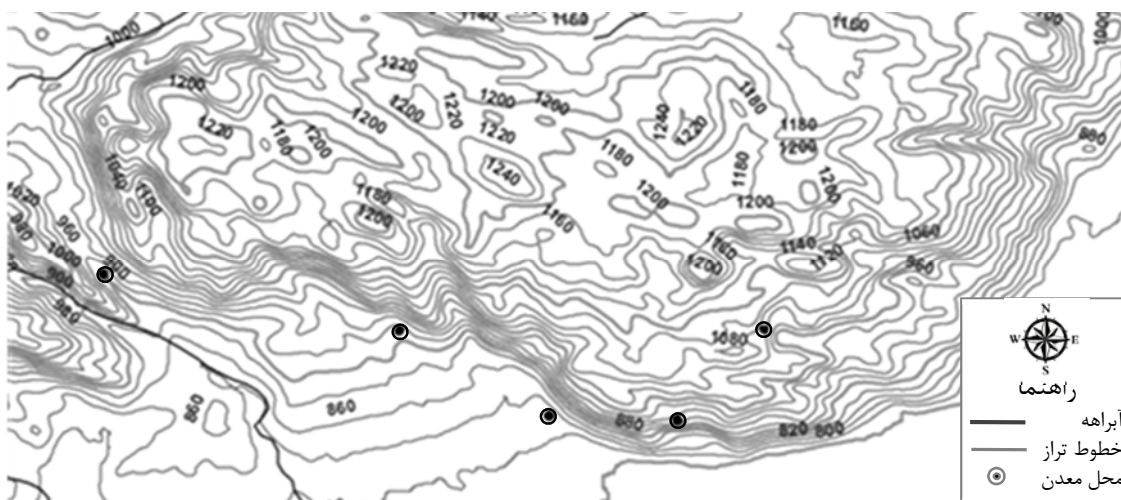
- وجود یا عدم وجود گودال‌های شوراب در سطح
 - وجود یا عدم وجود جریان آب زیرزمینی
 - وجود ضخامت ایمن (ارتفاع روباره)
 - پایداری نسبی فضای زیرزمینی
 - ابعاد و حجم کار معدنی
- مشخصات هندسی معادن شامل ابعاد دهانه، راهروها، کارگاه‌ها و پایه‌های معدنی با استفاده از اندازه‌گیری توسط متر

۳-۴- پایداری نسبی فضای زیرزمینی

بر اساس این معیار معادنی که در شرایط پایداری نامطلوبی قرار دارند و بدلیل شرایط ژئومکانیکی نامناسب ریزش‌های متعددی در آنها اتفاق افتاده در نظر گرفته نمی‌شوند. از جمله این معادن می‌توان به معدن سپیده اشاره نمود. معدن سپیده یکی از معادن نسبتاً بزرگ منطقه به شمار می‌آید. بدلیل وضعیت نامناسب سقف و دیواره‌ها و ریزش‌های صورت گرفته در دهانه ورودی معدن و دیگر نقاط آن و از همه مهم‌تر ریزش‌های موضعی اتفاق افتاده در طول مدت زمان بازدید، این معدن برای هدف مورد نظر نامناسب تشخیص داده شده است. شکل ۳ ریزش‌های اتفاق افتاده در دهانه این معدن را نشان می‌دهد. دیگر معادن هدف از پایداری نسبی خوبی برخوردار هستند.

خصوص سایر کاربری‌های استراتژیک که پایداری فضای دارای حساسیت کمتری است نیز می‌توان از این فاصله مرجع استفاده نمود. در این تحقیق با در نظر گرفتن ملاحظات پدافندی و احتمال وجود انفجار در دیواره خارجی این معادن فاصله ۱۰۰ متری به عنوان ضخامت ایمن برای فضای استراتژیک در نظر گرفته شده است.

با توجه به مطالعات صحرایی انجام شده، عکس‌های برداشت شده از معادن و بررسی نقشه‌های توپوگرافی منطقه (شکل ۲)، تمام معادن مورد مطالعه دارای حداقل ضخامت ۱۰۰ متری در دیواره‌ها و سقف خود هستند و بنابراین به منظور کاربرد فضای پدافند غیرعامل مناسب هستند.



شکل ۲: نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه و موقعیت معادن هدف (شماره ثبت: ۶۴۶۰)

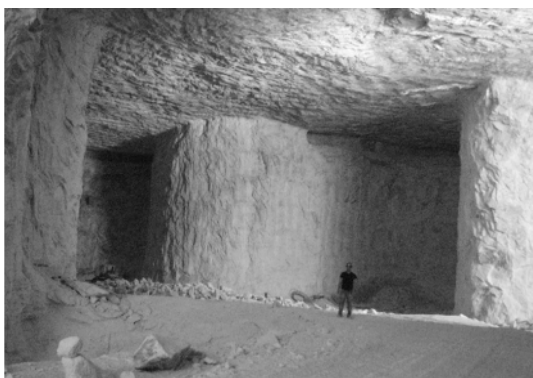
۳-۵- ابعاد و حجم کار معدنی

حجم فضای مناسب بستگی به نوع کاربری مورد نظر از فضا دارد. به عنوان مثال، در صورتی که هدف ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری باشد، همانند مورد مشابه معدن فلدسپار *Härsbacka*, کمترین حجم موردنیاز در حدود یک میلیون متر مکعب است (Karimi Nasab, et al., 2009). در این مرحله تعدادی از معادن هدف که دارای حجم کم بودند (کمتر از ۵۰,۰۰۰ متر مکعب) حذف شدند. معدن طلای سفید زمرد و معدن میلاد را می‌توان از این دسته نام برد. در خصوص سایر معادن هدف (معادن سالار و کوهدهشت



شکل ۳- ریزش اتفاق افتاده در دهانه معدن سپیده

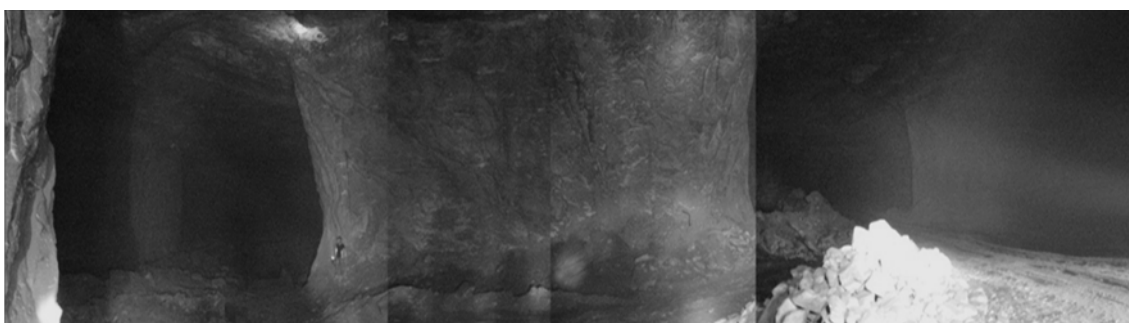
خوب، این معدن می‌تواند در آینده نزدیک به عنوان یک گزینه مناسب در نظر گرفته شود.



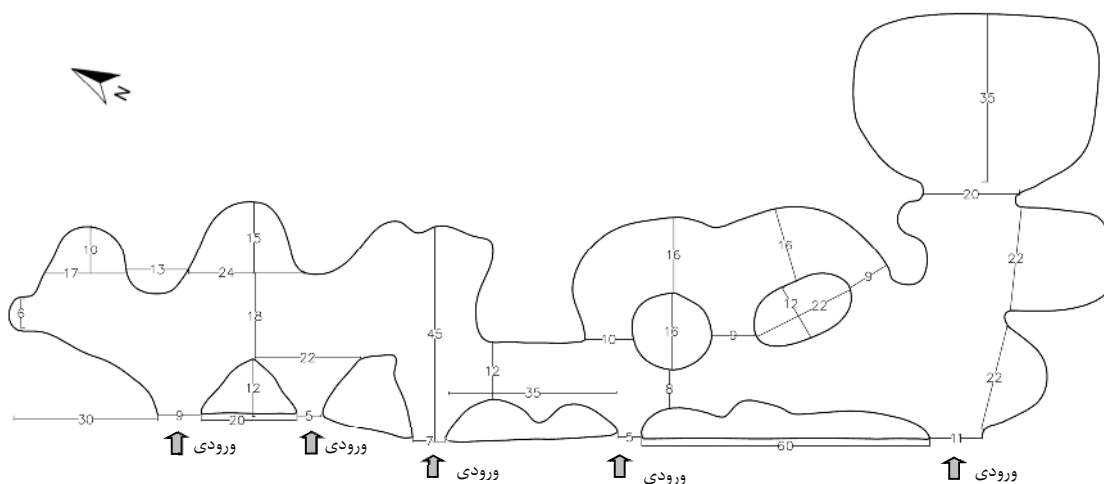
شکل ۴- فضای داخلی معدن سالار به همراه پایه در حال ساخت

کهن)، با استفاده از اندازه‌گیری‌های هندسی انجام شده نقشه این معدن در حین پیمایش تهیه و پایه‌ها و راهروها با توجه به اندازه‌های مربوطه جانمایی شدند (شکل‌های ۴ و ۵). نقشه تهیه شده با استفاده از نرم افزار *AutoCad* بطور دقیق رسم شد تا بدین ترتیب امکان اندازه‌گیری حجم کار معدنی فراهم شود. در شکل‌های ۶ و ۷ نقشه‌ی این معدن نشان داده شده است.

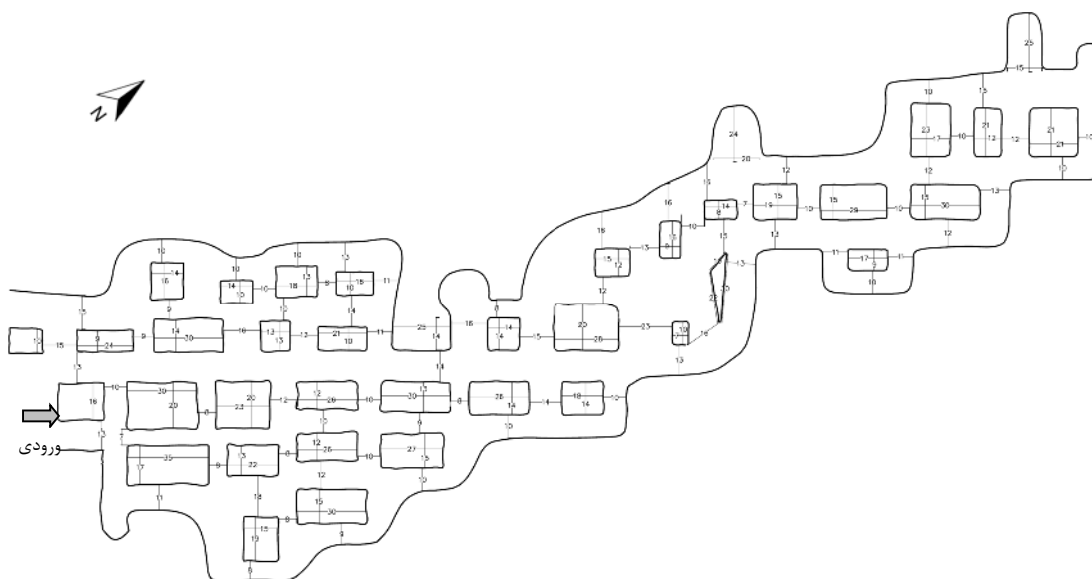
معدن سالار دارای ارتفاع متوسط ۲۵ متر است که بنا بر آن، حجم فضای خالی برای این معدن برابر ۲۱۵,۰۰۰ متر مکعب محاسبه شده است. این معدن می‌تواند با توجه به حجم فضای خالی آن برای برخی مقاصد پدافندی از جمله پناهگاه یا انبارسازی مهمات و جنگ‌افزار مناسب باشد. البته با توجه به کیفیت بالای نمک استخراج شده و سرعت استخراج نسبتاً



شکل ۵- نمایی از ابعاد فضای و پایه معدن کوه‌دشت کهن با استفاده از عکس‌برداری پانوراما



شکل ۶- نقشه معدن سالار به همراه ابعاد راهروها و پایه‌ها



شکل ۷- نقشه معدن کوه‌دشت کهن به همراه ابعاد راهروها و پایه‌ها

در این بخش از مقاله، باتوجه به پیوسته بودن محیط دربرگیرنده سازه از روش عددی تفاضل محدود با کاربرد نرم افزار *FLAC* برای مدل‌سازی نحوه انتشار امواج انفجاری و تحلیل دینامیکی سازه زیرزمینی استفاده شده است. همچنین رابطه‌ی تجربی استارفیلد (*Starfield*)، به عنوان یکی از پرکاربردترین روابط تجربی برای تخمین پالس فشار دینامیکی اعمال شده به دیواره چال، به منظور محاسبه بار وارده بر محفظه انفجار ناشی از انفجار پرتابه‌ی *GBU-28* بکار برده شده است.

۴-۱- معرفی ساختگاه

معدن کوه‌دشت کهن در گنبد نمکی متعلق به زون البرز و در تشکیلات قم قرار گرفته که به روش اتاق و پایه استخراج می‌شود. مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیک، نسبت پواسون و مقاومت کششی سنگ نمک توسط آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوره و آزمون کشش مستقیم بر روی نمونه‌های تهیه شده از معدن تعیین شده است (*Hosseini, 2012*). نتایج حاصل شده از آزمایشات و برخی دیگر از خواص مکانیکی سنگ نمک منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ خلاصه شده است.

معدن کوه‌دشت کهن، بزرگترین معدن منطقه دارای متوسط ارتفاع ۲۰ متر است. حجم فضای خالی در این معدن برابر ۶۲۰,۰۰۰ متر مکعب است. بنابراین از این حیث می‌توان این معدن را مناسب‌ترین گزینه به عنوان سازه پدافند غیر عامل در منطقه معرفی نمود. ذخیره باقیمانده این معدن بالغ بر یک میلیون تن برآورد گردیده و میزان استخراج سالانه آن در حدود ۸۰ هزار تن است.

۴-۲ ملاحظات پدافندی

همان طور که بیان شد، با در نظر گرفتن پارامترهای فنی و مهندسی انتخاب معدن با پتانسیل مناسب برای انبارسازی استراتژیک شامل پایداری فضا، وجود ضخامت ایمن در اطراف فضا، وجود یا عدم وجود گودال‌های شوراب در سطح زمین، جریان آب زیرزمینی و حجم فضای احداث شده (ظرفیت مورد نیاز)، معدن کوه‌دشت کهن برای این منظور انتخاب می‌شود. از آنجا که این معدن برای اهداف استراتژیک در نظر گرفته شده است، تحلیل پایداری دینامیکی سازه نیز باید مد نظر قرار گیرد. برای این منظور، از دیدگاه پدافند غیرعامل بررسی پایداری سازه تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سنگ نمک ساختگاه

کمیت	مقاومت تراکمی تک محوره	مقاومت کششی	مدول الاستیک	نسبت پواسون	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	زاویه اتساع	چگالی
مقدار	۲۸,۸۴	۱,۵۴	۹,۴۱	۰,۳۱	۴,۴	۲۹,۵	۷	۲۱۶۰
واحد	MPa	MPa	GPa	---	MPa	درجه	درجه	Kg/m ³

$$x_p = 0.0031SN \left(\frac{W}{A} \right)^{0.5} (V - 100) \quad (1)$$

که در آن x_p عمق نفوذ پرتابه، W وزن پرتابه بر حسب پوند، A سطح مقطع پرتابه بر حسب اینچ مربع، V سرعت برخورد پرتابه بر حسب فوت بر ثانیه، N ضریب دماغه و S مقدار ثابتی است که معمولاً برای سنگ ۱,۰۷ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مشخصات پرتابه در نظر گرفته شده که در جدول ۳ ارائه شده است، عمق نفوذ پرتابه ۲۳,۸۶ فوت معادل ۷,۲ متر حاصل خواهد شد.

۴-۲-۲- محاسبه بار انفجار

هنگامی که انفجار در یک چال یا محفظه انفجار به وقوع می‌پیوندد، فشار دینامیکی حاصل از انفجار بر دیواره چال وارد می‌شود. یکی از پرکاربردترین روابط تجربی محاسبه فشار انفجار رابطه (۲) است (Jimeno & Jimeno, 1995).

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

که در آن P فشار بر حسب MPa ، ρ_e چگالی ماده منفجره بر حسب g/cm^3 و v_D سرعت انفجار بر حسب m/s است.

در صورتی که قطر ماده منفجره با قطر چال برابر نباشد، فشار وارده بر چال تحت میرایی فضای بین ماده منفجره و چال قرار می‌گیرد و این امر سبب کمتر شدن فشار در پشت چال نسبت به فشار گاز ایجاد شده می‌گردد. با استفاده از رابطه (۳) فشار پشت چال محاسبه می‌گردد:

$$P_w = P \left(\frac{r_h}{b} \right)^{-q} \quad (3)$$

که در این رابطه r_h شعاع چال بر حسب mm شعاع ماده منفجره بر حسب mm و q فاکتور شکل ماده منفجره است که برای خرج‌های استوانه‌ای و کروی به ترتیب ۲ و ۳ در نظر گرفته می‌شود (Park, et al., 2009).

فشار وارد شده از طریق انفجار یک بمب به دیواره

۴-۲- بار دینامیکی ناشی از انفجار پرتابه

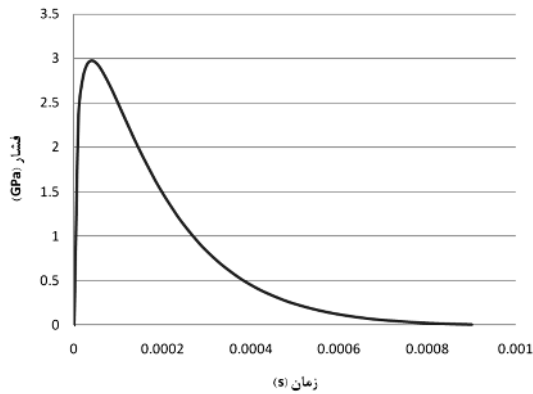
مهم‌ترین عامل تهدیدکننده پایداری سازه‌های زیرزمینی، بار دینامیکی ناشی از انفجار پرتابه‌هایی است که قابلیت نفوذ در زمین را دارند. این نوع پرتابه‌ها طی دو مرحله عمل می‌کنند. در مرحله اول پرتابه تا عمق مشخصی از زمین نفوذ کرده و در مرحله دوم، انفجار آن باعث انتشار امواج انفجاری و لرزه‌ای در زمین می‌شود که ممکن است باعث رسیدن خسارت به سازه زیرزمینی شود. البته عمق نفوذ پرتابه به میزان زیادی وابسته به جنس سنگ ساختگاه سازه است. در این مقاله پرتابه $GBU-28$ به عنوان عامل تهدیدکننده در نظر گرفته شده است. مشخصات این پرتابه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات پرتابه (globalsecurity, 2017)

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی ماده منفجره	۱/۷۷	gr/cm ³
سرعت انفجار	۸۳۰۰	m/s
وزن کل	۴۹۰۰	lb
سرعت برخورد	۶۰۰	ft/s
طول کل	۶	m
ضریب دماغه	۱/۳	---
سطح مقطع پرتابه	۴۰	in ²
قطر بمب	۳۶	cm
قطر حفره نفوذ	۵۰	cm

۴-۲-۱- محاسبه عمق نفوذ پرتابه

تاکنون روابط تجربی مختلفی توسط محققین برای محاسبه عمق نفوذ پرتابه ارائه شده است. در این روابط با استفاده از برخی خصوصیات پرتابه عمق نفوذ پرتابه محاسبه می‌شود. یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین این روابط توسط یانگ (Young) ارائه شده است (رابطه (۱)) (Bangash, 2009).



شکل ۸- منحنی بارگذاری دیواره محفظه انفجار

۴-۳- مدل‌سازی عددی

به منظور بررسی تاثیر انفجار بر سازه زیرزمینی، در فواصل ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ متری از نقطه انفجار، چهار مدل با استفاده از نرم‌افزار ایجاد و تحلیل می‌گردد. رفتار مصالح سنگی که عمدتاً شامل سنگ نمک است، به صورت الاستوپلاستیک مطابق با معیار خمیری موهر-کلمب در مدل در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ مدل ایجاد شده در عمق ۲۰ متری و محل انفجار پرتابه (که در فاصله ۱۵ متری از سازه واقع شده است) نشان داده شده است.

محفظه انفجار به صورت یک پالس است که در زمان بسیار کوتاهی به مقدار حداکثر رسیده و سپس با گذشت پیشانی موج رفته رفته کاهش می‌یابد. روابط تجربی مختلفی برای تخمین پالس فشار دینامیکی اعمال شده به دیواره چال ارائه شده است. از جمله روابط پرکاربرد در این زمینه می‌توان به رابطه استارفیلد اشاره کرد (Starfield & Pugliese, 1968):

$$P(t) = P_W \times 10^3 \times \frac{8\rho_r - C_p}{\rho_r C_p + V_D \rho_e} \times \left[e^{-\beta t / \sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\beta t} \right] \quad (4)$$

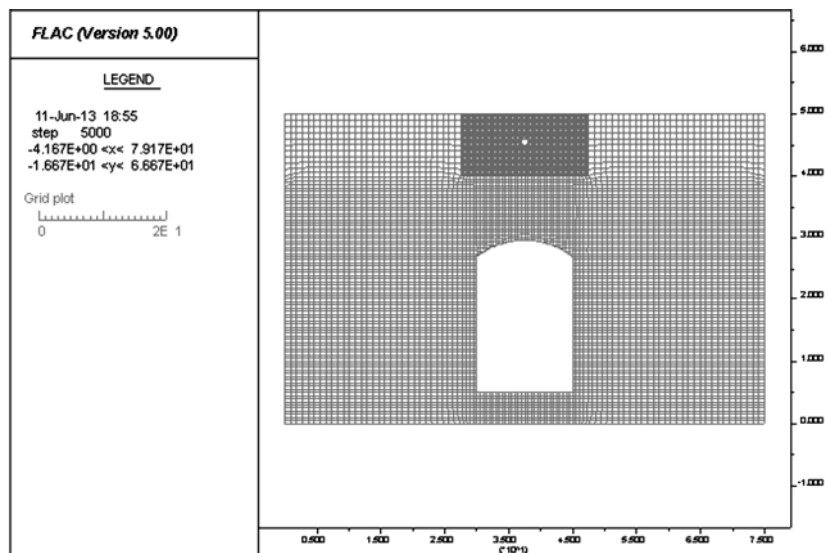
$$\beta = 16338$$

در این رابطه فشار دینامیکی نسبت به زمان بر حسب GPa ، ρ_r چگالی سنگ (kg/m^3)، ρ_e چگالی ماده منفجره (kg/m^3)، C_p سرعت انتشار امواج طولی در سنگ (m/s)، V_D سرعت انفجار (m/s) و P_W فشار پشت چال (MPa) است.

پالس انفجاری به وجود آمده از انفجار برای مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت رابطه (۵) است.

$$P(t) = 6855 \times 10^3 \times \frac{8(2160) - 2357}{2160(2357) + 8300(1770)} \times \left[e^{-11552 t} - e^{-\sqrt{32676} t} \right] \quad (5)$$

منحنی بارگذاری دیواره محفظه انفجار در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۹- هندسه سازه

۴-۳-۱- مش بندی

از جمله تفاوت‌های عمده تحلیل دینامیکی با تحلیل استاتیکی، متغیر زمان است. زمان محاسبه در این تحلیل‌ها نیز کاملاً وابسته به اندازه مش‌بندی است. با توجه به اینکه حداکثر سرعت ذرات در فاصله‌ای برابر یک هشتم طول موج ($1/8\lambda$) رخ می‌دهد، بنابراین اندازه مش‌بندی در این نوع تحلیل‌ها باید کمتر از این فاصله در نظر گرفته شود (Rosengren, et al., 1999). برای تحلیل مناسب باید ابعاد مش‌بندی در حوالی منطقه انفجار از این نسبت پیروی کند. با توجه به سرعت امواج طولی و عرضی در سنگ نمک (Manthei, 2005) و فرکانس بار انفجار حاصل شده از مدل‌سازی، کوچکترین بعد برای مش‌بندی مدل، ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (جدول ۴). این بعد از مش‌بندی فقط در منطقه در برگیرنده نقطه انفجار و تا فاصله مشخصی در نظر گرفته شده است و با افزایش فاصله از این نقطه تراکم مش‌بندی کاهش می‌یابد.

۴-۳-۲- تعادل استاتیکی

به منظور توزیع مناسب تنش در مدل و ایجاد شرایط واقعی

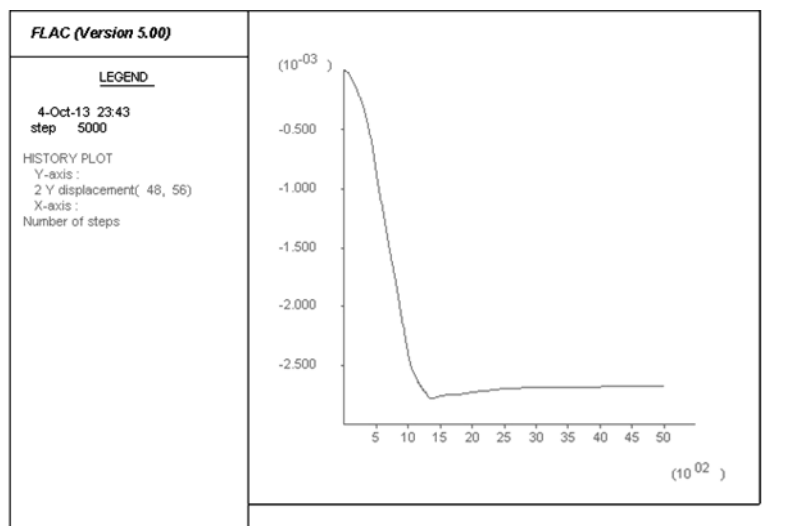
موجود در اطراف سازه قبل از هرگونه تحلیل دینامیکی، ضروری است مدل از لحاظ استاتیکی به تعادل برسد. ایجاد وضعیت تعادل در حالت استاتیکی و میزان جابجایی سقف برای سازه واقع در عمق ۲۰ متری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۴-۳-۳- مرزبندی دینامیکی

در تحلیل دینامیکی سازه‌ها با استفاده از روش‌های عددی، برخی از شرایط مرزی منجر به انعکاس امواج منتشر شده به داخل مدل می‌شوند. استفاده از مدل‌های بزرگ می‌تواند تا حد زیادی این مشکل را رفع کند، اما باعث افزایش بسیار زیاد زمان محاسبات می‌شود. روش دیگر برای جلوگیری از بازتاب امواج به داخل مدل استفاده از مرزهای بدون بازتاب است. چندین روش برای پیاده‌سازی اینگونه مرزها وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرزهای آرام (*Quiet Boundaries*) است که توسط کولمبیر و لیس‌مایر (*Kuhlemeyer and Lysmer*) ارائه شده است (ITASCA, 2005). در این تحقیق از این روش برای مرزبندی استفاده شده است

جدول ۴- تعیین ابعاد مش‌بندی مدل

سرعت موج P (m/s)	سرعت موج S (m/s)	فرکانس بار انفجار (Hz)	کوچکترین طول موج (λ_{min})	اندازه مش‌بندی (m) ($0.125\lambda_{min}$)
۴۶۰۰	۲۵۵۰	۱۲۰۰	۲/۵۵	۰/۲۶



شکل ۱۰- جابجایی سازه واقع در عمق ۲۰ متری و ایجاد تعادل استاتیکی

توجه به تاریخچه جابجایی بدست آمده فرکانس طبیعی مدل مشخص می‌شود (ITASCA, 2005). در مورد مطالعاتی این تحقیق، فرکانس طبیعی مدل با توجه به شکل ۱۱ برابر ۱۰ هرتز است.

۴-۳-۵- اعمال بار دینامیکی ناشی از انفجار

در نرم‌افزار *FLAC* ورودی بارگذاری دینامیکی می‌تواند به یکی از چهار طریق الف) تاریخچه شتاب، ب) تاریخچه سرعت، ج) تاریخچه تنش یا فشار و د) تاریخچه نیرو به مدل اعمال شود. در این مقاله، بار انفجاری به صورت تاریخچه فشار مطابق شکل ۸ به طور یکنواخت به دیواره گودال انفجاری اعمال می‌شود. هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت محفظه انفجار و شرایط مرزی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

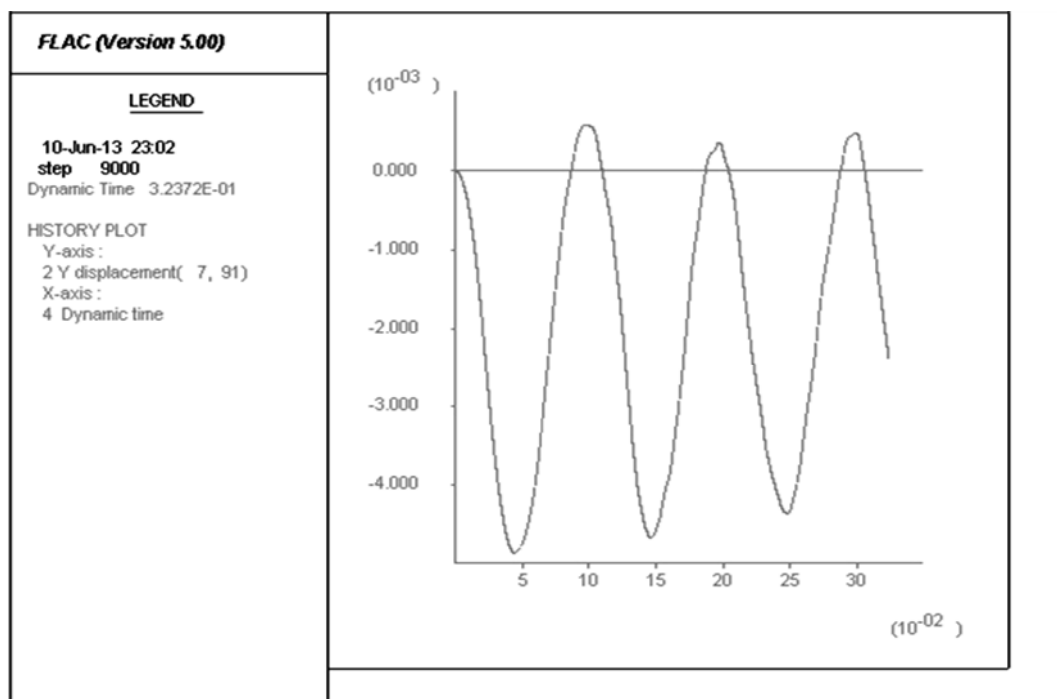
در این مقاله فرض شده که بار انفجار ناشی از ماده منفجره توزیع شده در طول پرتابه استوانه‌ای ۶ متری، به صورت متمرکز و در فاصله ۱ متری از دماغه پرتابه اعمال می‌شود. در این حالت با توجه به عمق نفوذ ۷/۲ متری، محفظه بارگذاری دینامیکی در عمق ۵ متری مدل‌سازی شده است (همانطور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود).

۴-۳-۴- تعیین ضرایب میرایی

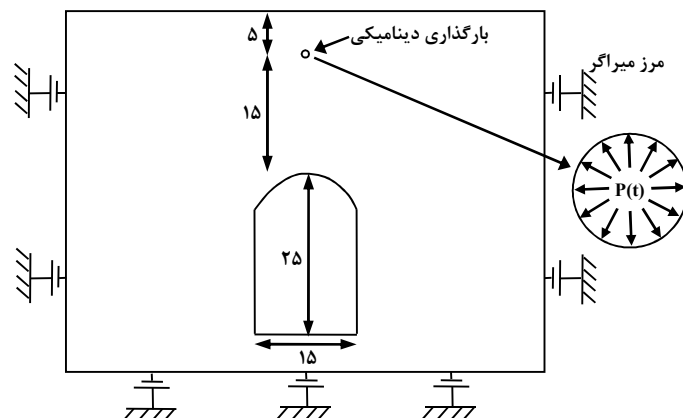
سیستم‌های دینامیکی طبیعی دارای درجه‌ای از میرایی بوده که انرژی ارتعاشات وارده را جذب می‌کنند. در صورت عدم وجود میرایی، ارتعاش یک سیستم مکانیکی تا ابد ادامه می‌یابد. در این تحقیق از مدل میرایی ریلی (Rayleigh *Damping*) برای معرفی میرایی مصالح استفاده شده است. یک ماتریس میرایی ریلی (*C*) با استفاده از ضرایب α و β با مولفه ماتریس جرم (*M*) و ماتریس سختی (*K*) مرتبط می‌شود.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۶)$$

که در آن ضرایب α ثابت میرایی مرتبط با جرم یا فرکانس اصلی مدل و β ثابت میرایی مرتبط با سختی است. برای مدل‌های زمین‌شناسی ضریب β حدود ۲ تا ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از مسائل فرکانس اصلی در ارتباط با دوره تناوب طبیعی نوسان سیستم است. برای بدست آوردن این فرکانس باید تاریخچه‌ای از جابجایی یا سرعت در بالاترین نقطه مدل در نظر گرفته و چندین سیکل برای حل مدل در حالت دینامیکی اعمال شود. در نهایت با



شکل ۱۱: تاریخچه جابجایی در بالاترین نقطه مدل در حالت بدون میرایی



شکل ۱۲- هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت محفظه انفجار و شرایط مرزی

۴-۴- بررسی نتایج

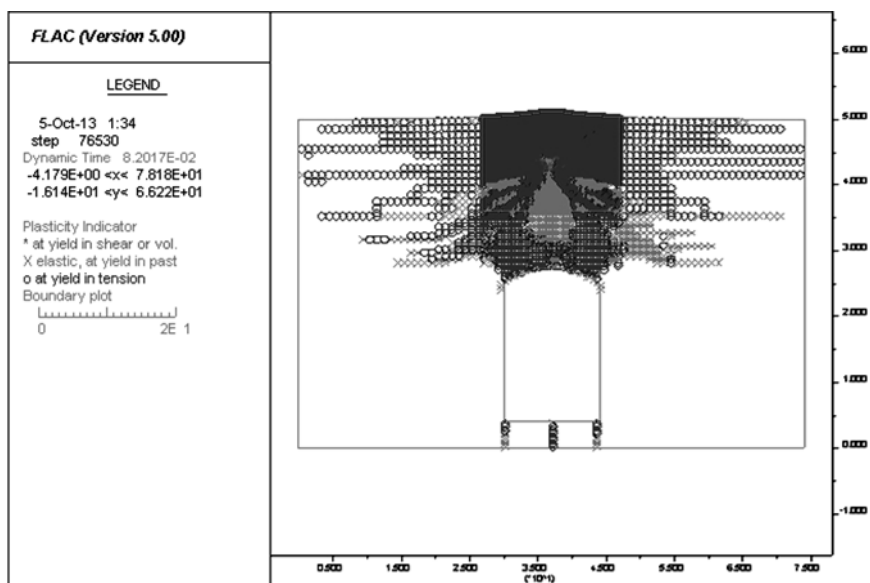
نتایج حاصل از بارگذاری دینامیکی بر سازه در عمق‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. پس از اعمال بار دینامیکی به دیواره گودال انفجار، موج شوک ایجاد شده در محیط انتشار می‌یابد. در شکل ۱۳ انتشار موج شوک ناشی از انفجار در مدل واقع در عمق ۲۰ متری نشان داده شده است. تنش انفجاری وارده به دیواره گودال انفجار باعث تشکیل ناحیه پلاستیک در نواحی اطراف می‌شود. در این ناحیه موج ضربه دارای بیشترین میرایی است. همچنین برخورد موج ضربه ناشی از انفجار به سازه باعث تشکیل ناحیه پلاستیک در سازه شده است. این منطقه به منظور جلوگیری از بوجود آمدن خسارات به تاسیسات و سازه‌ها باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. همان طور که مشاهده می‌شود، موج به دلیل پیوسته بودن و یکنواختی محیط، به صورت متقارن در مدل منتشر شده است.

۴-۴-۱- تغییرات تنش در سازه

هنگامی که سازه تحت تاثیر بار نسبتاً یکنواخت استاتیکی قرار دارد، تقریباً تنش‌های یکنواختی در آن ایجاد می‌شود. عبور موج انفجار از هر نقطه از سازه باعث تغییر در حالت تعادل آن نقطه و ایجاد تنش‌های فشاری و کششی می‌شود. شکل ۱۴ تاریخچه تنش ثبت شده‌ی وارده بر سازه در عمق ۲۰ متری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود در ابتدا پس از گذشت زمان اندکی (در حدود ۰٫۰۲۵ ثانیه) هنوز بار ناشی از انفجار به سازه نرسیده است و سازه تحت بار استاتیکی ناچیزی قرار دارد. سپس موج ضربه به سازه می‌رسد و سازه را تحت بارگذاری فشاری بسیار شدیدی در حدود ۱/۴ مگاپاسکال قرار می‌دهد که بسیار بیشتر از تنش استاتیکی وارده بر سازه است. این بار دینامیکی می‌تواند موجبات ریزش سقف را فراهم کند. در نهایت سازه تحت بار پایدار در حدود ۰٫۴ مگاپاسکال قرار می‌گیرد. با افزایش عمق سازه، تنش فشاری سیر نزولی داشته و برای سازه واقع در عمق ۱۰۰ متری به $۱/۷ \times ۱۰^۵$ پاسکال می‌رسد.

جدول ۵- خلاصه نتایج حاصل شده از تحلیل دینامیکی مدل‌ها با فاصله‌داری متفاوت سازه و نقطه انفجار

ردیف	فاصله بین نقطه انفجار و سازه (m)	بیشینه جابجایی در سقف سازه (mm)		بیشینه سرعت ذره‌ای در سقف سازه (cm/s)	بیشینه تنش در سقف سازه (Pa)
		قبل از انفجار (استاتیکی)	بعد از انفجار (دینامیکی)		
۱	۱۵	۳	۷۰	۵۰۰	$۱/۴ \times ۱۰^۶$
۲	۳۰	۴	۱۴	۱۴۰	۷×۱۰^۵
۳	۶۰	۶	۱۱	۶۰	$۲/۵ \times ۱۰^۵$
۴	۹۰	۹	۱۲	۳۰	$۱/۷ \times ۱۰^۵$

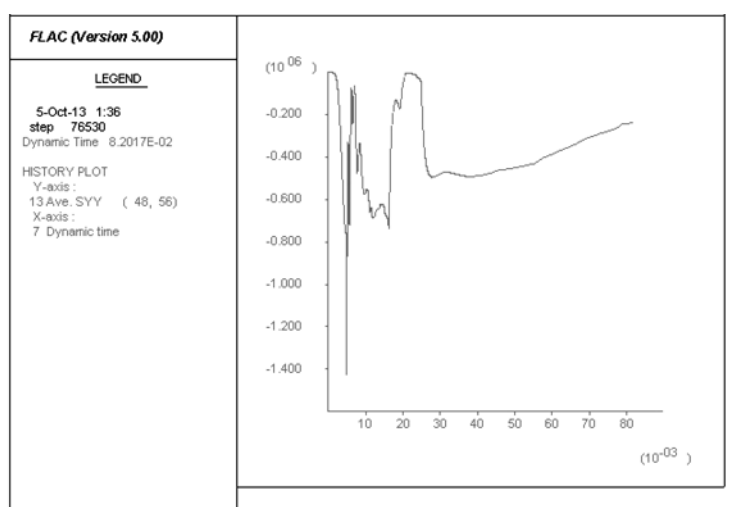


شکل ۱۳- انتشار موج انفجار در مدل واقع در عمق ۲۰ متری و تشکیل نواحی پلاستیک

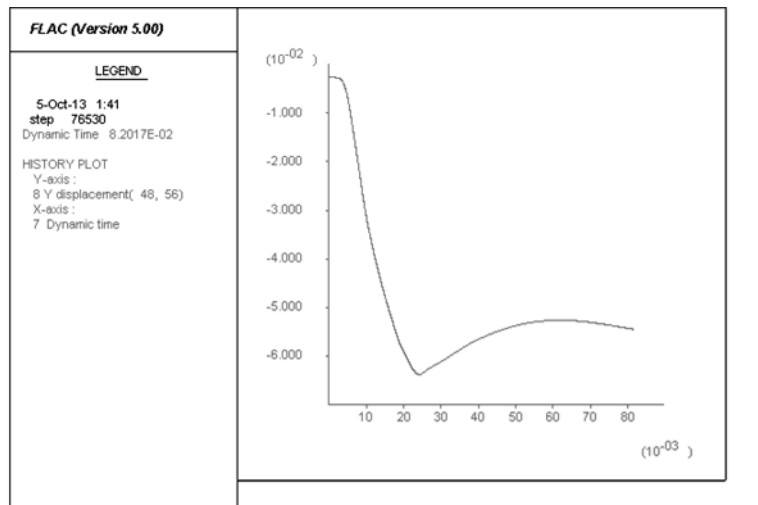
بارگذاری استاتیکی (شکل ۱۰) به حدود ۷۰ میلی‌متر بعد از بارگذاری دینامیکی رسیده است. این میزان جابجایی بسیار زیاد بوده و سبب ناپایداری و در نهایت ریزش سازه خواهد شد. همچنین در صورت نصب تجهیزات نگهداری، مقادیر حداکثر نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی وارده بر سیستم نگهداری به میزان بسیار قابل توجهی افزایش خواهد یافت. برای سازه واقع در اعماق بیشتر، اختلاف جابجایی سقف سازه بین حالت‌های استاتیکی و دینامیکی، کمتر است.

۴-۲- تغییرات جابجایی در سقف سازه

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شد، انتشار موج ضربه، باعث اعمال تنش فشاری بسیار زیادی بر سازه گردیده است. بنابراین باید انتظار ایجاد جابجایی در نقطه تاج سازه که در معرض بیشترین اعمال بار دینامیکی قرار دارد را داشت. شکل ۱۵ تاریخچه جابجایی در تاج سازه واقع در عمق ۲۰ متری را در حالت دینامیکی نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که جابجایی در سقف از حدود ۳ میلی‌متر بعد از



شکل ۱۴- تغییرات تنش در سازه واقع در عمق ۲۰ متری بعد از بارگذاری انفجاری

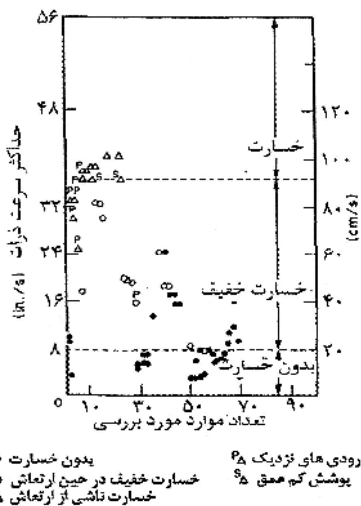


شکل ۱۵- تغییرات جابجایی در سازه واقع در عمق ۲۰ متری بعد از بارگذاری انفجاری

سازه امکان ایجاد خسارت بر اثر بارگذاری ناشی از انفجار وجود دارد. سرعت ذرات در فاصله ۳۰ متری از نقطه انفجار (سازه واقع در عمق ۳۵ متری)، ۱۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه است که در این سازه نیز امکان ایجاد خسارت بر اثر بارگذاری ناشی از انفجار وجود دارد.

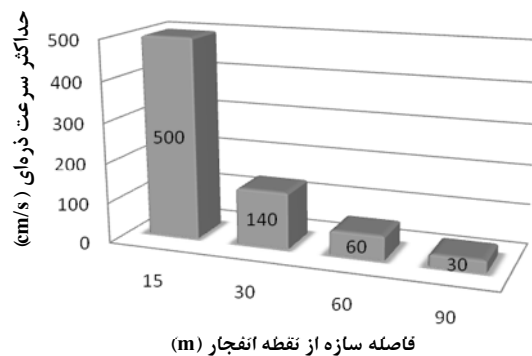
۴-۳- تغییرات سرعت ذرات

حداکثر سرعت ذرات یکی از مهمترین معیارها برای پیش‌بینی خسارت وارده به سازه‌های زیرزمینی است. شکل ۱۶ تغییرات حداکثر سرعت ذرات در تاج سازه را در فواصل ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ متری از نقطه انفجار نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- ارتباط بین میزان خسارات وارده بر سازه و حداکثر سرعت ذرات (John & Zahrah, 1987)

ذرات در فاصله ۶۰ متری از نقطه انفجار ۶۰ سانتی‌متر بر ثانیه است و سازه دچار خسارت ناچیزی می‌شود. در فاصله



شکل ۱۶- حداکثر سرعت ذرات در سقف سازه در عمق‌های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر سرعت ذرات با افزایش عمق احداث سازه کاهش می‌یابد. از آنجا که مقدار سرعت ذراتی که در فاصله ۱۵ متری از نقطه انفجار قرار دارند، ۵۰۰ سانتی‌متر بر ثانیه است و با توجه به ارتباط بین میزان خسارات وارده و سرعت ذرات ارائه شده در شکل ۱۷، در این

عنوان بهترین گزینه برای کاربری مجدد تحت فضای زیرزمینی استراتژیک انتخاب شده است. معدن کوهدشت کهن، بزرگترین معدن این منطقه با حجم فضای حفر شده‌ای برابر با ۶۲۰,۰۰۰ متر مکعب، متشکل از تونل‌هایی به ارتفاع متوسط ۲۰ متر و عرض متوسط ۱۴ متر است. از آنجا که این معدن برای اهداف استراتژیک در نظر گرفته شده است، در ادامه مقاله، به تحلیل پایداری دینامیکی سازه زیرزمینی موردنظر تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه‌ی *GBU-28* با استفاده از تلفیقی از روش‌های تجربی و عددی پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده، در صورتی که سازه در اعماق کمتر از ۶۰ متری واقع باشد، تنش فشاری و جابجایی در سقف سازه افزایش شدید یافته و در نهایت سازه دچار خسارات جدی می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی فضا در عمق ۱۰۰ متری، بیانگر تغییرات ناچیزی در سقف سازه می‌باشد. همچنین بر اساس معیار سرعت ذرات، معدن کوهدشت کهن که در عمق بیش از ۱۰۰ متر واقع شده است، متوجه خطر جدی‌ای از سوی بارگذاری‌های ناشی از انفجار نمی‌باشد و در نتیجه این معدن قابلیت تبدیل به فضای زیرزمینی استراتژیک را دارا است.

۹۰ متری از نقطه انفجار، سرعت ذرات ۳۰ سانتی متر بر ثانیه است که برای یک سازه زیرزمینی خطر مهمی به حساب نمی‌آید. بنابراین در فواصل بیشتر از ۹۰ متر نیز، بر اساس معیار سرعت ذرات، خطری سازه را تهدید نمی‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

امروزه فضاهای زیرزمینی نقش بسیار مهمی را به عنوان سازه‌های پدافندی از قبیل پناهگاه، انبارهای مهمات و تسلیحات نظامی و همچنین مخازن ذخیره‌سازی سوخت ایفا می‌کنند. در صورت کاربرد معادن زیرزمینی به عنوان فضای زیرزمینی استراتژیک، هزینه‌ی حفر که یکی از هزینه‌های اصلی احداث فضا است، حذف می‌شود. بر این اساس، در این مقاله با تمرکز بر معادن نمک منطقه سردره گرمسار، به بررسی امکان بهره‌برداری از این معادن به عنوان سازه‌های پدافند غیرعامل پرداخته شده است. با در نظر گرفتن معیارهای فنی و مهندسی انتخاب معدن شامل پایداری فضا، وجود ضخامت ایمن در اطراف، وجود یا عدم وجود گودال‌های شوراب در سطح زمین، جریان آب زیرزمینی و حجم فضای احداث شده (ظرفیت مورد نیاز)، معدن کوهدشت کهن به

۶- منابع‌ها

- Bangash, M.Y.H. (2009). *Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design*. Springer Science, 724-734.
- Eftekhari, M., Ramezanzadeh, A., Jalali, S.E., & Noroozi, M. (2011). Prefeasibility Study of Using Underground Abandon Mines as Passive Defense Structures. In Proc. of the First Asian and 9th Iranian Tunneling Symposium, (In Persian).
- Ghafarzadeh, R. (2003). Utilizing of Large Underground Spaces. In Proc. of the 6th Tunneling Symposium, 309-411 (In Persian).
- Hoseini Ranjbar, H., & Esmaeili, M. (2010). Investigation of Structural Stability of Tunnel Casing Located in Jointed Rock Mass Against the Effects of Rockets Explosions-case study: 500 + 345 km Ardabil-Miyane Railway Tunnel. In Proc. of the 5th National Congress on Civil Engineering, (In Persian).
- Hosseini, S.M.A. (2012). Study of Mechanical Behavior of Salt Caverns under Cyclic Loading. Ph.D. Thesis, Shahrood University, Shahrood, (In Persian).
- ITASCA Consulting Group Inc.; FLAC: User's Manual, Version 5.0., 2005.
- Jalali, S.E., & Eftekhari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines.

- In Proc. of the 8th SGEM International Conference Proceeding, Vol. 1, 27-34.
- Jimeno, C.L., Jimeno, E.L. (1995). Drilling and Blasting of Rocks. A.A. Balkema Rotterdam, 335-365.
- John, C.M.S., Zahrah, T.F. (1987). A Seismic Design of Underground Structures. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 2, 165-197.
- Karimi Nasab, S., Jalalifar, H., Ranjbar, H. (2009). Principles of Hydrocarbon Storage and the Necessity of Constructing Underground Oil Storage Facilities in Iran. In Proc. of the 3rd IRSME 2009, Yazd, (In Persian).
- Kheirandish, M.R., & Alizadeh Sevari, B. (2016). The Study of Explosion Impact on Underground Tunnels, Case Study: North of Tehran. Scientific Journal of Advanced Defence Science and Technology, 7 (3), 201-208 (In Persian).
- Kuzmenkove, A.A., Vorobev, V.D., Denisyuk, I.I., & Daueas, A.A. (1993). Seismic Effects of Blasting in Rock. Balkema Publishers, Rotterdam, 1-68.
- Lu, M. (2010). Rock Engineering Problems Related to Underground Hydrocarbon Storage. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2 (4), 289-297.
- Manthei, G. (2005). Characterization of Acoustic Emission Sources in a Rock Salt Specimen under Triaxial Compression. B. Seismol. Soc. Am., 95, 1674-1700.
- Mirzeinali Yazdi, S. H., Baziar, M. H., Rabeti Moghaddam, M., & Hashemi, H. R. (2010). Determination of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FLAC Software. In Proc. of the 1st Conf. on Passive Defence and Resistance Structures, Babol Noshirvani University of Technology, (In Persian).
- Morris, J.P., Rubin M.B., Blair S.C., Glenn L.A., & Heuze F.E. (2004), Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method. Engineering Computations, 21, 384-408.
- Nazeriani, H. (2007). Salt Mines of Garmsar Region. MSc. Thesis, Islamic Azad University, Tehran, (In Persian).
- Noroozi, M., & Mirzeinali Yazdi, S.H. (2013). Dynamical Analysis of Underground Spases Under High Explosive Load (A Case Study: Kouh-Dasht-Kohan Salt Mine of Garmsar). In Proc. of the 6th Tunneling Symposium, (In Persian).
- Park, D., Jeon, B., Jeon, S. (2009). A Numerical Study on the Screening of Blast-Induced Waves for Reducing Ground Vibration. Rock Mech. Rock Eng., 42, 449-473.
- Peila, D., Pelizza, S. (1995). Civil Reuse of Underground Mine Openings: A Summary of International Experience. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 10, 179-191.
- Retrieved from <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/gbu-28>, (2017).
- Rezaee, O. (2017) Dynamic Study of Buried Structures in Surface Blast with a Passive Defense Approach, NAJA Engineering Studies Journal, 9 (32), 64-98 (In Persian).

- Rosengren, L., Olofsson, S.O., Svedbjork, G. (1999). Modeling of Ground-Shock Wave Propagation in Soil Using FLAC. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, A.A Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 401-405.
- Starfield, A.M., Pugliese, J.M. (1968). Compressional Waves Generate in Rock by Cylindrical Explosive Charge: A Comparison between a Computer Model and Field Measurements. *Int. J. Rock Mech. Min.*
- Wei, X.Y., Zhao, Z.Y., & Gu, J. (2009). Numerical Simulations of Rock Mass Damage Induced by Underground Explosion. *Int. J. Rock Mech. Min.*, 46, 1206-1213.