

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

#### ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

##### 3.1 Παραδοχές

- Σήραγγα κυκλικής διατομής (ακτίνα R)
- Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (κατά τον άξονα της σήραγγας z)
- Ισότροπη γεωστατική ένταση ( $\sigma_{vo} = \sigma_{ho} = p_o$ ) πριν τη διάνοιξη της σήραγγας
- Έδαφος ελαστικό-απολύτως πλαστικό. Αστοχία κατά Mohr-Coulomb με παραμέτρους αντοχής  $c, \varphi$ :

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad \text{όπου} \quad N_\varphi = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

- Παραμόρφωση υπό σταθερό όγκο μετά την αστοχία
- Μέθοδος προσομοίωσης της εκσκαφής της σήραγγας: Η αρχική εσωτερική πίεση ( $p_o$ ) μειώνεται βαθμιαία σε ( $p$ ) και τελικώς μηδενίζεται.
- Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή (επίπεδη παραμόρφωση και κυλινδρικές συντεταγμένες):

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\Lambda} \{\dot{\sigma}_r - K_o \dot{\sigma}_\theta\} \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{\Lambda} \{\dot{\sigma}_\theta - K_o \dot{\sigma}_r\} \quad (2)$$

όπου:

$$K_o \equiv \frac{\nu}{1-\nu}, \quad \Lambda \equiv \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)}$$

και  $\dot{\sigma}_r = \sigma_r - p_o, \quad \dot{\sigma}_\theta = \sigma_\theta - p_o$

Επιλύοντας τις σχέσεις (2) ως προς τις τάσεις προκύπτει:

$$\dot{\sigma}_r = D\{\varepsilon_r + K_o \varepsilon_\theta\} \quad \dot{\sigma}_\theta = D\{\varepsilon_\theta + K_o \varepsilon_r\} \quad (3\alpha)$$

$$\text{όπου:} \quad D \equiv \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3\beta)$$

- Εξίσωση ισοροπίας (κατά τον άξονα r):  $\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$

Σημείωση: Λόγω συμμετρίας οι υπόλοιπες εξισώσεις ισοροπίας ικανοποιούνται αυτομάτως.

- Σχέσεις παραμορφώσεων-μετακινήσεων:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \varepsilon_z = 0 \quad (5)$$

όπου ( $u$ ) είναι η ακτινική μετακίνηση (θετική προς το εσωτερικό της σήραγγας).

### 3.2 Επίλυση στην πλαστική περιοχή ( $R < r < r_p$ )

Γύρω από τη σήραγγα αναπτύσσεται βαθμιαία μια πλαστική περιοχή, δηλαδή μια περιοχή όπου ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

$r_p$  = ακτίνα της πλαστικής περιοχής, δηλαδή η παραμόρφωση του εδάφους είναι ελαστική για  $r > r_p$  και πλαστική για  $R < r < r_p$ .

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (\text{ισορροπία})$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (\text{σχέση αστοχίας με μέγιστη τάση στη } \sigma_\theta)$$

Απαλειφή της  $\sigma_\theta$ :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{1}{r}(N_\varphi - 1)\sigma_r - \frac{2c}{r}\sqrt{N_\varphi} = 0 \quad (6)$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (6) δίνει:

#### 3.2.1 Περίπτωση $\varphi \neq 0$ (δηλαδή $N_\varphi \neq 1$ ):

Η διαφορική εξίσωση (6) έχει τη λύση ( $k = \text{σταθερά}$ ):

$$\ln\left[(N_\varphi - 1)\sigma_r + 2c\sqrt{N_\varphi}\right] = (N_\varphi - 1) \ln r + k$$

Συνοριακή συνθήκη:  $\sigma_r(r = R) = p$

Οπότε:

$$\sigma_r = \left[ p + \frac{2c\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi - 1} \right] \left( \frac{r}{R} \right)^{N_\varphi - 1} - \left( \frac{2c\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi - 1} \right) \quad (7\alpha)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad (7\beta)$$

#### 3.2.2 Περίπτωση $\varphi = 0$ (δηλαδή $N_\varphi = 1$ ):

Η διαφορική εξίσωση (6) δίνει:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{2c}{r} \Rightarrow \sigma_r = 2c \ln r + k$$

Συνοριακή συνθήκη:  $\sigma_r(r = R) = p$

Άρα:

$$\sigma_r = p + 2c \ln\left(\frac{r}{R}\right) \quad (8\alpha)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2c \quad (8\beta)$$

Παρατήρηση:  $\sigma_r - \sigma_\theta = 2c = \text{σταθερά}$

### 3.3 Επίλυση στην ελαστική περιοχή ( $r > r_p$ )

Εξίσωση ισορροπίας (σχέση 4):

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \Rightarrow \frac{d\dot{\sigma}_r}{dr} + \frac{\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_\theta}{r} = 0$$

Επιπλέον ισχύουν (σχέσεις 3 και 5):

$$\dot{\sigma}_r = D [\varepsilon_r + K_o \varepsilon_\theta] \quad \dot{\sigma}_\theta = D [\varepsilon_\theta + K_o \varepsilon_r]$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \qquad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$$

Από τις ανωτέρω, με απαλειφή των τάσεων και παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (9)$$

Η σχέση αυτή επιλύεται και δίνει ( $c_1, c_2 =$  σταθερές):

$$u = c_1 r + \frac{c_2}{r} \quad (10)$$

Συνοριακή συνθήκη:  $u(r = \infty) = 0$ , άρα:  $c_1 = 0$

Δηλαδή:  $u = \frac{c_2}{r} \quad (11)$

Συνεπώς η κατανομή των τάσεων στην ελαστική περιοχή δίνεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_r = p_o - c_2 D (1 - K_o) \frac{1}{r^2} \quad (12\alpha)$$

$$\sigma_\theta = p_o + c_2 D (1 - K_o) \frac{1}{r^2} \quad (12\beta)$$

Παρατήρηση 1:  $\sigma_r + \sigma_\theta = 2p_o =$  σταθερά

Παρατήρηση 2: Η σταθερά  $c_2$  προσδιορίζεται από την απαίτηση ισότητας των τάσεων στο όριο μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, η σταθερά  $c_2$  προσδιορίζεται από τη σχέση:  $\sigma_r (r = R) = p$  (βλέπε παρακάτω).

### 3.4 Προσδιορισμός της σταθεράς $c_2$

(α) Περίπτωση όπου δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, δηλαδή το σύνολο του εδάφους γύρω από την οπή παραμένει στην ελαστική περιοχή.

$$\sigma_r (r = R) = p \Rightarrow c_2 = \frac{(p_o - p) R^2}{D (1 - K_o)} \quad (13)$$

οπότε:

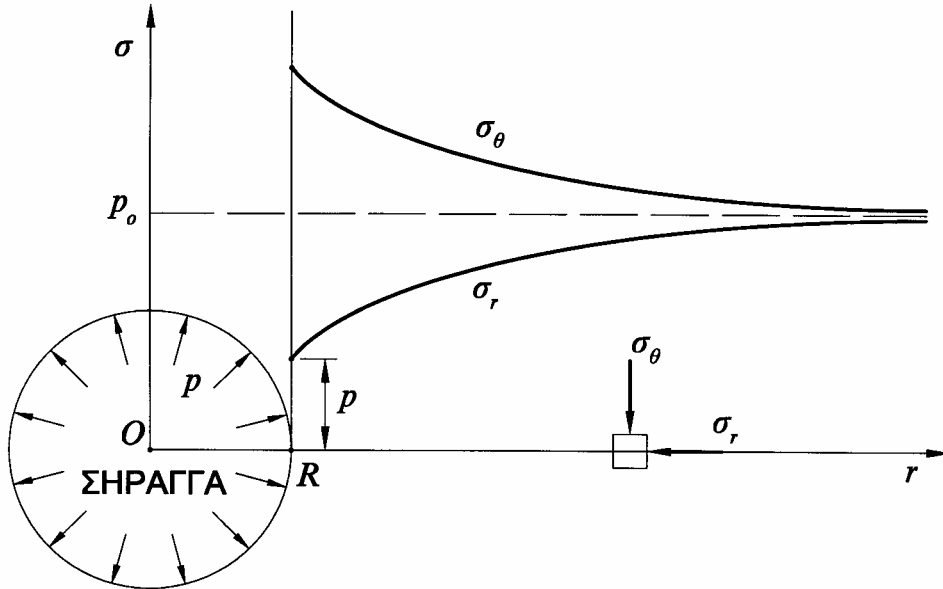
$$u = R (1 + \nu) \left( \frac{p_o - p}{E} \right) \left( \frac{R}{r} \right) \quad (14\alpha)$$

$$\sigma_r = p_o - (p_o - p) \left( \frac{R}{r} \right)^2 \quad (14\beta)$$

$$\sigma_\theta = p_o + (p_o - p) \left( \frac{R}{r} \right)^2 \quad (14\gamma)$$

(β) Περίπτωση όπου υπάρχει πλαστική περιοχή, δηλαδή το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ικανοποιείται για  $r < r_p$ , όπου  $r_p$  είναι η ακτίνα της πλαστικής περιοχής (προφανώς το έδαφος παραμένει ελαστικό για  $r > r_p$ ).

Στην περίπτωση αυτή, η ακτινική τάση ( $\sigma_r$ ) και η περιφερειακή τάση ( $\sigma_\theta$ ) στην θέση  $r = r_p$  είναι ίδιες, είτε υπολογισθούν με τη σχέση που ισχύει στην ελαστική περιοχή (σχέση 14) είτε υπολογισθούν με τη σχέση που ισχύει στην πλαστική περιοχή (σχέση 7 εφόσον  $\varphi \neq 0$  και σχέση 8 εφόσον  $\varphi = 0$ ). Η εξίσωση των



Σχήμα 1: Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική οπή. Παραδοχή γραμμικώς ελαστικού εδάφους.

ανωτέρω τιμών δίνει δυο σχέσεις από τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές των  $(r_p)$  και  $(c_2)$  ως κατωτέρω:

### 1. Περίπτωση $\varphi \neq 0$

Η ακτίνα  $(r_p)$  της πλαστικής περιοχής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{r_p}{R}\right)^{N_\varphi-1} = \left(\frac{2}{N_\varphi+1}\right) \frac{\left(p_o + \frac{2c\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi-1}\right)}{\left(p + \frac{2c\sqrt{N_\varphi}}{N_\varphi-1}\right)} \quad (15\alpha)$$

Η ανωτέρω σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

$$\left(\frac{r_p}{R}\right)^{N_\varphi-1} = \left(\frac{2}{N_\varphi+1}\right) \frac{N_s + \frac{2}{N_\varphi-1}}{N_s \left(\frac{p}{p_o}\right) + \frac{2}{N_\varphi-1}} \quad (15\beta)$$

όπου ο συντελεστής:

$$N_s \equiv \frac{p_o}{c\sqrt{N_\varphi}} = \frac{2p_o}{\sigma_{cm}}$$

ονομάζεται συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor). Σημειώνεται ότι  $\sigma_{cm} = 2c\sqrt{N_\varphi}$  είναι η αντοχή της βραχόμαζας σε μοναξονική θλίψη.

Η σταθερά  $(c_2)$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{c_2}{r_p^2} = \frac{(1+\nu)}{(N_\varphi+1)} \cdot \frac{p_o(N_\varphi-1) + 2c\sqrt{N_\varphi}}{E} \quad (16)$$

Στη συνέχεια, οι τάσεις  $(\sigma_r, \sigma_\theta)$  υπολογίζονται ως εξής:

- Στην ελαστική περιοχή: Σχέσεις 12
- Στην πλαστική περιοχή: Σχέσεις 7

**Παρατήρηση 1:** Υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής πίεσης ( $p_e$ ) της οπής, για την οποία αρχίζει να παρουσιάζεται πλαστική περιοχή, δηλαδή υπολογισμός της τιμής της πίεσης ( $p$ ) για την οποία  $r_p = R$ . Από τη σχέση (15), για  $r_p = R$  προκύπτει:

$$p_e = \frac{2p_o - 2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi + 1} \quad (17\alpha)$$

**Παρατήρηση 2:** Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής της συνοχής της βραχώμαζας για την οποία δεν εμφανίζεται πλαστική περιοχή γύρω από την οπή. Από τη σχέση (17α) προκύπτει:

$$c_{\min} = \frac{2p_o - p(N_\phi + 1)}{2\sqrt{N_\phi}} \quad (17\beta)$$

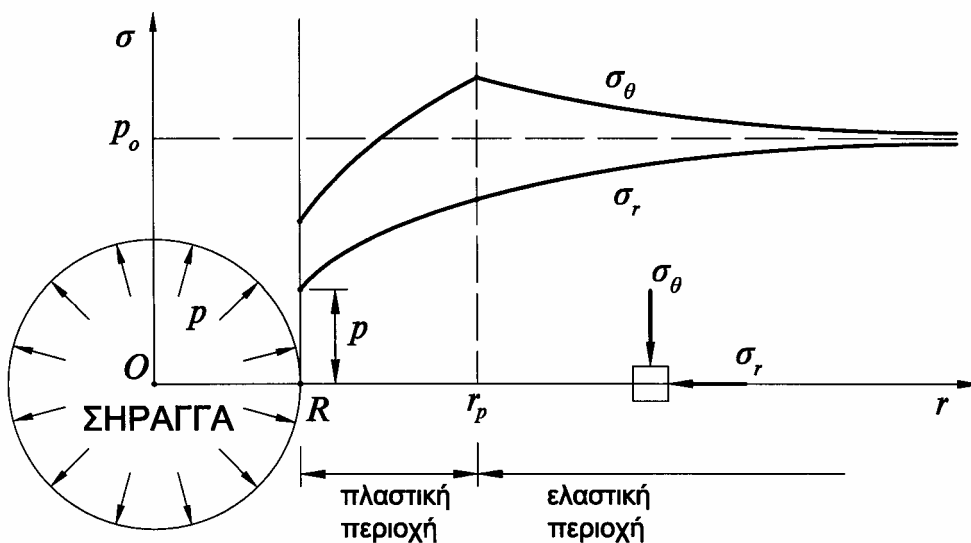
Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται ώστε να μην εμφανισθεί πλαστική περιοχή γύρω από την οπή ακόμη και για μηδενισμό της εσωτερικής πίεσης ( $p = 0$ ), δηλαδή για πλήρη εκσκαφή της οπής χωρίς καμία υποστήριξη είναι:

$$c = \frac{p_o}{\sqrt{N_\phi}} \Rightarrow \frac{p_o}{c\sqrt{N_\phi}} = 1 \Rightarrow N_s = 1$$

Ο παράγων ( $c\sqrt{N_\phi}$ ) ισούται με το ήμισυ της αντοχής του υλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη ( $\sigma_c$ ). Πράγματι:

$$\sigma_c = \sigma_1 = \sigma_3\sqrt{N_\phi} + 2c\sqrt{N_\phi} = 2c\sqrt{N_\phi} \quad (\text{επειδή } \sigma_3 = 0)$$

Συνεπώς, η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται ώστε να μην εμφανισθεί πλαστική περιοχή γύρω από την οπή ακόμη και για μηδενισμό της εσωτερικής πίεσης είναι:



Σχήμα 2: Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική οπή. Παραδοχή ελαστικού-απολύτως πλαστικού εδάφους.

$$N_s \equiv \frac{p_o}{\sigma_c/2} = 1$$

**Σημείωση:** ο συντελεστής ( $N_s$ ) ονομάζεται συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor). Συνεπώς, η βραχόμαζα γύρω από τη σήραγγα παραμένει ελαστική εάν  $N_s \leq 1$ .

**Παρατήρηση 3:** Γενικότερα, η συνθήκη μή-ανάπτυξης πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα (δηλαδή  $r_p = R$ ) για κάποια τιμή της εσωτερικής πίεσης ( $p$ ) είναι (από τη σχέση 17β):

$$N_s \equiv \frac{p_o}{c \sqrt{N_\phi}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{p}{p_o} \right) (N_\phi + 1)} \quad (17\gamma)$$

**Σημείωση:** Για  $p = 0$ , η σχέση αυτή δίνει:  $N_s = 1$ .

Η σχέση (17γ) δίνει τη μέγιστη τιμή του συντελεστή υπερφόρτισης ( $N_s$ ) για τον οποίο δεν αναπτύσσονται πλαστικές περιοχές γύρω από τη σήραγγα συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης ( $p$ ).

**Παράδειγμα εφαρμογής:**

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ  $N_s$   
ΓΙΑ ΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

$\phi$ (μοίρες)	Τιμές του $p/p_o$				
	0	0.20	0.40	0.50	0.60
20°	1.0	1.44	2.55	4.17	11.36
25°	1.0	1.53	3.26	7.46	25.51
30°	1.0	1.67	5.00	$\infty^*$	$\infty^*$
35°	1.0	1.88	16.14	$\infty^*$	$\infty^*$
40°	1.0	2.27	$\infty^*$	$\infty^*$	$\infty^*$

\* δηλαδή δεν αναπτύσσεται πλαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα

## 2. Περίπτωση $\phi = 0$

Η ακτίνα ( $r_p$ ) της πλαστικής περιοχής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$r_p = R \exp \left\{ \frac{p_o - p}{2c} - \frac{1}{2} \right\} = R \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[ N_s \left( 1 - \frac{p}{p_o} \right) - 1 \right] \right\} \quad (18)$$

**Σημείωση:** Στην περίπτωση όπου  $\phi = 0$ , ο συντελεστής υπερφόρτισης είναι:  $N_s = p_o/c$ . Συνεπώς, η βραχόμαζα γύρω από την οπή παραμένει ελαστική για  $p = 0$  εάν  $N_s \leq 1$ .

Η σταθερά ( $c_2$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{c_2}{r_p^2} = \left( \frac{c}{E} \right) (1 + \nu) \quad (19)$$

Στη συνέχεια, οι τάσεις ( $\sigma_r, \sigma_\theta$ ) υπολογίζονται ως εξής:

- Στην ελαστική περιοχή: Σχέσεις 12
- Στην πλαστική περιοχή: Σχέσεις 7

**Παρατήρηση 1:** Υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής πίεσης ( $p_e$ ) της οπής, για την οποία αρχίζει να παρουσιάζεται πλαστική περιοχή, δηλαδή υπολογισμός της τιμής της πίεσης ( $p$ ) για την οποία  $r_p = R$ . Από τη σχέση (18), για  $r_p = R$  προκύπτει:

$$p_e = p_o - c \quad (20\alpha)$$

**Παρατήρηση 2:** Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής της συνοχής της βραχώμαζας για την οποία δεν εμφανίζεται πλαστική περιοχή γύρω από την οπή. Από τη σχέση (20α) προκύπτει:

$$c_{\min} = p_o - p \quad (20\beta)$$

### 3.5 Υπολογισμός των εδαφικών μετακινήσεων

Λόγω συμμετρίας, η μετακίνηση είναι μόνον ακτινική ( $u$ ).

#### 3.5.1 Μετακίνηση στην ελαστική περιοχή

Η μετακίνηση δίνεται από τη σχέση (11):

$$u = \frac{c_2}{r} \quad (21)$$

Η σχέση αυτή εξειδικεύεται ως εξής:

(α) Περίπτωση όπου δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, δηλαδή όταν το έδαφος γύρω από την οπή είναι ελαστικό (βλέπε σχέση 14α):

$$u = R(1 + \nu) \left( \frac{p_o - p}{E} \right) \left( \frac{R}{r} \right) \quad (22\alpha)$$

Ειδικώς στο όριο της σήραγγας ( $r = R$ ):

$$u_R = R(1 + \nu) \left( \frac{p_o - p}{E} \right) \quad (22\beta)$$

(β) Περίπτωση όπου υπάρχει και πλαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα:

$$u = \frac{c_2}{r}$$

(β.1) Εάν  $\varphi \neq 0$ : Η σταθερά ( $c_2$ ) υπολογίζεται από τις σχέσεις (16) και (15).

(β.2) Εάν  $\varphi = 0$ : Η σταθερά ( $c_2$ ) υπολογίζεται από τις σχέσεις (19) και (18).

Με βάση τα ανωτέρω, η μετακίνηση στο όριο της πλαστικής περιοχής ( $r = r_p$ ) δίνεται από τη σχέση (για οποιοδήποτε  $\varphi$ ):

$$u_p = r_p \left( \frac{1 + \nu}{N_\varphi + 1} \right) \frac{p_o(N_\varphi - 1) + 2c\sqrt{N_\varphi}}{E} \quad (23)$$

#### 3.5.2 Μετακίνηση στην πλαστική περιοχή

Με την παραδοχή ότι στην πλαστική περιοχή η μετακίνηση γίνεται υπό σταθερό όγκο, προκύπτει για  $R < r < r_p$ :

$$\pi r_p^2 - \pi r^2 = \pi (r_p - u_p)^2 - \pi (r - u)^2 \Rightarrow u = r - \sqrt{r^2 - u_p(2r_p - u_p)} \quad (24\alpha)$$

Συνεπώς η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας ( $r = R$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$u_R = R - \sqrt{R^2 - u_p(2r_p - u_p)} \quad (24\beta)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις, το ( $u_p$ ) υπολογίζεται από τη σχέση (23) και το ( $r_p$ ) από τις σχέσεις (15) (για  $\varphi \neq 0$ ) και (18) (για  $\varphi = 0$ ).

Από τις σχέσεις (22β) και (24β) μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση (σύγκλιση) του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της εσωτερικής πίεσης ( $p$ ), δηλαδή κατά τη μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή ( $p_o$ ) έως το

μηδενισμό της. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3 και ονομάζεται “καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης” (convergence-confinement curve). Η γωνία ( $\alpha$ ) υπολογίζεται μέσω της σχέσης (22β) ως εξής:

$$\tan \alpha = \frac{u_p}{p_o - p} \Rightarrow \tan \alpha = \frac{(1 + \nu) R}{E} \quad (25)$$

Η εσωτερική πίεση ( $p_e$ ) για την οποία αρχίζει να αναπτύσσεται πλαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα δίνεται από τη σχέση (17α):

$$p_e = \frac{2p_o - 2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi + 1} \quad (26)$$

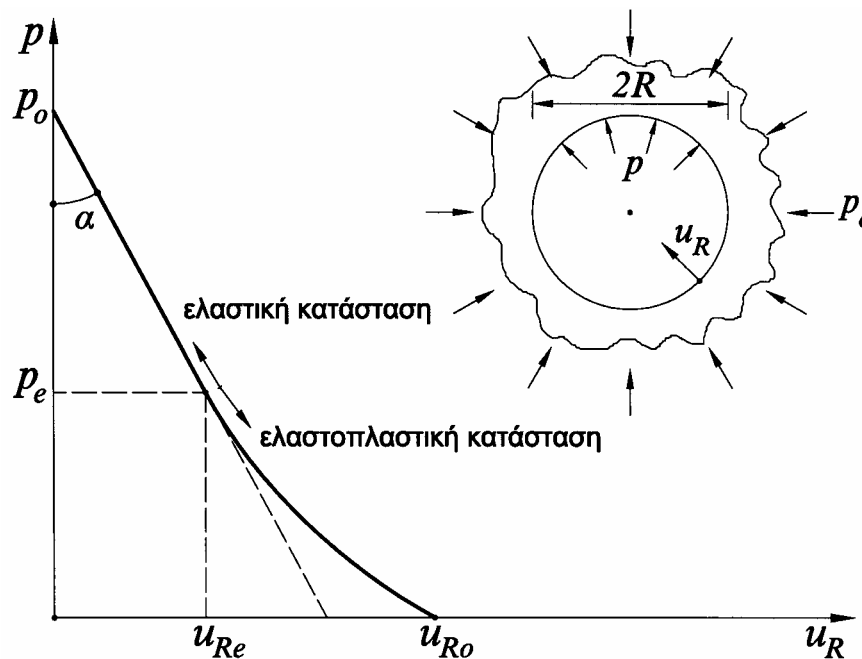
και η αντίστοιχη μετακίνηση του τοιχώματος της σήραγγας στην κατάσταση αυτή είναι:

$$u_{Re} = \frac{(1 + \nu) R}{E} \cdot \frac{p_o(N_\phi - 1) + 2c\sqrt{N_\phi}}{(N_\phi + 1)} \quad (27)$$

Μετά την έναρξη ανάπτυξης πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα, η σύγκλιση του τοιχώματος αυξάνει με ρυθμό μεγαλύτερο απ’ ότι στην ελαστική κατάσταση. Η μέγιστη τιμή ( $u_{Ro}$ ) της σύγκλισης προκύπτει για μηδενισμό της εσωτερικής πίεσης (πλήρης εκσκαφή της σήραγγας).

**Παρατήρηση:** Η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης του Σχήματος 3 αντιστοιχεί σε βραχόμαζα με συμπεριφορά ελαστική-απολύτως πλαστική. Στην περίπτωση βραχόμαζας με συμπεριφορά τύπου χαλάρωσης, η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης φαίνεται στο Σχήμα 4. Σε περιπτώσεις έντονης χαλάρωσης, προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας όταν η εσωτερική πίεση μειωθεί πέραν κάποιας τιμής.

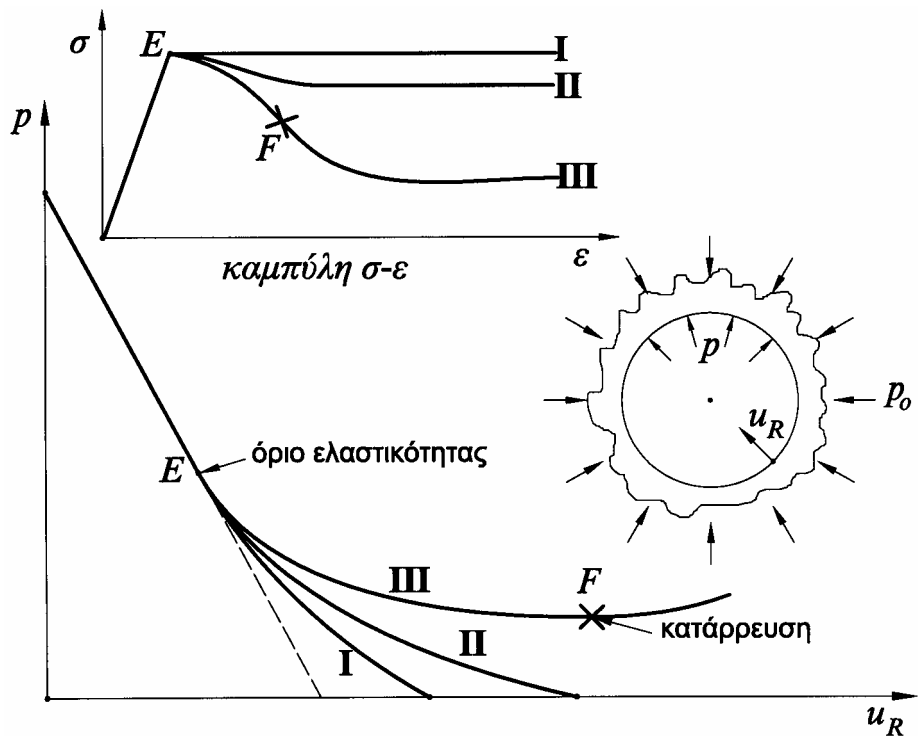
Η ανωτέρω εκτίμηση των μετακινήσεων του τοιχώματος της σήραγγας στην ελαστική και την πλαστική περιοχή επιτρέπει τον προσδιορισμό της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της βραχόμαζας. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας όπως περιγράφεται στο επόμενο



Σχήμα 3: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας (ακτίνα  $R$ ).



Κεφάλαιο.



Σχήμα 4: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης για διάφορους τύπους συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων της βραχόμαζας. Στην περίπτωση έντονης χαλάρωσης προκαλείται κατάρρευση της οροφής της σήραγγας.

