

Επιρροή της Χαλάρωσης της βραχώμαζας στη Διάνοιξη σηράγγων

Effect of Strain – Softening Behaviour of Rockmass on tunnel excavation

ΣΙΤΑΡΕΝΙΟΣ, Π. Πολιτικός Μηχανικός Π.Πατρών, Μ.Δ.Ε Ε.Μ.Π.
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το παρόν άρθρο διερευνά την επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς χαλαρούμενων γεωυλικών στην διάνοιξη σηράγγων. Ειδικότερα αναλύεται η κατανομή των τάσεων των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων γύρω από κυκλική σήραγγα σε ισότροπο γεωστατικό πεδίο. Χρησιμοποιείται τριγραμμικό μοντέλο τάσεων – παραμορφώσεων με μείωση της αντοχής μετά την κορυφαία τιμή. Επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις γύρω από τη σήραγγα και παράγονται αδιάστατα νομογραφήματα τα οποία δείχνουν την επιρροή της χαλάρωσης της βραχώμαζας στις μετακινήσεις της άντυγας της σήραγγας, στην έκταση της μή-ελαστικής περιοχής γύρω από αυτή και στην κατανομή του συντελεστή αποτόνωσης κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αναλύσεων σε ελαστικό - απολύτως πλαστικό υλικό που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πράξη.

ABSTRACT: This paper investigates the effect of strain softening of geomaterials on the excavation of tunnels. It investigates the effect of the magnitude of strain softening on the distribution of stresses, strains and displacements around a circular tunnel in an initially isotropic geostatic field. To simulate such strain – softening behaviour, a tri-linear stress – strain model was used and the differential equations around the circular tunnel were solved. The model includes a decreasing (softening) linear path after the maximum peak stress. Non-dimensional charts were obtained to illustrate the effect of strain – softening behaviour on the tunnel wall displacement, the extent of the non-elastic zone around the tunnel and on the distribution of the confinement along the tunnel axis. The results of the analyses were compared with results from commonly used elastic perfectly plastic analyses.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο βοήθημα στον σχεδιασμό της διάνοιξης και της υποστήριξης σηράγγων. Συνδυαζόμενες, με εμπειρικές συσχετίσεις που περιγράφουν την εξέλιξη των μετακινήσεων κατά μήκος του άξονα της σήραγγας ως συνάρτηση της απόστασης από το μέτωπο (καμπύλες σύγκλισης - απόστασης) όπως οι προταθείσες από τον Panet (1995) και από τους Chern et al (1998), οδηγούν στον προσδιορισμό των καμπυλών απόστασης – αποτόνωσης οι οποίες φανερώνουν την τιμή του συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=1-\rho_i/\rho_o$ σε κάθε θέση κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Η κατά το δυνατόν καλύτερη και ακριβέστερη γνώση της τιμής του συντελεστή αποτόνωσης

είναι πολύ σημαντική καθώς τα παραπάνω βρίσκουν εφαρμογή σε δι-διάστατες αναλύσεις με χρήση αριθμητικών μοντέλων για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων μέτρων άμεσης υποστήριξης. Επιπρόσθετα η γνώση της κατανομής τόσο των τάσεων γύρω από τη σήραγγα όσο και της έκτασης και κατανομής της σχηματιζόμενης μη-ελαστικής ζώνης γύρω από αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην διαστασιολόγηση επιμέρους στοιχείων όπως το μήκος αγκύρωσης αγκυριών, η διαταραχή του περιβάλλοντος εδάφους κλπ.

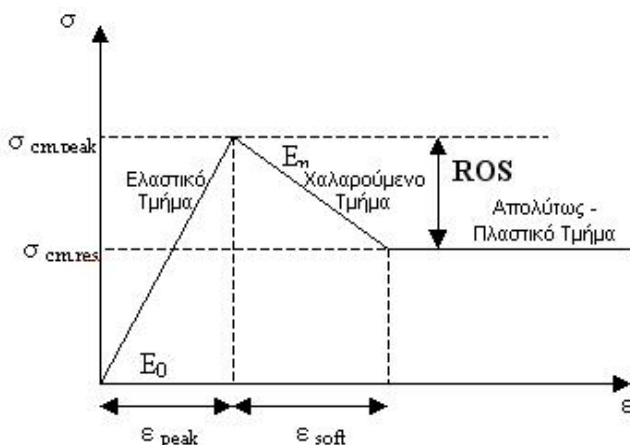
Η χρήση σύνθετων καταστατικών μοντέλων, όπως το χρησιμοποιούμενο στο παρόν άρθρο τρι – γραμμικό μοντέλο με χαλάρωση, για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς γεωυλικών κατά τον υπολογισμό των ανωτέρω στοιχείων δύναται να βελτιώσει την ακρίβεια

και την ορθότητα των αναλύσεων αυτών σε σύγκριση με τις συνήθως εφαρμοζόμενες μεθόδους (χρήση ελαστικού απολύτως πλαστικού μοντέλου).

Με τον όρο χαλαρούμενη μηχανική συμπεριφορά εννοούμε την απομείωση της αντοχής του υλικού μετά την κορυφαία τιμή της, μέχρι τη σταθεροποίησή της σε κάποια παραμένουσα τιμή. Γεωυλικά τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά χαλαρούμενη μηχανική συμπεριφορά είναι οι υπερστερεοποιημένες (στιφρές άργιλοι), οι πυκνές άμμοι καθώς και ψαθυρές βραχώμαζες όπως οι μαλακοί βράχοι σε μικρά υπερκείμενα. Για την μαθηματική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων υλικών η χρήση ελαστικού – απολύτως πλαστικού μοντέλου δεν κρίνεται ασφαλής και προτείνεται η χρήση πιο σύνθετου μοντέλου.

2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΧΑΛΑΡΩΣΗ

Για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών τα οποία παρουσιάζουν χαλάρωση γίνεται χρήση ενός εξιδανικευμένου τρι-γραμμικού μοντέλου τάσεων-παραμορφώσεων (σχήμα 1) με ελαστικό ανιόντα κλάδο μέχρι την κορυφαία αντοχή $\sigma_{cm,peak}$, φθίνοντα κλάδο λόγω χαλάρωσης και τελικό οριζόντιο κλάδο στο επίπεδο της παραμένουσας αντοχής $\sigma_{cm,res}$.



Σχήμα 1. Εξιδανικευμένη καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων υλικού με χαλάρωση
Figure 1. Idealized stress-strain curve for strain - softening material.

Για την περιγραφή του μεγέθους της χαλάρωσης ορίζεται ο βαθμός χαλάρωσης:

$$ROS = 1 - \sigma_{cm,res} / \sigma_{cm,peak} \quad (1)$$

μέγεθος το οποίο παίρνει τιμές από 0 έως 1 και συμβολίζει την απομείωση της παραμένουσας αντοχής $\sigma_{cm,res}$ σε σχέση με την κορυφαία τιμή της $\sigma_{cm,peak}$. Λαμβάνοντας μηδενική τιμή για τον βαθμό χαλάρωσης $ROS=0$ το παραπάνω μοντέλο εκφυλίζεται σε ελαστικό - απολύτως πλαστικό.

Για την καλύτερη κατανόηση της πρακτικής σημασίας του μέτρου ελαστικότητας σε χαλάρωση, $E_n = (\sigma_{cm,peak} - \sigma_{cm,res}) / \epsilon_{soft}$ (κλίση του φθίνοντα κλάδου λόγω χαλάρωσης), αυτό εκφράζεται ως συνάρτηση του λόγου των ανοιγμένων παραμορφώσεων $\epsilon_{soft} / \epsilon_{peak}$. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μέσω του παραπάνω λόγου ο έλεγχος του πόσο “όλκιμη” ή “ψαθυρή” είναι η χαλάρωση του υλικού. Προκύπτει η ακόλουθη σχέση (2):

$$E_n = E_0 \cdot (\epsilon_{soft} / \epsilon_{peak}) \cdot ROS \quad (2)$$

3. ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΧΑΛΑΡΩΣΗ

Θεωρείται διάνοιξη σήραγγας κυκλικής διατομής ακτίνας R σε ισότροπο αρχικό γεωστατικό πεδίο τάσεων $P_v = P_h = P_0 = \gamma \cdot H$ ($K_0=1$). Η προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας γίνεται μέσω της απομείωσης μιας ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης η οποία ασκείται στην περιφέρεια της σήραγγας και μειώνεται σταδιακά από την μέγιστη τιμή της, ίση με την αρχική γεωστατική πίεση μέχρι τον πλήρη μηδενισμό που αντιστοιχεί σε πλήρη αποτόνωση ανυποστήρικτης διατομής.

Για την περιγραφή της αστοχίας του υλικού χρησιμοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb σε αναφορά κυρίων τάσεων. Έτσι, για την μετάβαση από το ελαστικό στο χαλαρούμενο τμήμα της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων έχουμε:

$$\sigma_\theta = \sigma_{cm,peak} + \sigma_r \cdot N_{\phi,peak} \quad (3.1)$$

όπου

$$N_{\phi,peak} = \tan^2 (45 + \phi_{peak} / 2) \quad (3.2)$$

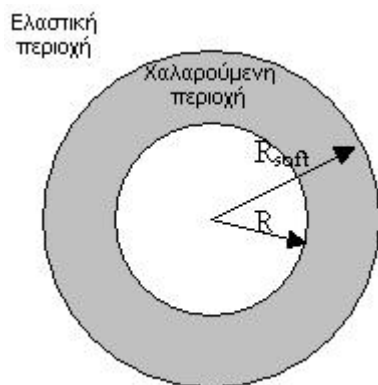
Αντίστοιχα για την μετάβαση από το χαλαρούμενο στο πλαστικό τμήμα της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\sigma_\theta = \sigma_{cm,res} + \sigma_r \cdot N_{\phi,res} \quad (4.1)$$

όπου :

$$N_{\phi, \text{res}} = \tan^2 (45 + \phi_{\text{res}} / 2) \quad (4.2)$$

Με την πρόοδο της εκσκαφής και την αντίστοιχη αύξηση της αποτόνωσης προοδευτικά και λόγω της δημιουργίας δράσης θόλου μειώνεται η ακτινική τάση σ_r ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η περιφερειακή τάση σ_θ . Αρχικά ακριβώς στην άντυγα της σήραγγας αρχίζει να ικανοποιείται το κριτήριο Mohr-Coulomb εκφρασμένο από τις σχέσεις 3.1&3.2. Αρχίζει λοιπόν να δημιουργείται γύρω από τη σήραγγα μία ζώνη χαλάρωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.

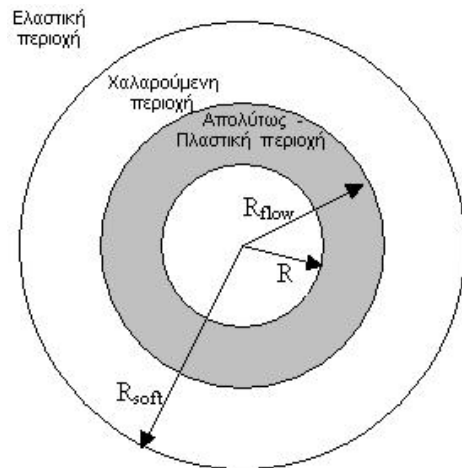


Σχήμα 2. Χαλαρούμενη & ελαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα.
Figure 2. Softening & elastic zone around the tunnel.

Με την συνέχιση της αποτόνωσης και πάλι αρχικά οριακά στην άντυγα της σήραγγας αρχίζει να ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας εκφρασμένο από τις σχέσεις 4.1&4.2. Έτσι τώρα σχηματίζεται γύρω από τη σήραγγα μια δεύτερη ζώνη στην οποία το υλικό συμπεριφέρεται απολύτως πλαστικά, γύρω από αυτή υπάρχει η ζώνη χαλάρωσης και έξω από αυτή το υλικό παραμένει ελαστικό (σχήμα3)

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Για να διαπιστωθεί η επίδραση της χαλαρούμενης μηχανικής συμπεριφοράς γεωυλικών στην διάνοιξη σηράγγων, αποφασίστηκε η διενέργεια μιας σειράς παραμετρικών αναλύσεων. Οι αναλύσεις αυτές διεξήχθησαν με βάση γεωμηχανικά χαρακτηριστικά που αφορούν βραχώμαζες.



Σχήμα 3. Πλαστική, χαλαρούμενη & ελαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα.
Figure 3. Plastic, Softening & Elastic zone around the tunnel.

Για τον υπολογισμό της κατανομής των τάσεων, των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα, έγινε χρήση της διαδικασίας που προτείνεται από τον Tanimoto (1980). Η προτεινόμενη μεθοδολογία η οποία βασίζεται σε ενεργειακά θεωρήματα προγραμματίστηκε κατάλληλα σε H/Y για την ευκολότερη διεξαγωγή των αναλύσεων.

4.1 Δεδομένα των αναλύσεων

Παράμετροι των αναλύσεων που διεξήχθησαν είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη σήραγγας, το ύψος των υπερκειμένων γαιών καθώς και τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της περιβάλλοντος τη σήραγγα βραχώμαζας. Έπιλέχθηκε σήραγγα σταθερής κυκλικής διατομής ακτίνας $R=5\text{m}$. Έγιναν αναλύσεις για τρεις περιπτώσεις ύψους υπερκειμένων $H=50, 100\&150\text{m}$. Ελήφθη ειδικό βάρος βραχώμαζας $\gamma=24 \text{ kN/m}^3$ και παράμετρος άρρηκτου πετρώματος κατά Hoek-Brown $m_i=10$. Τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκε να παραμετροποιηθούν είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_{ci} και ο δείκτης γεωλογικής αντοχής της βραχώμαζας GSI. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα ζεύγη τιμών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

Όσον αφορά τις παραμέτρους χαλάρωσης της βραχώμαζας σε κάθε περίπτωση γίνεται επίλυση για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης (ROS) 20%, 40%, 60% & 80%, η δε παραμένουσα γωνία εσωτερικής τριβής

Πίνακας 1. Ζεύγη Τιμών σ_{ci} & GSI που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις .

Table 1. σ_{ci} & GSI values used in the analysis.

GSI	10	15	20	25	30	35	40
$\sigma_{c,i}$ (Mpa)	5	7,5	10	12,5	12,5	12,5	12,5

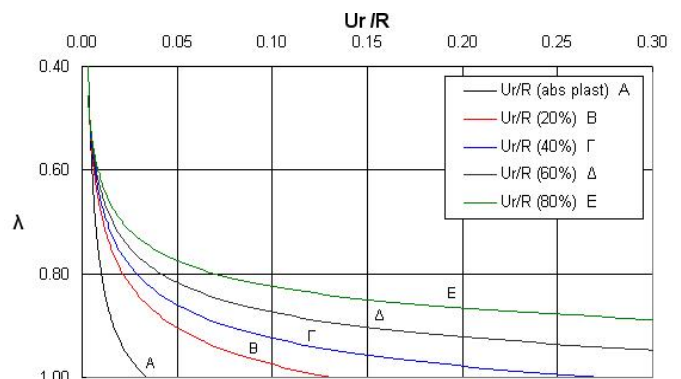
επιλέγεται $\phi_{res} = \frac{1}{2} \cdot \phi_{peak}$ σταθερή. Επιπρόσθετα έγιναν αναλύσεις για δύο τιμές του λόγου $\epsilon_{soft}/\epsilon_{peak} = 0,5$ & $2,0$ που αντιστοιχούν σε “ψαθυρή” και “όλκιμη” συμπεριφορά του υλικού κατά την αστοχία.

4.2 Διαδικασία των αναλύσεων

Αρχικά και αφού υπολογιστεί το γεωστατικό πεδίο τάσεων ως $P_0 = \gamma \cdot H$, υπολογίζονται τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας. Πιο συγκεκριμένα με εφαρμογή του κριτηρίου Hoek – Brown μέσω της χρήσης του προγράμματος RockLab υπολογίζονται η κορυφαία αντοχή της βραχώμαζας $\sigma_{cm,peak}$, το μέτρο ελαστικότητας E_m και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής κατά Mohr – Coulomb, C_{peak} , ϕ_{peak} . Κατά την εφαρμογή του κριτηρίου ελήφθη συντελεστής διαταραχής της βραχώμαζας $D=0$. Πραγματοποιήθηκε ικανός αριθμός αναλύσεων για διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω μεγεθών με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της χαλάρωσης.

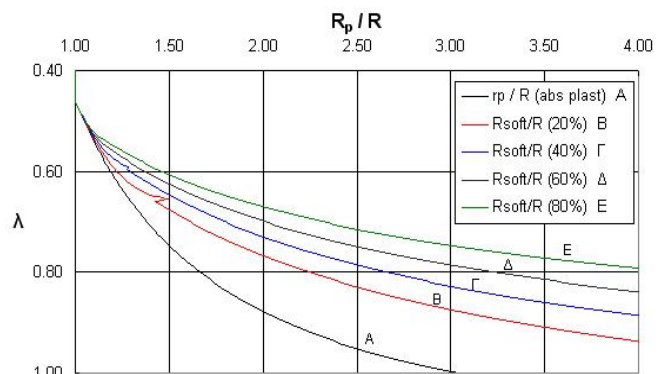
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για μία εκ των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν. Τα αποτελέσματα αφορούν σήραγγα βάθους $H=50m$ που αντιστοιχεί σε πεδίο γεωστατικών τάσεων $P_0=1,2$ Mpa. Η αντοχή του άρρηκτου βράχου εκλήφθηκε $\sigma_{ci,peak} = 5Mpa$ ενώ ο δείκτης γεωλογικής αντοχής της βραχώμαζας έχει τιμή ίση με $GSI=10$. Ο λόγος $\epsilon_{soft}/\epsilon_{peak}$ επιλέχθηκε να έχει την τιμή $2,0$ που αντιστοιχεί σε αρκετά “όλκιμη χαλάρωση”. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα ο συντελεστής υπερφόρτισης $N_s = 2 \cdot P_0 / \sigma_{cm,peak}$ ισούται με $9,1$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων.



Σχήμα 4. Καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά(A) και για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

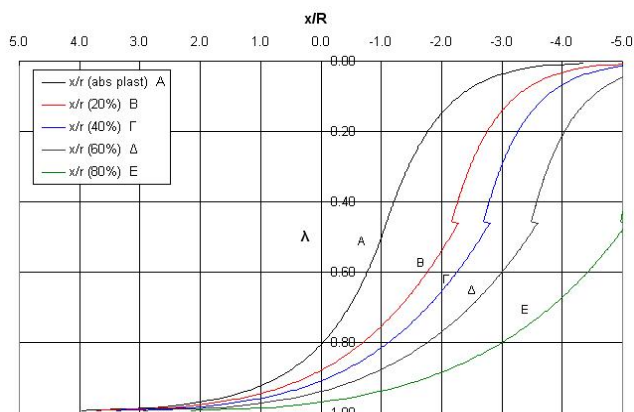
Figure 4. Converence – Confinement curves for elastic absolute plastic behaviour (A) and for four values of Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).



Σχήμα 5. Καμπύλες έκτασης της μη ελαστικής ζώνης για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Figure 5. Extent of the non-elastic zone for elastic absolute plastic behaviour (A) and for four values of Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Στη συνέχεια συνδυάζοντας τις καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης, με τις εμπειρικές συσχετίσεις της απόστασης από το μέτωπο, κάνοντας χρήση της προτεινόμενης από τους Chern et. al. (1998) μεθοδολογίας, προκύπτουν οι καμπύλες απόστασης – αποτόνωσης του σχήματος 6.



Σχήμα 6. Καμπύλες απόστασης - αποτόνωσης για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Figure 6. Distance – Confinement curves for elastic absolute plastic behaviour (A) and for four values of Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 Επιρροή της χαλάρωσης στις μετακινήσεις

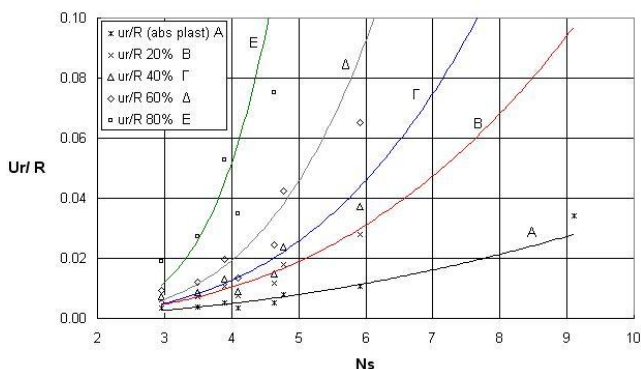
Για την διερεύνηση της επίδρασης της χαλάρωσης στην εξέλιξη των μετακινήσεων, βασιζόμαστε στις καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης οι οποίες προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις που διεξήχθησαν. Κατόπιν παρατήρησης των διαγραμμάτων αυτών μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις –σχόλια:

- Ακόμα και για μικρή χαλάρωση (ROS=20%) υπάρχει σημαντική αύξηση των συγκλίσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες για ελαστική – απολύτως πλαστική συμπεριφορά.
- Για μεγαλύτερους βαθμούς χαλάρωσης (ROS=40%,60%) οι συγκλίσεις αυξάνονται σε σχέση τόσο με τις αντίστοιχες για ελαστοπλαστικό μοντέλο όσο και με αυτές για μικρότερους βαθμούς χαλάρωσης. Μάλιστα η τάση αύξησης δείχνει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από γραμμική, δηλαδή πχ. για βαθμό χαλάρωσης αυξημένο κατά 20% οι μετακινήσεις αυξάνονται αρκετά παραπάνω από 20%.
- Για μεγάλους βαθμούς χαλάρωσης (ROS = 60% , 80%) και σημαντικά αυξημένες τιμές συντελεστή υπερφόρτισης N_s οι μετακινήσεις που προκύπτουν για το

τοίχωμα της σήραγγας u_r , από κάποιά τιμή του συντελεστή αποτόνωσης και πάνω, δεν έχουν πρακτικό παρά μόνο θεωρητικό ενδιαφέρον καθώς έχουν αποκτήσει τιμές οι οποίες συνήθως δεν δύναται να απαντηθούν σε πραγματικές συνθήκες, διότι θα έχει προηγηθεί κατάρρευση της διατομής.

- Για ίδιο βαθμό χαλάρωσης, όσο πιο απότομη είναι η πτώση της αντοχής, δηλαδή όσο πιο “ψαθυρή” καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων λαμβάνεται, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εξέλιξης των συγκλίσεων κατά την αποτόνωση.
- Οι τελικές συγκλίσεις οι οποίες προκύπτουν για ψαθυρή συμπεριφορά είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για πιο όλκιμη συμπεριφορά του υλικού κατά την χαλάρωση.

Στην συνέχεια γίνεται μια απόπειρα να ποσοτικοποιηθούν ορισμένα από τα σχόλια τα οποία εκφράστηκαν παραπάνω. Για να γίνει εφικτό κάτι τέτοιο χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα γραφήματα με βάση συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τις διεξηχθήσες αναλύσεις.



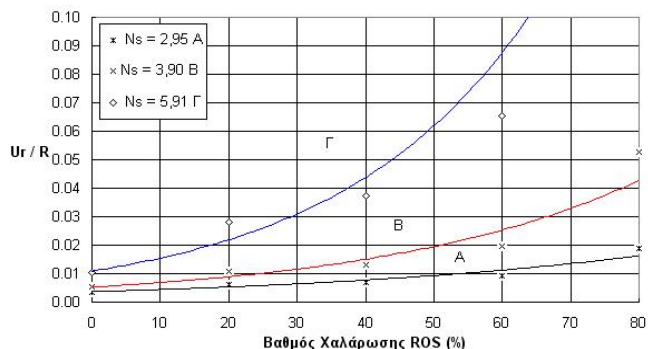
Σχήμα 7 Γράφημα εξέλιξης των συγκλίσεων (για $\lambda=1$) συναρτήσεως του N_s για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Figure 7 Evolution of the convergence curves (for $\lambda=1$) for elastic absolute plastic behaviour (A) and for four values of Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Αρχικά παρουσιάζεται ένα γράφημα στο οποίο εισήχθησαν οι τιμές της τελικής σύγκλισης για τους τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης και για τα διάφορα N_s που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που επιλύθηκαν. Σκοπός του γραφήματος αυτού είναι να διαπιστωθεί η επίδραση, του συντελεστή υπερφόρτισης σε συνδυασμό με το βαθμό χαλάρωσης, στις

συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας. Με χρήση του προγράμματος *Microsoft Excel* έγινε προσαρμογή καμπύλης (μία για κάθε βαθμό χαλάρωσης) στα σημεία του γραφήματος. Προέκυψε το γράφημα του σχήματος 7.

Από το γράφημα του σχήματος 7 προκύπτει ότι υπάρχει μία τάση αύξησης των τελικών συγκλίσεων συναρτήσει του συντελεστή αποτόνωσης. Η τάση αυτή τόσο για τις αναλύσεις με το ελαστικό απολύτως πλαστικό μοντέλο όσο και για τους διάφορους βαθμούς χαλάρωσης δείχνει να ακολουθεί μία υπερβολική αυξητική καμπύλη. Η υπερβολική αυτή αύξηση δείχνει να είναι τόσο πιο απότομη όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός χαλάρωσης. Ακολουθώντας με παρόμοια διαδικασία παρήχθη το γράφημα του σχήματος 8 με σκοπό πρωτίστως να διερευνηθεί η επίδραση του βαθμού χαλάρωσης στις συγκλίσεις για διάφορες τιμές του N_s . Προκύπτει να υπάρχει μια εκθετική τάση αύξησης των συγκλίσεων ως συνάρτηση του βαθμού χαλάρωσης. Η εκθετική αυτή τάση αύξησης είναι τόσο εντονότερη όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή υπερφόρτισης.



Σχήμα 8. Γράφημα εξέλιξης των συγκλίσεων συναρτήσει του βαθμού αποτόνωσης για διάφορες τιμές του N_s .

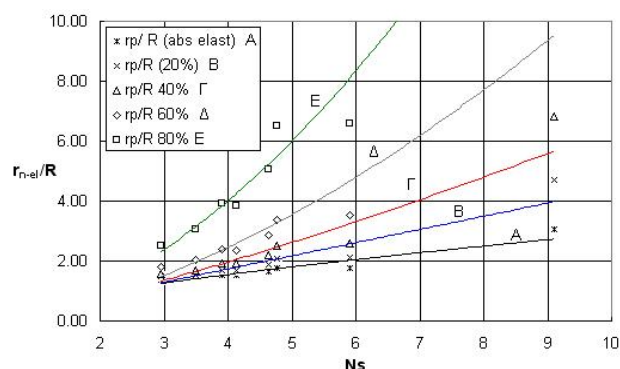
Figure 8. Evolution of the convergence curves as a function of the softening ratio, for various N_s values.

6.2 Επιρροή της χαλάρωσης στην έκταση της μη ελαστικής ζώνης

Η χαλάρωση έχει άμεση επίδραση στην έκταση της μη ελαστικής ζώνης που σχηματίζεται γύρω από τη σήραγγα. Όπως έχει προαναφερθεί, κατά την αποτόνωση, γύρω από τη σήραγγα σχηματίζεται μια ζώνη απολύτως πλαστική και μια ζώνη χαλάρωσης

οι οποίες συνθέτουν την μη ελαστική περιοχή. Γύρω από την ζώνη αυτή το έδαφος παραμένει ελαστικό. Κατόπιν παρατήρησης των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων που αφορούν την έκταση της ζώνης αυτής μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα σχόλια:

- Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός χαλάρωσης ROS τόσο μεγαλύτερη είναι και η έκταση της μη ελαστικής περιοχής r_{n-el} η οποία σχηματίζεται γύρω από τη σήραγγα.
- Επίσης όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής υπερφόρτισης N_s τόσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της σχηματιζόμενης μη ελαστικής ζώνης.
- Η κατανομή της χαλαρούμενης $R_{soft} - R_{flow}$ και της απολύτως - πλαστικής ζώνης R_{flow} μέσα στην μη ελαστική ζώνη εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε χαλάρωσης E_n .
- Όσο πιο “όλκιμη” είναι η χαλάρωση του υλικού τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της μη ελαστικής ζώνης καταλαμβάνεται από την ζώνη χαλάρωσης σε αντίθεση με την απολύτως πλαστική ζώνη και το αντίστροφο.

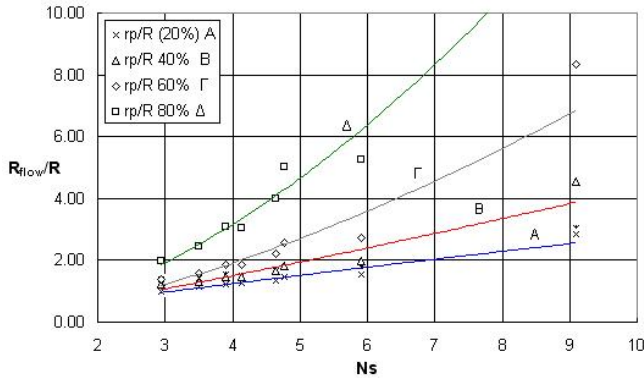


Σχήμα 9. Γράφημα έκτασης της μη ελαστικής ζώνης (για $\lambda=1$) συναρτήσει του N_s για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Figure 9. Extent of non-elastic zone curves for elastic perfectly plastic behaviour (A) and for four values of the Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο για τις μετακινήσεις, γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης ορισμένων από τα παραπάνω σχόλια μέσω της δημιουργίας κατάλληλων γραφημάτων μεταβολής της έκτασης της μη ελαστικής

ζώνης ως συνάρτηση του βαθμού χαλάρωσης και του συντελεστή αποτόνωσης. Έγιναν δύο γραφήματα το πρώτο (Σχήμα 9) αφορά την έκταση της μη ελαστικής ζώνης ενώ το δεύτερο (Σχήμα 10) αφορά την έκταση της απολύτως πλαστικής περιοχής.



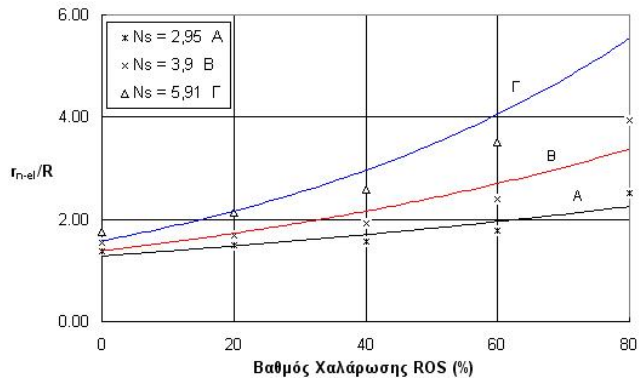
Σχήμα 10. Γράφημα έκτασης της απολύτως πλαστικής ζώνης (για $\lambda=1$) συναρτήσει του N_s για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).
Figure 10. Extent of flow zone for elastic perfectly plastic behaviour (A) and for four values of the Softening Ratio ROS=20% (A), 40% (B), 60% (Γ) και 80% (Δ).

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι όπως και οι μετακινήσεις έτσι και η έκταση της μη ελαστικής ζώνης γύρω από τη σήραγγα ακολουθούν μια τάση αύξησης με τον συντελεστή υπερφόρτισης η οποία προσεγγίζεται καλύτερα μέσω υπερβολικών αυξητικών καμπυλών. Η αύξηση αυτή είναι τόσο πιο απότομη όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός χαλάρωσης.

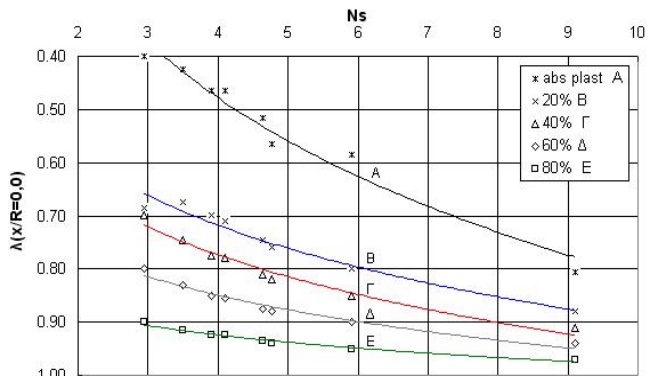
Απολύτως όμοια αυξητική τάση παρουσιάζει και η έκταση της απολύτως πλαστικής ζώνης κάτι που επιβεβαιώνει αυτό που προαναφέρθηκε ότι η κατανομή της ζώνης χαλάρωσης και της απολύτως πλαστικής ζώνης μέσα στην μη ελαστική περιοχή δεν εξαρτάται από το βαθμό χαλάρωσης και τον συντελεστή υπερφόρτισης αλλά μόνο από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε χαλάρωση.

Στη συνέχεια, όπως και για τις μετακινήσεις, έτσι και για την έκταση της μη ελαστικής ζώνης δημιουργήθηκε το γράφημα του σχήματος 11 με σκοπό να διερευνηθεί πρωτίστως η επίδραση του βαθμού χαλάρωσης στην έκταση της με ελαστικής ζώνης για διάφορες τιμές του N_s . Όμοια όπως και για τις μετακινήσεις προκύπτει η ύπαρξη μιας εκθετικής τάσης αύξησης της ακτίνας της μη ελαστικής ζώνης

ως συνάρτηση του βαθμού χαλάρωσης. Η εκθετική αυτή τάση αύξησης είναι τόσο εντονότερη όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή υπερφόρτισης.



Σχήμα 11. Γράφημα έκτασης της μη-ελαστικής ζώνης (για $\lambda=1$) συναρτήσει του N_s για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).
Figure 11. Extent of non-elastic zone for elastic perfectly plastic behaviour (A) and for four values of the Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).



Σχήμα 12. Γράφημα μεταβολής της τιμής του συντελεστή αποτόνωσης λ στο μέτωπο εκσκαφής ($x/R=0$) συναρτήσει του N_s για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά (A) και για τέσσερις βαθμούς χαλάρωσης ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).
Figure 12. Distance - Confinement curves for elastic perfectly plastic behaviour (A) and for four values of Softening Ratio ROS=20% (B), 40% (Γ), 60% (Δ) και 80% (E).

6.3 Επιρροή της χαλάρωσης στον συντελεστή αποτόνωσης.

Ο συντελεστής αποτόνωσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, η γνώση της τιμής

του οποίου παίζει πρωτεύοντα ρόλο στις δισδιάστατες αναλύσεις διάνοιξης σηράγγων. Ανάλυση των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης δείχνει ότι υφίσταται σημαντική επίδραση της χαλάρωσης επί του υπολογιζόμενου συντελεστή αποτόνωσης. Για να γίνει πιο άμεσα εμφανής η επίδραση της χαλάρωσης, παρήχθη το συγκεντρωτικό γράφημα του Σχήματος 12 που δίνει τιμές του συντελεστή αποτόνωσης ακριβώς στο μέτωπο, για ελαστική απολύτως πλαστική συμπεριφορά και για διάφορους βαθμούς χαλάρωσης.

Από παρατήρηση των καμπυλών απόστασης – αποτόνωσης (Σχήμα 12) σε συνδυασμό με το Σχήμα 11 μπορούν να διατυπωθούν τα ακόλουθα σχόλια :

- Φαίνεται να υπάρχει μια ιδιαίτερα έντονη επίδραση της χαλάρωσης στην τιμή του συντελεστή αποτόνωσης σε όλες τις θέσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας τόσο μπροστά όσο και πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.
- Προκύπτει σημαντική επιτάχυνση των συγκλίσεων ακόμα και για μικρούς βαθμούς χαλάρωσης (ROS = 20%).
- Για δε μεγαλύτερους βαθμούς χαλάρωσης (ROS = 60%,80%) ο συντελεστής αποτόνωσης στο μέτωπο παίρνει τιμές $\lambda = 0,80$ ή ακόμα και $\lambda = 0,90$ κάτι που σημαίνει ότι το 80% των συγκλίσεων έχει ήδη συμβεί μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική επίδραση της χαλαρούμενης μηχανικής συμπεριφοράς σε κρίσιμα στοιχεία του σχεδιασμού σηράγγων όπως οι καμπύλες σύγκλισης - αποτόνωσης, οι καμπύλες απόστασης - αποτόνωσης αλλά και σε άλλα επιμέρους στοιχεία όπως η έκταση της μη ελαστικής ζώνης. Η επίδρασή της στις περισσότερες των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν είναι αρκετά μεγάλη ώστε η τυχόν αγνόησή της και η χρήση μοντέλου ελαστικού – απολύτως πλαστικού για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων υλικών να οδηγεί σε σχεδιαστικά σφάλματα. Τέτοια σφάλματα μπορεί να αφορούν είτε στην επιλογή του τρόπου εκσκαφής (πχ. φάσεις εκσκαφής), είτε στην διαστασιολόγηση μέτρων άμεσης υποστήριξης ή μέτρων βελτίωσης της ευστάθειας μετώπου.

Τα συγκεντρωτικά γραφήματα που παρουσιάζονται δίνουν μια πρώτη άποψη τόσο της ποιοτικής όσο και τις ποσοτικής επίδρασης της χαλάρωσης σε μεγέθη που αφορούν στον σχεδιασμό της διάνοιξης σηράγγων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chen W.F. & Mizuno E. (1990), "Nonlinear Analysis in Soil Mechanics" *Developments in Geotechnical Engineering vol.53*, Elsevier.
- Chen W.F (1975), "Limit Analysis and Soil Plasticity" *Developments in Geotechnical Engineering vol.53*, Elsevier.
- Egger P. (2000), "Design and construction aspects of deep tunnels (with particular emphasis on strain softening rocks)". *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.15, No. 4, pp. 403 – 408.
- Hoek E, Carranza – Torres C., Corkum B. (2002), "Hoek – Brown Failure Criterion – 2002 Edition", Rocscience Inc.
- Tanimoto C. (1980), "Tunneling in rock with rockbolts and shotcrete", University of Kyoto, Japan.
- Tanimoto C. (1983), "Allowable limit of convergence in tunneling". *Proc. 24th Symposium on Rock Mechanics*, pp. 251 – 263.
- Tanimoto C., Shojiro H., Keizo K. (1981), "Interaction between fully bonded bolts and strain softening rock in tunneling". *Proc. 22th U.S Symposium on Rock Mechanics*, Massachusetts, U.S.A. pp 347-352.
- Tanimoto C., Shojiro H., Keizo K. (1981), "Interaction between rockbolts and weak rock in tunneling". *Proc. International symposium on weak rock in Tokyo, Japan 21-24 September 1981*, pp 763-768.