

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 22.12.2017 г.

## СЪПОСТАВЯНЕ НА КРИТЕРИИТЕ НА MOHR-COULOMB И DRUCKER-PRAGER ПРИ МОДЕЛИРАНЕ НА ПЪРВИЧНАТА ОБЛИЦОВКА ПРИ ТУНЕЛИТЕ

Н. Бабунска-Иванова<sup>1</sup>

*Ключови думи:* тунел, първична облицовка, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Нов австрийски метод, GEO5

### РЕЗЮМЕ

В статията са разгледани накратко същността, приложенията и ограниченията на критериите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*. Извършено е съпоставяне на двата критерия, като са разработени два модела чрез моделиране на първичната облицовка на проектен железопътен тунел Батановци с програмен продукт GEO5 по Нов австрийски метод. В резултат са изготвени анализи, подкрепени с диаграми и количествена оценка в процентно изражение на получените резултати. Посочени са причините, които водят до получаване на приликите и разликите, отчетени между двата модела и са направени съответните изводи и заключения.

### 1. Увод

Подземното строителство зависи в много голяма степен от физико-механичните свойства на скалите и от състоянието на скалния масив. От съществено значение е да се изяснят инженерно-геоложките и хидрогеоложките условия, при които то ще се извършва [1]. Освен това е необходимо да се направи анализ на поведението на скалния масив. За тази цел има разработени редица модели, с помощта на които е възможно да се извърши такъв анализ и които са залегнали в основата на съвременните софтуерни продукти, пригодени за решаването на такъв род проблеми.

---

<sup>1</sup> Невена Бабунска-Иванова, ас. инж., кат. „Транспортно строителство и съоръжения“, ВТУ „Т. Каблешков“, ул. „Гео Милев“ № 158, 1574 София, e-mail: babunska\_n@abv.bg

Двата класически идеално еласто-пластични конститутивни модели, свързани с критериите на разрушение, намерили широко приложение в инженерната практика, са тези на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*. При решаване на дадена задача обикновено се използва един от двата критерия (или друг такъв). Ето защо възниква необходимост от съпоставянето им с оглед на отчитане на разликите, получени при решението.

Предмет на настоящата разработка е изследване на поведението на масива, едновременно и с двата критерия при моделиране на първичната облицовка на железопътен тунел Батановци.

## 2. Същност, приложения и ограничения на критериите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*

За да бъде разбрана спецификата на двата критерия, е необходимо да се изясни тяхната същност, приложения и ограничения.

*Coulomb* (1776) предлага един от най-широко прилаганите критерии на разрушение в Механиката, който представя якостта на срязване:

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

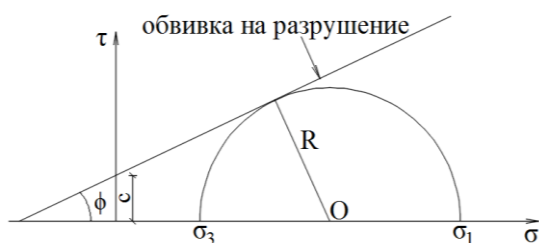
където двете материални константи  $\phi$  и  $c$  са наречени ъгъл на вътрешно триене и кохезия.

През 1900 г. *Mohr* посочва, че нормалните и тангенциалните напрежения в равнината на разрушение се изразяват както следва:

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

Обвивката на разрушение  $f(\sigma_n)$  е експериментално определена функция и разрушение настъпва когато окръжността на *Mohr* се допира до обвивката.

Уравнението на *Mohr* е еквивалентно на това на *Coulomb*, като израз (1) е наречен критерий на *Mohr-Coulomb* (фиг. 1), [2].



Фиг. 1. Критерий на *Mohr-Coulomb*

Изразен чрез главните напрежения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , критерият има вида [3]:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi + 2c \cos \phi. \quad (3)$$

Критерият на *Mohr-Coulomb* е лесен за прилагане, което се дължи на неговата математическа простота и ясният физически смисъл на параметрите, които могат да бъдат определени чрез изпитване на почвени проби [3]. Поради това той намира широко приложение при решаване на различни задачи.

Ограниченията на критерия са свързани с повърхнината му, която има ъглови точки (фиг. 2) и с пренебрегване на въздействието на главните напрежения [3], [4], [5].

Критерият на *Drucker-Prager* е формулиран през 1952 г. и представлява модификация на класическия критерий на *Von Mises* с отчитане на влиянието на хидростатичния натиск. Този критерий се изразява чрез уравнението [6]:

$$\sqrt{J_2} = \lambda I_1 + k, \quad (4)$$

където  $I_1$  и  $J_2$  са първа и втора инварианта на тензора на напрежение;

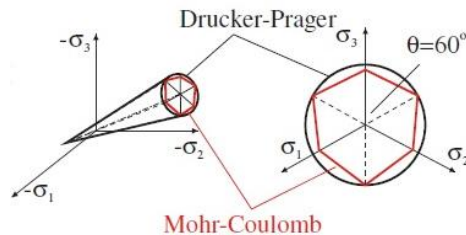
$\lambda$  и  $k$  – материални константи.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (4a)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \cdot \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]. \quad (4b)$$

Критерият на *Drucker-Prager* също е лесен за прилагане, има гладка повърхнина (фиг. 2) и съществува възможност за съчетаване с този на *Mohr-Coulomb* [6]. Ето защо и този критерий намира широко приложение.

Основното ограничение на критерия на *Drucker-Prager* се изразява в склонността му да надценява якостта на скалите в напрегнато състояние и води до значителни грешки в тримерното пространство, т.е.  $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ . Освен това критерият не дава точни резултати, когато едно или повече от главните напрежения са опънни [6].



Фиг. 2. Съпоставяне на критериите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*

### 3. Цел и задачи на изследването

Целта на настоящото изследване е разработването на два модела, с оглед на проследяване на поведението на масива при изпълнение на първичната облицовка на железопътен тунел Батановци по метода на крайните елементи (МКЕ) със софтуерния продукт GEO5. Двамата модела се отнасят за различни геоложки условия и дълбочина на съръжението. За всеки модел се прилагат критериите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*.

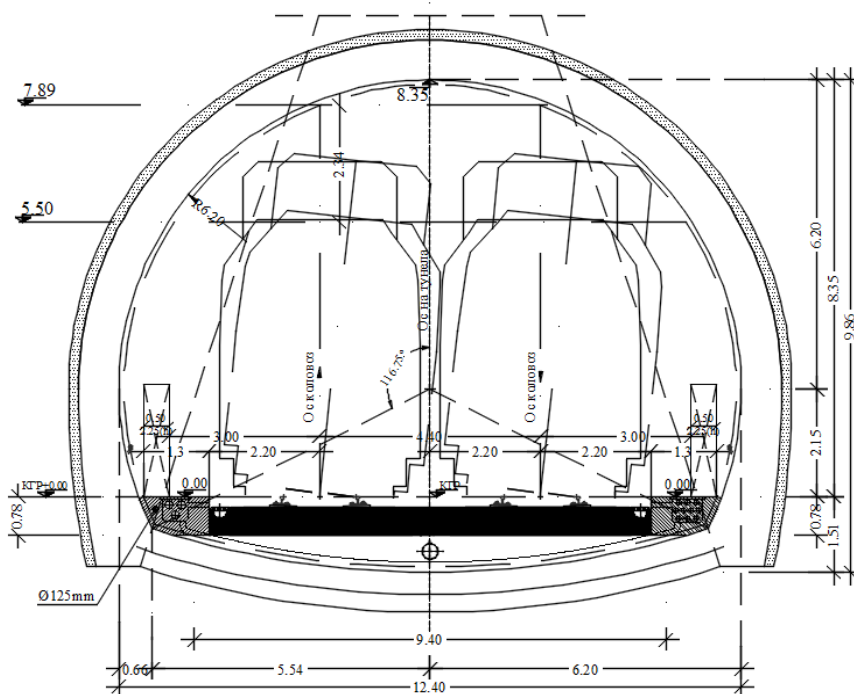
За реализиране на поставената цел, е необходимо да се изпълнят следните задачи:

- провеждане на решения на базата на създадените модели чрез метода на ограничената конвергенция (convergence-confinement method);
- извършване на сравнителен анализ на поведението на масива по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*, на базата на изготвената количествена оценка и разработени диаграми по отношение на максималните нормални и танген-

циални напрежения  $\sigma_{\max}$  и  $\tau_{xz,\max}$ , хоризонтални и вертикални премествания  $d_{x,\max}$  и  $d_{z,\max}$  и деформации  $\epsilon_{\max}$ .

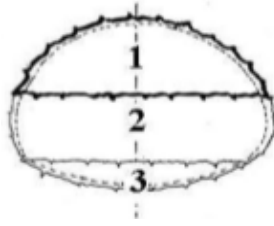
#### 4. Разработване на модели по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* чрез моделиране на първичната облицовка на тунел Батановци

Двата модела са разработени със софтуерния продукт GEO5 v.2017, FEM-Tunnel по МКЕ [7]. Отнасят се за проектен тунел Батановци, който е част от железопътната линия София – Перник – Радомир. Ситуиран е в междугарие Батановци – Копаница от km 38+333,42 до km 39+214,51. Съоръжението е двупътно с дължина 881,09 m (фиг. 3). Тунелът се намира в кръгова крива с радиус  $R = 1\,424$  m, преходна крива с дължина  $L = 240$  m, прав участък, вертикална крива с радиус  $R_V = 15\,000$  m и едностранен надлъжен наклон/слизане  $i = 7,0\%$  (посока Радомир). В километричния пояс km 38+333,42 ÷ km 38+470,89 ( $L = 137,47$  m) – страна София, и km 39+069,48 ÷ km 39+214,51 ( $L = 145,03$  m) – страна Радомир, е прието съоръжението да се изгради по открит способ, а останалите 598,59 m – по тунелен метод [8].



Фиг. 3. Напречно сечение на тунел Батановци [8]

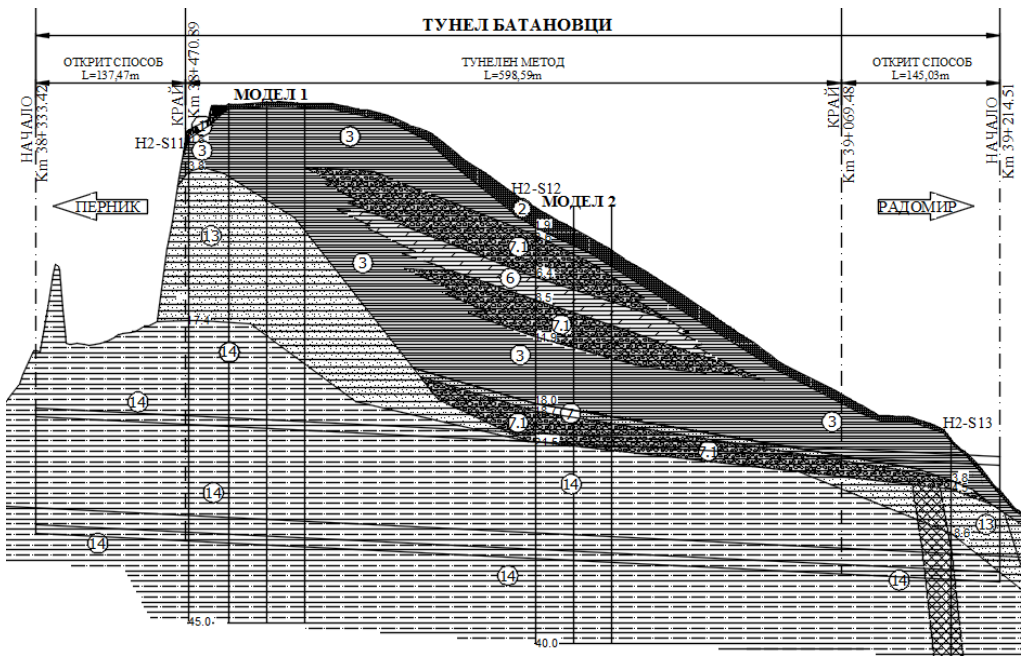
Двата модела са разработени по тунелния метод на km 38+542,62 (ос тунел – Модел 1) и km 38+822,89 (ос тунел – Модел 2), като е предвидено съоръжението да се изпълни по Нов австрийски метод [9]. Покритията над тунела са 29,4 m (Модел 1) и 19,3 m (Модел 2). Разкриването на тунелния профил се извършва на три части: калота, шрос и контрасвод (фиг. 4).



Фиг. 4. Разкриване на тунела по Нов австрийски метод:  
1 – Калота; 2 – Щрос; 3 – Контрасвод

Масивът е представен чрез моделите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*.

От геоложкия профил на масива (фиг. 5) са снети характеристики и параметри, представени в табл. 1 и табл. 2 [8].



Фиг. 5. Геоложки профил на тунел Батановци [8]

За трансформиране на *Mohr-Coulomb* параметрите – ъгъл на вътрешно триене  $\varphi$  и кохезия  $c$ , в параметрите  $\beta$  и  $d$  на *Drucker-Prager* са използвани изрази (5) и (6), [10]:

$$\tan \beta = \frac{3\sqrt{3} \tan \varphi}{\sqrt{9+12 \tan^2 \varphi}}, \quad (5)$$

$$d = \frac{3\sqrt{3}c}{\sqrt{9+12 \tan^2 \varphi}}. \quad (6)$$

След прилагане на горните изрази са получени съответните резултати за отделните пластове, които са дадени със скоби в табл. 1 и табл. 2 в колоните, съдържащи параметрите  $\varphi$  и  $c$ .

**Таблица 1. Характеристика и параметри на почви/скали за Модел 1 [8]**

Пласт	Описание	Дълбочина от повърхността*, м	$\gamma$ , $\text{kN/m}^3$	$\varphi$ ( $\beta$ ) <sup>o</sup>	$c$ (d), $\text{kPa}$	$E$ , $\text{MPa}$
2	Глина, прахова, тъмнокафява, хумусна	0,00÷0,35 0,00÷0,40	17,65	19 (29)	8,0 (12,8)	10
3	Глини, кафяви до жълтокафяви	0,35÷6,50 0,40÷11,70	19,00	19 (29)	25,0 (40,2)	20
13	Пясъчници, сиви, девионски	6,50÷19,90 11,70÷23,90	23,00	43,5 (47,9)	80,0 (93,4)	325
14	Мергелни шисти	19,90÷47,50 23,90÷47,60	24,00	44 (48,1)	178,0 (205,8)	495

\*Дадени са две дълбочини на всеки от пластове, тъй като същите са наклонени (фиг. 5).

**Таблица 2. Характеристика и параметри на почви/скали за Модел 2 [8]**

Пласт	Описание	Дълбочина от повърхността*, м	$\gamma$ , $\text{kN/m}^3$	$\varphi$ ( $\beta$ ) <sup>o</sup>	$c$ (d), $\text{kPa}$	$E$ , $\text{MPa}$
2	Глина, прахова, тъмнокафява, хумусна	0,00÷1,90 0,00÷1,50	17,65	19 (29)	8,0 (12,8)	10
3	Глини, кафяви до жълтокафяви	1,90÷2,60 1,50÷2,40	19,00	19 (29)	25,0 (40,2)	20
7.1	Брекчоконгломерат	2,60÷6,40 2,40÷4,75	23,00	40 (46,2)	61,0 (75,9)	91
6	Мергелни глини	6,40÷8,50 4,75÷6,90	20,2	21 (31,3)	28,5 (45,1)	45
7.1	Брекчоконгломерат	8,50÷11,90 6,90÷9,90	23,00	43 (47,7)	66,5 (78,4)	106
3	Глини, кафяви до жълтокафяви	11,90÷18,00 9,90÷15,30	19,00	25 (35,4)	30,5 (46,5)	35
7	Пясъчник, сив, разнo-зърнест със спойка	18,00÷18,70 15,30÷15,90	22,8	25 (35,4)	225 (343,1)	280
7.1	Брекчоконгломерат	18,70÷21,50 15,90÷18,40	23,00	46 (49)	72 (80)	120
14	Мергелни шисти	21,50÷40,00 18,40÷36,00	24,00	44 (48,1)	178,0 (205,8)	495

Класификацията на скалния масив е извършена в съответствие с определянето на индекса GSI (Geological Strength Index), като се започне от RMR (Rock Mass Rating) стойностите [11], [12]. За Модел 1 индекса има стойност – GSI = 50 (пласт 14), а за Модел 2 – GSI = 35 (пласт 7.1) [8].

Фрагментът от скалния масив, за който се извършва анализът по МКЕ за двата модела, е с размери съответно 70×48 m (Модел 1) и 70×40 m (Модел 2). За да се получи необходимата точност, мрежата в него и особено около съоръжението, се съгъства [13]. Генерираната мрежа се състои от триъгълни крайни елементи.

Съгласно препоръките на *Romana* за съответния клас на скалите по RMR системата, първичната облицовка се състои от армиран пръскан бетон *C 20/25* с дебелини съответно 150 mm (за Модел 1) и 200 mm (за Модел 2). Тунелният профил се укрепва и с анкери със следните параметри: дължина  $L = 4,0$  m, разстояние  $a = 1,0 \times 1,5 / 1,0 \times 1,0$  m, носимоспособност  $N_b = 120$  kN и стоманени рамки през разстояние  $s = 1,5$  m [14].

Профилът на тунела и областта, в която са разположени анкерите (анкерна зона), са въведени с помощта на точки и линии с дъги и сегменти, посредством координати. Анкерната зона включва 19 броя анкери през разстояние  $a = 1,0$  m, разположени в напречното сечение в свода на тунела. В стените същите се разреждат. Анкерите в изчислителните модели са въведени при предпоставката, че закотвящата площ от скалния масив около изкопа, съответстваща на тяхната дължина, се заменя с почвата/скалата с по-добри параметри [7].

$$C_{s+b} = C_s + C_b, \quad (7)$$

където  $C_s$  е кохезия на почвата/скалата, kPa;

$C_b$  – увеличена кохезия, поради укрепване с анкери, kPa;

$$C_b = \frac{N_b}{A_b} \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{1}{\gamma_{bc}}; \quad (7a)$$

$N_b$  – носимоспособност на анкерите, kN;

$A_b$  – площ, падаща се на един анкер, m<sup>2</sup>;

$\varphi$  – ъгъл на вътрешно триене на скалата, °;

$\gamma_{bc}$  – коефициент на сигурност на анкерите.

## 5. Решения на създадените модели и анализ на получените резултати

За анализ на тунели се използват различни методи, описани в литературата, като един от най-често прилаганите в инженерната практика е методът на ограничената конвергенция (convergence-confinement method), срещащ се още под наименованието  $\beta$  или  $\lambda$ -метод. Идеята му е, че първоначалните напрежения  $\sigma_0$ , действащи около мястото където ще се изгражда тунелът 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. За разработените модели, стойността на коефициента  $\beta$  е различна за различните етапи на решение. Последователността на изкопните и облицовъчни 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 сравнително достоверни резултати [7], [15], [16].

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

- Етап [1]: Първично напрегнато състояние на масива;
- Етап [2]: Моделиране на изкопа на калотата 25%/75%;

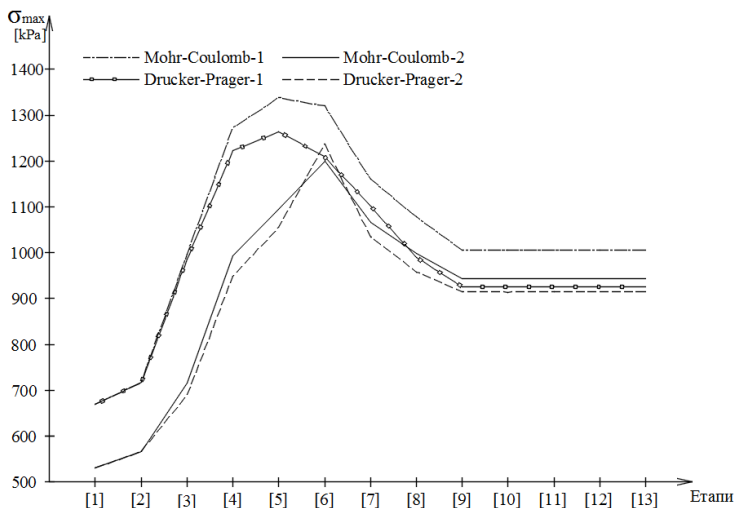
- Етап [3]: Укрепване на изкопа със стоманени рамки в свода на тунела и активиране на анкерната зона 30%/45%;
- Етап [4]: Укрепване на изкопа с пръскан бетон (млад бетон) в свода 30%/15%;
- Етап [5]: Подобряване на параметрите на пръскания бетон (зрял бетон) 15%/0%;
- Етап [6]: Моделиране на изкопа на щроса 25%/75%;
- Етап [7]: Укрепване на изкопа със стоманени рамки в пиедритите на тунела и активиране на анкерната зона 30%/45%;
- Етап [8]: Моделиране на армиран пръскан бетон (млад бетон) в пиедритите 30%/15%;
- Етап [9]: Подобряване на параметрите на пръскания бетон (зрял бетон) 15%/0%;
- Етап [10]: Моделиране на изкопа на контра свода 25%/75%;
- Етап [11]: Укрепване на изкопа със стоманени рамки 30%/45%;
- Етап [12]: Укрепване на изкопа с пръскан бетон (млад бетон) 30%/15%;
- Етап [13]: Подобряване на параметрите на пръскания бетон (зрял бетон) 15%/0%.

Въз основа на извършения анализ са получени резултати относно: нормалните и тангенциалните напрежения  $\sigma$  и  $\tau_{xz}$ ; хоризонталните и вертикалните премествания  $d_x$  и  $d_z$ ; деформациите  $\epsilon$  и др., като максималните им стойности са представени на графиките по-долу (фиг. 6 ÷ 10).

На база направеното сравнение и изготвените диаграми се констатира следните прилики и разлики между двата модела, разработени по критериите на *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*:

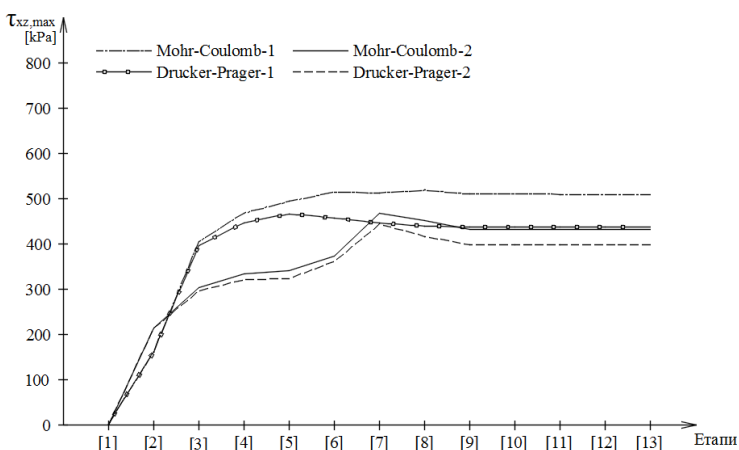
- Получените резултати на напреженията, преместванията и деформации в етап [1] показват еднакви минимални и максимални стойности и липса на промяна във формите и цветовите характеристики на анализирания по-върхнини. При етап [2] се появяват пренебрежимо малки разлики само в стойностите на напреженията (под 0,1%). Обяснението е, че в етап [1] се отчита първичното напрегнато състояние на скалния масив, преди да започне прокопаването на тунела и все още не се проявяват напреженията, преместванията и деформациите. В етап [2] пък се прокопава калотата, което също не води до натрупването на различия в резултатите.
- Графиките с максималните нормални и тангенциални напрежения, премествания и деформации имат сходен характер при двата критерия (фиг. 6 ÷ 10). Това е така, тъй като критериите използват сходни параметри при определяне на поведението на масива.
- И при двата модела по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* от етапи [10] до [13] настъпва равновесно състояние, т.е. не се наблюдава развитие на напрежения, премествания и деформации.

- Максималните нормални напрежения  $\sigma_{\max}$  и при двата модела са по-големи при *Mohr-Coulomb* за отделните етапи (с изключение на етап [6] при Модел 2) в сравнение с *Drucker-Prager* (фиг. 6). Най-голяма разлика между напреженията се явява в етап [6] на Модел 1 – около 8%.



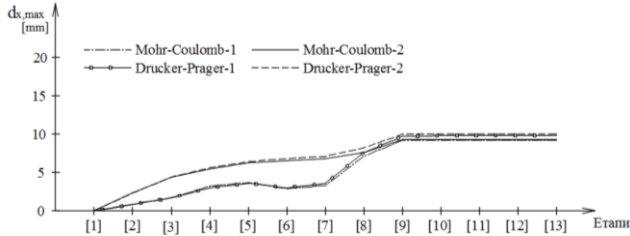
**Фиг. 6.** Съпоставяне на нормалните напрежения  $\sigma_{\max}$  по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* за Модел 1 и Модел 2

- При максималните тангенциални напрежения  $\tau_{xz, \max}$  отново се наблюдават по-големи стойности по *Mohr-Coulomb* спрямо *Drucker-Prager* и при двата модела (фиг. 7). Най-голяма разлика се констатира в етап [8] на Модел 1 – около 15%.

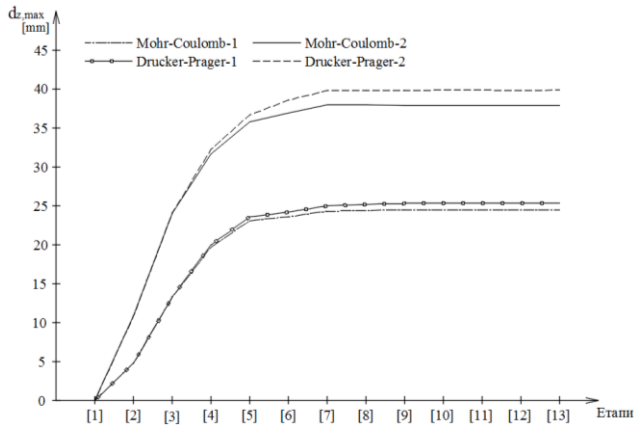


**Фиг. 7.** Съпоставяне на тангенциалните напрежения  $\tau_{xz, \max}$  по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* за Модел 1 и Модел 2

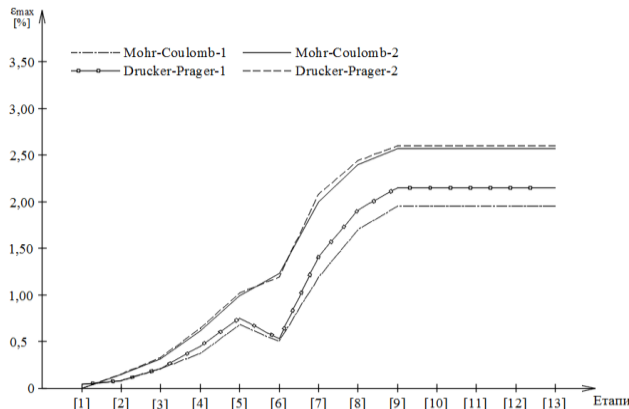
- Максималните хоризонтални и вертикални премествания  $d_{x,\max}$  и  $d_{z,\max}$ , както и деформации  $\varepsilon_{\max}$  се характеризират с по-големи стойности при *Drucker-Prager* в сравнение с *Mohr-Coulomb* (с изключение на етапи [4] и [5] при Модел 1, касаещи хоризонталните премествания  $d_x$ ), (фиг. 8 ÷ 10). В процентно изражение най-голяма разлика се отчита, както следва:  $d_{x,\max}$  – около 9%,  $d_{z,\max}$  – 5,0% – при Модел 2, а  $\varepsilon_{\max}$  – около 15% – при Модел 1.



**Фиг. 8.** Съпоставяне на хоризонталните премествания  $d_{x,\max}$  по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* за Модел 1 и Модел 2



**Фиг. 9.** Съпоставяне на вертикалните премествания  $d_{z,\max}$  по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* за Модел 1 и Модел 2



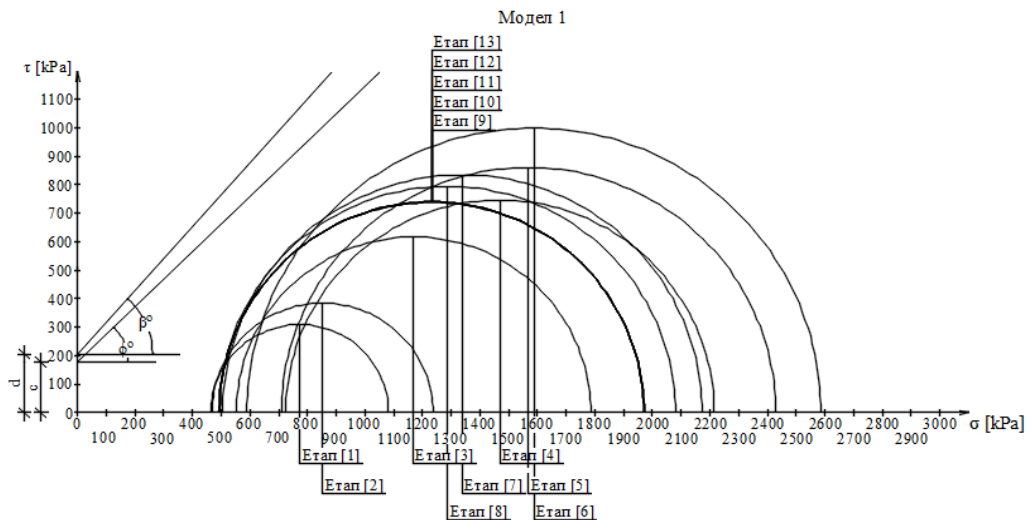
**Фиг. 10.** Съпоставяне на деформациите  $\varepsilon_{\max}$  по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* за Модел 1 и Модел 2

Получените при решенията разлики в напрежения, премествания и деформации се дължат на следните причини: Критерият на *Mohr-Coulomb* за разлика от този на *Drucker-Prager* е с негладка повърхнина, т.е. има наличие на ъглови точки (фиг. 2), а освен това последният използва други стойности на два от основните показателя – ъгъла на вътрешно триене  $\varphi$  и кохезията  $c$  (табл. 3, табл. 4), което води до получаване на различни резултати.

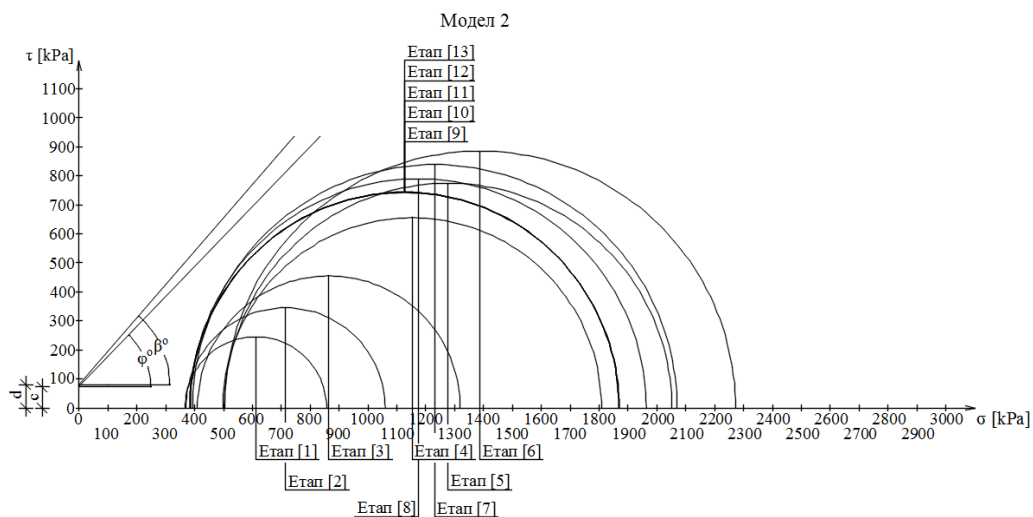
При нито един етап на двата модела не се констатира настъпване на разрушение при изобразяване на обвивките на разрушение по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager* и окръжностите на *Mohr* (фиг. 11, фиг. 12). Приложени са получените максимални стойности на главните напрежения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  за двата модела (табл. 5).

Таблица 5

Етапи	Стойности на максималните главни напрежения $\sigma_1$ и $\sigma_3$ за Модели 1 и 2, kPa							
	<i>Mohr-Coulomb</i>				<i>Drucker-Prager</i>			
	$\sigma_1^1$ ,max	$\sigma_3^1$ ,max	$\sigma_1^2$ ,max	$\sigma_3^2$ ,max	$\sigma_1^1$ ,max	$\sigma_3^1$ ,max	$\sigma_1^2$ ,max	$\sigma_3^2$ ,max
[1]	1081,8	463,5	856,8	366,7	1081,8	463,5	856,8	366,7
[2]	1237,0	467,6	1059,7	369,4	1234,4	467,6	1057,7	369,4
[3]	1786,0	552,1	1319,6	409,3	1739,7	553,1	1230,5	411,0
[4]	2215,3	724,3	1808,2	497,1	2091,5	678,0	1664,1	482,7
[5]	2429,3	709,2	2051,7	503,5	2238,2	677,9	1896,7	487,1
[6]	2586,1	588,9	2272,3	502,6	2201,3	554,2	2204,7	485,6
[7]	2173,1	504,6	2069,7	392,7	1988,8	494,5	1871,1	398,9
[8]	2080,3	493,2	1963,0	383,7	1800,3	495,0	1740,7	384,4
[9]	1971,0	493,4	1869,2	383,9	1687,9	495,3	1661,3	384,8
[10]	1970,6	493,3	1868,9	383,8	1686,8	495,2	1660,9	384,6
[11]	1971,3	493,2	1869,3	383,5	1686,7	495,1	1661,3	384,4
[12]	1971,3	493,2	1869,3	383,5	1686,7	495,1	1661,3	384,4
[13]	1971,2	493,1	1868,9	383,4	1686,6	495,0	1660,9	384,3



Фиг. 11



Фиг. 12

## 6. Изводи и заключения

В настоящото изследване са разработени два модела, с цел проследяване поведението на масива при изпълнение на първичната облицовка на проектен тунел Батановци по железопътната линия София – Перник – Радомир, чрез използване на софтуера GEO5. В резултат е представен сравнителен 2D анализ по *Mohr-Coulomb* и *Drucker-Prager*, като е приложен методът на ограничената конвергенция.

В заключение на гореизложеното могат да се направят следните изводи:

- Резултатите, получени и при двата модела по *Mohr-Coulomb* имат сходен характер с тези по *Drucker-Prager*.
- Не се наблюдава настъпване на разрушение, съгласно критериите в отделните етапи от прокопаването и укрепването на тунелния профил.
- При моделите, разработени по *Mohr-Coulomb*, се констатира по-голяма якост, при по-малки премествания и деформации, в сравнение с тези по *Drucker-Prager*, но разликите не се отличават с големи стойности.
- При Модел 1, въпреки по-голямото тунелно покритие ( $H = 29,4$  m), се наблюдават по-малки премествания и деформации спрямо Модел 2 ( $H = 19,3$  m), което се дължи на по-голямата якост на масива при първата разработка. Това води до заключението, че в случая по-голямо значение има якостта на почвите/скалите, в сравнение с дълбочината на тунела.

## Благодарности

Авторът на публикацията изказва благодарности на доц. д-р инж. Чавдар Колев, ВТУ „Тодор Каблешков“, катедра „Транспортно строителство и съоръжения“ за споделените знания и отправените критични бележки по време на писането на статията.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Tomev, Ъ., Tomev, Ю.* Тунели. Второ издание, София, ВТУ, 2012.
2. *Jiang, H., Xie, Y.* A Note on the Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Strength Criteria. *Mechanics Research Communications* 38(4):pp. 309 – 314, 2011.
3. *Labuz, J., Zang, A.* Mohr-Coulomb Failure Criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Volume 45, Issue 6, pp. 975 – 979, Springer, 2012.
4. *Михова, Л., Танев, Т.* Еластични и еласто-пластични конститутивни модели в земната механика. // *Годишник на УАСГ*, том 49, бр. 2, с. 173 – 195, София, 2016.
5. *Sandhya, R., Nagenda, K., Sai, T.* Applicability of Mohr-Coulomb & Drucker-Prager models for assessment of undrained shear behaviour of clayey soils. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Vol. 5, Issue 10, pp. 104 – 123, October 2014.
6. *Alejano, L., Bobet, A.* Drucker-Prager Criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Volume 45, Issue 6, pp. 995 – 999, Springer, 2012.
7. Engineering manuals for GEO5 programs-Part 3. Chapter 26 Numerical modelling of tunnel excavation using the NATM method, 36p., 05/2016, [www.finesoftware.eu/engineering-manuals/](http://www.finesoftware.eu/engineering-manuals/).
8. Изготвяне на ПУП (Подробен устройствен план) и Технически проект за модернизация на жп участък: „София – Перник – Радомир” по проект: Модернизация на жп линия „София – Перник – Радомир” – част от Транс-европейската транспортна мрежа. Декември 2015.
9. *Rabczewicz, L.v.* The New Austrian Tunneling Method. Part One, *Water Power*, vol. 16, N 11, pp. 453 – 457, 1964.
10. *Mosadegh, A., Nikraz, H.* Bearing Capacity Evaluation of Footing on a Layered-Soil using ABAQUS. *ESCC*, Volume 6, Issue 3, 2015.
11. *Bieniawski, Z. T.* Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, Wiley, 1989.
12. *Hoek, E.* Practical Rock Engineering, 341 p., <https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
13. *Георгиев, Л.* Тунели. Трето издание, София, 2004.
14. *Romana, M.* Update of 1989 Bieniawski’s RMR guidelines for tunnel excavation and support. *Proceedings of EUROCK 2014 ISRM European Symposium*, pp. 1139 – 1144, 2014.
15. *Maras-Dragojevic, S.* Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, *Gradevinaz* 64, pp. 573 – 581, 2012.
16. *Möller, S.* Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Doctoral Thesis, Stuttgart, pp. 174, 2006.

# COMPARISON OF CRITERIA OF MOHR-COULOMB AND DRUCKER-PRAGER IN MODELING PRIMARY LINING IN TUNNELING

**N. Babunska-Ivanova<sup>1</sup>**

*Keywords: tunnel, primary lining, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, New Austrian Tunneling Method, GEO5*

## ABSTRACT

The paper briefly discusses the essence, applications and limitations of the Mohr-Coulomb and Drucker-Prager criteria. A comparison of both criteria is performed by developing two models through modeling the primary lining of the Batanovtsi tunnel with the software GEO5 under New Austrian Tunneling Method. As a result, analyses are made, supported by diagrams and quantitative evaluation in percentage terms. The reasons for the similarities and differences between the two models are given and the relevant findings and conclusions are drawn.

---

<sup>1</sup> Nevena Babunska-Ivanova, Assist. Eng., Dept. "Transport Construction and Facilities", Higher School of Transport "T. Kableshkov", 158 G. Milev Str., Sofia 1574, e-mail: babunska\_n@abv.bg