

АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА СКАЛНИЯ МАСИВ ПРИ ИЗКОПАВАНЕ И УКРЕПВАНЕ НА ТУНЕЛНИЯ ПРОФИЛ

Валентина Шехова, Невена Бабунска-Иванова
babunska_n@abv.bg

Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”
София 1574, ул. “Гео Милев” 158,
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: тунел, скален масив, Mohr-Coulomb, Нов австрийски метод, първична облицовка, GEO5, метод на крайните елементи.

Резюме: Съществено в тунелното строителство е да се вземе предвид състоянието на скалния масив. Една от стъпките за анализиране поведението на масива е създаване на изчислителен модел, на базата на който може да се прецени с достатъчна точност верността при избора на отделните етапи при изкопаване на профила, вида и параметрите на тунелните облицовки и др., както и стабилността на масива. В настоящият доклад са определени радиуса на защитната зона около тунелното сечение, както и противодействието на първичната облицовка и укрепващия пръстен. Разработен е изчислителен модел на еднопътен железопътен тунел по метод на крайните елементи в среда на GEO5. Тунелът се изпълнява по Нов австрийски метод. Скалният масив е моделиран по критерия на разрушение на Mohr-Coulomb. Въз основа на извършения 2D анализ са получени стойности на напрежения, премествания и пластични деформации, представени в табличен и графичен вид. В резултат са направени съответните изводи и заключения.

1. Увод

Тунелното строителство зависи в много голяма степен от физико-механичните свойства на почвите/скалите и от състоянието на масива. Ето защо от съществено значение е да се направи анализ на състоянието на скалния масив. За тази цел в практиката има създадени различни критерии (Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hoek-Brown и др.), на чиято база са разработени съвременните софтуери.

Един от най-широко прилаганите критерии на разрушение в инженерната практика е този на Mohr-Coulomb, който представя якостта на срязване. Неговата същност се изразява чрез уравнението на Coulomb (1776):

$$(1) \quad |\tau| = c + \sigma_n \cdot \tan \phi,$$

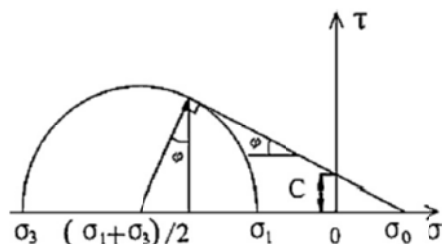
където двете материални константи ϕ и c са наречени ъгъл на триене и кохезия.

Доста по-късно Mohr (1990) отчита, че нормалните и тангенциалните напрежения в повърхнината на разрушение се изразяват както следва:

$$(2) \quad |\tau| = f(\sigma_n)$$

Функцията $f(\sigma_n)$ е експериментално определена и настъпва разрушение, когато окръжността на *Mohr* е само допирателна на обвивката на разрушение.

Уравнението на *Mohr* е еквивалентно на това на *Coulomb*, като израз (1) е наречен критерий на *Mohr-Coulomb* (фиг.1)¹.



Фиг. 1. Критерий на *Mohr-Coulomb* [1]

Критерият на *Mohr-Coulomb* намира широко приложение по света и у нас при решаването на различни проблеми, което се дължи на неговата математическа простота и ясният физически смисъл на параметрите, които могат да бъдат определени чрез изпитване на почвени проби².

2. Цел и задачи на изследването

Целта на настоящето изследване е проследяване и анализиране на състоянието на скалния масив при прокопаване и укрепване на железопътен тунел.

За реализиране на поставената цел е необходимо да се изпълнят следните задачи:

- Определяне радиуса на защитната зона около тунелния профил и противодействието на първичната облицовка и укрепващия пръстен при изграждане на съоръжението по Нов австрийски метод;
- Провеждане на решение на базата на създадения модел в среда на програмния продукт GEO5;
- Анализиране на получените от решението резултати.

3. Характеристика на изследвания тунел

В настоящата разработка е представен еднопътен железопътен тунел (фиг. 2), с дължина $L_T=1080.00$ m. По отношение на плана и профила, съоръжението е ситуирано в права с двустранен надлъжен наклон - 3.5%/изкачване и 3%/слизане.

Участъкът, който ще бъде разгледан по дължина на тунела е изграден от здрави глинести шисти. За определяне категорията на скалите е използвана класификацията на *Bieniawski*. Комплексната оценка на шистите е представена чрез RMR-системата и се характеризират с RMR=57. Съгласно стойността на системата, скалата е III категория – средно здрави скали³.

Метода на строителство на тунела е Нов австрийски метод⁴. Същността на метода се изразява в превръщането на скалния масив, чрез подходящи крепежни средства от натоварваща съоръжението среда в носещ елемент от него. Чрез деформируеми крепежи: анкери, стоманени дъги и пръскан бетон, включени в действие възможно най-бързо след атаката, се подпомага скалния масив да намери ново

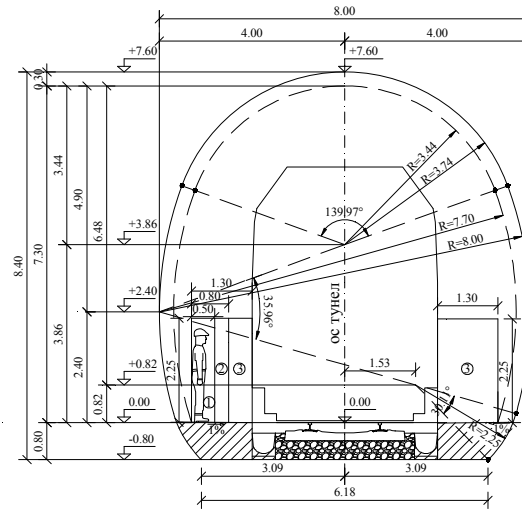
¹ Jiang H., Xie Y. A Note on the Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Strength Criteria, 2011.

² Labuz J., Zang A. Mohr-Coulomb Failure Criterion, Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 45, 2012.

³ Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, Wiley, 1989.

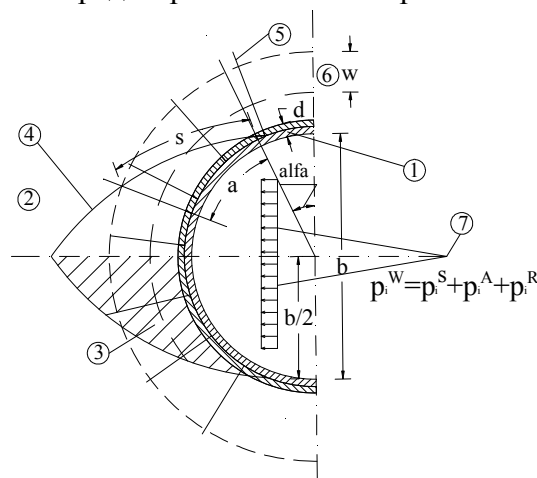
⁴ Rabcewicz L.v. The New Austrian Tunneling Method, Part One, Water Power, vol.16, N11, pp.453-457, 1964.

равновесно състояние като оформи около изкопа защитна зона. Тя представлява вторично засводяване, предизвикано от допусканите от крепежа контролирани деформации на скалната среда.



Фиг.2. Светло сечение на тунела

Теоретичните скалномеханични изследвания и опитът в тунелното строителство показват, че при стабилизационния процес се оформят и два хоризонтални скални клина, които се стремят да навлезат в направения изкоп (фиг.3). При това движение облицовките (първична и постоянна) се подлагат на срязване. На тази основа *Rabcewicz* е предложил методика за тяхното оразмеряване. Тя определя противодействието на подземната конструкция, което предотвратява нейното срязване⁵.



Фиг.3. Оразмерителна схема на крепеж-облицовка по Нов австрийски метод: 1-облицовка; 2-скален масив; 3-скален клин; 4-плоч на срязването; 5-анкер; 6-защитна зона; 7-противодействие на крепежа.

4. Определяне радиуса на защитната зона около тунелното сечение и противодействието на първичната облицовка и укрепващия пръстен

4.1. Определяне радиуса на защитната зона около тунелното сечение

Размерът на защитната зона около сечението на тунела може да бъде определен от уравнението на *Fenner-Talobre* и *Kastner* [4]:

$$(3) \quad p_i = -c \cdot \cot g \phi + [c \cdot \cot g \phi + p_o \cdot (1 - \sin \phi)] \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{2 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi}},$$

⁵ Георгиев, Л. Тунели, трето издание, Ес Принт, с.487, София, 2004.

където:

p_i - противодействие (*skin resistance*); c - кохезия на скалата; ϕ - ъгъл на вътрешно триене на скалата; r - радиус на тунела; R - радиус на защитната зона; γ - средно обемно тегло на масива; H - покритие над тунела; $p_o = \gamma \cdot H$.

Следователно, от израз (3) за радиуса на защитната зона се получава: $R=4,8$ m.

4.2. Определяне противодействието на първичната облицовка и защитната зона

Съгласно ⁶, стойността на RMR=57 съответства на клас на скалите при Нов австрийски метод – B1/B2. За тези класове е подходящо изпълнение на първична облицовка от анкери с дължина 4m и разстояние между тях около 2m в комбинация с армиран пръскан бетон с дебелина 15cm.

➤ Противодействие на анкерите

$$(4) \quad p_i^a = \frac{f_{st} \cdot \sigma_{st}}{e \cdot f} \cdot \left(1 + \frac{a \cdot \cos \beta}{b/2} \right), t/m^2,$$

където:

f_{st} - площ на стоманата на стеблото на анкера в напречно сечение; σ_{st} - якост на опън на стоманата; e, f - разстояние между анкерите в двете посоки; a – дължина на дъгата от срязания участък (фиг.5); β – наклон на анкера; b - разстояние между зоните на срязване (фиг.5).

➤ Противодействие на пръскания бетон

$$(5) \quad p_i^s = \frac{d \cdot \tau^s}{\sin \alpha \cdot b/2}, t/m^2,$$

където:

d - дебелина на пръскания бетон; τ^s - якост на срязване на пръскания бетон; α° - ъгъл на срязване на пръскания бетон.

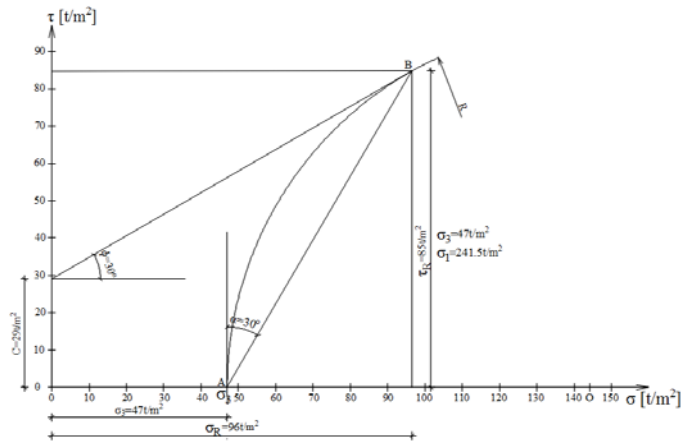
➤ Противодействие на защитната зона (укрепващият пръстен-скалата)

$$(6) \quad p_i^R = \frac{s \cdot \tau_R \cdot \cos \psi}{b/2} - \frac{s \cdot \sigma_n^R \sin \psi}{b/2} \cdot (1 - \operatorname{tg} \psi),$$

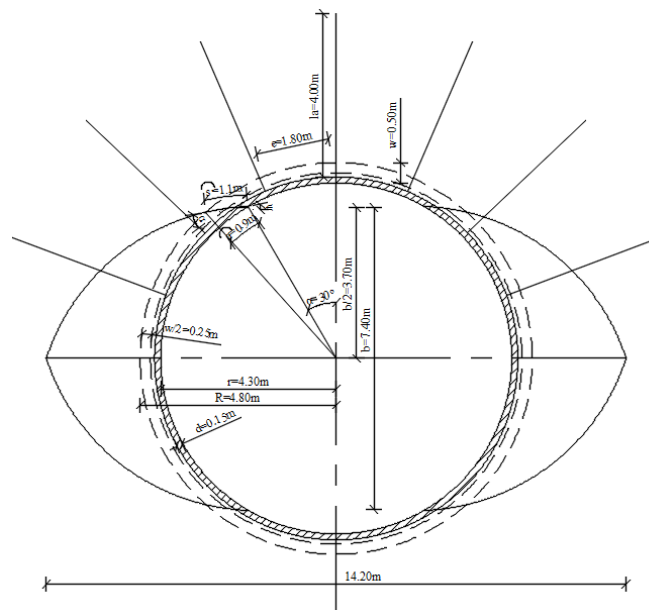
където:

τ_R - якост на срязване на скалата (фиг.4); σ_n^R - нормално напрежение в срязаната повърхност (фиг.4); S - дължина на срязването в защитната зона (фиг.5); ψ - наклон на центъра на срязващия клин по отношение на хоризонталата (фиг.5).

⁶ Karahan E. Design of Excavation and Support Systems for the Çubukbeli Tunnel in Antalya, Thesis, pp. 116, 2010.



Фиг. 4. Определяне на якостта на срязване на скалния масив τ_R и нормалното напрежение в срязаната повърхност σ_R



Фиг.5. Определяне на дължината на срязване S в защитната зона, дължината на дъгата от срязания участък a и ъгъл ψ

➤ **Общо противодействие на първичната облицовка и укрепващия пръстен**

$$(7) \quad \sum p_i = p_i^a + p_i^s + p_i^R$$

Резултатите от извършените изчисления, относно противодействието на първичната облицовка и укрепващия пръстен (защитната зона) са подредени в таблица 1.

Таблица 1

Противодействие			
p_i^a , kPa	p_i^s , kPa	p_i^R , kPa	$\sum p_i$, kPa
248	445	228	921

5. Създаване на изчислителен модел на тунела

Целта на изчислителния модел е да се анализира състоянието на масива преди и след прокопаването и укрепването на тунелния профил по метода на крайни елементи (МКЕ).

Създаденият модел е разработен със софтуерния продукт GEO5 v.2017, модул FEM-Tunnel.

Методиката на изследването преминава през следните стъпки:

- Разработване на модела;
- Решение на модела;
- Анализ на получените резултати.

Разкриването на профила се извършва на два етапа-калота и щрос. Покритието над тунела е около 9m.

Първичната облицовка е със следните параметри:

- Анкери тип *Swellex*⁷ с дължина $L=4,00$ m, разстояние между тях $a=1,80$ m и носимоспособност $N_b=150$ kN.
- Армиран пръскан бетон С 30/37 с дебелина 150 mm.

От геоложкият профил на масива, в който се изпълнява съоръжението, са снети следните характеристики и параметри, представени в таблица 2.

Таблица 2. Характеристика и параметри на почви/скали

Вид почва/скала	Дебелина на пласта [m]	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	Дилат. ъгъл χ [°]	c [kPa]	ν [-]	E [MPa]
Чакъл	0-1	20	32	2	10	0,25	50
Пясъчник, червен	1-5	23	32	0,5	200	0,2	900
Глинести шисти, здрави	над 5	25	30	0,5	290	0,25	1050
Анкерна зона	-	23	32	0,5	210	0,2	900

5.1. Разработване на модела

Разработването на модела се характеризира със следните стъпки⁸:

➤ Въвеждане на проектни данни

✓ Задаване дебелината на отделните пластове и на характеристиките и параметрите на масива.

Фрагментът от скалния масив, за който се извършва анализа по МКЕ е с размери 60x36m. Масивът е моделиран по модела на *Mohr-Coulomb*. Дебелините на отделните пластове, както и характеристиките и параметрите на масива са въведени, съгласно таблица 2.

✓ Въвеждане геометрията на тунелния профил.

Тунелният профил и областта, в която са разположени анкерите (анкерна зона) са въведени с помощта на точки и линии с дъги и сегменти, чрез координати. Изкопният профил е с размери: ширина–8,90m и височина–9,30m. Анкерната зона включва 9 броя анкери през разстояние 1,80m, разположени в напречното сечение в свода на тунела. Анкерите в изчислителните модели са въведени при предположението, че закотвящата площ от скалния масив около изкопа, съответстваща на тяхната дължина се заменя със скалата с по-добри параметри.

$$(8) \quad c_{S+b} = c_S + c_b$$

⁷ Swellex Rockbolts ®. <http://www.polarltd.com/html/SWELLEX%20ROCKBOLTS.pdf>

⁸ Engineering manuals for GEO5 programs-Part 3, Chapter 26 Numerical modelling of tunnel excavation using the NATM method, pp.36, 2016.

c_s – кохезия на почвата/скалата

$$(9) \quad c_b = \frac{N_b}{A_b} \cdot \frac{1 + \sin \phi}{2 \cdot \cos \phi} \cdot \frac{1}{\gamma_{bc}},$$

където:

c_b - увеличена кохезия при укрепване с анкери; N_b - носимоспособност на анкера; A_b - площ падаща се на един анкер; n -брой анкери; ϕ - ъгъл на вътрешно триене на скалата; γ_{bc} - коефициент на сигурност на анкерите.

➤ Задаване на параметрите на контактната зона

Трябва да бъде отчетено взаимодействието между масива и първичната облицовка. Параметрите на контактните елементи са дадени в таблица 3.

Таблица 3. Параметри на контактните елементи

Тип на контакта	K_N [kN/m ³]	K_S [kN/m ³]	δ_c [-]	δ_μ [-]
Пластична зона	60 000	24 000	0,8	0,8

➤ Генериране на мрежата от крайни елементи

За да се получи необходимата точност мрежата около тунела се сгъстява.

Генерираната мрежа се състои от триъгълни крайни елементи, като за конкретния случай техния брой е 2 552, а този на възлите – 4 310.

5.2. Решение на изчислителния модел

За анализ на тунели, изградени по Нов австрийски метод се използват различни методи, описани в литературата, като най-често прилагания в инженерната практика е т.н. β -метод. Идеята му е, че първоначалните напрежения σ_0 , действащи около мястото където ще се изгражда тунела постепенно се променят с времето. Напреженията се разделят на части, като тази, която се прилага към неукрепения изкоп се натоварва чрез стойността $(1-\beta) \cdot \sigma_0$, а останалата част от натоварването $\beta \cdot \sigma_0$ се взема предвид при укрепване на изкопа. Стойността на коефициента β зависи от геологията на скалния масив, първоначалното напрежение, геометрията и напредъка на тунела^{9,10}. За разработения модел, стойността на коефициента β за някои от етапите е $\beta=0,6$ при калотата и щроса. Последователността на изкопните работи се определя чрез процентното съотношение на деактивиране на съответния етап към оставащото действие на почвата/скалата. При моделиране на отделните етапи на изкопа са използвани процентните съотношения представени по-долу, които са базирани на дългогодишен опит и дават достоверни резултати.

Етапите, на базата на които е направен анализ по МКЕ са следните [8]:

- ✓ Етап [1]: Представяне на първичното напрегнато състояние на масива;
- ✓ Етап [2]: Моделиране изкопа на калотата при неукрепен забой 40%/60%;
- ✓ Етап [3]: Моделиране на пръскан бетон с дебелина 150 mm (млад бетон) в свода на тунела и активиране на анкерната зона 30%/30%;
- ✓ Етап [4]: Подобряване параметрите на пръскания бетон (зрял бетон) 30%/0%;
- ✓ Етап [5]: Моделиране изкопа на щроса при неукрепен забой 40%/60%;

⁹ Maras-Dragojevic S. Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, Gradevinaz 64, 2012.

¹⁰ Möller S., Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Doctoral Thesis, Stuttgart, 2006.

✓ Етап [6]: Моделиране на пръскан бетон с дебелина 150 mm (млад бетон) в пиедритите на тунела 30%/30%;

✓ Етап [7]: Подобряване параметрите на пръскания бетон (зрял бетон) 30%/0%.

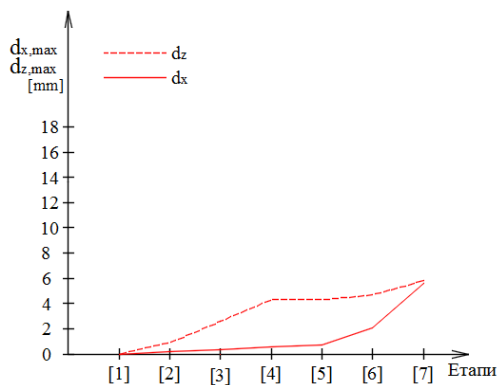
На базата на направения анализ са получени резултати относно: нормалните и тангенциалните напрежения σ_x , σ_z и τ_{xz} ; хоризонталните и вертикалните премествания d_x и d_z и еквивалентните и пластични деформации ϵ_{eq} и $\epsilon_{eq,pl}$ (табл. 4).

Таблица 4. Резултати на максималните стойности, получени от решението с МКЕ за отделните етапи

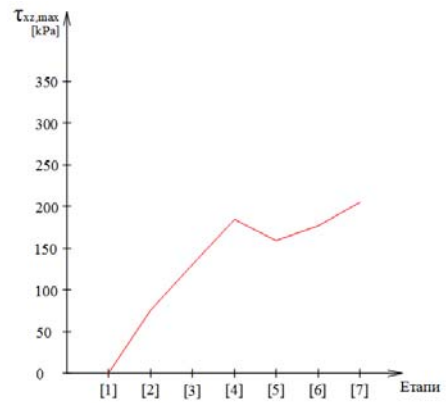
Показател/Етап	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
SigmaZ,tot.[kPa]	868,33	869,43	868,92	869,85	869,57	869,69	869,27
SigmaX,tot.[kPa]	289,44	289,59	289,17	289,31	289,03	288,94	288,64
TauXZ [kPa]	0,00	75,57	129,70	184,23	158,63	177,27	205,31
Epsilon eq. [%]	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,10
Epsilon eq.,pl. [%]	0,00	0,00	0,00	0,004	0,004	0,007	0,01
dz [mm]	0,00	0,906	2,6	4,3	4,3	4,7	5,8
dx [mm]	0,00	0,235	0,386	0,6	0,7	2,1	5,6

6. Анализ на получените резултати

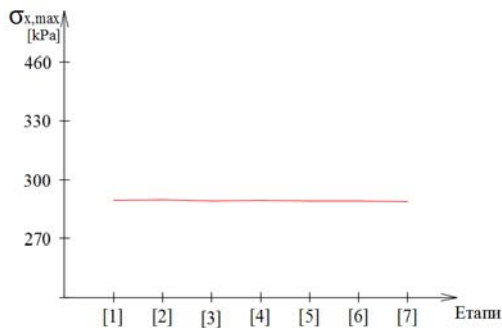
За онагледяване и анализиране на получените резултати са изготвени графики по отношение на максималните нормални и тангенциални напрежения σ_x , σ_z и τ_{xz} , хоризонтални и вертикални измествания d_x и d_z , еквивалентни пластични деформации $\epsilon_{eq,pl}$ и максималното тангенциално напрежение τ_{xz} за етап [7], съгласно критерия на Mohr-Coulomb (фиг.6÷11).



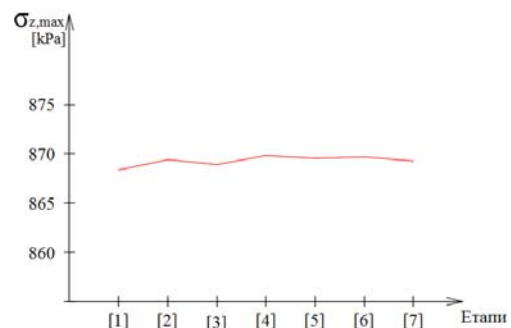
Фиг.6. Максимални премествания d_x и d_z



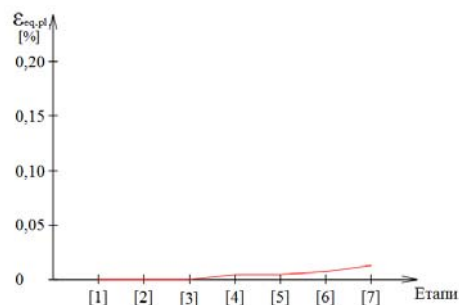
Фиг.7. Максимални тангенциални напрежения τ_{xz}



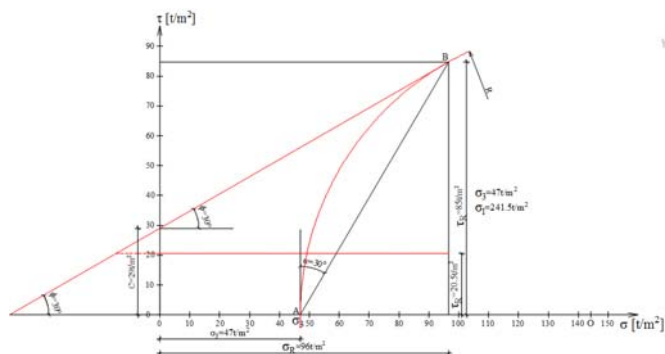
Фиг.8. Максимални нормални напрежения σ_x



Фиг.9. Максимални нормални напрежения σ_z



Фиг.10. Максимални пластични деформации $\epsilon_{eq.pl}$.



Фиг.11. Критерий на Mohr-Coulomb за етап [7]

На базата на представените резултати могат да бъдат направени следните изводи:

- Противодействието на подземната конструкция е достатъчно за да поеме напреженията, възникнали при прокопаването и укрепването на участъка от тунела;
- Максималните хоризонтални и вертикални премествания d_x и d_z , както и тангенциалните напрежения τ_{xz} се характеризират с поетапно нарастване. Въпреки това стойността на преместванията е малка - под 1 cm, а размера на максималните тангенциални напрежения е под граничната стойност на разрушение;
- По отношение на максималните нормални напрежения σ_z и σ_x няма почти никакво развитие;
- Размерът на пластичните деформации във всички етапи е пренебрежимо малък.

7. Заключение

Анализът на състоянието на скалния масив е задължителен етап при проектирането и строителството на тунели.

Направените изчисления, относно радиуса на защитната зона, противодействието на тунелната конструкция и изчислителния модел показват, че състоянието на масива е стабилно и не се предвижда настъпване на разрушение по критерия на *Mohr-Coulomb*. Препоръчва се монтиране на анкери и в стените на тунела, с оглед предотвратяване на локални обрушвания около тунелното сечение.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Jiang H., Xie Y. A Note on the Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Strength Criteria, Mechanics Research Communications 38(4):pp. 309-314, 2011.
- [2] Labuz J., Zang A. Mohr-Coulomb Failure Criterion, Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 45, Issue 6, pp. 975-979, Springer-Verlag 2012.
- [3] Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, Wiley, 1989.
- [4] Rabcewicz L.v. The New Austrian Tunneling Method, Part One, Water Power, vol.16, N11, pp.453-457, 1964.
- [5] Георгиев, Л. Тунели, трето издание, Ес Принт, с.487, София, 2004.
- [6] Karahan E. Design of Excavation and Support Systems for the Çubukbeli Tunnel in Antalya, Thesis, Middle East Technical University, pp. 116, 2010.
- [7] Swellex Rockbolts®.
<http://www.polarltd.com/html/SWELLEX%20ROCKBOLTS.pdf>

- [8] Engineering manuals for GEO5 programs-Part 3, Chapter 26 Numerical modelling of tunnel excavation using the NATM method, pp.36, 2016.
- [9] Maras-Dragojevic S. Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, Gradevinaz 64, pp.573-581, 2012.
- [10] Möller S. Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Doctoral Thesis, Stuttgart, 2006.

ANALYSIS OF THE CONDITION OF THE ROCK MASSIF FOR THE EXCAVATION AND SUPPORT OF THE TUNNEL PROFILE

Valentina Shehova, Nevena Babunska-Ivanova
babunska_n@abv.bg

***Todor Kableshkov University of Transport
1574 Sofia, 158 Geo Milev Str.,
BULGARIA***

Key word: Tunnel, Rock massif, Mohr-Coulomb, New Austrian Tunneling Method, Primary lining, GEO5, Finite element method.

Abstract: This report identifies the radius of the protective zone around the tunnel section as well as the resistance of the primary lining and the reinforcing ring. It has been developed a model of a rail tunnel using the GEO5 environment finite element method. The tunnel is implemented with the New Austrian Tunneling Method. The rock massif is modeled on the Mohr-Coulomb destruction criterion. On the basis of the analysis were obtained values of stresses, settlements, plastic deformations, etc. As a result has been made relevant inferences and conclusions.