

Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

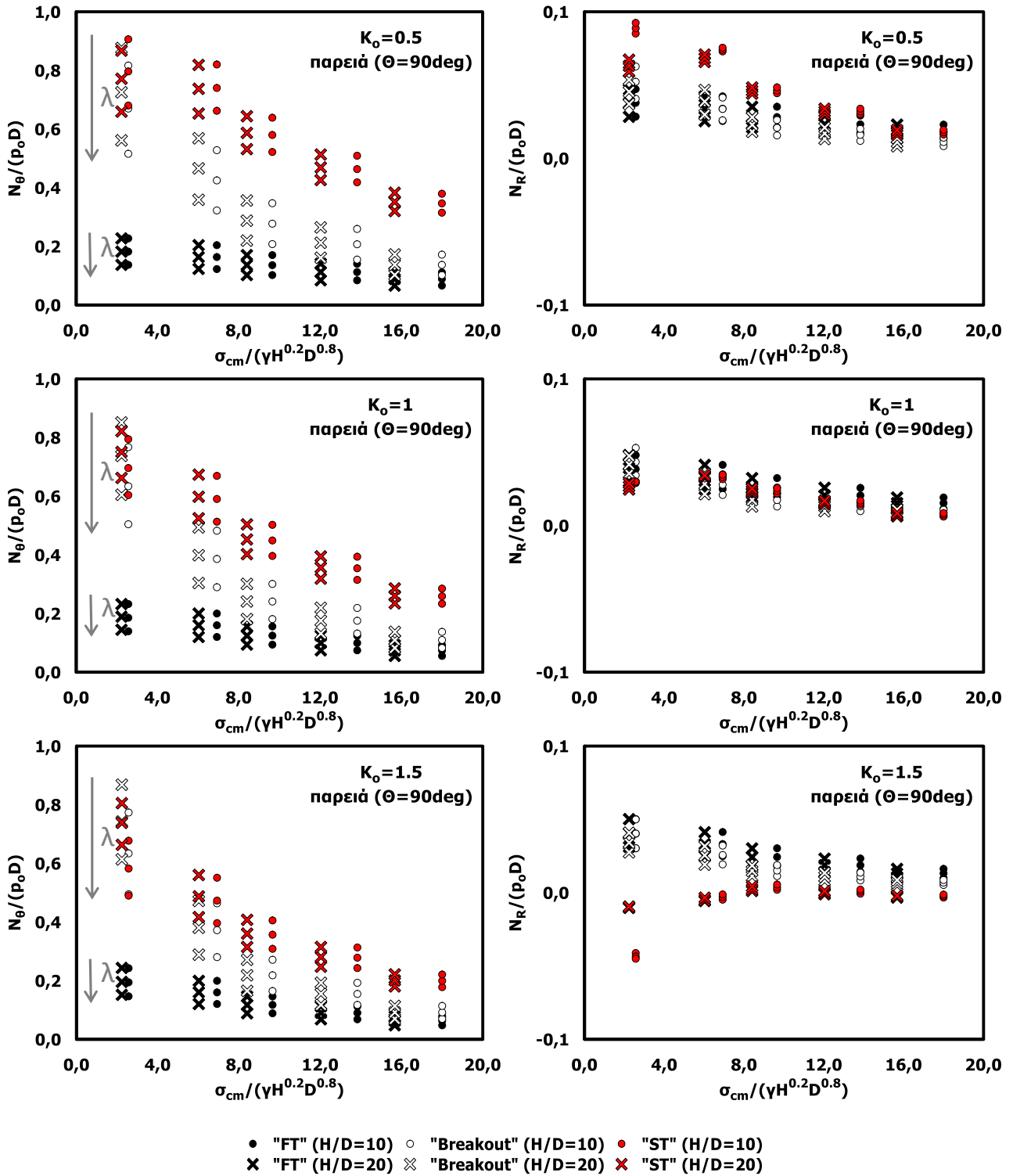
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων και κατηγοριών που έγιναν στην μελέτη διασταυρούμενων σηράγγων. Αρχικά, αναλύονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την Κατηγορία I στην παρειά και στην στέψη του ανοίγματος της συνδετήριας σήραγγας και στην συνέχεια για όλες τις Κατηγορίες I, II, III συγκεντρωμένα.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την εντατική κατάσταση της παρειάς και της στέψης στην Κατηγορία I.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που θα αναλυθούν παρακάτω αφορούν την Κατηγορία I για όλες τις παραμέτρους και τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη ακτινική και εφαπτομενική δύναμη στην παρειά και την στέψη του ανοίγματος συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου αντοχής της βραχομάζας ($\sigma_{cm}/\gamma D^{0.8}H^{0.2}$) της βραχομάζας και του συντελεστή αποτόνωσης λ για το αρχικό βήμα «FT», το βήμα «Bbreakout» και το τελικό βήμα «ST». Σε κάθε Σχήμα λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα και συγκρίνονται δυο περιπτώσεις με διαφορετικό ύψος υπερκείμενων γαιών $H/D=10$ και $H/D=20$ και με διαφορετικούς συμβολισμούς. Σε κάθε Σχήμα, που μελετάται, ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων είναι σταθερός και για αυτό αναλύονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις για $K_0=0.5$, 1.0 και 1.5 .

Αρχικά θα αναλυθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την εντατική κατάσταση στην παρειά του ανοίγματος της συνδετήριας σήραγγας. Στην παρειά η ένταση που δημιουργείται είναι θλιπτική. Όσον αφορά την κανονικοποιημένη εφαπτομενική αξονική δύναμη στην παρειά, στο Σχήμα 4.36 φαίνεται πως στο αρχικό βήμα «FT» η ένταση στην ισχυρή βραχομάζα είναι λίγο μικρότερη σε σχέση με την ασθενή και πως και για τις δυο περιπτώσεις υπερκείμενων H/D η φόρτιση είναι παρόμοια. Σημαντική είναι η επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης λ . Όσο μεγαλύτερη η αποτόνωση που συμβαίνει στο αρχικό βήμα «FT», τόσο μικρότερη είναι η εφαπτομενική δύναμη. Κατά το βήμα διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας στην ασθενή βραχομάζα αναπτύσσεται μεγαλύτερο εντατικό πεδίο σε σχέση με την ισχυρή, ενώ όσο η αντοχή της βραχομάζας μεγαλώνει η ένταση μειώνεται. Η ένταση για τις δυο περιπτώσεις H/D συνεχίζει να κυμαίνεται στο ίδιο επίπεδο. Ο συντελεστής αποτόνωσης λ επηρεάζει την ένταση στην παρειά, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η αποτόνωση τόσο μικρότερη και η ένταση. Στο τελευταίο βήμα ολοκλήρωσης «ST» τα αποτελέσματα προκύπτουν με τις ίδιες παρατηρήσεις όπως στο βήμα «Bbreakout» του ανοίγματος με κάποια μικρή αύξηση των δυνάμεων προς την ισχυρή βραχομάζα. Συγκρίνοντας τα γραφήματα του Σχήματος 4.36 για τους διαφορετικούς συντελεστές οριζοντίων τάσεων K_0 τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αντίστοιχες κατανομές. Πολύ σημαντική παρατήρηση είναι πως όσο αυξάνεται ο συντελεστής K_0 η ένταση σε κάθε βήμα αυξάνεται λιγότερο και πιο ομαλά για μια μέση-ισχυρή βραχομάζα, ενώ για την ασθενή βραχομάζα η αύξηση του συντελεστή K_0 δε μειώνει την ένταση λόγω της πλαστικοποίησης που έχει αναπτυχθεί και καθορίζει την εντατική κατάσταση. Η επίδραση της κανονικοποιημένης ακτινικής αξονικής δύναμης στην παρειά είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την κανονικοποιημένη εφαπτομενική αξονική δύναμη. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν στα γραφήματα φαίνεται πως η ένταση είναι μικρή και δεν διαφοροποιείται τόσο από βήμα σε βήμα, καθώς και ότι προς την ισχυρή βραχομάζα η ένταση ελαχιστοποιείται σε σχέση με την ασθενή. Γενικά και στις δυο περιπτώσεις υπερκείμενων η ένταση μοιάζει μεταξύ τους όμως διαφέρει λίγο στην ασθενή βραχομάζα. Τέλος, ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0 επηρεάζει την εντατική κατάσταση του ανοίγματος στην ακτινική διεύθυνση αφού όσο αυξάνεται ο συντελεστής τόσο αυξάνεται η αποφόρτιση στο τελευταίο βήμα ολοκλήρωσης της σήραγγας και ειδικότερα για την ασθενή βραχομάζα για $K_0=1.5$ δημιουργείται εφελκυσμός.

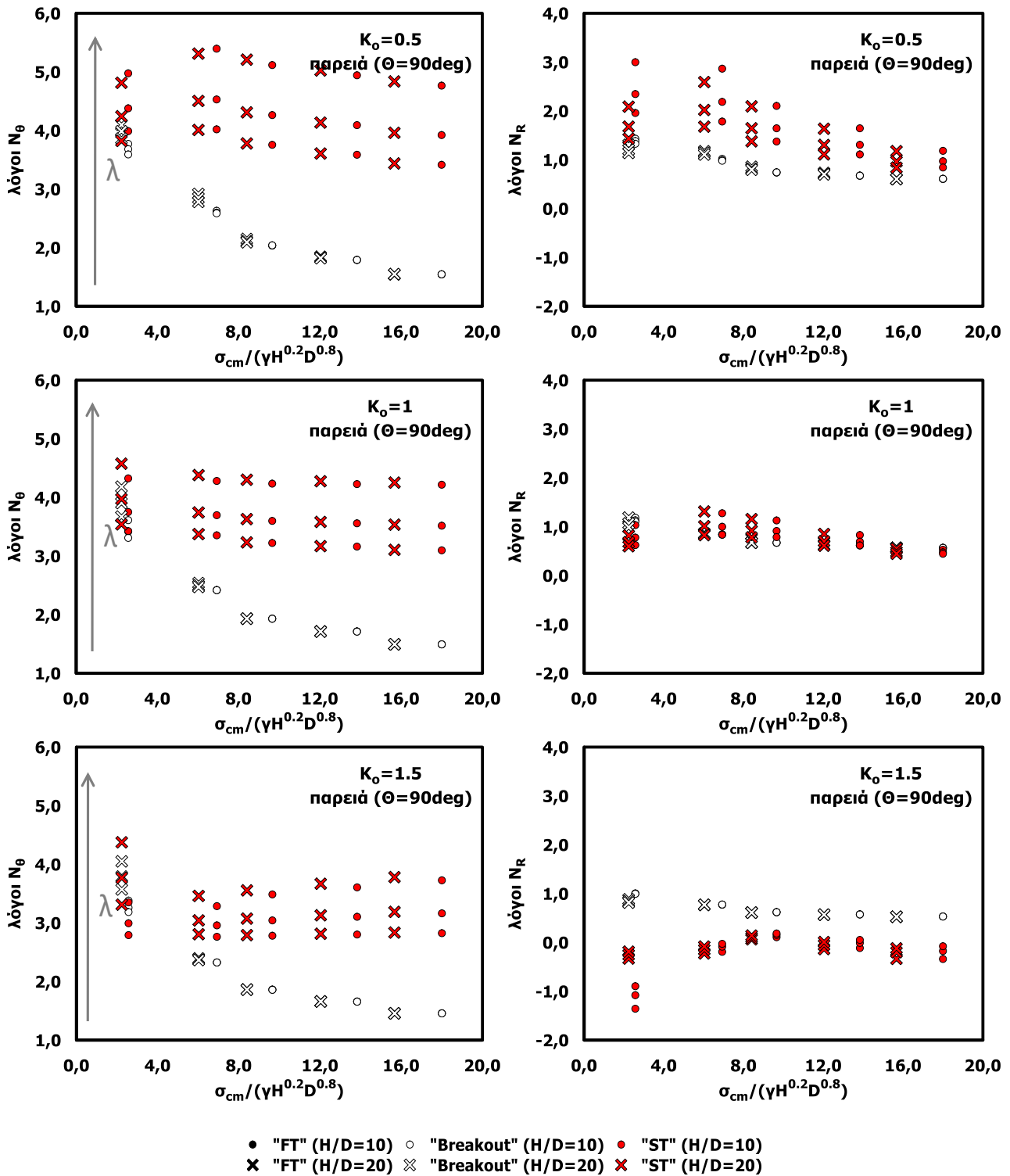
"Κατηγορία Ι"
(D/d=1.5 - H/D=10 & 20)



Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..1: Τιμές ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην παρειά του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm} / \gamma H^{0.2} D^{0.8}$). ($K_o=0.5, 1, 1.5$, $H/D=10, 20$)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι λόγοι της κανονικοποιημένης ακτινικής και εφαπτομενικής αξονικής δύναμης στην παρειά στο Σχήμα 4.37.

"Κατηγορία Ι"
(D/d=1.5 - H/D=10 & 20)

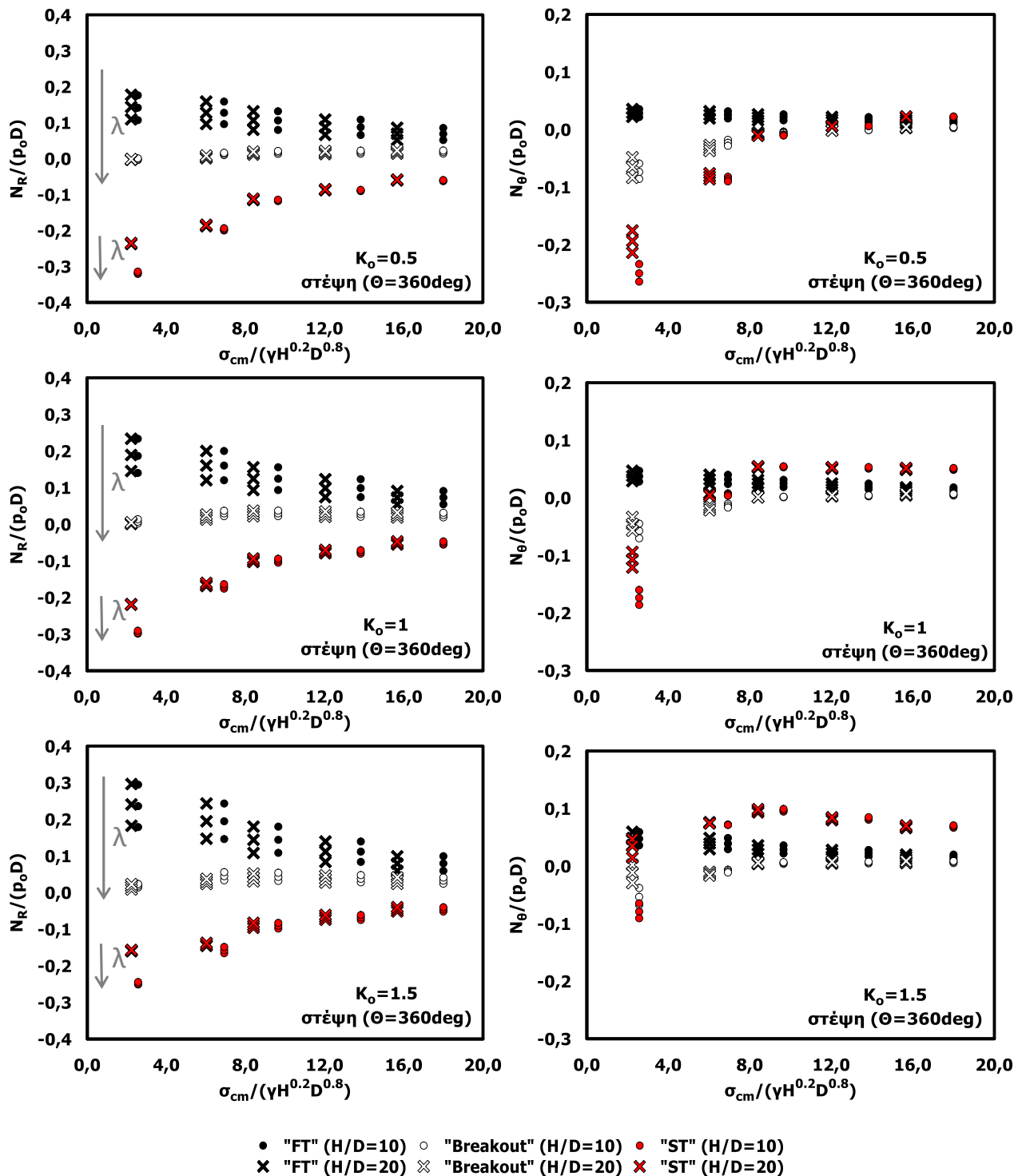


Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..2: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην παρειά του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\gamma H^{0.2} D^{0.8}$). ($K_o=0.5, 1, 1.5$, $H/D=10, 20$)

Από τους λόγους γίνεται ξεκάθαρη η επιρροή του συντελεστή K_0 , αφού όσο αυξάνεται ο συντελεστής τόσο η θλιπτική δύναμη μειώνεται. Γίνεται κατανοητό πως η διαφορά των υπερκείμενων τάσεων H/D δεν επηρεάζει την ένταση αφού είναι αντίστοιχη και στις δυο περιπτώσεις. Η αντοχή της βραχομάζας είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την εντατική κατάσταση, αφού όσο μικρότερη είναι η αντοχή τόσο μεγαλύτερη ένταση δημιουργείται ενώ όσο αυξάνεται η αντοχή η ένταση είναι πολύ πιο μικρή. Τέλος, όσον αφορά τον συντελεστή αποτόνωσης λ στο βήμα «Breakout» και «ST» κατά την διάνοιξη της συνδετήριας η σχέση με την επιβάρυνση του ανοίγματος, όπως αποτυπώνεται μέσω των λόγων, είναι ανάλογη με την αύξησή του. Δηλαδή, όσο αυξάνεται ο συντελεστής λ τόσο αυξάνεται και το ποσοστό της μεγέθυνσης της θλιπτικής καταπόνησης.

Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την εντατική κατάσταση στην στέψη του ανοίγματος της συνδετήριας σήραγγας. Στην στέψη συντελείται αποφόρτιση μείωση της θλίψης και τις περισσότερες φορές η ένταση γίνεται εφελκυστική. Όσον αφορά την κανονικοποιημένη εφαπτομενική αξονική δύναμη στην στέψη, που η επίδραση της παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.38, φαίνεται ότι η ένταση που δημιουργείται είναι πολύ μικρή. Είναι κατανοητό πως και για τις δυο περιπτώσεις υπερκείμενων η ένταση που δημιουργείται είναι αντίστοιχου κανονικοποιημένου μεγέθους με κάποιες διαφορές στην περίπτωση της ασθενούς βραχομάζας. Στην αρχική κατάσταση «FT» δημιουργείται μικρή θλίψη με ένταση περίπου ίδιου επιπέδου για τους διάφορους τύπους βραχομάζας. Κατά το «Breakout» αρχίζει η αποφόρτιση και η δημιουργία εφελκυσμού με μεγαλύτερη τιμή στην περίπτωση της ασθενούς βραχομάζας. Κατά την αύξηση της αντοχής της βραχομάζας η ένταση δεν αλλάζει τόσο στα βήματα που μελετώνται. Επίσης, κατά την αύξηση του συντελεστή οριζοντίων τάσεων $K_0=1.5$ δεν υπάρχει τόσο μεγάλη αποφόρτιση και επικρατεί η θλίψη για τις μεσαίες ή ισχυρές βραχομάζες, όμως δεν δημιουργείται κάποιο πρόβλημα λόγω του χαμηλού πεδίου τιμών του απόλυτου μεγέθους. Σε ότι αφορά την κανονικοποιημένη ακτινική αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στην στέψη, είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την κανονικοποιημένη εφαπτομενική αξονική δύναμη. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν στα Σχήμα 4.38 στην αρχική κατάσταση «FT» η δύναμη είναι θλιπτική και παρατηρείται πως όσο πιο ασθενής είναι η βραχομάζα τόσο μεγαλύτερη είναι η θλίψη που δημιουργείται και αντίθετα για την πιο ισχυρή βραχομάζα. Τα αποτελέσματα της μεταβολής τους λόγω της διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας είναι αντίστοιχου επιπέδου για τις δυο περιπτώσεις υπερκείμενων. Κατά το «Breakout» οι θλιπτικές δυνάμεις είναι πολύ μικρές λόγω της αποφόρτισης, που συντελείται, και στο τελικό βήμα «ST» δημιουργούνται εφελκυστικές δυνάμεις. Όσο πιο ασθενής είναι η βραχομάζα τόσο μεγαλύτερη η ένταση του εφελκυσμού που δημιουργείται. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0 τόσο πιο μεγάλη θλίψη επικρατεί στο αρχικό βήμα «FT», ενώ στο τελικό βήμα «ST» η ένταση είναι σχεδόν ανεξάρτητη από τον συντελεστή K_0 . Τέλος, ο συντελεστής αποτόνωσης λ επηρεάζει την ένταση στην στέψη, αφού όσο μικρότερη είναι η αποτόνωση τόσο μειώνεται ο εφελκυσμός και για την ακτινική και για την εφαπτομενική αξονική δύναμη κατά την διάνοιξη και ολοκλήρωση της συνδετήριας σήραγγας.

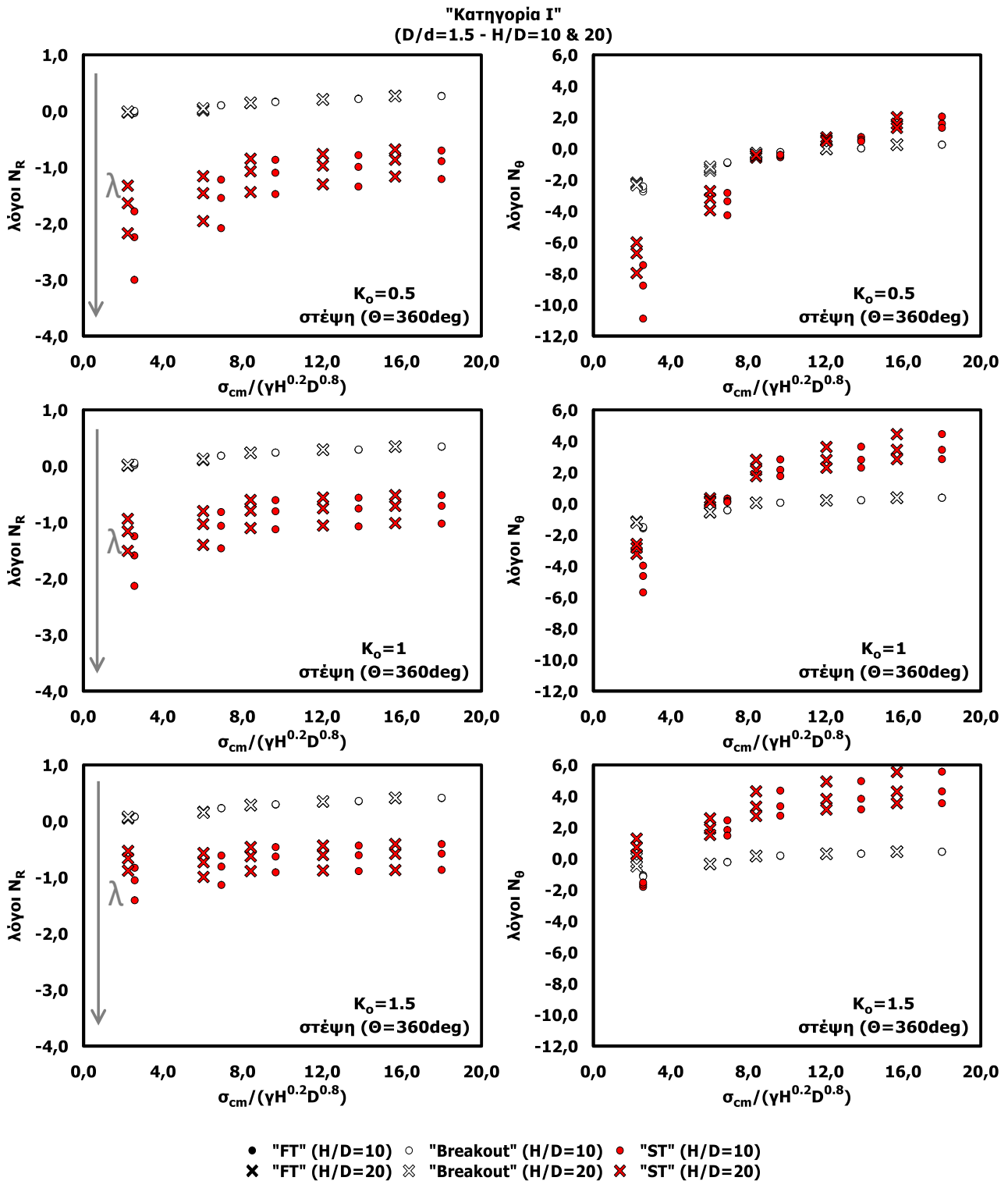
"Κατηγορία Ι"
(D/d=1.5 - H/D=10 & 20)



Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..3: Τιμές ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm} / \gamma H^{0.2} D^{0.8}$).
($K_o = 0.5, 1, 1.5$, $H/D = 10, 20$)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι λόγοι της κανονικοποιημένης ακτινικής και εφαπτομενικής αξονικής δύναμης στην στέψη στο Σχήμα 4.39. Γίνεται κατανοητό πως η διαφορά των

υπερκείμενων H/D δεν επηρεάζει την ένταση για τα διάφορα είδη βραχομάζας εκτός από την ασθενή βραχομάζα που υπάρχουν μικρές διαφορές, αφού η ένταση είναι παρόμοια και στις δυο περιπτώσεις.



Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..4: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών ($\sigma_{cm}/\gamma H^{0.2} D^{0.8}$). ($K_o=0.5, 1, 1.5$, H/D=10,20)

Παρατηρώντας τους λόγους της ακτινικής αξονικής δύναμης φαίνεται πως ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων K_0 παίζει ρόλο στην αποφόρτιση της έντασης. Ακόμη, γίνεται κατανοητή η σημασία της αντοχής της βραχομάζας αφού και για τις δυο περιπτώσεις αξονικών δυνάμεων

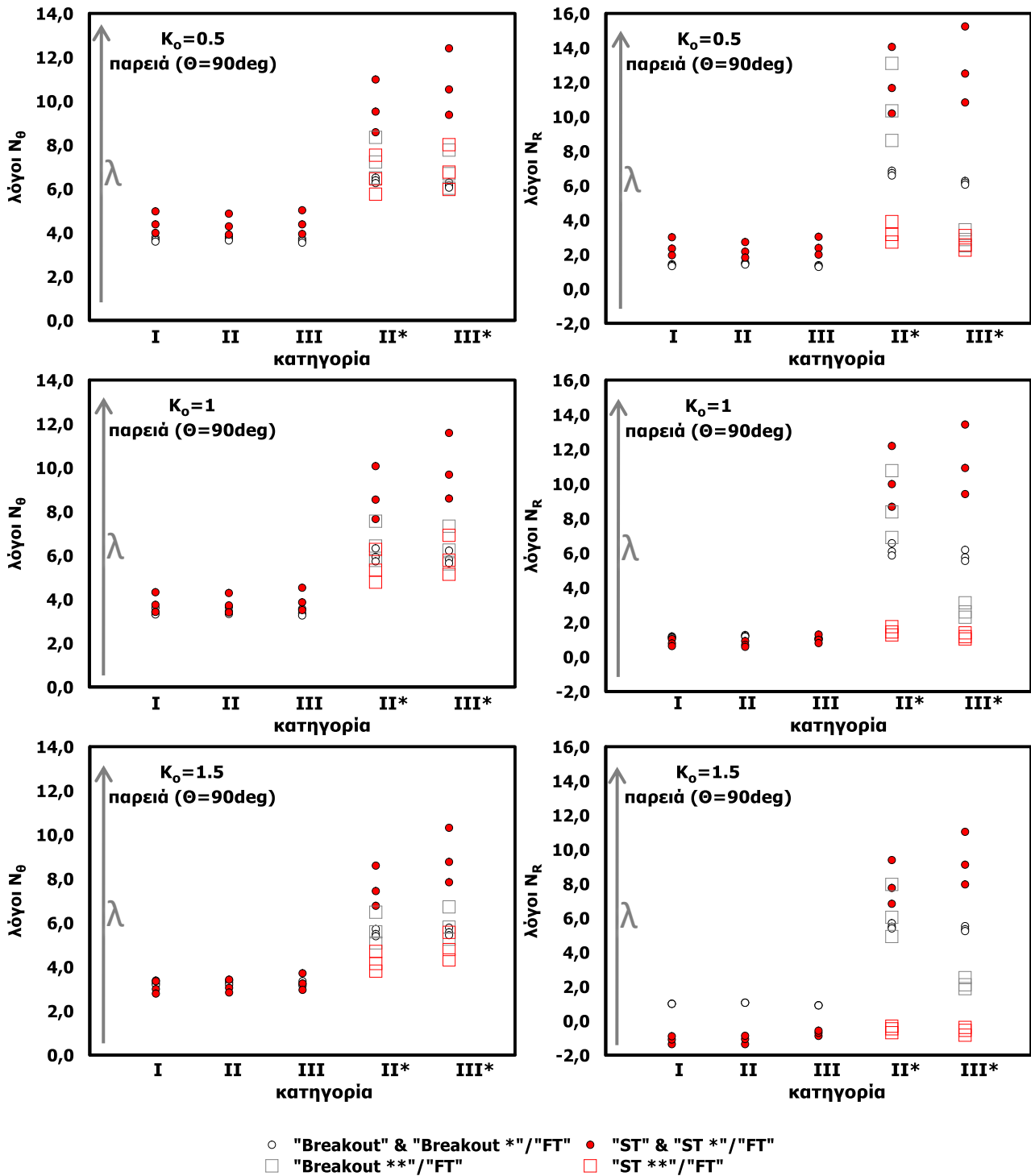
συντελεί στην μείωση της έντασης και την μικρότερη ανάπτυξή της. Επίσης, φαίνεται πως η πιο κρίσιμη ένταση για την στέψη είναι η ακτινική αξονική δύναμη λόγω του εντατικού πεδίου, που δημιουργείται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο συντελεστής οριζοντίων τάσεων και η αντοχή της βραχομάζας παίζουν κρίσιμο ρόλο στην καταπόνηση της στέψης. Από τις καμπύλες των λόγων φαίνεται όσο μεγαλύτερη η αντοχή της βραχομάζας και ο συντελεστής K_0 τόσο μικρότερο το τασικό πεδίο γύρω από το άνοιγμα της συνδετήριας σήραγγας. Τέλος, όσον αφορά τον συντελεστή αποτόνωσης λ ενώ πριν την διάνοιξη του ανοίγματος η σχέση μεταξύ του συντελεστή λ και των λόγων δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογη, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η αποτόνωση τόσο μικρότερη ο λόγος της έντασης που δημιουργείται, αντίθετα στο βήμα «Breakout» και «ST» κατά την διάνοιξη της συνδετήριας η σχέση γίνεται ανάλογη, δηλαδή όσο αυξάνεται ο συντελεστής λ τόσο αυξάνεται και ο λόγος της εντατικής φόρτισης του ανοίγματος.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την εντατική κατάσταση της παρειάς και της στέψης για όλες τις Κατηγορίες I, II, III και τις φάσεις εκσκαφής.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα Σχήματα 4.40 έως 4.43, τα οποία αναφέρονται στους λόγους της κανονικοποιημένης ακτινικής και εφαπτομενικής αξονικής δύναμης, που ασκείται στην παρειά και την στέψη του ανοίγματος, για τα βασικά βήματα της κάθε Κατηγορίας I, II, III συναρτήσει των κύριων παραμέτρων που έχουν μελετηθεί. Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται στο οριζόντιο άξονα οι τρεις Κατηγορίες (Κατηγορία I, II, III) και οι δυο επιπλέον Κατηγορίες που αφορούν τις δυο φάσεις εκσκαφής (Κατηγορία II*, III*). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την ασθενή και την ισχυρή βραχομάζα.

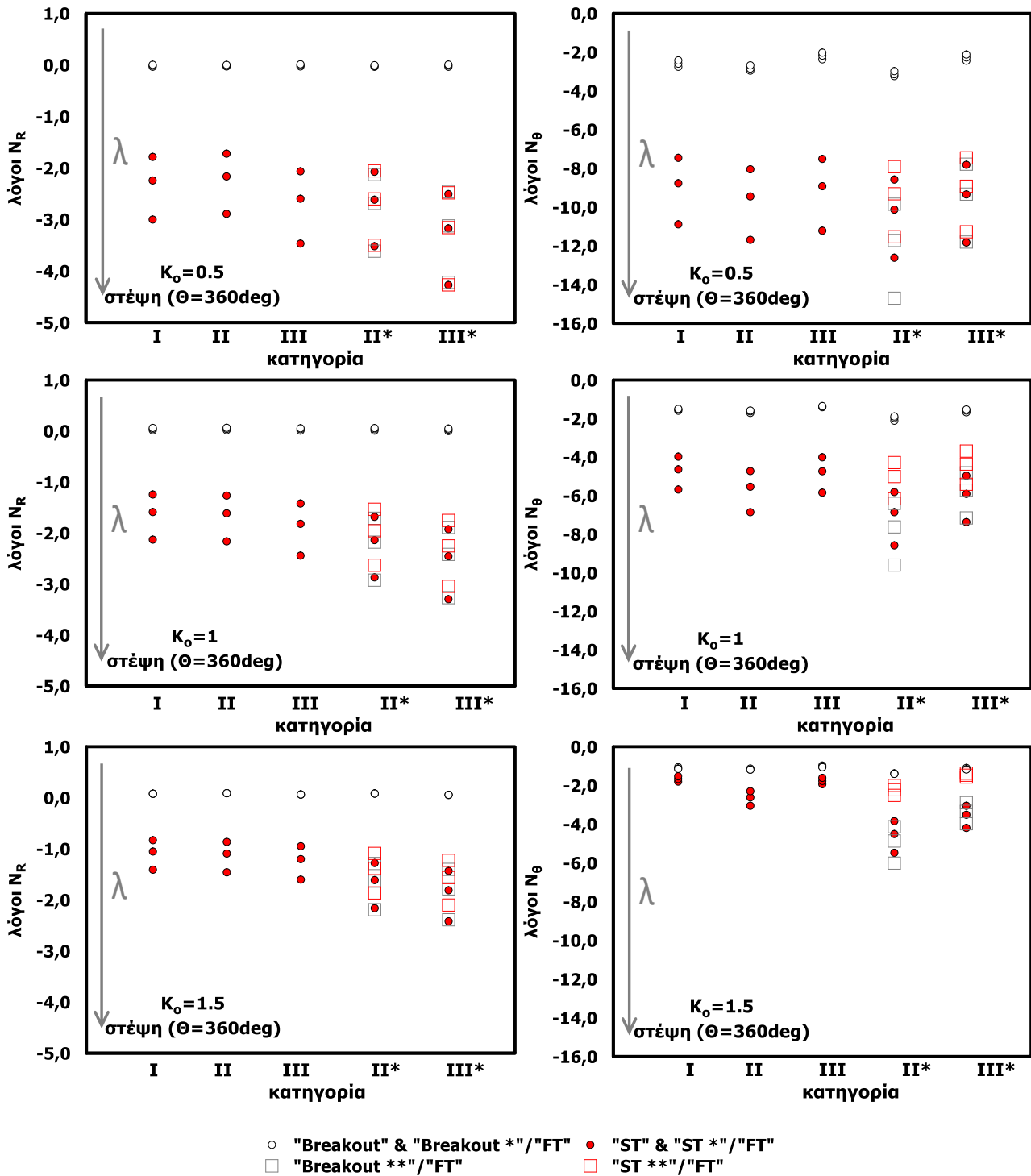
Παρατηρώντας τους λόγους των δυνάμεων στην παρειά και την στέψη προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα. Η μέθοδος των δυο φάσεων εκσκαφής (Κατηγορία II*, III*) της συνδετήριας σήραγγας και για την ασθενή και για την ισχυρή βραχομάζα είναι δυσμενέστερη σε σχέση με την ολομέτωπη εκσκαφή λόγω της αρχικής φόρτισης που προκύπτει κατά την εκσκαφή του άνω τμήματος «up» του ανοίγματος. Κατά την διάνοιξη του άνω τμήματος «Breakout*» στην Κατηγορία II*, III* η ένταση αυξάνεται. Επίσης, για τις Κατηγορίες I, II, III η ένταση είναι παρόμοια και παρατηρείται πως η αλλαγή της διατομής της συνδετήριας σήραγγας δεν προκαλεί μεγάλες αλλαγές στην εντατική κατάσταση του ανοίγματος και ότι η κυκλική διατομή επαρκεί για τον σχεδιασμό και κατασκευή των διασταυρούμενων σηράγγων. Όπως είναι πλέον κατανοητό στην παρειά η δυσμενέστερη δύναμη είναι η εφαπτομενική αξονική και στην στέψη η ακτινική για όλες τις Κατηγορίες μελέτης διασταυρούμενων σηράγγων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ασθενή και ισχυρή βραχομάζα φαίνεται πως στην ισχυρή βραχομάζα οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρότερες από αυτές της ασθενούς. Γενικά η αντοχή της βραχομάζας παίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη του εντατικού φορτίου. Τέλος, η αύξηση του συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 συμβάλει στην μείωση της έντασης και στην παρειά και στην στέψη για όλες τις κατηγορίες μελέτης.

"Κατηγορίες I & II & III"
($D/d=1.5 - H/D=10 - \sigma_{cm}/\rho_o=0.4$)



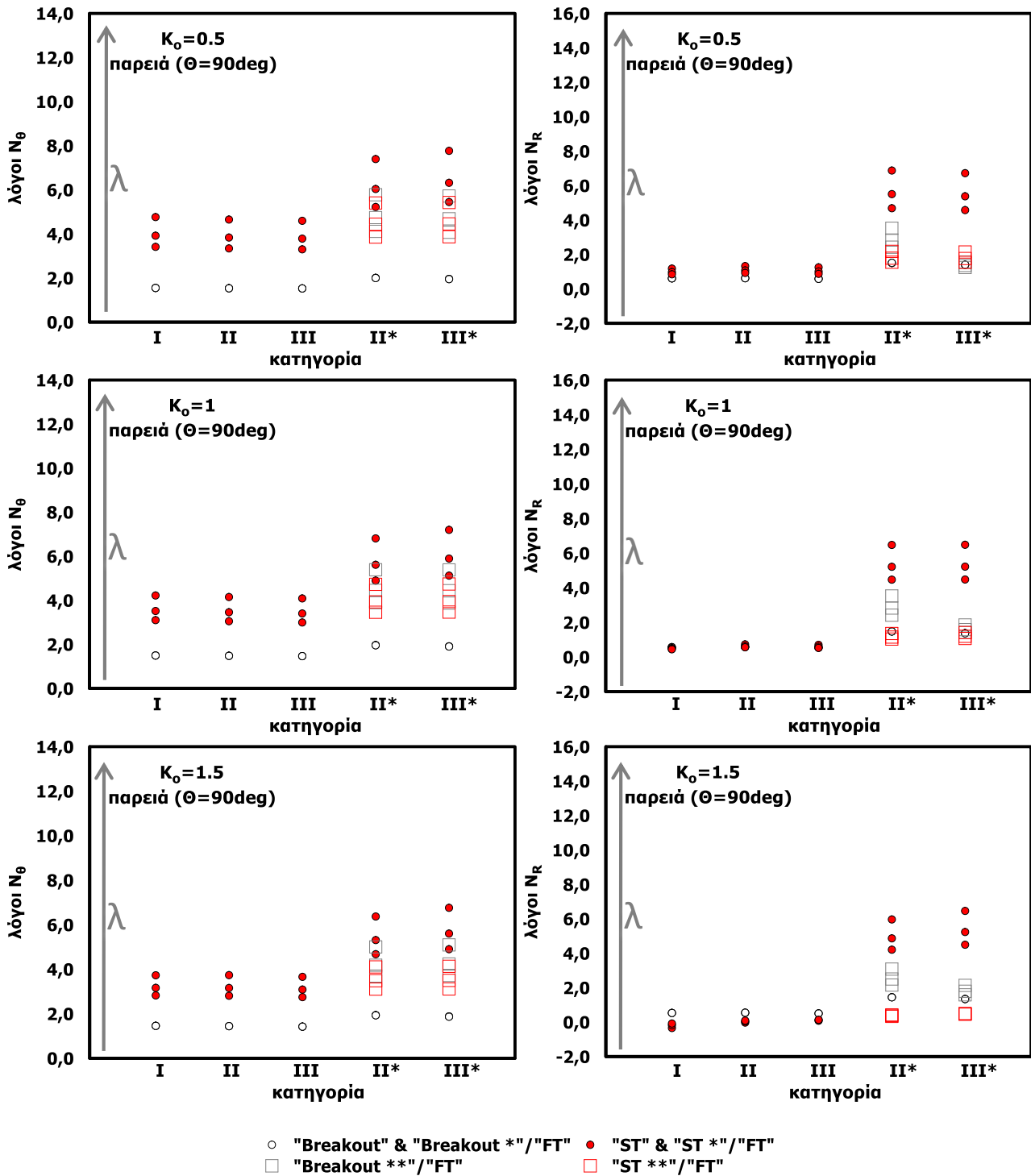
Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..5: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην παρειά του ανοίγματος της σήραγγας για τις Κατηγορίες I, II, III, II*, III*.
($K_o=0.5,1,1.5, H/D=10, \sigma_{cm}/\rho_o=0.4$)

"Κατηγορίες I & II & III"
($D/d=1.5$ - $H/D=10$ - $\sigma_{cm}/\rho_o=0.4$)



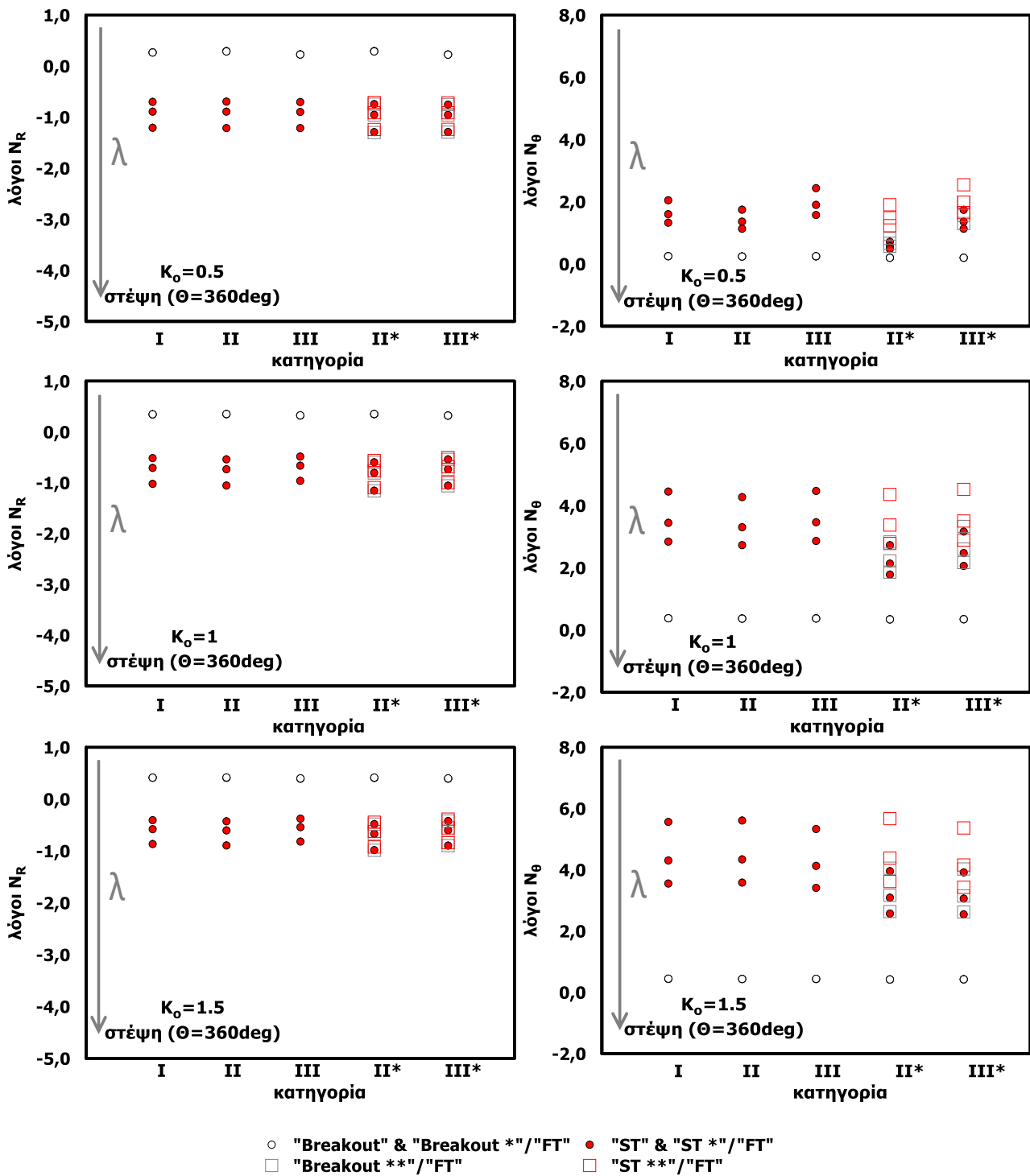
Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..6: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη του ανοίγματος της σήραγγας για τις Κατηγορίες I, II, III, II*, III*. ($K_o=0.5,1,1.5$, $H/D=10$, $\sigma_{cm}/\rho_o=0.4$)

"Κατηγορίες I & II & III"
($D/d=1.5 - H/D=10 - \sigma_{cm}/\rho_o=2.8$)



Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..7: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην παρειά του ανοίγματος της σήραγγας για τις Κατηγορίες I, II, III, II*, III*.
($K_o=0.5,1,1.5, H/D=10, \sigma_{cm}/\rho_o=2.8$)

"Κατηγορίες I & II & III"
($D/d=1.5 - H/D=10 - \sigma_{cm}/\rho_o=2.8$)



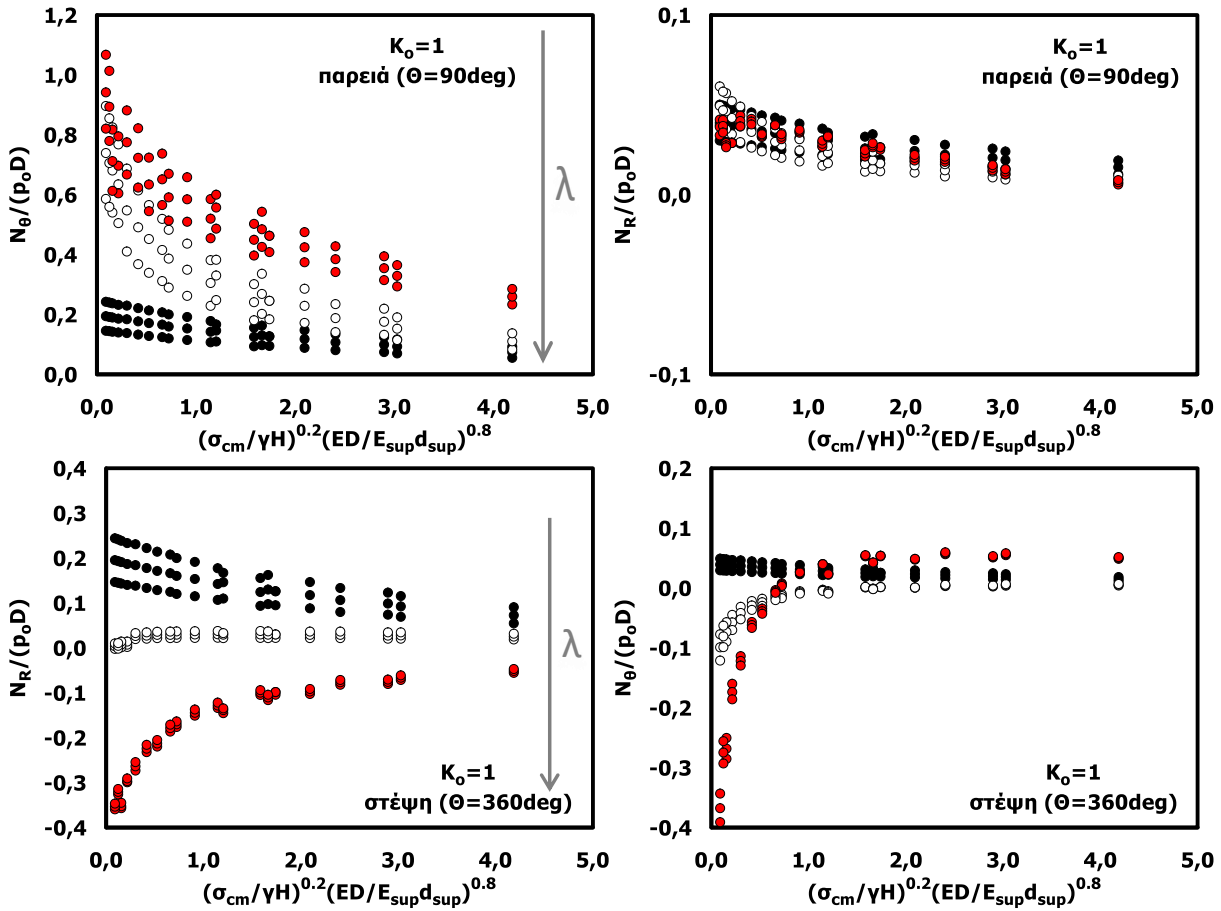
Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..8: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη του ανοίγματος της σήραγγας για τις Κατηγορίες I, II, III, II*, III*. ($K_o=0.5,1,1.5$, $H/D=10$, $\sigma_{cm}/\rho_o=2.8$)

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την εντατική κατάσταση της παρειάς και της στέψης για διαφορετικές παραμέτρους μελέτης, δηλ. πάχος t και μέτρο ελαστικότητας E εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν όλες τις κατηγορίες αντοχής της βραχομάζας και του συντελεστή αποτόνωσης λ με ύψος υπερκείμενων $H/D=10$ και συντελεστή οριζοντίων τάσεων $K_0=1$. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την μελέτη τριών διαφορετικών περιπτώσεων: α) πάχος σκυροδέματος ίσο με $t=0.8$ m και μέτρο ελαστικότητας του $E=20000$ MPa β) πάχος σκυροδέματος ίσο με $t=0.4$ m και μέτρο ελαστικότητας του $E=30000$ MPa και γ) πάχος σκυροδέματος ίσο με $t=0.8$ m και μέτρο ελαστικότητας του $E=30000$ MPa. Τα αποτελέσματα στα Σχήματα 4.44 και 4.45 αφορούν την κανονικοποιημένη ακτινική και εφαπτομενική αξονική δύναμη και τους λόγους τους για τις περιπτώσεις και παραμέτρους που αναφέρθηκαν, συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της βραχομάζας, της διαμέτρου της σήραγγας, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για τις τρεις περιπτώσεις και τα τρία βασικά βήματα «FT», «Breakout» και «ST».

Στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα και να γίνει κατανοητή ειδικά μέσα από τους λόγους των δυνάμεων η σημασία των γεωτεχνικών και μηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας (σ_{cm} , γ , E) και των μηχανικών χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (E_{sup} , t_{sup}). Ο ρόλος αυτών των διαγραμμάτων είναι να εισάγει ο χρήστης τις παραμέτρους της κάθε περίπτωσης μελέτης (σ_{cm} , γ , E , D , E_{sup} , t_{sup}) και να ελέγξει τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, δηλαδή αν η αύξηση κάποιας παραμέτρου του σκυροδέματος θα βοηθήσει στην επάρκεια της κατασκευής ή την μείωση της έντασης γύρω από το άνοιγμα της συνδετήριας σήραγγας. Έτσι, από αυτά τα συγκεντρωτικά διαγράμματα κατηγοριοποιείται και ελέγχεται το μέγεθος του φαινομένου που μελετάται για κάθε περίπτωση διασταυρούμενων σηράγγων.

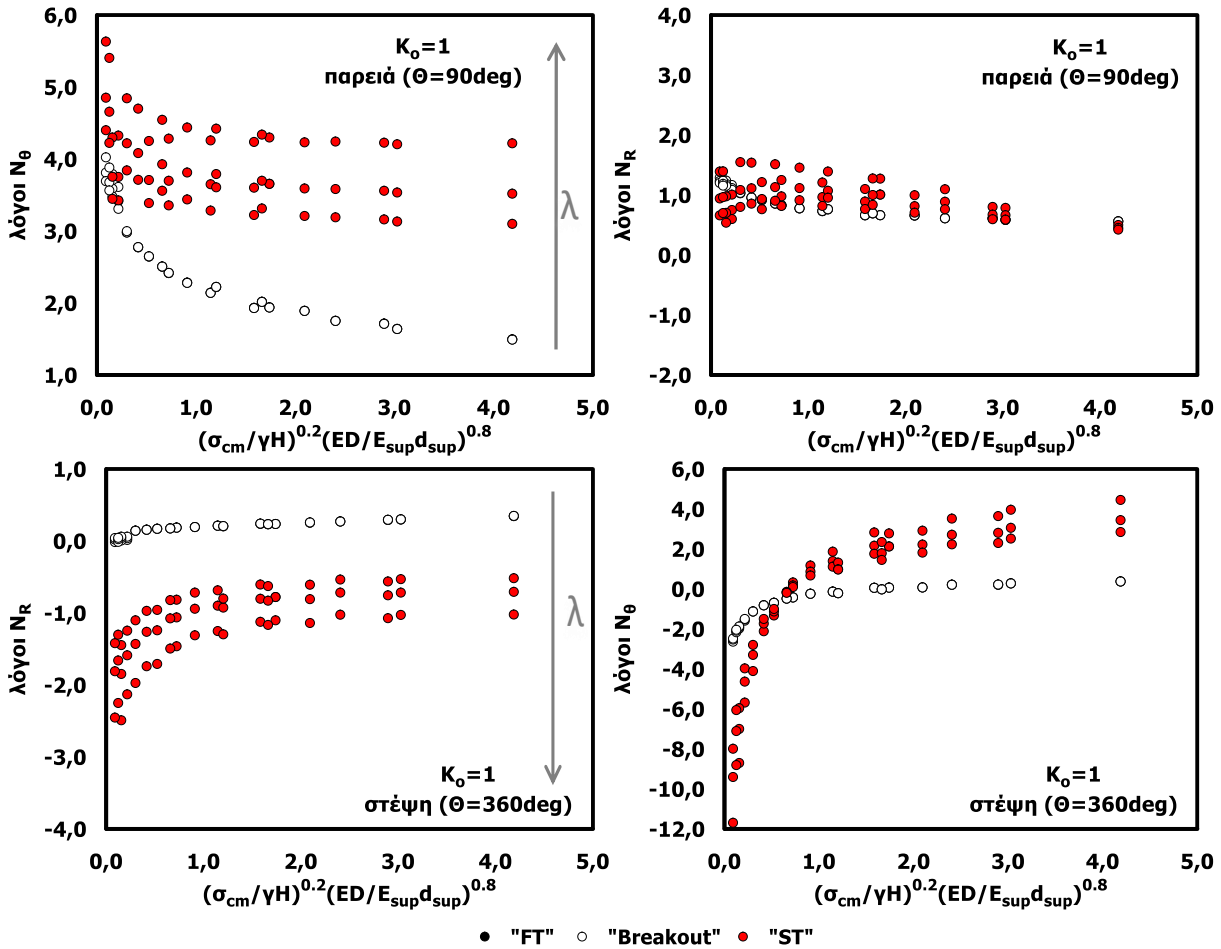
"Κατηγορία Ι"
(D/d=1.5 - H/D=10)



● "FT" ○ "Breakout" ● "ST"

Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..9: Τιμές ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη και την παρειά του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσει του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών και διαφορετικών παραμέτρων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

"Κατηγορία Ι"
(D/d=1.5 - H/D=10)



Σχήμα Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..10: Λόγοι ακτινικών (N_R) και εφαπτομενικών (N_θ) αξονικών δυνάμεων στην στέψη και την παρειά του ανοίγματος της σήραγγας, συναρτήσεσι του τροποποιημένου λόγου γεωτεχνικών συνθηκών και διαφορετικών παραμέτρων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

5. Συμπεράσματα & Προτάσεις

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερευνά την αλληλεπίδραση μεταξύ βαθιών διασταυρούμενων σηράγγων μέσω τριδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Σκοπός είναι η σύγκριση τριών κατηγοριών διατομής δίδυμων σηράγγων με δυο διαφορετικές μεθόδους διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν αποτελέσματα με διαφορετικό: α) ύψος υπερκείμενων, β) συντελεστή οριζοντίων τάσεων K_0 , γ) συντελεστή αποτόνωσης λ , δ) αντοχή βραχομάζας, ε) δυσκαμψία άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα).

Η Κατηγορία I αφορά σήραγγες με κυκλικές διατομές (δίδυμες και συνδετήρια) και διάνοιξη με ολομέτωπη εκσκαφή τόσο των κύριων όσο και της δευτερεύουσας σήραγγας. Στην κατηγορία αυτή έγινε μια επιπλέον διερεύνηση και μελέτη αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν με την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δηλαδή για συνδυασμούς αλλαγής είτε ταυτόχρονα είτε ξεχωριστά του πάχους t ή του μέτρου ελαστικότητας E του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η Κατηγορία II αφορά σήραγγες με κυκλική διατομή των δίδυμων σηράγγων και πεταλοειδή της συνδετήριας σήραγγας. Η Κατηγορία II μελετήθηκε για δύο μεθόδους εκσκαφής της συνδετήριας σήραγγας: α) ολομέτωπη εκσκαφή και β) εκσκαφή σε δυο φάσεις (Κατηγορία II*).

Η Κατηγορία III περιλαμβάνει σήραγγες με πεταλοειδή διατομή (δίδυμες και συνδετήρια) και μελετήθηκε και αυτή για δυο μεθόδους εκσκαφής: α) ολομέτωπη εκσκαφή και β) εκσκαφή σε δυο φάσεις (Κατηγορία III*).

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική μεταβολή στην εντατική καταπόνηση των δίδυμων σηράγγων στην περιοχή του ανοίγματος λόγω της διάνοιξης της συνδετήριας και παρουσιάζονται στα εξής τρία βασικά βήματα: (i) διάνοιξη πρώτων κύριων σηράγγων («FT» - First Tunnels), (ii) διάνοιξη ανοιγμάτων («Breakout») και (iii) ολοκλήρωση διάνοιξης δευτερής συνδετήριας σήραγγας («ST» - Second Tunnel).

Το κέλυφος της άμεσης υποστήριξης κατά τη διάνοιξη και μετά τη διάνοιξη των κύριων σηράγγων καταπονείται από θλιπτικές και εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέγεθος στην εγκάρσια διεύθυνση σε σύγκριση με την διαμήκη. Η ζώνη επιρροής του ανοίγματος στην άμεση υποστήριξη της κύριας σήραγγας εκτείνεται σε εύρος δύο φορές την ακτίνα της με κριτήριο προσδιορισμού την απόσβεση της μεταβολής της εγκάρσιας αξονικής δύναμης. Ειδικότερα, στην περιοχή του κόμβου, όπου διασταυρώνονται οι δίδυμες σήραγγες με την συνδετήρια, ο μηχανισμός ανακατανομής της έντασης στην άμεση υποστήριξη της περιφέρειας του ανοίγματος διακρίνεται σε δύο καταστάσεις: (i) στην περιοχή της παρειάς και το μεγαλύτερο μέρος του ανοίγματος, όπου αυξάνεται η θλιπτική δύναμη λόγω επιπρόσθετης αναπτυσσόμενης φόρτισης και (ii) στην περιοχή της στέψης και το μικρότερο μέρος του ανοίγματος, όπου μειώνεται η θλιπτική δύναμη και μεταπίπτει σε εφελκυστική λόγω εξελισσόμενης αποφόρτισης. Η συγκεκριμένη απόκριση συντελείται τόσο για την ακτινική όσο και την εφαπτομενική συνιστώσα της αξονικής δύναμης που ασκείται στην περιφέρεια του ανοίγματος. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι η φόρτιση του ανοίγματος, είτε θλιπτική, είτε εφελκυστική εντείνεται με την ολοκλήρωση της διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας σε σύγκριση με την κατάσταση δημιουργίας του ανοίγματος στην κύρια σήραγγα, ανεξάρτητα από τις παραμέτρους που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Ανάλογα με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω και τις Κατηγορίες I, II, III μπορούν να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για την εγκάρσια και την διαμήκη αξονική δύναμη:

- Η αντοχή της βραχομάζας για όλες τις κατηγορίες, που μελετήθηκαν, παίζει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της θλίψης στην παρειά και τη μείωσή της ή την ανάπτυξη εφελκυσμού στην περιοχή της διασταύρωσης. Όσο αυξάνεται η αντοχή τόσο μικρότερο εντατικό πεδίο αναπτύσσεται και τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή που συντελείται σε σύγκριση με το καθεστώς πριν τη δημιουργία του ανοίγματος.
- Ο συντελεστής οριζόντιων τάσεων K_0 για όλες τις περιπτώσεις και κατηγορίες επηρεάζει τη μείωση της θλίψης στην παρειά και γενικά την εντατική κατάσταση που δημιουργείται στο άνοιγμα. Για όρους κανονικοποιημένων δυνάμεων η αύξηση του συντελεστή K_0 συντελεί στην μείωση και της θλίψης στην παρειά και του εφελκυσμού στην στέψη. Η μεγάλη επίδραση του συντελεστή οριζόντιων τάσεων φαίνεται από τους λόγους των κανονικοποιημένων μεγεθών, αφού όσο αυξάνεται ο συντελεστής K_0 τόσο μειώνονται οι λόγοι των αντίστοιχων μεγεθών στην παρειά και στην στέψη του ανοίγματος.
- Το ύψος υπερκείμενων H/D δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την αλλαγή της εντατικής κατάστασης στο άνοιγμα.
- Ο συντελεστής αποτόνωσης λ κατά το αρχικό βήμα «FT» είναι αντιστρόφως ανάλογα της έντασης, δηλαδή όσο αυξάνεται η αποτόνωση τόσο μικρότερη ένταση δημιουργείται. Κατά την διάνοιξη όμως και την ολοκλήρωση της δευτερεύουσας σήραγγας, όσον αφορά τις κανονικοποιημένες δυνάμεις στην παρειά η σχέση του συντελεστή αποτόνωσης και της θλίψης παραμένει αντιστρόφως ανάλογη, δηλαδή όσο αυξάνεται η αποτόνωση τόσο μικρότερη θλίψη δημιουργείται στην παρειά. Αντίθετα, για τις κανονικοποιημένες δυνάμεις στην στέψη η σχέση του συντελεστή αποτόνωσης και του εφελκυσμού, που δημιουργείται στην στέψη, είναι ανάλογη για τα βήματα «Breakout» και «ST», δηλαδή όσο αυξάνεται η αποτόνωση τόσο αυξάνεται και ο εφελκυσμός στην στέψη. Όσον αφορά τους λόγους των αξονικών δυνάμεων, που αποτελούν το μέτρο της ποσοτικοποίησης της επίδρασης της διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας, η επίδραση του συντελεστή αποτόνωσης στην παρειά και την στέψη είναι ανάλογη της αύξησης της εξεταζόμενης τιμής του. Η αύξηση του συντελεστή αποτόνωσης συνεπάγεται μεγαλύτερες τιμές λόγων και αντίστροφα.
- Η αλλαγή της διατομής της συνδετήριας σήραγγας από κυκλική σε πεταλοειδή από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αναλύθηκαν φαίνεται πως επηρεάζει και διαφοροποιεί τη ένταση γύρω από το άνοιγμα της συνδετήριας σήραγγας, σε μικρό βαθμό που καθιστά τα αποτελέσματα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό η κυκλική διατομή είναι το ίδιο επαρκής για την αριθμητική προσομοίωση του υπό μελέτη προβλήματος με την πεταλοειδή. Η προαναφερθείσα επισήμανση ισχύει για ολομέτωπη διάνοιξη της συνδετήριας σήραγγας, είτε κυκλικής, είτε πεταλοειδούς διατομής.
- Σε σύγκριση της κατηγορίας I και III, δηλαδή κατασκευή σηράγγων με κυκλικές διατομές (κύριες-συνδετήρια) και με πεταλοειδείς (κύριες-συνδετήρια) αντίστοιχα, προκύπτει πως τα αποτελέσματα της εντατικής κατάστασης είναι παρόμοια μεταξύ τους με κάποιες μικρές διαφορές και δεν κρίνεται απαραίτητη η αριθμητική προσομοίωση πεταλοειδών

σηράγγων (κύριες-συνδετήρια). Η συγκεκριμένη επισήμανση ισχύει για ολομέτωπη διάνοιξη της συνδετήριας σήραγγας, είτε κυκλικής, είτε πεταλοειδούς διατομής

- Οι διαφορετικές μέθοδοι εκσκαφής επηρεάζουν την ένταση που θα δημιουργηθεί στο κέλυφος της άμεσης υποστήριξης. Η μέθοδος διάνοιξης της συνδετήριας σε δυο φάσεις εκσκαφής είναι δυσμενέστερη από την ολομέτωπη εκσκαφή. Αυτό προκύπτει λόγω της αρχικής φόρτισης που δημιουργείται όταν σκάβεται το άνω τμήμα της διατομής, η οποία συνεχίζει να υπάρχει κατά την ολοκλήρωση του κατώτερου τμήματος και διάνοιξη της συνδετήριας σήραγγας.
- Στην κατηγορία I όπου χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές παράμετροι μηχανικών χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρουσιάζεται η επιρροή των μηχανικών χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην εντατική κατάσταση, που δημιουργείται γύρω από το άνοιγμα της κύριας σήραγγας. Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E του σκυροδέματος δεν επηρεάζει τόσο στην αλλαγή της εντατικής κατάστασης αφού τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα των δυνάμεων είναι παρόμοια με αυτά της αρχικής κατάστασης πριν την αλλαγή του μέτρου ελαστικότητας E . Η αλλαγή του πάχους t του σκυροδέματος και η αύξηση του προκαλεί αύξηση των κανονικοποιημένων δυνάμεων και αντίστοιχα περισσότερη ένταση ασκείται στην παρειά και την στέψη λόγω της αύξησης των διαστάσεων του κελύφους και κατά συνέπεια της δυσκαμψίας του. Από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα μπορεί ο μελετητής να εισάγει τα δεδομένα των μηχανικών χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των παραμέτρων της βραχομάζας και να εκτιμήσει τα αναπτυσσόμενα μεγέθη στη στέψη και την παρειά του ανοίγματος, τόσο στην εγκάρσια, όσο και τη διαμήκη διεύθυνση.

Τέλος, τα συγκεντρωτικά διαγράμματα συναρτήσεως του τροποποιημένου όρου αντοχής της βραχομάζας ($\sigma_{cm}/\gamma H^{0.2} D^{0.8}$) που παρουσιάζονται σε αυτήν την διπλωματική εργασία αποτελούν ένα γενικευμένο προκαταρκτικό οδηγό για την κατασκευή και διαστασιολόγηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην περιοχή της διασταύρωσης δίδυμων σηράγγων με τη συνδετήρια.

Προτάσεις

Στα πλαίσια περαιτέρω διερεύνησης του υπό μελέτη προβλήματος προτείνεται η διερεύνηση της επίδρασης:

- των διαφορετικών μεγεθών (διαμέτρων) συνδετήριας σήραγγας
- της διάνοιξης της συνδετήριας σήραγγας με μέτρα υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής
- της χρήσης πιο σύνθετου καταστατικού προσομοιώματος για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα ενσωματώνει κριτήριο για την αστοχία του και την χρονική διάσταση στην σκλήρυνσή του και απόκτηση της συνολικής του δυσκαμψίας

Βιβλιογραφία

Γ. Τσιαμπάος, Μ. Καββαδάς (2016), Βιβλίο Βραχομηχανική Σήραγγες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Kavvadas, M., Kalos, K. (2017), "A constitutive model for Strength Degradation of Rockmasses (SDR)", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol 50, pp 1-24.

Spyridis, P., Bergmeister, K. (2015), "Analysis of lateral openings in tunnel linings", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 50, pp. 376-395.

C. Carranza-Torres, M. Diederichs (2009), "Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 506–532.

Panagiotis Spyridis, Konrad Bergmeister (2015), "Analysis of lateral openings in tunnel linings", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol., pp. 376–395.

F.Y. Hsiao, C.L. Wang, J.C. Chern (2009), "Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 14–21.

Hong-Liang Liu, Shu-Cai Li, Li-ping Li, and Qian-Qing Zhang (2017), "Study on Deformation Behavior at Intersection of Adit and Major Tunnel in Railway", *Tunnel Engineering*, *KSCCE Journal of Civil Engineering* (2017) 21(6):2459-2466.

JinkuiLia ,Xianke Wei and WenjingLiangc (2015), "The Effects of Different Excavation Angle on Intersecting Tunnel Surrounding Rock Stability", 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015).

Bergmeister, K., Breen, J.E., Jirsa, J.O., Kreger, M.E. 1993. *Detailing for Structural Concrete*. Center for Transportation Research Report 0-1127-3F, University of Texas, Austin.

Dassault Systèmes, 2011. *Abaqus/standard user's manual v. 6.9*, Dassault Systèmes

Förder, M., Abel, F., Tirpitz, E.R., 2008. *Der Malmö Citytunnel, Schweden – Tunnelbau in Skandinavien (The Malmö Citytunnel, Sweden – Tunnelling in Scandinavia)*. *Beton-und Stahlbetonbau* 103, 689–697.

Hoek, E., Brown, E.T., 1980. *Underground Excavations in Rock*. CRC Press, London

Hsiao, F.Y., Yu, C.W., Chern, J.C., 2005. Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsuehshan tunnel. In: Proceedings of the International Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels, Taipei.

Jäger, J., 2002. Tunnel junction at shallow cover: a case study. In: Proceedings of the Third International Conference on Engineering Computational Technology. Civil-Comp Press, Prague.

Karakus, M., 2007. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 22, 47–56

Moon, H., Lee, H., 1991. A 3-D FE model of a shaft-tunnel-tunnel intersection and comparison with a 2-D model. In: International Society for Rock Mechanics – 7th ISRM Congress. Springer, Aachen, Germany.