

## Comparative analysis of concrete cover of underground structures with Winkler spring frame methods and continuous environment method

Safa Peyman<sup>1✉</sup> , Alireza Basiri<sup>2</sup> 

1. Corresponding author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran.

E-mail: [speyman@ihu.ac.ir](mailto:speyman@ihu.ac.ir)

2. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Emam Hossein University, Tehran, Iran.

E-mail: [alirezab11121@gmail.com](mailto:alirezab11121@gmail.com)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

##### Received

2025-03-26

##### Received in revised form

2025-05-21

##### Accepted

2025-06-18

##### Available online

2025-06-30

#### Keywords:

Underground Structures,  
Tunnel,  
continuous environment  
method,  
PLAXIS,  
SAP2000

### ABSTRACT

The most appropriate method for analyzing the concrete cover of tunnels and underground structures is to use the continuous environment method. Appropriate software for this method simulates the concrete cover and its follower environment together. However, structural engineers often use the Winkler frame and spring method to analyze the concrete cover of tunnels. In this method, the concrete cover is modeled with Winkler springs using frame elements and the effect of the surrounding environment. Despite the use of the Winkler frame and spring method, the results are not completely clear compared to the continuous environment methods. Accordingly, in the present study, the results of the analysis of concrete cover of tunnels under the effect of static loads and dynamic loads caused by explosion are compared with these two methods. PLAXIS software is used for continuous environment analysis and SAP2000 software is used for analysis by Winkler frame and spring method. The results show good accuracy of the approximate method of Winkler frame and spring, and it can be seen that the answers obtained by the two methods are close to each other.

**Cite this article:** Peyman, Safa., & Basiri, Alireza. (2025). Comparative analysis of concrete cover of underground structures with Winkler spring frame methods and continuous environment method. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 126-136. DOI: 10.22126/amcen.2025.11207.1018



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11207.1018

Publisher: Razi University

## **Introduction**

Analysis and design of concrete linings for tunnels and underground structures is one of the important topics in the design of road tunnels, water conveyance tunnels, metro tunnels, and other critical underground defense structures and metro stations. To analyze the behavior of concrete linings in underground structures under static and dynamic loads, continuum medium methods and the Winkler beam-spring model are widely used. In the continuum medium method, the concrete tunnel lining and the surrounding environment are analyzed together as a continuous medium. Using software such as PLAXIS and FLACK, the concrete tunnel lining and the surrounding soil or rock environment can be modeled simultaneously. These software consider the surrounding environment of the tunnel as seamless and continuous. Software such as UDEC allows for the modeling of jointed surrounding environments along with the concrete tunnel lining. In recent years, extensive research has been conducted to investigate the behavior of concrete tunnel linings using these software tools. However, despite the widespread use of the Winkler beam-spring method by consulting engineers, its results compared to more accurate continuum methods are not entirely clear. Accordingly, in the present study, the results of the analysis of concrete tunnel linings under static and dynamic loads using the Winkler beam-spring method are compared with those obtained from the continuum method. For the continuum method analysis, PLAXIS software is used, while SAP2000 is employed for the Winkler beam-spring method analysis.

## **Method**

Structural engineers commonly utilize the Winkler beam-spring method for analyzing concrete tunnel linings. In this approach, the concrete lining is modeled using frame elements, while the surrounding ground interaction is simulated through Winkler springs.

The investigated structure is an underground horseshoe-shaped tunnel, with its dimensions (in millimeters) illustrated in Figure 1. The concrete lining has a uniform thickness of 400 mm, with the tunnel crown located 40 meters below ground surface. The concrete lining analysis considers both rock pressure and blast loading effects. In the beam-spring method, the magnitude of rock pressure acting on the lining is determined based on the geotechnical characteristics of the surrounding soil/rock mass. This study presents a comparative analysis of concrete tunnel lining behavior under static and dynamic blast loads using two distinct approaches: Continuum method analysis performed using PLAXIS software and Winkler beam-spring method analysis conducted with SAP2000

## **Results**

Based on the results, it can be concluded that the numerical solution using the Winkler beam-spring method demonstrates excellent accuracy compared to the continuum method solution. Furthermore, the findings reveal that both the axial forces and bending moments obtained through the Winkler beam-spring method are consistently higher in all cases than those obtained via the continuum method. This observation indicates that the application of the Winkler beam-spring method provides conservative results, making it a reliable approach for design purposes.

**Conclusions**

The use of continuum-based methods for numerical analysis of concrete tunnel linings and underground structures offers very high accuracy. Suitable software for this method, such as FLACK and PLAXIS, simultaneously simulate the concrete lining and the surrounding ground medium. However, structural engineers typically perform numerical analysis of concrete tunnel linings using SAP2000, which is based on the Winkler beam-spring method. In this method, the concrete lining is modeled using frame elements, while the surrounding ground is represented by Winkler springs. Despite the widespread use of the Winkler beam-spring method by consulting engineers for the analysis and design of concrete tunnel linings, researchers have not yet fully clarified its accuracy compared to continuum methods. Accordingly, this study compares the results of concrete tunnel lining analysis under static loads and dynamic blast loads using both methods. The PLAXIS software is used for the continuum method, while SAP2000 is employed for the Winkler beam-spring method. The obtained results indicate that the responses from the Winkler beam-spring method closely match those from the continuum method. Thus, it can be concluded that the finite element analysis of underground tunnel linings using the Winkler beam-spring method in SAP2000 provides reasonably accurate results.

**Author Contributions**

All authors participated in writing and revising the article.

**Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.



## تحلیل مقایسه‌ای پوشش بتنی سازه‌های زیرزمینی با روش‌های قاب فنر وینکلر و روش محیط پیوسته

صفا پیمان<sup>۱</sup>✉، علیرضا بصیری<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: [speyman@ihu.ac.ir](mailto:speyman@ihu.ac.ir)

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: [alirezab11121@gmail.com](mailto:alirezab11121@gmail.com)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b><br/>مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b><br/>۱۴۰۴/۰۱/۰۶</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b><br/>۱۴۰۴/۰۲/۳۱</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b><br/>۱۴۰۴/۰۳/۲۸</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b><br/>۱۴۰۴/۰۴/۰۹</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b><br/>سازه زیر زمینی،<br/>تونل، قاب و فنر وینکلر،<br/>محیط پیوسته،<br/>PLAXIS<br/>SAP2000</p> | <p>مناسب‌ترین روش برای تحلیل پوشش بتنی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی استفاده از روش محیط پیوسته است. نرم افزارهای مناسب این روش، شبیه‌سازی پوشش بتنی و محیط پیروانی آن را با هم انجام می‌دهند. با این وجود، مهندسان سازه معمولاً برای تحلیل پوشش بتنی تونل‌ها از روش قاب و فنر وینکلر استفاده می‌کنند. در این روش، پوشش بتنی با استفاده از المان‌های قابی و اثر محیط پیرامونی با فنرهای وینکلر مدل‌سازی می‌شوند. با وجود استفاده از روش قاب و فنر وینکلر نتایج آن در مقایسه با روش‌های محیط پیوسته به طور کامل روشن نمی‌باشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر نتایج تحلیل پوشش بتنی تونل‌ها تحت اثر بارهای استاتیکی و بار دینامیکی ناشی از انفجار با این دو روش با هم مقایسه می‌شوند. برای تحلیل به روش محیط پیوسته از نرم افزار PLAXIS و برای تحلیل به روش قاب و فنر وینکلر از نرم افزار SAP2000 استفاده می‌گردد. نتایج به دست آمده دقت خوب روش تقریبی قاب و فنر وینکلر را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود، پاسخ‌های به دست آمده با دو روش به هم نزدیک هستند.</p> |

استناد: پیمان، صفا؛ بصیری، علیرضا. (۱۴۰۴). تحلیل مقایسه‌ای پوشش بتنی سازه‌های زیرزمینی با روش‌های قاب فنر وینکلر و روش محیط پیوسته.

مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۱۳۶-۱۲۶. DOI: 10.22126/amcen.2025.11207.1018



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

## ۱. مقدمه

تحلیل و طراحی پوشش بتنی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی یکی از موضوعات دارای اهمیت در طراحی تونل‌های راه، تونل‌های انتقال آب، تونل‌های مترو و دیگر سازه‌های مهم زیرزمینی دفاعی و ایستگاه‌های مترو می‌باشد. برای تحلیل رفتار پوشش بتنی سازه‌های زیرزمینی تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی از روش‌های محیط پیوسته و روش قاب و فنر وینکلر بطور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۱]. در روش محیط پیوسته پوشش بتنی تونل و محیط اطراف آن به صورت پیوسته و با هم تحلیل می‌شوند. با استفاده از نرم افزارهایی مانند PLAXIS و FLACK، می‌توان پوشش بتنی تونل و محیط خاکی یا سنگی اطراف آن را با هم مدل نمود. این نرم افزارها محیط اطراف تونل را بدون درز و بصورت پیوسته در نظر می‌گیرند. نرم افزارهایی مانند UDEC وجود دارند که امکان مدلسازی محیط‌های پیرامونی دارای درز و پوشش بتنی تونل را با هم دارند. در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی برای بررسی رفتار پوشش بتنی تونل‌ها با استفاده از این نرم افزارها انجام شده است. نیکو طالب و همکاران با استفاده از نرم افزار PLAXIS پایداری تونل‌ها را بررسی و ضخامت پوشش بتنی مورد نیاز را به دست آوردند [۲]. رضانی و مطهری از نرم افزار PLAXIS برای بررسی رفتار پوشش بتنی تونل‌ها تحت اثر زلزله استفاده نمودند و پاسخ‌های به دست آمده را با پاسخ‌های روش تحلیلی مقایسه نمودند [۳]. علاوه بر این با استفاده از هیدروکدهای توانمندی مانند AUTODYN، امکان بررسی آثار انفجارهای سطحی و مدفون بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی وجود دارد. تقوی پارسا و پیمان با استفاده از هیدرو کد AUTODYN، اثر انفجارهای سطحی و مدفون بر پوشش بتنی سازه‌های زیرزمینی را بررسی نمودند [۴، ۵]. آن‌ها نشان دادند، رابطه‌های تقریبی به دست آمده برای بارگذاری پوشش بتنی تونل‌ها تحت اثر بار انفجار [۶، ۷]، از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشند. لو و همکاران با مدل نمودن خاک و سازه درون آن با استفاده از روش عددی رفتار سازه‌های زیرزمینی را تحت اثر انفجار بررسی نمودند [۸]. ونگ و همکاران نیز با استفاده از روش عددی اثر انفجار بر سازه‌های مدفون را بررسی کردند [۹]. لئونگ و همکارانش بیشینه فشار ناشی از انفجار در انواع خاک را با توجه به فاصله مقیاس شده محاسبه نمودند [۱۰]. در این پژوهش نتایج حاصل از تحلیل عددی در نرم‌افزار با روابط

تجربی موجود در TM5-1300 [۱۱] مقایسه شده است. هاوبی اثر انفجار بر تونل‌های مترو را با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مورد بررسی قرار داد [۱۲]. هاوبی اثر مقدار ماده منفجره، مشخصات زمین و عمق دفن تونل را بررسی نمود. کریمی تبار و همکاران، خسارت پوشش بتنی تونل در اثر انفجار داخلی را با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی نمودند [۱۳].

استفاده از روش محیط پیوسته و نرم افزارهای مربوط به آن دارای پیچیدگی‌هایی است و به دلیل مدل‌سازی محیط پیرامون پوشش بتنی تعداد المان‌ها زیاد می‌گردد. زیاد شدن المان‌های دو و سه بعدی در شبیه‌سازی عددی، سبب می‌شود، زمان انجام محاسبات عددی طولانی شود. این موضوع سبب شده است، روش ساده‌تر قاب و فنر وینکلر برای تحلیل پوشش بتنی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی استفاده شود [۱]. در این روش پوشش بتنی تونل با استفاده از المان‌های قابی و اثر محیط پیرامونی آن با استفاده از فنرهای وینکلر مدل‌سازی می‌شوند. این روش تحلیل بطور گسترده و با استفاده از نرم افزار SAP2000 توسط مهندسان مشاور برای تحلیل و طراحی پوشش بتنی تونل‌ها، شفت‌ها و دیگر سازه‌های زیر زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. در آیین نامه مهندسی و طراحی تونل‌ها و شفت‌ها در سنگ (EM 1110-2-2901) ارتش ایالات متحده آمریکا مبانی علمی این روش تحلیل ارائه شده است [۱۵]. در مدل‌سازی‌های عددی روش قاب و فنر وینکلر معمولاً اندرکنش خاک و سازه با فنرهای عمود و مماس بر سطح جداره پوشش بتنی تونل در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. اثر فنرهای مماس بر سطح جداره تونل بر نتایج تحلیل، برای پوشش‌های بتنی پیوسته که دارای محیط‌های پیرامونی سنگی یا خاکی سفت می‌باشند، ناچیز است [۱۴]. فام و سوگیمتو، اندرکنش خاک و سازه را با فنرهای عمود و مماس بر سطح بیرونی جداره پوشش بتنی سگمنتال مدلسازی نمودند [۱۶]. آن‌ها نشان دادند، اثر فنرهای مماس بر سطح برای پوشش بتنی سگمنتال تونل‌های باریکی که در خاک‌های نرم اجرا می‌شوند، قابل تامل است. پیمان و همکاران با استفاده از این روش تحلیل، ضریب رفتار پوشش بتنی تونل‌های زیر زمینی را تحت اثر بار انفجاری بررسی نمودند [۱۷]. با وجود استفاده گسترده مهندسان مشاور از روش قاب و فنر وینکلر نتایج آن در مقایسه با روش‌های دقیق‌تر محیط پیوسته به طور کامل روشن نمی‌باشد. بر این

مشخصات مکانیکی و فیزیکی مورد نیاز محیط سنگی در برگرفته تونل و بتن مورد استفاده برای ساخت پوشش بتنی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است [۱۴].

مشخصات مکانیکی و فیزیکی مورد نیاز محیط سنگی در برگرفته تونل و بتن مورد استفاده برای ساخت پوشش بتنی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است [۱۴].

جدول ۱. مشخصات سنگ در برگرفته تونل

| نوع مشخصه                | مقدار                        |
|--------------------------|------------------------------|
| مدول الاستیسیته          | $E_r = 5.9 \text{ GPa}$      |
| ضریب پواسون              | $\nu_r = 0.22$               |
| ضریب اصطکاک داخلی (درجه) | $\phi = 44^\circ$            |
| حداکثر شتاب افقی زمین    | $A_s = 0.22 \text{ m/s}^2$   |
| حداکثر سرعت افقی زمین    | $V_s = 39 \text{ cm/s}$      |
| ضریب تضعیف               | $n = 2.5$                    |
| جرم حجمی                 | $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ |

جدول ۲. مشخصات پوشش بتنی تونل

| نوع مشخصه       | مقدار                        |
|-----------------|------------------------------|
| مدول الاستیسیته | $E_r = 25.6 \text{ GPa}$     |
| ضریب پواسون     | $\nu_r = 0.2$                |
| جرم حجمی        | $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ |

خاطر نشان می‌سازد، مشخصات محیط در برگرفته تونل مربوط به یک تونل اجرا شده است و مقادیر ارائه شده از گزارش ژئوتکنیک این پروژه استخراج شده است.

## ۲-۲. بارگذاری

### ۱-۲-۲. بار سنگ

تحلیل سازه‌ای تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی تحت اثر بارهای دائمی ایستا مانند بار سنگ و بارهای دینامیکی مانند بار زلزله و بار انفجار با توجه به رفتار غیر خطی اندرکنش خاک و سازه ملاحظات خاص خود

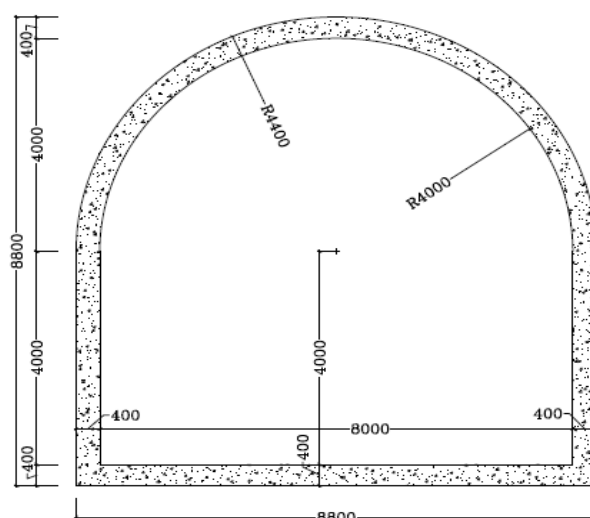
اساس، در پژوهش حاضر نتایج تحلیل پوشش بتنی تونل‌ها تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی با روش قاب و فنر وینکلر، با نتایج به دست آمده از تحلیل با روش محیط پیوسته مقایسه می‌شوند. برای تحلیل به روش محیط پیوسته از نرم افزار PLAXIS و برای تحلیل به روش قاب و فنر وینکلر از نرم افزار SAP2000 استفاده می‌گردد.

## ۲. کلیات مساله

برای انجام این پژوهش، پوشش بتنی تونلی زیرزمینی تحت اثر بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش ابتدا مشخصات هندسی و مکانیکی مقطع این تونل و محیط در برگرفته آن ارائه می‌شود. سپس درباره‌ی بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی انفجار مطالب مورد نیاز ارائه می‌گردد. در ادامه چگونگی شبیه‌سازی عددی با هر دو روش محیط پیوسته و قاب و فنر وینکلر توضیح داده می‌شود.

## ۱-۲. مشخصات هندسی و مکانیکی پوشش بتنی و محیط پیرامونی تونل مورد بررسی

سازه مورد بررسی تونلی زیر زمینی، به شکل نعل اسبی می‌باشد که ابعاد آن بر حسب میلی‌متر در شکل ۱ آورده شده است. پوشش بتنی این تونل دارای ضخامت ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. سطح بالایی این تونل ۴۰ متر از سطح زمین فاصله دارد.



شکل ۱. هندسه تونل زیرزمینی (ابعاد به میلی‌متر)

## ۳-۲. شبیه سازی عددی

روش‌های مختلفی برای تحلیل و طراحی پوشش بتنی تونل‌ها وجود دارد. انتخاب هر کدام از این روش‌ها به عامل‌های مختلفی مانند دقت مورد نظر، شناخت وضعیت زمین، اندرکنش زمین و سازه و دیگر عوامل مهم بستگی دارد. از تفاوت‌های اساسی بین روش‌های مزبور چگونگی اعمال اثر اندرکنش زمین و پوشش بتنی می‌باشد. امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای فراوانی در اختیار است که می‌توانند به شیوه‌های مختلف این تأثیر را در محاسبات وارد نمایند. در این مقاله، شبیه سازی عددی پوشش بتنی تونل و سازه‌های زیر زمینی با دو روش محیط پیوسته و قاب و فنر وینکلر انجام می‌شود، در ادامه فرایند شبیه سازی پوشش بتنی و محیط در بر گیرنده‌ای با این دو روش آورده می‌شود.

## ۳-۲-۱. روش تحلیل عددی قاب و فنر وینکلر

زمین به عنوان یک محیط فیزیکی با رفتار تغییر شکل‌پذیر در اطراف پوشش بتنی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سازه آن خواهد داشت. به منظور اعمال این تأثیر در میان شیوه‌های متفاوت موجود، مدل‌سازی تأثیر اندرکنش زمین و سازه با استفاده از فنرهای کشسان وینکلر در اطراف پوشش بتنی، کاربرد وسیع‌تری دارد [۱۴]. با توجه به اینکه رفتار پوشش بتنی از نوع کرنش صفحه‌ای می‌باشد، برای مدل‌سازی پوشش بتنی از المان‌های قابی با عرض مقطع یک متر استفاده می‌شود. به این ترتیب، پس از مشخص شدن بارهای وارد بر پوشش بتنی تونل، تحلیل پوشش مزبور به روش تیر - فنر توسط نرم‌افزار SAP2000 انجام می‌شود. در مدل‌های دو بعدی تیر معرف پوشش بتنی می‌باشند.

از سوی دیگر، اثر اندرکنش محیط اطراف در نقاط مختلف، با معرفی کردن فنرهای وینکلر که به نقاط گرهی متصل می‌شوند، شبیه‌سازی می‌گردد. سختی این فنرها با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح سنگ در بر گیرنده پوشش بتنی تونل به دست می‌آید. تغییر شکل فنرها مساوی تغییر مکان تماس حایل‌بندی زمین به طرف داخل توده است. اگر تغییر مکان منفی باشد (همگرایی) پوشش یا وافشردگی زمین) واکنش بیش ایستا معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، مقاومت کششی بین پوشش بتنی و دیواره صفر است. در روند

را دارد. در این پژوهش پوشش بتنی تونل مورد بررسی تحت اثر بار سنگ و بار انفجار تحلیل می‌شود. در روش قاب و فنر با توجه به مشخصات خاک یا سنگ پیرامونی مقدار بار سنگ وارد بر پوشش بتنی به دست می‌آید. روش‌های متفاوتی برای محاسبه بار سنگ وجود دارد. در جدول ۳ بار سنگ محاسبه شده بر مبنای این روش‌ها، که باید بر روی پوشش بتنی تونل مورد بررسی وارد شود، ارائه شده است [۱۴].

جدول ۳. بار سنگ وارد بر پوشش بتنی

| نوع بار | مقدار بار                    |
|---------|------------------------------|
| افقی    | $P_h = 5.08 \text{ ton/m}^2$ |
| قائم    | $P_v = 7.8 \text{ ton/m}^2$  |

در روش محیط پیوسته نیاز به اعمال بار سنگ بر روی سطح بیرونی پوشش بتنی وجود ندارد و نرم افزارهای مورد استفاده با داشتن مشخصات مکانیکی خاک و پوشش بتنی تونل، فرایند تحلیل را انجام می‌دهند.

## ۳-۲-۲. بارگذاری انفجاری

به فشار ناشی از موج انفجار در هر نقطه از محیط اطراف انفجار که مقدار آن با وزن ماده منفجره رابطه مستقیم و با فاصله از مرکز انفجار رابطه معکوس دارد، اضافه فشار می‌گویند. محاسبه اندازه این فشار و تغییرات آن در طی زمان از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است. فرض می‌شود، انفجاری معادل ۵۴۵ کیلوگرم ماده منفجره TNT ناشی از نفوذ بمبی به عمق ۶ متری زمین، بر روی سازه زیرزمینی مورد بررسی رخ دهد. اگر فاصله مرکز انفجار از سطح رویی پوشش بتنی ۳۴ متر باشد، مقادیر فشار بیشینه، مقدار ضربه و مدت زمان اعمال بار مثلی ضربه‌ای به سطوح رویی و کناری پوشش بتنی تونل مورد بررسی از جدول ۴ به دست می‌آید [۱۴].

جدول ۴. بارگذاری انفجاری پوشش بتنی

|                    |                                        |
|--------------------|----------------------------------------|
| بیشینه فشار        | $P_0 = 17.3 \text{ ton/m}^2$           |
| مقدار ضربه         | $I_0 = 3.83 \text{ (ton/m}^2\text{)s}$ |
| مدت زمان اعمال بار | $T_d = 0.442 \text{ s}$                |

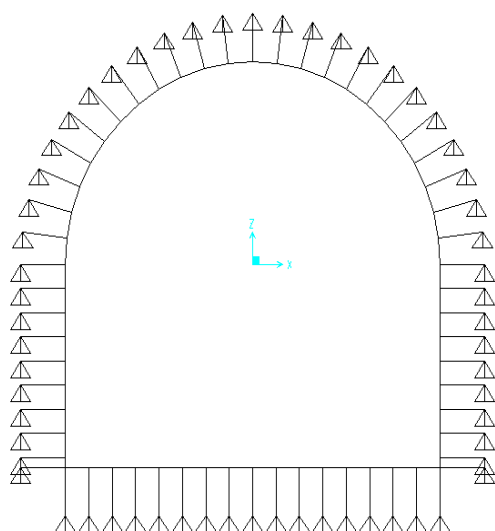
اکنون با توجه به سختی محوری میله‌ها  $K_b = A_b E_b / L_b$  که در آن،  $A_b$  سطح مقطع میله و  $E_b$  مدول الاستیسیته مصالح میله و  $L_b$  طول میله می‌باشد، می‌توان سطح مقطع میله جایگزین فنر برای گرهی که مساحت آن  $A = B * L$  باشد، را محاسبه کرد.

$$A_b E_b / L_b = K_r . L . B \quad (4)$$

با معلوم بودن مدول الاستیسیته مصالح میله اگر طول آن برابر واحد در نظر گرفته شود، مساحت مقطع آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_b = K_r . L . B / E_b \quad (5)$$

در شکل (۲) مدل تیر- میله برای مدل سازی پوشش بتنی سازه زیر زمینی مورد بررسی و محیط در بر گیرنده آن با استفاده از نرم افزار SAP2000 نشان داده است. در این مدل، میله‌های اطراف که اندرکنش بین پوشش بتنی و خاک را مدل می‌کنند، متناسب با سختی محوری فقط توانایی تحمل بار محوری از نوع فشاری را دارا می‌باشند. از سوی دیگر، المان‌های قابی درون صفحه که پوشش بتنی را مدل می‌کنند، توانایی تحمل نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی را دارا می‌باشند.



شکل ۲. شبیه سازی پوشش بتنی تونل مستقیم و محیط در بر گیرنده آن با استفاده از المان‌های قابی و میله‌ای

طراحی لاینینگ تونل‌ها، برای هریک از ترکیبات طراحی، بعد از آنالیز مدل فنرهایی که به کشش می‌افتند، حذف شده و سپس مدل دوباره آنالیز می‌شود، این روند تا آنجا ادامه می‌یابد که هیچ فنری به کشش نیافتد. از آنجایی که این روند طراحی زمان‌بر بوده و دارای خطا نیز می‌باشد، امروزه در نرم‌افزارهایی همچون SAP2000 اعضای خطی یا میله‌ای با خصوصیات فقط کشش و یا فقط فشار گنجانده شده است. در مورد اندرکنش خاک و سازه می‌بایست از حالت فقط فشار استفاده کرد. سختی محوری این میله‌ها معادل سختی فنرهای وینکلر است. باید دانست، در صورت استفاده از فنرهای مزبور لازم است، تحلیل بصورت غیر خطی انجام شود. همان‌گونه که گفته شد، فنرهای مورد استفاده در مدل نمایانگر رفتار زمین اطراف پوشش می‌باشند. بر این اساس، سختی فنرها تابع مشخصه‌های زمین اطراف پوشش بتنی و شکل حفاری است. پژوهشگران رابطه‌های متفاوتی برای استخراج سختی فنر بر حسب مدول تغییر شکل‌پذیری زمین محیط اطراف پوشش بتنی و هندسه حفاری ارائه کرده‌اند. بدون بحث درباره این روش‌ها از روش تئوری الاستیسیته استفاده می‌گردد. مطابق تئوری مزبور، ضریب عکس‌العمل زمین با رابطه (۱) ارائه می‌شود [۱۴].

$$K_r = \frac{E_r}{R(1 + \nu_r)} \quad (1)$$

در این رابطه،  $E_r$  ضریب الاستیسیته خاک یا سنگ محیط در بر گیرنده پوشش بتنی،  $R$  شعاع دهانه تونل و  $\nu_r$  ضریب پواسون سنگ است. به این ترتیب، سختی فنر برای گرهی که مساحت آن  $A = B * L$  باشد برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$K = K_r . L . B \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $L$  طول و  $B$  عرض قوسی از پوشش است که توسط یک فنر تکیه‌گاهی نگهداری می‌شود. به این ترتیب، برای مساحت یک متر مربع، سختی فنر به دست می‌آید.

$$K_r = \frac{E_r}{R(1 + \nu)} = \frac{5.9}{4.20(1 + 0.22)} = 1.15 \text{ GN / m} \quad (3)$$



## ۲-۳-۲. روش تحلیل عددی محیط پیوسته

در روش محیط پیوسته پوشش بتنی تونل و محیط اطراف آن به صورت پیوسته و با هم تحلیل می‌شوند. در این پژوهش برای انجام تحلیل عددی پوشش بتنی تونل و محیط پیرامونی آن با روش محیط پیوسته از نرم افزار اجزای محدود، PLAXIS استفاده می‌شود. فرضیات و روند مدل سازی به روش محیط پیوسته به صورت زیر می‌باشد:

۱- مدل سازی به صورت دو بعدی است و در رابطه سازی حل عددی وجود شرایط کرنش صفحه‌ای لحاظ شده است.

۲- پوشش بتنی با استفاده از المان رشته‌ای دو گرهی تیر ستون مدل گردید. محیط اطراف پوشش بتنی به صورت پیوسته مدل شد و برای شبکه بندی آن از المان‌های کرنش صفحه‌ای پانزده گرهی استفاده گردید.

۳- ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده که فاصله مرز مدل از جداره تونل، ۱۰ برابر قطر تونل باشد. فاصله مرز سطح زمین از راس پوشش بتنی همان فاصله فرض شده چهل متر می‌باشد.

۴- از مدل رفتاری موهر کولمب برای محیط در بر گیرنده پوشش بتنی استفاده شد.

۵- با توجه به بررسی و آنالیز انجام شده برای المان سطح مشترک بین سنگ و سازه Rinter برابر ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

در بخش محاسبه نرم‌افزار PLAXIS، کلیه مراحل اجرایی پروژه اصلی، به صورت فاز بندی در نرم افزار تعریف می‌شود. به این معنا که نرم‌افزار PLAXIS این قابلیت را دارد که متناسب با مراحل اجرای پروژه واقعی، مدل سازی را با تعریف فازهای متعدد انجام دهد.

## ۳. حل عددی

## ۳-۱. اعتبار سنجی نتایج

در جدول ۵ نیروی محوری و لنگر خمشی به دست آمده از حل عددی پژوهش حاضر با نتایج مرجع [۱۴] برای پوشش بتنی تونلی که مشخصات مصالح بتنی، محیط در برگیرنده و بارهای سنگ و انفجار وارد بر آن در بخش ۲ ارائه گردید، مقایسه شده است. این مرجع از روش تحلیلی قاب و فنر وینکلر استفاده نموده است. این نتایج برای

مقطعی از دیواره قائم پوشش بتنی تونل در محل برخورد به کف به دست آمده‌اند.

جدول ۵. نتایج روش محیط پیوسته و روش قاب و فنر وینکلر

| مرجع [۱۴] | روش قاب و فنر وینکلر SAP2000 | روش محیط پیوسته PLAXIS | ---               |
|-----------|------------------------------|------------------------|-------------------|
| -۲۲۱/۴۴   | -۲۱۷/۹                       | -۲۳۵/۰۸۴               | نیروی محوری (Ton) |
| -۹۳/۹۴    | -۹۰/۴۷                       | -۹۰/۴۴                 | لنگر خمشی (Ton.m) |

همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ‌های به دست آمده از روش‌های عددی محیط پیوسته و قاب و فنر وینکلر تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع [۱۴]، دارند. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهند، که پاسخ‌های این دو روش بسیار به هم نزدیک می‌باشند. بر این اساس، می‌توان دقت روش قاب و فنر وینکلر را نسبت به حل با روش محیط پیوسته که دقیقتر است را پذیرفت.

## ۲-۳. مقایسه روش‌های حل محیط پیوسته و قاب و فنر وینکلر

در ادامه برای بررسی بیشتر، پاسخ‌های هر دو روش برای سه نوع خاک با هم مقایسه می‌شوند. نتایج برای پوشش‌های بتنی تونل نعل اسبی، با شعاع قوس ۶ متر بدست آمده‌اند. در جدول ۶ مشخصات اصلی سه نوع خاک یا همان محیط در بر گیرنده تونل‌ها همراه بارهای افقی و قائم سنگ و بار انفجار وارد بر پوشش بتنی تونل آورده شده است. سایر مشخصات مورد نیاز همان مشخصات جدول ۱ فرض می‌شوند. در همه حالت‌ها بار انفجار ناشی از نفوذ و انفجار بمبی است در عمق ۶ متری زمین که دارای ۵۴۵ کیلوگرم تی ان تی می‌باشد. فاصله ی مرکز انفجار از سطح رویی پوشش بتنی ۴۰ متر می‌باشد.

جدول ۶. مشخصه‌های زمین اطراف تونل

| واحد              | زمین ۱ | زمین ۲ | زمین ۳ |                 |
|-------------------|--------|--------|--------|-----------------|
| kN/m <sup>2</sup> | ۲۰     | ۲۲/۶   | ۲۵     | وزن مخصوص       |
| mN/m <sup>2</sup> | ۵۸۰    | ۲۵۰۰   | ۴۴۰۰   | ضریب الاستیسیته |
| -                 | ۰/۴    | ۰/۳۸   | ۰/۳۰   | ضریب پواسون     |
|                   | ۳۰     | ۵۰     | ۷۰     | RMR             |

|                                   |                   |          |         |
|-----------------------------------|-------------------|----------|---------|
| تحت اثر بار سنگ                   | لنگر خمشی (ton.m) | -۱۸۲/۱۶۶ | -۱۷۱/۰۵ |
| تحت اثر توام بار سنگ و بار انفجار | نیروی محوری (ton) | -۳۷۰/۴۷  | -۳۵۴/۱  |
|                                   | لنگر خمشی (ton.m) | -۱۸۸/۱۶۶ | -۱۷۵/۷  |

جدول ۹. نتایج روش محیط پیوسته و روش قاب و فنر وینکلر برای زمین ۳

|                                   | روش قاب و فنر وینکلر | روش محیط پیوسته |         |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------|---------|
| تحت اثر بار سنگ                   | نیروی محوری (ton)    | -۱۴۰/۶          | -۱۳۳/۷۶ |
|                                   | لنگر خمشی (ton.m)    | -۵۰/۷           | -۴۸/۱۴  |
| تحت اثر توام بار سنگ و بار انفجار | نیروی محوری (ton)    | -۱۵۰/۵          | -۱۳۹/۲۹ |
|                                   | لنگر خمشی (ton.m)    | -۵۲/۶           | -۴۹     |

## ۴. نتیجه گیری

استفاده از روش های محیط پیوسته برای تحلیل عددی پوشش بتنی تونل ها و سازه های زیرزمینی از دقت بسیار خوبی برخوردار می باشد. نرم افزارهای مناسب این روش مانند FLACK و PLAXIS شبیه سازی پوشش بتنی و محیط پیروانی آن را با هم انجام می دهند. با این وجود، مهندسان سازه معمولاً، تحلیل عددی پوشش بتنی تونل ها را با استفاده از نرم افزار SAP2000 که مبتنی بر روش قاب و فنر وینکلر می باشد انجام می دهند. در این روش، پوشش بتنی با استفاده از المان های قابی و اثر محیط پیرامونی با فنرهای وینکلر مدلسازی می شوند. با وجود استفاده گسترده از روش قاب و فنر وینکلر در مهندسی مشاور برای تحلیل و طراحی پوشش بتنی تونل ها، نتایج آن در مقایسه با روش های محیط پیوسته توسط پژوهشگران بطور کامل روشن نشده است.

بر این اساس، در پژوهش حاضر نتایج تحلیل پوشش بتنی تونل ها تحت اثر بارهای استاتیکی و بار دینامیکی ناشی از انفجار با این دو روش با هم مقایسه می شوند. برای تحلیل به روش محیط پیوسته از

|                            |                    |       |       |      |
|----------------------------|--------------------|-------|-------|------|
| بار سنگ قائم               | ton/m <sup>2</sup> | ۵۰    | ۱۱    | ۶    |
| بار سنگ افقی               | ton/m <sup>2</sup> | ۲۰    | ۴     | ۲/۴  |
| بیشینه فشار انفجار         | ton/m <sup>2</sup> | ۱۲    | ۱۳/۸۴ | ۱۶/۶ |
| زمان اعمال بار مثلی انفجار | sec                | ۰/۴۴۶ | ۰/۴۴۳ | ۰/۴۴ |

در جدول های ۷ تا ۹ نتایج به دست آمده با هر دو روش محیط پیوسته و قاب فنر وینکلر برای تونل با شعاع ۶ متر و با سه محیط پیرامونی متفاوت با هم مقایسه شده اند. این نتایج برای مقطعی از دیواره قائم پوشش بتنی تونل در محل برخورد به کف به دست آمده اند. مشاهده می شود، نتایج دو روش به هم نزدیک می باشند. بر این اساس، می توان بیان داشت که حل عددی با روش قاب و فنر وینکلر نسبت به حل عددی روش محیط پیوسته از دقت بسیار خوبی برخوردار است. همچنین مشاهده می شود، نیرو و لنگر به دست آمده با روش قاب و فنر وینکلر در همه حالت ها بیشتر از نیرو و لنگر به دست آمده با روش محیط پیوسته می باشد. این موضوع بیانگر آن است که استفاده از روش قاب و فنر وینکلر در جهت اطمینان است.

جدول ۷. نتایج روش محیط پیوسته و روش قاب و فنر وینکلر برای زمین ۱

|                                   | روش قاب و فنر وینکلر | روش محیط پیوسته |         |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------|---------|
| تحت اثر بار سنگ                   | نیروی محوری (ton)    | -۶۳۰/۸          | -۶۱۲/۸۷ |
|                                   | لنگر خمشی (ton.m)    | -۵۳۳/۹۹         | -۵۲۱/۶  |
| تحت اثر توام بار سنگ و بار انفجار | نیروی محوری (ton)    | -۶۴۲/۰۷۳        | -۶۲۰/۶  |
|                                   | لنگر خمشی (ton.m)    | -۵۵۰/۹۹         | -۵۲۳/۳۴ |

جدول ۸. نتایج روش محیط پیوسته و روش قاب و فنر وینکلر برای زمین ۲

|  | روش قاب و فنر وینکلر | روش محیط پیوسته |         |
|--|----------------------|-----------------|---------|
|  | نیروی محوری (ton)    | -۳۵۶/۸۷         | -۳۴۸/۷۱ |

- Manual; US Department of the Army, Navy and Air Force, Washington DC, 1990.
- [12] Huabei, L. "Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading"; Springer Sci. B.V, 2009.
- [13] H. Karimi Tabar, F. Basaligheh, M. Nikkhah, "Numerical Modeling of Damage Caused by Internal Explosion"; "Journal of Energetic Materials" Volume 15, No.1, Serial No.45, Spring 2020
- [14] Peyman, S.; Akbari, Ah. "Loading, Analysis and Design of Under Ground Structures"; IHU Press, 2021(In Persian).
- [15] Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock"; EM 1110-2-2901, Dep't. of the Army, U.S. Army Corps of Eng.Washington, DC 20314-1000, 1997
- [16] Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock"; EM 1110-2-2901, Dep't. of the Army, U.S. Army Corps of Eng.Washington, DC 20314-1000, 1997
- [17] S. Peyman,; A. Babaei.; M. H. Taghavi Parsa.; A. Akbari.; " Evaluation of Reduction Factor for concrete coatings of underground structures under blast loading"; Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2020) ; pp 1-14,

نرم افزار PLAXIS و برای تحلیل به روش قاب و فنر وینکلر از نرم‌افزار SAP2000 استفاده می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، پاسخ‌های به دست آمده روش قاب و فنر وینکلر به نتایج حاصل از روش پیوسته نزدیک هستند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تحلیل پوشش بتنی تونل‌های زیر زمینی با استفاده روش اجزای محدود قاب و فنر وینکلر با نرم افزار اجزای محدود SAP2000 از دقت خوبی برخوردار است.

## Referances

- [1] Peyman, S.; Ghazanfarinia, S. "Defence and Secutity Structures"; MAUT Press, 2007(In Persian).
- [2] Fasihnikoutalab, M. H.; Huat, B. B. K.; Asadi. A.; Daneshmand. S.; "Numerical Stability Analysis of Tunnel by PLAXIS"; EJGE, Vol. 17 , 2012, 45-462.
- [3] Fasihnikoutalab, M. H.; Huat, B. B. K.; Asadi. A.; Daneshmand. S.; "Numerical Stability Analysis of Tunnel by PLAXIS"; EJGE, Vol. 17 , 2012, 45-462.
- [4] Taghavi Parsa, M.H.; Peyman, S.; "Analysis of the effect of buried explosive loading on underground reinforced concrete structures"; Amirkabir J. Civil Eng., 51(1) (2019) 3-18
- [5] Taghavi Parsa, M.H.; Peyman, S.; " Analysis of explosion loading on underground structures under surface explosion"; Tarbiat Modares J. Civil Eng., 19(5) (2019) 31-39
- [6] Brode, H. L. "Numerical Solution of Spherical Blast Waves", J. Applied Physics, 1995, 6, 766-775.
- [7] Henrych, J. "The Dynamics of Explosion and Its Use"; Elsevier, Amsterdam, 1979.
- [8] Lu, Y.; Wang, Z. "Characterization of Structural Effects from Above-Ground Explosion Using Coupled Numerical Simulation"; Comput Struct. 2006, 84, 1729-1742.
- [9] Wang, Z.; Lu, Y.; Hao, H.; Chong, K. "A Full Coupled Numerical Analysis Approach for Buried Structures Subjected to Subsurface Blast"; Comput Struct. 2005, 83, 339-356.
- [10] Leong, E. C.; Anand, S.; Cheong, H. K.; Lim, C. H. "Reexamination of Peak Stress Scaled Distance Due to
- [11] TM5-1300. "The Design of Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions"; Technical