

Numerical Modeling and Stability Assessment of the H16 Bifurcation in the Tabas Coal Mine

Satar Mahdevari * 

Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The design of tunnel networks in underground mines is inherently complex, inevitably leading to various branches and intersections. The stability of these intersections directly affects the safety and efficiency of the mine. In the present study, one of the bifurcated intersections of the Parvadeh Tabas coal mine (the H16 intersection) has been investigated. The finite difference method (FLAC3D software) was employed to calculate three components: the distribution of induced stresses, the stress concentration, and the extent of the plastic zone. The results show that the maximum vertical induced stress in the area between the two tunnels reaches 25.5 MPa on the left side of the intersection. In the same zone, the stress concentration increases to 1.6 near the slope tunnel and to 1.7 near the access tunnel. At the roof of the access tunnel, moving away from the intersection is accompanied by a gradual increase in stress; a phenomenon attributed to the non circular and wide cross section of this tunnel. The modeling error in the three investigated sections was calculated based on the maximum displacements of 419, 412, and 370 mm, respectively, which correspond to horizontal convergences of 838, 824, and 740 mm. The relative error of the model compared to the field data was estimated at 5%, 3%, and 8%, respectively. Due to the presence of layers with different strengths, the extension of the plastic zone at various distances from the intersection exhibits a completely asymmetric behavior. Furthermore, the presence of a coal seam at the tunnels floor not only intensifies the extent of the plastic zone but also directly leads to floor instability and heave.

Review History:

Received: Apr. 27, 2024

Revised: Jun. 02, 2026

Accepted: Jun. 12, 2026

Available Online: Jun. 26, 2026

Keywords:

Numerical Modeling

Bifurcated Intersection

Induced Stresses

Extent of the Plastic Zone

Tabas Mine

1- Introduction

Underground tunnels are essential for transportation, energy, water, and mining [1–3]. In underground mines, tunnel intersections are the most critical points due to sudden geometric changes and induced stress concentrations [4,5]. Among intersection types, bifurcations (where a main tunnel splits into two branches) are particularly challenging. The middle rock pillar between the two branches experiences high compressive and shear stresses, making it the most stability-sensitive zone [6].

Numerical methods, especially the finite difference method, are widely used to analyze intersection stability [7]. Previous studies have shown that intersection angle, excavation sequence, and support systems greatly affect stability [8,9]. Combined support systems (fully grouted rockbolts, long cables, steel sets) have been proven effective [10,11]. This study investigates the H16 bifurcated intersection in the Parvadeh Tabas coal mine (slope tunnel S2 and access tunnel MG5 at ~570 m depth). The aim is to determine induced stresses, stress concentration, and plastic zone extent using FLAC3D. Model results are validated with

field monitoring data, and the effect of a weak coal seam at the tunnel floor on plastic zone development is evaluated.

2- Methodology

The Parvadeh coal mine, the first mechanized coal mine in Iran, has an annual production capacity of about 2.5 million tonnes of raw coal [12]. The study area consists of mudstone, siltstone, sandstone, and coal seams (B1, B2, C1, C2, D), with seam C1 being the most important in terms of thickness and stability [13]. The investigated H16 bifurcated intersection connects the slope tunnel S2 and the access tunnel MG5 at a depth of about 570 m with an intersection angle of 78°. The slope tunnel has a Dshaped crosssection (width 5.6 m, height 3.95 m), which gradually widens to a trapezoidal shape (width 6.9 m) at the intersection. The access tunnel initially has an irregular trapezoidal crosssection at the intersection, then transitions to a regular trapezoid and finally to a Dshaped section.

A finite difference method using FLAC3D software was used to simulate the rock mass behavior around the H16 intersection. The model dimensions (100×70×100) were

*Corresponding author's email: satar.mahdevari@aut.ac.ir

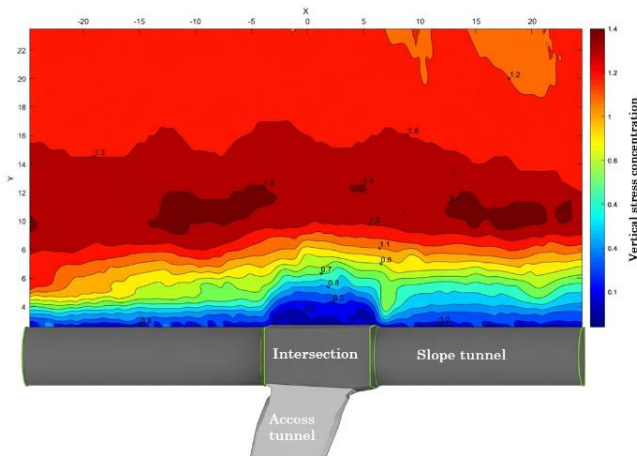


Fig. 1. Contours of vertical induced stress concentration in the right wall of the slope tunnel.

determined based on the Saint Venant principle (five times the tunnel width) to minimize boundary effects [14,15]. The insitu stress ratio (horizontal to vertical) was set to $K=1.15$ based on field measurements. The Mohr-Coulomb constitutive model was adopted, and the staged excavation sequence followed the actual mining plan. The proposed support system includes fully grouted rockbolts (22 mm diameter, 2.4 m length), long cable anchors (9 m), flexibolts (6 m), steel sets (TH36, IPB260, IPB320), and wire mesh. Model validation was performed using field monitoring data from three sections (2792, 2795, 2798) over five months. The maximum horizontal displacements were 419, 412, and 370 mm, corresponding to relative errors of 5%, 3%, and 8%, respectively. These results confirm the good accuracy of the numerical model.

3- Results and Discussion

The numerical analysis shows that the maximum vertical induced stress (25.5 MPa) occurs on the left side of the H16 bifurcation, in the area between the slope and access tunnels. The stress concentration factor (ratio of induced stress to initial insitu stress) reaches 1.7 near the left side of the intersection. Figure 1 presents the contours of vertical induced stress concentration in the right wall of the slope tunnel. A notable finding is that even at a distance of 23 m from the intersection center, the induced vertical stress has not returned to its initial value (14.9 MPa), indicating a wide zone of stress disturbance caused by the excavation. The three-dimensional view of induced stresses (Figure 2) clearly shows that the left side of the intersection (with a smaller angle) experiences significantly higher stress levels than the right side, with the maximum stress occurring closer to the sharp corner. The stress distribution follows a domeshaped pattern: initially increasing, then gradually decreasing with a mild slope due to the wide extent of the disturbed zone.

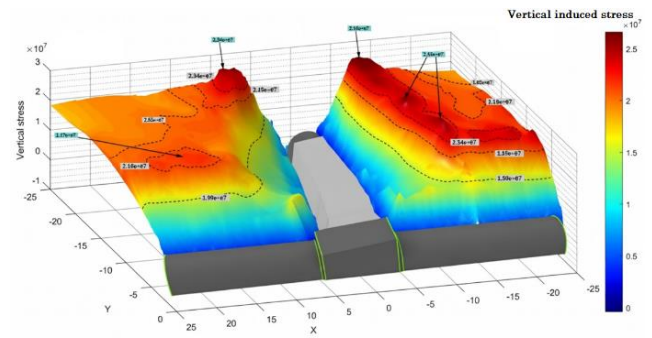


Fig. 2. Three dimensional view of vertical induced stresses on both sides of the bifurcation intersection

The plastic zone around the bifurcation exhibits a strongly asymmetric behavior, primarily due to the presence of alternating stiff and weak rock layers. As shown in Figure 3, before excavation of the access tunnel, the plastic zone is concentrated mainly at the crown and floor of the inclined tunnel. After excavation of the access tunnel, the plastic zone expands significantly, especially in the floor (up to 8.7 m depth) compared to the crown (about 5.7 m). This asymmetry becomes even more pronounced at the intersection itself. In some areas, the plastic zone extends up to 14 m on the obtuse angle side and more than 16 m on the acute angle side of the middle rock pillar, while in other regions it remains limited to 8–9 m. These results confirm that the local geology and excavation sequence directly control the yielding mechanism.

The position of the weak coal seam relative to the tunnel cross-section plays a decisive role in plastic zone development. When the weak layer is located in the tunnel roof, its influence on plastic zone expansion is limited. However, when the weak coal seam is present at the tunnel floor, the plastic zone expands dramatically downward, leading to severe floor instability and heave.

This finding is critical for deep coal mines. Therefore, numerical modeling must accurately incorporate geological layering, and support system design should pay special attention to floor conditions. Measures such as deep floor anchors, increasing floor bearing capacity, and combined support systems (fully grouted rockbolts, long cables, and steel sets) are recommended to control plastic zone development and enhance long-term stability of bifurcated intersections.

4- Conclusion

In this study, the stability of the H16 bifurcated intersection in the Parvadeh Tabas coal mine was evaluated using the finite difference method (FLAC3D). The main numerical findings are summarized as follows: The maximum vertical induced stress in the area between the two tunnels reached 25.5 MPa on the left side of the intersection, which is 1.7 times the

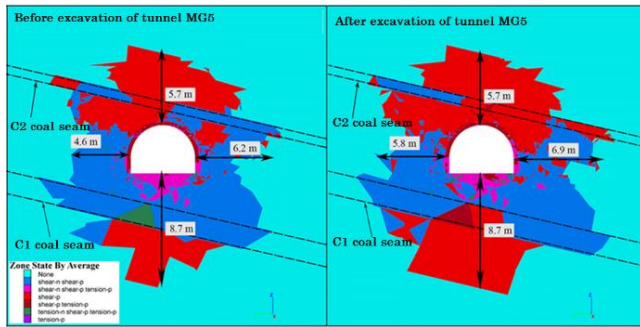


Fig. 3. Plastic zone at distances of 15 m before and after excavation of the access tunnel

initial vertical stress. The stress distribution in the rock mass between the two tunnels follows a domeshaped pattern: it first increases and then decreases with a milder slope, indicating the wideranging influence of the intersection on the stress field. As the distance from the intersection center increases, the extent of the plastic zone continuously decreases in both tunnels; therefore, the most critical zone is the immediate vicinity of the intersection. The presence of inclined layers with different strengths creates an asymmetric plastic zone. The weak coal seam at the tunnel floor intensifies the plastic zone and directly leads to floor heave, whereas the same seam in the roof has little effect on plastic zone expansion. The measured convergence at various points exceeded 400 mm, and its increasing trend continued even after several months, indicating that the rock mass has not reached a stable equilibrium.

References

- [1] Maidl, B., Thewes, M., and Maidl, U., 2013. *Handbook of Tunnel Engineering*. Wiley, Hoboken.
- [2] Kolymbas, D., 2005. *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Springer, Berlin.
- [3] Mahdevari, S., 2026. "Intelligent forecasting of tunnel deformation in underground coal mines using a dynamic swarm-tuned adaptive neuro-fuzzy inference system for knowledge-driven ground control". *Advanced Engineering Informatics*, 71, 104287.
- [4] Liu, X., and Wang, Y., 2010. "Three dimensional numerical analysis of underground bifurcated tunnel". *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447–455.
- [5] Gharouni Nik, M., and Farmahini Farahani, A., 2016. "Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(2), 191–198.
- [6] Hsiao, F.-Y., Yu, C.-W., and Chern, J.-C., 2005. "Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsuehshan tunnel". In *World Long Tunnels*, pp. 81–90.
- [7] Khetwal, A., Khetwal, S., Sharma, K.G., and Panciera, A., 2023. "A 3-dimensional numerical analysis of the intersection of tunnels and shafts". In *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World – Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023*, pp. 1608–1615.
- [8] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., and Wang, C., 2013. "Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189–204.
- [9] Chortis, F., and Kavvas, M., 2021. "Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections". *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 1771–1793.
- [10] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., and Ye, Q., 2022. "Failure analysis and control technology of intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock". *International Journal of Coal Science & Technology*, 9, 19.
- [11] Wu, Y.Y., He, M.C., Li, H., Gao, Y.B., and Xie, S.R., 2024. "Instability mechanism and energy evolution of surrounding rock at intersections of deep multi-form application". *Journal of Central South University*, 31(3), 890–911.
- [12] IRITEC, 2003. "Tabas Coal Mine Project, Detailed design report Vol 1, underground mine revision B". Technical report.
- [13] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., and Tannant, D.D., 2017. "Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks". *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3537–3555.
- [14] Toupin, R.A., 1965. "Saint-Venant's Principle". *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 18(2), 83–96.
- [15] Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., 1951. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.



مدلسازی عددی و ارزیابی پایداری انشعاب دو شاخه H۱۶ در معدن زغال سنگ طبس

ستار مهدوری^{ID}*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

کلمات کلیدی:

مدلسازی عددی
انشعاب دوشاخه
تنش‌های القایی
وسعت ناحیه پلاستیک
معدن طبس

خلاصه: طراحی شبکه تونل‌ها در معادن زیرزمینی ذاتاً پیچیده است و ناگزیر به ایجاد انشعاب‌ها و تقاطع‌های گوناگون است. پایداری این تقاطع‌ها مستقیماً ایمنی و بازدهی معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر، یکی از تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال سنگ پروده طبس (انشعاب دو شاخه H۱۶) مورد مطالعه قرار گرفته است. روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC3D) برای محاسبه سه مؤلفه توزیع تنش‌های القایی، تمرکز تنش و وسعت ناحیه پلاستیک به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه تنش قائم القایی در محدوده بین دو تونل و در جانب چپ تقاطع به ۲۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد. در همین ناحیه (چپ تقاطع)، تمرکز تنش در همسایگی تونل شیب‌دار به ۱/۶ و در مجاورت تونل دسترسی به ۱/۷ افزایش می‌یابد. در سقف تونل دسترسی، فاصله گرفتن از محل انشعاب با افزایش تدریجی تنش همراه است؛ پدیده‌ای که به مقطع غیردایروی و عریض این تونل نسبت داده می‌شود. میزان خطای مدلسازی در سه مقطع مورد بررسی با بیشینه جابجایی به ترتیب ۴۱۹، ۴۱۲ و ۳۷۰ میلی‌متر که معادل همگرایی افقی ۸۳۸، ۸۲۴ و ۷۴۰ میلی‌متر می‌باشند، محاسبه گردید. خطای نسبی مدل نسبت به داده‌های میدانی به ترتیب ۵٪، ۳٪ و ۸٪ برآورد شده است. به دلیل وجود لایه‌هایی با مقاومت ناهمسان، گسترش ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع رفتاری کاملاً نامتقارن نشان می‌دهد. افزون بر این، حضور لایه زغال سنگ در کف تونل‌ها، نه تنها دامنه ناحیه پلاستیک را تشدید می‌کند، بلکه مستقیماً به ناپایداری و بالازدگی کف می‌انجامد.

۱- مقدمه

سازه‌های زیرزمینی، به ویژه تونل‌ها، نقش ستون فقرات زیرساخت‌های مدرن را در حوزه‌های حمل‌ونقل، انتقال انرژی، آب و بهره‌برداری معدنی ایفا می‌کنند [۱]. رشد شتابان شهرنشینی و افزایش تقاضا برای منابع عمیق زمین، مهندسان را ناگزیر به احداث تونل در شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی پیچیده‌تر کرده است [۲]. در معادن زیرزمینی، شبکه‌های تونلی نه تنها دسترسی به لایه‌های معدنی را ممکن می‌سازند، بلکه وظایف حیاتی تهویه، جابه‌جایی مواد و ایمنی نیروی انسانی را نیز بر عهده دارند [۳]. در این میان، تقاطع تونل‌ها به دلیل تغییر ناگهانی هندسه، همپوشانی میدان‌های تنش و تمرکز تنش‌های القایی، حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین نقاط هر شبکه زیرزمینی به شمار می‌روند [۴-۶].

در شبکه تونل‌های یک معدن زیرزمینی، بسته به زاویه انشعاب، تعداد انشعابات و اهداف طراحی، انواع گوناگونی از تقاطع پدید می‌آید. رایج‌ترین

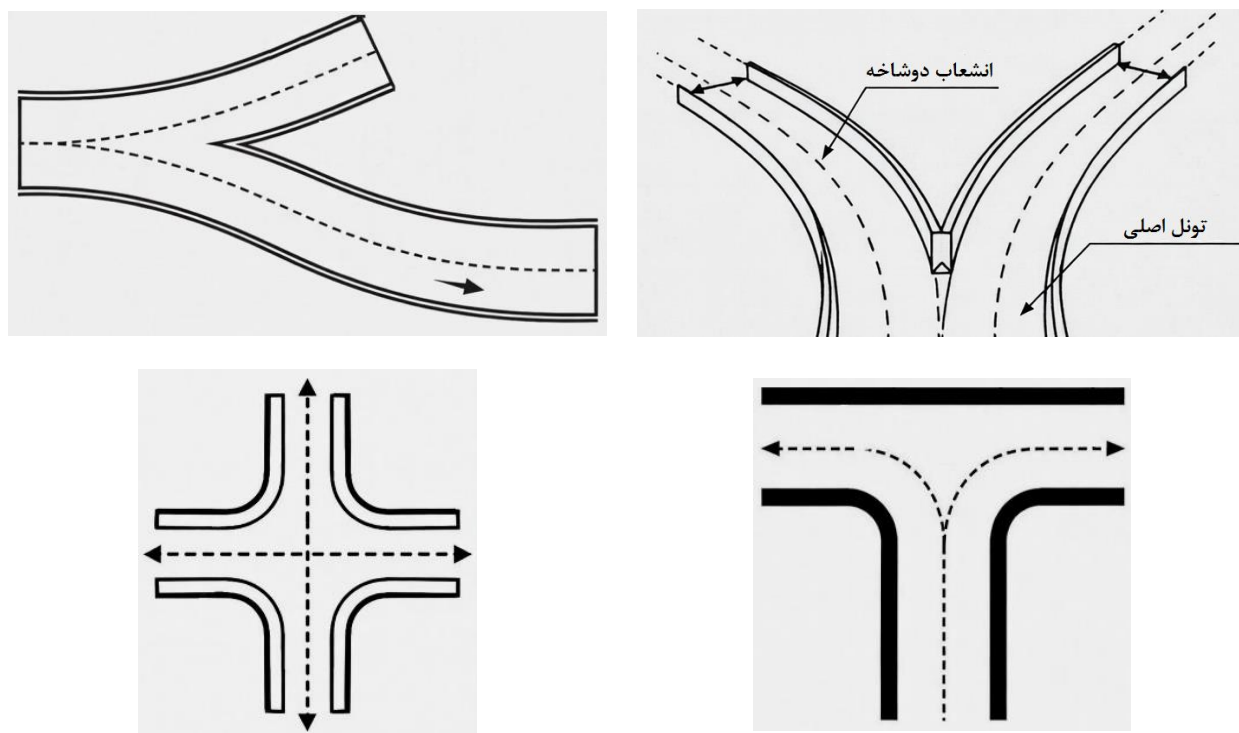
انواع شامل تقاطع دوشاخه^۱ (که در آن یک تونل اصلی به دو شاخه تقریباً هم‌اندازه تقسیم می‌شود)، تقاطع Y-شکل (انشعاب با زاویه حاده)، تقاطع T-شکل (انشعاب عمود بر تونل اصلی) و تقاطع چهارراه است [۶-۹]. در معادن زغال سنگ عمیق، تقاطع‌های دوشاخه اغلب در محل اتصال تونل‌های شیب‌دار به تونل‌های دسترسی افقی یا گالری‌های اصلی رخ می‌دهند. ویژگی هندسی بارز این تقاطع‌ها، وجود یک پایه سنگی میانی بین دو شاخه است که تحت تأثیر تمرکز تنش‌های فشاری و برشی، بحرانی‌ترین ناحیه از نظر پایداری به شمار می‌رود [۱۰، ۱۱]. علاوه بر هندسه، عواملی چون زاویه انشعاب، نسبت تنش‌های برجا، نوع سیستم نگهداری و لایه‌بندی زمین‌شناسی نیز در رفتار مکانیکی تقاطع نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. شکل ۱ نمایی شماتیک از انواع تقاطع‌های متداول در معادن زیرزمینی و اجزای کلیدی یک تقاطع دوشاخه را نشان می‌دهد.

از جمله چالش‌برانگیزترین پیکربندی‌های هندسی در سازه‌های

1. Bifurcation

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: satar.mahdevari@aut.ac.ir





شکل ۱. نمایی شماتیک از انواع تقاطع در معادن زیرزمینی.

Fig. 1. Schematic view of intersection types in underground mines.

بر پایداری تقاطع متمرکز بوده‌اند. مدلسازی عددی در حالت‌های مختلف با تغییر سه پارامتر عمق، نسبت تنش برجا و زاویه تقاطع نشان می‌دهد که تقاطع با زاویه ۳۰ درجه بحرانی‌ترین حالت را دارد و افزایش تنش برجا و عمق منجر به افزایش قابل توجه تغییر شکل‌ها می‌شود [۱۴]. احداث تونل انشعاب عمود بر تونل اصلی باعث بارگذاری فشاری در دیواره تونل اصلی و بارگذاری کششی در تاج و کف تقاطع می‌شود [۱۶]. نتایج یک مطالعه تجربی-عددی با روش تفاضل محدود نشان داد که افزایش زاویه تقاطع سبب افزایش پایداری تقاطع خواهد شد و تأثیر ترتیب حفاری بر پایداری تقاطع در زوایای مختلف یکسان است [۱۷، ۱۸]. بهترین ترتیب حفاری در تونل‌های متقاطع غیرهم‌اندازه، به زاویه برخورد بستگی دارد. برای زاویه ۳۰ درجه، ابتدا حفاری تونل اصلی و سپس تونل فرعی مناسب‌ترین است. برای زاویه ۶۰ درجه، ابتدا حفاری تونل فرعی و سپس تونل اصلی توصیه می‌شود. برای زاویه ۹۰ درجه، حفاری همزمان هر دو تونل بهترین پایداری را به همراه دارد [۱۹].

در مورد تقاطع‌های دوشاخه با هندسه نامنظم و دهانه بزرگ، تحلیل غیرخطی با روش تفاضل محدود نشان می‌دهد که نواحی دارای هندسه

زیرزمینی، تقاطع دوشاخه است که در آن دو تونل با زاویه قائمه یا حاده به یکدیگر متصل می‌شوند [۴]. در این نواحی، لزوم افزایش سطح مقطع در محل اتصال، سبب می‌شود دهانه تونل‌ها به طور محسوسی بزرگ‌تر از مقاطع عادی گردد. پیامد مستقیم این افزایش دهانه، تشدید تغییر شکل‌های توده‌سنگ و افت چشمگیر پایداری سازه در محل تقاطع است [۱۲]. هرگونه ناپایداری در این محدوده، از ریزش سقف و ترک‌خوردگی دیواره گرفته تا بالازدگی کف، نه تنها یک پدیده موضعی نیست، بلکه می‌تواند به سرعت به کل شبکه تونل تسری یافته و خسارات جانی و مالی سنگینی به بار آورد. از این رو، تحلیل کمی الگوی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها و پیش‌بینی دقیق رفتار توده‌سنگ پیرامون تقاطع‌های دوشاخه، به یکی از ضروری‌ترین گام‌ها در فرآیند طراحی ایمن و اقتصادی معادن عمیق محسوب می‌شود [۱۳].

روش‌های عددی به دلیل توانایی در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده، شرایط مرزی غیرخطی و رفتار الاستوپلاستیک توده‌سنگ، بیش از سایر روش‌ها برای تحلیل پایداری تقاطع تونل‌ها در معادن زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۴، ۱۵]. بسیاری از پژوهش‌های اولیه بر تأثیر پارامترهایی نظیر نسبت تنش افقی به قائم، زاویه برخورد انشعاب‌ها و امتیاز توده‌سنگ

از سوی دیگر، پژوهش‌هایی که به بررسی ترتیب حفاری پرداخته‌اند، نشان می‌دهند که ترتیب حفاری تأثیر قابل توجهی بر الگوهای تغییر شکل دارد. همچنین حفاری تونل دسترسی پس از تونل اصلی، می‌تواند ناحیه پلاستیک اطراف تونل اصلی را تا بیش از ۱/۵ برابر قطر تونل دسترسی گسترش دهد [۵]. در تقاطع‌هایی که سطح مقطع در محل برخورد به شکل دوزنقه یا نامنظم تعریض می‌شود، توزیع تنش به شدت نامتقارن بوده و گوشه‌های تیز بیشترین آسیب را می‌بینند [۱۲، ۲۹]. ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع تونل به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از سایر نواحی است و عمدتاً در دیواره جانبی و تاج تونل متمرکز می‌شود. همچنین حفاری تونل انشعابی تأثیر قابل توجهی بر تونل اصلی و سطح زمین دارد و ناحیه پلاستیک در منطقه تقاطع در مقایسه با مقطع تونل بزرگ‌تر است [۱۶، ۳۰].

به طور خاص در مورد معدن زغال‌سنگ پروده طبس، پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. مدلسازی عددی پایداری تونل‌های اصلی این معدن در محل برخورد با لایه زغال‌سنگ [۱۰] و طراحی سیستم نگهداری و تعیین زمان بهینه نصب آن به روش تفاضل محدود [۳۱] از جمله این پژوهش‌ها هستند. پژوهش حاضر به بررسی پایداری تقاطع دوشاخه‌ی H16 در معدن زغال‌سنگ پروده طبس می‌پردازد. این تقاطع از برخورد تونل شیب‌دار شماره ۲ (S2) با تونل دسترسی به گالری شماره ۵ (MG5) در عمق حدود ۵۷۰ متری پدید آمده است. هدف اصلی، تعیین میدان تنش‌های القایی، تمرکز تنش و گستردگی ناحیه‌ی پلاستیک پیرامون تقاطع با استفاده از روش عددی تفاضل محدود (FLAC3D) است. برای صحت‌سنجی مدل، نتایج مدل‌سازی با داده‌های حاصل از پایش میدانی مقایسه و محدوده ایمن در نواحی مختلف شده است. همچنین، تأثیر لایه‌بندی ناهمگن زمین‌شناسی و نیز حضور لایه ضعیف زغال‌سنگ در کف بر گستردگی ناحیه پلاستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- معرفی معدن زغال‌سنگ پروده طبس

معدن زغال‌سنگ پروده طبس، نخستین معدن مکانیزه ایران، از سال ۱۳۸۶ مورد بهره‌برداری قرار گرفته و ظرفیت تولید سالانه آن در حدود ۲/۵ میلیون تن زغال‌سنگ خام است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس، در استان خراسان جنوبی واقع شده است. ساختار زمین‌شناسی ناحیه پروده از چندین گسل بزرگ با روند شرقی‌غربی تشکیل شده که توسط گسل‌های کوچک‌تر به بخش‌های مجزایی تقسیم می‌شوند. پهنه زغال‌خیز پروده از سمت غرب به گسل کلمرد و از سمت شرق به گسل نایبند که هر دو

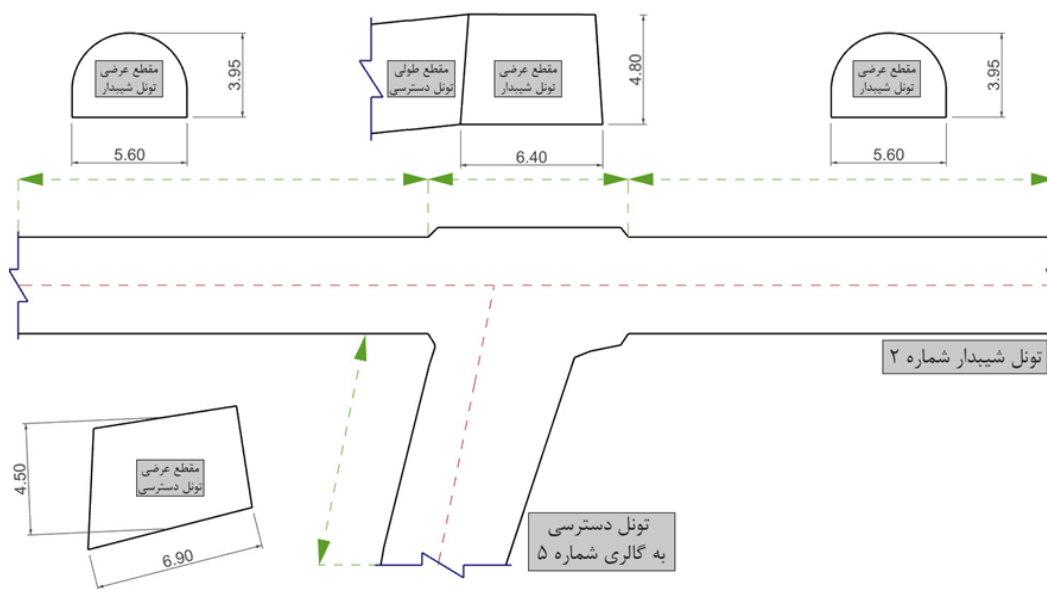
نامنظم در محل تقاطع با تمرکز تنش شدید و تغییر شکل‌های بزرگ همراه هستند و نیازمند طراحی سیستم نگهداری ویژه می‌باشند [۱۲]. یکی از یافته‌های کلیدی، نقش حیاتی پایه سنگی میانی در حفظ پایداری تقاطع‌های دوشاخه با فاصله کم است که به چگالی توده‌سنگ، چسبندگی و مدول الاستیسیته بستگی دارد و از طریق نسبت عرض به دهانه، نشست تاج تونل و همگرایی افقی ارزیابی می‌شود. بنابراین تقویت ستون سنگی میانی و حفظ یکپارچگی آن، به عنوان مهم‌ترین عامل پایداری تقاطع‌های دوشاخه شناخته می‌شود [۱۳]. برای ارزیابی پایداری تقاطع تونل‌ها با تقریب‌های شبه-سه‌بعدی و روابط تحلیلی فرم بسته، توزیع تنش و تغییر شکل در محل تقاطع محاسبه می‌شود. این روش با در نظر گرفتن معیار شکست موهر-کولمب و استفاده از نمودارهای تنش مجاز، امکان شناسایی نواحی مستعد گسیختگی برشی را فراهم می‌آورد [۲۰].

در زمینه سیستم‌های نگهداری، پژوهش‌های متعددی کارایی سیستم‌های ترکیبی (پیچ‌سنگ تمام‌تزیقی همراه با کابل‌های بلند و قاب‌های فولادی) را تأیید کرده‌اند [۲۱، ۲۲]. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که اعمال پیش‌تنیدگی در انکرهای بلند، ضمن بهبود یکپارچگی توده‌سنگ، ظرفیت خودنگهداری آن را افزایش می‌دهد [۲۳]. بر اساس تحقیقات زمین‌شناسی، تحلیل نظری و شبیه‌سازی عددی، سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌سنگ، مش فلزی و شاتکریت برای تقاطع‌های تونل در معادن زغال‌سنگ پیشنهاد شده است [۲۴، ۲۵]. برای شبیه‌سازی سیستم نگهداری قوس-پیچ در تونل‌های با تغییر شکل بزرگ از طریق توسعه نرم‌افزار FLAC3D و افزودن چهار ماژول اصلی (قوس نگهداری قابل‌تسلیم، اندرکنش جداشونده قاب-سنگ، پیچ‌سنگ شکستنی، و توده‌سنگ عملیاتی) یک رویکرد عددی بهبودیافته ارائه شده است که قابلیت اطمینان بیشتری در شبیه‌سازی رفتار تونل‌ها دارد [۲۶]. به منظور حل مشکل تغییر شکل‌های بزرگ در تقاطع راهروهای سنگی نرم با مقطع بزرگ در عمق زیاد، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که زاویه بهینه ۹۰ درجه و نصب کابل‌های مهار فولادی با نسبت پواسون منفی^۱ تأثیر کنترل مناسبی بر تغییر شکل‌های بزرگ دارد [۲۷]. برای بررسی اندرکنش سیستم نگهداری ترکیبی پیچ‌سنگ-کابل و توده‌سنگ و اسکوالاستو-پلاستیک، شبیه‌سازی عددی با مدل موهر-کولمب (الاستیک-کاملاً پلاستیک) و مدل خزش برگز نشان می‌دهد که اگر سیستم نگهداری درون ناحیه پلاستیک قرار گیرد، کارایی آن در کنترل تغییر شکل‌ها محدود بوده و نیاز به تمهیدات قوی‌تری دارد [۲۸].

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۳۲].

Table 1. Physical and mechanical properties of rock layers in the study area [32].

واحد سنگی	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	نسبت پواسون
لای سنگ	۲۴۰۰	۱/۲۷	۰/۷۲	۱۸	۰/۲۵
لای سنگ-ماسه‌ای	۲۶۰۰	۲/۱۷	۰/۲۱	۲۷	۰/۲۵
ماسه سنگ	۲۷۰۰	۲/۱۶	۱/۲۲	۲۷	۰/۲۵
زغال سنگ	۱۶۰۰	۰/۶۲	۰/۴۲	۱۲	۰/۳۲



شکل ۲. نمای دید از بالا و مقاطع عرضی محدوده تقاطع دوشاخه H16.

Fig. 2. Top view and cross sections of the H16 bifurcation intersection area

تشکیل شده و لایه زغال سنگ C2 نیز در سقف مشاهده می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در جدول ۱ گردآوری شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تقاطع دوشاخه H16 دارای سطح مقطع عریض و هندسه‌ای نامتقارن است. این تقاطع در عمق ۵۷۰ متری، تونل شیب‌دار S2 را با تونل دسترسی MG5 و با زاویه ۷۸ درجه به یکدیگر متصل می‌کند. هندسه تونل شیب‌دار S2 از مقطع D-شکل با عرض ۵/۶ متر و ارتفاع ۳/۹۵ متر تشکیل شده است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع این تونل به تدریج و با افزایش عرض از هر دو دیواره (چپ و راست)

در راستای شمالی جنوبی گسترش یافته‌اند، محدود می‌گردد. سنگ‌های منطقه بیشتر از گل سنگ، توالی لایه‌های لای سنگ (سیلت‌استون) و ماسه سنگ تشکیل شده‌اند؛ همچنین لایه‌های سنگ آهک نیز به صورت پراکنده قابل مشاهده است [۳۲].

لایه‌های اصلی زغال سنگ در این ناحیه شامل لایه‌های B1، B2، C1، C2 و D هستند. از میان آن‌ها، لایه C1 از نظر ضخامت و پایداری، مهم‌ترین لایه زغال سنگ منطقه به شمار می‌رود [۳۳]. سطح مقطع تونل در ناحیه تقاطع دوشاخه عمدتاً از ماسه سنگ، لای سنگ و لای سنگ‌ماسه‌ای

نظر گرفته شوند، شرایط مرزی اعمال شده در آن مرزها تأثیر قابل توجهی بر توزیع تنش و تغییرشکل در اطراف تونل نخواهند داشت. رعایت این اصل باعث می‌شود که نتایج مدلسازی به پاسخ‌های یک محیط نیمه‌بی‌نهایت نزدیک شده و از خطاهای ناشی از محدودیت ابعاد مدل کاسته شود. بر اساس همین قاعده و با در نظر گرفتن عرض تونل شیب‌دار (۵/۶ متر) به عنوان طول مرجع، در پژوهش حاضر مطابق شکل ۳ ابعاد مدل $100 \times 70 \times 100$ متر تعیین گردیده است [۳۴-۳۶].

به دلیل وجود سازه‌های مختلف پیرامون این تقاطع (که بر اساس طرح معدن و عملیات استخراج تعیین شده‌اند)، حفاری هر تونل باعث اغتشاش در تنش بر جای منطقه شده و همپوشانی تنش‌های القایی را در پی دارد. عمق زیاد این تقاطع (۵۷۰ متر) خود سبب پیدایش تنش‌های برجای نسبتاً بزرگی شده است؛ به طوری که مقدار تنش قائم اولیه به ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. تنش قائم ناشی از وزن روباره به مرز بالایی مدل وارد شده است. مرزهای جانبی مدل در راستای افقی مهار شده‌اند و مرز کف نیز از جابجایی در هر دو جهت افقی و قائم ثابت گردیده است.

بر اساس نتایج آزمایش‌های برجا در محدوده تقاطع، نسبت تنش افقی به قائم برابر ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل رفتاری موهرکولمب برای توصیف رفتار مکانیکی توده‌سنگ استفاده شده است. سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز محدوده مورد مطالعه قرار دارد. در این تحلیل، اثر آب‌های زیرزمینی لحاظ نشده و تنها تنش‌های برجای زمین به عنوان شرایط اولیه اعمال گردیده است. علاوه بر این، زاویه شیب تونل S2 نسبت به خط افق حدود ۱۵ درجه و زاویه شیب تونل MG5 حدود ۶ درجه است. مراحل و ترتیب حفاری تونل‌های شیب‌دار و دسترسی مطابق شکل ۴ بوده و مدلسازی نیز به همین صورت انجام شده است.

سیستم نگهداری تونل شیب‌دار S2 شامل پیچ‌سنگ‌هایی به قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۲/۴ متر با آرایش منظم و فاصله‌داری ۱ متر است. این پیچ‌سنگ‌ها به صورت تمام‌طول با رزین تزریق شده و همراه با وایر مش نصب می‌شوند. همچنین قاب‌های فولادی کشویی TH36 با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر برای تأمین پایداری تونل به کار رفته‌اند؛ فضای خالی میان قاب فولادی و دیواره تونل با مواد پرکننده پوشانده می‌شود (شکل ۵).

با نزدیک شدن به محل تقاطع (تا شعاع ۹ متری از مرکز)، به دلیل افزایش عرض دهانه و سطح مقطع، از سیستم نگهداری تقویت‌شده استفاده شده است. در این ناحیه، پیچ‌سنگ‌هایی به طول ۲/۷ متر با آرایش متراکم‌تر نصب می‌گردد. در محل تقاطع، انکرهای پیش‌تنیده ۹ متری، فلکسی‌بولت‌های ۶

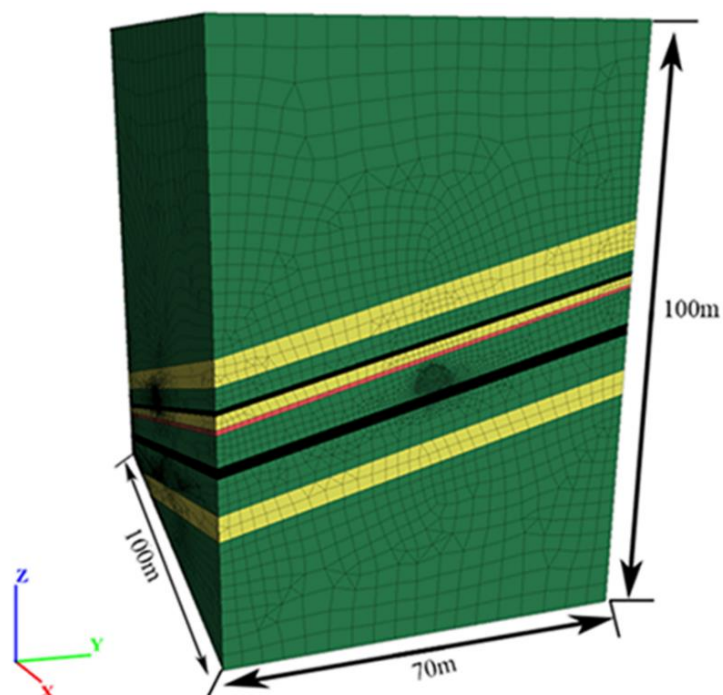
به یک مقطع دوزنقه‌ای تعریض می‌شود که عرض آن به ۶/۹ متر افزایش می‌یابد. پس از پایان عملیات حفاری تونل شیب‌دار در محل تقاطع، حفاری همزمان ادامه تونل شیب‌دار و تونل دسترسی آغاز می‌شود. در نقطه تقاطع، هندسه تونل دسترسی به صورت مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع نامنظم است. با دور شدن از محل تقاطع، سطح مقطع این تونل به طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ ابتدا به یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع منظم تبدیل می‌شود و پس از کاهش عرض به ۵/۶ متر، به مقطع D-شکل تغییر می‌یابد.

۳- نتایج مدلسازی عددی

۳-۱- روش مدلسازی و شرایط مرزی

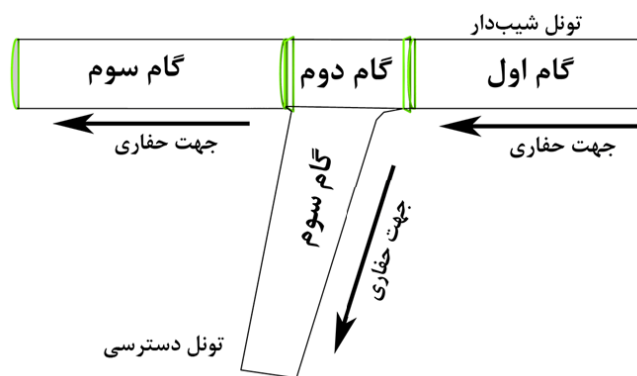
در پژوهش حاضر، از روش عددی تفاضل محدود به کمک نرم‌افزار FLAC3D برای شبیه‌سازی رفتار توده‌سنگ پیرامون تقاطع دوشاخه H16 در معدن طبس استفاده شده است. در واقع مدلسازی با فرض پیوسته بودن محیط انجام شده است. در مقیاس مدل (ابعاد چندین برابر عرض تونل)، اثر درزه و ترک‌های منفرد قابل صرف‌نظر است و رویکرد محیط پیوسته با پارامترهای معادل نظیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی می‌تواند رفتار کلی توده‌سنگ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. روش تفاضل محدود ذاتاً برای محیط‌های پیوسته طراحی شده و با استفاده از مدل رفتاری موهرکولمب و پارامترهای کاهش‌یافته (نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک معادل) می‌توان اثر ناپیوستگی‌ها را به طور ضمنی لحاظ کرد. همچنین عدم دسترسی به داده‌های دقیق از سامانه درزه و ترک در عمق ۵۷۰ متری، مدلسازی ناپیوسته را ناممکن می‌سازد.

به منظور نزدیک‌سازی هرچه بیشتر شرایط مدل به وضعیت واقعی زمین، ابعاد دامنه مدل بر اساس اصل سنت-ونانت و به میزان پنج برابر عرض تونل در نظر گرفته شد تا تأثیر شرایط مرزی بر پاسخ‌های کلی مدل به حداقل برسد. اصل سنت-ونانت یکی از مفاهیم بنیادین در مکانیک جامدات و روش‌های عددی است که به طور گسترده در مدلسازی سازه‌های ژئوتکنیکی و تونل‌ها به کار می‌رود. بر اساس این اصل، اگر سیستمی از نیروهای وارد بر یک ناحیه از بدنه جامد با یک سیستم استاتیکی معادل (همان برآیند نیرو و گشتاور) جایگزین شود، توزیع تنش و کرنش در نقاطی که به اندازه کافی از ناحیه اعمال نیرو دور هستند، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. به عبارت ساده‌تر، اثر یک اغتشاش موضعی (مانند حفاری تونل یا اعمال بار متمرکز) با فاصله گرفتن از منبع اغتشاش به سرعت کاهش یافته و ناچیز می‌شود. در مدلسازی عددی تونل‌ها، این اصل مبنای تعیین ابعاد دامنه مدل قرار می‌گیرد؛ اگر مرزهای مدل به اندازه کافی از محل حفاری دور در



شکل ۳. هندسه و نحوه مش بندی مدل عددی.

Fig. 3. Geometry and meshing of the numerical model.

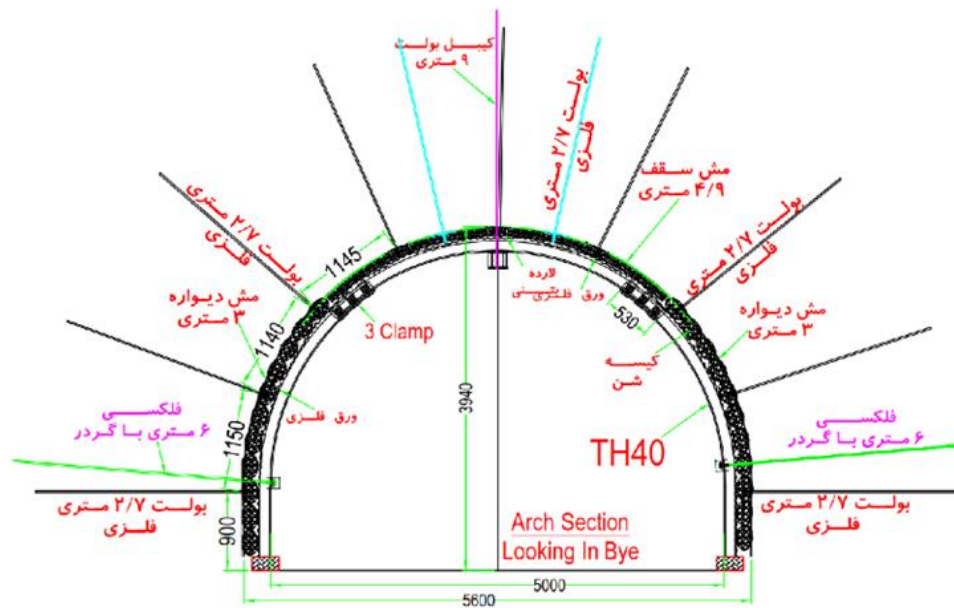


شکل ۴. مراحل و ترتیب حفاری تونل های شیب دار و دسترسی.

Fig. 4. Excavation stages and sequence of the slope and access tunnels.

مربعی و فاصله داری ۸۰۰ میلی متر نصب شده اند. همچنین در این تونل، فلکسی بولت ۶ متری در سقف و قاب های فولادی IPB260 به عنوان سیستم نگهداری به کار رفته است. مشخصات مکانیکی اجزای سیستم نگهداری در جدول ۲ ارائه شده است.

متری و پیچ سنگ هایی با فاصله داری ۸۰۰ میلی متر به کار گرفته شده اند. به دلیل افزایش سطح مقطع در محل تقاطع دوشاخه، به جای قاب های فولادی کشویی از تیرهای IPB260 و IPB320 استفاده شده است. در تونل دسترسی MG5، پیچ سنگ های تزریقی در سقف و دیواره با آرایش



شکل ۵. آرایش سیستم‌های نگهداری در مقطع تونل شیب‌دار.

Fig. 5. Arrangement of support systems in the cross section of the slope tunnel.

جدول ۲. مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی.

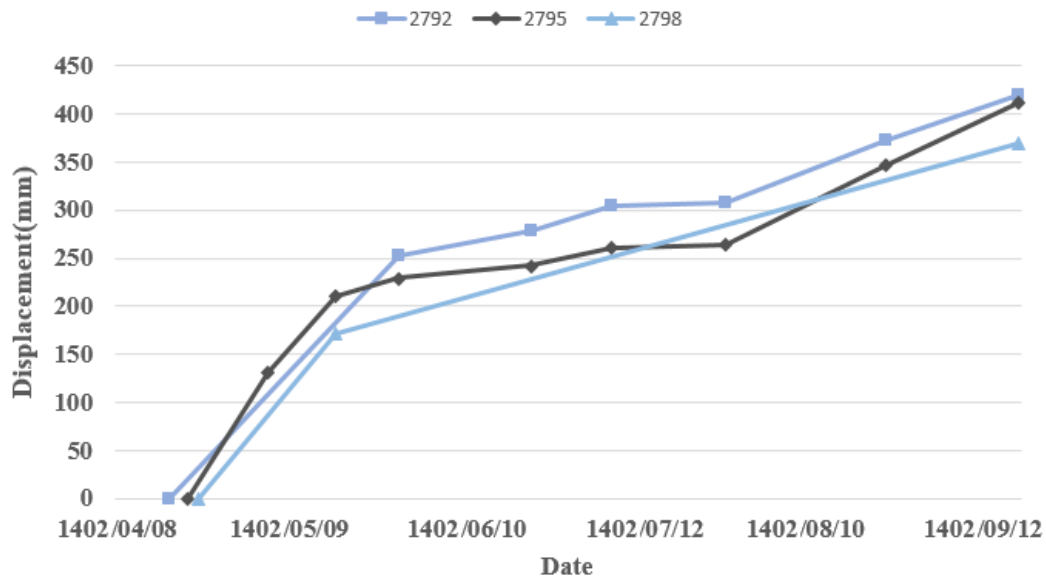
Table 2. Specifications of the proposed support system.

پیماسنگ	فلکسی بولت سقف	کابل انکر سقف	واحد	پارامتر
۲۲	۲۱/۷	۴۲	(mm)	قطر
۲/۴	۶	۹	(m)	طول
۳۱۰	۴۹۰	۶۰۰	(kN)	مقاومت کششی
۲۵۰	-	-	(kN)	مقاومت فشاری
		۲۵۰	(kN)	پیش تنیدگی
۱۸	-	-	(/)	کرنش مجاز
۲/۴	۴	۵	(m)	طول ناحیه انکراژ (باند)
رزین	رزین	دوغاب سیمان		مواد تزریق

می‌شود، جابجایی از مقدار نزدیک به صفر در ابتدای دوره آغاز شده و طی پنج ماه در برخی نقاط به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر رسیده است. این روند به صورت غیرخطی است: در دو ماه نخست، افزایش سریع جابجایی (فاز اولیه همگرایی) رخ داده و پس از آن، نرخ همگرایی تا حدودی کاهش یافته است.

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

به منظور ارزیابی اعتبار مدل عددی توسعه یافته در این پژوهش، نتایج شبیه سازی با داده های پایش میدانی همگرایی تونل مقایسه گردید. داده های پایش از سه مقطع مجزا (۲۷۹۲، ۲۷۹۵ و ۲۷۹۸) در بازه زمانی مرداد تا آذر ۱۴۰۲ (پنج ماه) برداشت شده اند. شکل ۶ روند زمانی جابجایی دیواره های تونل را نشان می دهد. همان طور که مشاهده



شکل ۶. جابه‌جایی افقی پایش شده در سه مقطع از تونل شیب‌دار.

Fig. 6. Monitored horizontal displacement in three sections of the slope tunnel.

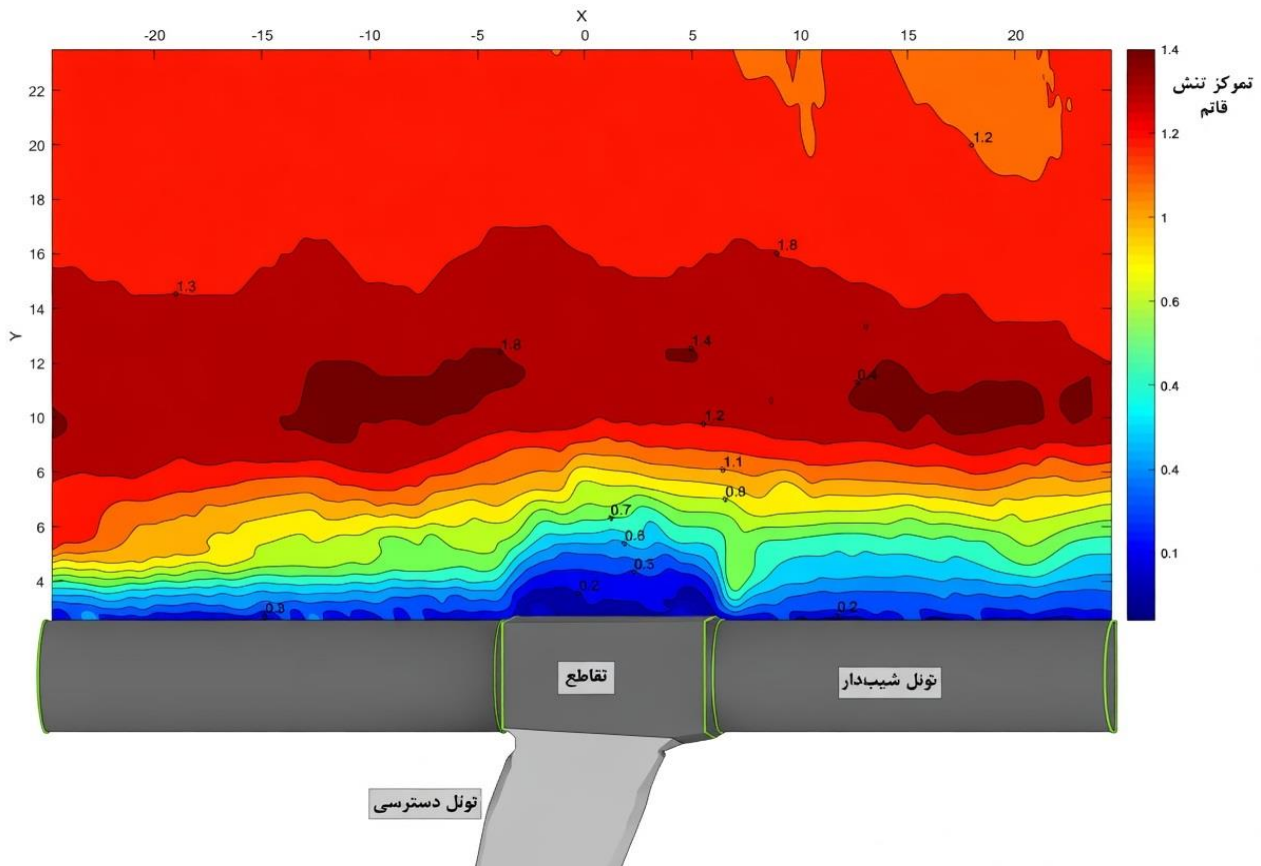
جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های پایش میدانی.

Table 3. Comparison of numerical simulation results with field monitoring data

مقطع	جابجایی میدانی (mm)	جابجایی مدل (mm)	خطای نسبی (%)
2792	۴۱۹	۴۴۰	۵
2795	۴۱۲	۴۲۴	۳
2798	۳۷۰	۴۰۰	۸

مدل عددی، عرض داخلی تونل در نتیجه حرکت دیواره‌ها به سمت داخل، به میزان ۸۰۱ میلی‌متر کاهش یافته است. جابجایی افقی دیواره چپ برابر ۰/۳۷ متر و دیواره راست برابر ۰/۴۵ متر محاسبه شده است. همچنین در تاج تونل، جابجایی قائم به مقدار ۱۰ سانتی‌متر ثبت گردیده است. در نهایت، میزان خطای مدلسازی در سه مقطع مورد بررسی با بیشینه جابجایی به ترتیب ۴۱۹، ۴۱۲ و ۳۷۰ میلی‌متر که معادل همگرایی افقی ۸۳۸، ۸۲۴ و ۷۴۰ میلی‌متر می‌باشند، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، خطای نسبی مدل نسبت به داده‌های

که نشان‌دهنده ورود سیستم به فاز ثانویه همگرایی می‌باشد. اما از اواخر مهر به بعد، مجدداً شتاب قابل توجهی در افزایش جابجایی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از پیشروی ناحیه پلاستیک یا تأثیر پیشرفت حفاری‌ها باشد. در میان سه مقطع، مقطع ۲۷۹۲ با ثبت بیشینه جابجایی حدود ۴۲۰ میلی‌متر حساس‌ترین پاسخ را نشان داد، در حالی که نقطه ۲۷۹۸ با حدود ۳۷۰ میلی‌متر کمترین جابجایی را تجربه کرد. این تفاوت را می‌توان به موقعیت متفاوت نقاط اندازه‌گیری نسبت به ضعف‌های ساختاری زمین (مانند درزه‌ها و لایه‌های ضعیف) یا الگوی نامتقارن تنش در مقطع تونل نسبت داد. بر اساس خروجی



شکل ۷. کانتورهای تمرکز تنش القایی قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار.

Fig. 7. Contours of vertical induced stress concentration in the right wall of the slope tunnel.

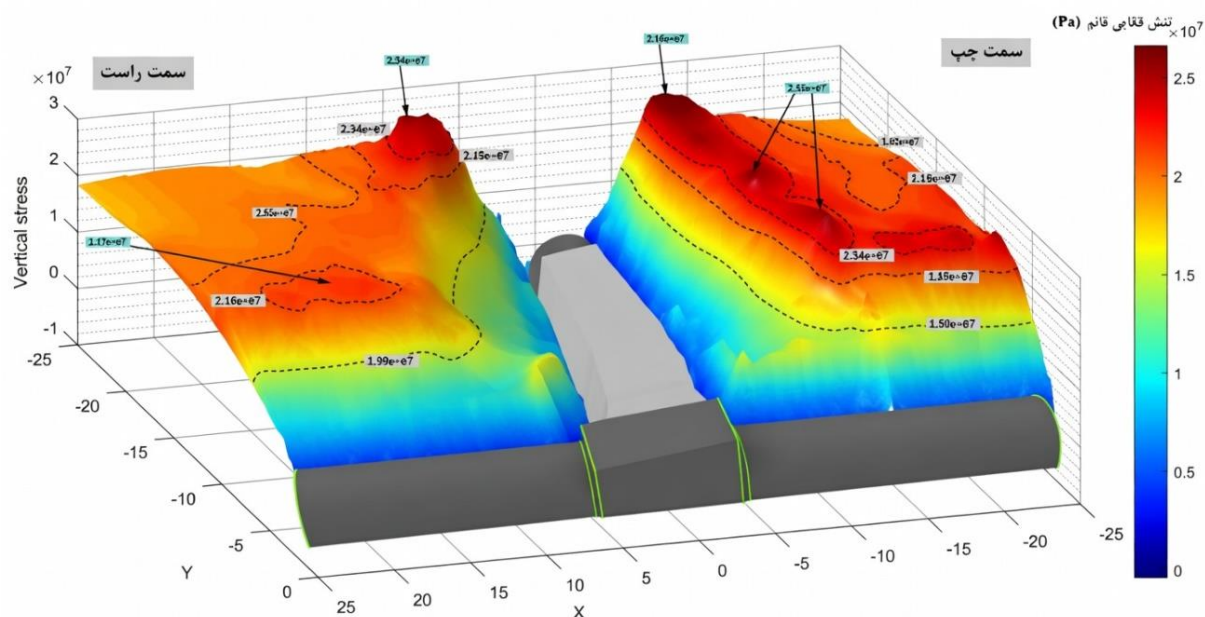
از ۱ نشان‌دهنده تمرکز تنش و مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده رهایی تنش هستند.

بیشینه تمرکز تنش قائم برابر با $1/7$ در فاصله تقریبی ۱۱ متر از مرکز تقاطع مشاهده شد. این نقطه حداکثر تمرکز تنش در بخش بالایی و جانبی تقاطع قرار دارد. شایان توجه است که حتی در فاصله ۲۳ متری از مرکز تقاطع، تنش القایی قائم هنوز به تنش قائم اولیه ($14/9$ مگاپاسکال) پیش از شروع عملیات حفاری بازنگشته است. این امر حاکی از آن است که تأثیر حفاری تونل شیب‌دار بر میدان تنش اطراف تقاطع، فراتر از فاصله‌های نزدیک بوده و تا شعاع نسبتاً وسیعی ادامه می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که نصب سیستم نگهداری، هرچند توانسته است از افزایش بیش از حد تنش در نزدیکی تونل‌ها جلوگیری کند، اما نمی‌توان به‌طور کامل میدان تنش را به شرایط اولیه بازگرداند. بنابراین، لازم است در طراحی سیستم نگهداری تقاطع‌های زیرزمینی اثرات بلندمدت و دامنه تأثیر حفاری تونل‌های مجاور به‌دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

میدانی به ترتیب 0.5% ، 0.3% و 0.8% برآورد شده است که در محدوده مطلوب قرار داشته و اعتبار مدل عددی تأیید می‌گردد.

۳-۳- تحلیل تنش‌های القایی

نتایج حاصل از تحلیل عددی توزیع تنش قائم در اطراف تقاطع تونل دسترسی و تونل شیب‌دار، به‌صورت کانتور در شکل ۷ ارائه شده است. این شکل نشان‌دهنده تغییرات تمرکز تنش قائم در محدوده اطراف تقاطع است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی توزیع تنش پس از حفاری تونل شیب‌دار و نصب سیستم نگهداری، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گرفته است. مناطق نزدیک به تونل‌ها شاهد کاهش قابل ملاحظه تنش قائم هستند، در حالی که با افزایش فاصله از تقاطع، تنش‌های القایی به‌تدریج به مقادیر بالاتر می‌رسند. فاکتور تمرکز تنش برابر است با نسبت تنش قائم القایی به تنش قائم برجای اولیه در همان نقطه پیش از حفاری. این کمیت نشان می‌دهد که تنش قائم در اثر حفاری چند برابر شده است. مقادیر بیشتر



شکل ۸. نمای سه بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه.

Fig. 8. Three dimensional view of vertical induced stresses on both sides of the bifurcation intersection.

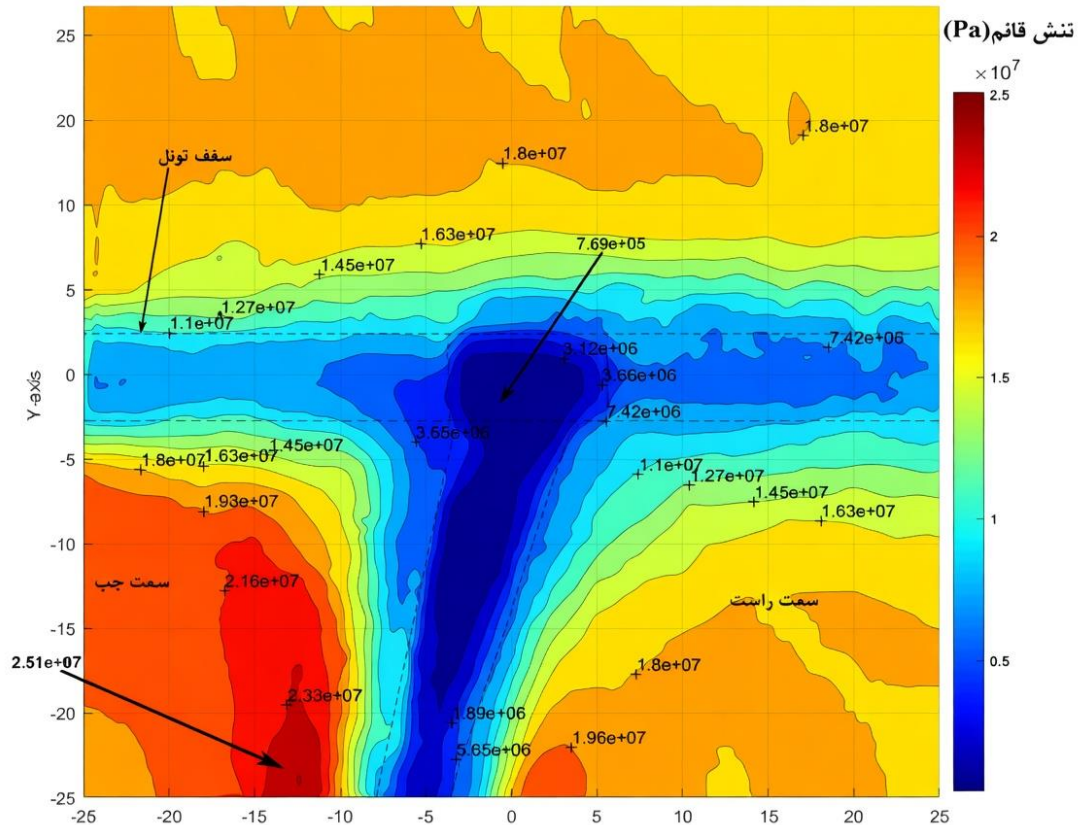
فاصله از محل تقاطع دوشاخه، تمرکز تنش در تونل دسترسی به‌طور قابل توجهی بیشتر از تونل شیب‌دار خواهد بود. بنابراین، تونل دسترسی در فواصل دورتر از تقاطع، تحت تأثیر تمرکز تنش بیشتری قرار می‌گیرد.

در شکل ۹، توزیع تنش قائم در امتداد خطی به فاصله ۱/۵ متر بالاتر از سقف تقاطع دوشاخه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش قائم در لبه سقف تونل شیب‌دار حدود ۱۱ مگاپاسکال است و رفتار متفاوتی را در سه ناحیه مورد بررسی (سقف سمت چپ تقاطع، سقف سمت راست تقاطع و دیواره سمت راست تونل شیب‌دار) نشان می‌دهد. در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار، تنش القایی قائم در فاصله تقریبی ۶ متری از لبه سقف تونل به مقدار اولیه خود بازمی‌گردد؛ با این حال، روند افزایشی تنش همچنان ادامه یافته و مقادیر آن به بیش از ۱۸ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین در ناحیه سقف سمت زاویه بسته تقاطع، تنش قائم در فاصله کمتر از ۳ متر از لبه به مقدار اولیه خود نزدیک می‌شود و سپس روند افزایشی خود را ادامه می‌دهد.

این نتایج حاکی از آن است که سقف تونل شیب‌دار و ناحیه تقاطع به سمت تونل دسترسی، به دلیل نصب سیستم نگهداری پیشنهادی، شاهد رهایی قابل توجه تنش بوده‌اند. کمینه مقدار تنش قائم ثبت‌شده در این ناحیه برابر با ۰/۷۶۹ مگاپاسکال است. همچنین بیشینه تنش القایی قائم در

برای وضوح بیشتر، نمای سه بعدی تنش‌های القایی قائم در هر دو سمت تقاطع دوشاخه نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به منحنی‌های توزیع تنش، سطح تنش قائم در توده سنگ سمت چپ که در محل تقاطع زاویه کمتری دارد، به مراتب بالاتر از سمت راست است. علاوه بر این، محدوده حداکثر تنش القایی قائم در سمت چپ نسبت به مقدار متناظر در سمت راست، در فاصله نزدیک‌تری از گوشه تیز تقاطع اتفاق می‌افتد؛ همچنین مقدار بیشینه و وسعت ناحیه با توزیع تنش شدیدتر در سمت چپ بیشتر است. به‌طور کلی روند تغییرات تنش‌های القایی قائم، در ابتدا به‌صورت پیوسته افزایشی بوده و سپس با دور شدن از تقاطع کاهشی و سپس ثابت می‌شود؛ به نحوی که به‌صورت کانتورهای هم‌تراز و گنبدی-شکل دارای یک مقدار بیشینه بوده و به تدریج با گسترش گنبد، کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه، ناحیه تمرکز تنش تا فاصله ۴۷ متری از گوشه تیز پایه سنگی ادامه یافته است. در این ناحیه، تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار به ۱/۰۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی به ۱/۷۱ افزایش یافته است. در سمت راست تقاطع دوشاخه نیز، تمرکز تنش در مجاورت تونل شیب‌دار به ۱/۴۷ و در مجاورت تونل دسترسی به ۱/۷۲ رسیده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش



شکل ۹. منحنی‌های تنش القایی قائم در فاصله ۱/۵ متر بالاتر از سقف تقاطع دوشاخه (دید از بالا).

Fig. 9. Vertical induced stress curves at a distance of 1.5 m above the roof of the bifurcation intersection (top view).

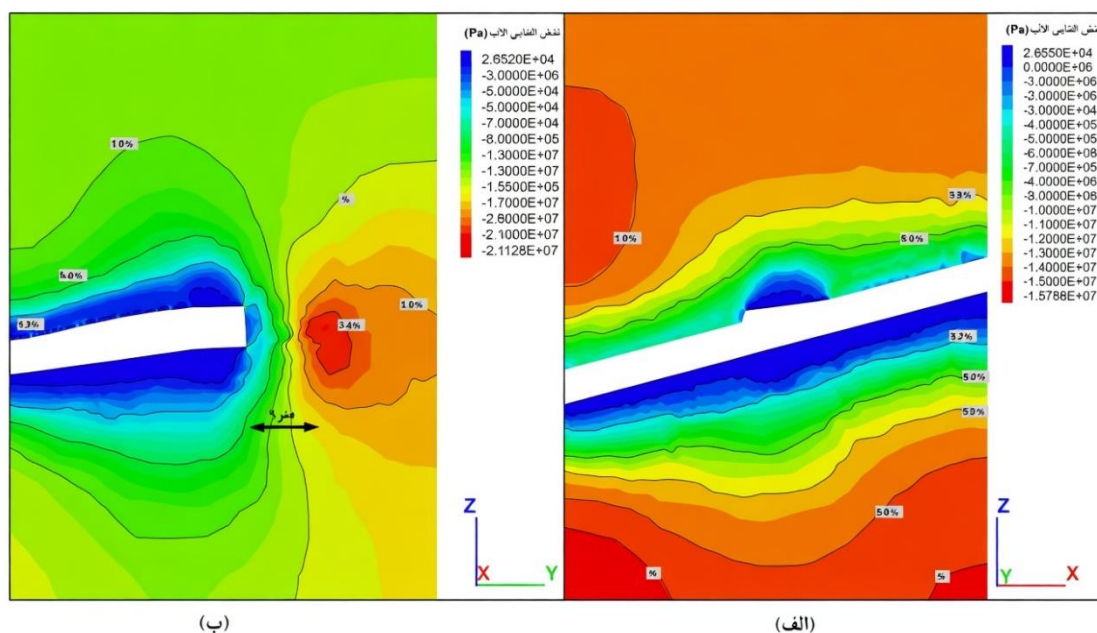
۳-۴- گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون تقاطع

الگوی گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع دوشاخه به شدت تحت تأثیر ناهمگنی لایه‌های زمین‌شناسی و موقعیت نسبی لایه ضعیف قرار دارد. در شکل ۱۱ توزیع نواحی تسلیم‌شده تونل شیب‌دار در فواصل ۱۵ متری قبل و بعد از حفاری تونل دسترسی با رنگ‌های مختلف بیانگر آن است که رفتار سنگ توده در اطراف مقطع، یکنواخت و متقارن نیست. در هر دو مقطع، بیشترین تمرکز ناحیه پلاستیک در تاج و کف تونل مشاهده می‌شود. دامنه گسترش ناحیه پلاستیک در طرفین تونل شیب‌دار، بعد از حفاری تونل دسترسی توسعه یافته است. همچنین در راستای قائم، گسترش ناحیه پلاستیک در کف (حدود ۸,۷ متر) به مراتب بیشتر از تاج (حدود ۵,۷ متر) بوده که نشان‌دهنده تمرکز تنش و ضعف ساختاری در ناحیه کف است.

در شکل ۱۲ که مربوط به تونل دسترسی و ناحیه تقاطع است، این ناهمگنی با وضوح بیشتری نمایان می‌شود. در نمای پلان و برش عرضی،

محدوده بین دو تونل و در جانب چپ تقاطع به ۲۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد. در مقابل، در سقف تونل دسترسی با افزایش فاصله از محل تقاطع، سطح تنش قائم روند افزایشی نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از سطح مقطع غیرمردور و نسبتاً عریض این تونل باشد.

در شکل ۱۰، میدان تنش‌های القایی قائم در صفحات موازی با جهت پیشروی تونل، برای هر دو تونل شیب‌دار و تونل دسترسی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود، سیستم نگهداری پیشنهادی عملکرد مناسبی در کنترل بالادگی کف تونل و محدود کردن جابه‌جایی‌های سقف داشته است. بر اساس شکل ۱۰-ب، در مقطع دوزنقه‌ای تونل، گوشه‌های تیز مقطع شاهد تمرکز تنش قابل توجهی هستند، در حالی که دیواره‌ها و سقف این مقطع تنش‌های نسبتاً پایین‌تری را تجربه می‌کنند. بیشینه تنش قائم در این ناحیه در فاصله حدود ۹ متری از دیواره سمت راست تونل شیب‌دار رخ داده است.



شکل ۱۰. منحنی‌های تنش القایی قائم در صفحه موازی پیشروی تونل؛ (الف) تونل شیب‌دار (ب) تونل دسترسی.

Fig. 10. Vertical induced stress curves in the plane parallel to tunnel advance; (a) slope tunnel, (b) access tunnel.

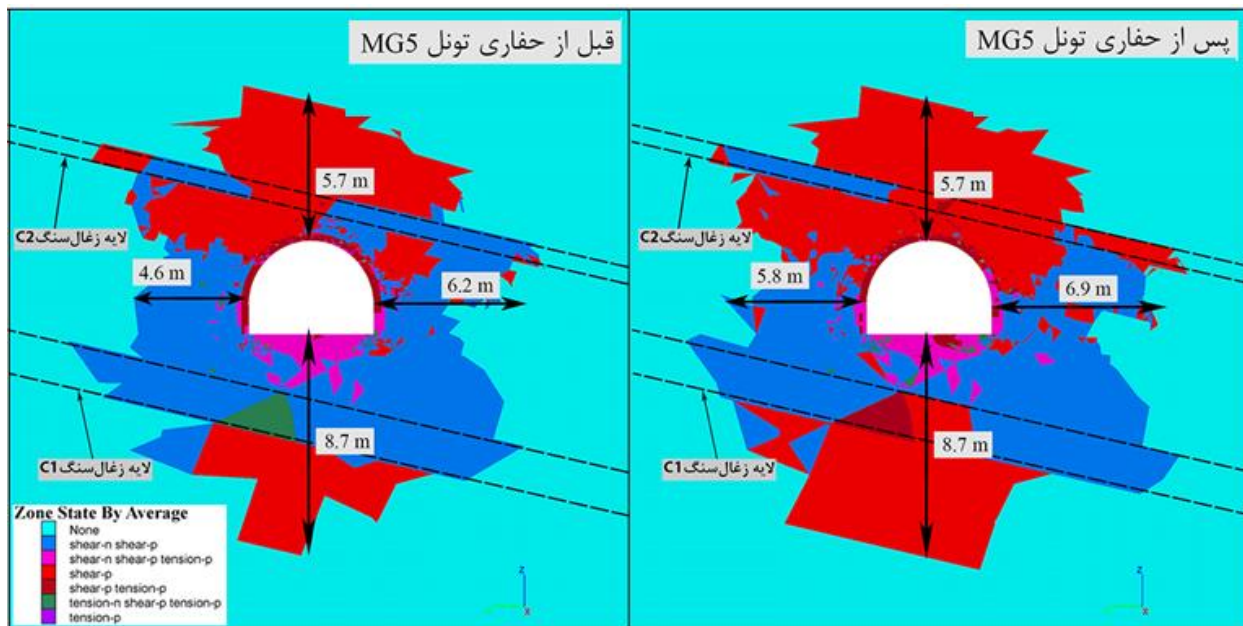
موارد به بیش از ۲ متر می‌رسد. این عدم تقارن به‌ویژه در نواحی مجاور تقاطع تشدید شده و با تمرکز تنش همراه است.

از سوی دیگر، تحلیل توزیع قائم ناحیه پلاستیک نشان می‌دهد که گسترش این ناحیه در کف تونل به‌مراتب بیشتر از تاج آن است. به‌طوری‌که عمق نفوذ پلاستیسیته در کف در برخی مقاطع به حدود ۸٫۷ متر و در نواحی تقاطع حتی بیش از ۱۰ متر می‌رسد، در حالی که این مقدار در تاج به حدود ۵ تا ۶ متر محدود می‌شود. این پدیده بیانگر حساسیت بالای کف تونل نسبت به حضور لایه‌های ضعیف و تمرکز تنش‌های فشاری است. در واقع، قرارگیری لایه‌های با مقاومت پایین در کف موجب کاهش ظرفیت باربری و افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک در این ناحیه می‌شود.

مقایسه حالت‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که موقعیت لایه ضعیف (نظیر لایه زغال‌سنگ) نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و جهت گسترش ناحیه پلاستیک دارد. زمانی که این لایه در سقف تونل قرار گیرد، توسعه ناحیه پلاستیک در بالا نسبتاً محدود بوده و اثر آن بر پایداری کلی کمتر است. اما در حالتی که لایه ضعیف در کف واقع شود، گسترش ناحیه پلاستیک به سمت پایین به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و منجر به تشدید ناپایداری کف می‌گردد. این وضعیت می‌تواند به بروز پدیده بالازدگی کف منجر شود

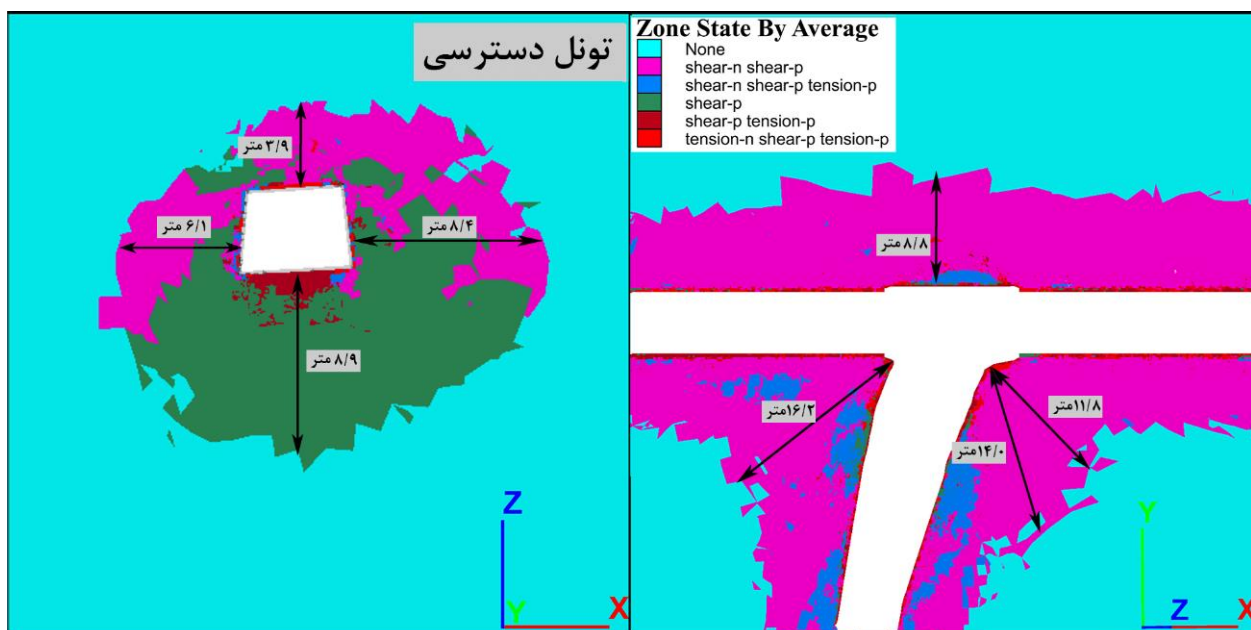
ناحیه پلاستیک با الگوی نامتقارن و توسعه‌یافته در اطراف تقاطع دیده می‌شود؛ به‌ویژه در محل اتصال شاخه‌ها، تمرکز نواحی برشی-کششی افزایش یافته و گسترش آن در جهت کف و دیواره‌ها تشدید شده است. مقادیر ثبت‌شده نشان می‌دهد که در برخی نواحی، عمق گسترش پلاستیسیته حدود ۱۴ متر در پایه میانی سمت زاویه باز تونل و به بیش از ۱۶ متر در پایه میانی سمت زاویه بسته تونل می‌رسد، در حالی که در بخش‌های دیگر این مقدار کمتر و در حدود ۸ تا ۹ متر است. این تغییرات بیانگر تأثیر مستقیم لایه‌بندی و حضور لایه‌های با مقاومت متفاوت و حفاری تونل دسترسی بر توزیع تنش و مکانیزم تسلیم توده‌سنگ است.

نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تقاطع دوشاخه به‌شدت تحت تأثیر ناهمگنی مکانیکی لایه‌های سنگی و موقعیت هندسی آنها نسبت به مقطع حفاری قرار دارد. برخلاف محیط‌های همگن که در آنها ناحیه پلاستیک به‌صورت نسبتاً متقارن پیرامون تونل توسعه می‌یابد، در این مطالعه به دلیل تناوب لایه‌های سخت و نرم، الگوی گسترش ناحیه پلاستیک رفتاری نامتقارن و پیچیده از خود نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، دامنه توسعه ناحیه پلاستیک در دیواره‌های دو طرف تونل متفاوت بوده و این اختلاف در برخی



شکل ۱۱. ناحیه پلاستیک در فواصل ۱۵ متری قبل و بعد از حفاری تونل دسترسی.

Fig. 11. Plastic zone at distances of 15 m before and after excavation of the access tunnel.



شکل ۱۲. ناحیه پلاستیک در فواصل ۲۰ متری از مرکز تقاطع دوشاخه.

Fig. 12. Plastic zone at distances of 20 m from the center of the bifurcation intersection.

منابع

- [1] Maidl, B., Thewes, M., and Maidl, U., 2013. Handbook of Tunnel Engineering. Wiley, Hoboken, NJ. <https://doi.org/10.1002/9783433603499>
- [2] Kolymbas, D., 2005. Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/3-540-28500-8>
- [3] Mahdevari, S., 2026. "Intelligent forecasting of tunnel deformation in underground coal mines using a dynamic swarm-tuned adaptive neuro-fuzzy inference system for knowledge-driven ground control". Advanced Engineering Informatics, 71, 104287. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.104287>
- [4] Liu, X., and Wang, Y., 2010. "Three dimensional numerical analysis of underground bifurcated tunnel". Geotechnical and Geological Engineering, 28(4), 447–455. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9304-x>
- [5] Liu, H.L., Li, S.C., Li, L.P., and Zhang, Q.Q., 2017. "Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway". KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6), 2459–2466. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-2128-y>
- [6] Gharouni Nik, M., and Farmahini Farahani, A., 2016. "Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam". Amirkabir Journal of Civil Engineering, 48(2), 191–198. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.655>
- [7] Mahdevari, S., and Hayati, M., 2021. "Finite-difference based response surface methodology to optimize tailgate support systems in longwall coal mining". Scientific Reports, 11, 4112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82104-8>
- [8] Siad, I., Akchiche, M., and Spyridis, P., 2023. "Numerical Simulation of the Effect of Cross Passage Excavation on Surface Settlement". Geotechnical and Geological Engineering, 41, 4071–4082. <https://doi.org/10.1007/>

که یکی از مهم‌ترین چالش‌های ژئومکانیکی در تقاطع‌های معادن زیرزمینی، به‌ویژه در معادن زغال‌سنگ عمیق، محسوب می‌شود.

بنابراین، نتایج این تحلیل بر ضرورت لحاظ دقیق لایه‌بندی زمین‌شناسی در مدل‌سازی‌های عددی تأکید دارد. همچنین در طراحی سیستم نگهداری تقاطع‌ها، توجه ویژه به شرایط کف تونل و موقعیت لایه‌های ضعیف ضروری است. استفاده از راهکارهایی نظیر تقویت کف با انکرهای عمقی، افزایش ظرفیت باربری کف و به‌کارگیری سیستم‌های نگهداری ترکیبی می‌تواند نقش مؤثری در کنترل گسترش ناحیه پلاستیک و افزایش پایداری تقاطع ایفا نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پایداری تقاطع دوشاخه H16 در معدن زغال‌سنگ پروده طبس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم‌ترین یافته‌های عددی به شرح زیر خلاصه شده است:

- بیشینه تنش قائم القایی در محدوده بین دو تونل و در سمت چپ تقاطع به ۲۵/۵ مگاپاسکال (معادل ۱/۷ برابر تنش قائم اولیه) رسید.
- توزیع تنش در توده‌سنگ بین دو تونل الگویی گنبدی شکل دارد؛ ابتدا افزایش یافته، سپس با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده دامنه گسترده تأثیر تقاطع بر میدان تنش است.
- با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، گستردگی ناحیه پلاستیک در هر دو تونل به طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ بنابراین بحرانی‌ترین ناحیه، محدوده بلافضل پیرامون محل برخورد است.
- وجود لایه‌های شیب‌دار با مقاومت متفاوت باعث پیدایش ناحیه پلاستیک نامتقارن شده است. لایه ضعیف زغال‌سنگ در کف، ناحیه پلاستیک را به شدت تشدید کرده و مستقیماً به بالازدگی کف منجر می‌شود، در حالی که حضور همین لایه در سقف تأثیر چندانی در گسترش ناحیه پلاستیک ندارد.
- مقدار همگرایی اندازه‌گیری‌شده در نقاط مختلف به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر رسیده و روند افزایشی آن حتی پس از چند ماه ادامه یافته است که حاکی از عدم دستیابی به تعادل پایدار در توده‌سنگ می‌باشد.

سیاس‌گزاری

از مدیریت و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ پروده طبس برای همکاری در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60156-3

s10706-023-02508-3

- [16] Chortis, F., and Kavvadas, M., 2021. "Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections". *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 1771–1793. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01587-w>
- [17] Jinkui, L., Xianke, W., and Wenjing, L., 2015. "The Effects of Different Excavation Angle on Intersecting Tunnel Surrounding Rock Stability". In *Proceedings of the 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015)*, pp. 247–251. <https://doi.org/10.2991/mic-15.2015.57>
- [18] Chen, Y., Liu, M., Yin, F., Zhang, L., Wu, J., and Li, J., 2024. "Deformation characteristics of surrounding rock in the intersection area between main tunnel and construction adit of the Xianglushan tunnel". *Geomechanics and Engineering*, 38(1), 1–13. <https://doi.org/10.12989/gae.2024.38.1.001>
- [19] Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Liu, M., Song, S., Zhou, Z., and Wang, Z., 2023. "The Influence of Construction Methods on the Stability of Tunnels and Ground Structures in the Construction of Urban Intersection Tunnels". *Sustainability*, 15(20), 14720. <https://doi.org/10.3390/su152014720>
- [20] Michael, A., and Gutierrez, M., 2023. "Mechanics of Tunnel Intersections: Closed-Form Approximations for Deformation Modeling and Failure Prediction". In **57th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**, ARMA-2023-0577. <https://doi.org/10.56952/ARMA-2023-0577>
- [21] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., and Ye, Q., 2022. "Failure analysis and control technology of intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock". *International Journal of Coal Science & Technology*, 9, 19. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00479-z>
- [22] Wu, Y.Y., He, M.C., Li, H., Gao, Y.B., and Xie, S.R., [9] Ren, Y., Zhou, S., Jia, J., Yuan, Q., Zhou, Z., Liu, M., and He, H., 2023. "Construction stability analysis of intersection tunnel in city under CRD method". *Frontiers in Earth Science*, 11, 1264140. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1264140>
- [10] Abbasi, F., Khosravi, M.H., Jafari, A., Bashari, A., and Alipenhani, B., 2021. "Support Analysis of Main Tunnels in Tabas Mechanized Parvadeh Mine at Intersection with Coal Seam". *Journal of Mining and Environment*, 12(3), 711–724. <https://doi.org/10.22044/jme.2021.10610.2014>
- [11] Hsiao, F.-Y., Yu, C.-W., and Chern, J.-C., 2005. "Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsuehshan tunnel". In *World Long Tunnels*, pp. 81–90.
- [12] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., and Wang, C., 2013. "Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189–204. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.011>
- [13] Wang, J., Long, Y., Cao, A., Cui, T., Lin, L., Gao, Y., Liu, X., and Li, H., 2025. "Middle Rock Pillar Stability Criteria for a Bifurcated Small Clear-Distance Tunnel". *Applied Sciences*, 15(10), 5634. <https://doi.org/10.3390/app15105634>
- [14] Khetwal, A., Khetwal, S., Sharma, K.G., and Panciera, A., 2023. "A 3-dimensional numerical analysis of the intersection of tunnels and shafts". In **Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World – Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023**, pp. 1608–1615. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-192>
- [15] Li, G., He, M., Zhang, G., and Tao, Z., 2010. "Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway". *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28–34. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60156-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60156-3)

- Underground Space Technology, 163, 106679. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106679>
- [29] Simsek, Z., Healy, J.C., Hawkins, B., and Atefi-Monfared, K., 2020. "Geometric effects on rock behavior surrounding underground cross tunnel structures". In *54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Paper No. ARMA-2020-1476.
- [30] Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., and Guo, J., 2016. "Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel". Tunnelling and Underground Space Technology, 56, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016>
- [31] Shekarchizadeh, M., Najafi, M., and Fatehi Marji, M., 2025. "Numerical Simulation of Appropriate Design for Selecting Tunnel Support Systems in Squeezing Grounds (Tunnel No. 2 in Tabas Coal Mine, Iran)". Advances in Civil Engineering, 2025, 4398231. <https://doi.org/10.1155/adce/4398231>
- [32] IRITEC, 2003. "Tabas Coal Mine Project, Detailed design report Vol 1, underground mine revision B". Technical report, Iran International Engineering Company (IRITEC).
- [33] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., and Tannant, D.D., 2017. "Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks". Neural Computing and Applications, 28(11), 3537–3555. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2263-2>
- [34] Toupin, R.A., 1965. "Saint-Venant's Principle". Archive for Rational Mechanics and Analysis, 18(2), 83–96. <https://doi.org/10.1007/BF00282253>
- [35] Mariano, P.M., and Galano, L., 2015. Fundamentals of the Mechanics of Solids. Birkhäuser, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3133-0>
- [36] Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., 1951. Theory of Elasticity. McGraw-Hill, New York.
2024. "Instability mechanism and energy evolution of surrounding rock at intersections of deep multi-form application". Journal of Central South University, 31(3), 890–911. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5567-x>
- [23] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., Li, J., Sun, X., and Xie, C., 2022. "Study on the Constant Resistance Coupling Support Technology for Rock Column at the Intersection Point of Deep Soft Rock Large Section Roadway: A Case Study in China". Shock and Vibration, 2022, 1574530. <https://doi.org/10.1155/2022/1574530>
- [24] Meng, Q., Han, L., Qiao, W., Zhang, J., Mei, F., and Feng, W., 2016. "Supporting effect and application of bolt-net-anchor coupling support under extremely weak cementation formation". Journal of Mining and Safety Engineering, 33(5), 770–778. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2016.05.002>
- [25] Shan, R., Zhang, S., Huang, P., and Liu, W., 2021. "Research on Full-Section Anchor Cable and C-Shaped Tube Support System of Deep Layer Roadway". Geofluids, 2021, 5593601. <https://doi.org/10.1155/2021/5593601>
- [26] Li, W., Yang, N., Yang, B., Ma, H., Li, T., Wang, Q., Wang, G., Du, Y., and Zhao, M., 2018. "An improved numerical simulation approach for arch-bolt supported tunnels with large deformation". Tunnelling and Underground Space Technology, 77, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.001>
- [27] Sun, X.M., Qi, Z.M., Zhang, Y., Miao, C.Y., Zhao, C.W., and He, M.C., 2023. "Failure mechanism and control countermeasures of surrounding rock at deep large section chamber intersection in the Wanfu Coal Mine". Journal of Mountain Science, 20(7), 2058–2075. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8004-y>
- [28] Wang, J., Zhang, D., Sun, Z., Lu, S., and Zhu, J., 2025. "Viscos-elastic-plastic analysis of the interaction between the rockbolt-cable combined support and rock mass considering tunnel face effect". Tunnelling and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Mahdevari, Numerical Modeling and Stability Assessment of the H16 Bifurcation in the Tabas Coal Min, Amirkabir J. Civil Eng., 58(2) (2026) 151-170.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23137.8114](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23137.8114)

