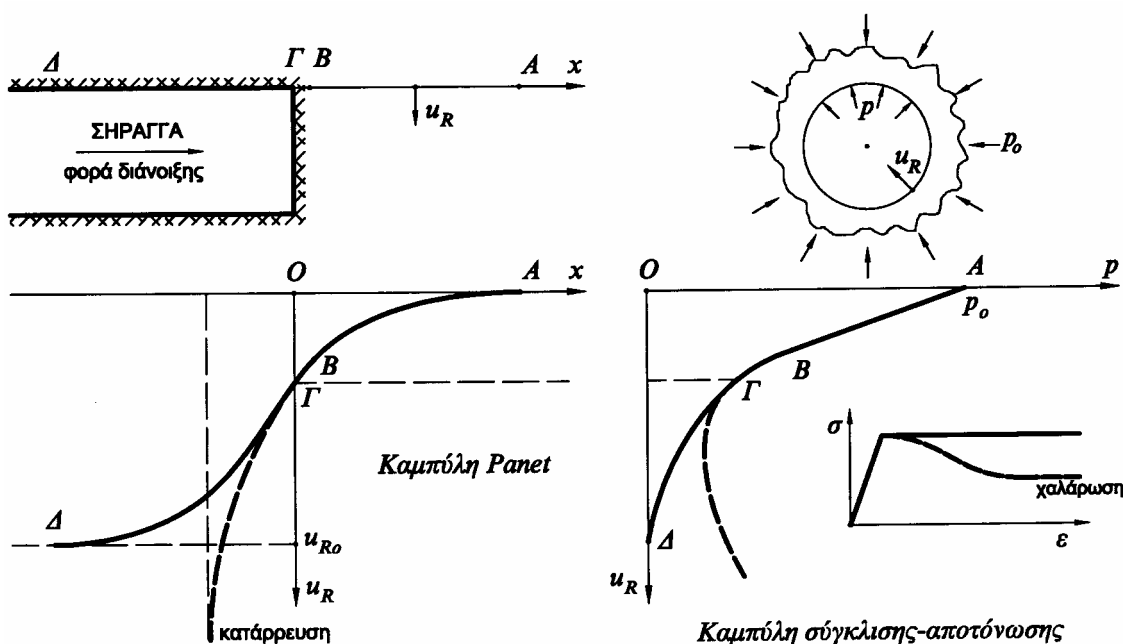


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

4.1 Μέθοδος ανάλυσης

Κατά τη διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει μια τέτοια καμπύλη (ΑΒΓΔ) εξέλιξης της σύγκλισης για ανυποστήρικτη σήραग्γα, σε διάγραμμα $x - u_R$ όπου (u_R) είναι η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας και (x) είναι η απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής. Από το σχήμα φαίνεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης (u_{R0}), της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης, συμβαίνει εμπρός από το μέτωπο της σήραγγας. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Συνεπώς, σε κάθε θέση (x) κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης $x-u_R$ μια τιμή της σύγκλισης του τοιχώματος (u_R). Για τη συγκεκριμένη τιμή (u_R) αντιστοιχεί μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μια τιμή της πίεσης (p), η οποία είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική πίεση (p_0). Η πίεση (p) ονομάζεται “ισοδύναμη εσωτερική πίεση” επειδή προκαλεί την ίδια σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με αυτήν που συμβαίνει σε απόσταση (x) από το μέτωπο της σήραγγας. Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή της σήραγγας δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.



Σχήμα 1: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραग्γα.

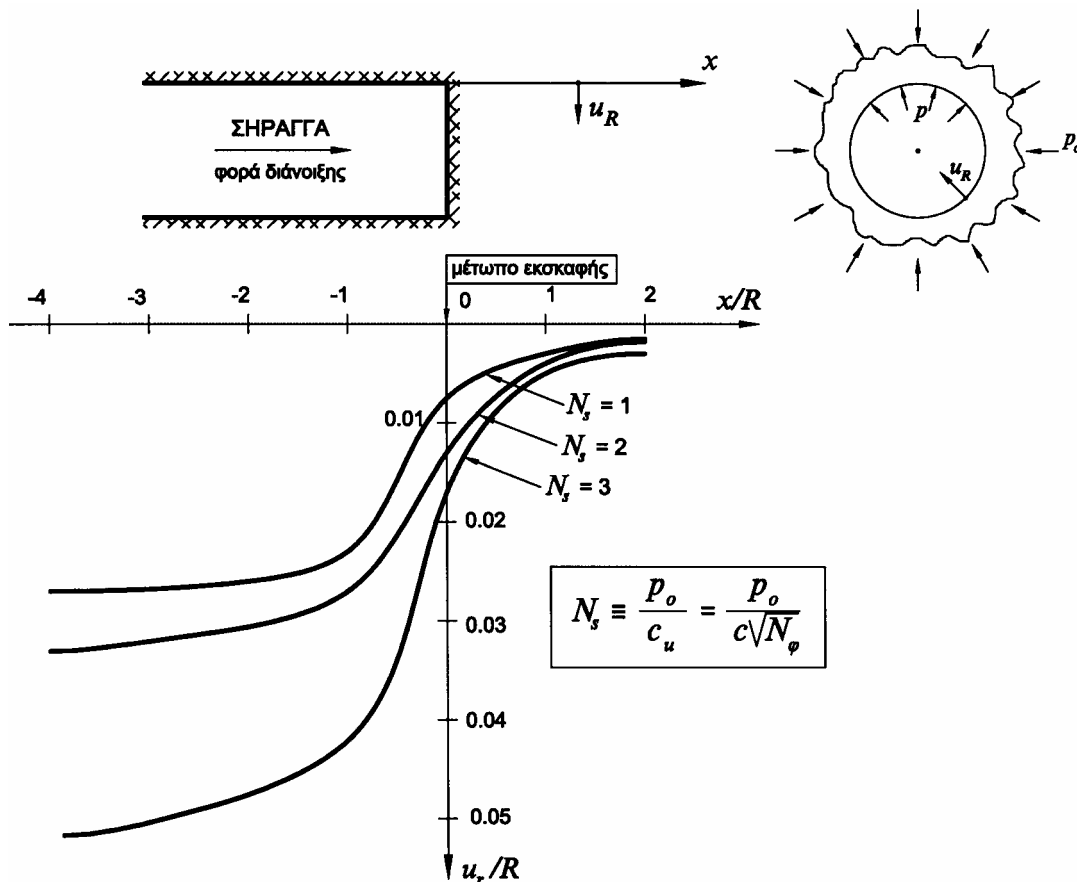
Η συσχέτιση της σύγκλισης (u_R) του τοιχώματος της σήραγγας με την απόσταση (x) από το μέτωπο εκσκαφής είναι πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας που έχει συμβεί πριν από την εφαρμογή της προσωρινής υποστήριξης. Σημειώνεται ότι ακόμη και στην περίπτωση όπου η προσωρινή υποστήριξη εφαρμόζεται ακριβώς στη θέση του μετώπου της σήραγγας, κάποια σύγκλιση έχει ήδη συμβεί (της τάξεως του 30-35% της συνολικής σύγκλισης). Η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν από την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ως άνω σύγκλισης επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης. Στα επόμενα εκτιμάται η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας συναρτήσει της απόστασης (x) από το μέτωπο εκσκαφής.

Η σύγκλιση $u_R(x)$ του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ($x < 0$) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση $x = 0$) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

$$u_R(x) = u_R(o) + [u_{R\infty} - u_R(o)] \left\{ 1 - \left[\frac{m}{m + \xi(-x/R)} \right]^2 \right\}$$

όπου:

$u_{R\infty}$ = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση ($x = -\infty$) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Για ελαστοπλαστική βραχόμαζα και ισότροπες γεωστατικές τάσεις ($\sigma_v = \sigma_h = p_o$) η τελική σύγκλιση μπορεί να υπολογισθεί με τις σχέσεις που περιγράφηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο για μηδενική εσωτερική



Σχήμα 2: Τυπικές μορφές καμπύλων Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s).

πίεση ($p=0$). Η σύγκλιση αυτή μπορεί να υπολογισθεί και με αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης της συμπεριφοράς της βραχόμαζας κατά τη διάνοιξη της σήραγγας (π.χ. την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) για μηδενική τιμή της εσωτερικής πίεσης.

R = η ακτίνα της σήραγγας

$\zeta = u_{R\infty}^e / u_{R\infty} =$ συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση. Για ισότροπη βραχόμαζα η ελαστική τελική σύγκλιση δίνεται από τη σχέση:

$$u_{R\infty}^e = \frac{p_o}{2G} R$$

$u_R(o) =$ σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας (θέση $x = 0$)

$m =$ συντελεστής

Οι τιμές των δύο τελευταίων συντελεστών εξαρτώνται από το συντελεστή υπερφόρτισης της βραχόμαζας $N_s = 2p_o / \sigma_{cm}$ ($\sigma_{cm} =$ αντοχή της βραχόμαζας σε μοναξονική θλίψη):

N_s	m	$u_R(o) / u_{R\infty}$
≤ 1	0.75	0.27
2	0.80	0.30
4	0.85	0.33
6	0.90	0.35

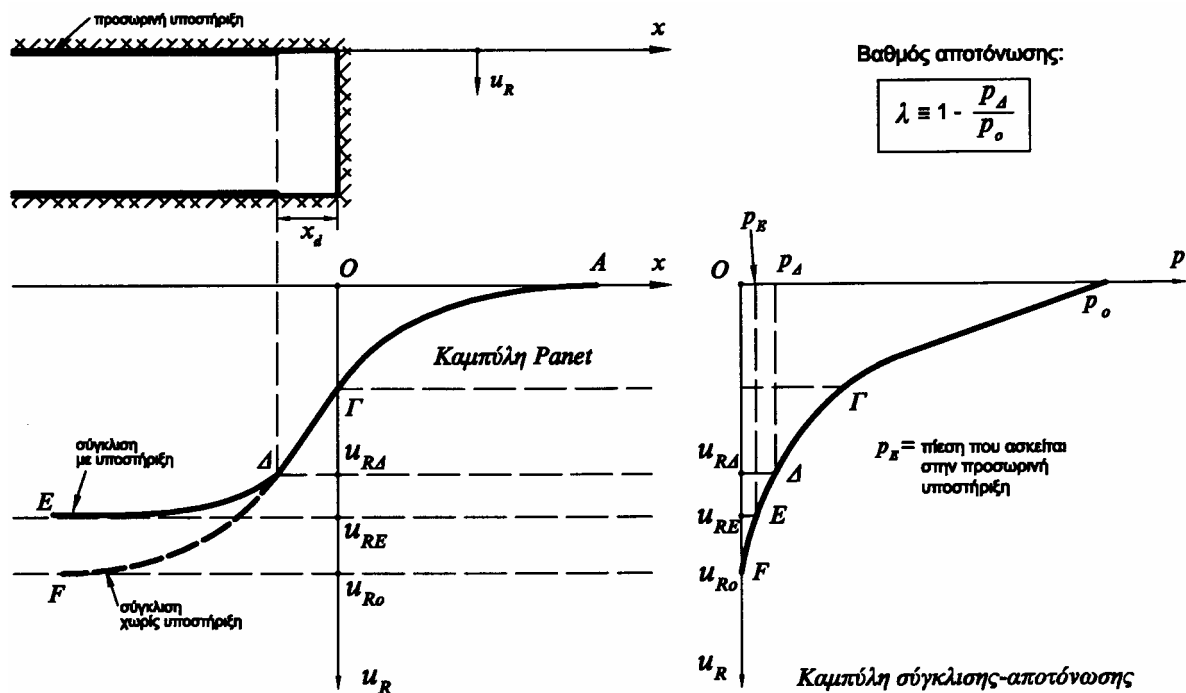
Ο ακόλουθος Πίνακας δίνει τυπικές τιμές της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις (x) από το μέτωπο:

$\zeta(-x/R)$	$u_R(x) / u_{R\infty}$ για			
	$N_s \leq 1$	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 6$
0	0.270	0.300	0.330	0.350
0.25	0.589	0.594	0.600	0.602
0.50	0.737	0.735	0.734	0.731
0.75	0.818	0.814	0.811	0.807
1.0	0.866	0.862	0.859	0.854
2.0	0.946	0.943	0.940	0.937

Τυπικές καμπύλες σύγκλισης του τοιχώματος σε διάφορες θέσεις πίσω από το μέτωπο εκσκαφής φαίνονται στο Σχήμα 2.

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει τις αντίστοιχες καμπύλες σε διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η καμπύλη $x-u_R$ ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση (u_{RE}) είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σύγκλιση της ανυποστήρικτης διατομής (u_{RO}). Αντιστοίχως, στην τελική κατάσταση ισορροπίας (κατάσταση Ε) ασκείται πίεση (p_E) στην προσωρινή υποστήριξη. Εάν (Δ) είναι η κατάσταση κατά τη στιγμή της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (σε απόσταση x_d πίσω από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας), τότε στο σημείο Δ αντιστοιχεί μια τιμή της σύγκλισης (u_{RD}) και μια ισοδύναμη εσωτερική πίεση (p_d). Ο βαθμός αποτόνωσης (deconfinement ratio) των εδαφικών τάσεων κατά την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ορίζεται από τη σχέση:

$$\lambda \equiv 1 - \frac{p_d}{p_o}$$



Σχήμα 3: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

όπου (p_o) είναι η αρχική γεωστατική πίεση και ($p_Δ$) είναι η ισοδύναμη εσωτερική πίεση που αντιστοιχεί στη θέση τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Είναι προφανές ότι ο βαθμός αποτόνωσης των τάσεων είναι μικρότερος από τη μονάδα.

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ του βαθμού αποτόνωσης (λ) και της θέσης τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (καμπύλες Panet). Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor) $N_s \equiv p_o/c_u \leq 1$, η βραχώμαζα γύρω από τη σήραγγα παραμένει στην ελαστική περιοχή¹, ακόμη και για πλήρη αποτόνωση της εσωτερικής πίεσης ($p = 0 \Rightarrow \lambda = 1$). Στην τελευταία αυτή περίπτωση, ο βαθμός αποτόνωσης των τάσεων στο μέτωπο της εκσκαφής ($x = 0$) είναι $\lambda = 0.27$, δηλαδή $p/p_o = 0.73$. Γενικότερα, από τις καμπύλες Panet προκύπτουν οι εξής τιμές του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων για διάφορες αποστάσεις πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας:

Απόσταση (x) από το μέτωπο της εκσκαφής*	Συντελεστής αποτόνωσης (λ) για			
	$N_s \leq 1$	$N_s = 2$	$N_s = 3$	$N_s = 4$
0	0.27	0.39	0.52	0.67
R/2	0.69	0.80	0.84	0.89
R	0.82	0.86	0.88	0.92
2R	0.90	0.92	0.93	0.94

* R = ακτίνα της σήραγγας

Κατά συνέπεια, σε απόσταση περίπου ίση με τη διάμετρο της σήραγγας ($x = 2R$), έχει επέλθει σχεδόν πλήρης αποτόνωση των εσωτερικών τάσεων.

¹ Τούτο αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο περί κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλική οπή

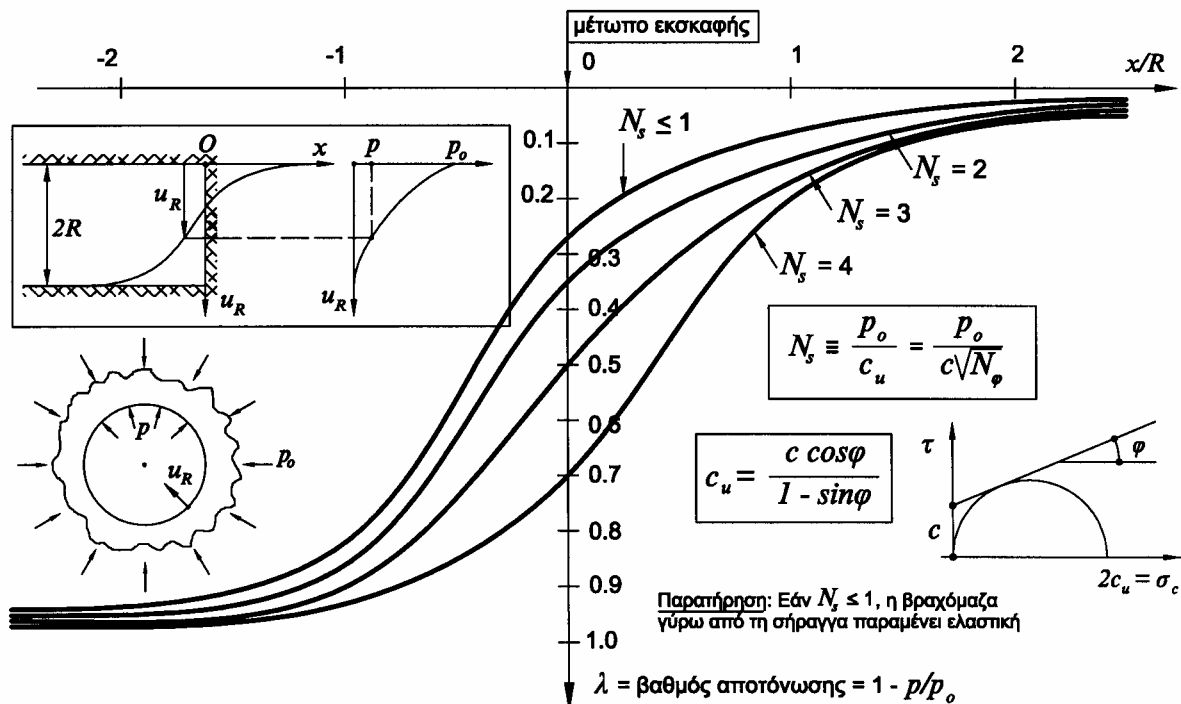
Με την αύξηση του συντελεστή υπερφόρτισης (N_s) αυξάνουν οι γεωστατικές τάσεις (p_o) σε σχέση με την αντοχή της βραχώμαζας ($\sigma_c = 2c_u$), η πλαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα διευρύνεται και αυξάνουν οι συγκλίσεις της οροφής.

Η συσχέτιση μεταξύ της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p), ή του βαθμού αποτόνωσης $\lambda \equiv 1 - p/p_o$, και της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας (u_R) περιγράφεται από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (convergence-confinement curve). Ο τρόπος υπολογισμού της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης περιγράφηκε στο Κεφάλαιο που αφορά τις κατανομές των τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλική σήραγγα. Η μορφή της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης μιας ανυποστήρικτης σήραγγας φαίνεται στο Σχήμα 5 (καμπύλη ΑΔΕΦ).

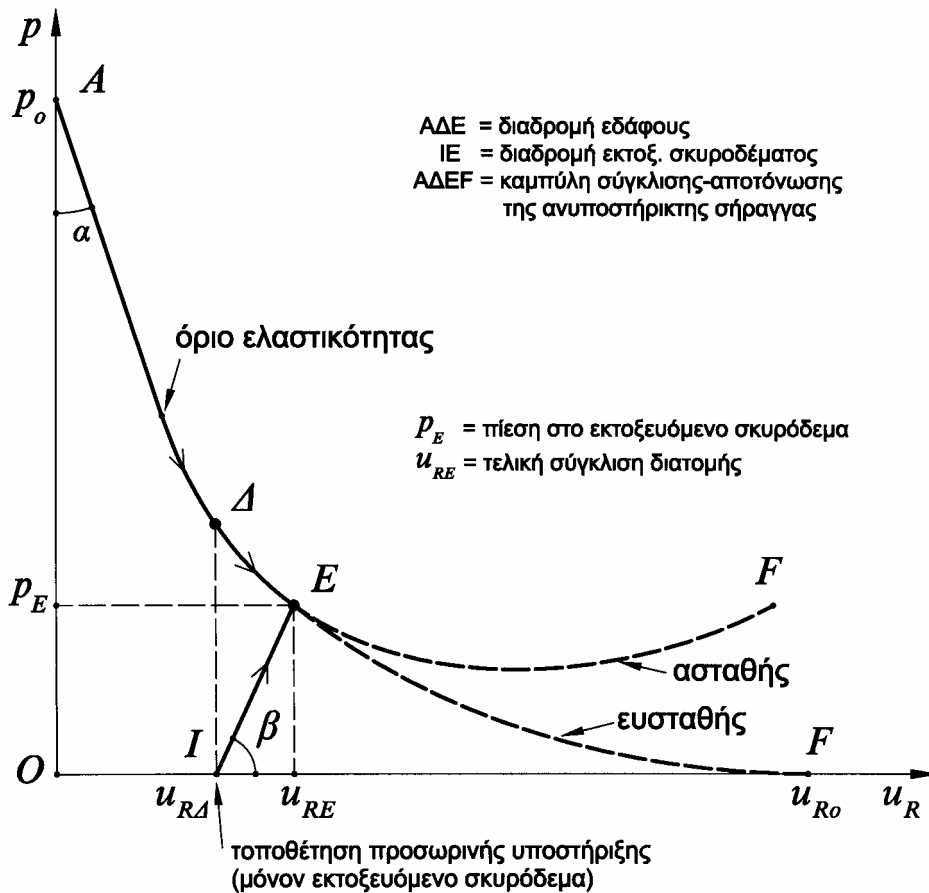
Ο συνδυασμός των καμπύλων Panet (Σχήμα 4) και της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος σε κάθε θέση (x) του άξονα της σήραγγας. Η μέθοδος είναι η εξής:

1. Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης (N_s).
2. Από τη συγκεκριμένη καμπύλη Panet (Σχήμα 4) και τη συγκεκριμένη τιμή (x) υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης (λ) και στη συνέχεια η ισοδύναμη εσωτερική πίεση $p = p_o (1 - \lambda)$.
3. Υπολογίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης με βάση τις ελαστικές παραμέτρους (E, ν) και τις παραμέτρους αντοχής (c, φ) του εδάφους. Η μέθοδος περιγράφεται στο Κεφάλαιο "Κατανομές τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από κυκλική σήραγγα".
4. Από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και για την τιμή της πίεσης (p) που υπολογίστηκε παραπάνω, υπολογίζεται η σύγκλιση της διατομής (u_R).

Ο βαθμός αποτόνωσης (λ), δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή (p_o) σε μια μικρότερη τιμή (p) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής



Σχήμα 4: Τυπικές μορφές των καμπύλων Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s .



Σχήμα 5: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

υποστήριξης σήραγγων. Πράγματι, μέσω των καμπύλων Panet, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση (p) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση (x) τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δυο φάσεις ως εξής:

- (1) Η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p_0) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.
- (2) Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p) στο μηδέν. Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης.

Είναι προφανές ότι όσο αργότερα τοποθετηθούν τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης τόσο μικρότερο φορτίο θα αναλάβουν και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συνολική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας.

Αρκετά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης σήραγγων σε δυο διαστάσεις (δηλαδή στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας) δεν επιτρέπουν την απομείωση των εσωτερικών τάσεων κατά το βαθμό αποτόνωσης (λ): $p = p_0 (1 - \lambda)$.

Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά η μέθοδος της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχώμαζας στο εσωτερικό της σήραγγας (ground loosening method). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι η μείωση του μέτρου

ελαστικότητας από την αρχική τιμή (E_o) σε μια μικρότερη τιμή (E) σε μια περιοχή της βραχόμαζας (συγκεκριμένα: στην περιοχή όπου προβλέπεται να εκσκαφεί η σήραγγα) προκαλεί σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας με τον ίδιο τρόπο που θα προκαλούσε η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική τιμή (p_o) σε μια μικρότερη τιμή (p). Αποδεικνύεται εύκολα ότι:

(α) Η σύγκλιση του τοιχώματος εντός ελαστικού δίσκου ακτίνας (R) λόγω ισότροπης πίεσης (p) είναι:

$$u_R = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)R}{E} p$$

(β) Η μετακίνηση του τοιχώματος μιας κυκλικής οπής ακτίνας (R) εντός ελαστικού χώρου λόγω ισότροπης πίεσης στο εσωτερικό της οπής είναι:

$$u_R = \frac{(1+\nu)R}{E} p$$

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η απομείωση του μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή της "οπής" από (E_o) σε (E) προκαλεί μείωση της πίεσης στο τοίχωμα της οπής από (p_o) σε (p). Είναι προφανές ότι η σύγκλιση του τοιχώματος της οπής υπολογιζόμενη είτε μέσω του δίσκου είτε μέσω του χώρου που περιβάλλει την οπή θα πρέπει να είναι η ίδια. Συνεπώς:

(α) Σύγκλιση του τοιχώματος του δίσκου:

$$u_{R1} = - \left[\frac{(1+\nu)(1-2\nu)R}{E_o} p_o - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)R}{E} p \right]$$

(β) Σύγκλιση του χώρου που περιβάλλει την οπή:

$$u_{R2} = \frac{(1+\nu)R}{E_o} p_o - \frac{(1+\nu)R}{E} p$$

Εξίσωση των δυο συγκλίσεων δίνει:

$$\frac{E}{E_o} = \frac{(1-2\nu)(p/p_o)}{2(1-\nu) - (p/p_o)} = \frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{(1-2\nu) + \lambda}$$

Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής της τελευταίας σχέσης φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα ($\lambda = 1 - p/p_o$):

ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ (ΜΕΙΩΜΕΝΟΥ) ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

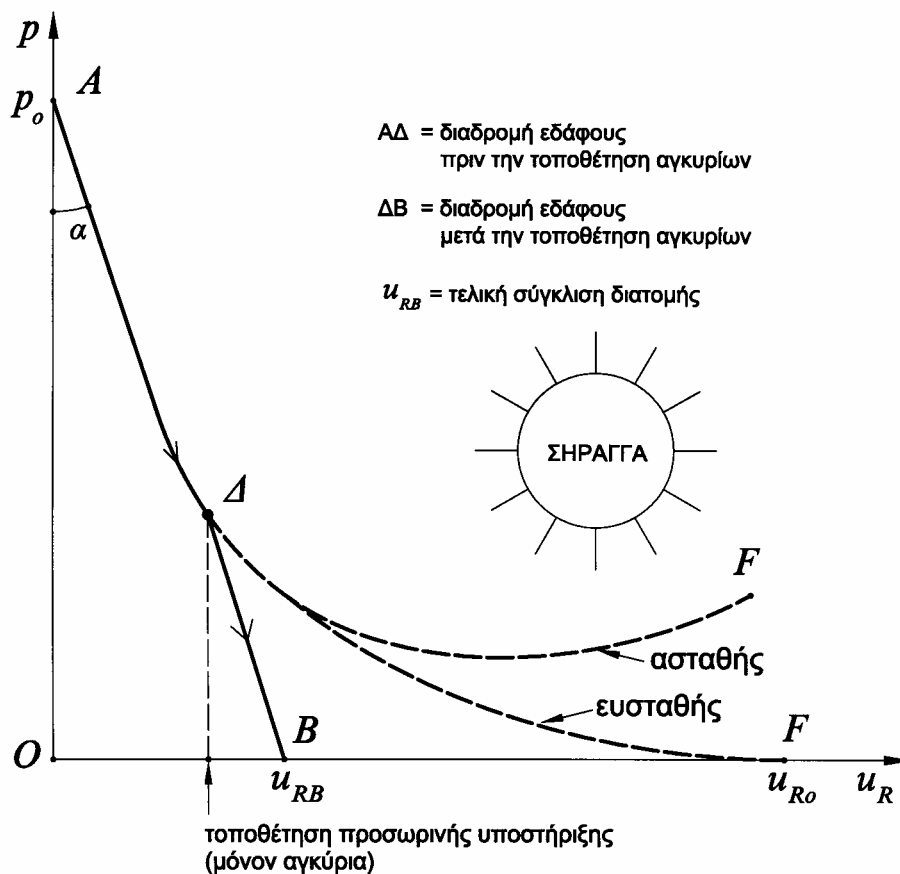
λ	p/p_o	Τιμές του E/E_o για		
		$\nu = 0.25$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.35$
0.20	0.80	0.571	0.533	0.480
0.30	0.70	0.438	0.400	0.350
0.40	0.60	0.333	0.300	0.257
0.50	0.50	0.250	0.222	0.187
0.60	0.40	0.182	0.160	0.133
0.70	0.30	0.125	0.109	0.090
0.80	0.20	0.077	0.067	0.054
0.90	0.10	0.036	0.031	0.025

Ο ανωτέρω πίνακας δίνει την αντιστοιχία του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων (λ) και του συντελεστή χαλάρωσης (E/E_o) στο εσωτερικό της σήραγγας και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του συντελεστή χαλάρωσης που ισοδυναμεί με κάποια τιμή του συντελεστή αποτόνωσης.

4.2 Επιρροή της προσωρινής υποστήριξης

Η καμπύλη ΑΓΔF του Σχήματος 3 και η καμπύλη ΑΔΕF του Σχήματος 5 δείχνουν τη συμπεριφορά της βραχόμαζας γύρω από ανυποστήρικτη σήραγγα. Συνήθως, σε κάποια (μικρή) απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χαλύβδινα πλαίσια, αγκύρια κλπ). Σκοπός της τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι ο περιορισμός της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας, η αποφυγή κατάρρευσης της οροφής (στην περίπτωση συμπεριφοράς τύπου χαλάρωσης - βλέπε Σχήμα 1) καθώς και η αποφυγή αποσφηνώσεων βραχωδών τεμαχίων. Με την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης σε απόσταση x_d από το μέτωπο της εκσκαφής (σημείο Δ στο Σχήμα 3) η καμπύλη σύγκλισης ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ αντί της διαδρομής ΔF που αντιστοιχεί στην ανυποστήρικτη διατομή, με συνέπεια τη μείωση της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας.

Η επιρροή της τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης από στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος φαίνεται στο Σχήμα 5. Κατά την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης (σημείο Δ) έχει ήδη συμβεί σύγκλιση του τοιχώματος ίση με (u_{RD}). Αμέσως μετά την τοποθέτηση, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι αφόρτιστο (επειδή τοποθετείται σε μια διατομή που ισορροπεί). Με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου της σήραγγας, η διατομή τείνει να συγκλίνει περαιτέρω λόγω μείωσης



Σχήμα 6: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια.

της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p). Στην περαιτέρω σύγκλιση της διατομής ανθίσταται ο δακτύλιος από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναλαμβάνοντας φορτία. Η ανάληψη φορτίων από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα προκαλεί συμπίεση του δακτυλίου και κάποια (μικρή) αύξηση της σύγκλισης της διατομής. Στο Σχήμα 5, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί τη διαδρομή ΙΕ, ενώ το έδαφος ακολουθεί τη διαδρομή ΔΕ. Η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται στο σημείο Ε όπου η πίεση επί του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ισούται με p_E . Η κλίση της ευθείας ΙΕ υπολογίζεται παρακάτω:

Η περιφερειακή τάση (σ_θ) εντός δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους (t) και μέσης ακτίνας (R) είναι:

$$\sigma_\theta = p \frac{R}{t}$$

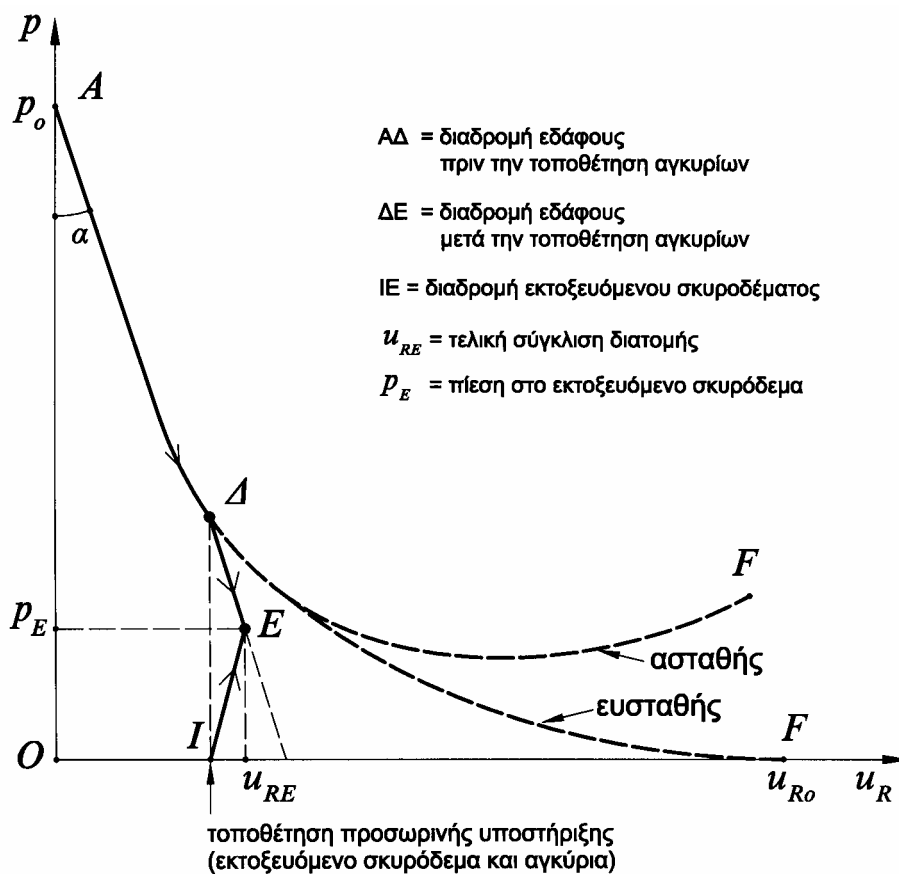
όπου (p) είναι η πίεση που η βραχόμαζα ασκεί στο δακτύλιο. Η αντίστοιχη ακτινική πίεση (σ_r) κυμαίνεται κατά το πάχος του δακτυλίου μεταξύ μηδέν και (p) με μέση τιμή:

$$\sigma_r = p/2$$

Λόγω επίπεδης παραμόρφωσης:

$$\frac{u_R}{R} = \varepsilon_\theta = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\sigma_\theta - \nu\sigma_r]$$

όπου (E , ν) είναι οι ελαστικές σταθερές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Συνδυασμός των ανωτέρω σχέσεων δίνει:



Σχήμα 7: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

$$\tan \beta = K = \frac{p}{u_R} = \frac{E}{R(1+\nu) \left[(1-\nu) \frac{R}{t} - \frac{1}{2} \nu \right]}$$

Η γωνία (β) φαίνεται στο Σχήμα 5.

Το Σχήμα 6 παρουσιάζει την εξέλιξη της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης στην περίπτωση προσωρινής υποστήριξης με αγκύρια. Η καμπύλη ΑΔF αποτελεί τη διαδρομή του εδάφους που περιβάλλει τη σήραγγα χωρίς μέτρα υποστήριξης. Στο σημείο Δ τοποθετούνται τα αγκύρια τα οποία ενισχύουν τη βραχόμαζα και μειώνουν την ενδοσιμότητά της. Έτσι, η περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας δεν ακολουθεί την καμπύλη ΔF αλλά την καμπύλη ΔB η οποία προκαλεί μικρότερη μετακίνηση του τοιχώματος (u_{RB}) απ' ότι στην περίπτωση της ανυποστήρικτης διατομής (u_{RO}).

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης στην περίπτωση προσωρινής υποστήριξης με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια. Η τελική κατάσταση αντιστοιχεί στο σημείο E και η πίεση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ισούται με p_E .

4.3 Υπολογισμός της έντασης της επένδυσης σήραγγας

4.3.1 Υπολογισμός των εντατικών μεγεθών

Η μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης καταλήγει στον υπολογισμό της πίεσης που ασκεί η βραχόμαζα στην επένδυση της σήραγγας συναρτήσει της σύγκλισης του τοιχώματος. Η σύγκλιση αυτή οφείλεται αφενός στην χρονική υστέρηση της εφαρμογής των μέτρων υποστήριξης (προώθηση του μετώπου εκσκαφής πριν την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης) και αφετέρου στην ενδοσιμότητα των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της βραχόμαζας και των μέτρων υποστήριξης μέσω της απαίτησης ενιαίας παραμόρφωσης των δύο, αποτελεί την ουσία του τρόπου λειτουργίας των μέτρων υποστήριξης.

Στο εδάφιο αυτό υπολογίζεται η ένταση (αξονική δύναμη και καμπτική ροπή) του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της προσωρινής υποστήριξης σήραγγας συναρτήσει των πιέσεων της περιβάλλουσας βραχόμαζας.

Εστω κυλινδρικό κέλυφος (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επένδυσης της σήραγγας) ακτίνας (R), πάχους (e) και ελαστικών σταθερών (E, ν), στο οποίο ασκείται εξωτερική ακτινική πίεση (σ_R). Η επαπτομενική τάση ($\tau_{R\theta}$), η ακτινική μετακίνηση (u) και η επαπτομενική μετακίνηση (v) συνδέονται μέσω των σχέσεων:

$$\sigma_R = K_{sn} \left(\frac{u}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + K_{sf} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial^4 u}{\partial \theta^4} + \frac{2}{R} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{u}{R} \right)$$

$$\tau_{R\theta} = -K_{sn} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \right)$$

όπου: $K_{sn} = \frac{E[R^2 - (R - e)^2]}{(1 + \nu)[(1 - 2\nu)R^2 + (R - e)^2]}$ είναι η αξονική αντίσταση (ατένεια) του

κελύφους και: $K_{sf} = \frac{E}{12(1 - \nu)} \frac{e^3}{R^3}$ είναι η καμπτική αντίσταση (δυσκαμψία) του κελύφους.

Στην περίπτωση αξονικής συμμετρίας (περί τον άξονα της σήραγγας) ισχύει:

$\nu = 0$, $\frac{\partial u}{\partial \theta} = 0$, οπότε:

$$\sigma_R = (K_{sn} + K_{sf}) \frac{u}{R} \quad \tau_{R\theta} = 0$$

Η τελευταία σχέση δίνει την συνδυασμένη δυσ-παραμορφωσιμότητα (ατένεια και δυσκαμψία) της επένδυσης της σήραγγας, δηλαδή την απόκριση (σύγκλιση) της επένδυσης κατά την εφαρμογή πίεσης (σ_R) εκ της βραχόμαζας.

Οι ανωτέρω διαφορικές εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για διάφορες κατανομές των εξωτερικών πιέσεων της μορφής:

$$\sigma_R = \frac{1}{2} [(p_v + p_h) + (p_v - p_h) \cos 2\theta]$$

$$\tau_{R\theta} = r \sin 2\theta$$

όπου για $\theta = 0$ (κατακόρυφη διεύθυνση): $\sigma_R = p_v$, $\tau_{R\theta} = 0$

για $\theta = 45^\circ$: $\sigma_R = \frac{1}{2}(p_v + p_h)$, $\tau_{R\theta} = r$

και για $\theta = 90^\circ$ (οριζόντια διεύθυνση): $\sigma_R = p_h$, $\tau_{R\theta} = 0$. Οι κατανομές τάσεων αυτής της μορφής αντιστοιχούν σε ανισότροπες γεωστατικές τάσεις p_v και p_h στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση, αντιστοίχως, οπότε: $r = \frac{1}{2}(p_v - p_h)$.

Επίλυση των διαφορικών εξισώσεων για την ανωτέρω κατανομή των εξωτερικών τάσεων, δίνει τις εξής μετακινήσεις του κελύφους:

$$\frac{u}{R} = \left(\frac{1}{K_{sn} + K_{sf}} \right) p + \frac{1}{9K_{sf}} \left[q - \frac{1}{2}r \right] \cos 2\theta$$

$$\frac{v}{R} = \frac{1}{4K_{sn}} r \sin 2\theta - \frac{1}{18K_{sf}} \left[q - \frac{1}{2}r \right] \sin 2\theta$$

όπου: $p = \frac{1}{2}(p_v + p_h)$ και $q = \frac{1}{2}(p_v - p_h)$. Στην περίπτωση όπου p_v και p_h είναι οι ανισότροπες γεωστατικές τάσεις στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση, αντιστοίχως ισχύει επιπλέον: $r = q$.

Αντιστοίχως, για την καμπτική ροπή (M) και την αξονική δύναμη στο κέλυφος ισχύουν οι διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{N}{R} + \frac{1}{R^2} \frac{d^2 M}{d\theta^2} = \sigma_R \quad \frac{1}{R^2} \frac{dM}{d\theta} - \frac{1}{R} \frac{dN}{d\theta} = \tau_{R\theta}$$

Για τις ανωτέρω κατανομές των (σ_R) και ($\tau_{R\theta}$), οι τελευταίες διαφορικές εξισώσεις επιλύονται και δίνουν τις ακόλουθες κατανομές της αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής στο κέλυφος:

$$N = pR + \frac{1}{3}(2r - q)R \cos 2\theta \quad M = \frac{1}{6}(r - 2q)R^2 \cos 2\theta$$

4.3.2 Υπολογισμός της ατένειας και δυσκαμψίας της επένδυσης

Στο Κεφάλαιο αυτό υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά ατένειας (K_{sn}) και δυσκαμψίας (K_{sf}) διαφόρων τύπων υποστήριξης σηράγγων.

4.3.2.1 Επένδυση με κελύφος σταθερού πάχους

Στην περίπτωση σήραγγας ακτίνας (R) με επένδυση από εκτοξευόμενο ή έγχυτο σκυρόδεμα πάχους (e) και ελαστικών σταθερών (E, ν), η αξονική αντίσταση

(ατένεια) του κελύφους είναι: $K_{sn} = \frac{E[R^2 - (R - e)^2]}{(1 + \nu)[(1 - 2\nu)R^2 + (R - e)^2]}$, ενώ η καμπτική

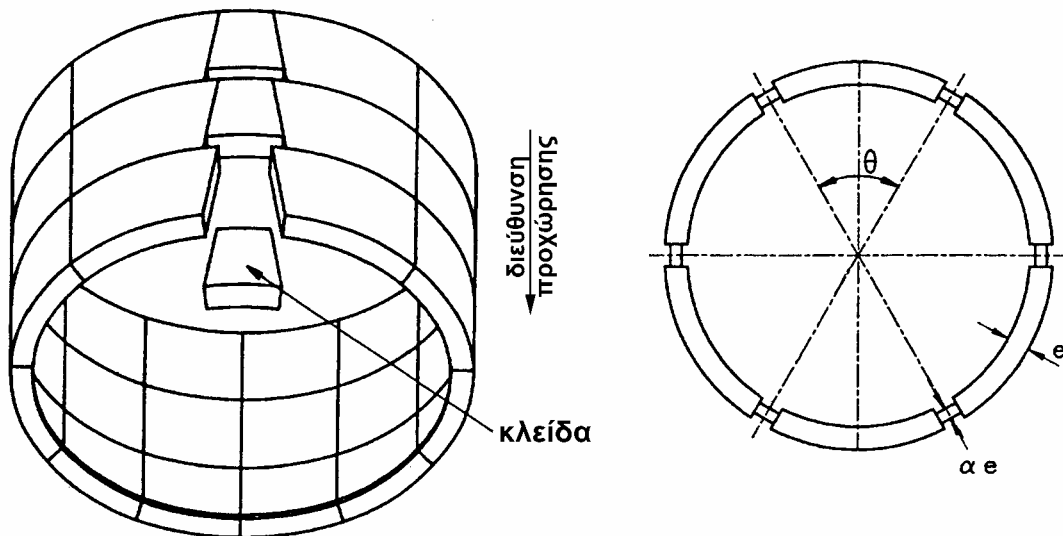
αντίσταση (δυσκαμψία) του κελύφους είναι: $K_{sf} = \frac{E}{12(1 - \nu)} \frac{e^3}{R^3}$.

4.3.2.2 Επένδυση με στοιχεία μεταβλητού πάχους

Οι ανωτέρω τιμές της ατένειας (K_{sn}) και δυσκαμψίας (K_{sf}) ισχύουν για κελύφη σταθερού πάχους (e). Σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. κελύφη από προκατασκευασμένα στοιχεία, κελύφη μειωμένης ατένειας για διογκώσιμα εδάφη) το πάχος του κελύφους δεν είναι σταθερό αλλά περιλαμβάνει και τμήματα μειωμένου πάχους. Στα επόμενα υπολογίζεται η ατένεια και δυσκαμψία τέτοιων κελυφών. Έστω, ότι το κελύφος ακτίνας (R) αποτελείται από (n) τμήματα πάχους (e) και ισάριθμα τμήματα πάχους (αe), όπου $\alpha < 1$. Ο λόγος των μηκών των τμημάτων σταθερού και μειωμένου πάχους είναι (ξ). Συνεπώς, τα τμήματα πάχους (e) και (αe) θα έχουν μήκη, αντιστοίχως:

$$l_1 = \frac{2\pi R \xi}{(1 + \xi)n} \quad l_2 = \frac{2\pi R}{(1 + \xi)n}$$

Εάν (E_1, E_2) είναι τα μέτρα ελαστικότητας των δυο τμημάτων μήκους l_1 και l_2 αντιστοίχως, τότε το ισοδύναμο μέσο μέτρο ελαστικότητας ενός κελύφους με ενιαίο πάχος (e) θα είναι:



Σχήμα 8: Επένδυση σήραγγας με προκατασκευασμένα στοιχεία

$$E = \frac{\alpha E_1 E_2 (l_1 + l_2)}{E_1 l_2 + \alpha l_1 E_2}$$

και η μέση ατένεια του ισοδύναμου κελύφους:

$$K_{sn} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{e}{R} \right)$$

Η ισοδύναμη μέση ροπή αδρανείας του κελύφους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = \left[\alpha^3 + \left(\frac{4}{n} \right)^2 \right] \frac{e^3}{12} \quad (\text{για } n > 4)$$

οπότε, η μέση δυσκαμψία του ισοδύναμου κελύφους είναι:

$$K_{sf} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{I}{R^3}$$

4.3.2.3 Υποστήριξη με χαλύβδινα πλαίσια

Στην περίπτωση υποστήριξης της σήραγγας με χαλύβδινα πλαίσια σε καλή επαφή με τη βραχώμαζα, η ατένεια και δυσκαμψία των στοιχείων αυτών υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$K_{sn} = \frac{E_\alpha A}{LR} \quad K_{sf} = \frac{E_\alpha I}{LR^3}$$

όπου:

L = απόσταση μεταξύ των πλαισίων (κατά μήκος του άξονα της σήραγγας)

R = ακτίνα της σήραγγας

E_α = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

A = εμβαδόν διατομής του πλαισίου

I = ροπή αδρανείας της διατομής του πλαισίου

Στην περίπτωση όπου η επαφή μεταξύ των πλαισίων και του εδάφους γίνεται με παρεμβήσματα (τάκους), τότε το (K_{sf}) παραμένει αμετάβλητο και:

$$\frac{1}{K_{sn}} = \frac{LR}{E_\alpha A} + \frac{LR^3}{E_\alpha I} \left[\frac{\theta(\theta + \sin \theta \cos \theta)}{2 \sin^2 \theta} - 1 \right] + \frac{2L\theta t_o}{E_o w_o^2}$$

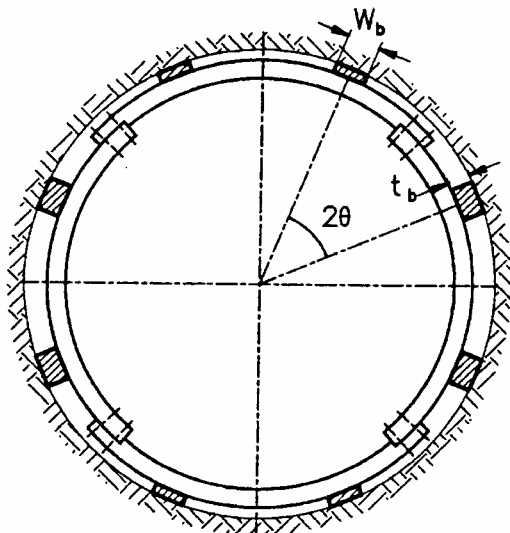
όπου:

2θ = η επίκεντρος γωνία μεταξύ των τάκων, δηλαδή $\theta = \pi/n$, όπου (n) είναι ο αριθμός των τάκων

E_o = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των τάκων

w_o = το μήκος του τάκου κατά την διατομή της σήραγγας

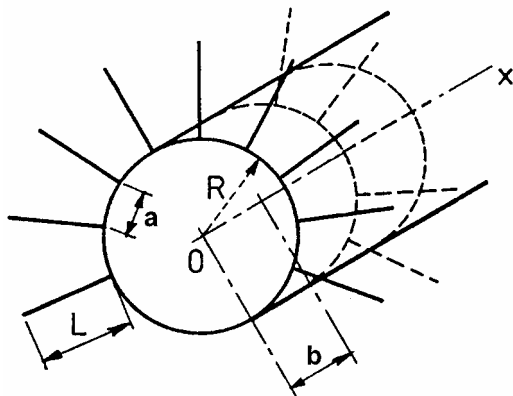
t_o = το πάχος του τάκου κατά την ακτίνα της σήραγγας



4.3.2.4 Υποστήριξη με αγκύρια και βλήτρα

Στην περίπτωση υποστήριξης της διατομής της σήραγγας με αγκύρια ή βλήτρα, η δυσκαμψία του συστήματος της υποστήριξης είναι μηδέν και η ατένεια (K_{sn}) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{K_{sn}} = \frac{ab}{R} \left(\frac{4L}{\pi d^2 E_b} + Q \right)$$



όπου: (a, b) είναι οι διαστάσεις του κανάβου των αγκυρίων, (R) είναι η ακτίνα της σήραγγας, (d) είναι η διάμετρος των αγκυρίων, (E_b) είναι το μέτρο ελαστικότητας των αγκυρίων, (L) είναι το συνολικό μήκος των αγκυρίων για αγκύρια διαστελλόμενης κεφαλής και το ήμισυ του μήκους για αγκύρια συνεχούς πάκτωσης, ενώ $Q = 0.03 - 0.05$ m/MN που δίνει μια αυξημένη ενδοσιμότητα των παθητικών αγκυρίων λόγω χαλαρότητας (απαιτείται κάποια αρχική παραμόρφωση για να αρχίσουν να αναλαμβάνουν φορτία).

Στην περίπτωση υποστήριξης της διατομής της σήραγγας με περισσότερα του ενός συστήματα (π.χ. αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα) οι δυσκαμψίες και ατένειες αθροίζονται.

Ο ακόλουθος Πίνακας παρουσιάζει ενδεικτικές τιμές της ατένειας (K_{sn}) και δυσκαμψίας (K_{sf}) για διάφορα είδη προσωρινής υποστήριξης κυκλικής σήραγγας διαμέτρου 10 μέτρων.

Είδος υποστήριξης	K_{sn} (MPa)	K_{sf} (MPa)
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 10cm	210	0.004
Έγχυτο σκυρόδεμα πάχους 40cm	2500	1.35
Δακτύλιος από έξι προκατασκευασμένα στοιχεία μπετόν πάχους 30cm	2800	0.50
Χαλύβδινα πλαίσια HEB140 ανά 1m, σε καλή επαφή με το βράχο	190	0.0025
Αγκύρια διαστελλόμενου άκρου μήκους 4m, $d = 18\text{mm}$, σε κάνναβο 1m x 1m	22.5	0

Βιβλιογραφία

Panet M. (1995) "Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinement", Presses de l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.