



## The Analysis of Effective Parameters on Tunnels Stability against Shock Wave Loads

Vahid Amirkiyaei<sup>1\*</sup>, Sohrab Davodi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master of Science in Rock Mechanics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> PhD of tectonic, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2020 September 19

Accepted: 2021 July 10

\* Correspondence Email Address:

vahidamirkiyaei@gmail.com

#### Keywords:

Numerical modeling,  
Underground space,  
Taguchi design method,  
Particle Velocity,  
FLAC3D software

### ABSTRACT

The Enemy's threats against Islamic country have obliged the military force to regard the importance of underground spaces as safe structures against air strike. These structures are capable of protecting military equipment such as ammunition store and non- military targets like urban tunnel from missile attack. The design of military and non-military infrastructure should have a proper application against natural disaster at peace and war time. There is no written standard in terms of the effect of the projectile blast on structures. So, Numerical modeling is the economical method to be applied as the useful tool in engineering design and analysis. In this study, the effect of main parameters on stability of underground spaces subjected to explosion wave has been considered and suggested the safe design for these structures. In this regard, the influence of the presence and absence of water condition, geometry and dimensions of underground spaces, the tunnel depth, the geomechanical properties of rock mass, stress ratio, the size of crater and the horizontal distance of projectile collision versus amount of particle peak velocity on underground spaces have been taken to account, using FLAC3D software. Then, tagochi design method has been used to assess all mentioned parameters. The results show that, in variance analysis, rock mass classifying and stress ratio have the maximum and minimum effect on underground stability respectively. With regard to input parameters, water was accounted as damper and among the geometries; circle- shaped tunnel is the best shape. The tunnel cross section should be small and optimized. The stability of underground spaces is improved with increasing depth, owing to the better quality of rock mass. The higher crater distance from tunnel and the bigger crater are caused less influence on stability.



## تحلیل پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل‌ها در برابر نیروهای ناشی از انفجار

وحید امیرکیایی<sup>۱\*</sup>، سهراب داودی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲- دانشجوی دکتری تکتونیک، دانشگاه علوم و تحقیقات

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹)

### چکیده

با توجه به تهدیدات روزافزون دشمنان علیه میهن اسلامی، اهمیت سازه‌های زیرزمینی مدفون به عنوان سازه‌هایی امن در برابر حملات هوایی و موشکی از دیدگاه پدافند غیرعامل را مشخص می‌نماید طراحی زیرساخت‌های نظامی و غیرنظامی، علاوه بر عملکرد پدافندی در زمان جنگ، در زمان صلح نیز باید کاربری مناسب در برابر بلاهای طبیعی داشته باشد. مدل‌سازی عددی، روشی اقتصادی و یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی مهندسی می‌باشد. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مؤثر بر پایداری سازه‌های زیرزمینی در اثر موج ناشی از انفجار به صورت هماهنگ و همه جانبه و در نهایت طراحی سازه‌های امن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به بررسی تأثیر وجود و عدم حضور آب، هندسه و ابعاد فضای زیرزمینی، عمق قرارگیری، خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ، نسبت تنش‌های افقی به قائم، اندازه گودال انفجاری و فاصله افقی برخورد پرتابه نسبت بر میزان سرعت ذره‌ای حداکثر با استفاده از نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر همه جانبه عوامل ذکر شده، از روش طراحی تاگوجی استفاده شده است. در آنالیز واریانس نتایج، رده‌بندی مهندسی توده سنگ رتبه اول و نسبت تنش افقی کمترین تأثیر را بر میزان پایداری دارا می‌باشد. در رابطه با سطوح مختلف انتخابی برای پارامترهای مؤثر در طراحی آزمایش، آب به عنوان یک میراگر عمل نموده، در بین هندسه‌های انتخابی، دایره دارای بهترین عملکرد می‌باشد. ابعاد سطح مقطع، حتی المقدور باید کوچک و بهینه باشد. با افزایش عمق و کیفیت توده سنگ، مقدار پایداری تونل در مقابل انفجار افزایش می‌یابد. هر چه فاصله گودال انفجاری از تونل بیشتر و اندازه گودال بزرگ‌تر باشد، تأثیر آن بر پایداری تونل کمتر است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، سازه‌های زیرزمینی، طراحی آزمایش تاگوجی، نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$ ، سرعت ذره‌ای

### ۱- مقدمه

مرتبط به روش‌های طراحی و ایمن‌سازی سازه‌های مدفون، در زمره روش‌های نظامی و سری کشورهای مختلف می‌باشد. مطالعات مربوط به انتشار امواج ناشی از انفجار و پاسخ سازه‌های زیرزمینی را می‌توان به سه روش تجربی، آزمایشگاهی و عددی تقسیم‌بندی نمود. در مورد روش‌های تجربی و آزمایشگاهی، با توجه به بزرگ مقیاس بودن، هزینه‌بر بودن، نیاز به تجهیزات و امکانات خاص، مطالعات کمتری انجام شده است. در این بین مدل‌سازی عددی، روشی به نسبت اقتصادی بوده که به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی مهندسی بدل شده است [۲ و ۳].

از طرف دیگر شبیه‌سازی کامل فرایند انفجار و نحوه گسترش امواج، مستلزم داشتن مدل‌های پیچیده و منطبق بر واقعیت بوده تا با بارگذاری صحیح، پاسخ درستی از مواد به دست آید. فرایند شبیه‌سازی انفجار پرتابه‌ها و تأثیر آن بر سازه‌های زیرزمینی را می‌توان بدین صورت در نظر گرفت؛ انفجار ماده‌ی منفجره، بارگذاری دینامیکی و انتشار امواج ناشی از انفجار و نوع رفتار

با توجه به تهدیدات روزافزون دشمنان علیه میهن اسلامی، و همچنین تجربیات به دست آمده از هشت سال دفاع مقدس، اهمیت سازه‌های زیرزمینی مدفون به عنوان سازه‌هایی امن در برابر حملات هوایی و موشکی از دیدگاه پدافند غیرعامل را مشخص می‌نماید. این سازه‌ها توانایی حفظ تجهیزات و تأسیسات نظامی (سایت‌های حساس مانند زاغه مهمات) و غیرنظامی (تونل‌های شهری و پناهگاه‌ها) از حملات موشکی دشمن را داراست. طراحی زیرساخت‌های نظامی و غیرنظامی، علاوه بر عملکرد پدافندی در زمان جنگ، در زمان صلح نیز باید کاربری مناسب در برابر بلاهای طبیعی را داشته باشد [۱]. در مورد بررسی تأثیر انفجار پرتابه‌ها بر سازه‌ها استاندارد مشخص، مدون و شناخته شده قابل اتکایی وجود ندارد. دلیل فقدان این استاندارد به علت طبقه‌بندی تحقیقات

باید میزان پایداری آن به دلیل سرباره و میرایی موج افزایش می‌یابد [۱۰-۱۳].

میزان بیشینه نفوذ پرتابه و قدرت پرتابه از جمله مواردی است که از دست طراح خارج بوده و وابسته به قدرت تسلیحاتی دشمن و نوع فتاوری پرتابه‌ها مربوط می‌باشد. همچنین فاصله و زاویه مکان انفجار بنا به نوع دقت پرتابه متفاوت بوده و مکان‌یابی دشمن از سازه‌های زیرزمینی مربوط می‌باشد. مطالعات نشان دهنده آن است که هر چه قدرت پرتابه بیشتر و فاصله آن با تونل کمتر باشد، میزان قدرت انتشار امواج و آسیب پذیری سازه‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد [۱۱، ۱۴-۱۶]. مساحت و شعاع گودال انفجاری نیز بر میزان تخریب سازه‌های زیرزمینی اثر گذار بوده به نحوی که با افزایش شعاع میزان تخریب نیز افزایش می‌یابد [۳-۴ و ۱۷].

بررسی مطالعات انجام شده نشان دهنده پراکندگی تحقیقات و بعضاً عدم دسترسی به تمامی آن‌ها به صورت یکپارچه می‌باشد. با توجه به مطالب عنوان شده، بررسی تأثیر پارامترهای مذکور به صورت هماهنگ و همه جانبه برای بررسی گسترش موج ناشی از انفجار و در آخر طراحی سازه‌های امن زیرزمینی ضرورت تحقیق حاضر را نمایان می‌سازد. در این مطالعه با استفاده از روش طراحی تاگوچی به بررسی تأثیر عوامل وجود و عدم حضور آب، هندسه و ابعاد فضای زیرزمینی، عمق قرارگیری، خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ، نسبت تنش‌های افقی به قائم، اندازه گودال انفجاری و فاصله افقی برخورد پرتابه نسبت به تونل، پرداخته شده است. با استفاده از ترکیب این عوامل در شرایط مختلف و بررسی پایداری تونل، می‌توان اهمیت هر یک از پارامترها را بر اساس اولویت آن‌ها طبقه‌بندی کرده و در طراحی سازه‌های امن تر گام برداشت. در این پژوهش از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> به ساخت مدل‌های عددی بر اساس طرح ارائه شده توسط طراحی آزمایش تاگوچی پرداخته شده تا با انجام مدل‌سازی سه‌بعدی، نتایج نزدیک‌تر به واقعیت‌تری حاصل شود. مطالعه انجام شده صرفاً یک تحلیل پارامتریک، جهت شناسایی عوامل مؤثر بر میزان پایداری فضاهای زیرزمینی در برابر بارهای ناشی از انفجار بوده و مربوط به محل خاصی نمی‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی، یک طرح آزمایش با ۳۲ مدل با شرایط متفاوت در نرم‌افزار مینی‌تب طراحی و مدل‌ها در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> ساخته شده و کلیه مراحل تحلیل استاتیکی و دینامیکی روی این مدل‌ها انجام شده است. دلیل انتخاب طراحی آزمایش برای مدل‌سازی عددی پدیده انفجار، بررسی عوامل اثرگذار بر میزان گسترش موج و پایداری فضای زیرزمینی می‌باشد. طراحی آزمایش با ترکیب تمامی عوامل و بررسی نتایج حاصل از هر

سازه‌ی زیرزمینی نسبت به بار عملی. مطالعات انجام شده در بحث پایداری فضاهای زیرزمینی در هنگام انفجار را می‌توان به دو مورد اساسی تقسیم نمود، مورد اول شرایط زمین و نحوه طراحی فضاهای زیرزمینی و مورد دوم قدرت و مکان انفجار نسبت به سازه مذکور می‌باشد [۴].

شرایط زمین شامل مواردی چون حضور آب‌های زیرزمینی، خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و نسبت تنش‌های افقی به قائم است، که نحوه انتشار و گسترش موج ناشی از انفجار تحت تأثیر این عوامل محیطی خواهد بود.

در زمینه حضور آب‌های زیرزمینی ونگ با ارائه یک مدل فازی جدید برای خاک، نشان داد که هوا باعث کاهش شدت گسترش موج انفجار و آب باعث افزایش آن می‌شود [۵]. اسماعیلی و فلاح زاده با بررسی پدیده اثر انفجار بر روی یک تونل زیرزمینی، حضور آب را به عنوان یک عامل تشدید کننده شناسایی کردند [۶].

خصوصیات ژئومکانیکی به عنوان اصلی‌ترین شرایط زمین، بیشترین مطالعات در زمینه انتشار امواج را به خود اختصاص داده است. افزایش مدول الاستیسیته، مقاومت نهایی، زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک و سنگ تأثیر چشمگیری بر میزان پایداری تونل در مقابل بارهای ناشی از انفجار دارند ولی از طرف دیگر میرایی امواج ناشی از انفجار کاهش یافته و امواج تا عمق بیشتری نفوذ می‌کنند [۲-۹]. در مورد تأثیر نسبت تنش‌های افقی به قائم بر میزان گسترش موج اطلاعات چندانی در دسترس نیست.

از سوی دیگر شرایط طراحی سازه‌های امن زیرزمینی با توجه به کاربرد آن‌ها و نیاز بخش‌های عمرانی و نظامی، محققین را بر آن داشته تا با بررسی مقاطع هندسی متفاوت و ابعاد گوناگون، و همچنین عمق بهینه فضا، میزان تأثیرگذاری موج انفجار بر میزان پایداری این فضاها را به حداقل برسانند. در زمینه‌ی بررسی تأثیر شکل هندسی و انتخاب مقطع می‌توان به تحقیق انتظاری زارچ و همکاران اشاره نمود، که با مدل‌سازی مقاطع مختلف نیم‌دایره‌ای و مستطیلی، مقطع نعل اسبی را دارای بهترین عملکرد در مقابل بارهای ناشی از انفجار معرفی کرده‌اند [۴].

عمق فضای زیرزمینی به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر میزان تأثیر بارهای ناشی از انفجار مورد علاقه‌ی طراحان سازه‌های امن بوده است. عمق سازه‌ی زیرزمینی به چندین عامل مختلف وابسته است، که از این بین مهم‌ترین آن‌ها شامل عمق پایداری تونل در شرایط استاتیکی و صرفه اقتصادی آن، میزان میرایی محیط انتشار موج، مقدار بیشینه نفوذ و قدرت پرتابه‌ها و موشک‌ها می‌باشد.

مدل‌سازی‌های انجام شده، بر روی تأثیر انفجار سطحی بر پایداری فضای زیرزمینی نشان می‌دهد که هرچه عمق سازه افزایش

جدول (۱) تجزیه و تحلیل واریانس برای یک طرح دو عاملی (عامل A با تعداد سطح m و عامل B با تعداد سطح n) و چگونگی محاسبه هر پارامتر را به عنوان نمونه ارائه کرده؛ که این روابط قابل تعمیم برای طرح‌هایی با عوامل بیشتر می‌باشد. منبع تغییرات شامل عوامل مؤثر در آزمایش و یا تأثیر همزمان دو پارامتر بر نتایج آزمایش می‌باشد. ستون درجه آزادی تعداد موارد مستقل مربوط به منبع تغییرپذیر می‌باشد. ستون مجموع مربعات برابر مجموع مربعات (SS) انحراف داده‌ها از میانگین کل آن‌هاست. از تقسیم ستون مجموع مربعات به مقادیر ستون درجه آزادی، ستون میانگین مربعات (MS) به دست می‌آید. مجموع مربعات خطا با SSE و میانگین مربعات خطا با MSE نشان داده شده است. از آنجا که تعداد کل مشاهدات برابر با مقدار ضرب تعداد سطوح دو عامل می‌باشد ( $N=m \times n$ )، درجه آزادی SST برابر با  $N-1$  واحد است و درجه آزادی SSE برابر با  $N-(m+n-2)$  واحد است. پس از تشکیل جدول آنالیز واریانس شبیه جدول (۱)، برای تعیین عوامل مؤثر، پژوهش از روش آماره F استفاده شده است، که شرط معناداری هر عامل بسته به بزرگ‌تر بودن آماره F محاسبه شده آن در مقایسه با آماره F استاندارد می‌باشد. آماره F عامل مورد نظر، از تقسیم میانگین مجموع مربعات آن عامل بر مقدار میانگین مربعات خطا به دست می‌آید (مانند معناداری کل مدل،  $F_{Total} = MST/MSE$ ).

در انتها برای مشخص شدن سطوح تأثیرگذار هر فاکتور در طراحی آزمایش از مفهوم میانگین میانگین‌ها (mean of means) استفاده می‌شود. میانگین میانگین‌ها عبارت است از میانگین جواب‌های به دست آمده برای یک سطح از فاکتوری مشخص که در آزمایش‌های مختلف تکرار شده است. با توجه به میانگین‌های به دست آمده از هر سطح از آن فاکتور، هرچه میانگین به دست آمده بالاتر باشد، تأثیرگذاری آن سطح نیز بیشتر می‌باشد و در نتیجه سطوح تأثیرگذار تمامی فاکتورها به دست می‌آید.

مدل‌سازی، بیان نزدیک به واقعیت‌تری از اهمیت هر یک از پارامترها ارائه کرده و با اولویت‌بندی آن‌ها، در طراحی سازه‌ای امن کمک مؤثری خواهد داشت. داده‌های ورودی این پژوهش، بر اساس استدلال‌های مهندسی در طراحی فضاهای زیرزمینی از هر یک از پارامترهای مذکور انتخاب شده است. اندازه و نوع هندسه مقاطع بر اساس کاربردی‌ترین آن‌ها انتخاب شده است. خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی RMR برآورد شده است. سایر پارامترها نیز بر اساس داده‌ها و روابط موجود انتخاب شده است.

## ۲-۱- طراحی آزمایش تاگوچی

طراحی آزمایش به سلسله آزمون‌هایی اطلاق می‌شود که عوامل مؤثر بر یک فرایند و میزان تأثیر آن‌ها را مشخص می‌کند [۱۸]. انواع طرح آزمایش را می‌توان به دو روش فاکتوریل کامل و فاکتوریل جزئی تقسیم کرد. در این مطالعه از روش تاگوچی که جز روش‌های فاکتوریل جزئی بوده، استفاده شده است. طراحی آزمایش به روش تاگوچی، روش طراحی آزمایشی ساده‌تر، کم هزینه‌تر و سریع‌تر به صورت آزمایش‌های ناقص جایگزین شده و تنها بخشی از یک مجموعه آزمایش انجام می‌شود. تاگوچی طراحی آزمایش‌های خود را بر اساس ماتریس‌های ارتوگونال پایه‌ریزی کرده است. از همین رو ماتریس ارتوگونال مناسب جهت انجام طراحی آزمایش برحسب تعداد پارامترهای مؤثر بر آزمایش و تعداد سطوح این پارامترها انتخاب می‌شود. در طراحی آزمایش‌ها از سه روش، خطای آزمایش محاسبه می‌شود. بر این اساس ماتریس ارتوگونال مناسب جهت انجام طراحی آزمایش برحسب تعداد پارامترهای مؤثر بر آزمایش و تعداد سطوح پارامترها انتخاب می‌شود. به منظور تحلیل این‌گونه طراحی از یک روش استاندارد آماری بانام تحلیل واریانس جهت محاسبه درجه اطمینان استفاده می‌شود. در این روش تحلیل اطلاعات به صورت مستقیم انجام نمی‌شود و تنها به تحلیل بررسی تعیین میزان تغییرها در میانگین گروه‌های مورد آزمایش، درجه اطمینان محاسبه می‌شود.

جدول (۱). نحوه تحلیل نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش

منبع تغییرات	درجه آزادی (DOF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مجموع مربعات (MS)	آماره F	F جدول
A	m-1	SSA	MSA(SSA/m-1)	MSA/MSE	Fstandard
B	n-1	SSB	MSB(SSB/n-1)	MSB/MSE	Fstandard
خطا	$N-(m+n-2)$	SSE	$MSE(SSE/N-(m+n-2))$	-	-
کل	N-1	SST	MST(SST/N-1)	MST/MSE	Fstandard

اصلی تنش‌های قائم، وزن روباره است، لذا مقادیر این تنش‌ها را می‌توان از رابطه‌ی (۷) پیش‌بینی نمود [۱۹].

$$\sigma_v = \rho_m \times h \quad (7)$$

که در آن  $\sigma_v$ : تنش بر جای قائم (MPa)،  $\rho_m$ : وزن مخصوص سنگ‌های روباره ( $MN/m^3$ )،  $h$ : ضخامت روباره (m) است. نسبت تنش افقی متوسط به تنش عمودی طبق رابطه‌ی (۸) با ضریب  $k$  تعریف می‌شود که در آن  $\sigma_h$  تنش افقی و  $\sigma_v$  تنش قائم است [۱۹].

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (8)$$

که در این رابطه برای محاسبه‌ی  $\sigma_v$  از رابطه‌ی (۷) استفاده شده است. در این پژوهش نسبت‌های تنش افقی برابر با ۰/۳، ۰/۷، ۱/۱ و ۱/۵ فرض شده است.

با توجه به اینکه تاکنون رابطه‌ی قابل اتکایی برای تخمین گودال یا حفره‌ای که در اثر نفوذ پرتابه در سنگ ارائه نشده است. در این تحقیق برای بررسی تأثیر اندازه گودال انفجاری، گودال انفجاری با استفاده از یک کره، با شعاع ۱، ۲، ۳ و ۴ متر در نظر گرفته شده است. گودال انفجاری در تمامی مدل‌ها در عمق ۱۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است. همچنین برای بررسی تأثیر فاصله افقی انفجار از مرکز تونل، گودال انفجاری در فواصل افقی صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر نسبت به مرکز تونل در نظر گرفته شده است.

برای انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای یاد شده و به دست آوردن میزان پایداری در مدل‌سازی عددی، یک مجموعه آزمایش بر اساس پارامترهای یاد شده با استفاده از نرم‌افزار Minitab و از روش تاگوچی طراحی شده است، تا اولویت پارامترها و ترتیب اثرگذاری بر میزان پایداری مشخص گردد. طراحی آزمایش به روش تاگوچی هفت پارامتر هندسه و ابعاد تونل، عمق قرارگیری، طبقه‌بندی متفاوت ژئومکانیکی توده‌سنگ، نسبت تنش افقی به قائم، شعاع گودال انفجاری و فاصله محوری مرکز انفجار از مرکز تونل دارای چهار سطح و شرط خشک و اشباع بودن محیط در دو سطح خلاصه گردید. روش تاگوچی با کمک آرایه‌های متعامد مجموع تمام حالت‌های ممکن یعنی ۳۲۷۶۸ آزمایش در حالت فاکتوریل کامل ( $2^1 \times 4^7 = 32768$ ) را به ۳۲ آزمایش ( $L_{32}$ ) کاهش می‌دهد.

در جدول (۳) عامل‌های در نظر گرفته شده و مقادیر آن‌ها در سطوح متفاوت ارائه شده است. انتخاب نوع متغیرها و تعداد سطوح مختلف آن‌ها بر اساس تحقیقات قبلی صورت گرفته و سعی شده تا از بین عوامل مختلف مهم‌ترین آن‌ها در نظر گرفته شود.

## ۲-۲- عوامل مؤثر در طراحی آزمایش

مسئله آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات اجرای حفاریات زیرزمینی بوده، که اگر سازه زیرزمینی در زیر سطح آب‌های زیرزمینی حفاری شود، به دو صورت زهکش و با نصب پرده آب‌بند و یا به صورت زهکشی نشده، که در این حالت تونل یا سازه تحت فشار هیدرواستاتیکی قرار خواهد گرفت. در حالت زهکشی نشده بار وارده به تونل بیشتر بوده و کاهش مقاومت هر چه بیشتر سنگ را در پی دارد. از این‌رو برای نشان دادن تفاوت هر چه بیشتر حالت خشک و اشباع مدل‌های در حالت بدون زهکشی ساخته شده‌اند. سطح آب زیرزمینی در این پژوهش، در ۱۵ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده است.

تأثیر شکل هندسی و ابعاد مقطع تونل یکی از پارامترهای مهم در بررسی پایداری تونل بوده، که در این پژوهش سعی شده با مقایسه چهار مقطع دایره‌ای، نعل اسبی، بیضوی و مستطیلی، با شعاع معادل یکسان در نظر گرفته شود، که مقاطع آن‌ها در شکل (۱) به همراه اندازه هر یک نمایش داده شده است.

در اغلب تحلیل‌هایی که به هر شکل، برای طراحی شیب‌ها، پی‌ها و فضا‌های زیرزمینی در سنگ انجام می‌گیرد، به ارزیابی معتبر و دقیق خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌های سنگی نیاز می‌باشد [۱۹]. مقدار طبقه‌بندی مهندسی سنگ، RMR توده‌سنگ با جمع امتیاز شش پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر، RQD شاخص کیفیت توده‌سنگ، فاصله‌داری درزه‌ها، شرایط درزه‌ها، شرایط آب زیرزمینی و جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها به دست می‌آید. پس از تعیین RMR، سنگ در یکی از رده‌های طبقه‌بندی خیلی خوب (۸۱-۱۰۰)، خوب (۶۱-۸۰)، متوسط (۶۰-۴۱)، بد (۴۰-۲۱) و خیلی بد (۲۰-۰) قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی رفتار محیط، مدل موهر-کلمب در نظر گرفته شده، تا اجازه گسیختگی پلاستیک به مدل داده شود. از این‌رو، با توجه به رده تعیین شده، مقادیر چگالی، مدول دگرشکل‌پذیری، مقاومت، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ با توجه به روابط ارائه شده بر اساس RMR به دست می‌آید [۱۹].

در این تحقیق از چهار رده خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با مقادیر RMR، ۷۰، ۵۰، ۳۰ و ۱۰ استفاده شده و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس روابط (۱) تا (۶) که در جدول (۲) ارائه شده، محاسبه شده است.

منشأ اصلی تنش‌های بر جای مؤثر بر توده‌های سنگی وضعیت و تاریخ زمین‌شناختی آن‌ها است. در بین این عوامل، عمق قرارگیری نسبت به سطح زمین، وضعیت توپوگرافی زمین و وضعیت ساختاری، نقش اصلی را بر عهده دارند. از آنجا که عامل

شعاع معادل	مقطع دایروی	مقطع نعل اسبی	مقطع بیضوی	مقطع مستطیلی
۳ متر				
۵ متر				
۷/۵ متر				
۱۰ متر				

شکل (۱). هندسه مقاطع و اندازه دهانه مربوط به آن‌ها

جدول (۲). روابط و مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی مهندسی RMR [۱۹].

RMR				معادله	واحد	پارامتر	رابطه
خوب (۷۰)	متوسط (۵۰)	ضعیف (۳۰)	خیلی ضعیف (۱۰)				
۲۶۸۰	۲۶۰۰	۲۵۲۰	۲۴۴۰	$\rho_m = 4 \times RMR + 2400$	Kg/m <sup>3</sup>	چگالی ( $\rho_m$ )	(۱)
-	۴/۳۸	۲/۶۲۸	۰/۸۷۶	$E_m = 0.0876 \times RMR, RMR \leq 50$	GPa	مدول دگرشکل پذیری ( $E_m$ )	(۲)
۳۳/۲۵۲	-	-	-	$E_m = 0.0876RMR + 1.056(RMR - 50) + 0.015(RMR - 50)^2, RMR > 50$			
۶۵/۵۹	۲۸/۲۸	۷/۸۹	۰/۵۱	$\sigma_{cm} = 0.0016RMR2.5$	MPa	مقاومت ( $\sigma_{cm}$ )	(۳)
۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۴۳	$\nu = 0.5 - \frac{0.2RMR}{RMR + 0.2(100 - RMR)}$	-	ضریب پواسون ( $\nu$ )	(۴)
۵۵	۴۵	۳۵	۲۵	$\phi_m = 20 + 0.5RMR$	degree	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi_m$ )	(۵)
۱۰/۳۴	۵/۸۵	۲/۰۵	۱/۶۱	$C_m = \frac{\sigma_{cm} (1 - \sin \phi_m)}{2 \cos \phi_m}$	MPa	چسبندگی ( $C_m$ )	(۶)

جدول (۳). عامل‌های در نظر گرفته شده در آزمایش‌ها و مقادیر آن‌ها در سطوح مختلف

ردیف	عامل	سطح			
		۴	۳	۲	۱
۱	وجود آب (A)			اشباع (۲)	خشک (۱)
۲	هندسه تونل (B)	مستطیل	بیضی	نعل اسبی	دایره
۳	ابعاد تونل برحسب شعاع معادل (متر) (C)	۱۰	۷/۵	۵	۳
۴	عمق قرارگیری تونل (متر) (D)	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰
۵	طبقه‌بندی توده‌سنگ برحسب RMR (E)	۷۵ (قوی)	۵۰ (متوسط)	۳۰ (ضعیف)	۱۰ (خیلی ضعیف)
۶	نسبت تنش افقی به قائم (F)	۱/۵	۱/۱	۰/۷	۰/۳
۷	شعاع گودال انفجاری (متر) (G)	۴	۳	۲	۱
۸	فاصله افقی از مرکز انفجار (متر) (H)	۳۰	۲۰	۱۰	۰

**جدول (۴).** عامل‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی تونل و نحوه ترکیب آن‌ها در سطوح مختلف در طراحی آزمایش تاگوچی

شماره طرح آزمایش برای مدل‌سازی	عوامل مؤثر در طراحی آزمایش						
	شرایط آب (A)	هندسه تونل (B)	ابعاد تونل (C)	عمق تونل (D)	طبقه‌بندی توده‌سنگ (E)	نسبت تنش افقی به قائم (F)	مکان برخورد پرتابه (G)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۱	۱	۴	۴	۴	۴	۴
۵	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۳
۶	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۴
۷	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۱
۸	۱	۲	۴	۴	۳	۳	۲
۹	۱	۳	۱	۲	۲	۳	۲
۱۰	۱	۳	۲	۱	۴	۴	۱
۱۱	۱	۳	۳	۴	۱	۲	۴
۱۲	۱	۳	۴	۳	۲	۱	۳
۱۳	۱	۴	۱	۲	۴	۳	۴
۱۴	۱	۴	۲	۱	۳	۴	۳
۱۵	۱	۴	۳	۴	۲	۱	۲
۱۶	۱	۴	۴	۳	۱	۲	۱
۱۷	۲	۱	۱	۴	۱	۴	۳
۱۸	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۴
۱۹	۲	۲	۱	۳	۲	۲	۱
۲۰	۲	۲	۲	۴	۱	۱	۳
۲۱	۲	۲	۳	۱	۴	۳	۴
۲۲	۲	۲	۴	۲	۳	۱	۲
۲۳	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۳
۲۴	۲	۲	۴	۱	۴	۲	۱
۲۵	۲	۳	۱	۳	۳	۱	۴
۲۶	۲	۳	۲	۴	۴	۲	۱
۲۷	۲	۳	۳	۱	۱	۳	۴
۲۸	۲	۳	۴	۲	۲	۴	۱
۲۹	۲	۴	۱	۳	۴	۲	۲
۳۰	۲	۴	۲	۴	۱	۳	۱
۳۱	۲	۴	۳	۱	۲	۴	۴
۳۲	۲	۴	۴	۲	۱	۳	۱

جدول (۴) نحوه انجام ۳۲ آزمایش طراحی شده را با توجه به عوامل و سطوح مختلف برای بررسی تأثیر عوامل مذکور بر میزان پایداری و گذر موج ناشی از انفجار را نشان می‌دهد.

برای نگهداری مقاطعی که نیاز به سیستم نگهداری داشته از شاتکریت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است، که مشخصات آن در جدول (۵) قابل مشاهده است.

**جدول (۵).** خواص شاتکریت به‌کار برده شده به‌عنوان سیستم نگهداری [۲۰].

مدول یانگ (Gpa)	نسبت پوآسون	مقاومت فشاری تک‌محوره (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
۳۰	۰/۲	۳۴	۲/۵	۲۳۰۰

مقدار میرایی رایلی در مدل‌سازی عددی، برای توده‌سنگ‌های با طبقه‌بندی مهندسی خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط و خوب، به‌ترتیب ۵، ۴، ۳ و ۱ در نظر گرفته شده است.

## ۲-۳- ارزیابی خسارت و محاسبه لرزش زمین

لرزش زمین ممکن است سبب بروز خسارت در ساختمان‌های سطحی یا زیرزمینی گردد. سرعت ذره‌ای شتاب، فرکانس ارتعاشات و جایجایی ذرات، پارامترهایی از امواج هستند که می‌توان هر یک را به‌عنوان معیاری برای ارزیابی خسارت و کنترل لرزش به‌کار برد. هرگاه فرکانس امواج انفجاری از ۴۰ هرتز بیشتر باشد، استفاده از سرعت ذره‌ای به‌عنوان معیار بررسی خسارت توصیه می‌شود [۲۱].

تحقیقات بسیار زیادی در کشورهای مختلف بر روی معیار سرعت ذره‌ای حداکثر برای ارزیابی خسارت و کنترل لرزش زمین انجام شده و استانداردهای متفاوتی ارائه شده است. تأثیر لرزش زمین بر روی توده‌های سنگی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. لرزش زمین از یک سو یکپارچگی توده سنگی و پارامترهای مقاومت فشاری آن تأثیر می‌گذارد و از سوی دیگر می‌تواند باعث لغزش، ریزش و انواع شکستگی‌ها گردد. کلدن (۱۹۷۱) معیار خود را به صورت جدول (۶) ارائه نمود [۲۲].

**جدول (۶).** تأثیر لرزش بر روی توده‌های سنگی [۲۲]

حداکثر سرعت ذره‌ای (cm/sec)	آسیب مورد انتظار
<۲۵	برای سنگ‌های اطراف خطری ندارد.
۲۵ تا ۶۰	احتمال لغزش در اثر شکست کششی
۶۰ تا ۲۵۰	لغزش کششی و گاهی ترک‌های شعاعی
>۲۵۰	شکست کامل توده‌سنگ

## ۴-۲- محاسبه بار دینامیکی

حداکثر فشار ناشی از انفجار توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی این روابط فشار حداکثر تابع عدد مقیاس شده  $Z$  مطابق رابطه (۹) تعریف می‌شود [۱]:

$$Z = \frac{r}{W\sqrt{3}} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $R$  فاصله از مرکز انفجار بر حسب متر و  $W$  وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم می‌باشد. با توجه به روابط تحلیلی موجود، از رابطه هنریچ (۱۹۷۹) (رابطه ۱۰) در محاسبه مقدار بار دینامیکی ناشی از انفجار استفاده شده است [۱].

$$P = \frac{1407.2}{Z} + \frac{554}{Z^2} - \frac{35.7}{Z^3} + \frac{0.625}{Z^4} \quad (10)$$

که با قرار دادن مقدار  $Z$  در رابطه فوق، حداکثر فشار ناشی از انفجار بر حسب  $KPa$  به دست می‌آید. در این تحقیق، وزن ماده‌ی منفجره برابر با ۲۵۰۰ کیلوگرم (برابر با خرج پرتابه GBU-57، ساخت کشور آمریکا) در نظر گرفته شده است.

جهت به دست آوردن زمان لازم برای رسیدن به فشار  $P$  رابطه (۱۱) پیشنهاد شده است [۳]:

$$t_r = 0.1 t_a = 0.1 \frac{R}{C} \quad (11)$$

که در آن  $t_a$  زمان لازم جهت رسیدن موج به نقطه‌ای در فاصله  $R$ ، میانگین سرعت لرزه‌ای و  $t_r$  زمان لازم جهت رسیدن فشار ایجاد شده در اثر انفجار به مقدار بیشینه خود می‌باشد. بعد از

رسیدن به فشار  $P$ ، موج انعکاسی به صورت یکنواخت کاهش پیدا می‌کند. رابطه (۱۲) کاهش نمایی فشار موج شوک را نشان می‌دهد. در اینجا مقدار سرعت لرزه‌ای به صورت میانگین، ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۳].

$$P_t = P e^{-\frac{t}{t_a}} \quad (12)$$

که در آن  $P_t$  فشار شوک بعد از گذشت زمان  $t$  می‌باشد. فشار شوک محاسبه شده، بر دیواره گودال‌های انفجاری با شعاع‌های متفاوت، با فرض ثابت بودن سرعت لرزه‌ای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه، اعمال می‌شود.

مقادیر حداکثر فشار ناشی از انفجار این مقدار ماده منفجره و  $t_a$ ، با توجه به گودال‌های انتخاب شده در طراحی آزمایش، در جدول (۷) درج شده است.

جدول (۷). مقادیر مربوط به محاسبه بار دینامیکی

مقادیر				پارامتر
۴	۳	۲	۱	شعاع گودال (متر)
۰/۲۹۵	۰/۲۲۲	۰/۱۴۸	۰/۰۷۴	فاصله مقیاس شده ( $Z$ )
۹/۸۰۵	۱۴/۶۰۸	۲۵/۱۴۵	۵۲/۹۹۷	فشار بیشینه (MPa)
۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	$t_a$ (ثانیه)

با توجه به مقادیر حاصل از جدول (۷)، روابط (۱۶-۱۳) معادله فشار شوک انفجاری وارد بر دیواره گودال انفجاری، به ترتیب مربوط به شعاع گودال ۱ تا ۴ متر، در جدول (۸) آورده شده است.

جدول (۸). روابط مربوط به شوک انفجاری وارد بر دیواره گودال‌های انفجاری

رابطه	(۱۳)	(۱۴)	(۱۵)	(۱۶)
معادله $P_t$	$52/997 e^{-1000t}$	$25/145 e^{-500t}$	$14/608 e^{-333t}$	$9/805 e^{-250t}$

FLAC<sup>3D</sup> را نام برد [۲۳]. در این تحقیق از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> مدل‌سازی تأثیر پارامترهای ذکر شده در بخش قبل، بر میزان حداکثر سرعت ذره‌ای و پایداری تونل استفاده شده است.

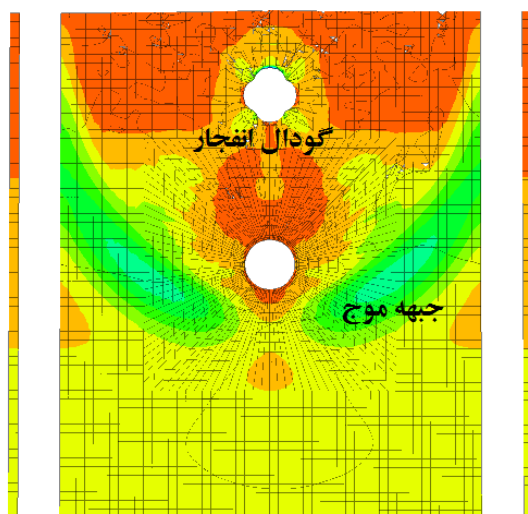
اولین قدم در تحلیل عددی، داشتن مدل اولیه مناسب با عوامل تأثیرگذار و نامطلوب حداقل است. در این راستا ابعاد مدل به نحوی انتخاب می‌شود که، مرزها کمترین تأثیر را بر نتایج داشته باشند. در این راستا با توجه به شعاع معادل مقاطع و روابط کرش، در این تحقیق ابعاد مدل حداقل ۵ برابر شعاع معادل تونل در نظر گرفته شده است. ابعاد مش‌بندی در راستای حل عددی دینامیکی مدل‌ها و انتقال بهتر امواج، باید اندازه مش از یک‌دهم طول موج مرتبط با بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی و یا فرکانس حاکم در ارتعاش آزاد، کوچک‌تر انتخاب شود، که در اینجا ابعاد مش یک متر در نظر گرفته شده است. بعد از ساخت مدل،

## ۵-۲- بررسی پایداری فضاهای زیرزمینی در برابر بار

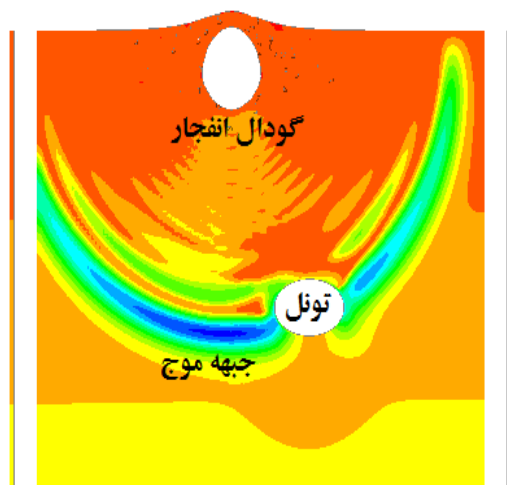
### ناشی از انفجار با استفاده از روش عددی تفاضل

#### محدود

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی استفاده شده برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که همچنان از کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی برخوردار است، روش عددی تفاضل محدود است. این روش شبیه به روش المان محدود، زیر سطوح را به صورت پیوسته مدل می‌کند، یعنی به صورت یکسری المان‌ها که در گره‌ها به هم متصل هستند. برتری روش تفاضل محدود این است که احتیاج به توان محاسباتی بالا جهت پردازش ندارد. از جمله مهم‌ترین نرم‌افزارهای تفاضل محدود که در حل مسائل ژئومکانیک کاربرد فراوانی دارند می‌توان FLAC<sup>2D</sup> و



مرز آزاد  
 شکل (۳). نحوه انتشار جبهه موج در مدل طرح شماره ۱



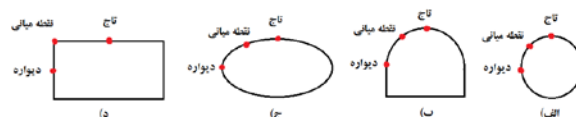
مرز آزاد  
 شکل (۴): نحوه انتشار جبهه موج در مدل طرح شماره ۱۱



مرز آزاد  
 شکل (۵). نحوه انتشار جبهه موج در مدل طرح شماره ۲۱

پارامترهای ورودی داده شده در بخش قبل بر اساس مدل رفتاری موهر-کولمب به مدل اعمال شده و پس از آن شرایط اولیه و اعمال مرزهای گیردار مناسب به مدل داده شده و بعد از آن مدل برای رسیدن به تعادل اولیه اجرا می‌گردد. بعد از حل استاتیکی، تمامی تغییر شکل‌ها در مدل‌ها صفر شده تا میزان تغییرات بعد از اعمال بار دینامیکی مشخص گردد. به منظور ایجاد شرایط واقعی در مدل‌ها و جلوگیری از عدم انعکاس موج به داخل مدل، از مرزهای آزاد برای مدل دینامیکی استفاده شده است.

برای محاسبه سرعت ذره‌ای در تونل، سه نقطه (شکل ۲) در هر یک از مقاطع انتخاب شده و تاریخچه سرعت آن‌ها برداشت شده است. در نقطه تاج سرعت در راستای قائم، در دیواره سرعت در راستای افقی و نقطه میانی در هر دو راستای قائم و افقی تاریخچه سرعت استخراج شده است.



شکل (۲). نقاط تاج، میانی و دیواره روی هر مقطع، (الف) دایروی، (ب) نعل اسبی، (ج) بیضوی، (د) مستطیلی

### ۳- نتایج مدل‌سازی عددی

در این بخش به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان حداکثر سرعت ذره‌ای و تأثیر آن بر میزان پایداری مقاطع بحث شده است. در این بخش ابتدا شکل انتشار جبهه موج، تأثیر موج بر مدل، نمودارهای مربوط به مؤلفه‌های جابجایی و سرعت ارائه شده است.

#### ۳-۱- بررسی جبهه موج حاصل از انفجار

شکل‌های (۳) تا (۷) به ترتیب نمایی از انتشار موج و گسترش آن‌ها را در طرح‌های ۱، ۱۱، ۲۱، ۲۵ و ۳۱ نمایش می‌دهند. این شکل‌ها از بررسی کنتورهای تنش در راستای قائم به دست آمده‌اند. همان‌طور که مشخص است در این مقاطع گسترش موج به صورت دایره‌ای بوده و به صورت یک پالس فشاری به مدل وارد شده است. لازم به ذکر است که جبهه موج با گذر زمان بازتر و بزرگ‌تر شده و زمانی که به مرزهای مدل رسیده به دلیل انتخاب مرز آزاد؛ از انعکاس موج به داخل مدل جلوگیری شده است. با دقت در شکل‌های (۵) و (۶)، مشاهده می‌شود که جبهه موج تا محدوده مشخصی از مدل پیشروی کرده و بعد از آن متوقف شده است، این امر به سبب تغییر محیط و شرایط مدل مربوط بنا به طرح پیشنهادی طراحی آزمایش بوده، که بیانگر تأثیرپذیری موج از محیط و شرایط آن می‌باشد.

### ۳-۲- بررسی تاریخیچه سرعت ذره‌ای و PPV

شکل‌های (۱۲- ۱۰) چند نمونه از تاریخیچه سرعت ذره‌ای از نقاط ذکر شده در سه مدل متفاوت را نمایش می‌دهند. اگر موج فشاری از محیط سخت به محیط نرم وارد شود سرعت ذره به صورت فشاری وارد محیط نرم می‌شود و اگر موج فشاری از محیط نرم وارد محیط سخت شود سرعت ذره به صورت کششی وارد محیط نرم می‌شود. پس در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>، فشار یا سرعت به صورت منفی به مدل اعمال شود، مقدار منفی نشان دهنده فشار و مثبت نشان‌دهنده کشش است.

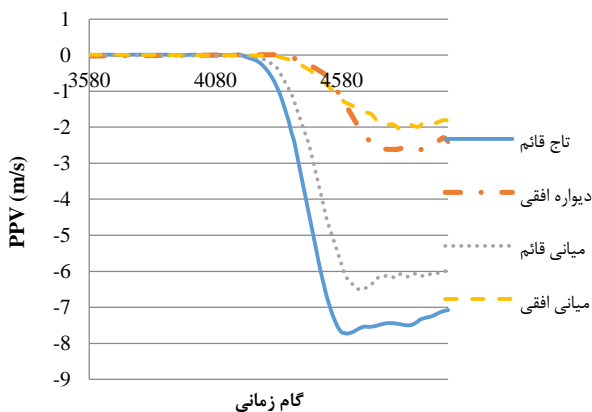
برای بررسی تأثیر تغییر پارامترها، میزان حداکثر سرعت ذره‌ای در نقطه تاج هر یک از مدل‌ها در شکل (۱۳) آورده شده است.

محاسبات آنالیز واریانس عوامل بر اساس سطح اطمینان ۹۰٪ و با استفاده از نرم‌افزار Minitab، در زیر آورده شده است. هر سطح در جدول آنالیز واریانس فرضیه عدم صفر میانگین هر سطح از عوامل را، در برابر نامساوی بودن آن‌ها بررسی می‌کند.

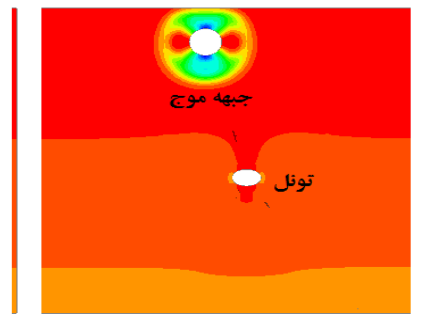
در ابتدا آماره F برای کل مدل محاسبه شده و با آماره به دست آمده از جدول F استاندارد مقایسه می‌شود و در ادامه معناداری مدل بررسی می‌شود. جدول (۹)، جدول آنالیز واریانس با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۰٪ را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر حاصل، مدل انتخاب

شده معنادار می‌باشد. با مقایسه مقادیر آماره F محاسبه شده و به دست آمده از جدول آماره F استاندارد نشان دهنده بارز بودن تمامی عوامل به جز تأثیر نسبت تنش افقی به قائم (با تفاوتی اندک از سطح اطمینان ۹۰٪) که مقدار آن ۰/۰۹ از ۲/۸۲ کمتر است، می‌باشند.

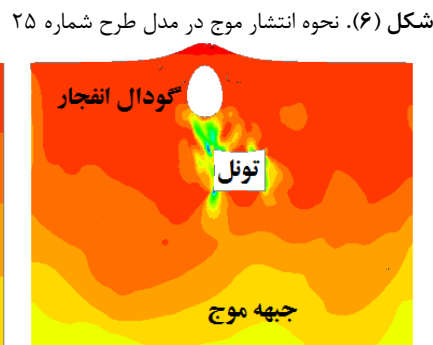
با توجه به شناسایی عوامل بارز در طراحی آزمایش، در ادامه با بررسی تأثیر هر یک از پارامترها بر میزان گسترش موج و سرعت ذره‌ای با استفاده از روش میانگین میانگین‌های پرداخته شده است.



شکل (۱۰). نمودار سرعت ذره‌ای در طرح شماره ۱



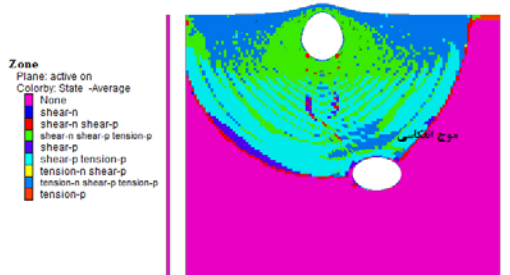
مرز آزاد (۵) مرز آزاد



مرز آزاد (۶) مرز آزاد

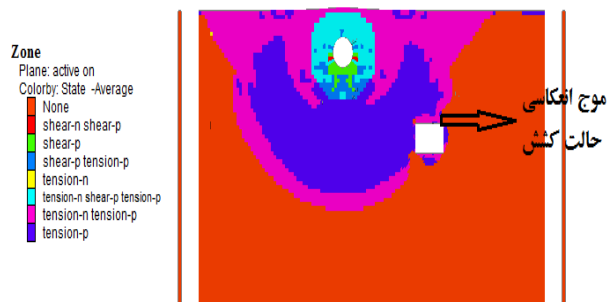
شکل (۶). نحوه انتشار موج در مدل طرح شماره ۲۵

در شکل‌های (۸ و ۹)، که حالت قرارگیری مدل‌ها در حالت پلاستیک را نشان می‌دهد. به وضوح مشخص است هنگامی که موج به فضای زیرزمینی رسیده، دچار انعکاس شده و قسمتی از تونل در حالت کشش قرار گرفته است.



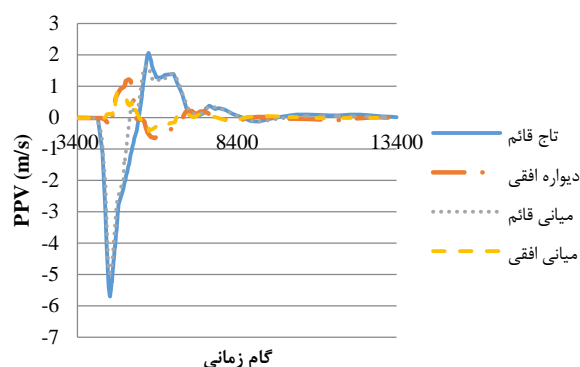
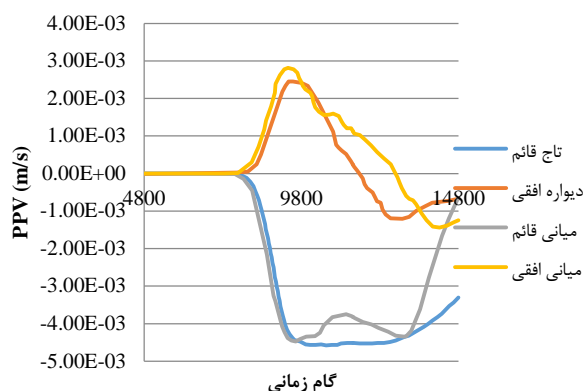
شکل (۷). نحوه انتشار موج در مدل طرح شماره ۳۱

شکل (۸). حالت پلاستیک و تنش‌های اعمالی در اثر انفجار در مدل شماره ۱۱



شکل (۸). حالت پلاستیک و تنش‌های اعمالی در اثر انفجار در مدل شماره ۱۱

شکل (۹). حالت پلاستیک و تنش‌های اعمالی در اثر انفجار در مدل طرح شماره ۱۴



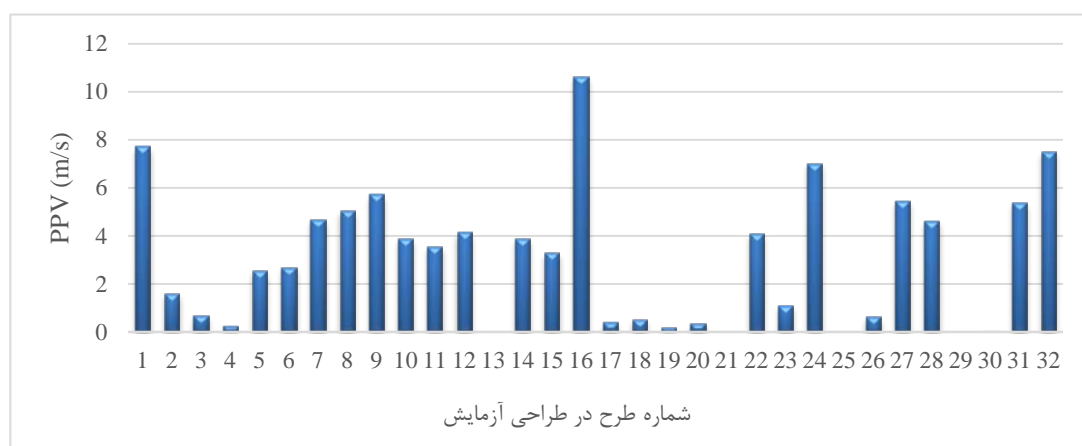
شکل (۱۱). نمودار سرعت ذره‌ای در طرح شماره ۹

شکل (۱۲). نمودار سرعت ذره‌ای در طرح شماره ۱۳

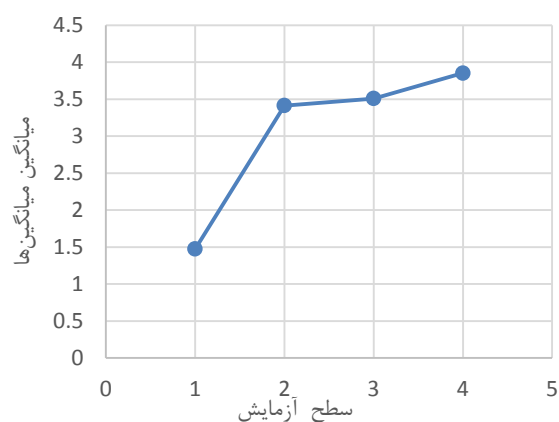
طراحی آزمایش در ۱۶ حالت خشک و ۱۶ حالت اشباع (سطح آب زیرزمینی در ۱۵ متری زمین) استفاده شده است. در شکل (۱۴) نمودار تأثیر حضور آب بر میزان تغییرات سرعت ذره‌ای در تاج تونل آورده شده است.

### ۳-۳- مطالعه تأثیر سطح آب زیرزمینی بر سرعت ذره‌ای و پایداری تونل در هنگام انفجار

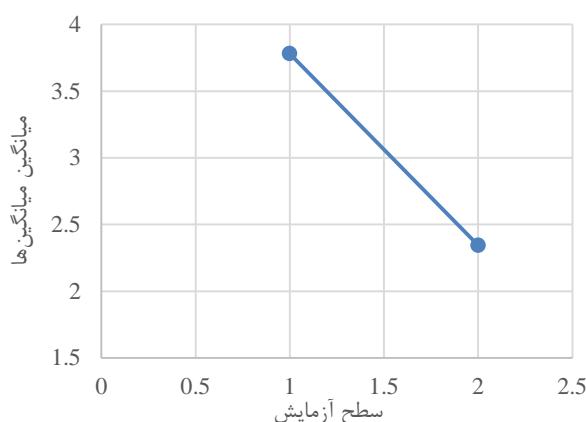
برای بررسی تأثیر تغییرات حضور آب بر روی رفتار تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در هنگام انفجار، با استفاده از نتایج ۳۲ مدل



شکل (۱۳). مقدار حداکثر سرعت ذره‌ای به دست آمده در مدل‌سازی در تاج تونل



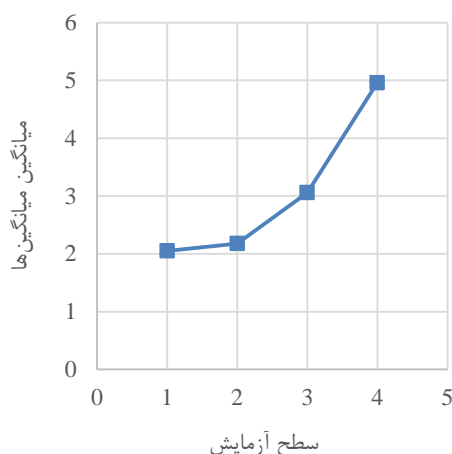
شکل (۱۵). تأثیر شکل هندسی بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: دایروی، سطح ۲: نعل اسبی، سطح ۳: بیضوی، سطح ۴: مستطیلی)



شکل (۱۴). تأثیر حضور آب بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: خشک، سطح ۲: اشباع)

می‌شوند. بررسی تأثیر ابعاد تونل بر میزان پایداری و سرعت ذرات با استفاده از آنالیز واریانس نشان می‌دهد که با افزایش سطح مقطع، میزان ناپایداری در آن افزایش می‌یابد (شکل ۱۶).

دلیل این امر، قرار گرفتن سطح وسیع‌تری از فضای زیرزمینی در مقابل موج ناشی از انفجار است. همچنین در حالت استاتیکی نیز، مقاطع بزرگ دارای پایداری‌های ضعیف‌تری نسبت به مقاطع کوچک‌تر می‌باشد و دلیل آن قرار گرفتن درزه و شکاف بیشتر در اطراف مدل، احتمال تشکیل بلوک‌های ناپایدار و تشکیل زون پلاستیک بزرگ‌تر را نام برد.



شکل (۱۶). تأثیر ابعاد تونل بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: شعاع معادل ۳ متر، سطح ۲: شعاع معادل ۵ متر، سطح ۳: شعاع معادل ۷/۵ متر، سطح ۴: شعاع معادل ۱۰ متر)

### ۳-۵- مطالعه تأثیر عمق تونل بر سرعت ذره‌ای و پایداری تونل در هنگام انفجار

با افزایش عمق قرارگیری تونل، میزان فشار استاتیکی وارد بر تونل افزایش می‌یابد. در حالت دینامیکی افزایش عمق باعث افزایش طول مسیر پیموده شده توسط موج می‌شود. بنابراین اثر میرایی بر روی امواج افزایش یافته و در نتیجه میزان تأثیر بار دینامیکی بر روی تونل کاهش می‌یابد. برای مطالعه تأثیر عمق قرارگیری تونل بر روی رفتار تونل در هنگام انفجار، تونل در عمق‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش عمق قرارگیری تونل میزان سرعت ذره‌ای قائم تاج تونل کاهش می‌یابد (شکل ۱۷). دلیل این امر افزایش عمق قرارگیری تونل و در نتیجه کاهش میزان تأثیر بار دینامیکی می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود با حضور آب زیرزمینی، میزان سرعت ذره‌ای بیشینه در مدل‌ها کاهش و میزان میرایی موج نسبت به حالت خشک افزایش می‌یابد، که این موضوع سبب پایداری بیشتر فضا می‌باشد.

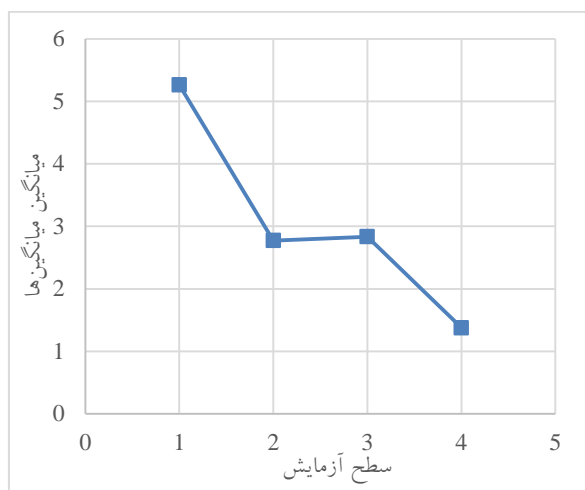
جدول (۹). جدول آنالیز واریانس برای داده‌های حداکثر سرعت ذره‌ای به دست آمده از مدل‌سازی عددی

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مجموع مربعات	آماره F	F جدول
شرایط آب زیرزمینی	۱	۱۶/۵۰۱	۱۶/۵۰۰۸	۲۰/۸۳	۳/۳۶
هندسه	۳	۲۷/۷۴۱	۹/۲۴۷۱	۱۱/۶۷	۲/۸۲
ابعاد	۳	۴۳/۲۶۴	۱۴/۴۲۱۳	۱۸/۲۰	۲/۸۲
عمق	۳	۳۳/۳۰۹	۱۱/۱۰۳۰	۱۴/۰۲	۲/۸۲
طبقه‌بندی توده‌سنگ	۳	۶۲/۶۴۵	۲۰/۸۸۱۵	۲۶/۳۶	۲/۸۲
نسبت تنش افقی به قائم	۳	۶/۴۲۹	۲/۱۴۲۹	۲/۷۱	۲/۸۲
مکان قرارگیری ماده منفجره	۳	۳۸/۵۷۳	۱۲/۸۵۷۷	۱۶/۲۳	۲/۸۲
اندازه گودال	۳	۱۱/۵۴۶	۳/۸۴۸۷	۴/۸۶	۲/۸۲
خطا	۹	(SSE) ۷/۱۳۰	(MSE) ۰/۷۹۲۲	-	-
کل	۳۱	۲۴۷/۱۳۷ (SS <sub>T</sub> )	۷/۹۷۲۲	۱۰/۰۶	۲/۲۵
		R-Sq=۹۷/۱٪	R-Sq(adj)=۹۰/۱٪		

### ۳-۴- مطالعه تأثیر هندسه و ابعاد تونل بر سرعت ذره‌ای و پایداری تونل در هنگام انفجار

برای بررسی تأثیر تغییرات هندسه و ابعاد تونل از ۴ مقطع دایروی، نعل اسبی، بیضی و مستطیلی با شعاع‌های معادل ۳، ۵، ۷/۵ و ۱۰ برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان می‌دهد که از لحاظ پایداری، به ترتیب مقطع دایروی، نعل اسبی، بیضی و مستطیل در برابر انفجار دارای اولویت می‌باشند (شکل ۱۵).

با توجه به در نظر گرفتن شرایط گوناگون در این تحقیق، مقطع دایره‌ای دارای عملکرد بهتری نسبت به مقاطعی مانند نعل اسبی که در مقاله انتظاری و همکاران [۴] عنوان شده، می‌باشد. از طرفی می‌توان به این نکته اشاره کرد که هر چه سطح انحنای مقطع حفاری بیشتر باشد مقدار پایداری آن در مقابل موج بیشتر بوده و احتمالاً سطوح تخت و با انحنای کم، باعث انعکاس بیشتر موج بوده و در نهایت مطابق تئوری انفجار، باعث تخریب بیشتر



شکل (۱۸). تأثیر کیفیت توده سنگ بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: رده‌بندی سنگ ضعیف، سطح ۲: رده‌بندی سنگ ضعیف، سطح ۳: رده‌بندی سنگ متوسط، سطح ۴: رده‌بندی سنگ خوب)

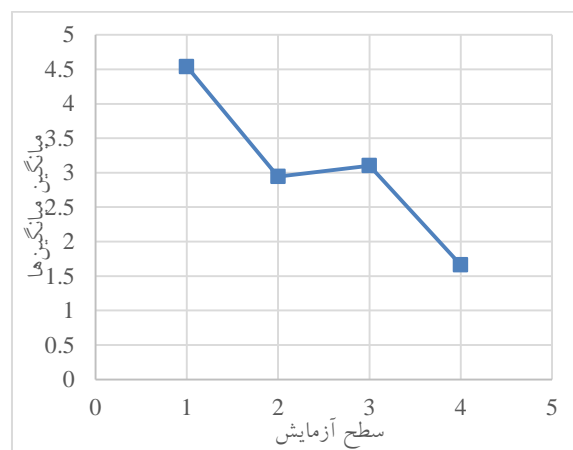
نتایج حاصل از این تحلیل‌ها و مقایسه با تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که کیفیت توده سنگ به عنوان پارامتری کلیدی در پایداری تونل در مقابل بارهای ناشی از انفجار ایفای نقش می‌نماید [۹-۲]. شکستگی نمودار به دلیل بیان شده در بخش قبل می‌باشد.

### ۳-۷- مطالعه تأثیر نسبت تنش افقی به قائم بر رفتار تونل و سرعت ذره‌ای در هنگام انفجار

برای بررسی تأثیر میزان نسبت تنش افقی به قائم در سرعت ذره‌ای و پایداری تونل، از ۴ مقدار  $0.3$ ،  $0.7$ ،  $1/1$  و  $1/5$  در مدل‌سازی استفاده شده است. شکل (۱۹) نشان می‌دهد که این پارامتر تقریباً روندی رو به افزایش بر میزان سرعت ذره‌ای دارد. دلیل این امر می‌تواند مربوط به همسو شدن تنش‌های روباره و جانبی و ایجاد شرایط تنش هیدرواستاتیک شود.

### ۳-۸- مطالعه تأثیر موقعیت ماده منفجره بر رفتار تونل و سرعت ذره‌ای در هنگام انفجار

برای بررسی میزان تأثیر موقعیت ماده منفجره بر رفتار تونل، همانند شکل (۲۰) موقعیت ماده منفجره در فواصل افقی صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متری نسبت به محور تونل در نظر گرفته شده است. موقعیت ماده منفجره تونل از دو جنبه دارای اهمیت می‌باشد: الف) زاویه برخورد امواج، ب) مسافت پیموده شده توسط موج و میرا شدن بخشی از انرژی موج. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زاویه قرارگیری مرکز انفجار و دور شدن آن از مرکز تاج تونل، تغییر سرعت امواج ذره‌ای، کاهش می‌یابد (شکل ۲۱).

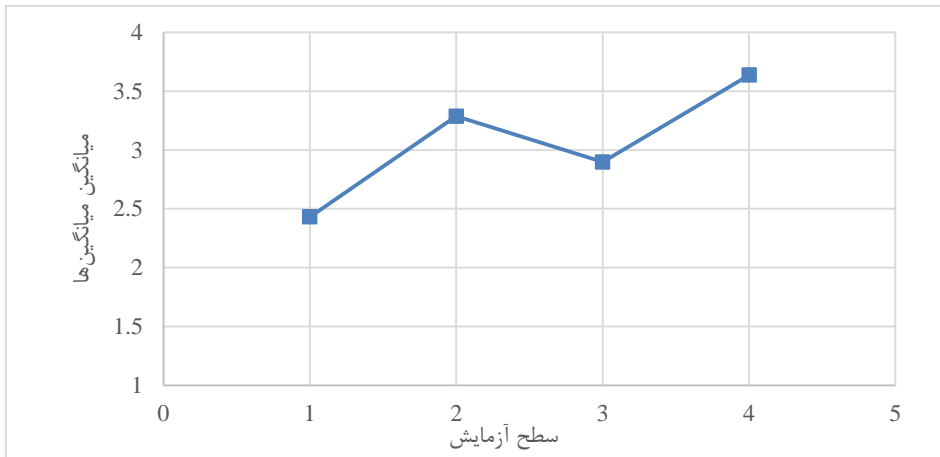


شکل (۱۷). تأثیر عمق بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: عمق ۲۰ متر، سطح ۲: عمق ۳۰ متر، سطح ۳: عمق ۴۰ متر، سطح ۴: عمق ۵۰ متر)

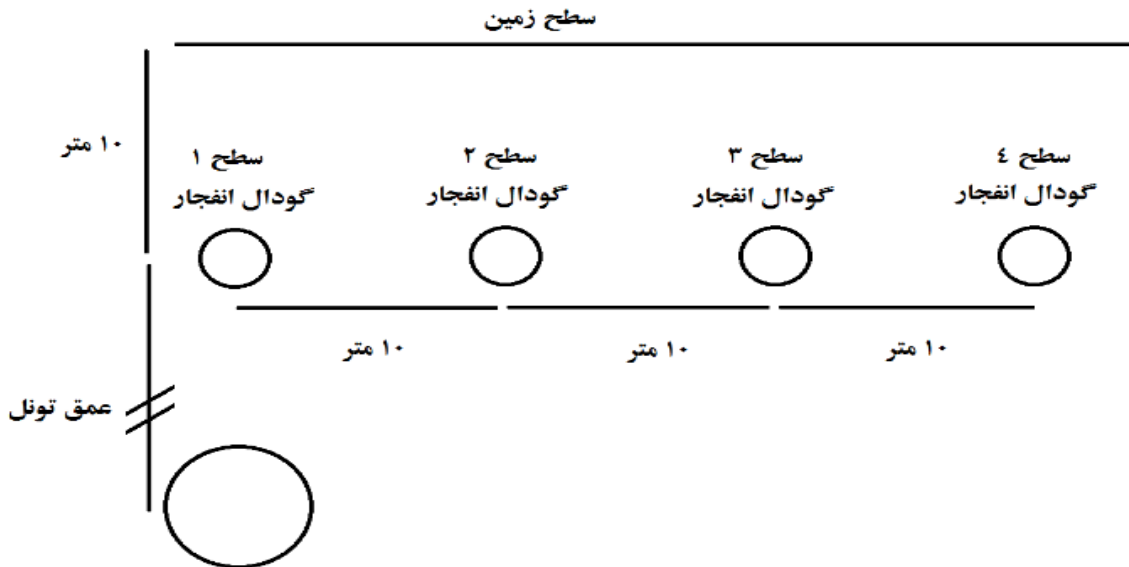
مقایسه نتیجه تأثیر پارامتر عمق بر میزان پایداری تونل با مطالعات قبلی که ادعان داشته‌اند [۱۰-۱۳] با افزایش عمق پایداری و میرایی موج افزایش یافته یکسان می‌باشد. لازم به ذکر است نمودارهای نمایش داده شده از آنالیز طراحی آزمایش، روند کلی تأثیر پارامترها را نمایش می‌دهند و شکستگی موجود در نمودار شکل (۱۷) به علت نزدیک بودن میانگین‌های به دست آمده در این دو سطح ۲ و ۳ بوده و تأثیر پارامتر عمق روندی کاهشی بر میزان حداکثر سرعت ذره‌ای دارد.

### ۳-۶- مطالعه تأثیر طبقه‌بندی توده سنگ بر رفتار تونل در هنگام انفجار

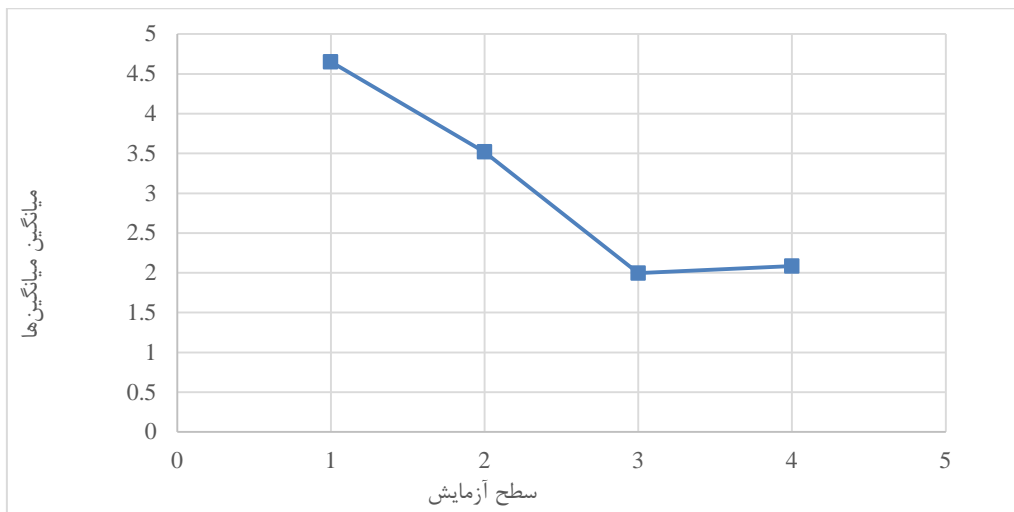
برای بررسی تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته توده سنگ و ضریب پواسون بر روی رفتار تونل‌ها و فضاها زیرزمینی در هنگام انفجار از طبقه‌بندی توده سنگ RMR استفاده شده است. با استفاده از ۴ گروه طبقه‌بندی شده خیلی ضعیف، متوسط و خوب میزان پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته توده سنگ و ضریب پواسون تخمین زده شده و در مدل‌سازی عددی بکار گرفته شده است. نتایج ۳۲ مدل با امتیاز RMRهای ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ بر اساس طرح آزمایش و آنالیز واریانس نشان دهنده آن است که با افزایش پارامترهای فوق و کیفیت توده سنگ میزان سرعت ذرات کاهش می‌یابد و در پی آن پایداری افزایش می‌یابد (شکل ۱۸).



شکل (۱۹). نمودار تأثیر نسبت تنش افقی به قائم بر میزان موج لرزه‌ای (سطح ۱: نسبت تنش ۰/۳، سطح ۲: نسبت تنش ۰/۷، سطح ۳: نسبت تنش ۱/۱، سطح ۴: نسبت تنش ۱/۵)



شکل (۲۰). موقعیت سطوح گودال انفجار نسبت به مرکز تونل



شکل (۲۱). تأثیر موقعیت قرارگیری ماده منفجره بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: بالای تونل (فاصله صفر)، سطح ۲: فاصله ۱۰ متری، سطح ۳: فاصله ۲۰ متری، سطح ۴: فاصله ۳۰ متری)

با مرتب‌سازی دلتاهای به دست آمده محاسبه می‌شود. هر چه میزان دلتای یک پارامتر بزرگ‌تر باشد، پارامتر مذکور نقش بیشتری بر جواب نهایی خواهد داشته و دارای رتبه بالاتری می‌باشد [۱۸]. در جدول (۱۰) مقادیر میانگین‌های پارامترها، دلتای محاسبه شده هر یک و رتبه‌بندی پارامترها درج شده است.

جدول (۱۰). جدول پاسخ برای ارزیابی پارامترهای مؤثر در گسترش موج و سرعت ذره‌ای

سطح	پارامتر							
	شرایط آب (A)	هندسه تونل (B)	ابعاد تونل (C)	عمق تونل (D)	طبقه‌بندی توده‌سنگ (E)	نسبت تنش افقی به قائم (F)	مکان برخورد پرتابه (G)	اندازه گودال (H)
۱	۳/۷۸۰	۱/۴۷۵	۲/۰۵۰	۴/۵۴۱	۵/۲۶۵	۲/۱۴۳۱	۴/۶۵۰	۳/۹۷۹
۲	۲/۳۴۴	۳/۴۱۳	۲/۱۷۹	۲/۹۴۴	۲/۷۷۳	۳/۲۸۶	۳/۵۱۹	۳/۲۰۷
۳	-	۳/۵۰۹	۳/۰۵۹	۳/۱۰۳	۲/۸۳۴	۲/۸۹۷	۱/۹۹۶	۲/۶۲۴
۴	-	۳/۸۵۳	۴/۹۶۱	۱/۶۶۱	۱/۳۷۷	۳/۶۳۵	۲/۰۸۴	۲/۴۳۹
دلتا	۱/۴۳۶	۲/۳۷۸	۲/۹۱۰	۲/۸۷۹	۳/۸۸۹	۱/۲۰۴	۲/۶۵۴	۱/۵۴۱
رتبه	۷	۵	۲	۳	۱	۸	۴	۶

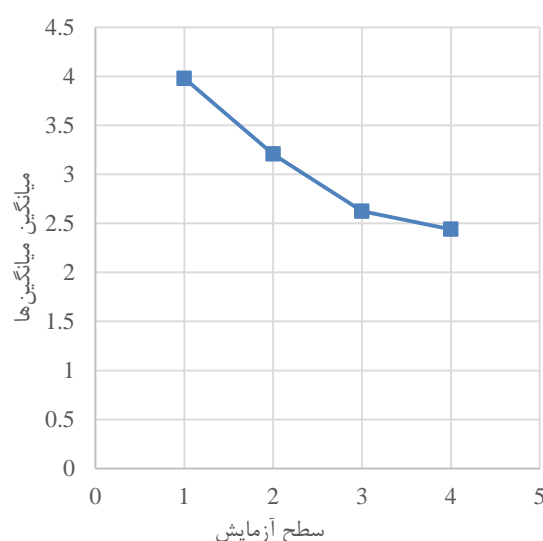
با توجه به نتایج به دست آمده، کیفیت توده‌سنگ نقش بسزایی در گسترش موج و سرعت ذره‌ای ایفا می‌کند. کمترین تأثیر نیز مربوط به نسبت تنش افقی به قائم می‌باشد، که رتبه ۸ را داراست. با توجه به مطالعات انجام شده در گذشته و تحقیق فعلی، می‌توان نتیجه گرفت که، برای داشتن فضایی ایمن زیرزمینی باید طراحی در توده‌سنگ با کیفیت خوب، با ابعاد بهینه، با عمق متوسط (۷۰ متری) و مقاطع دایروی حفر شده تا از امواج ناشی از انفجار مصون بماند. چنانچه آب زیرزمینی نیز وجود داشته باشد، می‌تواند به‌عنوان یک میراگر عمل کرده و از انتقال موج جلوگیری به‌عمل آورد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و روش طراحی آزمایش تاگوچی به بررسی تأثیر انفجار مدفون بر سازه‌های زیرزمینی پرداخته شده است. طراحی آزمایش با در نظر گرفتن شرایط مختلف پارامترهای ژئوتکنیکی (کیفیت توده‌سنگ، شرایط آب زیرزمینی و نسبت تنش) و طراحی سازه (هندسه، ابعاد و عمق تونل) با توجه به مکان انفجار و اندازه گودال انفجار بر روی پایداری فضاهای زیرزمینی با استفاده از معیار حداکثر سرعت ذرات، انجام شده است. با استفاده از آنالیز واریانس نتایج به‌دست

#### ۹-۳- مطالعه تأثیر شعاع گودال انفجار بر رفتار تونل و سرعت ذره‌ای در هنگام انفجار

برای بررسی تأثیر شعاع گودال انفجار بر رفتار تونل و سرعت ذرات، شعاع گودال انفجار ۱، ۲، ۳ و ۴ متر در نظر گرفته شد. برای هر یک از این مقادیر با ثابت در نظر گرفتن مقدار ماده‌ی منفجره (۲۵۰۰ کیلوگرم)، از روابط (۱۳) تا (۱۶) برای اعمال تاریخچه‌های فشار وارده به دیواره گودال استفاده شده است. تاریخچه‌های فشار محاسبه شده در جدول (۸) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، با افزایش شعاع گودال انفجار، مقدار سرعت ذرات کاهش می‌یابد.



شکل (۲۲). تأثیر میزان افزایش شعاع گودال بر میزان سرعت ذره‌ای (سطح ۱: شعاع ۱ متر، سطح ۲: شعاع ۲ متر، سطح ۳: شعاع ۳ متر، سطح ۴: شعاع ۴ متر)

#### ۱۰-۳- بررسی میزان تأثیر پارامترهای مورد مطالعه

در این تحقیق میزان تأثیر هشت پارامتر بر رفتار تونل‌های زیرزمینی تحت اثر انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. انتخاب این پارامترها بر اساس عدم قطعیت‌هایی است که در ویژگی‌های ژئوتکنیکی محل قرارگیری تونل‌ها و فضاهای امن زیرزمینی و همچنین در مشخصات انفجار وجود خواهد داشت. در این بخش از تحقیق با مطالعه میزان تأثیر این پارامترها مؤثرترین پارامترها تعیین می‌گردند.

برای بررسی توأم میزان تأثیر پارامترهای مورد مطالعه، در طراحی آزمایش تاگوچی، از دو مفهوم دلتا<sup>۲</sup> و رتبه<sup>۳</sup> برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترها استفاده می‌شود. مقدار دلتا برابر با اختلاف بیشینه و کمینه میانگین‌های محاسبه شده برای هر پارامتر می‌باشد. رتبه

<sup>۲</sup> Delta

<sup>۳</sup> Rank

که کنترل کننده پارامترهای مقاومتی سنگ نظیر زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته، ضربه پواسون می‌باشد، دامنه سرعت ذره‌ای روندی نزولی را طی می‌کند، یعنی هر چه کیفیت توده‌سنگ پایین‌تر باشد و سنگ ضعیف‌تر، میزان تخریب ناشی از انفجار افزایش می‌یابد. بنا به نتایج به دست آمده از این پارامتر، باید در مکان‌یابی فضاهای زیرزمینی دقت کرده و تونل در سنگ‌هایی با کیفیت خوب و متوسط حفر شود.

۶. نسبت تنش افقی به قائم در فرایند انتقال موج، نقشی افزایشنده دارد. به این ترتیب که، هر چه میزان این نسبت پایین‌تر باشد، مقدار سرعت ذره‌ای نیز کاهش می‌یابد. این امکان وجود دارد که، به دلیل نزدیک‌تر شدن تنش‌های روباره و جانبی، شرایط تنش هیدرواستاتیک ایجاد شود و انتقال موج بهتر صورت می‌پذیرد.

۷. در بحث برخورد پرتابه و زاویه قرارگیری مرکز انفجار با سازه زیرزمینی، با افزایش زاویه قرارگیری مرکز انفجار و دور شدن آن از مرکز تاج تونل، سرعت امواج ذره‌ای کاهش می‌یابد. علت این امر، افزایش فاصله پیمایش موج و در نتیجه میرایی بیشتر آن است.

۸. هر چه شعاع گودال انفجار بیشتر باشد، مقدار سرعت ذره‌ای کاهش می‌یابد. شاید این امر به علت کاهش بار دینامیکی ناشی از انفجار، به دلیل توزیع آن بر سطح بیشتر می‌باشد.

## ۵- مراجع

[۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن "پدافند غیرعامل، مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان؛ دفتر امور مقررات ملی ساختمان، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، نشر توسعه، ویرایش اول، ۱۳۹۱.

[2] Shahnazari, H.; Esmaili, M.; Hosseini Ranjbar, H. "Simulating the Effects of Projectile Explosion on a Jointed Rock Mass Using 2D DEM: A Case Study of Ardebil-Mianeh Railway Tunnel"; Int. J. Civ. Eng., 2010, 8, 125-133.

[3] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport- A Parametric Study"; Geotech. Geol. Eng., 2006, 24, 227-248.

[۴] انتظاری زارچ، حسین؛ دهقانی اشکذری، قاسم؛ برخورداری بافقی، کاظم "بررسی تأثیر شکل هندسی مقطع تونل در عملکرد لایه نگهدارنده تحت اثر بارگذاری انفجار خارجی"; مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال ۵، شماره ۱، صفحه ۶۱، ۱۳۹۳.

آمده از مدل‌سازی عددی بر مبنای طراحی آزمایش، می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج به دست آمده از این پژوهش ارائه نمود:

۱. حضور آب و یا احداث فضای زیرزمینی در افق‌های زیر سطح آب زیرزمینی به شرط آب‌بند نمودن آن‌ها، می‌تواند به عنوان یک عامل میراگر که باعث کاهش مقدار سرعت ذره‌ای می‌شود، خسارات ناشی از انفجار را کاهش دهد.

۲. مقاطع دایروی با توجه به تمامی عوامل در نظر گرفته شده در طراحی آزمایش، با کمترین میزان آسیب در برابر موج ناشی از انفجار روبرو هستند. اولویت پایداری مقاطع در مقابل بارهای دینامیکی ناشی از انفجار به ترتیب مربوط به مقاطع دایروی، نعل اسب، بیضوی و مستطیلی شکل می‌باشد. این امر می‌تواند مربوط به تأثیر سطوحی که در مقابل بارهای ناشی از انفجار قرار می‌گیرند، باشد. هر چه سطوح در مقابل بار ناشی از انفجار تخت‌تر و دارای انحنای کمتری باشد، میزان بازتابش موج بیشتر بوده، که با توجه به تئوری انعکاسی انفجار [۲۴]، موجب خرابی در سازه مذکور می‌شوند. بنابراین توصیه می‌شود که جهت ایمن‌سازی سازه‌های زیرزمینی، هندسه مقطع سازه با سطوحی که دارای انحنای بیشتر است، جهت حفاری انتخاب شود، که در این بین می‌توان سطح مقطع دایروی را به عنوان بهترین مقطع پیشنهاد نمود.

۳. افزایش ابعاد بر میزان حداکثر سرعت ذره‌ای روندی صعودی ایفا می‌کند. به نحوی که هر چه ابعاد مقطع افزایش یابد، میزان سرعت ذره‌ای افزایش یافته و تونل ناپایدارتر می‌شود. حتی‌المقدور هرچه فضای زیرزمینی دارای ابعاد کوچک‌تری باشد، در مقابل امواج ناشی از انفجار مصون‌تر است. در نتیجه باید در طراحی سازه‌های زیرزمینی بنا به کاربرد آن بهینه‌ترین ابعاد مقطع انتخاب شود، که در زمینه‌ی حفر و نگهداری نیز مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

۴. پارامتر عمق در سازه‌های زیرزمینی به عنوان پارامتری مؤثر بر میزان پایداری سازه ایفای نقش می‌نماید. در این زمینه، تأثیر عمق قرارگیری سازه در برابر بارهای ناشی از انفجار حائز اهمیت است. هر چه عمق سازه کمتر و به مکان انفجار نزدیک‌تر باشد، مقدار حداکثر سرعت لرزه‌ای افزایش یافته و در نتیجه پایداری تونل کاهش می‌یابد. دلیل این امر میرایی موج ناشی از انفجار در فاصله‌های زیاد می‌باشد.

۵. در بررسی پارامتر طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ در میزان ارتعاش ذرات اطراف فضای زیرزمینی در برابر بارهای ناشی از انفجار، این پارامتر به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر بر نتایج به دست آمده شناسایی شده است. با افزایش عدد امتیاز توده‌سنگ

- [14] Nagy, N. M.; Eltehawy, E. A.; Elhanafy, H. M.; Eldesouky, A. "Numerical Modeling of Geometrical Analysis for Underground Structures"; In 13<sup>th</sup>. international conference on Aerospace science & aviation technology, Egypt. 2009.
- [15] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; Geomech. Eng., 2010, 2, 1-18.
- [۱۶] خیراندیش، محمدرضا؛ علیزاده صوری، بهزاد "بررسی تأثیر موج انفجار بر روی تونل‌های زیرزمینی مطالعه موردی: محدوده شمال تهران"; مجله علمی-پژوهشی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال ۷، شماره ۳، صفحه ۲۰۱، ۱۳۹۵.
- [17] Mitelman, A.; Elmo, D. "Modelling of Blast-Induced Damage in Tunnels Using a Hybrid Finite-Discrete Numerical Approach"; J. Rock. Mech. Geotech. Eng., 2014, 6, 565-573.
- [18] Montgomery, D. C. "Design and Analysis of Experiments". John Wiley & Sons, 2008.
- [۱۹] شریف زاده، مصطفی؛ نورانی، رضا "خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها"; نشر صدا، ۱۳۹۰.
- [20] Alamut Bridge and Building Engineering Co. "Design and Calculation of Concrete Segments"; 2006.
- [21] Hustrulid, W.A.; Kuchta, M; Martin, R.K. "Open Pit Mine Planning and Design", Two Volume Set & CD-ROM Pack. CRC Press, 2013.
- [22] Jimeno, E. L.; Jimino, C. L.; Carcedo, A. "Drilling and Blasting of Rocks", CRC Press; 1995.
- [23] Itasca Consulting Group. INC. "FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 5.1., Minneapolis, MN, 2012.
- [۲۴] استوار، رحمت الله "آتشکاری در معادن"; انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۹.
- [۵] اسماعیلی، مرتضی؛ فلاح زاده، پوران "بررسی رفتار سازه‌ی زیرزمینی تحت اثر بارهای انفجاری (مطالعه موردی - خط ۷ متروی تهران)"; هشتمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران، انجمن تونل ایران، ۱۳۸۸.
- [6] Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H. "Numerical Investigation of Effects of Water Saturation on Blast Wave Propagation in Soil Mass"; J. Eng. Mech., 2004, 130, 551-561.
- [۷] میرزینلی، سیدحسین؛ بازیار، محمدحسن؛ هاشمی، حمیدرضا؛ رابطی مقدم، مسعود "بررسی تأثیر انفجار پرتابه های متعارف بر تونل‌های سطحی به کمک نرم افزار FLAC مطالعه موردی مترو کرج و حومه"; اولین کنفرانس پدافند غیرعامل و سازه‌های مقاوم، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۹.
- [۸] سبحانی، احسان "تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط پیوسته و ناپیوسته"; پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.
- [۹] انتظاری زارچ، حسین؛ برخوردار بافقی، کاظم؛ مهرنهاد، حمید؛ دهقانی اشکذری، قاسم "بررسی اثر انفجار سطحی بر روی تونل متروی مشهد"; اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۲.
- [10] Yang, Z. "Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings"; Finite Elem. Anal. Des., 1997, 24, 113-132.
- [11] Liu, H. "Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading"; Geotech. Geol. Eng., 2009, 27, 699-711.
- [12] Xia, X.; Li, J.; Li, H.; Liu, B.; Zhou, Q.; Zhao, J.; Liu, Y. "Study on Damage Characteristics of Rock Mass under Blasting Load in Lingao Nuclear Power Station, Guangdong Province"; Chin. J. Rock Mech. Eng., 2007, 12, 019.
- [۱۳] قزوینیان، عبدالهادی؛ رحمتی پور، شهیما "اثر بمب‌های هوایی روی سازه‌های زیرزمینی"; مجله علمی-پژوهشی مواد پراورزی، سال ۶، شماره ۲، صفحه ۳، ۱۳۹۰.