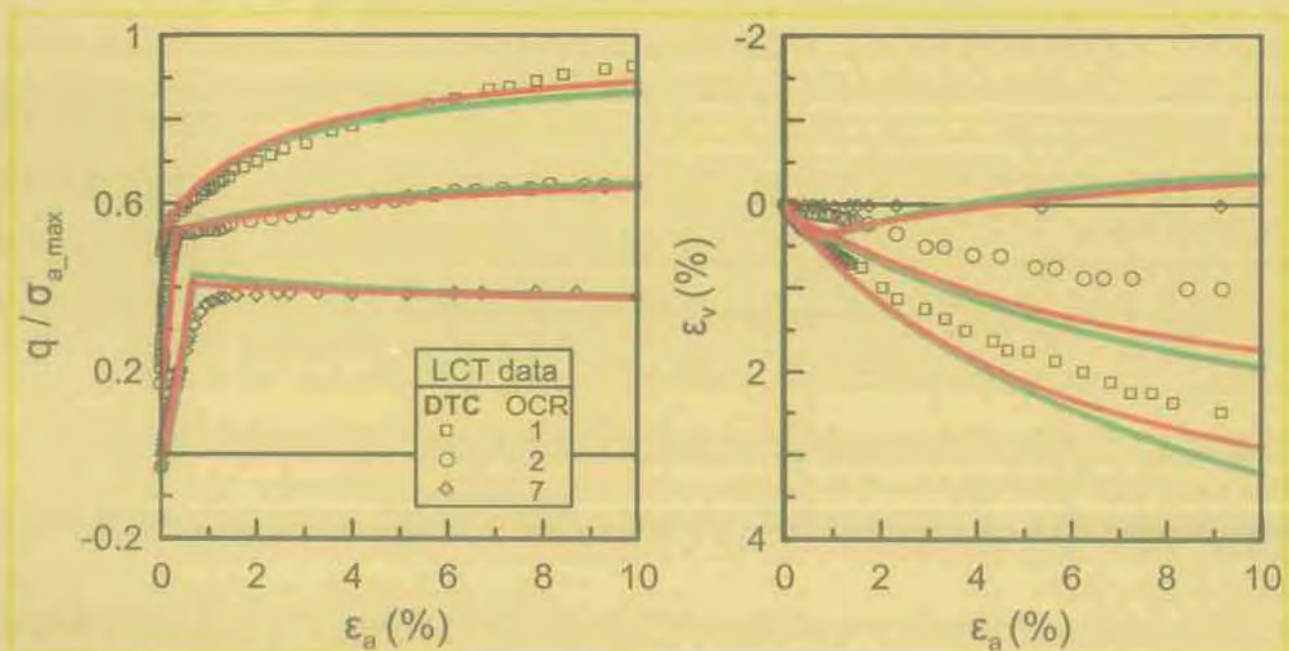


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ  
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ»



«IMPROVED CONSTITUTIVE MODELING OF THE MECHANICAL  
RESPONSE OF COHESIVE SOILS»

Επιβλέπων καθηγητής: Αχιλλέας Παπαδημητρίου

Φοιτήτρια: Βράννα Αντιγόνη

Βόλος, Μάρτιος 2009

Στους γονείς μου,

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «**ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ**» έχει ως σκοπό τη διερεύνηση και πρόταση τρόπων βελτίωσης της καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς συνεκτικών εδαφών, όπως η άργιλος.

Η περάτωση της συγκεκριμένης εργασίας θα ήταν πρακτικώς αδύνατη χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του κυρίου Παπαδημητρίου Αχιλλέα, ο οποίος διατήρησε αμείωτο το ενδιαφέρον του για την επίβλεψη του θέματος και ήταν πάντα πρόθυμος να προσφέρει τις γνώσεις του. Τον ευχαριστώ εκ βαθέων και του εύχομαι τα καλύτερα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τους κυρίους Κωμοδρόμο Αιμίλιο και Ντακούλα Παναγιώτη που με χαρά δέχτηκαν να παρευρεθούν στην παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» οφείλω στους γονείς μου που με στηρίζουν και με περιβάλλουν με αγάπη όλα τα χρόνια της ζωής μου.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή
  - 1.1. Αντικείμενο - Αναγκαιότητα
  - 1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας
2. Το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY
  - 2.1. Συνοπτική παρουσίαση
  - 2.2. Το SANICLAY στον τριαξονικό χώρο
  - 2.3. Βαθμονόμηση των σταθερών του προσομοιώματος SANICLAY
  - 2.4. Απόδοση του προσομοιώματος SANICLAY
  - 2.5. Προτερήματα και μειονεκτήματα του προσομοιώματος SANICLAY
3. Διερεύνηση του Νόμου Ροής
  - 3.1. Εισαγωγή
  - 3.2. Αλλαγή της συμπεριφοράς διάτμησης ως συνάρτηση της σταθεράς  $x$
  - 3.3. Αλλαγή της συμπεριφοράς διάτμησης ως συνάρτηση μεταβλητής τιμής  $x$
  - 3.4. Συμπέρασμα
4. Αλλαγή της μορφής της επιφάνειας διαρροής: στρεβλωμένος λημνίσκος
  - 4.1. Εισαγωγή
  - 4.2. Παρουσίαση του νέου προσομοιώματος
  - 4.3. Προσομοιώσεις απόκρισης της αργίλου LCT με το νέο προσομοίωμα
    - 4.3.1. Επίδραση της σταθεράς  $C$
    - 4.3.2. Επίδραση του όρου  $\left(\frac{p}{p_o}\right)^x$  στις σχέσεις μεταβολής των  $\alpha$  και  $\beta$
    - 4.3.3. Επίδραση των τιμών των σταθερών  $m$  και  $n$  στην προβλεπόμενη απόκριση
  - 4.4. Σύγκριση προβλέψεων νέου προσομοιώματος με το SANICLAY
5. Αλλαγή της μορφής της επιφάνειας διαρροής: στρεβλωμένο ελλειψοειδές
  - 5.1. Εισαγωγή

- 5.2. Παρουσίαση του νέου προσομοιώματος
- 5.3. Προσομοιώσεις της απόκρισης της αργίλου LCT με το νέο προσομοίωμα
  - 5.3.1. Επίδραση των τιμών των σταθερών  $N$  και  $z$  στην προβλεπόμενη απόκριση
  - 5.3.2. Ορισμός της σταθεράς  $z$  με βάση τις τιμές  $n$  και  $N$  και μία δεδομένη επιφάνεια διαρροής αναφοράς
- 5.4. Σύγκριση προβλέψεων νέου προσομοιώματος με το SANICLAY
6. Σύνοψη
7. Βιβλιογραφία

## **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

### **1.1: Αντικείμενο - Αναγκαιότητα**

Η ευρεία χρήση αριθμητικών κωδίκων σε σημαντικές γεωτεχνικές εφαρμογές αποτελεί συνέπεια της ραγδαίας τεχνολογικής εξέλιξης και των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων σε ακρίβεια και ταχύτητα. Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πολλά καταστατικά προσομοιώματα απόκρισης της εδαφικής συμπεριφοράς, με μεγάλη ποικιλία ως προς την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Βασική επιδίωξη κατά τη δημιουργία του κάθε προσομοιώματος αποτελεί η διαμόρφωση αποτελεσματικού ισοζυγίου μεταξύ χρηστικότητας και ακριβούς απόδοσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται και προτείνονται τρόποι βελτίωσης της καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς συνεκτικών εδαφών, όπως η άργιλος. Ως βάση αυτής της έρευνας αποτελεί το καταστατικό προσομοίωμα ανισοτροπικής πλαστικότητας SANICLAY (Dafalias et al 2006), με το όνομά του να προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων «Simple ANIsotropic CLAY model». Βασικό μέλημα σ' αυτή την προσπάθεια ήταν να διατηρηθεί, κατά το δυνατόν, η απλότητα του προσομοιώματος αναφοράς.

### **1.2: Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας**

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY και γίνεται διατύπωση και περιγραφή των εξισώσεων του υπό τριαξονικές συνθήκες. Επιπλέον, αξιολογείται η απόδοση (performance) του στην προσομοίωση με ακρίβεια της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς μιας αργίλου χαμηλής πλαστιμότητας σε αστράγγιστες και στραγγιζόμενες δοκιμές διάτμησης. Επίσης διασαφηνίζονται τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα του εν λόγω προσομοιώματος, με τα δεύτερα να αποτελούν το στόχο βελτίωσης στα επόμενα κεφάλαια.

Το Κεφάλαιο 3 διερευνά το νόμο ροής του καταστατικού προσομοιώματος αναφοράς SANICLAY, με στόχο ακριβέστερες προβλέψεις χωρίς σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητάς του. Η διερεύνηση του νόμου ροής δε γίνεται εκ βάθρων, καθώς

δεν επιτρέπεται αύξηση των σταθερών του προσομοιώματος, χάριν διατήρησης της απλότητάς του.

Στα Κεφάλαια 4 και 5 προτείνονται δύο νέα καταστατικά προσομοιώματα, με την ονομασία «στρεβλωμένος λημνίσκος» και «στρεβλωμένο ελλειψοειδές» αντίστοιχα. Τα νέα αυτά προσομοιώματα διατηρούν τη μορφή της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού («περιστρεμμένο ελλειψοειδές»), τη γενική μορφή των νόμων κράτυνσης και την ισότροπη ελαστικότητα του SANICLAY, αλλά εισάγουν διαφορετική μορφή στην επιφάνεια διαρροής. Πιο συγκεκριμένα, στα νέα προσομοιώματα η επιφάνεια διαρροής δεν έχει μορφή «περιστρεμμένου ελλειψοειδούς» όπως στο SANICLAY, αλλά τη μορφή ενός «στρεβλωμένου λημνίσκου» και ενός «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς», απ' τις οποίες υιοθετούν καταχρηστικά και την ονομασία τους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα συμπεράσματα από την παρούσα έρευνα, και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

## **Κεφάλαιο 2: Το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY**

### **2.1: Συνοπτική παρουσίαση**

Το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY είναι ένα προσομοίωμα ανισοτροπικής πλαστικότητας για αργίλους, το οποίο παρέχει σχετικά ακριβείς προσομοιώσεις τόσο για αστράγγιστη όσο και για στραγγιζόμενη συμπεριφορά κανονικώς στερεοποιημένων αργίλων και σε ικανοποιητικό βαθμό υπερστερεοποιημένων αργίλων, αγνοώντας τα φαινόμενα καταστροφής δομής που είναι πιθανό να αναπτυχθούν.

Βασίζεται σε μετεξέλιξη του προσομοιώματος **Modified Cam Clay (MCC)** (Burland 1965) και ουσιαστικά αποτελεί την απλούστερη δυνατή ενεργητική μετάβασή του από την ισοτροπία στην ανισοτροπία. Χρησιμοποιεί συνολικά οχτώ (8) σταθερές, οι πέντε (5) από τις οποίες προέρχονται από το προσομοίωμα MCC, ενώ οι υπόλοιπες τρεις (3) προκύπτουν εύκολα από εργαστηριακές δοκιμές.

Το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY υπακούει σε μη συζευγμένο νόμο ροής, ορίζοντας μια επιφάνεια διαρροής διαφορετική της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού. Εκτός από την ισοτροπική κράτυνση της επιφάνειας διαρροής, και οι δύο επιφάνειες εξελίσσονται μέσω ενός συνδυασμού κινηματικής και στρεβλωτικής κράτυνσης (kinematic και distortional hardening).

### **2.2: Το SANICLAY στον τριαξονικό χώρο**

Η διατύπωση του προσομοιώματος παρουσιάζεται εδώ στον τριαξονικό χώρο τάσεων – παραμορφώσεων. Λεπτομέρειες επί της γενίκευσής του στον πολυαξονικό χώρο (multiaxial space) δίνονται στην πρωτότυπη δημοσίευση του Dafalias et al (2006).

Πιο συγκεκριμένα, το προσομοίωμα ορίζεται ως συνάρτηση των κάτωθι όρων ενεργών τάσεων:



$p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ , της μέσης ενεργούς τάσης και  
 $q = (\sigma_a - \sigma_r)$ , της αποκλίνουσας τάσης.

Σε όρους παραμορφώσεων ορίζονται τα αντίστοιχα μεγέθη:

$\varepsilon_v = (\varepsilon_a + 2\varepsilon_r)$ , η ογκομετρική παραμόρφωση και  
 $\varepsilon_q = (2\varepsilon_a - \varepsilon_r)/3$ , η αποκλίνουσα παραμόρφωση.

Σε όλα τα ανωτέρω μεγέθη οι δείκτες  $a$  και  $r$  συμβολίζουν αντίστοιχα την αξονική και ακτινική διεύθυνση ενός τριαξονικού δοκιμίου.

Το προσομοίωμα χαρακτηρίζεται από ισοτροπική υποελαστικότητα, και οι ρυθμοί μεταβολής της ογκομετρικής και αποκλίνουσας ελαστικής παραμόρφωσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\dot{p}}{K} \quad \text{και} \quad \dot{\varepsilon}_q^e = \frac{\dot{q}}{3G} \quad (2.1)$$

όπου:

$\dot{p}$  και  $\dot{q}$  : οι ρυθμοί μεταβολής των ενεργών τάσεων  $p$  και  $q$ ,

$K = p(1 + e_{in})/\kappa$  : το ελαστικό μέτρο ισοτροπικής συμπίεσης

$e_{in}$  : η αρχική τιμή του δείκτη πόρων  $e$

$\kappa$  : είναι μια σταθερά του προσομοιώματος, που αποτυπώνει την κλίση της γραμμής επαναφόρτισης στον χώρο  $e - \ln p$

$G$  : το ελαστικό μέτρο διάτμησης, το οποίο συσχετίζεται με την εκάστοτε τρέχουσα τιμή του  $K$ , ως συνάρτηση του ελαστικού λόγου Poisson  $\nu$  (σταθερά του προσομοιώματος) σύμφωνα με τη σχέση:

$$G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K \quad (2.2)$$

Οι εξισώσεις των ρυθμών ογκομετρικής και αποκλίνουσας πλαστικής παραμόρφωσης δίνονται από το νόμο ροής:

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \langle L \rangle \frac{\partial g}{\partial p}; \quad \dot{\varepsilon}_q^p = \langle L \rangle \frac{\partial g}{\partial q} \quad (2.3)$$

όπου  $g=0$  η επιφάνεια πλαστικού δυναμικού, και

$L$  ο δείκτης φόρτισης, ο οποίος λόγω των αγκυλών Macauley δίνει: για  $L > 0$  δίνει  $\langle L \rangle = L$  και συνθήκες φόρτισης, ενώ διαφορετικά για  $L < 0$  δίνει  $\langle L \rangle = 0$  και συνθήκες αποφόρτισης.

Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση που περιγράφει την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού είναι η ακόλουθη:

$$g = (q - p_\alpha)^2 - (M^2 - \alpha^2) p (p_\alpha - p) = 0 \quad (2.4)$$

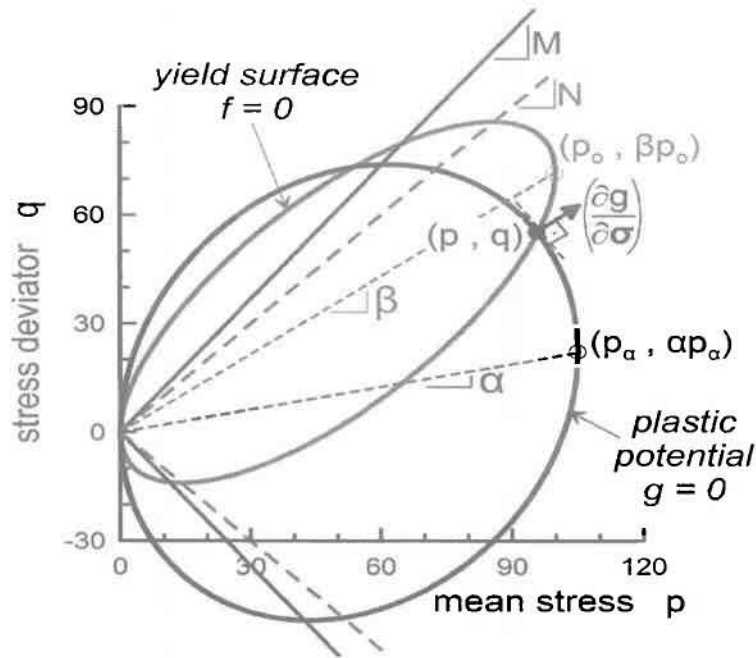
όπου:

$\alpha$  : αδιάστατη μεταβλητή (υποβόσκων λόγος τάσεων) που εισάγει την ανισοτροπία στην επιφάνεια πλαστικού δυναμικού και αποτελεί μία από τις παραμέτρους κράτυνσης του προσομοιώματος.

$p_\alpha$  : η τιμή της τάσης  $p$  όταν  $q = p_\alpha$  . Η τιμή της  $p_\alpha$  δε συνδέεται με εξίσωση κράτυνσης, καθώς η τιμή της  $p_\alpha$  εκτιμάται επιβάλλοντας την εξίσωση 2.4 όταν το τρέχον σημείο  $(p,q)$  ανήκει στην επιφάνεια διαρροής  $f=0$ .

$M$  : κλίση γραμμής κρίσιμης τάσης (critical stress ratio)

Η επιφάνεια πλαστικού δυναμικού στο χώρο των τάσεων-παραμορφώσεων – που για συζευγμένη πλαστικότητα λειτουργεί και ως επιφάνεια διαρροής – είναι μία περιστραμμένη και στρεβλωμένη έλλειψη (βλέπε Σχήμα 2.1). Το μέγεθος της περιστροφής (περί τον άξονα  $q=0$ ) και στρέβλωσης της επιφάνειας δηλώνει το μέγεθος της ανισοτροπίας και ελέγχεται από τη μεταβλητή  $\alpha$ .



Σχήμα 2.1. Οι επιφάνειες του προσομοιώματος SANICLAY στον τριαξονικό χώρο τάσεων.

Από το Σχήμα 2.1 διαφαίνεται ότι  $M = M_c$  όταν ο αποκλίνων λόγος τάσεων είναι  $\eta = q/p > \alpha$ , και  $M = M_e$  όταν  $\eta = q/p < \alpha$ , με τις τιμές των  $M_c$  και  $M_e$  να είναι σταθερές του προσομοιώματος.

Η επιφάνεια  $g=0$  παρουσιάζει  $\frac{\partial g}{\partial p} = 0$  για  $\eta = M_c$  (και  $\eta > \alpha$ ) και για  $\eta = -M_e$  (και  $\eta < \alpha$ ), εντοπίζοντας τη βασική προϋπόθεση για να βρίσκεται ένα σημείο στην κρίσιμη κατάσταση (μηδενική μεταβολή ογκομετρικής παραμόρφωσης, βλ. εξίσωση 2.3).

Επίσης συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν:

$$\dot{\epsilon}_v^p = \langle L \rangle \frac{\partial g}{\partial p} = \langle L \rangle p (M^2 - \eta^2); \quad \dot{\epsilon}_q^p = \langle L \rangle \frac{\partial g}{\partial q} = \langle L \rangle 2p(\eta - \alpha); \quad \psi = \frac{\dot{\epsilon}_v^p}{\dot{\epsilon}_q^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{2(\eta - \alpha)} \quad (2.5)$$

όπου  $\psi$  ο εκάστοτε τρέχων ρυθμός μεταβολής του όγκου, ως συνάρτηση της αποκλίνουσας παραμόρφωσης, δηλαδή η διαστολικότητα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, η επιφάνεια διαρροής διαχωρίζεται από την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού και δίνεται από τη σχέση:

$$f = (q - p\beta)^2 - (N^2 - \beta^2) p (p_0 - p) = 0 \quad (2.6)$$

όπου οι μεταβλητές  $p_0$ ,  $\beta$  και  $N$  (σταθερά του προσομοιώματος) αντικαθιστούν τις αντίστοιχες μεταβλητές  $p_a$ ,  $\alpha$  και  $M$  της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού (σχέση 2.4).

Συγκεκριμένα, η μεταβλητή  $p_0$  εισάγει την ισοτροπική κράτυνση της επιφάνειας διαρροής, ενώ η αδιάστατη μεταβλητή  $\beta$  είναι η μεταβλητή κινηματικής κράτυνσης που εισάγει την ανισοτροπία στην επιφάνεια διαρροής, όπως ακριβώς κάνει η μεταβλητή  $\alpha$  στην επιφάνεια πλαστικού δυναμικού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη αποκλίνουσα τάση  $q$  στην επιφάνεια  $f = 0$  δεν παρατηρείται πάνω στη γραμμή  $\eta=M$  αλλά πάνω στη γραμμή  $\eta=N$ . Αυτή ακριβώς είναι και η ιδιότητα που επιτρέπει την προσομοίωση χαλάρωσης κατά την αστράγγιστη θλίψη που ακολουθεί μονοδιάστατη στερεοποίηση  $K_0$ , - όπου  $K_0$  ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης - και ο σημαντικότερος λόγος που καθιστά αναγκαία την εισαγωγή μιας επιφάνειας διαρροής διαφορετικής της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού.

Στο υπόλοιπο της παρούσας παραγράφου παρουσιάζονται οι εξισώσεις μεταβολής των παραμέτρων κράτυνσης  $p_0$ ,  $\beta$  και  $\alpha$  του προσομοιώματος.

Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός μεταβολής του  $p_0$  δίνεται από τη σχέση που υιοθετείται αυτούσια από το MCC :

$$\dot{p}_0 = \langle L \rangle \bar{p}_0 = \langle L \rangle \left( \frac{1 + e_{in}}{\lambda - \kappa} \right) p_0 \left( \frac{\partial g}{\partial p} \right) \quad (2.7)$$

όπου  $e_{in}$  η αρχική τιμή του δείκτη πόρων,

$\kappa$  και  $\lambda$  (σταθερές του προσομοιώματος) οι κλίσεις της φόρτισης και αποφόρτισης-επαναφόρτισης σε ισοτροπική στερεοποίηση στο χώρο των  $e - \ln p$ , (βλέπε σχέση 2.3) ενώ

ο λόγος  $\partial g / \partial p$  εισάγει στη σχέση 2.7 το ρυθμό μεταβολής της ογκομετρικής πλαστικής παραμόρφωσης  $\dot{\epsilon}_v^p$  (βλέπε σχέση 2.3).

Στη συνέχεια, ο ρυθμός μεταβολής της μεταβλητής  $\alpha$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{\alpha} = \langle L \rangle \bar{\alpha} = \langle L \rangle \left( \frac{1 + e_{ini}}{\lambda - \kappa} \right) C \left( \frac{p}{p_o} \right)^z \left| \frac{\partial g}{\partial p} \right|^{n-x} (\alpha^b - \alpha) \quad (2.8)$$

$$n/x > \alpha \Rightarrow \alpha^b = M_c ; n/x < \alpha \Rightarrow \alpha^b = -M_e$$

όπου  $C$  είναι μία σταθερά του προσομοιώματος.

Η μελέτη της εξέλιξης της μεταβλητής  $\alpha$  ικανοποιεί *τρεις βασικές απαιτήσεις*, που είναι και οι βασικοί λόγοι για τη μορφή που δόθηκε στην ανωτέρω σχέση. Πιο συγκεκριμένα:

- Αρχικώς, υποβάλλοντας φόρτιση υπό σταθερό λόγο τάσεων  $\eta$ , θα πρέπει και η στροφή της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού που ορίζεται από τη μεταβλητή  $\alpha$  να παύει να εξελίσσεται μετά την πάροδο ικανής φόρτισης, και αυτή η τελική τιμή ορίζεται ως  $\eta/x$ , όπου  $x$  μία σταθερά του προσομοιώματος SANICLAY. Η απαίτηση αυτή οδηγεί σε επιτυχή προσομοίωση της  $K_o$ -φόρτισης (μονοδιάστατη στερεοποίηση), και καθορίζει μαζί με την σταθερά  $N$  το μη-συσχετισμένο νόμο ροής του προσομοιώματος.
- Δεύτερον, από την εξίσωση που περιγράφει την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού,  $g=0$ , προκύπτει η απαίτηση ότι  $|\alpha| < M$  ώστε οι τιμές των  $p$  και  $q$  να είναι πραγματικές και η επιφάνεια  $g=0$  να μην εκφυλίζεται στην ευθεία  $q=\alpha p$ . Για την ισχύ της ανίσωσης αυτής χρησιμοποιούνται οι οριακές τιμές  $\alpha^h = M = M_c$  για τη θλίψη και  $\alpha^b = -M = -M_e$  για τον εφελκυσμό.
- Η τρίτη απαίτηση είναι η παύση μεταβολής μεταβλητών κράτυνσης  $p_o$ ,  $\alpha$  και  $\beta$ , όταν  $\partial g / \partial p = 0$ , ώστε στην Κρίσιμη Κατάσταση να «παγώνουν» όλες οι αλλαγές εκτός από τη συσσώρευση αποκλίνουσας πλαστικής παραμόρφωσης.

Περαιτέρω, προσεκτική μελέτη της σχέσης (2.8) οδηγεί στις κάτωθι παρατηρήσεις:

- Ο λόγος  $(p/p_0)^2$  ελαχιστοποιεί το ποσοστό στροφής της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού για μεγάλους δείκτες υπερστερεοποίησης OCR, όπου  $p/p_0 \leq 1$ , χάριν ακριβέστερης προσομοίωσης.

- Ο όρος  $|\partial g / \partial p|$  υποδηλώνει την εξάρτηση στην απόλυτη τιμή του ρυθμού πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης και τη συνακόλουθη ικανοποίηση της τρίτης απαίτησης.

- Η μεταβλητή  $a$  γενικά τείνει προς την ακραίες τιμές  $a^b = M = M_e$  κατά τη θλίψη και  $a^b = -M = -M_e$  κατά τον εφελκυσμό. Όταν ο λεγόμενος «ελκυστής» (attractor) λόγος  $\eta/x$  βρίσκεται μεταξύ των οριακών  $M_e$  και  $-M_e$ , θα προσελκύσει και θα σταθεροποιήσει το  $a$  στην τιμή  $\eta/x$  πριν φτάσει στο  $a^b$ , όπως θα συνέβαινε σε φόρτιση  $K_0$ , ικανοποιώντας την πρώτη απαίτηση. Όταν όμως ο λόγος  $\eta/x$  βρίσκεται εκτός του χώρου  $M_e$  και  $-M_e$  τότε απλούστατα η μεταβλητή  $a$  θα συγκλίνει στα όρια  $M_e$  ή  $-M_e$ , χωρίς να τα υπερβεί, εξαιτίας του όρου  $(a^b - a)$ , ικανοποιώντας και τη δεύτερη προαναφερθείσα απαίτηση.

Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό, η εξίσωση του ρυθμού μεταβολής της μεταβλητής  $\beta$  πρέπει να ικανοποιεί *τρεις αντίστοιχες βασικές απαιτήσεις*.

- Η πρώτη απαίτηση είναι ότι ο «ελκυστής» της μεταβλητής  $\beta$  είναι ο λόγος των τάσεων  $\eta$  και όχι το  $\eta/x$ , ώστε να μην οδηγούμαστε σε κάποια ελαστική φάση αποφόρτισης που δε συμβαδίζει με τα πειραματικά αποτελέσματα.

- Ως δεύτερη απαίτηση τίθεται η ισχύς της ανίσωσης  $|\beta| < N$  ώστε οι τιμές των  $p$  και  $q$  να είναι πραγματικές και η επιφάνεια διαρροής να μην εκφυλίζεται στην ευθεία  $q=Np$ , πράγμα που σημαίνει ότι οι οριακές τιμές της μεταβλητής  $\beta$  είναι  $\beta^b = \pm N$ , εφόσον η κλίση  $N$  θεωρείται απλουστευτικά η ίδια τόσο κατά τη θλίψη όσο και κατά τον εφελκυσμό.

- Η τρίτη απαίτηση είναι ίδια με την αντίστοιχη για τη μεταβλητή  $a$ . Πρέπει να ισχύει:  $\dot{\beta}=0$  όταν  $\partial g / \partial p=0$ , ώστε να αποφευχθεί μία συνεχόμενη στρόφη και λέπτυνση της επιφάνειας διαρροής στην Κρίσιμη Κατάσταση.

Ο συνδυασμός των τριών αυτών απαιτήσεων δίνει την ακόλουθη εξίσωση:

$$\beta = \langle L \rangle \beta = \langle L \rangle \left( \frac{1 + e_{mi}}{\lambda - \kappa} \right) C \left( \frac{p}{p_o} \right)^2 \left| \frac{\partial g}{\partial p} \right| n - \beta |(\beta^b - \beta) \quad (2.9)$$

$$n > \beta \Rightarrow \beta^b = N ; n < \beta \Rightarrow \beta^b = -N$$

Ο ρόλος των δύο τελευταίων όρων της σχέσης (2.9) είναι ίδιος με αυτόν που αντιστοιχεί στους δύο τελευταίους όρους της εξίσωσης του ρυθμού μεταβολής της μεταβλητής  $\alpha$  (σχέση 2.8), δηλαδή την ικανοποίηση των πρώτων δύο απαιτήσεων.

Ο δείκτης φόρτισης  $L$  και ο συντελεστής πλαστικότητας  $K_p$  που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα SANICLAY προκύπτουν από την καταστατική εξίσωση (2.6) σε συνδυασμό με τις σχέσεις (2.7) και (2.9) και υπακούουν αντίστοιχα στις σχέσεις:

$$L = \frac{1}{K_p} \left( \frac{\partial f}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q} \right) = \frac{1}{K_p} p \left[ (N^2 - n^2) \dot{p} + 2(n - \beta) \dot{q} \right] \quad (2.10)$$

$$K_p = - \left( \frac{\partial f}{\partial p_o} \bar{p}_o + \frac{\partial f}{\partial \beta} \bar{\rho} \right) = p \left[ (N^2 - \beta^2) \bar{p}_o + 2(q - p_o \beta) \bar{\beta} \right] \quad (2.11)$$

### 2.3. Βαθμονόμηση των σταθερών του προσομοιώματος SANICLAY

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το καταστατικό προσομοίωμα SANICLAY απαιτεί τη βαθμονόμηση οχτώ (8) σταθερών, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Μόνο οι τρεις τελευταίες είναι καινούριες, σε σύγκριση με τις άλλες που χρησιμοποιούνται και για την εφαρμογή του προσομοιώματος MCC.

Γενικότερα, η βαθμονόμηση των σταθερών αυτών προϋποθέτει τη συλλογή δεδομένων από καθιερωμένες εργαστηριακές δοκιμές και συγκεκριμένα από:

- 1) Δοκιμές μονοδιάστατης ( $K_o$ ) ή προτιμότερα ισοτροπικής στερεοποίησης σε τάσεις εμφανώς μεγαλύτερες από την πίεση προστερεοποίησης με τουλάχιστον έναν κύκλο αποφόρτισης-επαναφόρτισης, χρησιμοποιώντας οιδήμετρο ή τριαξονική συσκευή (για τις σταθερές  $\kappa$  και  $\lambda$ )

- 2) Μετρήσεις πλευρικών τάσεων κατά τη διάρκεια μονοδιάστατης συμπίεσης και τάσεων διόγκωσης μεγαλύτερων από την πίεση προστερεοποίησης, με τη χρήση είτε ηλεκτρονικά ελεγχόμενης τριαξονικής συσκευής ή πλευρικού τασικού οιδήμετρου (για τις σταθερές  $x$  και  $v$ ), και
- 3) Δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης ( $CK_oUC$ ) και εφελκυσμού ( $CK_oUE$ ) σε κανονικώς  $K_o$  στερεοποιημένες αργίλους (για τις σταθερές  $M_c$ ,  $M_e$ ,  $N$  και  $C$ ).

Αναλυτικότερα, η διαδικασία βαθμονόμησης των σταθερών αυτών αναφέρεται σε πειράματα πάνω σε δοκίμια Lower Cromer Till (LCT), τα οποία είναι ταξινομημένα ως χαμηλής πλαστικότητας αμμοϊλυώδης άργιλος (CL), με όριο υδαρότητας  $w_L = 25\%$  και δείκτη πλαστιμότητας  $I_P = 13\%$ ), ένα αργιλικό έδαφος με μεγάλη περιεκτικότητα σε ασβεστίτη και ιλλίτη.

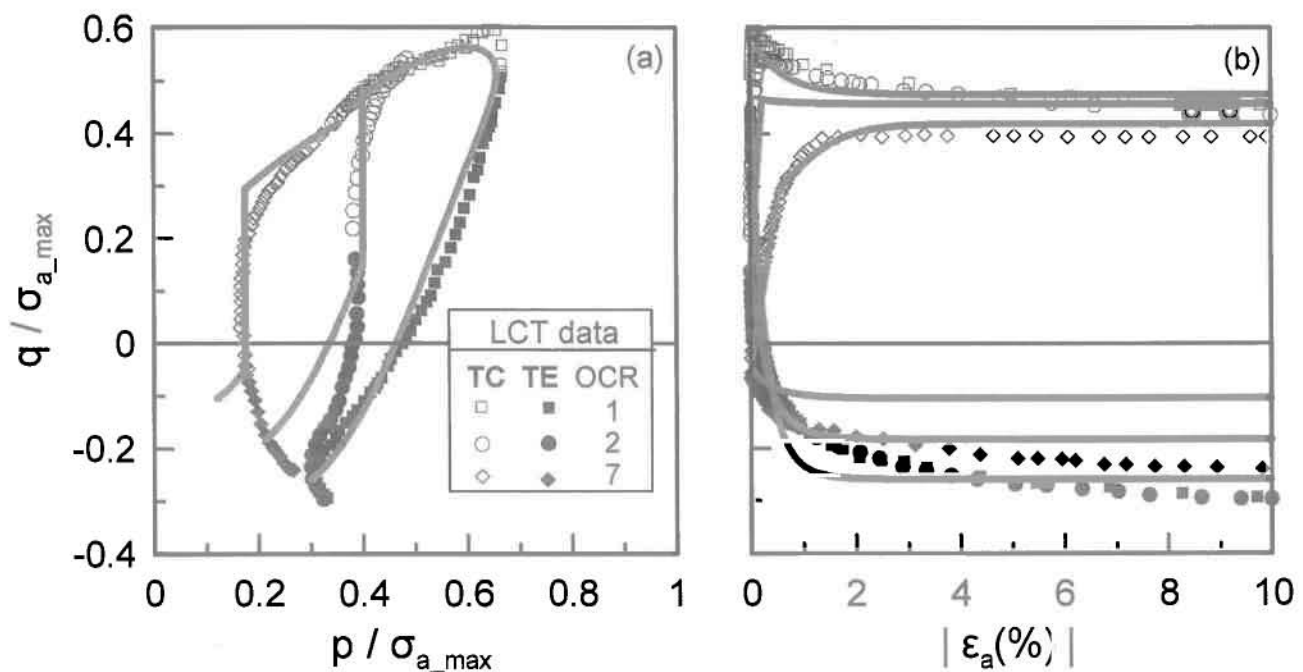
Σταθερά	Περιγραφή του ρόλου της σταθεράς	Τιμή
$M_c$	Η τιμή του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων, $\eta=q/\rho$ στην κρίσιμη κατάσταση για θλίψη	1.18
$M_e$	Η τιμή του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων, $\eta=q/\rho$ στην κρίσιμη κατάσταση για εφελκυσμό	0.86
$\lambda$	Συμπιεστότητα κανονικώς στερεοποιημένης NC αργίλου	0.063
$\kappa$	Συμπιεστότητα υπερ-στερεοποιημένης OC αργίλου	0.009
$\nu$	Ελαστικός λόγος Poisson	0.2
$N$	Σχήμα της επιφάνειας διαρροής	0.91
$x$	Όριο κορεσμού της ανισοτροπίας, για $\eta=q/p$ =σταθερό	1.56
$C$	Ρυθμός εξέλιξης της ανισοτροπίας	16

**Πίνακας 2.1. Σταθερές του μοντέλου SANICLAY και οι τιμές τους για άργιλο LCT.**



### 2.4. Απόδοση του προσομοιώματος SANICLAY

Η απόδοση (performance) του καταστατικού προσομοιώματος SANICLAY μελετήθηκε για διάφορες τασικές οδεύσεις, συνθήκες στράγγισης και τιμές υπερστερεοποίησης OCR, συγκρίνοντας τα εργαστηριακά δεδομένα για την άργιλο LCT με τις αριθμητικές προβλέψεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για τις φορτίσεις που μελετήθηκαν και στην εργασία αυτή και αφορούν τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό υπό αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες, με βάση τη δημοσίευση των Dafalias et al (2006).



Σχήμα 2.2 Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

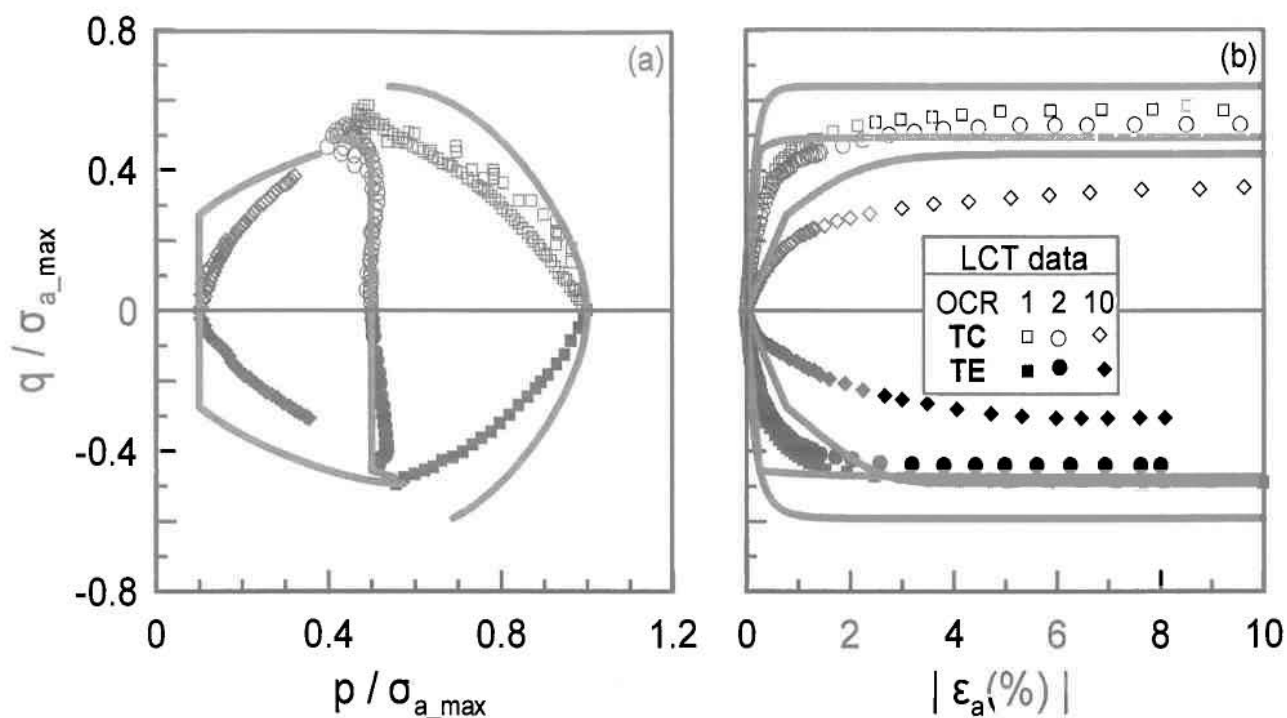
Το Σχήμα 2.2 συγκρίνει τα δεδομένα και τις προσομοιώσεις για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης ( $CK_0UC$ ) και εφελκυσμού ( $CK_0UE$ ) σε  $K_0$  στερεοποιημένα δείγματα LCT και OCR=1, 2, 4 και 7. Συγκεκριμένα, το γράφημα 2.2α κάνει τη σύγκριση σε όρους ενεργής τασικής όδευσης, ενώ το γράφημα 2.2β συγκρίνει τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τριαξονικές τάσεις  $p$  και  $q$  κανονικοποιούνται ως προς το  $\sigma_{a\_max}$ , δηλαδή τη μέγιστη αξονική (κατακόρυφη)

τάση στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης. Η ποσότητα  $|\epsilon_a\%|$  είναι η αξονική (κατακόρυφη) παραμόρφωση και εισάγεται σε απόλυτες τιμές ώστε να ενσωματώνονται στο ίδιο σχήμα τα αποτελέσματα τόσο για θλίψη όσο και για εφελκυσμό.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η καλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης συναντάται για  $OCR=1$ , καθώς είναι τα εν λόγω πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βαθμονόμησης. Για υπερστερεοποιημένες αργίλους, οι προκύπτουσες αστράγγιστες τασικές οδεύσεις διατηρούν αρχικά μία σταθερή τιμή  $p$ , η οποία αντιστοιχεί σε μια ελαστική συμπεριφορά εντός της επιφάνειας διαρροής. Αυτή η συμπεριφορά συνεχίζεται έως ότου η τάση φτάσει στην επιφάνεια διαρροής, οδηγώντας σε ελαστοπλαστική απόκριση μέχρι την κρίσιμη κατάσταση.

Αυτός είναι ο λόγος που οι προσομοιώσεις δείχνουν μία πιο «δύσκαμπτη» συμπεριφορά σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, κατά τις αρχικές φάσεις της αστράγγιστης φόρτισης και για μεγάλες τιμές  $OCR$ .

Ωστόσο, η «δύσκαμπτη» συμπεριφορά που παρατηρείται σε μεγάλα  $OCR$  αστράγγιστων δοκιμών δεν είναι τόσο έντονη στο προσομοίωμα SANICLAY εν συγκρίσει με τα αποτελέσματα άλλων «απλών» προσομοιωμάτων – ανάμεσα στα οποία και το MCC- επειδή οι επιφάνειες πλαστικού δυναμικού και διαρροής του SANICLAY έχουν κατάλληλα περιστραφεί και στρεβλωθεί.

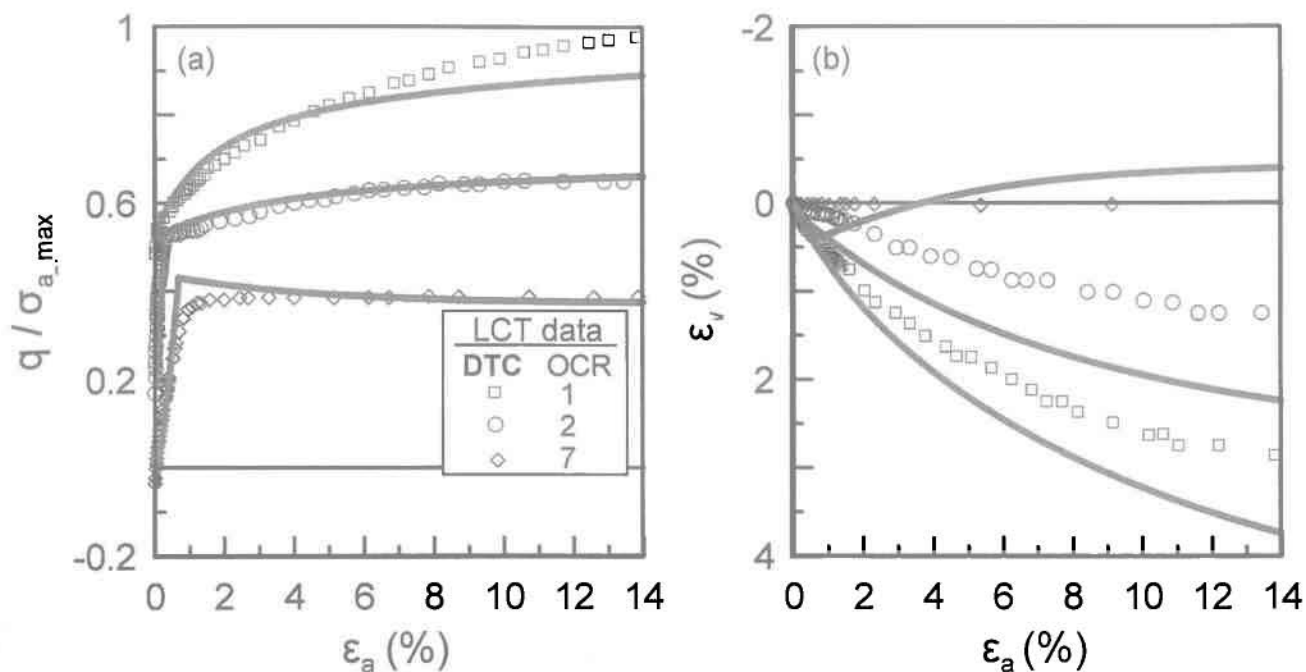


Σχήμα 2.3 Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Το Σχήμα 2.3 συγκρίνει τα δεδομένα και τις προσομοιώσεις για αστράγγιστη τριαξονική θλίψη (CIUC) και εφελκυσμό (CIUE) σε υδροστατικά (ή ισοτροπικά) στερεοποιημένα δείγματα LCT και για OCR=1, 1.5, 2, 4, 10 και 20. Η σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στο Σχήμα 2.2 .

Παρατηρείται ότι οι καλύτερες συγκρίσεις επιτυγχάνονται για μέσες τιμές OCR (=1.5 – 4.0), ενώ για  $OCR \geq 2$ , η απόκριση του SANICLAY είναι παρόμοια με αυτή που προκύπτει από το MCC προσομοίωμα καθώς η προηγούμενη φάση ισοτροπικής στερεοποίησης δεν έχει προλάβει να στρέψει τις επιφάνειες του μοντέλου ( $\alpha=\beta=0$ ) όπως συμβαίνει μετά την  $K_0$  φόρτιση.

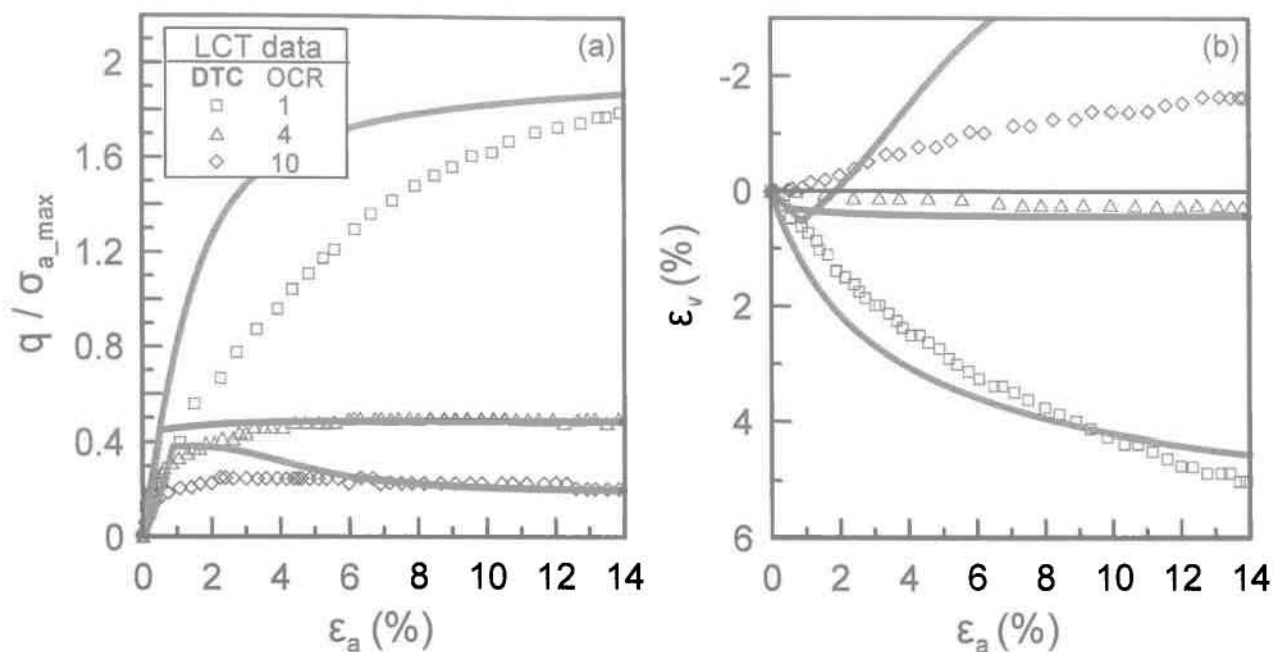
Συμπερασματικά, οι επιδράσεις της ιστορίας στερεοποίησης και της ανισοτροπίας που εισάγεται μέσω του SANICLAY είναι εμφανείς για αστράγγιστη διάτμηση. Οι διαφορές είναι μάλιστα μεγαλύτερες για OCR=1, σε σύγκριση με τα OC δείγματα.



Σχήμα 2.4 Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

Το Σχήμα 2.4 συγκρίνει δεδομένα και προσομοιώσεις για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης ( $CK_0DC$ ) σε  $K_0$  -στερεοποιημένα δείγματα LCT και OCR=1, 1.5, 2, 4 και 7. Πιο συγκεκριμένα, το γράφημα 11α κάνει τη σύγκριση σε όρους διατμητικών τάσεων - διατμητικών παραμορφώσεων, ενώ το 11β συγκρίνει ογκομετρικές με αξονικές διατμητικές παραμορφώσεις.

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η απόκριση διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης προσομοιώνεται καλύτερα από την ογκομετρική παραμόρφωση, για όλες τις τιμές των OCR. Ειδικότερα, το μοντέλο SANICLAY προσομοιώνει επιτυχώς την απόκριση  $q/\sigma_{a\_max} - \epsilon_a$ , με εξαίρεση τη χαλάρωση που προσομοιώνεται για OCR=7, αλλά δεν προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα.



**Σχήμα 2.5** Σύγκριση προβλέψεων και μετρήσεων για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Το Σχήμα 2.5 συγκρίνει τα δεδομένα και τις προσομοιώσεις για στραγγιζόμενη τριαξονική θλίψη (CIDC) σε υδροστατικά (ή ισοτροπικά) στερεοποιημένα δείγματα LCT και για  $OCR=1, 1.25, 1.5, 2, 4, 10$ . Η σύγκριση γίνεται όπως και στο Σχήμα 2.4 .

Παρατηρείται ότι η ογκομετρική παραμόρφωση προσομοιώνεται με αρκετή ακρίβεια, ειδικά για  $OCR=1 - 4$ . Όσον αφορά στην απόκριση διατμητικής τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, ένα γενικό σχόλιο είναι πως το προσομοίωμα SANICLAY προβλέπει μία περισσότερο «δύσκαμπτη» συμπεριφορά για όλες τις τιμές OCR, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης το σημείο της τάσης παραμένει μέσα στις ελλειπτικές επιφάνειες του προσομοιώματος που είναι ευθυγραμμισμένες με τον άξονα  $p$  ( $\alpha=\beta=0$ ), με αποτέλεσμα η απόκριση του προσομοιώματος να θυμίζει αυτή του MCC, ειδικά για  $OCR \geq 2$ .

Όπως προκύπτει από τα Σχήματα 2.4 και 2.5, οι επιδράσεις της ιστορίας στερεοποίησης και της ανισοτροπίας που εισάγεται μέσω του SANICLAY είναι εμφανείς και για αστράγγιστη διάτμηση. Οι διαφορές είναι μεγαλύτερες για  $OCR=1$ , σε σύγκριση με τα OC δείγματα.

## 2.5 Προτερήματα και μειονεκτήματα του προσομοιώματος SANICLAY

Με βάση όλα όσα παρουσιάσθηκαν στο Κεφάλαιο 2, προκύπτει ότι το SANICLAY είναι ένα σχετικά απλό προσομοίωμα ανισοτροπικής πλαστικότητας, καθώς ως σταθερές έχει τις πέντε (5) του MCC, και μόνον τρεις (3) επιπλέον, τις :  $x$ ,  $C$ ,  $N$ . Άλλωστε, το προσομοίωμα SANICLAY μεταπίπτει στο προσομοίωμα MCC, απλά θέτοντας  $x=1$ ,  $N=M$  και  $C=0$ .

Σε ό,τι αφορά στην απόδοσή του, επισημαίνεται η εν γένει ακριβής πρόβλεψη ειδικά για μικρές τιμές OCR (πολύ καλύτερη εκείνης του MCC), ενώ για μεγάλες τιμές OCR η απόκρισή του ομοιάζει εκείνης του MCC και οδηγεί, εν γένει, σε πιο δύσκαμπτη συμπεριφορά από εκείνη που υποδεικνύουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ειδικότερα, ως σημαντικότερα μειονεκτήματα εντοπίζονται:

- η υποεκτίμηση του  $q_{max}$  σε δοκιμές  $CK_{0UC}$  και  $OCR=1$ , και η ταυτόχρονη υπερεκτίμησή του στις αντίστοιχες δοκιμές  $CIUC$ .
- η σαφώς «δύσκαμπτη» συμπεριφορά σε μεγάλες τιμές OCR, ειδικά στις δοκιμές  $CIUC$ ,  $CIUE$ ,  $CIDC$ , δηλαδή σε δοκιμές διάτμησης μετά από ισοτροπική στερεοποίηση.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνονται προσπάθειες βελτίωσής του, με στόχο να μη χαθεί, κατά το δυνατόν, η απλότητα των καταστατικών σχέσεων και ο μικρός αριθμός σταθερών, που είναι τα βασικά προτερήματα του SANICLAY.

## Κεφάλαιο 3: Διερεύνηση του Νόμου Ροής

### 3.1: Εισαγωγή

Τα προβλήματα που εμφανίζει το καταστατικό προσομοίωμα SANICLAY, όπως παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2, υπογραμμίζουν την ανάγκη διερεύνησης και υπόδειξης τρόπων βελτίωσής του.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια να καταλήξουμε σε ακριβέστερες προβλέψεις χωρίς αλλαγή στις επιφάνειες ή στο πλήθος των παραμέτρων κράτυνσης  $p_0$ ,  $\alpha$  και  $\beta$ , εναλλακτικές που θα οδηγούσαν σε αύξηση της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος. Έτσι, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις νέες σταθερές που εισήχθησαν στο προσομοίωμα SANICLAY (σε σχέση με το MCC), που είναι οι  $C$ ,  $N$  και  $\chi$ , όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, και η διαφοροποίηση των οποίων ενδέχεται να οδηγήσει σε καλύτερες προβλέψεις.

Εκ των νέων σταθερών, η  $C$  ρυθμίζει το ρυθμό περιστροφής των επιφανειών του προσομοιώματος, και ως εκ τούτου μεταβολή της τιμής της επιφέρει μόνο ποσοτικές και όχι ποιοτικές διαφοροποιήσεις στις προβλέψεις (βλέπε και Dafalias et al 2006). Επιπλέον, όπως περιγράφεται και σε επόμενο κεφάλαιο, οι ποσοτικές διαφοροποιήσεις αυτές είναι άξιες λόγου, μόνο όταν οι επιφάνειες «προλαβαίνουν» να περιστραφούν, δηλαδή πρακτικώς μόνο για τις δοκιμές διάτμησης που εκτελούνται μετά από ιστροπική στερεοποίηση. Συνεπώς, η σταθερά αυτή δεν προσφέρεται για απαλοιφή των μειονεκτημάτων του SANICLAY, και δε διερευνάται ιδιαίτερος περαιτέρω.

Στη συνέχεια, η έμφαση δίδεται στο μη συσχετισμένο νόμο ροής που εισάγεται μέσω των σταθερών  $N$  και  $\chi$ . Πιο συγκεκριμένα, η σταθερά  $N$  διαφοροποιεί την τιμή του λόγου αποκλίνουσας τάσης  $\eta$  για την οποία προκύπτει  $\partial f / \partial p = 0$  από εκείνη της κρίσιμης κατάστασης (όπου  $\eta = M$ ). Με άλλα λόγια, η τιμή του  $N$  είναι διαφορετική της τιμής της σταθεράς  $M$ , δίνοντας τη δυνατότητα για προσομοίωση συμπεριφοράς χαλάρωσης. Χάριν απλότητας στο SANICLAY θεωρείται ότι  $N = N_c = N_e$ . Η εισαγωγή μιας επιπλέον σταθεράς  $N_c \neq N_e$  θα οδηγούσε σε ποσοτικά καλύτερες προβλέψεις, μεταξύ εφελκυσμού και θλίψης, αλλά θα αύξανε την πολυπλοκότητα στον πολύ-αξονικό χώρο των τάσεων (multiaxial stress space) καθώς θα έπρεπε να εισαχθεί συσχέτιση και με την γωνία Lode, μια συσχέτιση που κάνει ιδιαίτερα πολύπλοκη τη

συνθήκη συμβατότητας  $df=0$ , με βάση την οποία εκτιμάται ο δείκτης φόρτισης  $L$  (σχέση 2.9 για τριαξονικό χώρο τάσεων). Η πολυπλοκότητα θα αυξανόταν περαιτέρω αν η σταθερά  $N$  γινόταν μεταβλητή ή θεωρούνταν παράμετρος κράτυνσης, καθώς τότε θα χρειαζόταν να ορισθεί σχέση μεταβολής της (σχέση  $\bar{N}$ , αντίστοιχα με τις σχέσεις για  $\bar{p}_o$ ,  $\bar{\beta}$ ), αλλά και να αλλαχθεί η σχέση υπολογισμού του πλαστικού μέτρου κράτυνσης  $K_p$  (σχέση 2.10 για τριαξονικό χώρο). Ενδεικτικά δίνεται εδώ, ο ρυθμός μεταβολής της  $f$  ως προς την παράμετρο  $N$  που θα έπρεπε να εισαχθεί στη σχέση 2.10, πέραν της σχέσης  $\bar{N}$ ):

$$\frac{\partial f}{\partial N} = -2Np(p_o - p) \quad (3.1)$$

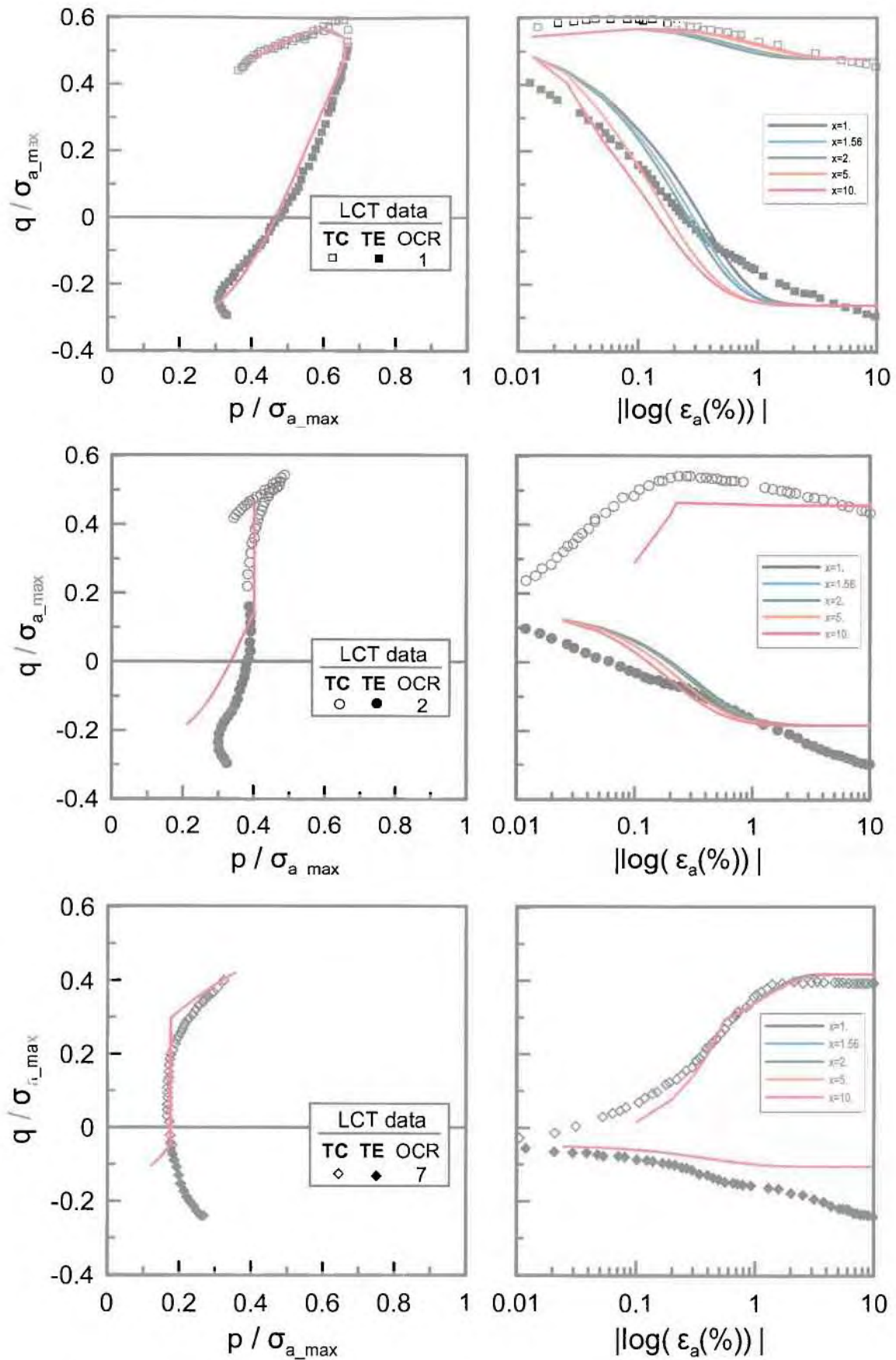
Επομένως, σε αυτό το κεφάλαιο ερευνάται η αλλαγή της συμπεριφοράς διάτμησης που προκαλεί η σταθερά  $x$ , η οποία εισέρχεται αποκλειστικά στη σχέση κράτυνσης της μεταβλητής  $a$  της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού (σχέση 2.8), και πιθανή μεταβολή αυτής δεν διαφοροποιεί καμία άλλη καταστατική σχέση. Σημειώνεται, ότι στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, οι τιμές των παραμέτρων όλων των υπολοίπων σταθερών του καταστατικού προσομοιώματος SANICLAY είναι ίδιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.

### 3.2: Αλλαγή της συμπεριφοράς διάτμησης ως συνάρτηση της σταθεράς $x$

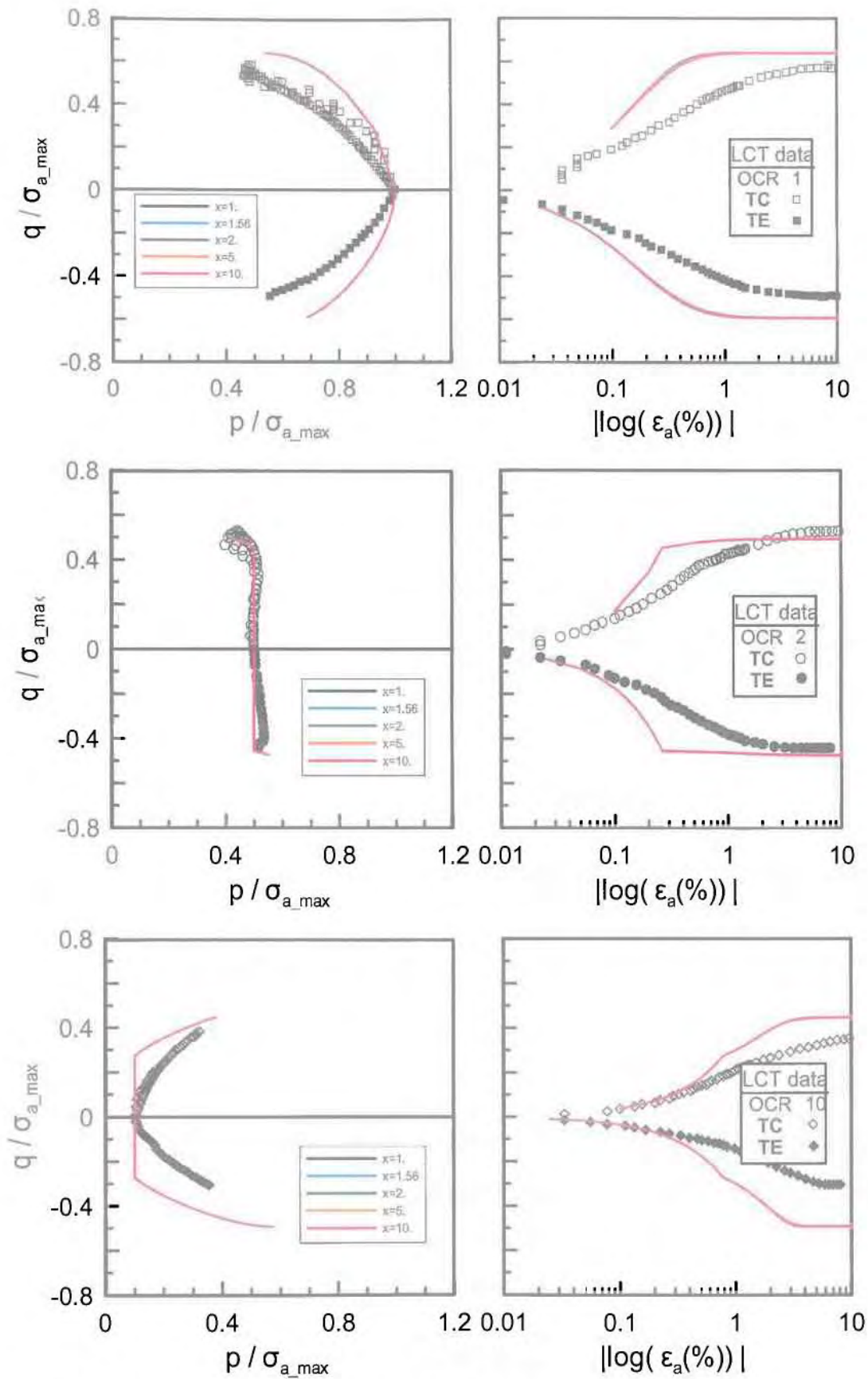
Όπως προαναφέρεται, η σταθερά  $x$  στη σχέση (2.8) διαφοροποιεί τον υποβόσκοντα λόγο τάσεων  $a$  της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού από τον αντίστοιχο λόγο  $\beta$  της επιφάνειας διαρροής. Συνεπώς, για φόρτιση που ξεκινά από  $p=q=0$  μια αλλαγή της σταθεράς  $x$  θα επηρέαζε και την μονοδιάστατη ( $K_o$ -) στερεοποίηση, γεγονός που θα οδηγούσε σε διαφορετικές αρχικές συνθήκες στο τέλος της στερεοποίησης ή στην αρχή της διάτμησης, και σε μη συγκρίσιμες φορτίσεις διάτμησης στη συνέχεια. Συνεπώς, στις προβλέψεις διάτμησης που παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν, οι αρχικές συνθήκες στο τέλος της στερεοποίησης ή στην αρχή της διάτμησης είναι ίδιες, και είναι εκείνες που έχουν προκύψει θεωρώντας  $x=1.56$ , στις προβλέψεις για τις δοκιμές διάτμησης των Σχημάτων 2.2, 2.3, 2.4 και 2.5 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.



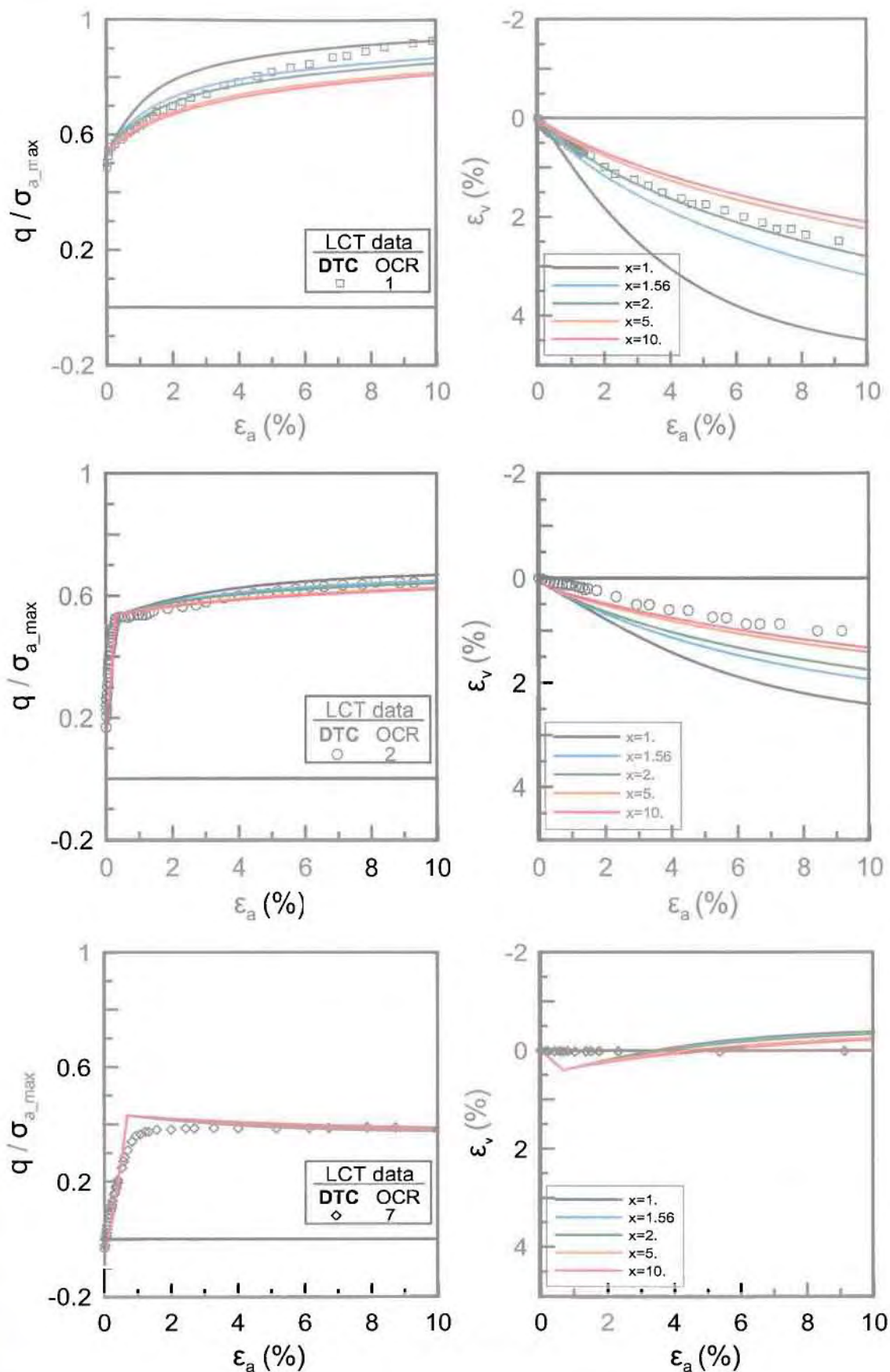
Συνεπώς, στην παράγραφο αυτή επαναλαμβάνονται οι προβλέψεις διάτμησης που παρουσιάσθηκαν στο Κεφάλαιο 2, για  $x=1, 1.56, 2, 5$  και  $10$ . Πιο συγκεκριμένα στα Σχήματα 3.1 & 3.2 παρουσιάζονται οι προβλέψεις για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση) και ισοτροπική στερεοποίηση, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, στα Σχήματα 3.3 & 3.4 παρουσιάζονται οι προβλέψεις για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση) και ισοτροπική στερεοποίηση, αντίστοιχα.



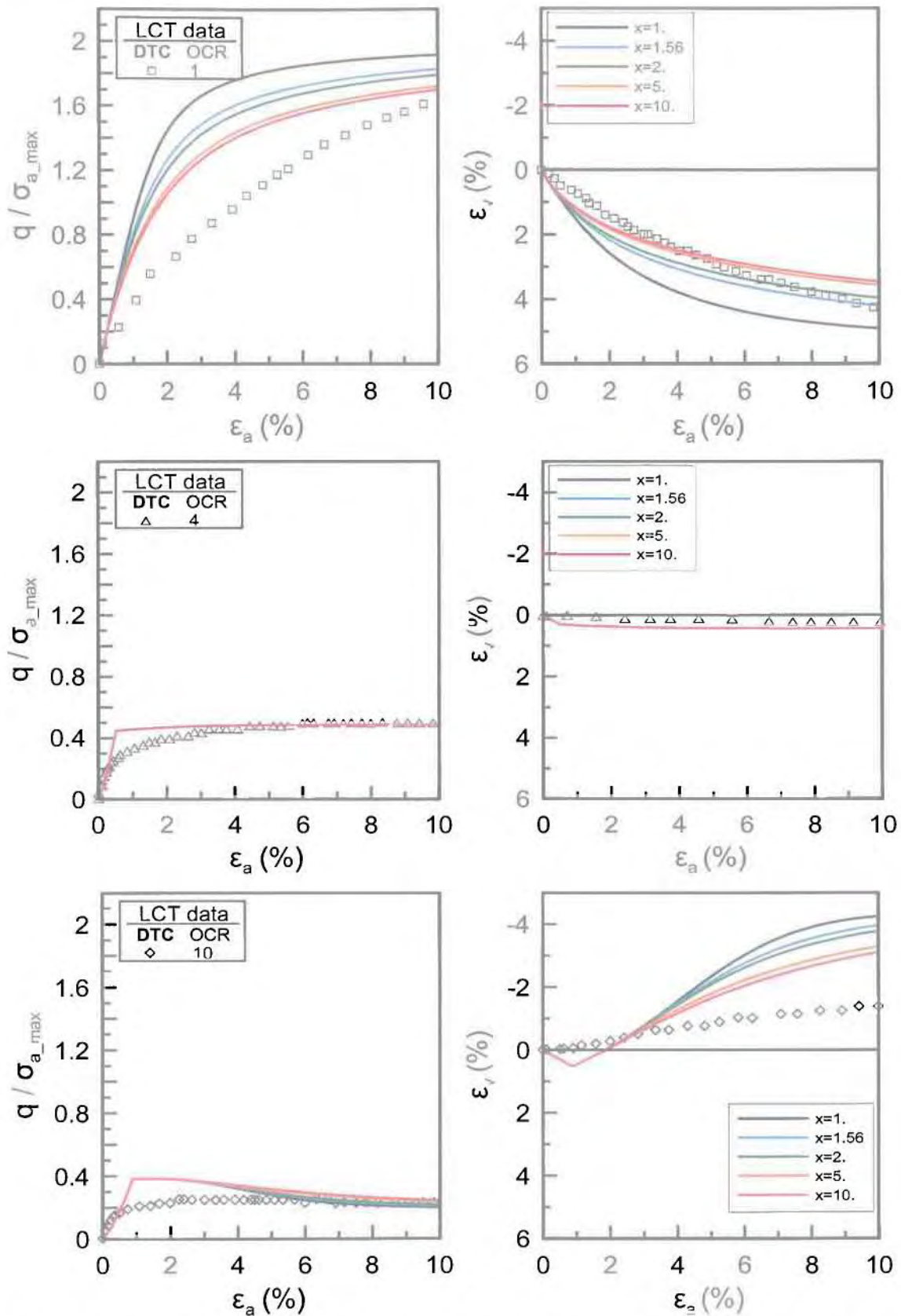
Σχήμα 3.1. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων με παράμετρο  $x$  για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 3.2. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων με παράμετρο  $x$  για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήματα 3.3. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων με παράμετρο  $x$  για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 3.4. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων με παράμετρο  $x$  για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Από τα Σχήματα 3.1 έως 3.4 γίνεται αντιληπτό ότι η αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου  $x$  επηρεάζει σαφώς εντονότερα τις στραγγιζόμενες δοκιμές διάτμησης (Σχήματα 3.3 και 3.4). Παρόλα αυτά διαφαίνεται ότι τιμές της σταθεράς  $x$  μεγαλύτερες τις τιμής  $x_0 = 1.56$  που δίνει ορθή εκτίμηση της  $K_0$  στερεοποίησης, δίνουν ορθότερες προβλέψεις των δοκιμών στραγγιζόμενης διάτμησης. Συνεπώς, μια διαφοροποίηση της τιμής του  $x$ , κατά τη διάρκεια της φόρτισης πιθανώς να οδηγούσε σε ορθότερες προβλέψεις, πιθανότητα που διερευνάται στην επόμενη παράγραφο.

### 3.3. Αλλαγή της συμπεριφοράς διάτμησης ως συνάρτηση μεταβλητής τιμής $x$

Με βάση όσα αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, εδώ διερευνάται η αλλαγή στην προβλεπόμενη συμπεριφορά διάτμησης, αν θεωρηθεί ότι η σταθερά  $x$  είναι μεταβλητή συνάρτηση του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων,  $\eta=q/p$ , δηλαδή η τιμή της μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με την πορεία της τασικής όδευσης.

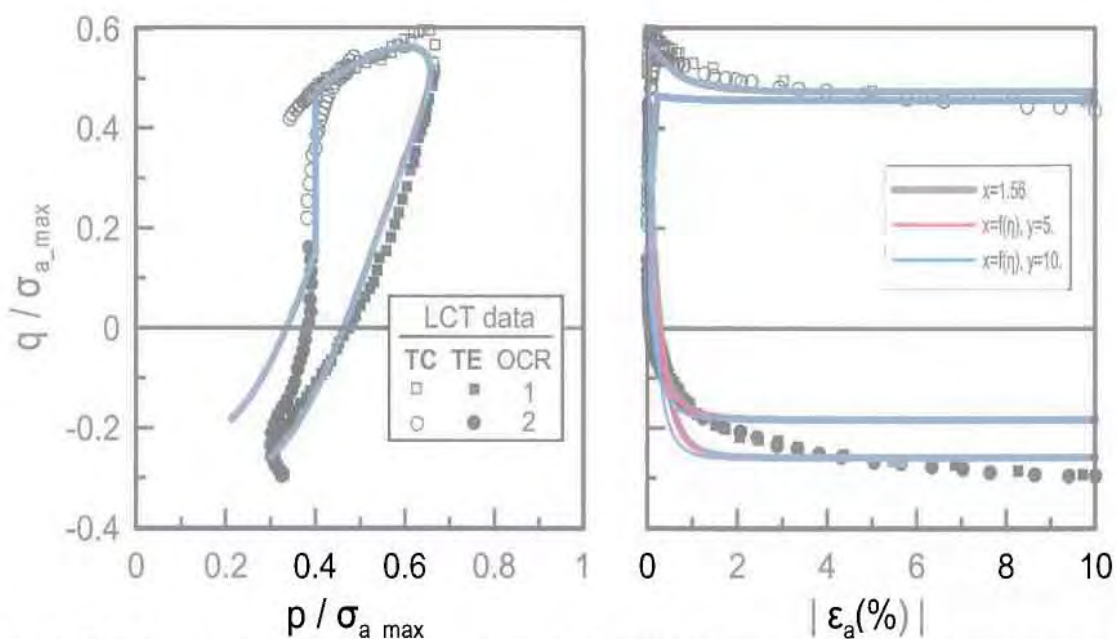
Το σκεπτικό που ακολουθήθηκε στον καθορισμό της συνάρτησης  $x(\eta)$  λαμβάνοντας υπ' όψιν τα Σχήματα 3.1 – 3.4 περιγράφεται παρακάτω:

Σύμφωνα με το καταστατικό προσομοίωμα SANICLAY, στο τέλος της  $K_0$ -στερεοποίησης ο δείκτης (ουδέτερης) ώθησης  $K_0$  παίρνει την τιμή  $K_0=0.49$  για την άργιλο LCT, και ο αποκλίνων λόγος τάσεων έχει τιμή  $\eta=\eta_{K_0}=3(1-K_0)/(1+2K_0)=0.77$ , ενώ η παράμετρος  $x$  είναι  $x=x_0=1.56$ . Αυτή η τιμή του  $x$  θα πρέπει να επιτυγχάνεται για  $\eta=\eta_{K_0}$  ώστε να διατηρείται ορθή η πρόβλεψη της μονοδιάστατης στερεοποίησης. Περαιτέρω, από τις προβλέψεις της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει ότι τιμές του  $x > 1.56$  είναι μάλλον προτιμότερες, ειδικά για δοκιμές διάτμησης που ξεκινούν από ισοτροπική συμπίεση ( $\eta=0$ ). Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις ίδιες προβλέψεις, τιμές  $x \geq 5x_0$  δίνουν πρακτικώς τη βέλτιστη συμπεριφορά σε διάτμηση. Από την άλλη, η ελάχιστη τιμή του  $x$  είναι  $x=1$ , γιατί σε αντίθετη περίπτωση η τιμή του  $\beta$  θα ήταν μεγαλύτερη του  $\alpha$  στο τέλος της στερεοποίησης, γεγονός που δημιουργεί μη φυσική συμπεριφορά.

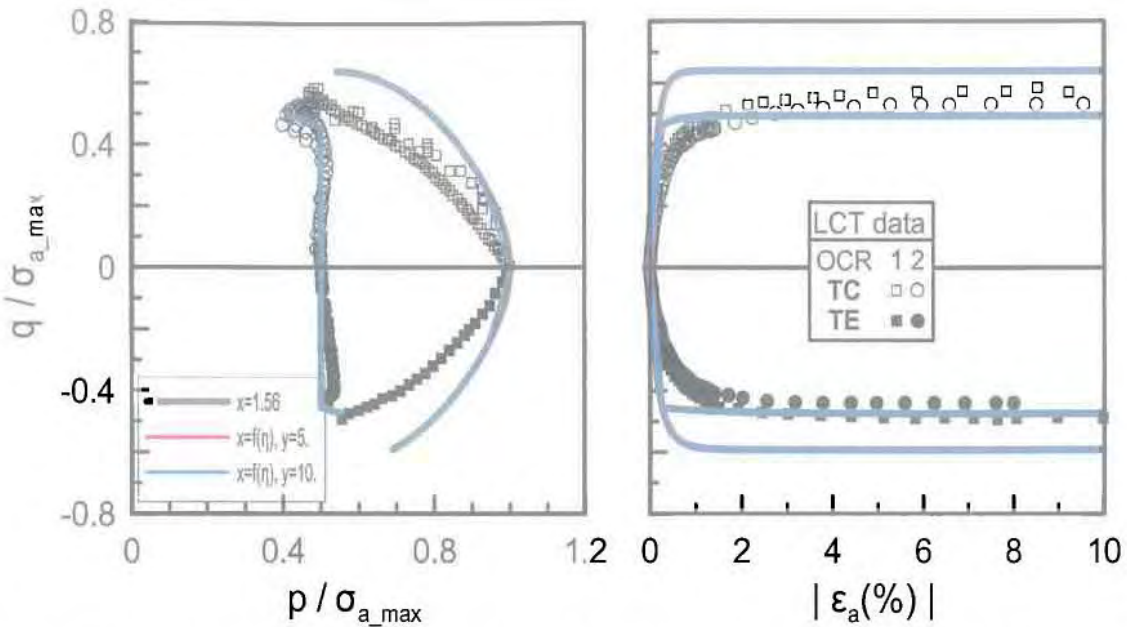
Έτσι, η υιοθέτηση μιας γραμμικής σχέσης  $x(\eta)$  που συμφωνεί με τις ως άνω απαιτήσεις κρίνεται επαρκώς απλή και ίσως προσδώσει καλύτερες προβλέψεις, χωρίς καμία άλλη αλλαγή στο προσομοίωμα SANICLAY. Η υιοθετούμενη σχέση προς διερεύνηση δίνεται παρακάτω:

$$x = x_0 \left( y - (y-1) \left| \frac{\eta}{\eta_{K_0}} \right| \right) > 1 \quad , \quad \text{για } y > 1 \quad (3.2)$$

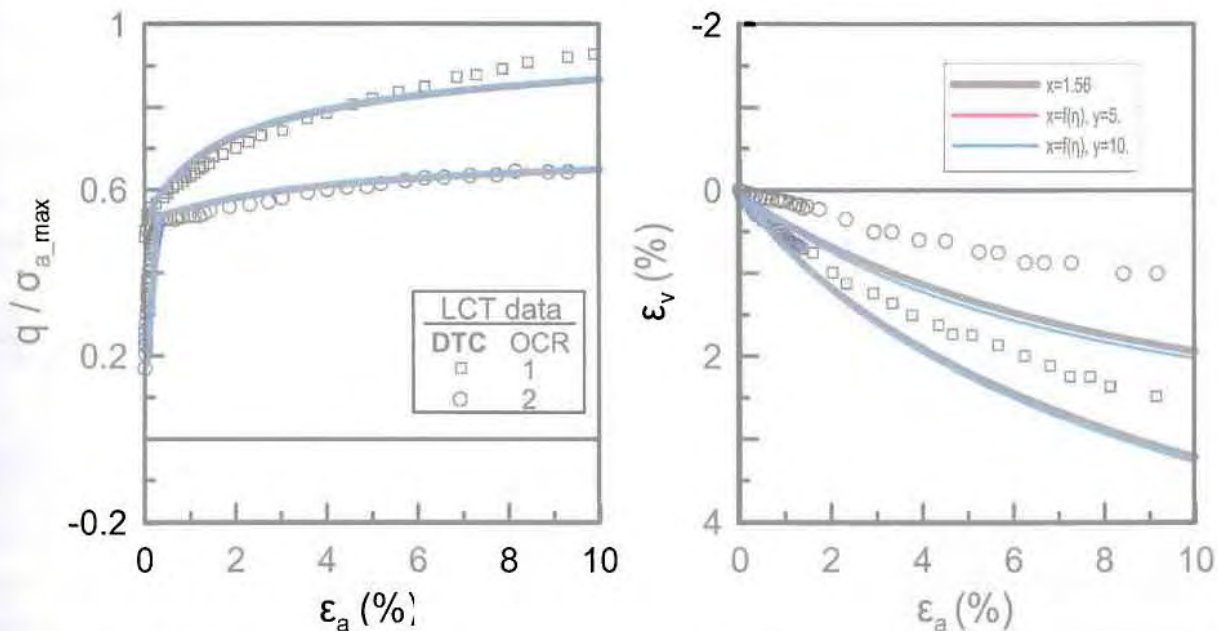
Στα Σχήματα 3.5 έως 3.8 συγκρίνονται οι προβλέψεις του SANICLAY για τις γνωστές δοκιμές της αργίλου LCT με νέες προβλέψεις με μεταβλητή τιμή του  $x$  και  $y=5$  και  $10$ , σύμφωνα με τη σχέση 3.2. Όπως προκύπτει δεν υπάρχει ουσιώδης διαφοροποίηση στις προβλέψεις, και ο λόγος είναι ότι η απλή γραμμική μεταβολή (ειδικά για  $y=5$ ) δεν προλαβαίνει να αποδώσει τη διαφοροποίηση της απόκρισης που παρατηρήθηκε στα Σχήματα 3.1 έως 3.4, καθώς το  $\eta$  αλλάζει επαρκώς γρήγορα. Συνεπώς, μια σχέση της μορφής (3.2) δεν θεωρείται επαρκής, αλλά περαιτέρω διερεύνηση του θέματος δε θεωρήθηκε πρακτικώς χρήσιμη, καθώς στα επόμενα Κεφάλαια εισάγονται πιο δραστικές επεμβάσεις στο προσομοίωμα αναφοράς.



Σχήμα 3.5 Σύγκριση δεδομένων και αναλύσεων για  $x=f(\eta)$ , για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

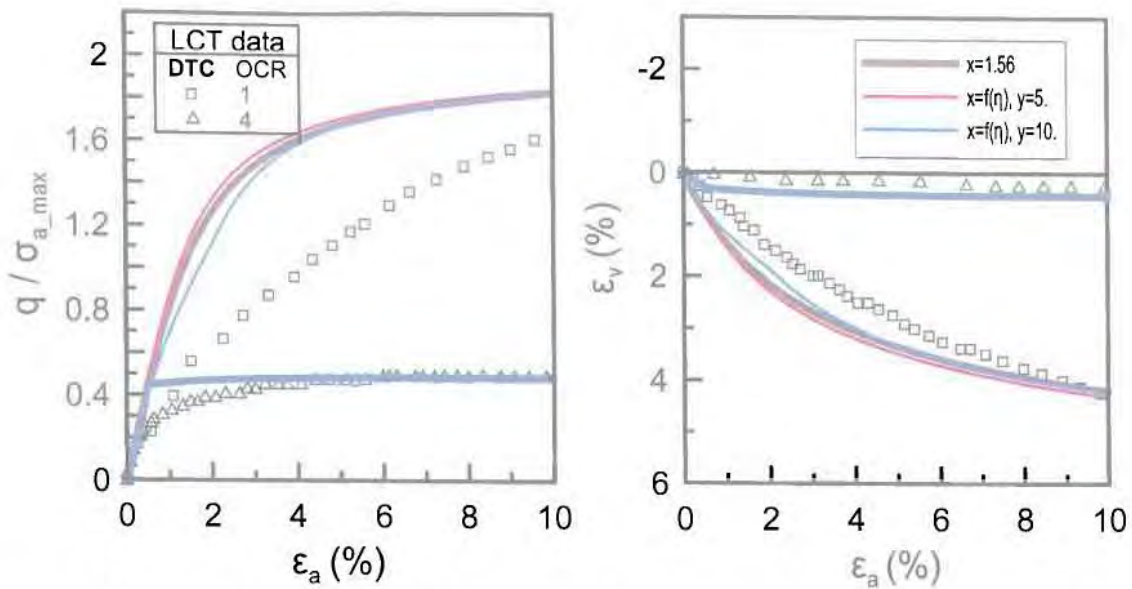


Σχήμα 3.6 Σύγκριση δεδομένων και αναλύσεων για  $x=f(\eta)$ , για την άργιλο LCT για δοκιμές αστραγγιστής τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 3.7 Σύγκριση δεδομένων και αναλύσεων για  $x=f(\eta)$ , για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).





Σχήμα 3.8 Σύγκριση δεδομένων και αναλύσεων για  $x=f(\eta)$ , για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

### 3.4. Συμπέρασμα

Οι προβλέψεις του SANICLAY για δοκιμές διάτμησης που προέκυψαν με μετατροπή της σταθεράς  $x$  σε γραμμική συνάρτηση του λόγου αποκλίνουσας τάσης  $\eta$  δε διαφοροποιούνται ιδιαίτερα από εκείνες για  $x=1.56$ , την τιμή που δίνει σωστή πρόβλεψη της τιμής του λόγου ουδετέρων ωθήσεων  $K_0$  στη στερεοποίηση που προηγείται της διάτμησης. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μεταβλητής  $x$  (αλλά με διατήρηση της τιμής  $x=x_0=1.56$  για  $\eta=\eta_{k_0}$  ώστε να μην απολεσθεί η ορθή πρόβλεψη του  $K_0$ ) δε βοηθάει σημαντικά στη βελτίωση της εικόνας των προβλέψεων διάτμησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος αποκλίνουσας τάσης  $\eta$  μεταβάλλεται επαρκώς γρήγορα, με αποτέλεσμα την αντίστοιχα γρήγορη επαναφορά της τιμής της  $x$  σε τιμές πλησίον της  $x_0$ . Συνεπώς, με τέτοιου είδους παρεμβάσεις δε μπορούν να αναπαραχθούν οι βελτιωμένες προβλέψεις διάτμησης που προκύπτουν για σταθερές τιμές  $x \neq 1.56$ , και αποτέλεσαν το λόγο εισαγωγής της γραμμικής μεταβολής του  $x$ . Θα πρέπει να διευκρινισθεί, ότι χρήση διαφορετικών σταθερών τιμών  $x$  ανά είδος φόρτισης δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη, και αυτός ήταν ο λόγος διερεύνησης μιας συνεχούς σχέσης μεταβολής του  $x$ .

## Κεφάλαιο 4: Αλλαγή της μορφής της επιφάνειας διαρροής: στρεβλωμένος λημνίσκος

### 4.1: Εισαγωγή

Με βάση το Κεφάλαιο 3, η αλλαγή του νόμου ροής όπως διερευνήθηκε επηρεάζει κυρίως τις στραγγιζόμενες δοκιμές διάτμησης, και σχεδόν καθόλου τις αντίστοιχες δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες. Συνεπώς, ένας πιο καθοριστικός τρόπος πιθανής βελτίωσης του SANICLAY θα ήταν εκείνος που θα επηρέαζε τόσο τις στραγγιζόμενες, όσο και τις αστράγγιστες δοκιμές διάτμησης. Δίνοντας την έμφαση λοιπόν στις αστράγγιστες δοκιμές, είναι λογικό η μελέτη να επικεντρωθεί στη μορφή της ενεργού τασικής όδευσης. Καθώς η μορφή της ενεργού τασικής όδευσης υπό αστράγγιστες συνθήκες εξαρτάται σημαντικά από τη μορφή της επιφάνειας διαρροής, ένας τρόπος βελτίωσης της απόδοσης του προσομοιώματος αναφοράς είναι η αλλαγή στη μορφή της, χωρίς να αλλάξει κάτι περαιτέρω στα υπόλοιπα καταστατικά συστατικά του προσομοιώματος. Ως μια εύλογη επιλογή για εναλλακτική μορφή της επιφάνειας διαρροής είναι εκείνη που χρησιμοποίησαν οι Pestana & Whittle (1999) στο MIT-S1, η οποία έχει μορφή «στρεβλωμένου λημνίσκου» («distorted lemniscate»).

Σε αυτό το κεφάλαιο βασική επιδίωξη είναι η διερεύνηση του νέου προσομοιώματος που διαθέτει επιφάνεια διαρροής αυτή της μορφής του «στρεβλωμένου λημνίσκου», αλλά κατά τα άλλα διατηρεί τα χαρακτηριστικά του SANICLAY, και το κατά πόσο μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερες προβλέψεις της συμπεριφοράς της αργίλου LCT.

Το προσομοίωμα που εξετάζεται, και αναφέρεται με το όνομα «στρεβλωμένος λημνίσκος» χάριν απλότητας και συντομίας, εισάγει μια νέα επιφάνεια διαρροής η οποία υπακούει στη μαθηματική σχέση (Pestana & Whittle 1999, σε τανυστική μορφή):

$$f = (q - p\beta)^2 - \zeta^2 p^2 \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^n \right] = 0 \quad (4.1)$$

$$\zeta^2 = m^2 + \beta^2 - 2 \frac{q}{p} \beta$$

όπου  $n$ ,  $m$  οι νέες σταθερές του προσομοιώματος, που αντικαθιστούν τη σταθερά  $N$  του SANICLAY.

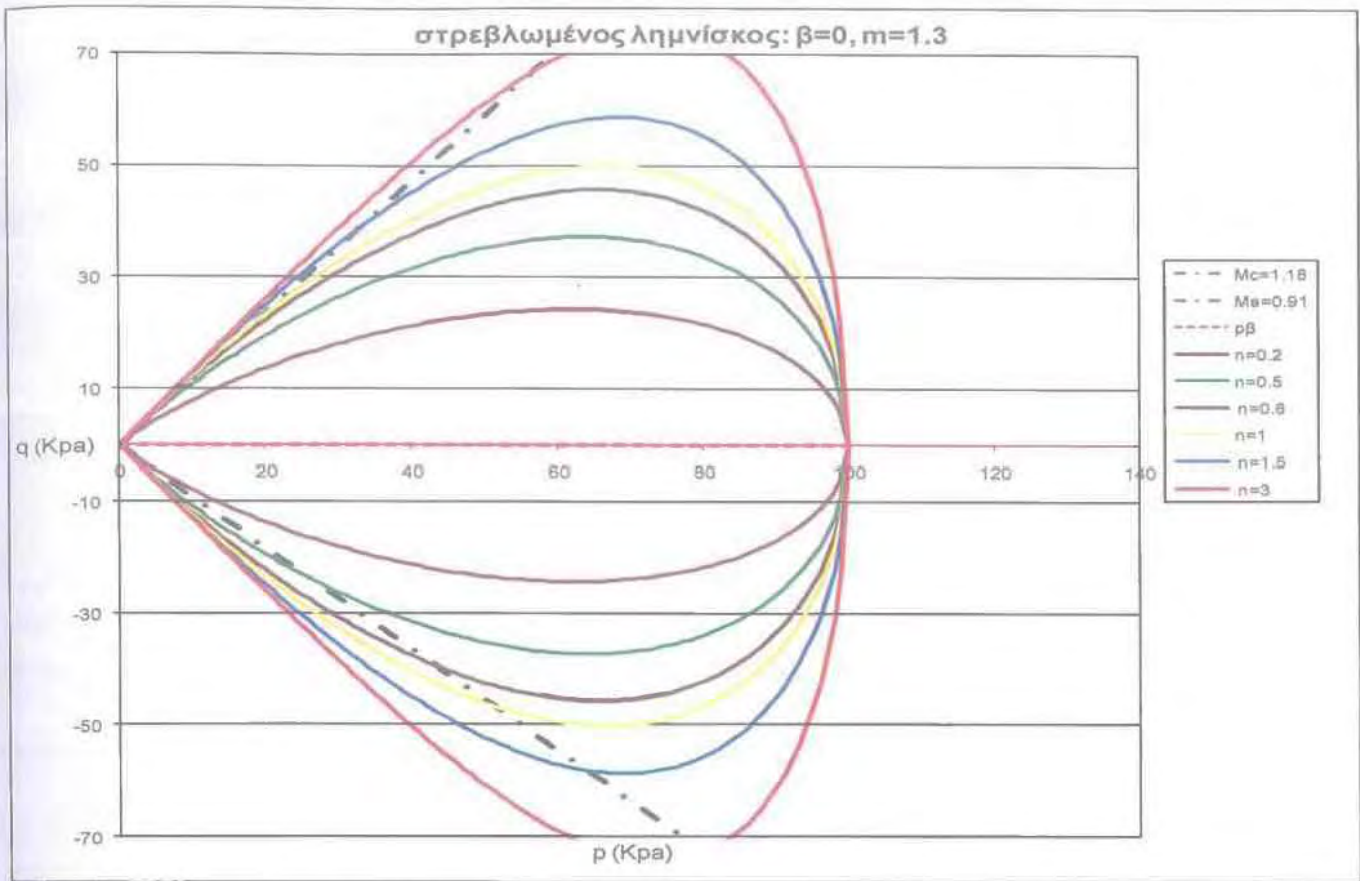
Λύνοντας τη σχέση (4.1) ως προς  $q$  προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$q = p\beta\left(\frac{p}{p_o}\right)^n \pm p\sqrt{\left(1-\left(\frac{p}{p_o}\right)^n\right)\left(m^2 - \beta^2\left(\frac{p}{p_o}\right)^n\right)} \quad (4.2)$$

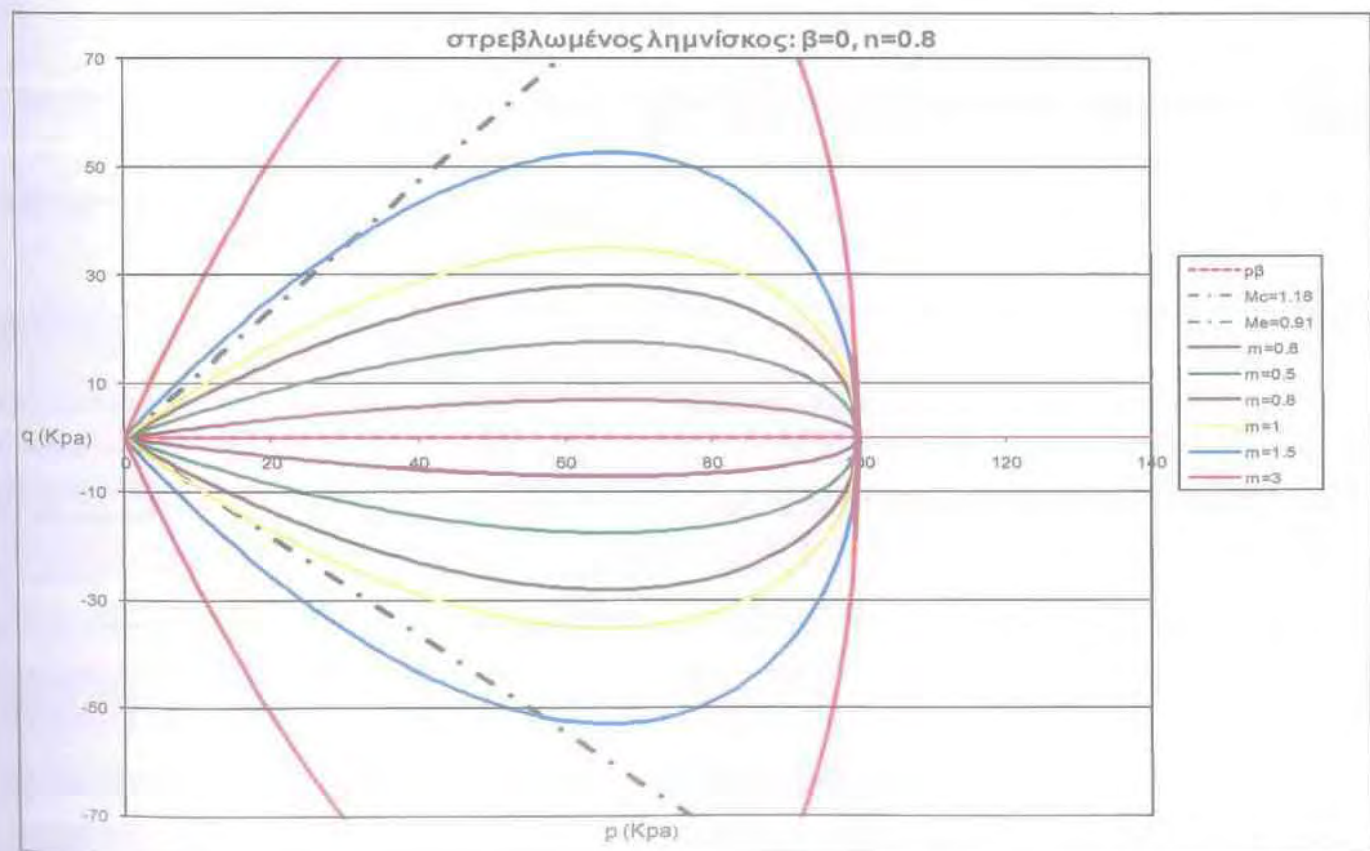
Γίνεται φανερό, ότι για να μην εκφυλίζεται η επιφάνεια διαρροής του νέου προσομοιώματος στην καμπύλη της μορφής  $q=p\beta(p/p_o)^n$  θα πρέπει να ισχύει:

$$|\beta| \leq m\left(\frac{p_o}{p}\right)^{n/2} \quad (4.3)$$

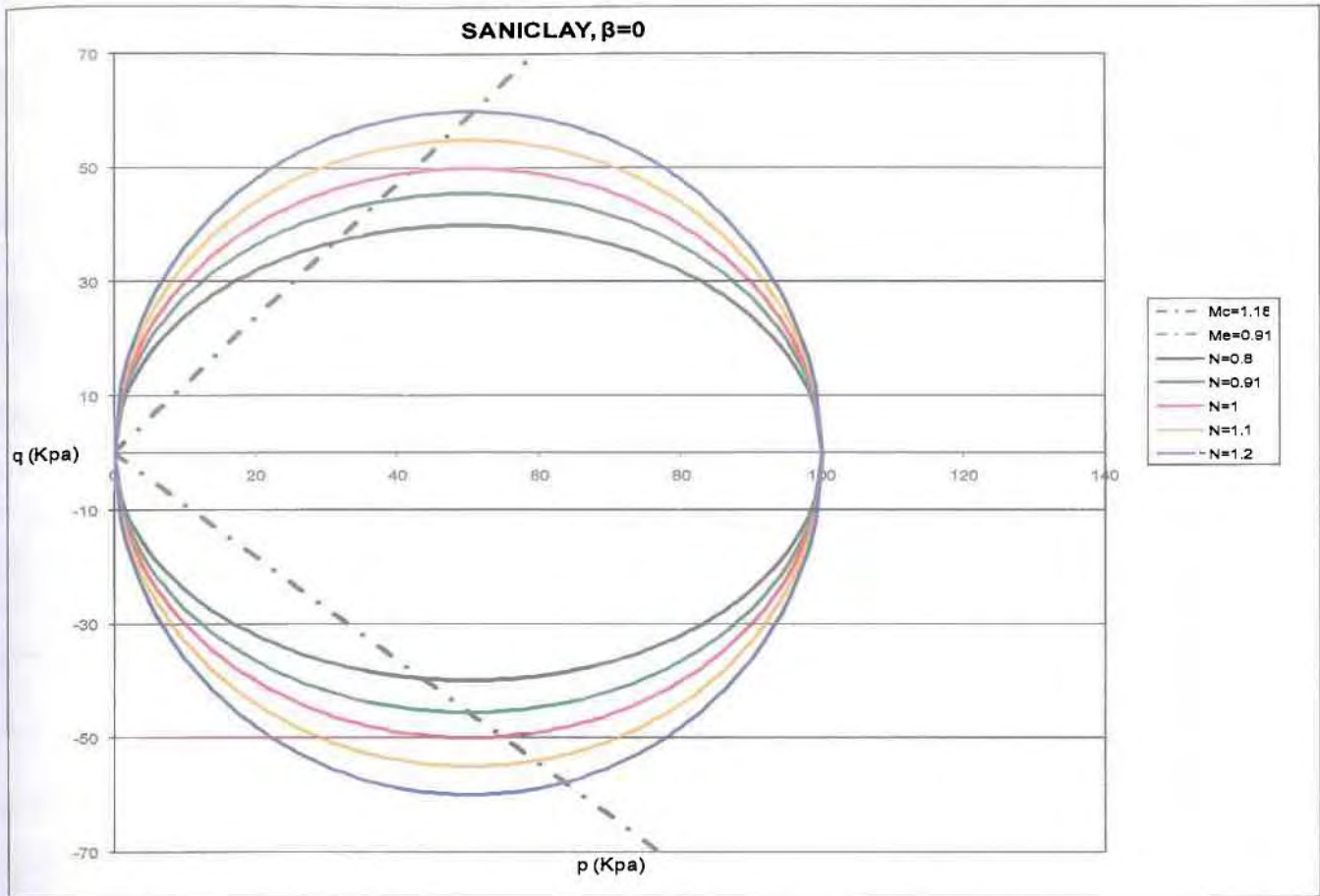
Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν την επιρροή στη μορφή της νέας επιφάνειας διαρροής διαφορετικών τιμών του  $n$  για σταθερή τιμή  $m$  (Σχήματα 4.1 και 4.4), και αντιστρόφως διαφορετικών τιμών του  $m$  για σταθερή τιμή  $n$  (Σχήματα 4.2 και 4.5). Επιπλέον, χάριν συγκρίσεως παρατίθενται και τα Σχήματα 4.3 και 4.6, στα οποία διαφαίνεται η μορφή της επιφάνειας διαρροής για το SANICLAY που προκύπτει για διάφορες τιμές  $N$ . Συνολικά, για κάθε διερεύνηση παρουσιάζονται δύο ομάδες μορφών επιφανείας διαρροής, μια για την περίπτωση όπου  $\beta=\eta=0$  που αντιστοιχεί στο τέλος της ιστροπικής στερεοποίησης (Σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3), και μία για την περίπτωση όπου  $\beta=\eta_{K_0}=0.77$  που αντιστοιχεί στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης (Σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6). Υπενθυμίζεται ότι  $\eta_{K_0}=0.77$  αντιστοιχεί σε  $K_0=0.49$  της αργίλου LCT (βλέπε και Κεφάλαιο 3). Ενδεικτικά, τα σχήματα που παρουσιάζονται έχουν γίνει για τιμή της αρχικής ενεργής τάσης  $p_o=100$  KPa, και αποτυπώνουν και τις ευθείες (με μαύρη διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχούν στις Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό, κλίσεων  $M_c=1.18$  και  $M_e=-0.91$ , αντίστοιχα.



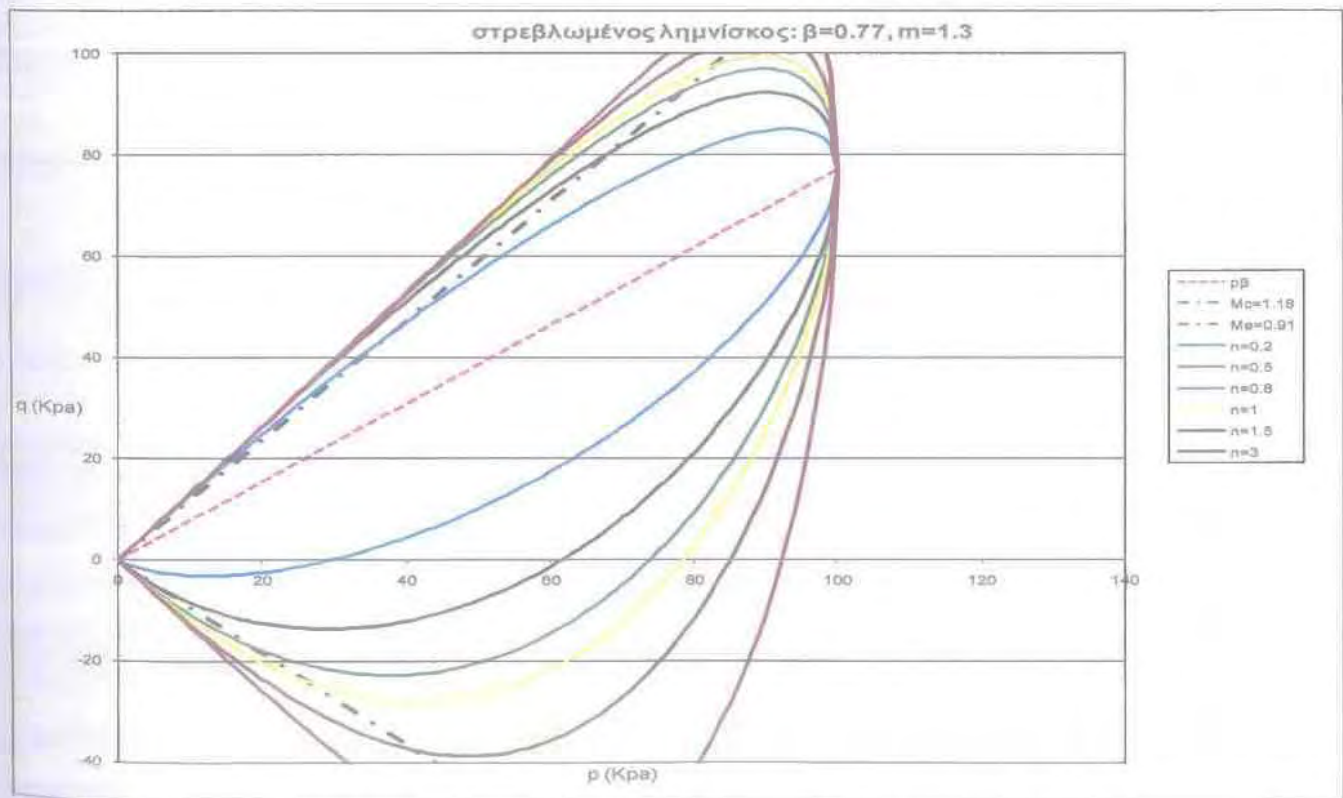
Σχήμα 4.1. Επίδραση της μεταβλητής  $n$  στο στρεβλωμένο λημνίσκο, για  $m=1.3$  και  $\beta=0$



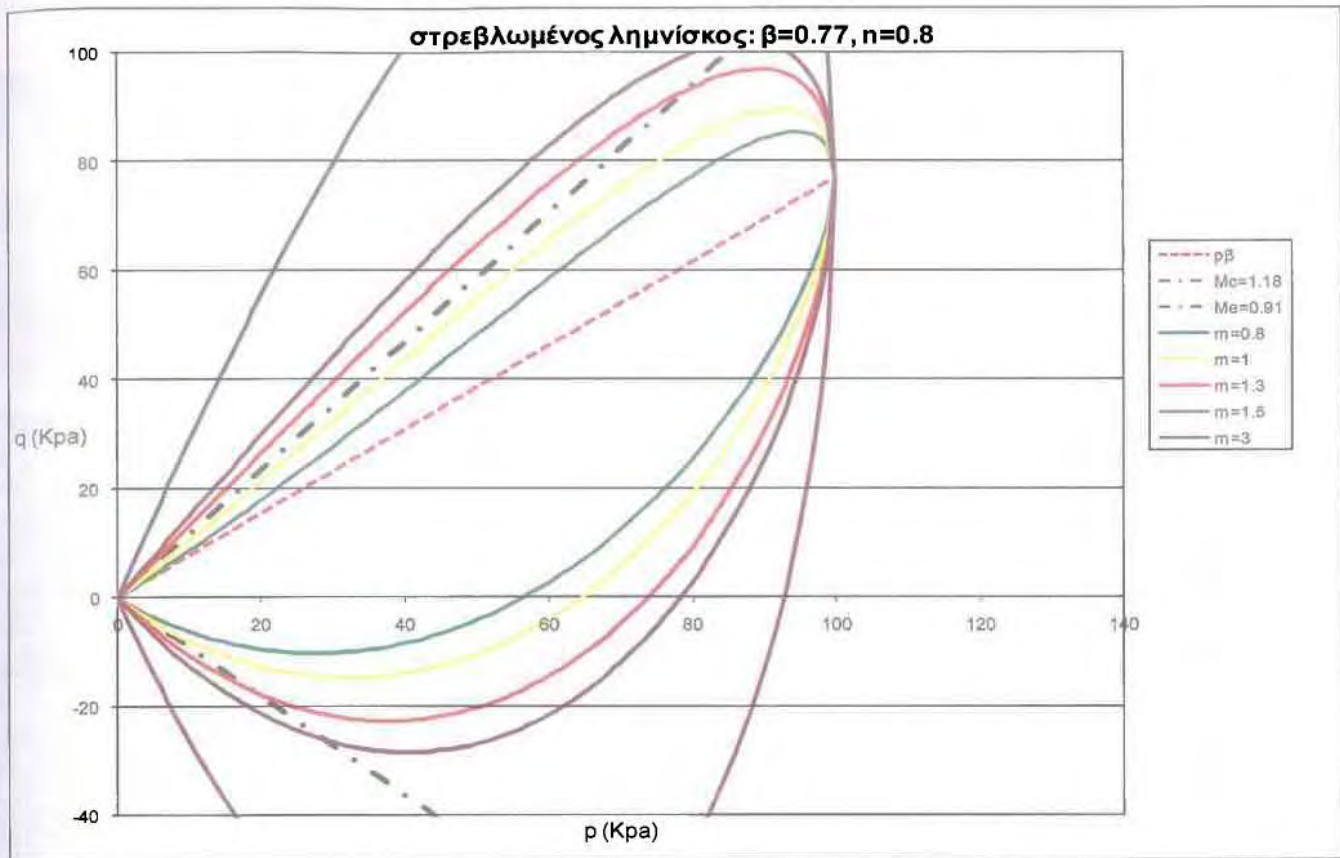
Σχήμα 4.2. Επίδραση της μεταβλητής  $m$  στο στρεβλωμένο λημνίσκο, για  $n=0.8$  και  $\beta=0$



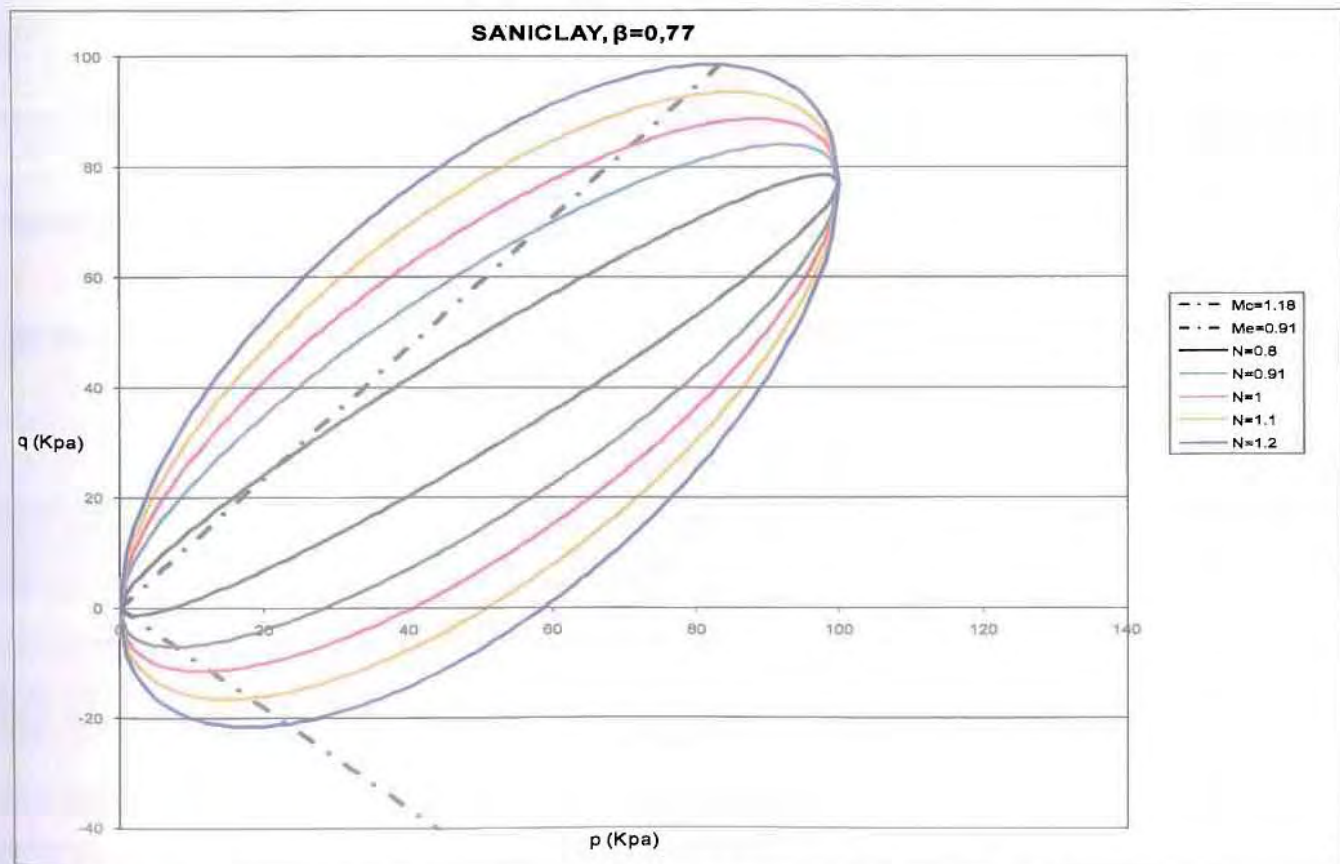
Σχήμα 4.3. Επίδραση της μεταβλητής N στο SANICLAY, για  $\beta=0$



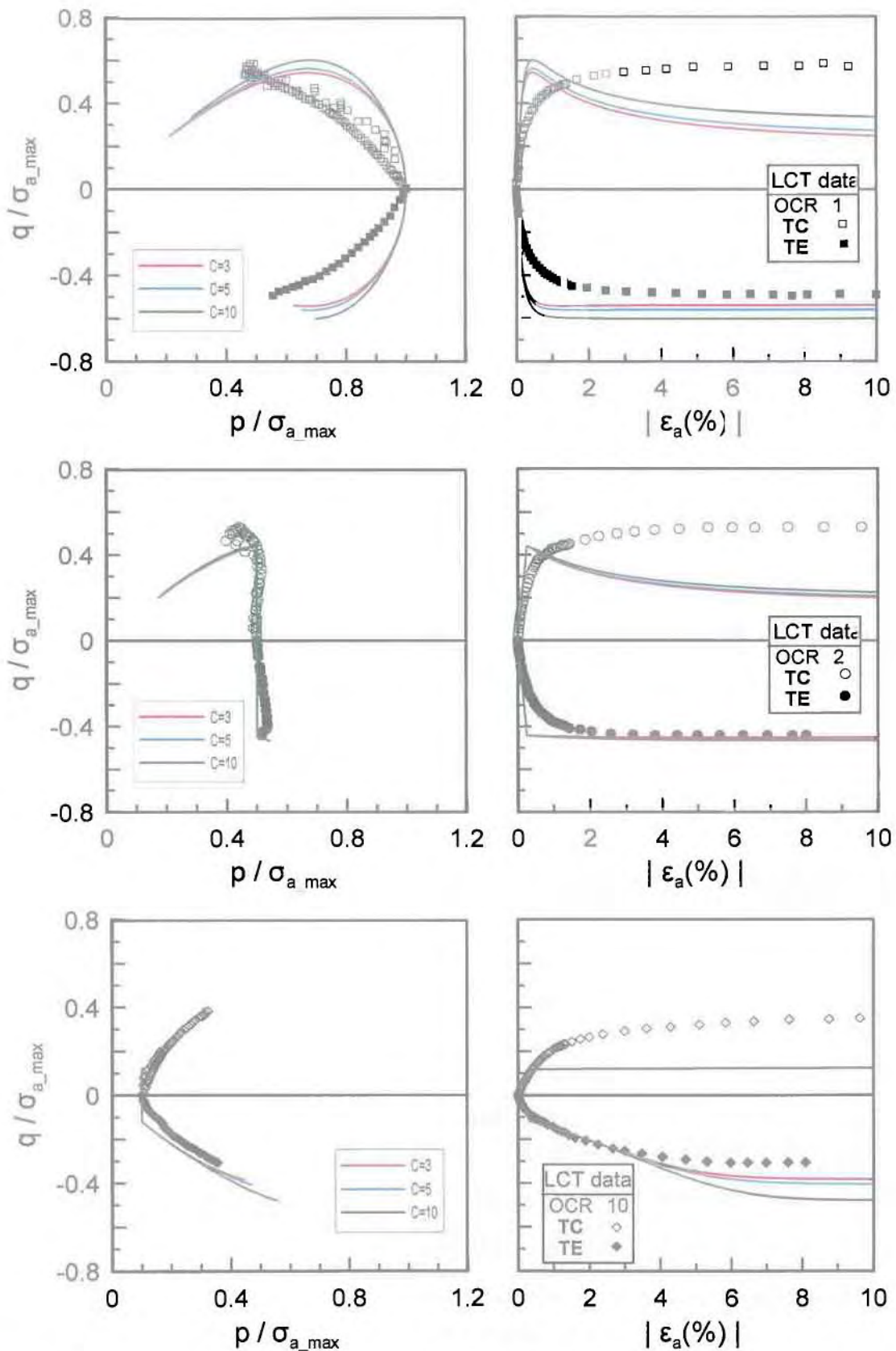
Σχήμα 4.4. Επίδραση της μεταβλητής n στο στρεβλωμένο λημνίσκο, για  $m=1.3$  και  $\beta=0.77$



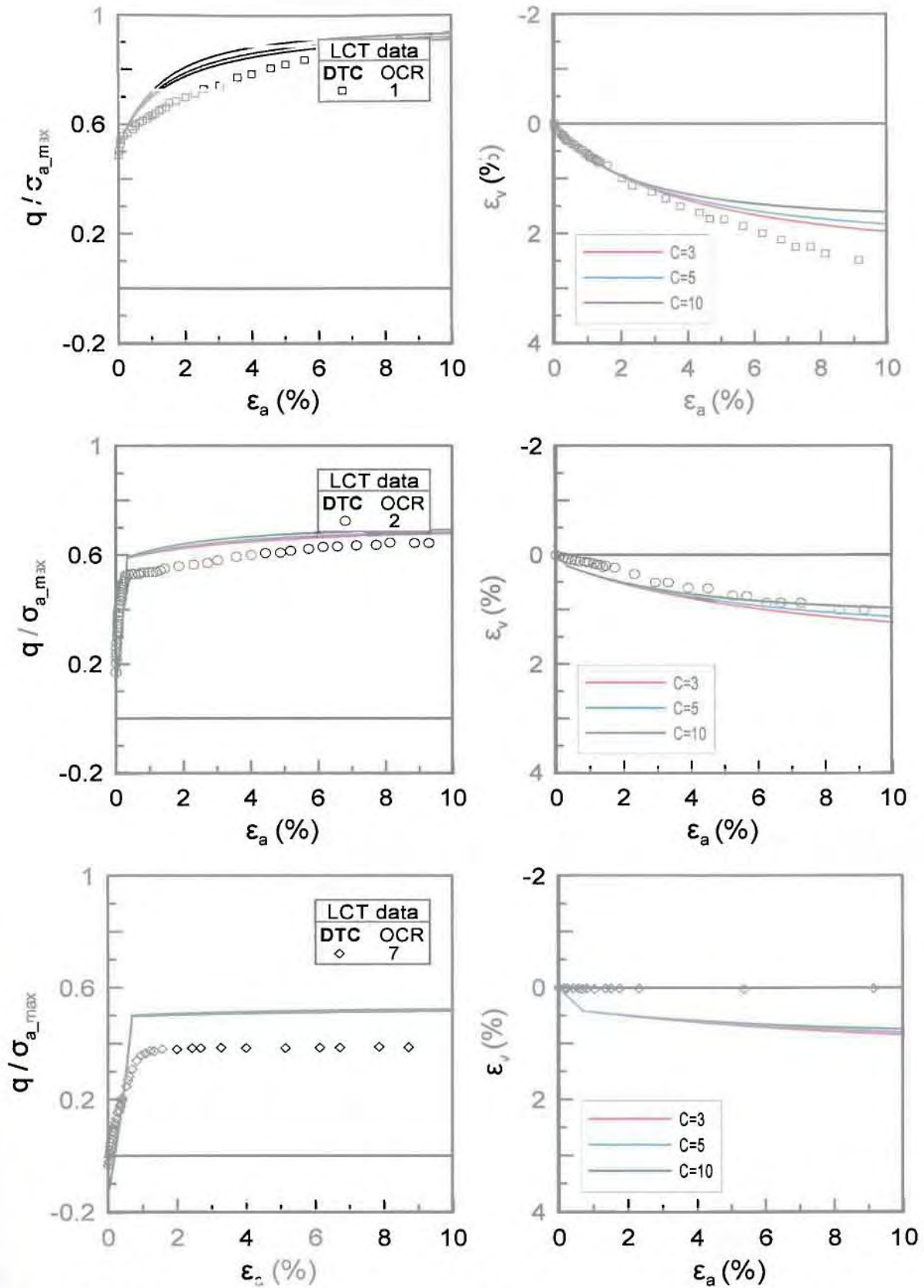
Σχήμα 4.5. Επίδραση της μεταβλητής  $m$  στο στρεβλωμένο λημνίσκο, για  $n=0.8$  και  $\beta=0.77$



Σχήμα 4.6. Επίδραση της μεταβλητής  $N$  στο SANICLAY, για  $\beta=0.77$

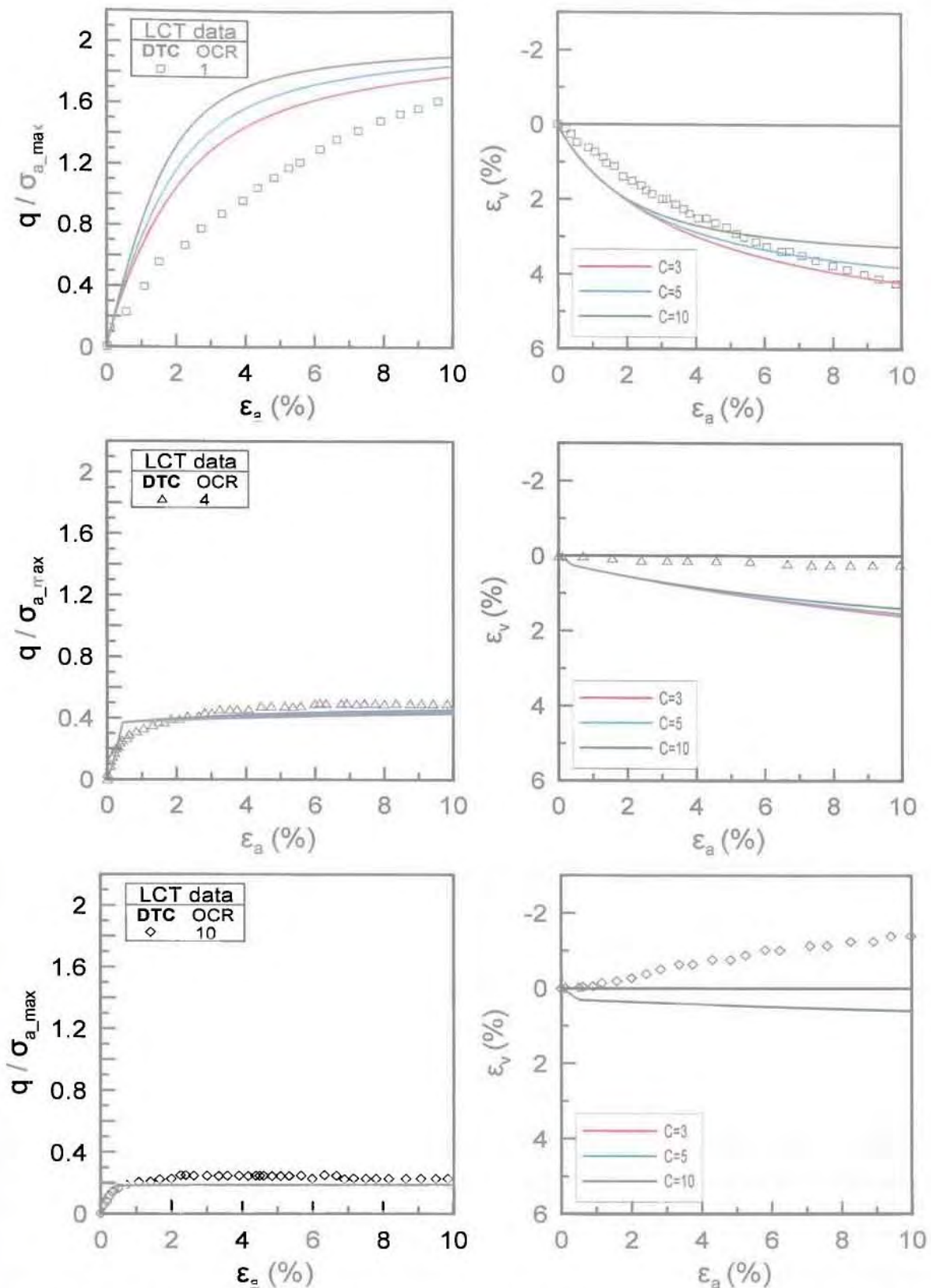


Σχήμα 4.8. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων (με το «στρεβλωμένο λημνίσκο») με μεταβλητή  $C$  για την άργιλο LCT για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 4.9. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων (με το «στρεβλωμένο λημνίσκο») με μεταβλητή C για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).





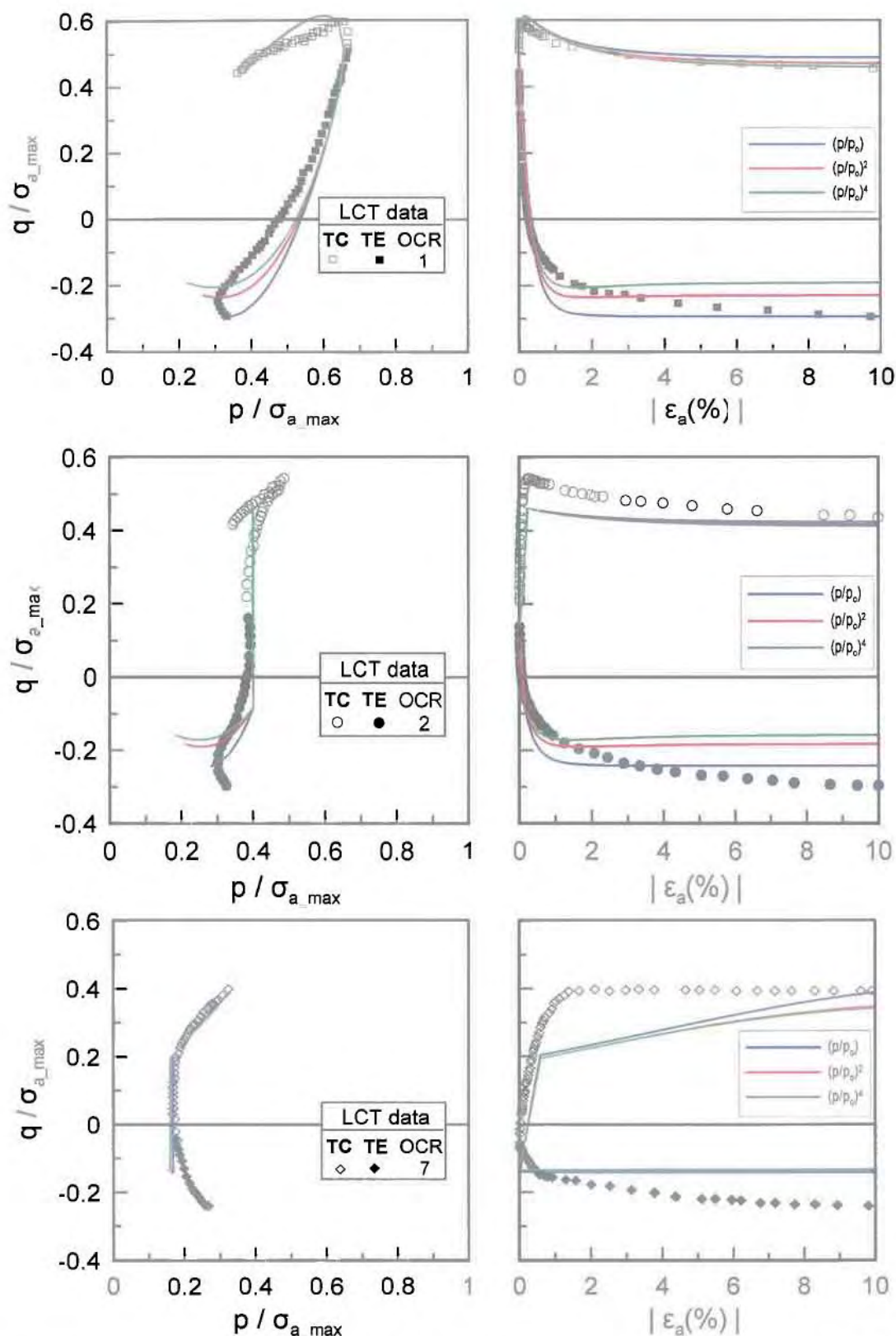
Σχήμα 4.10. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων (με το «στρωβλωμένο λημνίσκο») με μεταβλητή C για την άργιλο LCT για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Όπως φαίνεται από τα σχήματα αυτά, η αύξηση στην τιμή της σταθεράς  $C$  οδηγεί σε περισσότερο δύσκαμπτη συμπεριφορά. Από εκεί και πέρα, η εν λόγω σταθερά δεν επηρεάζει ποιοτικά την προβλεπόμενη απόκριση, και συνεπώς η επιλογή της τιμής της δε θεωρείται κρίσιμη για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων του νέου προσομοιώματος. Έτσι, για τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου, η σταθερά  $C$  παραμένει πάντα ίση με  $C = 5$  που αποτυπώνει μια μέση ικανοποιητική απόκριση, και η έμφαση δίδεται σε άλλα συστατικά του νέου προσομοιώματος.

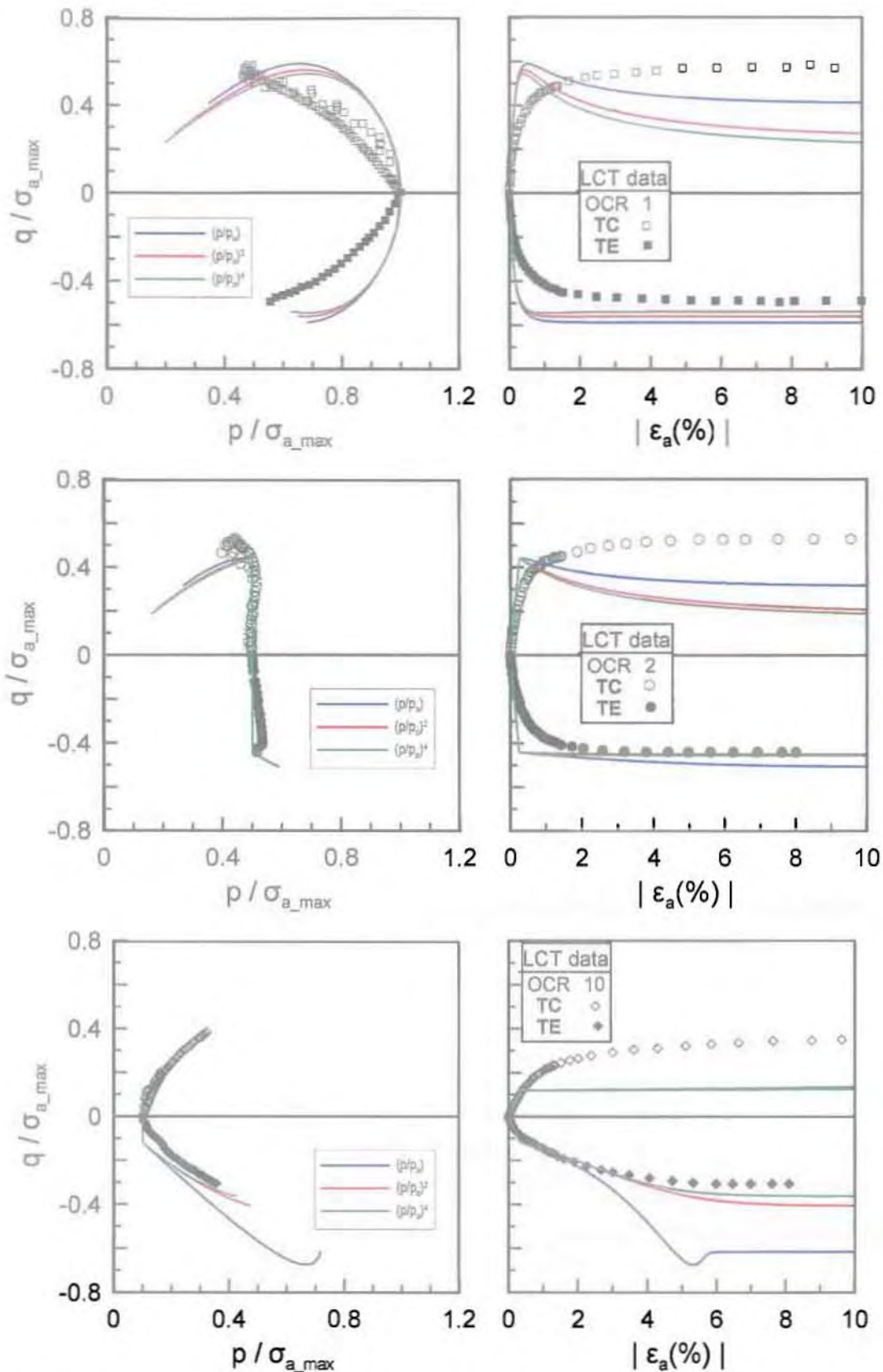
#### 4.3.2: Επίδραση του όρου $\left(\frac{p}{p_0}\right)^x$ στις σχέσεις μεταβολής των $\alpha$ και $\beta$

Ο όρος  $(p/p_0)^2$  των εξισώσεων (2.8) και (2.9) μειώνει το ρυθμό περιστροφής των επιφανειών πλαστικού δυναμικού και διαρροής, όσο μικρότερο γίνεται το  $p$  σε σχέση με το  $p_0$ . Γίνεται κατανοητό, ότι για μεγάλα OCR όπου το  $p$  είναι ιδιαίτερα μικρότερο του  $p_0$  ο όρος αυτός πρακτικώς μηδενίζει το ρυθμό περιστροφής των δύο επιφανειών. Στα πλαίσια μελέτης του νέου προσομοιώματος «στρεβλωμένου λημνίσκου» θεωρήθηκε χρήσιμο να διερευνηθεί η χρησιμότητα της ύπαρξης του εν λόγω όρου, δεδομένου του ευρύτερου μεγέθους της νέας επιφάνειας διαρροής. , Επειδή δεν υπάρχει κάποιος άλλος λόγος παρουσίας του όρου αυτού στις σχέσεις (2.8) και (2.9), διερευνήθηκε στη συνέχεια η επίδρασή του στην απόκριση της αργίλου LCT, για τιμές εκθέτη  $x=1$  και  $x=4$ , δηλαδή στη θέση του  $(p/p_0)^2$  τοποθετήθηκε αρχικά ο όρος  $(p/p_0)$  και έπειτα  $(p/p_0)^4$ .

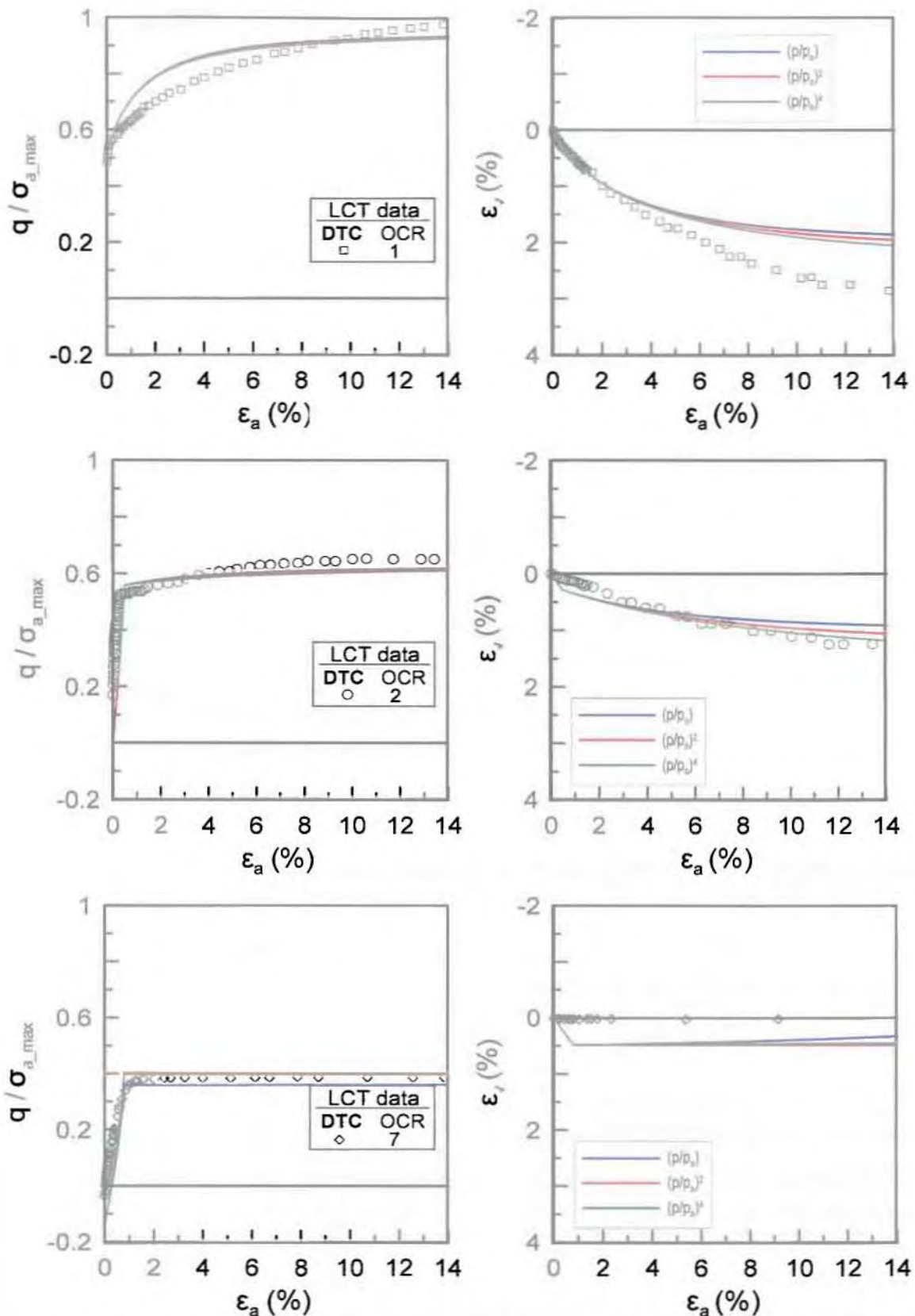
Τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 4.11 έως 4.14) παρουσιάζουν την επιρροή του εκθέτη  $x$  του όρου  $(p/p_0)^x$  στις σχέσεις μεταβολής των παραμέτρων κινηματικής κράτυνσης  $\alpha$  και  $\beta$ , (2.8) και (2.9) αντίστοιχα, όπως αυτή αποτυπώνεται στις προβλέψεις του προσομοιώματος «στρεβλωμένου λημνίσκου» για την άργιλο LCT. Οι προβλέψεις αυτές γίνονται και πάλι μόνο ενδεικτικά για  $m=1.25$  και  $n=1$ . Πιο συγκεκριμένα, τα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζουν την επίδραση για αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονο-διάστατη και ισοτροπική στερεοποίηση, αντίστοιχα. Ομοίως, τα Σχήματα 4.13 και 4.14 κάνουν το ίδιο για στραγγιζόμενες δοκιμές τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη και ισοτροπική στερεοποίηση, αντίστοιχα.



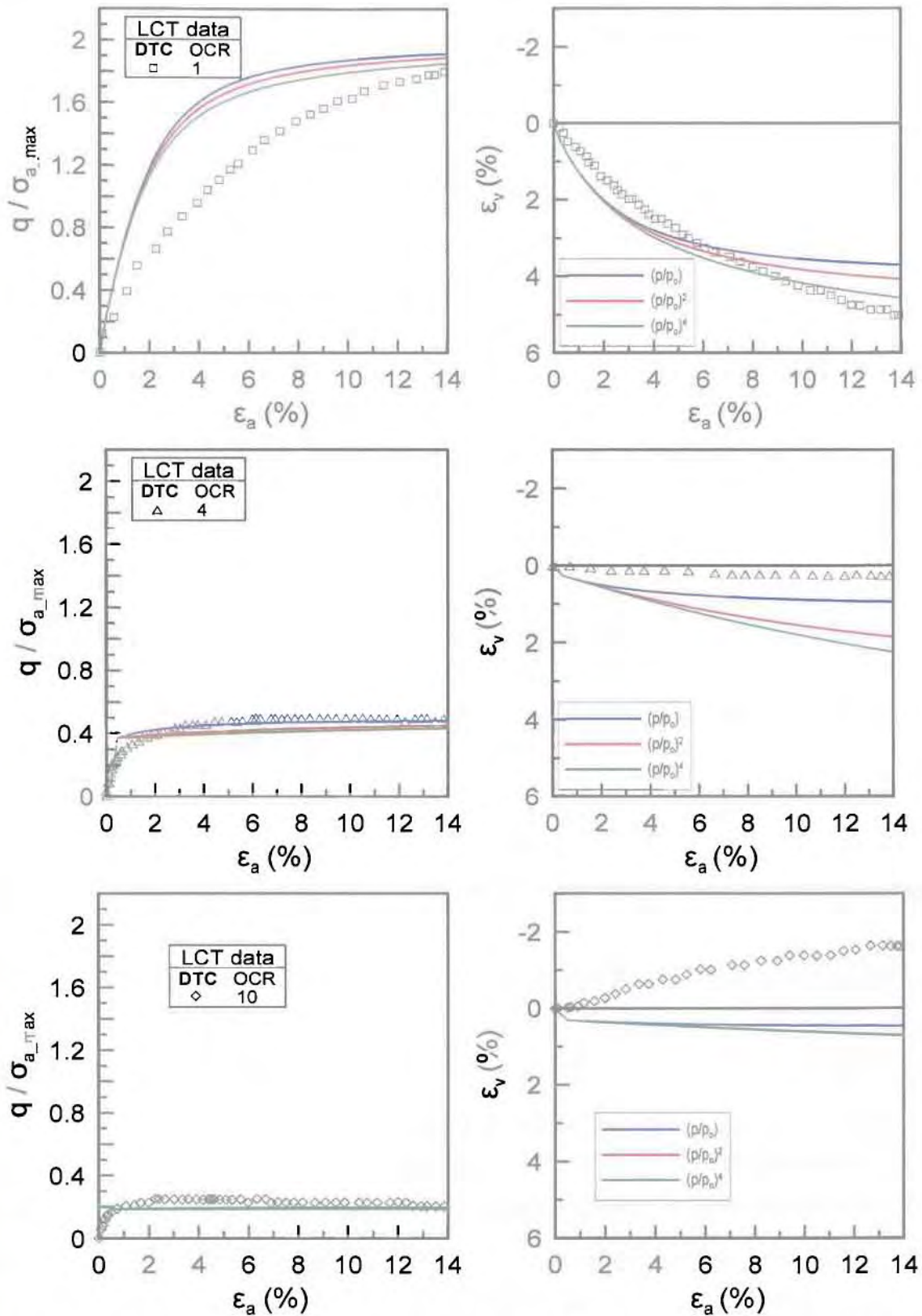
Σχήμα 4.11. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT για έλεγχο επίδρασης του όρου  $(\rho/\rho_0)^x$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 4.12. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT για έλεγχο επίδρασης του όρου  $(p/p_0)^x$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 4.13. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT για έλεγχο επίδρασης του όρου  $(p/p_0)^x$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



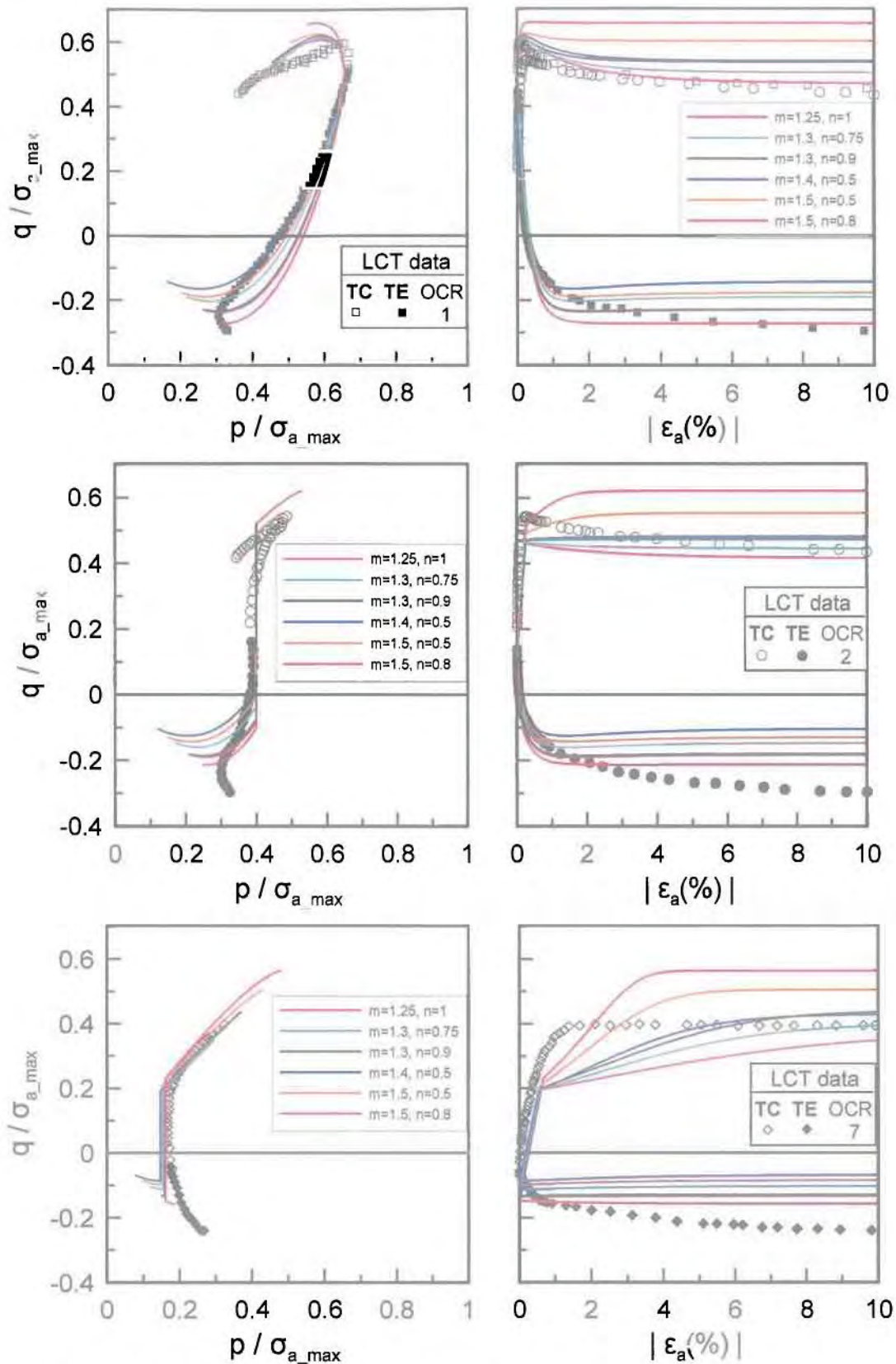
Σχήμα 4.14. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT για έλεγχο επίδρασης του όρου  $(p/p_0)^x$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Όπως φαίνεται από τα σχήματα αυτά, η επίδραση του όρου  $(p/p_0)^x$  στις εξισώσεις μεταβολής των παραμέτρων κινηματικής κράτυνσης  $\alpha$  και  $\beta$  του προσομοιώματος δεν είναι καθοριστικής σημασίας για την προβλεπόμενη συμπεριφορά. Εν πάση περιπτώσει, η όποια επίδραση δείχνει να είναι μάλλον πιο σημαντική για μεγάλα OCR, και σε κάθε περίπτωση αύξηση του εκθέτη  $x$  στον όρο αυτό απομειώνει το ρυθμό περιστροφής των επιφανειών του προσομοιώματος και οδηγεί σε πιο «εύκαμπτη» συμπεριφορά. Η εν λόγω επίδραση δεν είναι ομοιόμορφη για όλες τις τιμές του OCR και όλες τις δοκιμές. Μάλιστα, ειδικά για τιμή εκθέτη  $x=1$ , δηλαδή χρήση του όρου  $(p/p_0)$  στις σχέσεις 2.8 και 2.9, στο σχήμα (4.12) εμφανίζεται υπερβολικά μεγάλη διαστολικότητα σε τριαξονικό εφελκυσμό, ως αποτέλεσμα υπερβολικής στροφής των επιφανειών, μια περίπτωση που θα πρέπει να αποφευχθεί. Συνεπώς, επελέγη να διατηρηθεί στο νέο προσομοίωμα «στρεβλωμένου λημνίσκου» ο όρος με τιμή εκθέτη  $x=2$ , όπως ακριβώς προτάθηκε και στο SANICLAY.

#### 4.3.3: Επίδραση των τιμών των σταθερών $m$ και $n$ στην προβλεπόμενη απόκριση

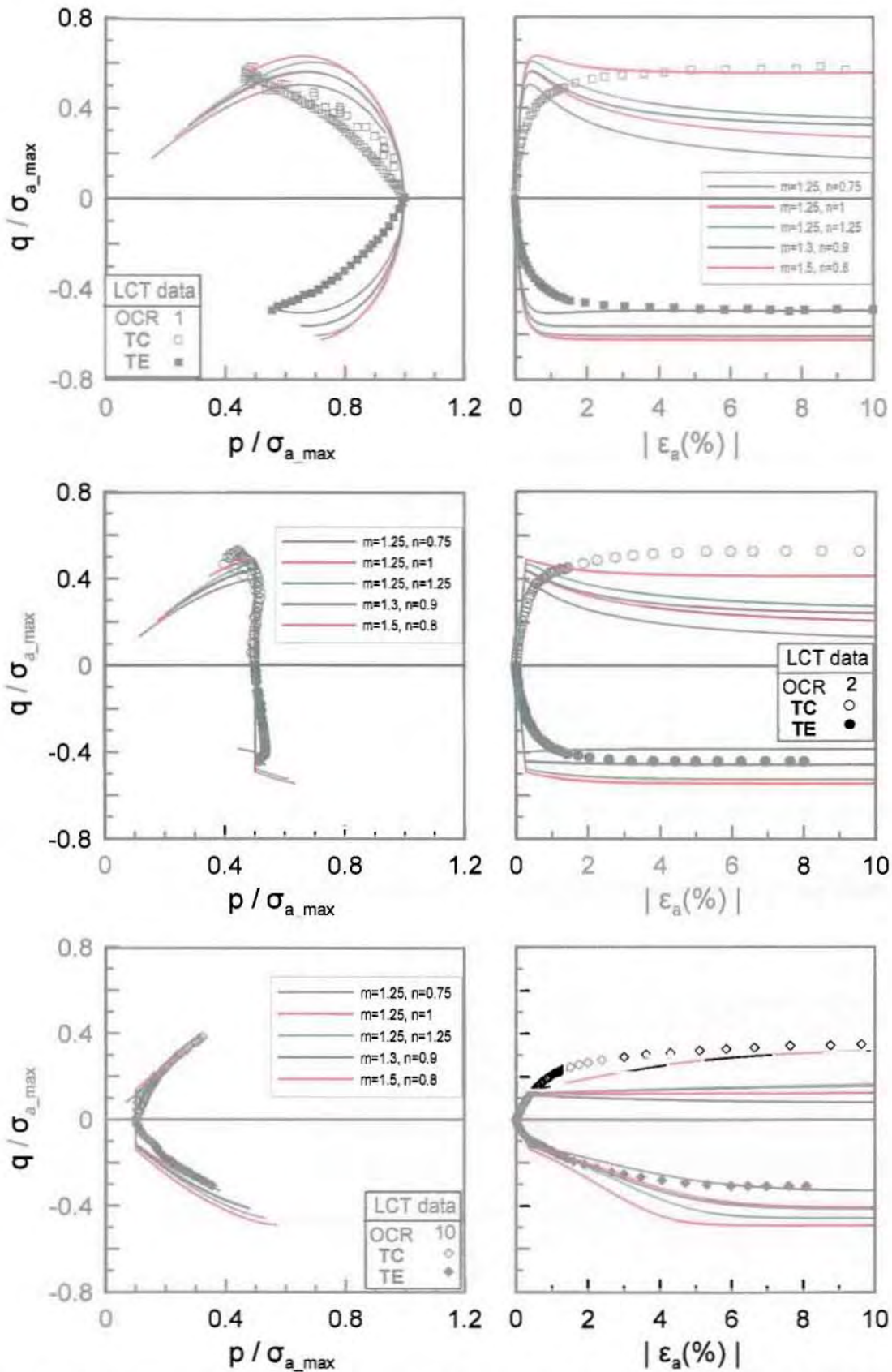
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται παραμετρικές αναλύσεις με χρήση του νέου προσομοιώματος «στρεβλωμένος λημνίσκος», για διαφορετικά ζεύγη τιμών  $m$  και  $n$ , των νέων σταθερών που αντικαθιστούν τη σταθερά  $N$  της επιφάνειας διαρροής του SANICLAY. Ο στόχος των παραμετρικών αναλύσεων είναι να βρεθεί το ζεύγος τιμών των  $(m, n)$  που δίνει τις βέλτιστες προσομοιώσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων για την άργιλο LCT, στις κάτωθι περιπτώσεις φόρτισεων:

- δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης CKoUC και εφελκυσμού CKoUE, για διάφορες τιμές OCR μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (Σχήμα 4.15)
- δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης CIUC και εφελκυσμού CIUE, για διάφορες τιμές OCR μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 4.16)
- δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης CKoDC, για διάφορες τιμές OCR μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (Σχήμα 4.17)
- δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης CIDC, για διάφορες τιμές OCR μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 4.18)

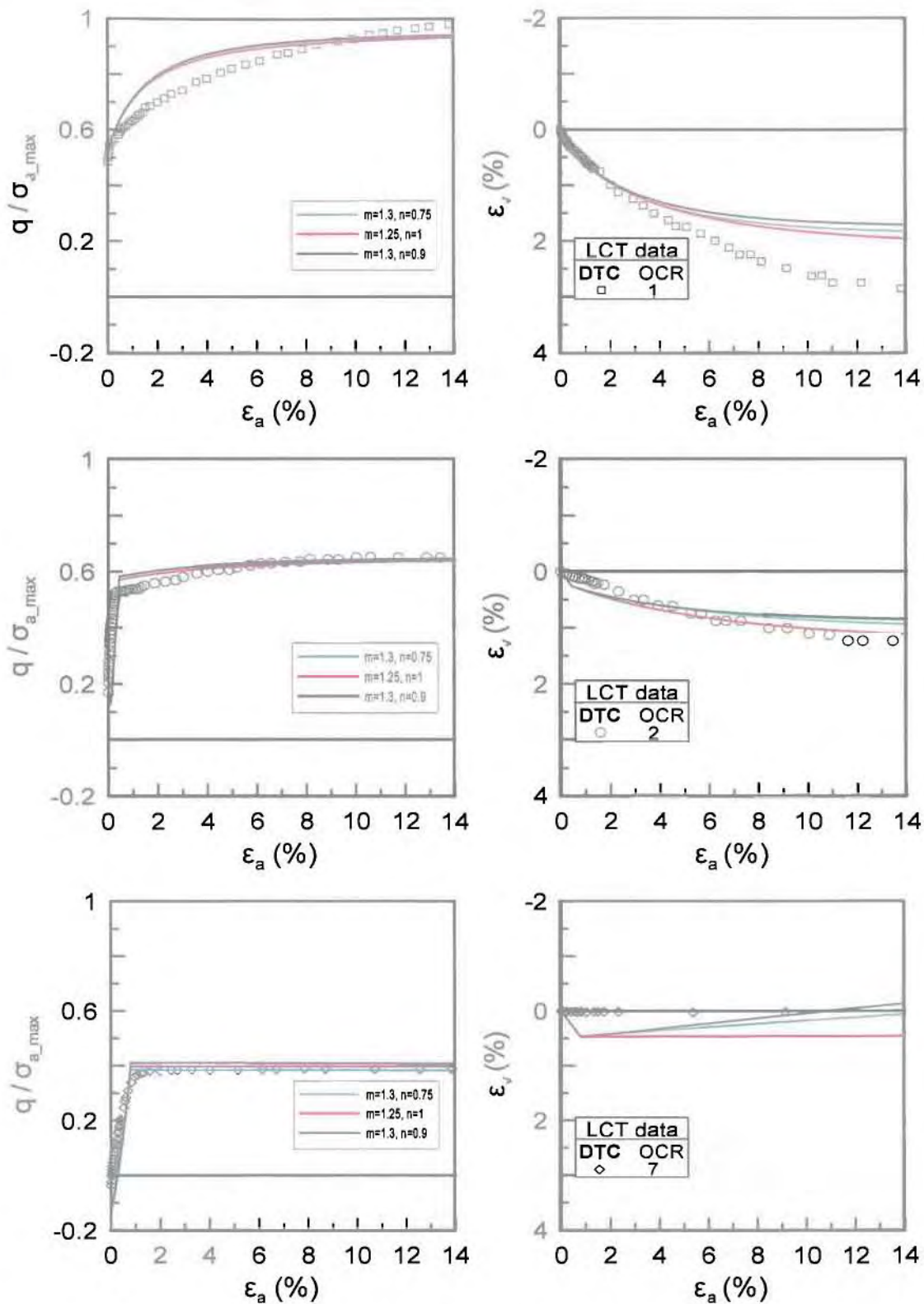


Σχήμα 4.15. Σύγκριση μετρήσεων και παραμετρικών αναλύσεων για την άργιλο LCT για διάφορες τιμές των σταθερών  $m$  και  $n$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

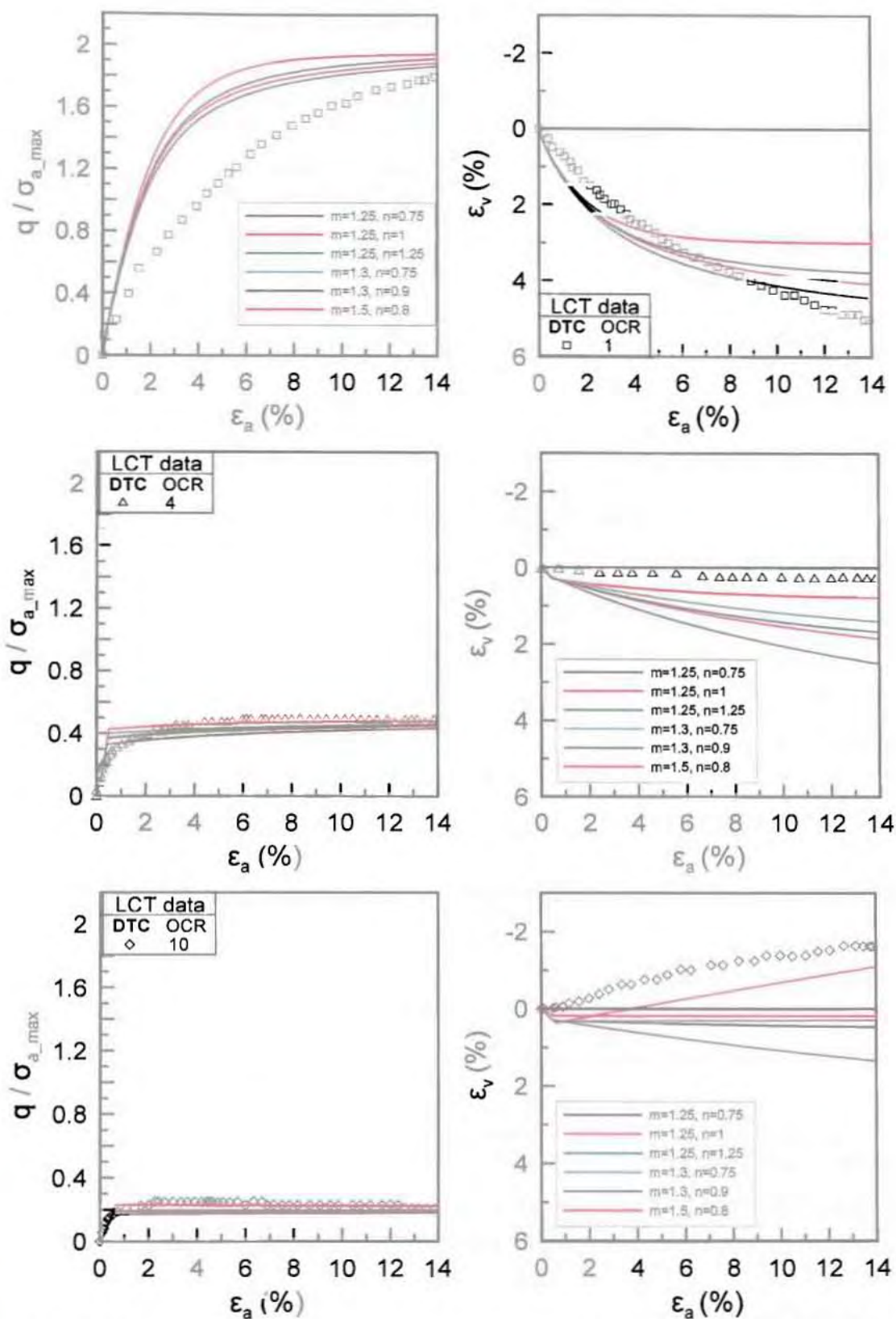




Σχήμα 4.16. Σύγκριση μετρήσεων και παραμετρικών αναλύσεων για την άργιλο LCT για διάφορες τιμές των σταθερών  $m$  και  $n$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 4.17. Σύγκριση μετρήσεων και παραμετρικών αναλύσεων για την άργιλο LCT για διάφορες τιμές των σταθερών  $m$  και  $n$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



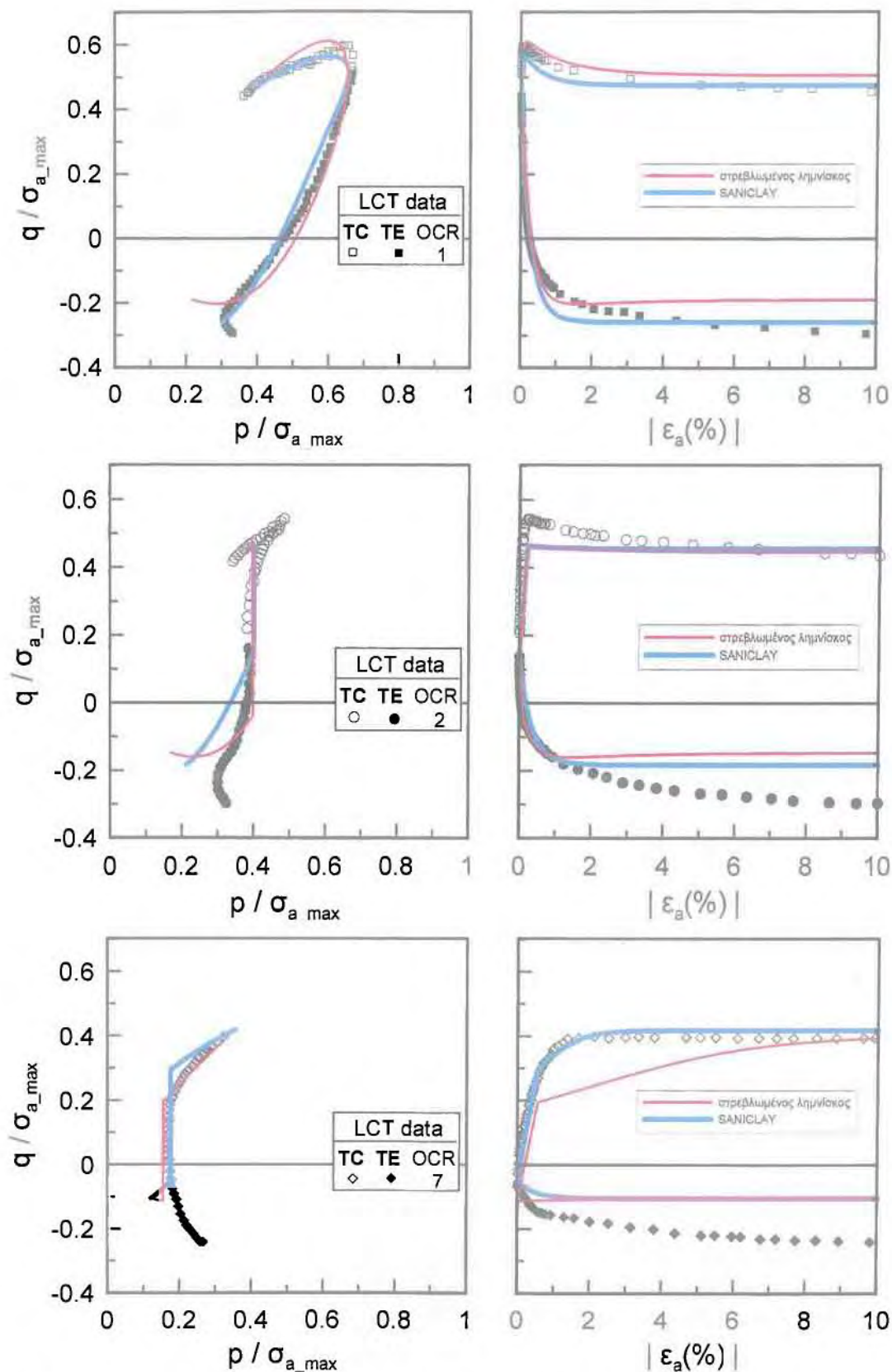
Σχήμα 4.18. Σύγκριση μετρήσεων και παραμετρικών αναλύσεων για την άργιλο LCT για διάφορες τιμές των σταθερών  $m$  και  $n$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Από τα Σχήματα 4.15 έως 4.18 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

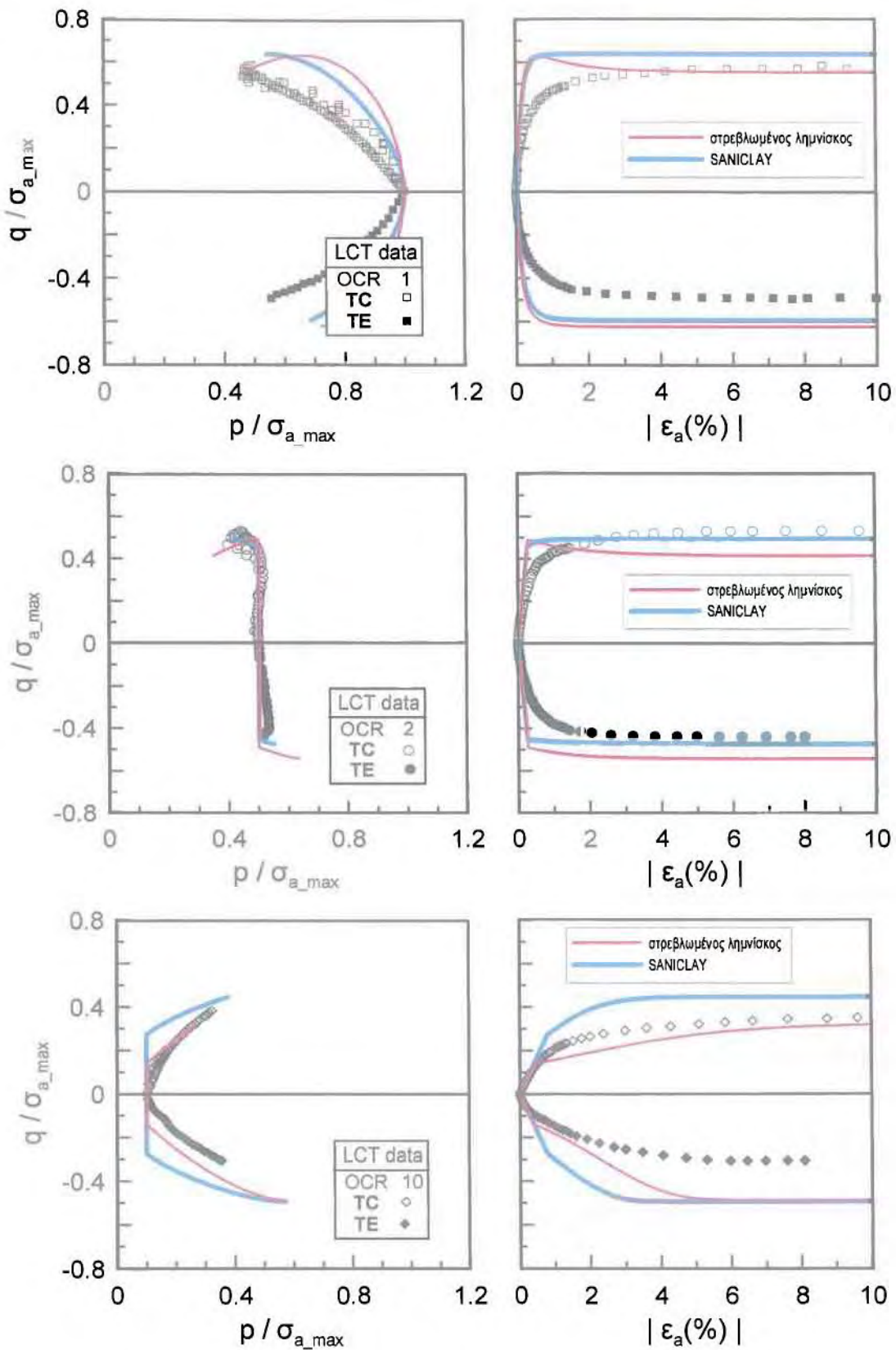
- Οι τιμές των σταθερών  $m$  και  $n$  που δίνουν, εν γένει, ρεαλιστικές προβλέψεις απόκρισης αργίλων κυμαίνονται ως εξής:  $m=1.0-1.5$ ,  $n=0.5-1.5$ .
- Το ζεύγος τιμών  $m$  και  $n$  που οδηγεί σε καλύτερες προσομοιώσεις για αναλύσεις τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (CKo δοκιμές, βλέπε Σχήματα 4.15 και 4.17), είναι:  $m=1.30$ ,  $n=0.75$ . Φυσικά, ανά περίπτωση, μπορούν να υπάρχουν και σχετικά καλύτερες προβλέψεις, αλλά το προαναφερθέν ζεύγος τιμών δίνει μια συνολικά βέλτιστη προσομοίωση.
- Το ζεύγος τιμών  $m$  και  $n$  που οδηγεί σε καλύτερες προσομοιώσεις για αναλύσεις τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (CI δοκιμές, βλέπε Σχήματα 4.16 και 4.18), είναι:  $m=1.50$ ,  $n=0.80$ . Φυσικά, ανά περίπτωση, μπορούν να υπάρχουν και σχετικά καλύτερες προβλέψεις, αλλά το προαναφερθέν ζεύγος τιμών δίνει μια συνολικά βέλτιστη προσομοίωση.
- Χρήση των παραμέτρων  $(m, n) = (1.5, 0.80)$  που προέκυψαν για τις CI δοκιμές σε προσομοιώσεις για CKo δοκιμές δίνει ποσοτικά λάθος προβλέψεις (π.χ. δεν προβλέπεται χαλάρωση στις δοκιμές CKoUC για OCR=1 και 2, στο Σχήμα 4.15). Αντίστοιχα, χρήση των παραμέτρων  $(m, n) = (1.30, 0.75)$  που προέκυψαν για τις CKo δοκιμές σε προσομοιώσεις για CI δοκιμές δίνει επίσης ποσοτικά λάθος προβλέψεις (π.χ. προβλέπεται έντονη χαλάρωση στις δοκιμές CIUC για OCR=1 & 2, στο Σχήμα 4.16).

#### 4.4: Σύγκριση προβλέψεων νέου προσομοιώματος με το SANICLAY

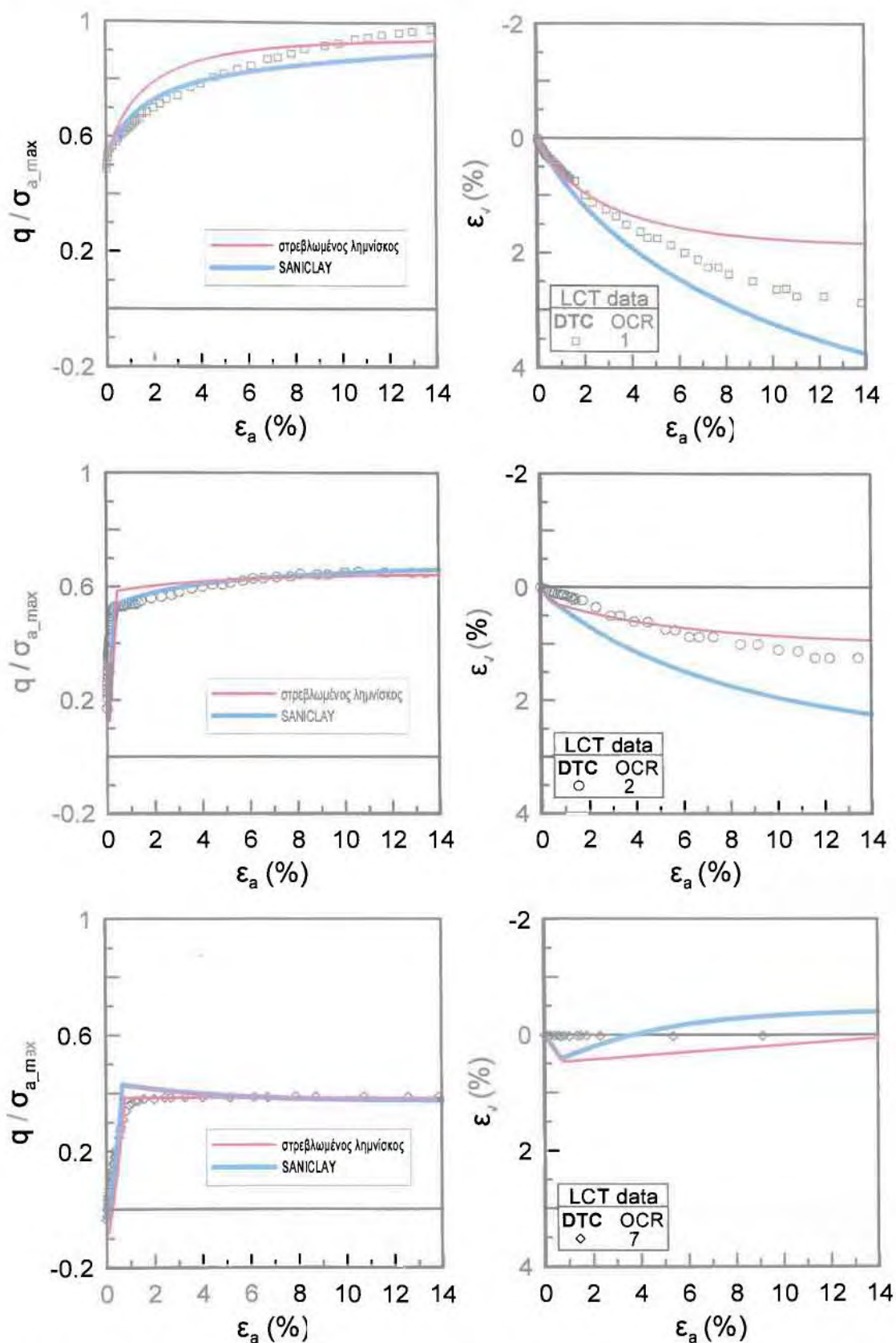
Με βάση την παραμετρική ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, έχει γίνει επιλογή τιμών των σταθερών  $(m, n)$  που δίνουν τις βέλτιστες προβλέψεις. Εδώ επιχειρείται μια σύγκριση των εν λόγω προβλέψεων, με τις αντίστοιχες προβλέψεις του SANICLAY, για να διαπιστωθεί κατά πόσο έχει επιτευχθεί βελτιωμένη προσομοίωση της συμπεριφοράς αργίλων. Έτσι, στα Σχήματα 4.19 έως 4.22 γίνεται απευθείας σύγκριση των προβλέψεων των δύο προσομοιωμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα για την άργιλο LCT, για τις γνωστές τέσσερις κατηγορίες φορτίσεων: δοκιμές CKoUC και CKoUE (Σχήμα 4.19), δοκιμές CIUC και CIUE (Σχήμα 4.20), δοκιμές CKoDC (Σχήμα 4.21) και δοκιμές CIDC (Σχήμα 4.22).



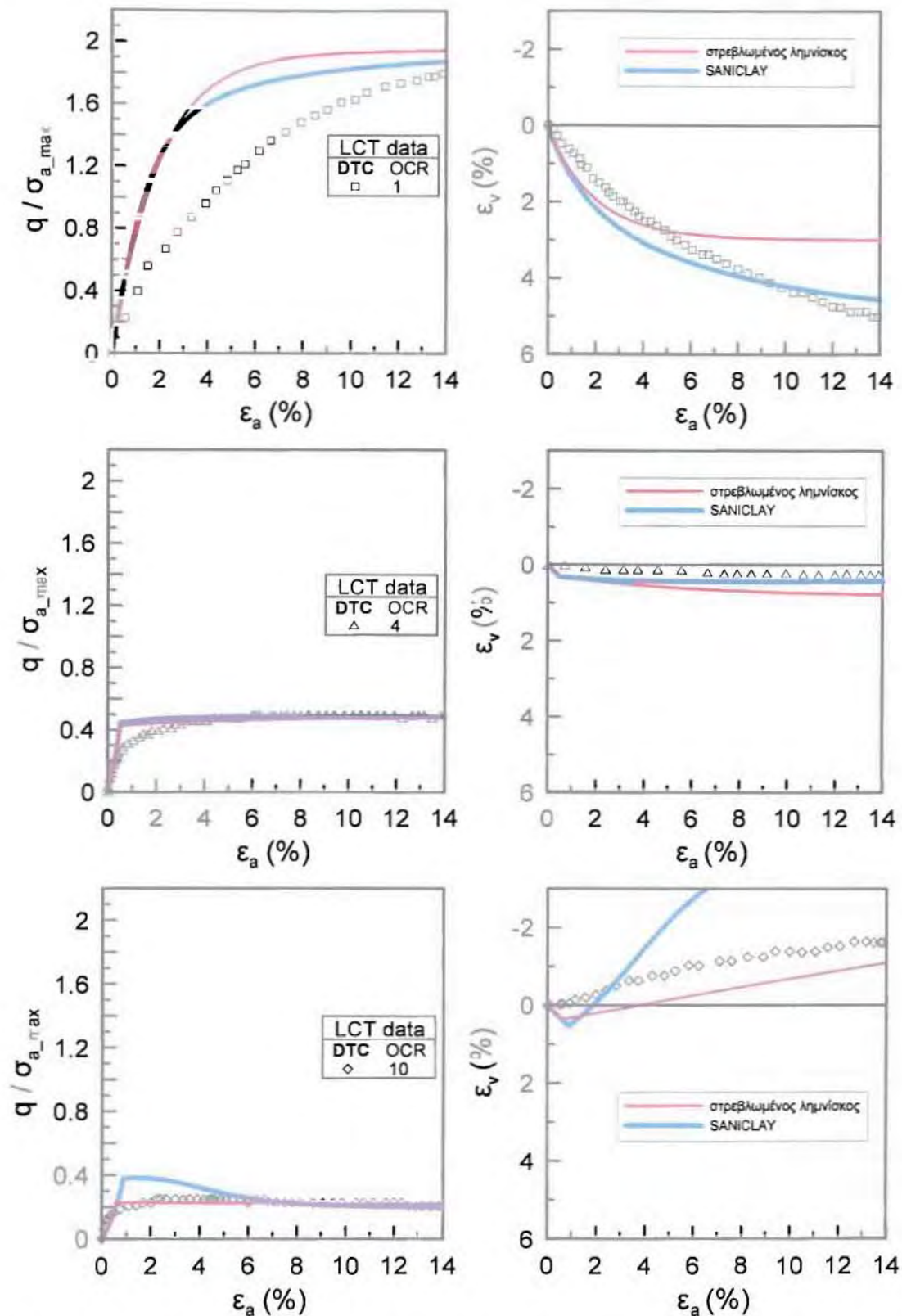
Σχήμα 4.19. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.3, 0.75)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 4.20. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.5, 0.8)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 4.21. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.3, 0.75)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

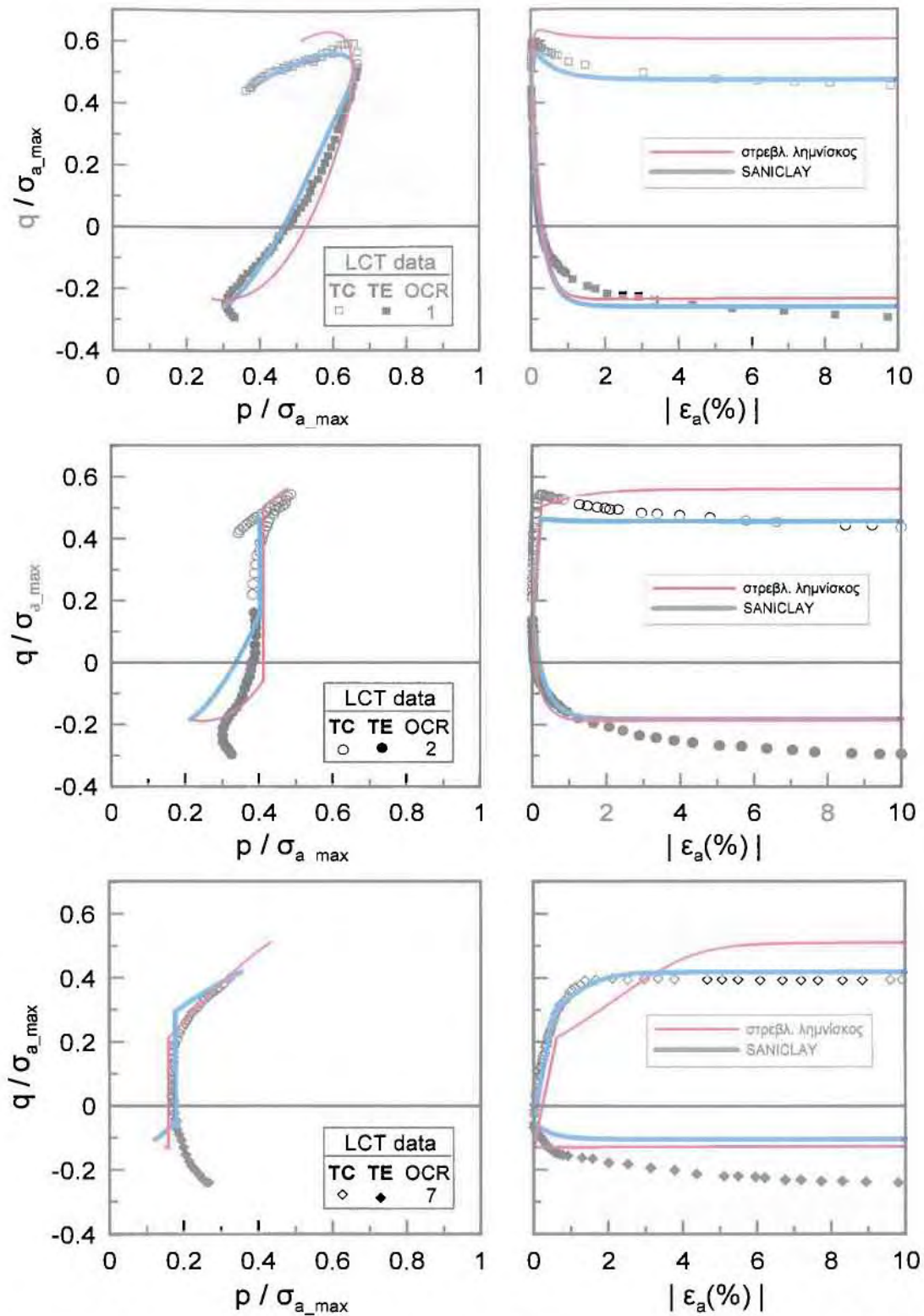


Σχήμα 4.22. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.5, 0.8)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

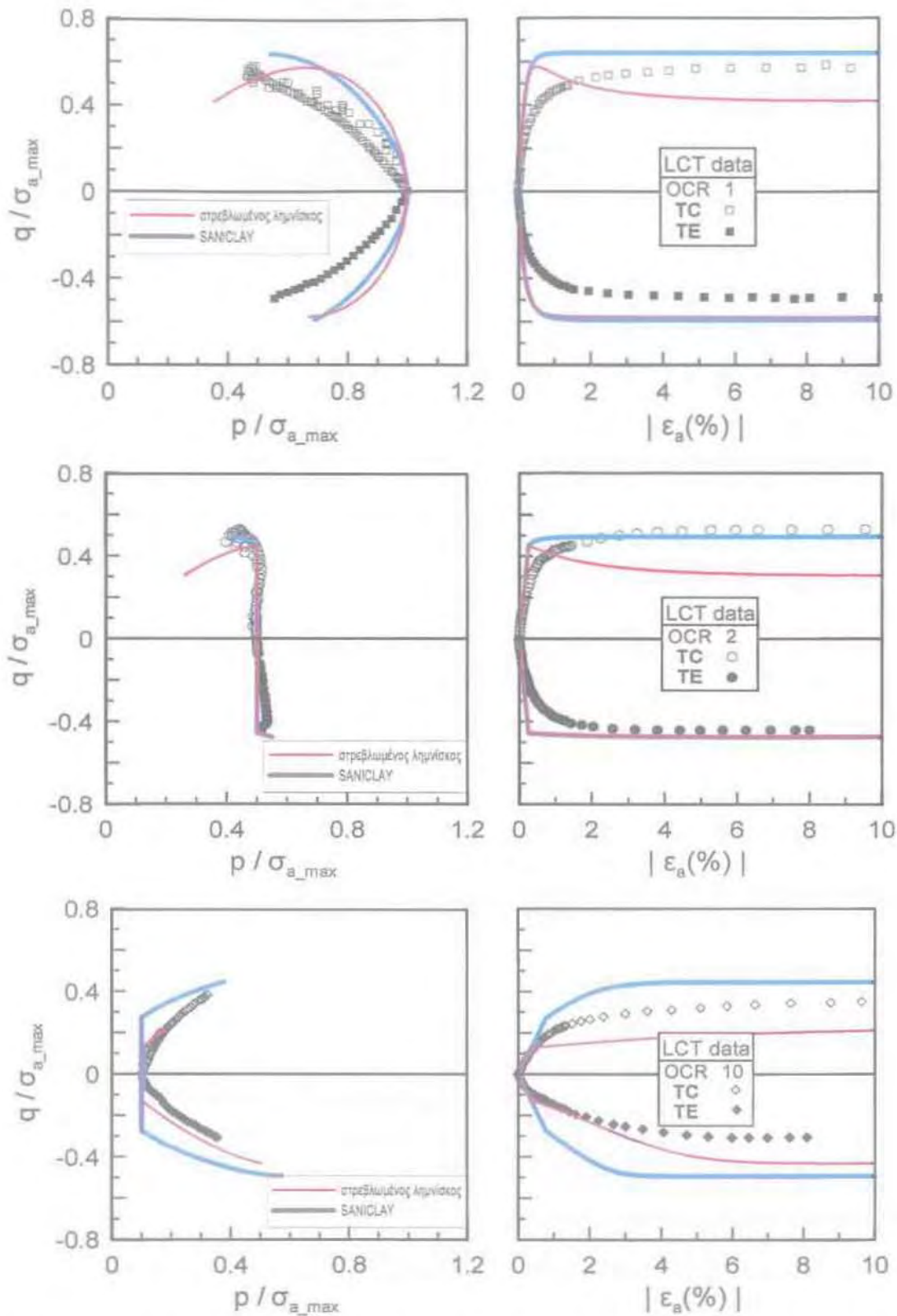


Με βάση τις συγκρίσεις των Σχημάτων 4.19 έως 4.22, προκύπτει ότι με κατάλληλη επιλογή τιμών των σταθερών ( $m, n$ ) το νέο προσομοίωμα μπορεί να προσφέρει, κατά περίπτωση, καλύτερες προβλέψεις της συμπεριφοράς αργίλων, σε σχέση με το προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY. Όμως, στην πράξη (δηλαδή σε προβλήματα συνοριακών συνθηκών), δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιείται το προσομοίωμα με διαφορετικές τιμές στις σταθερές, ανά περίπτωση.

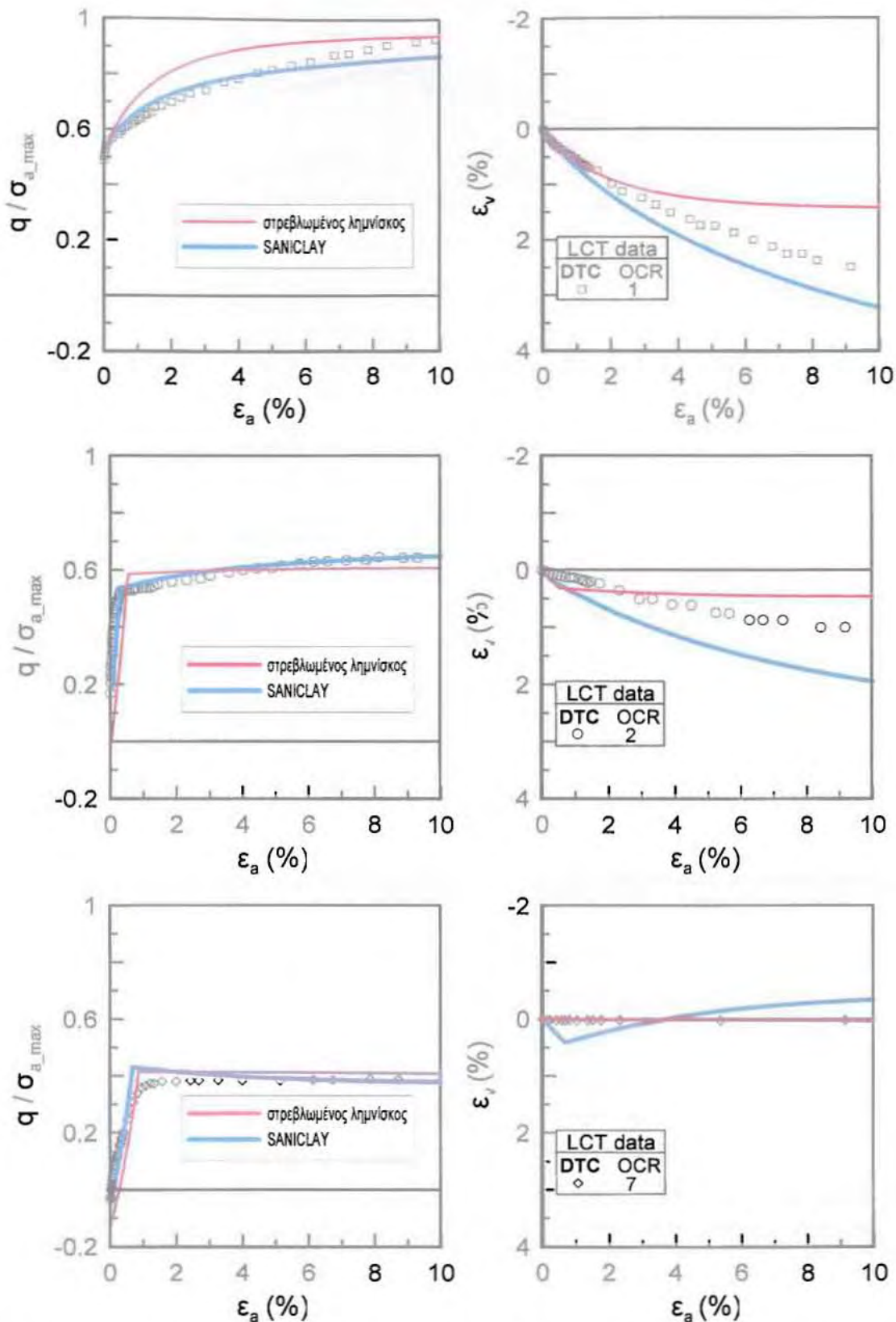
Έτσι, στα Σχήματα 4.23 έως 4.26 που ακολουθούν, η σύγκριση των προβλέψεων του SANICLAY γίνεται με μια καινούρια ομάδα προβλέψεων του νέου προσομοιώματος για τιμές  $(m, n) = (1.40, 0.77)$ , δηλαδή τις μέσες τιμές των σταθερών  $(m, n)$  που προκρίθηκαν ως οι βέλτιστες ανάλογα με το είδος της στερεοποίησης που προηγήθηκε της διάτμησης. Οι συγκρίσεις γίνονται και πάλι για τις γνωστές τέσσερις κατηγορίες φορτίσεων: δοκιμές CKoUC και CKoUE (Σχήμα 4.23), δοκιμές CIUC και CIUE (Σχήμα 4.24), δοκιμές CKoDC (Σχήμα 4.25) και δοκιμές CIDC (Σχήμα 4.26).



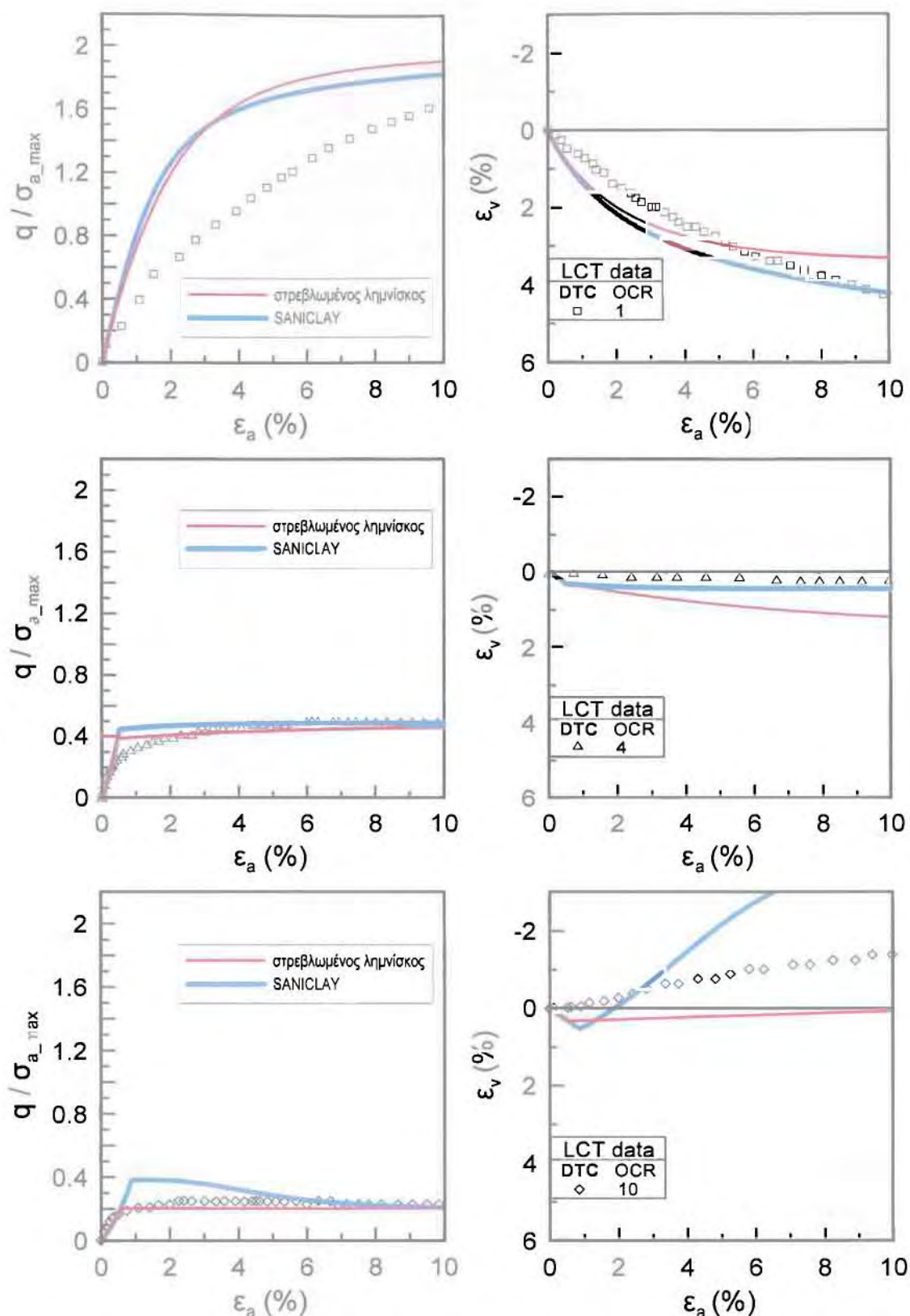
Σχήμα 4.23. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.40, 0.77)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 4.24. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.40, 0.77)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 4.25. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.40, 0.77)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 4.26. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου λημνίσκου» με  $(m, n) = (1.40, 0.77)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Με βάση τις συγκρίσεις των Σχημάτων 4.23 έως 4.26 προκύπτει ότι το νέο προσομοίωμα για μοναδικό ζεύγος τιμών  $(m, n)$  δεν επιφέρει κάποια σημαντική βελτίωση στην προσομοίωση της απόκρισης της αργίλου LCT, σε σύγκριση με το καταστατικό προσομοίωμα SANICLAY. Δεδομένου μάλιστα ότι το νέο προσομοίωμα χαρακτηρίζεται και από μια επιπλέον σταθερά έναντι του SANICLAY (έχει ζεύγος σταθερών  $(m, n)$  για την επιφάνεια διαρροής έναντι της σταθεράς  $N$  του SANICLAY), το δεύτερο είναι μάλλον προτιμότερο προς χρήση σε σχέση με το «στρεβλωμένο λημνίσκο».

## Κεφάλαιο 5: Αλλαγή της μορφής της επιφάνειας διαρροής: στρεβλωμένο ελλειψοειδές

### 5.1: Εισαγωγή

Η διερεύνηση στο προηγούμενο κεφάλαιο μιας νέας επιφάνειας διαρροής της μορφής του «στρεβλωμένου λημνίσκου» δεν επέφερε ικανοποιητική βελτίωση στις προβλέψεις για την απόκριση της αργίλου στο σύνολο των αναλύσεων σε σύγκριση με τις προβλέψεις του SANICLAY, δεδομένης μάλιστα και της προσαύξησης κατά μίας του συνολικού πλήθους των σταθερών του προσομοιώματος.

Ωστόσο, η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης του SANICLAY οδήγησε στη μελέτη μιας δεύτερης εναλλακτικής μορφής επιφάνειας διαρροής, αυτής του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς», η οποία αναφέρεται στη διδακτορική διατριβή του Taiebat (2008). Έτσι, κατ' αντιστοιχία με το Κεφάλαιο 4, στο παρόν κεφάλαιο, βασική επιδίωξη είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων ενός νέου προσομοιώματος που διαθέτει επιφάνεια διαρροής αυτή της μορφής του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς», αλλά κατά τα άλλα διατηρεί τα χαρακτηριστικά του SANICLAY.

Το προσομοίωμα που εξετάζεται, και αναφέρεται με το όνομα «στρεβλωμένο ελλειψοειδές» χάριν απλότητας και συντομίας, εισάγει μια νέα επιφάνεια διαρροής η οποία υπακούει στη μαθηματική σχέση:

$$f = (q - p\beta)^2 - (XN^2 - \beta^2) p (p_0 - p) = 0 \quad (5.1\alpha)$$

$$\text{όπου } X = \left( n + 2(1-n) \cdot \frac{p}{p_0} \right)^z \quad (5.1\beta)$$

με τις  $n$ ,  $z$  και  $N$  να αποτελούν τις νέες σταθερές του προσομοιώματος, που αντικαθιστούν τη σταθερά  $N$  του SANICLAY.

Παρατηρείται ότι για  $z=0$  ή/και  $n=1$  η σχέση (5.1β) δίνει  $X=1$ , και συνεπώς η σχέση (5.1α) μεταπίπτει στη σχέση (2.6), που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής του SANICLAY. Αυτός είναι ο λόγος που η σταθερά  $N$  και στο «στρεβλωμένο

ελλειψοειδές» παίζει αντίστοιχο ρόλο με εκείνον που παίζει στο προσομοίωμα SANICLAY.

Λύνοντας τη σχέση (5.1α) ως προς  $q$  προκύπτει:

$$q = p\beta \pm \sqrt{p(p-p_0)(\beta^2 - XN^2)} \quad (5.2)$$

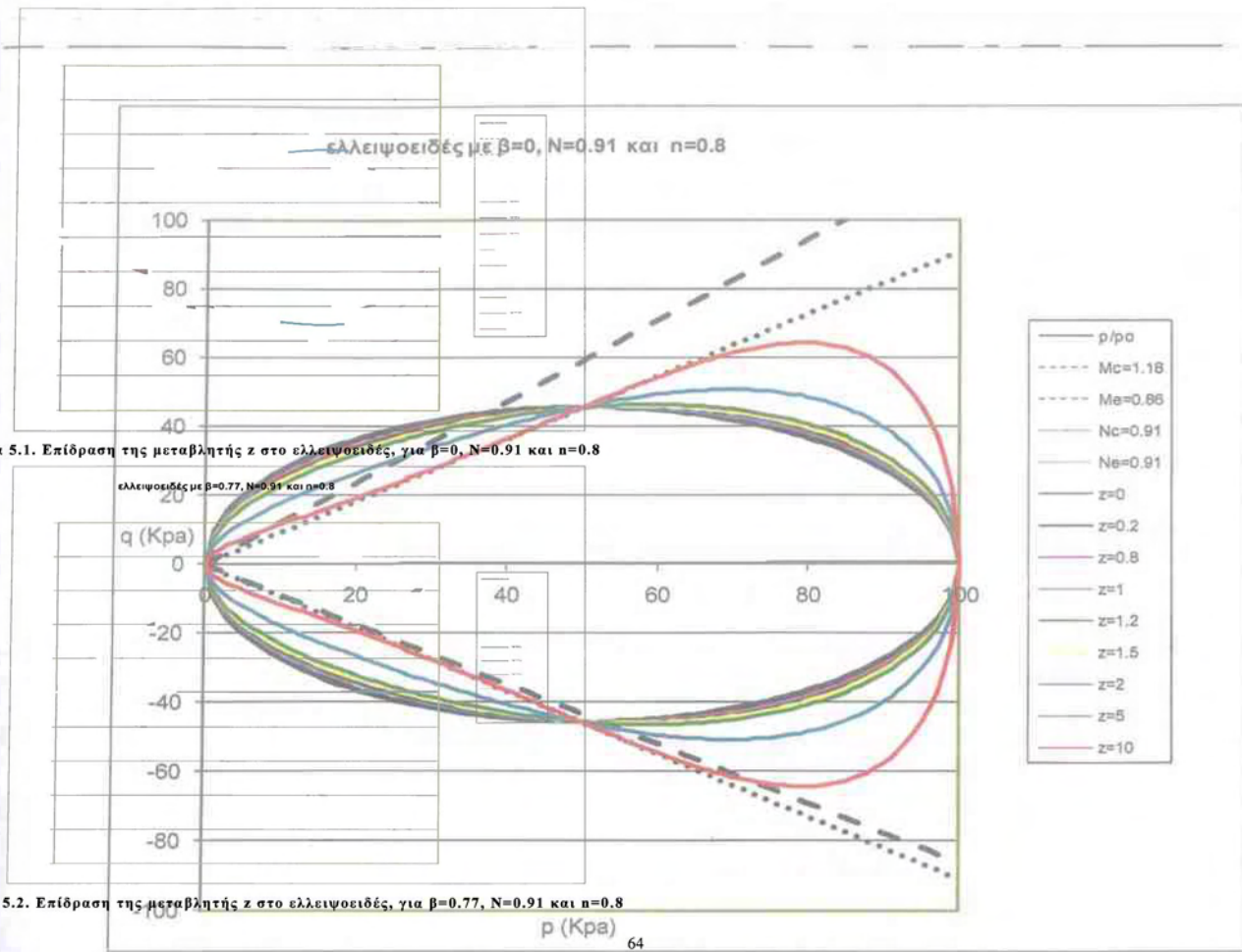
Με βάση τη σχέση (5.2) προκύπτει ότι για να μην εκφυλίζεται η επιφάνεια διαρροής του νέου προσομοιώματος στην ευθεία της μορφής  $q=p\beta$  θα πρέπει να ισχύει:

$$\beta^2 < XN^2 \Rightarrow |\beta| < N \left( n + 2(1-n) \frac{p}{p_0} \right)^{z/2} \quad (5.3)$$

Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν την επιρροή στην επιφάνεια διαρροής του στρεβλωμένου ελλειψοειδούς με μεταβλητές τις νέες σταθερές του προσομοιώματος σε δύο ομάδες περιπτώσεων:  $\beta=0$ , στο τέλος δηλαδή της ισοτροπικής στερεοποίησης και  $\beta=\eta_{k0}=0.77$  που αντιστοιχεί στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα (5.1) και (5.2) διαφαίνεται η επίδραση της μεταβλητής  $z$  για  $N=0.91$  και  $n=0.8$  ενώ στα Σχήματα (5.3) και (5.4) η επίδραση της μεταβλητής  $n$  για  $N=0.91$  και  $z=0.8$  και για τις δύο ομάδες περιπτώσεων. Στα Σχήματα (5.1) έως (5.4) είναι δυνατή η σύγκριση των επιφανειών του στρεβλωμένου ελλειψοειδούς με αυτές του προσομοιώματος SANICLAY, οι οποίες προκύπτουν για  $z=0$  ή/και  $n=1$ .

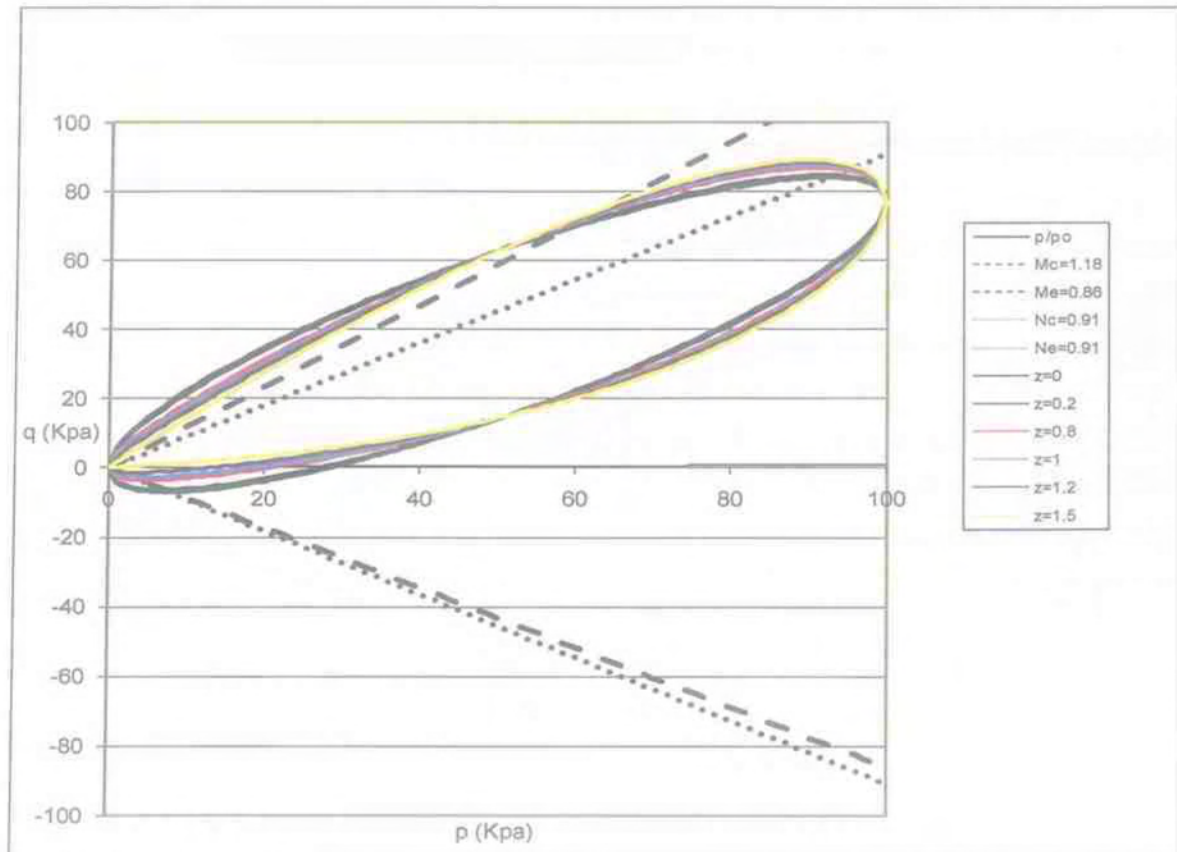
Τα Σχήματα (5.5) και (5.6) παρουσιάζουν την επιρροή της μεταβλητής  $N$  για  $z=0.8$  και  $n=0.8$ , σε σύγκριση με την αντίστοιχη για κάθε τιμή  $N$  επιφάνεια διαρροής του SANICLAY. Ενδεικτικά, τα σχήματα που ακολουθούν έχουν γίνει για τιμή της παραμέτρου ισοτροπικής κράτυνσης  $p_0=100$  KPa, και αποτυπώνουν και τις ευθείες (με μαύρη διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχούν στις Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) για τριαξονική θλίψη και εφελκυσμό, κλίσεων  $M_c=1.18$  και  $M_e=0.86$ , αντίστοιχα, καθώς και τις ευθείες για  $N_c=N_e=0.91$  (με μαύρη εστιγμένη γραμμή).

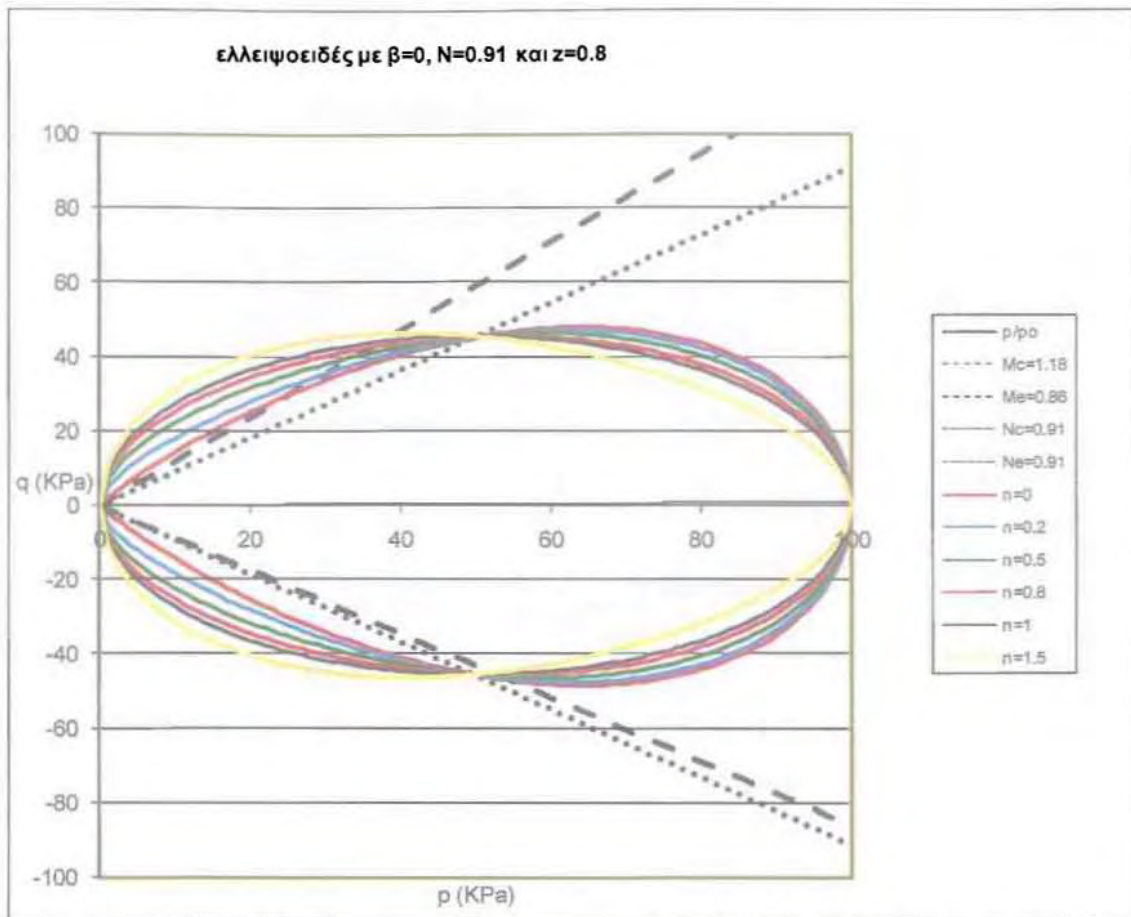




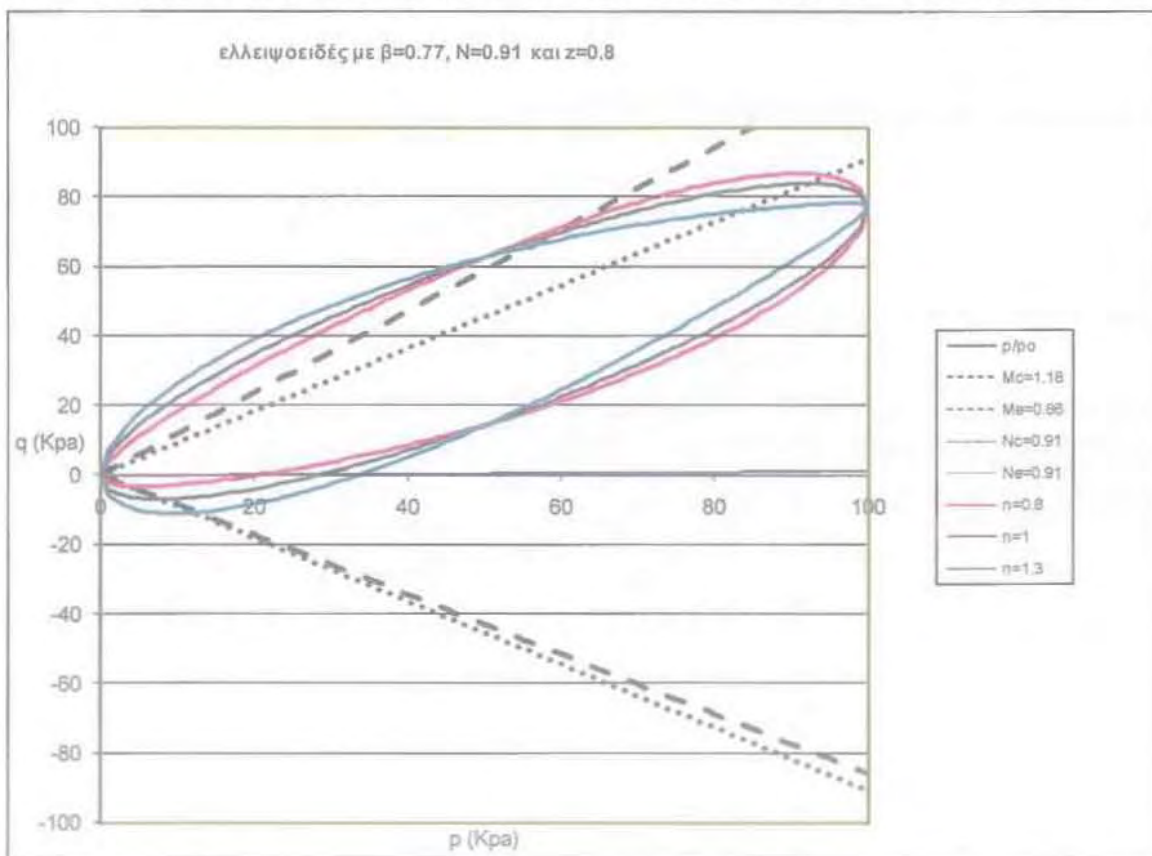
Σχήμα 5.1. Επίδραση της μεταβλητής z στο ελλειψοειδές, για  $\beta=0, N=0.91$  και  $n=0.8$

Σχήμα 5.2. Επίδραση της μεταβλητής z στο ελλειψοειδές, για  $\beta=0.77, N=0.91$  και  $n=0.8$

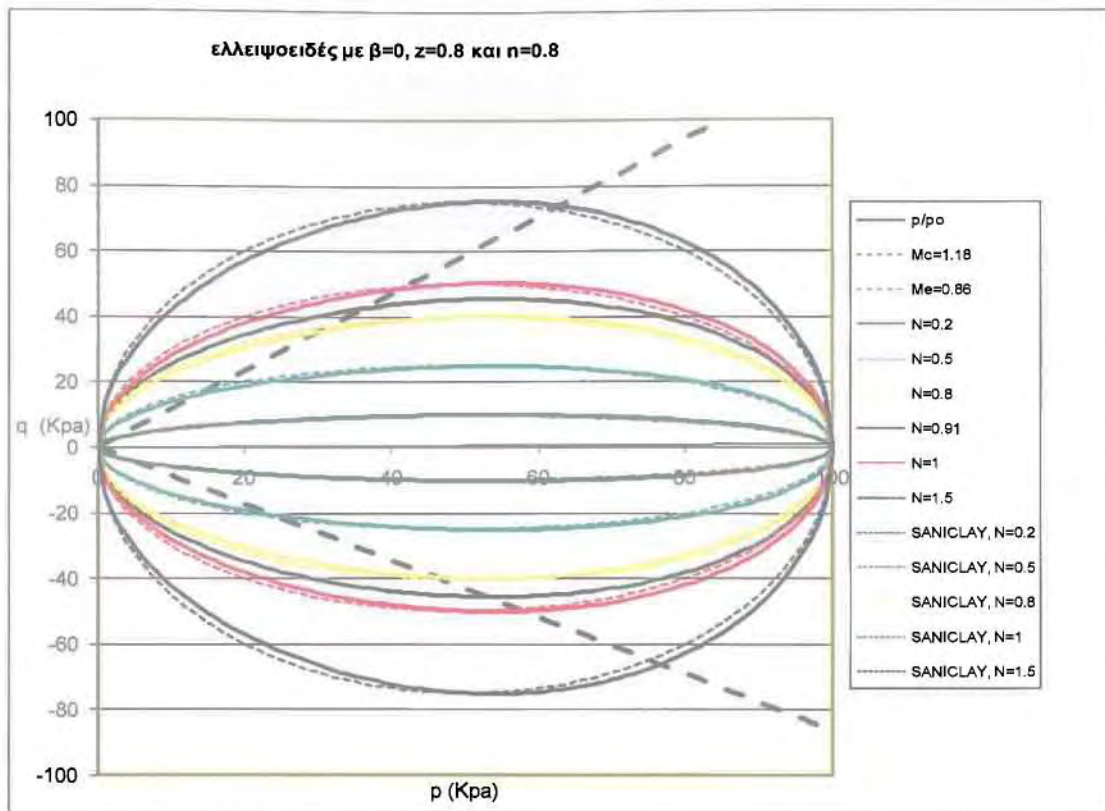




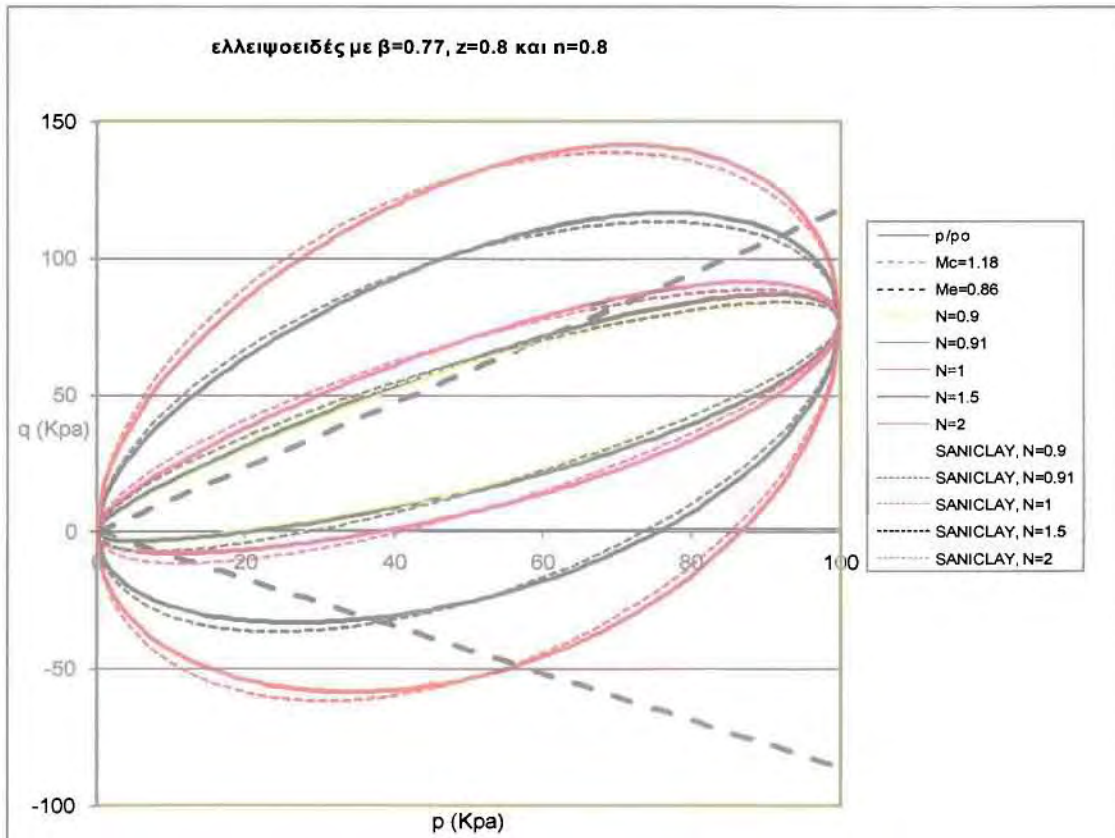
Σχήμα 5.3. Επίδραση της μεταβλητής  $n$  στο ελλειψοειδές, για  $\beta=0$ ,  $N=0.91$  και  $z=0.8$



Σχήμα 5.4. Επίδραση της μεταβλητής  $n$  στο ελλειψοειδές, για  $\beta=0.77$ ,  $N=0.91$  και  $z=0.8$



Σχήμα 5.5. Επίδραση της μεταβλητής  $N$  στο ελλειψοειδές και το SANICLAY, για  $\beta=0$ ,  $z=0.8$  και  $n=0.8$



Σχήμα 5.6. Επίδραση της μεταβλητής  $N$  στο ελλειψοειδές και το SANICLAY, για  $\beta=0.77$ ,  $z=0.8$  και  $n=0.8$

Από τα παραπάνω Σχήματα προκύπτει ότι αν η σταθερά του νέου προσομοιώματος  $n$  έχει τιμή  $n < 1$ , τότε η στρέβλωση που εισάγεται αυξάνει το εύρος του ελλειψοειδούς σε μεγάλες τιμές  $p/p_0$  (π.χ  $\geq 0.6$ ) και ταυτόχρονα το απομειώνει σε μικρές τιμές  $p/p_0$  (π.χ  $\leq 0.4$ ). Επισημαίνεται επίσης ότι αντίθετης μορφής στρέβλωση του ελλειψοειδούς προκύπτει για τιμές του  $n > 1$ , ενώ για  $n = 1$  το ελλειψοειδές μεταπίπτει στη μορφή που έχει στο SANICLAY. Επιπλέον προκύπτει ότι η ενδεικτική τιμή  $n = 0.8$  φαίνεται ικανοποιητική για τη μόρφωση της νέας μορφής επιφάνειας διαρροής, σύμφωνα με τα Σχήματα (5.3) και (5.4), δεδομένου ότι σε σχέση με το SANICLAY οδηγεί σε σχετικά μεγαλύτερη τιμή μέγιστου  $q$  για φόρτιση που ξεκινά από  $\beta=0.77$  και  $OCR=1$ , και αντίστοιχα μικρότερη τιμή μέγιστου  $q$  για φορτίσεις σε μεγάλες τιμές του  $OCR$ , τουλάχιστον για τιμές  $z > n$ . Πιο συγκεκριμένα, για τιμές  $n < 1$ , αύξηση της σταθεράς  $z$  του νέου προσομοιώματος οδηγεί σε περαιτέρω στρέβλωση της επιφάνειας διαρροής προς τη σωστή ποιοτικά κατεύθυνση. Με βάση όμως τη σχέση (5.3), δεν είναι δυνατή η επ' αόριστον στρέβλωση της επιφάνειας και αύξηση της τιμής του  $z$ , για δεδομένο  $n$ , εκτός αν το  $\beta=0$ . Αυτός είναι ο λόγος που στα προηγούμενα σχήματα (όπου  $n=0.8$ ), για την περίπτωση της ιστροπικής φόρτισης ( $\beta=0$ ) οι παρουσιαζόμενες τιμές της σταθεράς  $z$  κυμαίνονται από 0.8 έως και 2.0, ενώ για την περίπτωση μονοδιάστατης στερεοποίησης ( $\beta=0.77$ ), η τιμή του  $z$  δέχεται τιμές από 0.8 έως και 1.0, αλλά όχι μεγαλύτερη.

## 5.2: Παρουσίαση του νέου προσομοιώματος

Υιοθετώντας ως μορφή της επιφάνειας διαρροής εκείνη του στρεβλωμένου ελλειψοειδούς (σχέση 5.1α) συνεπάγεται εκτίμηση των παραγώγων αυτής ως προς τις μεταβλητές κατάστασης  $p$  και  $q$  και τις παραμέτρους κράτυνσης  $p_0$  και  $\beta$ . Οι παράγωγοι της επιφάνειας διαρροής ως προς  $p$ ,  $p_0$ ,  $q$  και  $\beta$  που χρησιμοποιήθηκαν στο νέο προσομοίωμα και προκύπτουν από τη σχέση (5.1) είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{\partial f}{\partial p} = p(XN^2 - \eta^2) + \frac{\partial X}{\partial p} N^2 p(p - p_0) \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial p_0} = -p(XN^2 - \beta^2) + \frac{\partial X}{\partial p_0} N^2 p(p - p_0) \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial q} = 2(q - p\beta) = 2p(\eta - \beta) \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial p} = -2p(q - \beta p_0) \quad (5.7)$$

όπου:

$$\frac{\partial X}{\partial p} = \frac{2z(1-n)}{p_0} \left( n + 2(1-n) \frac{p}{p_0} \right)^{z-1} \quad (5.8)$$

$$\frac{\partial X}{\partial p_0} = -\frac{2z(1-n)p}{p_0^2} \left( n + 2(1-n) \frac{p}{p_0} \right)^{z-1} \quad (5.9)$$

Οι σχέσεις (5.6) και (5.7) είναι ίδιες με τις αντίστοιχες εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY, ενώ το ίδιο ισχύει και για τις παραγώγους της επιφάνειας διαρροής ως προς  $p$  και  $p_0$  που δίδονται από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) για την τιμή  $X=1$ . Σύμφωνα και με τις ανωτέρω σχέσεις, η τιμή  $X=1$  για κάθε τιμή του  $p$  προκύπτει για  $n=1$  ή/και  $z=0$ .

Συγκεντρωτικά και σε αναφορά με το Κεφάλαιο 2, οι εξισώσεις που εξακολουθούν να ισχύουν στο νέο προσομοίωμα «στρεβλωμένο ελλειψοειδές» είναι οι εξής:

- εξίσωση (2.1) που δίνει τις σχέσεις εκτίμησης των ελαστικών παραμορφώσεων
- εξίσωση (2.2) που δίνει την ελαστική σχέση συσχέτισης των ελαστικών μέτρων  $K$  και  $G$
- εξίσωση (2.3) που δίνει τις σχέσεις εκτίμησης των πλαστικών παραμορφώσεων
- εξίσωση (2.4) που περιγράφει την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού,  $g=0$
- εξίσωση (2.5) που περιγράφει τη διαστολικότητα του προσομοιώματος
- εξίσωση (2.7) που δίνει το ρυθμό μεταβολής της μεταβλητής  $p_0$
- εξίσωση (2.8) που δίνει το ρυθμό μεταβολής της μεταβλητής  $a$ ,  $\dot{a}$

Αντιθέτως, οι εξισώσεις που αλλάζουν στο νέο προσομοίωμα είναι οι ακόλουθες:

• εξίσωση (2.6) που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής,  $f=0$ , και δίνεται πια από τη νέα σχέση (5.1α)

• εξίσωση (2.9) που περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της μεταβλητής  $\beta$ , δηλαδή της  $\beta$ . Η εξίσωση αυτή μεταβάλλεται, καθώς ως νέο όριο της μεταβλητής  $\beta$  υιοθετείται η σχέση:

$$\beta^b = +N \min \left\{ \left[ (n+2(1-n))^{(z/2)} \right], \left[ n^{(z/2)} \right] \right\}, \quad (5.10)$$

μια σχέση που εξασφαλίζει την ύπαρξη της επιφάνειας για όλες τις τιμές  $p$ , ανεξαρτήτως των τιμών  $z$ ,  $n$  και  $N$ .

• εξίσωση (2.10) που δίνει τη σχέση του δείκτη φόρτισης,  $L$ , δεδομένου ότι αλλάζει η παράγωγος της  $f=0$  ως προς τη μεταβλητή κατάστασης  $p$  (Σχέση 5.4)

• εξίσωση (2.11) που δίνει το πλαστικό μέτρο κράτυνσης  $K_p$ , δεδομένου ότι αλλάζουν οι παράγωγοι της  $f=0$  ως προς την παράμετρο κράτυνσης  $p_0$  (Σχέση 5.5) αλλά και του ρυθμού μεταβολής της ίδιας της μεταβλητής  $\beta$  (Σχέση 2.9, με το νέο περιορισμό:  $\beta^b = +N \min \left\{ \left[ (n+2(1-n))^{(z/2)} \right], \left[ n^{(z/2)} \right] \right\}$ ).

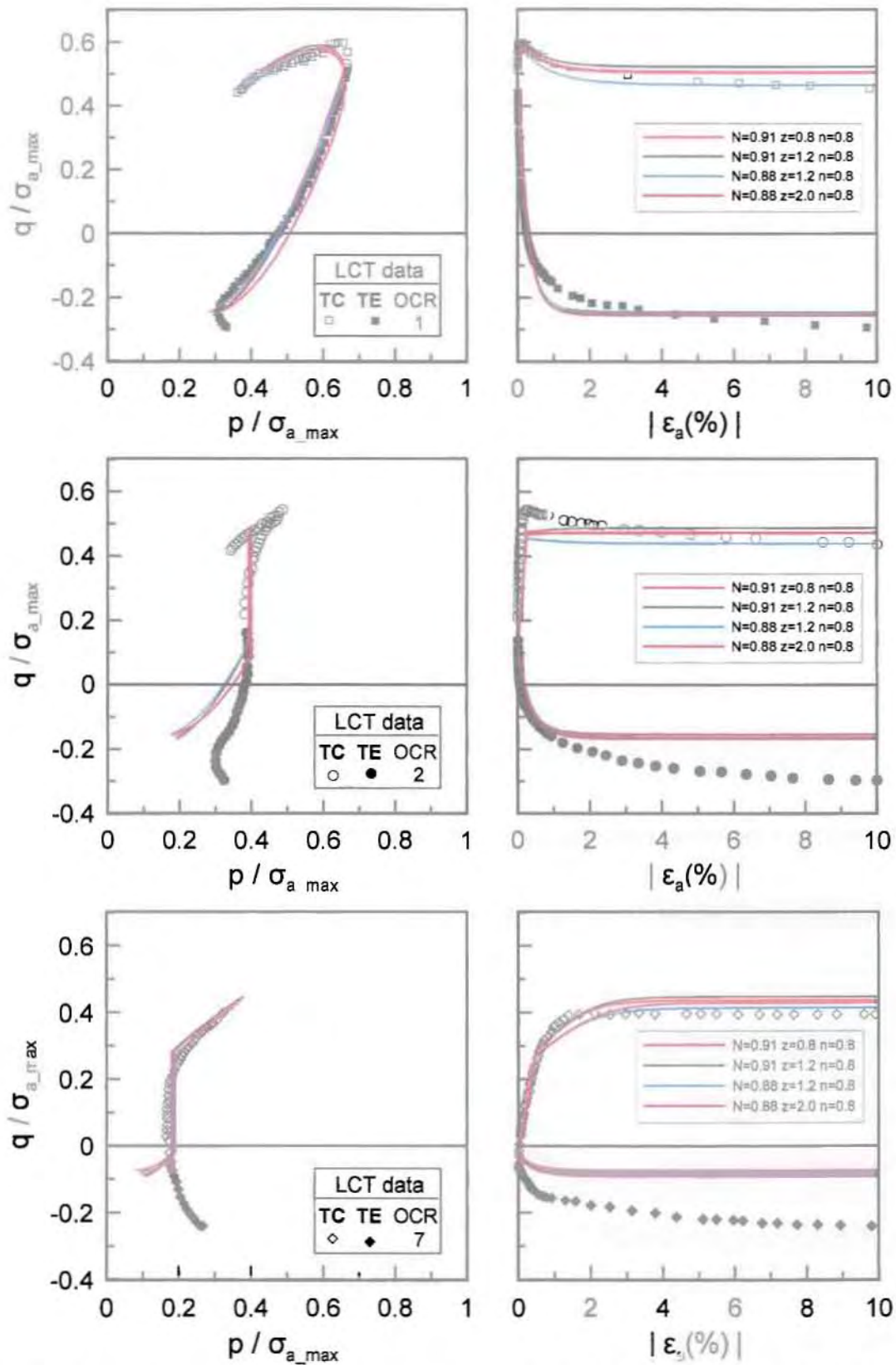
### 5.3. Προσομοιώσεις της απόκρισης της αργίλου LCT με το νέο προσομοίωμα

#### 5.3.1: Επίδραση των τιμών των σταθερών $N$ και $z$ στην προβλεπόμενη απόκριση

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται παραμετρικές αναλύσεις με χρήση του νέου προσομοιώματος «στρεβλωμένο ελλειψοειδές», για διαφορετικά ζεύγη τιμών  $N$  και  $z$ , των νέων σταθερών που αντικαθιστούν τη σταθερά  $N$  της επιφάνειας διαρροής του SANICLAY. Η σταθερά  $n$  έχει την τιμή  $n=0.8$  σε όλες τις δοκιμές που ακολουθούν. Ο στόχος των παραμετρικών αναλύσεων είναι να βρεθεί το ζεύγος τιμών των  $(N, z, n)$  που δίνει τις βέλτιστες προσομοιώσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων για την άργιλο LCT, στις κάτωθι περιπτώσεις φόρτισεων:

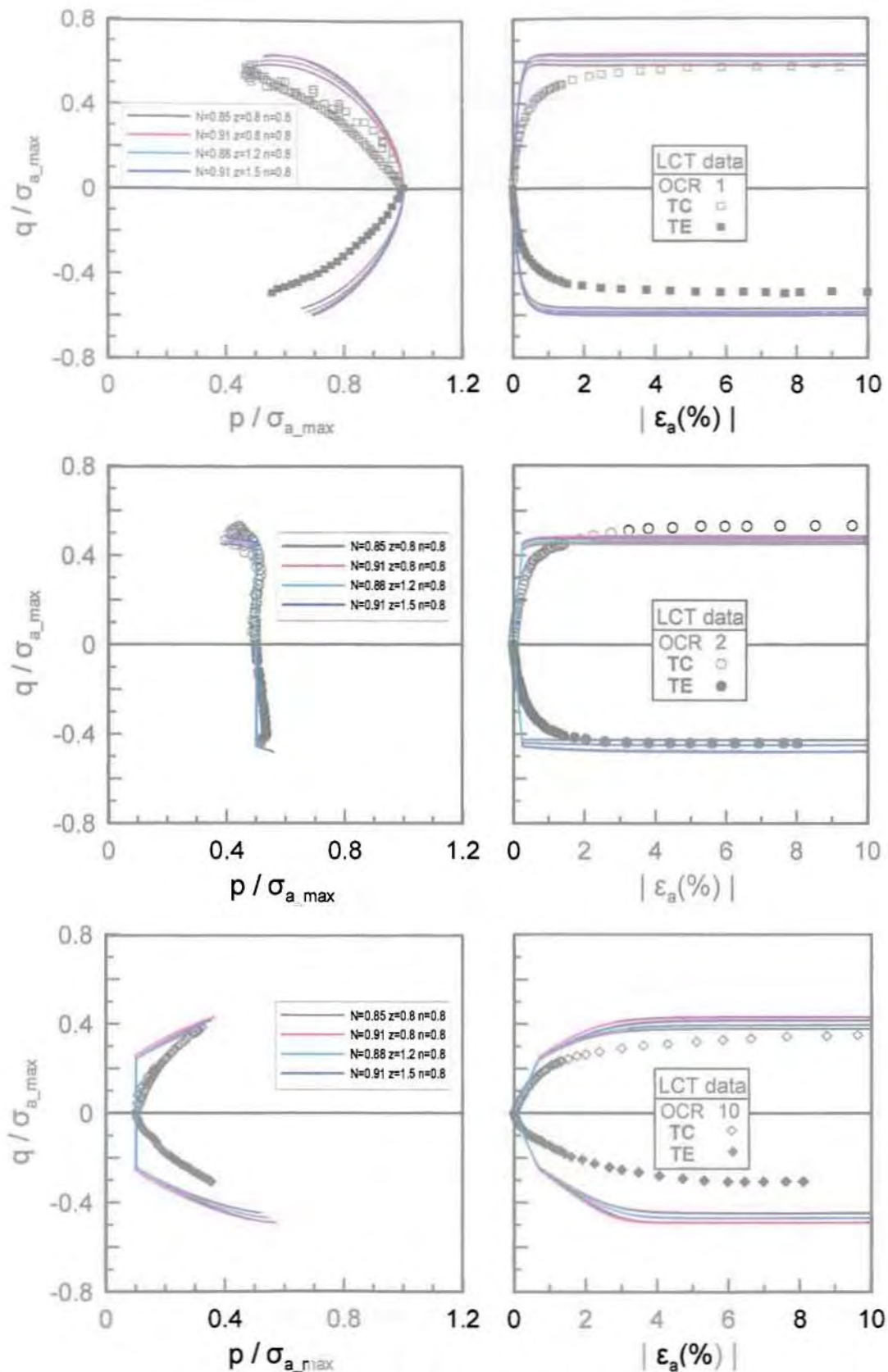
- δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης CKoUC και εφελκυσμού CKoUE, για διάφορες τιμές OCR μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (Σχήμα 5.7)

- δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης CIUC και εφελκυσμού CIUE, για διάφορες τιμές OCR μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 5.8)
- δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης CKoDC, για διάφορες τιμές OCR μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (Σχήμα 5.9)
- δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης CIDC, για διάφορες τιμές OCR μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 5.10)

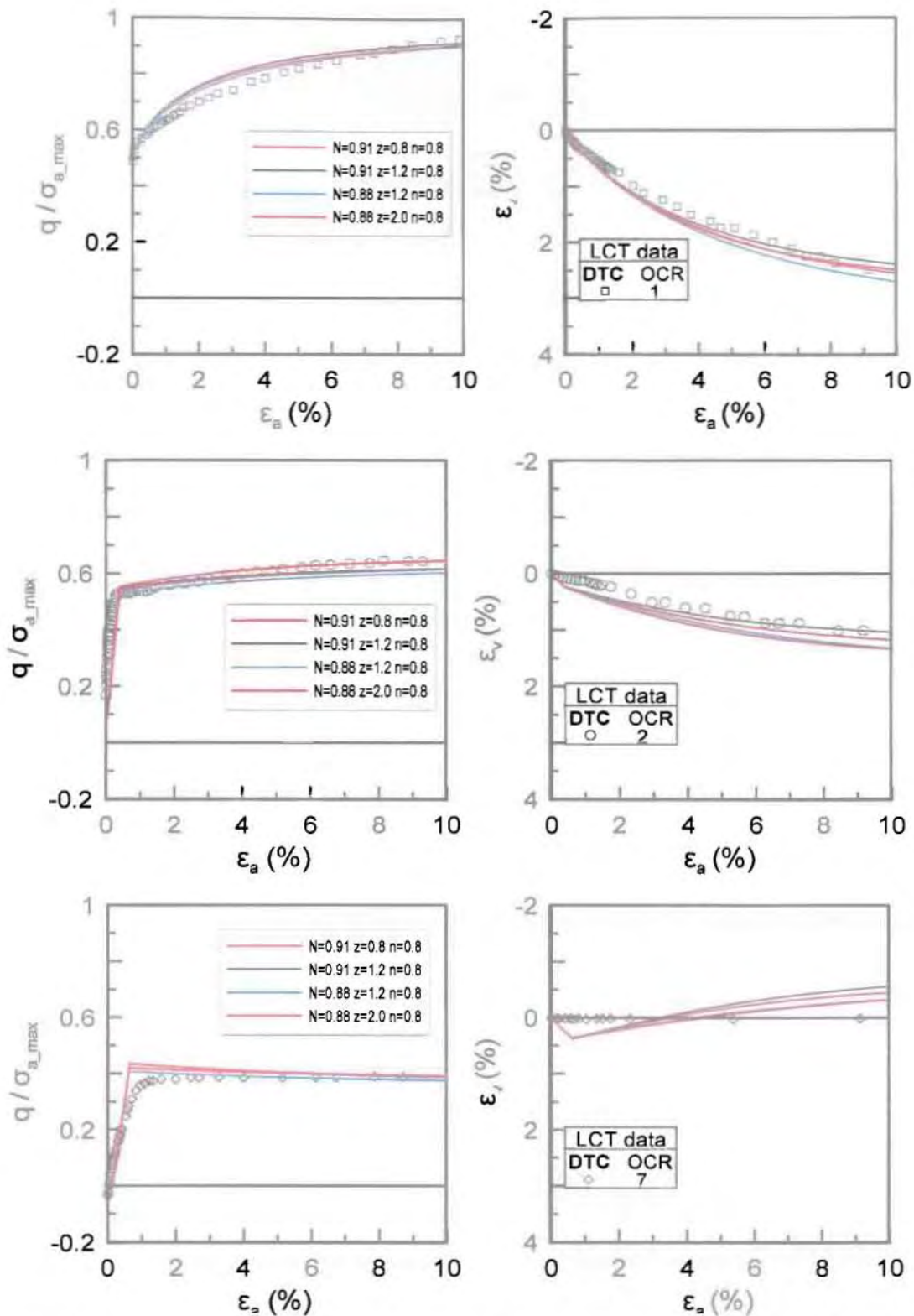


Σχήμα 5.7. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» για  $n=0.8$  και διάφορες τιμές των σταθερών  $N$  και  $z$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

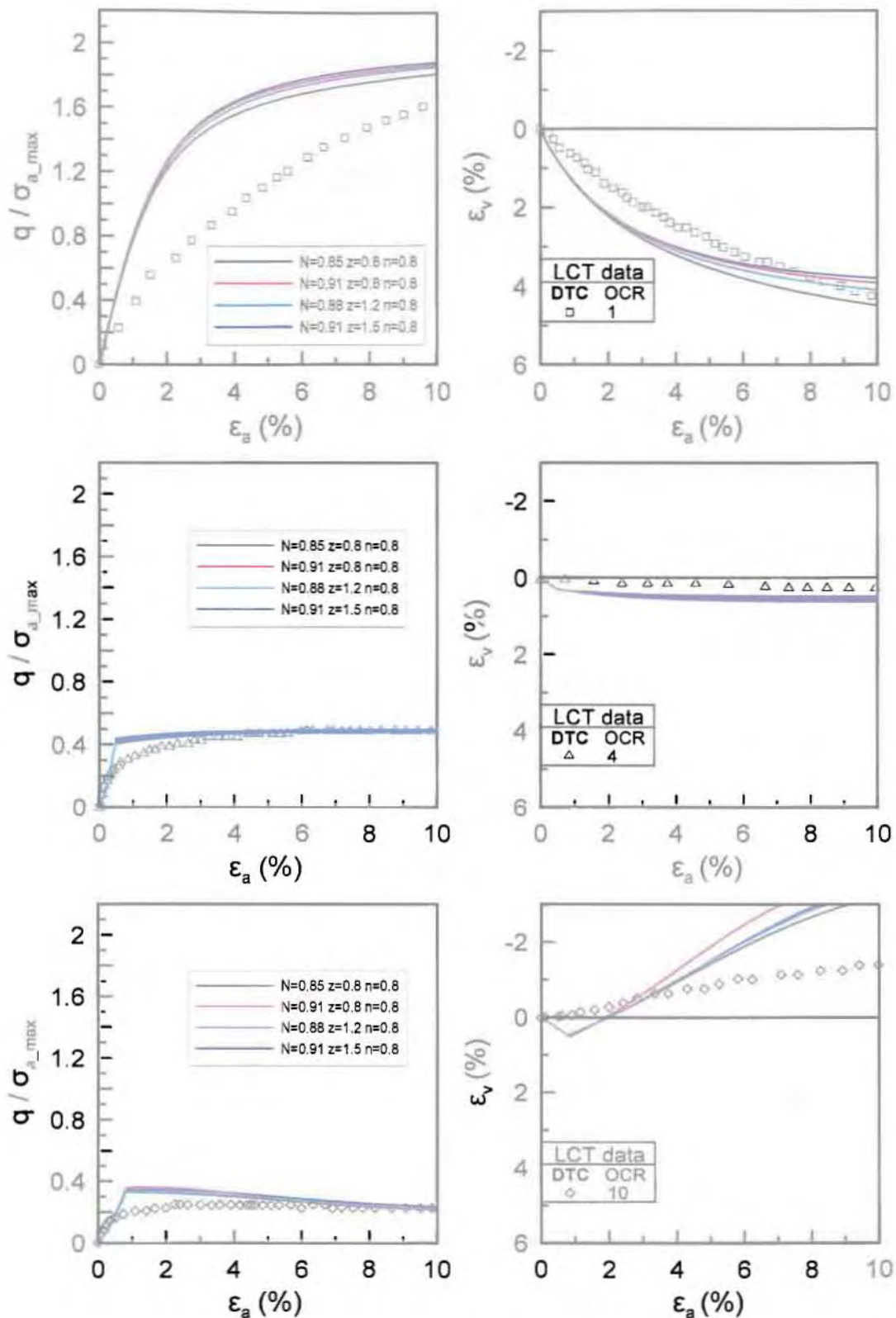




Σχήμα 5.8. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» για  $n=0.8$  και διάφορες τιμές των σταθερών  $N$  και  $z$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



Σχήμα 5.9. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» για  $n=0.8$  και διάφορες τιμές των σταθερών  $N$  και  $z$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 5.10. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» για  $n=0.8$  και διάφορες τιμές των σταθερών  $N$  και  $z$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Από τα Σχήματα 5.7 έως 5.10 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τιμές των σταθερών  $N$  και  $z$  που δίνουν, εν γένει, ρεαλιστικές προβλέψεις απόκρισης αργίλων κυμαίνονται ως εξής:  $N=0.85 - 0.91$ ,  $z=0.8 - 1.5$ . Μάλιστα παρατηρείται γενικώς ότι η τιμή της μεταβλητής  $z$  είναι μεγαλύτερη ή ίση της μεταβλητής  $n$ , ώστε να μην προκύπτει πρόβλημα ύπαρξης της επιφάνειας διαρροής για τις πιθανές τιμές του  $\beta$ .
- Το ζεύγος τιμών  $N$  και  $z$  που οδηγεί σε καλύτερες προσομοιώσεις για αναλύσεις τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (CKο δοκιμές, βλέπε Σχήματα 5.7 και 5.9), είναι:  $N=0.88$ ,  $z=1.2$ . Φυσικά, ανά περίπτωση, μπορούν να υπάρχουν και σχετικά καλύτερες προβλέψεις, αλλά το προαναφερθέν ζεύγος τιμών δίνει μια συνολικά βέλτιστη προσομοίωση για δοκιμές διάτμησης μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση.
- Το ζεύγος τιμών  $N$  και  $z$  που οδηγεί σε καλύτερες προσομοιώσεις για αναλύσεις τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (CI δοκιμές, βλέπε Σχήματα 5.8 και 5.10), είναι:  $N=0.85$ ,  $z=0.8$ . Φυσικά και πάλι, ανά περίπτωση, μπορούν να υπάρχουν και σχετικά καλύτερες προβλέψεις, αλλά το προαναφερθέν ζεύγος τιμών δίνει μια συνολικά βέλτιστη προσομοίωση για δοκιμές διάτμησης μετά από ισοτροπική στερεοποίηση.

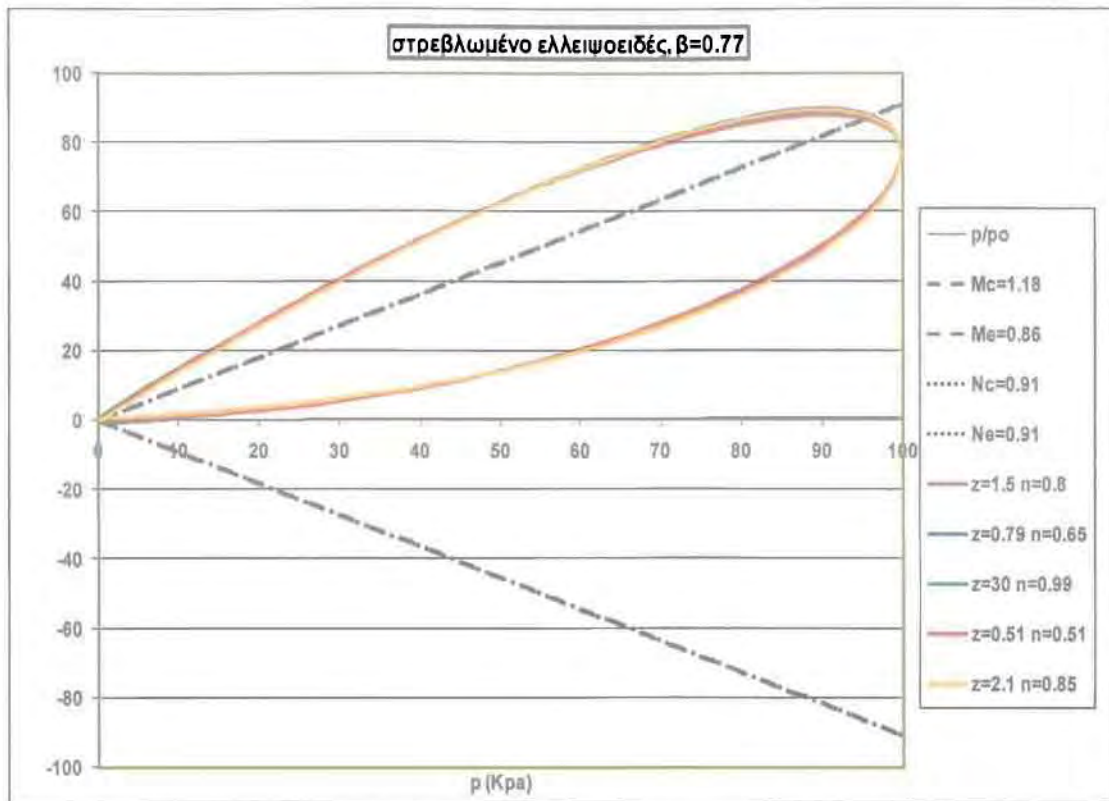
Ειδικότερα για τη δοκιμή  $(N, z, n) = (0.88, 2.0, 0.8)$  επισημαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της μεταβλητής  $\beta$  στο τέλος της μονοδιάστατης στερεοποίησης είναι ίση με  $\beta = 0.704 < \beta_K = 0.77$ , μια τιμή που δε μεταβάλλεται κατά την τριαξονική θλίψη που ακολουθεί (για  $OCR=1$ ). Αυτό οφείλεται στο ότι η ως άνω τιμή του  $\beta$  είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη με βάση τη σχέση 5.10 (για τις εν λόγω τιμές σταθερών), και η εισαγωγή αυτής της τιμής ως τιμής για την παράμετρο  $\beta^b$  στη σχέση (2.9) δεν επέτρεψε την περαιτέρω αύξηση του  $\beta$  και τον επαγόμενο εκφυλισμό της επιφάνειας διαρροής σε ευθεία (για κάποιες τιμές του  $p/p_0$ ). Παρά το γεγονός ότι η επιφάνεια διαρροής δε στρέφεται περαιτέρω, οι προβλέψεις που προκύπτουν για την εν λόγω δοκιμή στην τριαξονική θλίψη (για  $OCR=1$ ) που ακολουθεί είναι σχετικά εύλογες. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η επιφάνεια διαρροής σε τέτοιες φορτίσεις δεν αναμένεται να στραφεί σημαντικά, ούτως ή άλλως. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και στις φορτίσεις τριαξονικού εφελκυσμού, όπου η μικρότερη τιμή του  $\beta$  σε σχέση με την αναμενόμενη οδηγεί σε αρχικώς ελαστική συμπεριφορά κατά τον τριαξονικό εφελκυσμό (για

OCR=1). Αυτό αποτυπώνεται με την αρχικώς γραμμική ενεργό τασική όδευση (με  $p$  σταθερό) μέχρι της στιγμής που η τρέχουσα τάση ( $p, q$ ) συναντήσει την επιφάνεια διαρροής και ενεργοποιήσει την ελαστοπλαστική κράτυνση αυτής και τη συνακόλουθη κύρτωση της ενεργού τασικής όδευσης.

Επομένως, χάριν ακριβέστερων προβλέψεων σε δοκιμές διάτμησης που ξεκινούν μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση, παρουσιάζεται επιτακτική η ανάγκη μη επιλογής τιμών για τις σταθερές ( $N, z, n$ ) που οδηγούν σε  $\beta^{\max} < \bar{\beta}_{K_o} = \eta_{K_o}$ . Αυτή η αναγκαιότητα, σε συνδυασμό με τη συνθήκη  $n < 1$  (για επιθυμητή στρέβλωση της επιφάνειας διαρροής), δίνει με βάση τη σχέση (5.10) ότι απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαμόρφωση ρεαλιστικών προβλέψεων ελαστοπλαστικής απόκρισης αργίλων είναι η ισχύς της ακόλουθης ανίσωσης:

$$Nn^{(z/2)} \geq \eta_{K_o} \quad (5.11)$$

Η αλληλεξάρτηση μεταξύ των τριών σταθερών του προσομοιώματος σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση καταδεικνύει ότι αρκεί ο ορισμός δύο σταθερών στο στρεβλωμένο ελλειψοειδές ( $N$  και  $z$  ή  $N$  και  $n$ ). Αυτός είναι και ο λόγος που όλες οι προηγούμενες (αλλά και οι επόμενες) προβλέψεις έγιναν για σταθερή τιμή του  $n=0.8$ . Για να καταδειχθεί ακόμη περισσότερο το γεγονός ότι υπάρχουν συνδυασμοί τιμών ( $N, z, n$ ) που οδηγούν πρακτικά στην ίδια επιφάνεια διαρροής, στο Σχήμα 5.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται πέντε τέτοιες επιφάνειες διαρροής για  $\beta=\eta_{K_o}=0.77$ , η καθεμία από τις οποίες προέκυψε από δύο διαφορετικά ζεύγη ( $z, n$ ) και για  $N=0.91$ . Ενδεικτικά η τιμή της μέγιστης ενεργούς ορθής τάσης σε όλες τις επιφάνειες του Σχήματος 5.11 είναι  $p_o=100$  KPa.



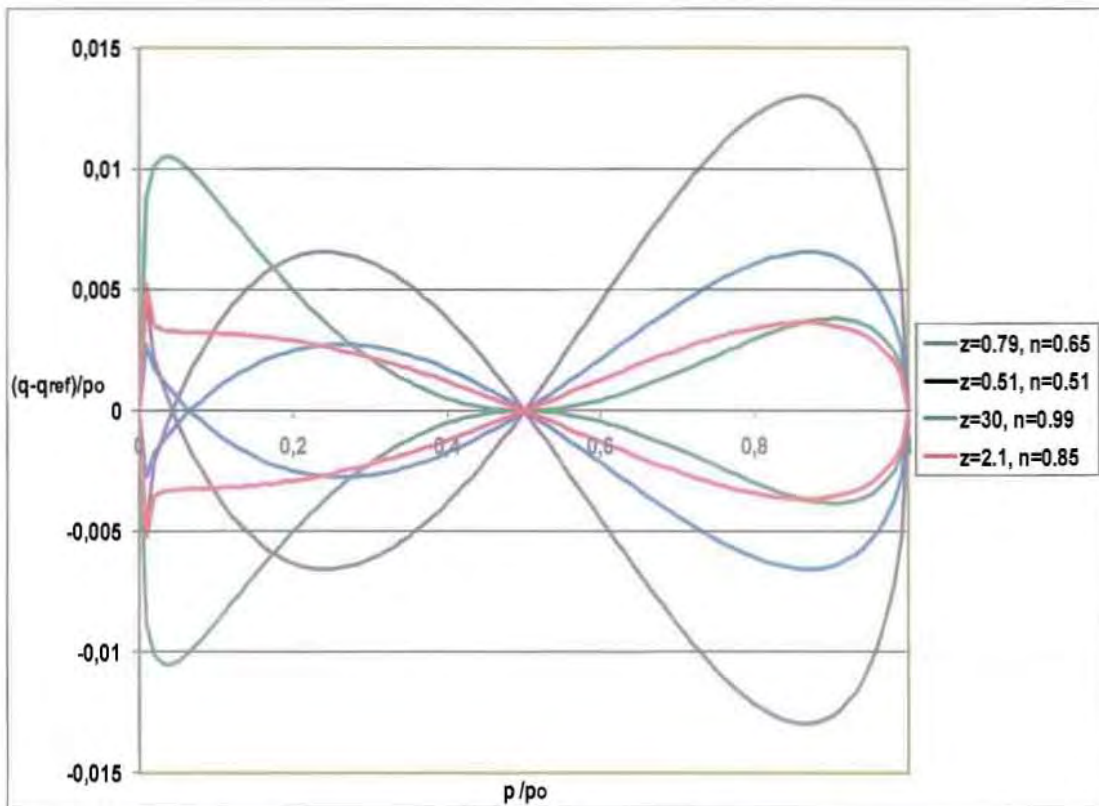
Σχήμα 5.11. Παρόμοιες επιφάνειες διαρροής του στρεβλωμένου ελλειψοειδούς για  $\beta=0.77$  και  $N=0.91$ , για διαφορετικά ζεύγη τιμών  $(z, n)$ .

Το εν λόγω ζήτημα απομείωσης των δύο επιπλέον σταθερών  $(n, z)$  του νέου προσομοιώματος σε πρακτικώς μία επιπλέον σταθερά, τη  $z$ , ουσιαστικά οδηγεί στην ανάγκη κατοχύρωσης μιας διαδικασίας με βάση την οποία να μπορεί κάποιος να εκτιμήσει την επιθυμητή τιμή του  $z$ , με βάση τις δεδομένες τιμές των  $N$  και  $n$ . Αυτό είναι το αντικείμενο της επόμενης υπο-παραγράφου.

### 5.3.2: Ορισμός της σταθεράς $z$ με βάση τις τιμές $n$ και $N$ και μία δεδομένη επιφάνεια διαρροής αναφοράς

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η δυνατότητα ορισμού της σταθεράς  $z$  του προσομοιώματος, με δεδομένα τις σταθερές  $n$  και  $N$  και μία δεδομένη επιφάνεια διαρροής αναφοράς. Για το σκοπό αυτό, ως επιφάνεια διαρροής αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια που προκύπτει για  $(z_{ref}, n_{ref}) = (1.5, 0.8)$  και  $N=0.91$ , που είναι μια από τις επιφάνειες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11 (για  $\beta=0.77$  και  $p_0=100\text{KPa}$ ). Έτσι, στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η διαφορά στις τιμές του  $q/p_0$  (ως συνάρτηση του  $p/p_0$  που δίνουν όλες οι υπόλοιπες πρακτικώς όμοιες επιφάνειες διαρροής του Σχήματος 5.11 σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς, ώστε να ποσοτικοποιηθεί το σχετικό λάθος.

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι το σχετικό λάθος είναι συνάρτηση του  $p/p_0$ , αλλά κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Μάλιστα στην αρχή των αξόνων ( $p=0$ ), για  $p=p_0$ , αλλά και για  $p/p_0=0.5$  το σχετικό λάθος είναι μηδενικό, δηλαδή οι επιφάνειες διαρροής ταυτίζονται τοπικά. Συνολικά λοιπόν προκύπτει, ότι οποιοδήποτε ζεύγος τιμών ( $z, n$ ) κι αν επιλέξει κανείς από τα προτεινόμενα, θα οδηγηθεί πρακτικώς στην ίδια επιφάνεια διαρροής, και σε πρακτικώς ταυτόσημες προβλέψεις της μηχανικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 5.12. Διαφοροποίηση επιφανειών διαρροής από την επιφάνεια αναφοράς με  $(z, n, N) = (1.5, 0.8, 0.91)$ , ως προς  $\rho_0$ , για  $\beta=0.77$

Η προκύπτουσα αλληλεξάρτηση των σταθερών ( $n, z$ ) για δεδομένο  $N$  προκύπτει και αναλυτικά. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη σχέση (5.2) προκύπτει ότι για να επιτύχει κανείς μία επιφάνεια διαρροής με τιμές σταθερών ( $z, n$ ) όμοια με μία επιφάνεια αναφοράς με  $(z_{ref}, n_{ref})$  και ίδια τιμή της σταθεράς  $N$  θα πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

$$(\beta^2 - XN^2) = (\beta^2 - X_{ref}N^2) \Rightarrow (n + 2(1-n)\frac{p}{p_o})^z = (n_{ref} + 2(1-n_{ref})\frac{p}{p_o})^{z_{ref}} \Rightarrow$$

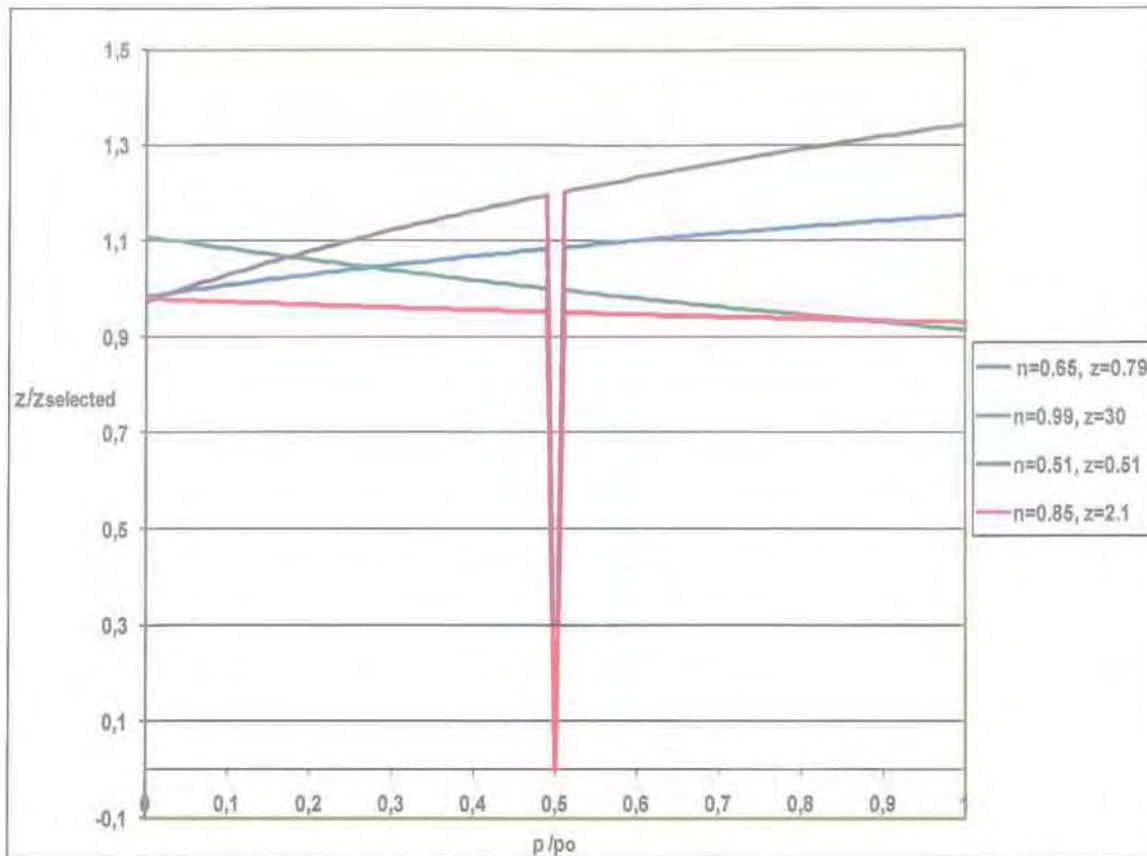
$$z = z_{ref} \frac{\log \left[ n_{ref} + 2(1-n_{ref})\frac{p}{p_o} \right]}{\log \left[ n + 2(1-n)\frac{p}{p_o} \right]} \quad (5.12)$$

Έτσι, η εξίσωση (5.12) υπολογίζει με ακρίβεια την τιμή της σταθεράς  $z$  ενός ζεύγους  $(n, z)$  που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να προκύψει μια εντελώς ταυτόσημη επιφάνεια με εκείνη της επιφάνειας αναφοράς, που αντιστοιχεί σε ζεύγος τιμών  $(n_{ref}, z_{ref})$  και ίδια τιμή  $N$ . Γίνεται φανερό, ότι μία και μοναδική τιμή της σταθεράς  $z$  δε μπορεί να υπάρξει, καθώς η  $z$  είναι συνάρτηση και του λόγου  $p/p_o$ . Αυτό αναμενόταν πρακτικώς και από το Σχήμα 5.12, απ' όπου προκύπτει ότι το σχετικό λάθος στις τιμές του  $q/p_o$  είναι συνάρτηση του λόγου  $p/p_o$ .

Πρακτικώς όμως, η χρήση του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» οδηγεί στην πρακτική ανάγκη για επιλογή μιας τιμής του  $z=z_{sel}$ , που είναι σταθερή και ανεξάρτητη του  $p/p_o$ . Σε μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης του σχετικού λάθους που επεισέρχεται λόγω της Σχέσης 5.12 από αυτή την πρακτική ανάγκη, στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η τιμή του λόγου  $z/z_{sel}$  ως συνάρτηση του  $p/p_o$ , για τα ζεύγη τιμών  $(n, z)$  που έχουν επιλεγεί προς χρήση στα Σχήματα 5.11 και 5.12 (για  $N=0.91$ ). Ως  $(n, z)$  της επιφάνειας αναφοράς θεωρούνται πάντα τα  $(n_{ref}, z_{ref}) = (0.8, 1.5)$ . Όπως προκύπτει, οι θεωρητικώς αναγκαίες  $z$  κυμαίνονται μεταξύ  $(0.92 - 1.34)z_{sel}$ , δηλαδή έχουν μικρή απόκλιση από την πρακτικώς επιλεγείσα.

Συνολικά λοιπόν προκύπτει, ότι η χρήση μιας σταθερής τιμής του  $n$  (π.χ.  $n=0.8$ ) μπορεί πρακτικώς να αποδώσει οποιαδήποτε επιθυμητή μορφή της επιφάνειας διαρροής, αρκεί να δοθεί η κατάλληλη τιμή στη σταθερά  $z$ . Συνεπώς, οι επιπλέον σταθερές του «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» σε σχέση με το SANICLAY είναι πρακτικώς μία, η  $z$ , και αυτός είναι ο λόγος που όλες οι προβλέψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα έρευνα έγιναν για  $n=0.8$ .

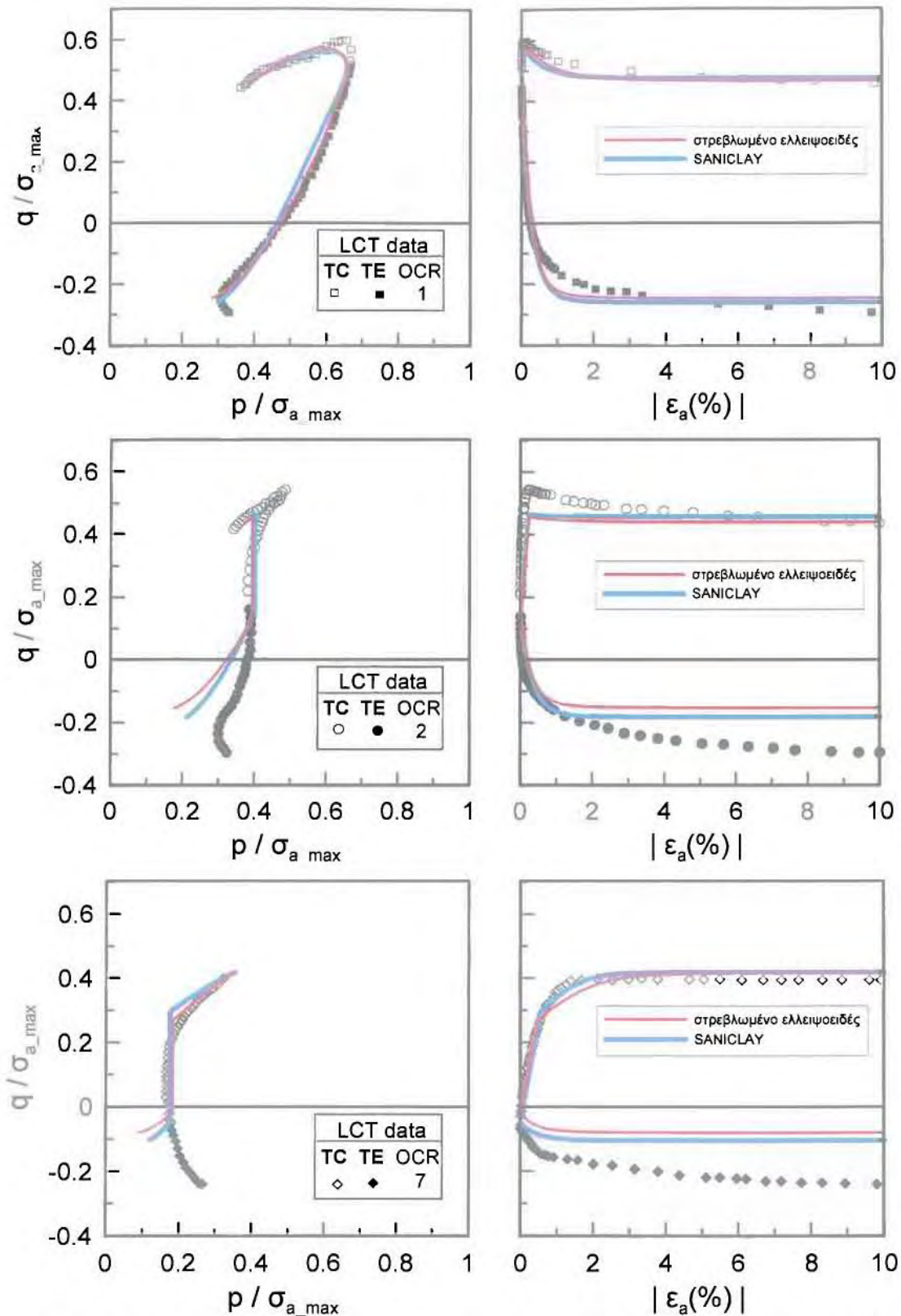




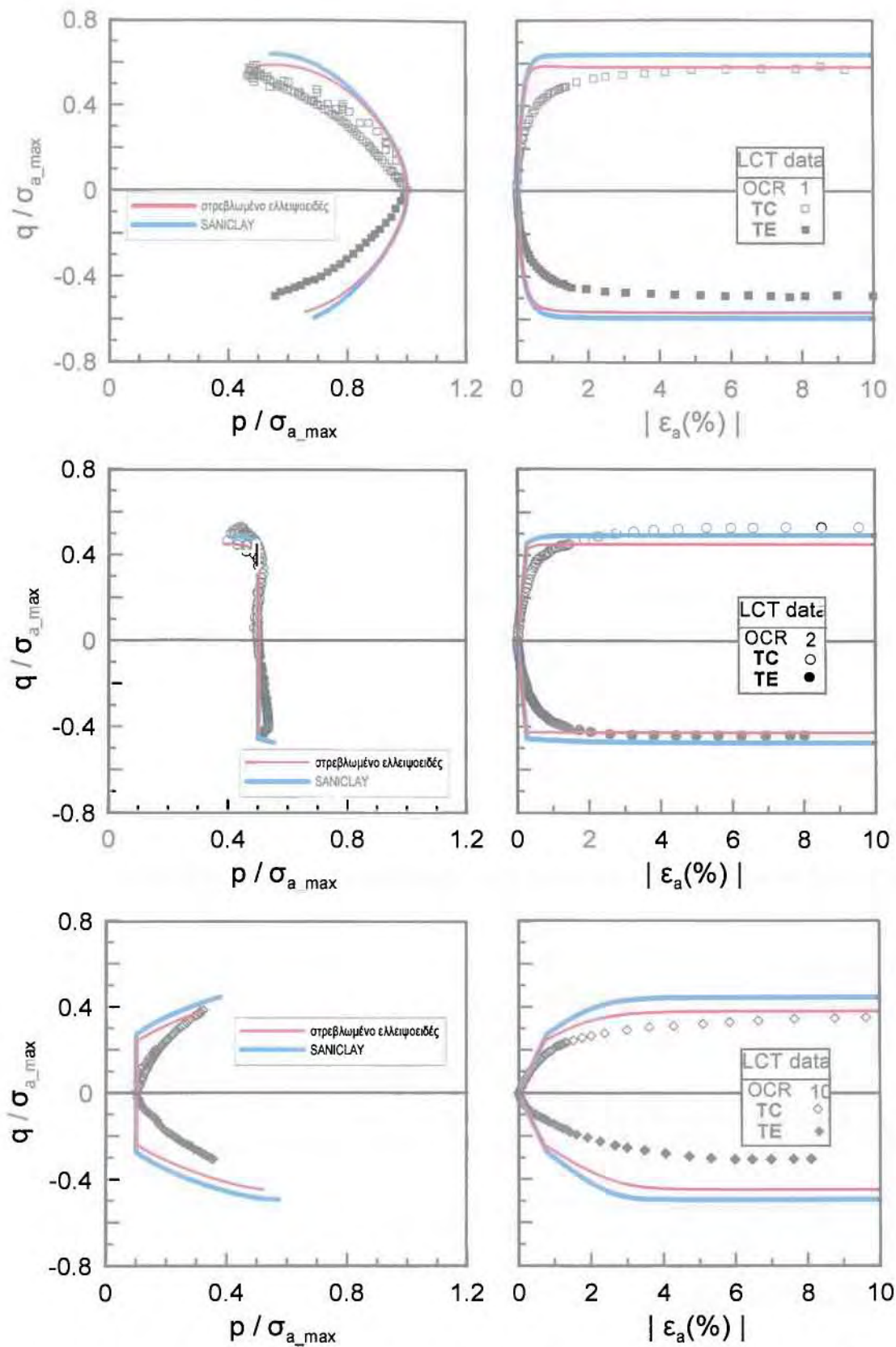
Σχήμα 5.13. Σύγκριση της υπολογισθείσας τιμής  $z$  μίας επιφάνειας διαρροής ως προς την τιμή  $z_{selected}$  της επιφάνειας αναφοράς με  $(z, n) = (1.5, 0.8)$  και  $N=0.91$ , για  $\beta=0.77$

#### 5.4: Σύγκριση προβλέψεων νέου προσομοιώματος με το SANICLAY

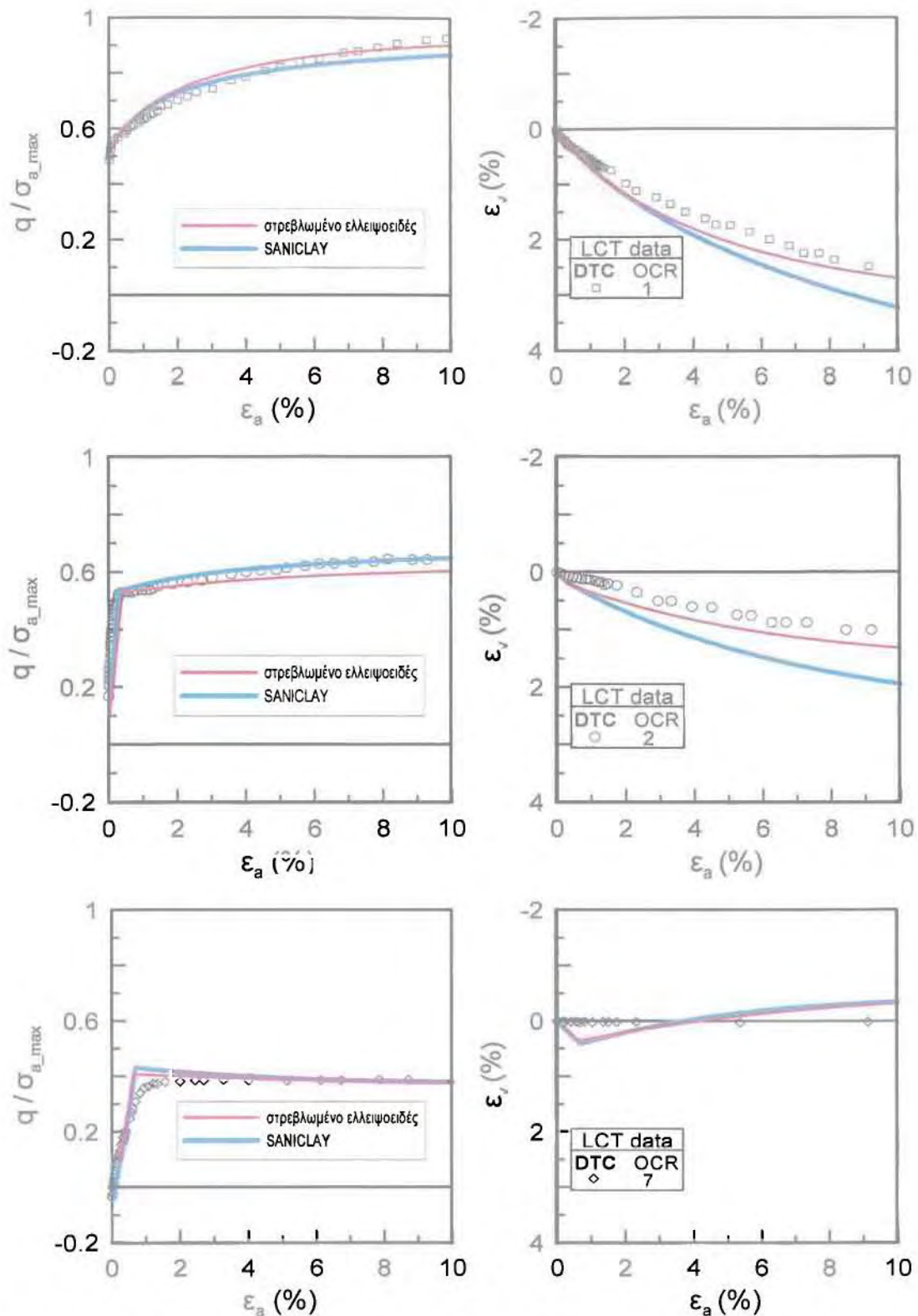
Με βάση την παραμετρική ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, έχει γίνει επιλογή τιμών των σταθερών ( $N, z, n$ ) που δίνουν τις βέλτιστες προβλέψεις, ανά περίπτωση. Εδώ επιχειρείται μια σύγκριση των εν λόγω προβλέψεων, με τις αντίστοιχες προβλέψεις του SANICLAY, για να διαπιστωθεί κατά πόσο έχει επιτευχθεί βελτιωμένη προσομοίωση της συμπεριφοράς αργίλων. Έτσι, στα Σχήματα 5.14 έως 5.17 γίνεται απευθείας σύγκριση των προβλέψεων των δύο προσομοιωμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα για την άργιλο LCT, για τις γνωστές τέσσερις κατηγορίες φορτίσεων: δοκιμές CKoUC και CKoUE (Σχήμα 5.14), δοκιμές CIUC και CIUE (Σχήμα 5.15), δοκιμές CKoDC (Σχήμα 5.16) και δοκιμές CIDC (Σχήμα 5.17).



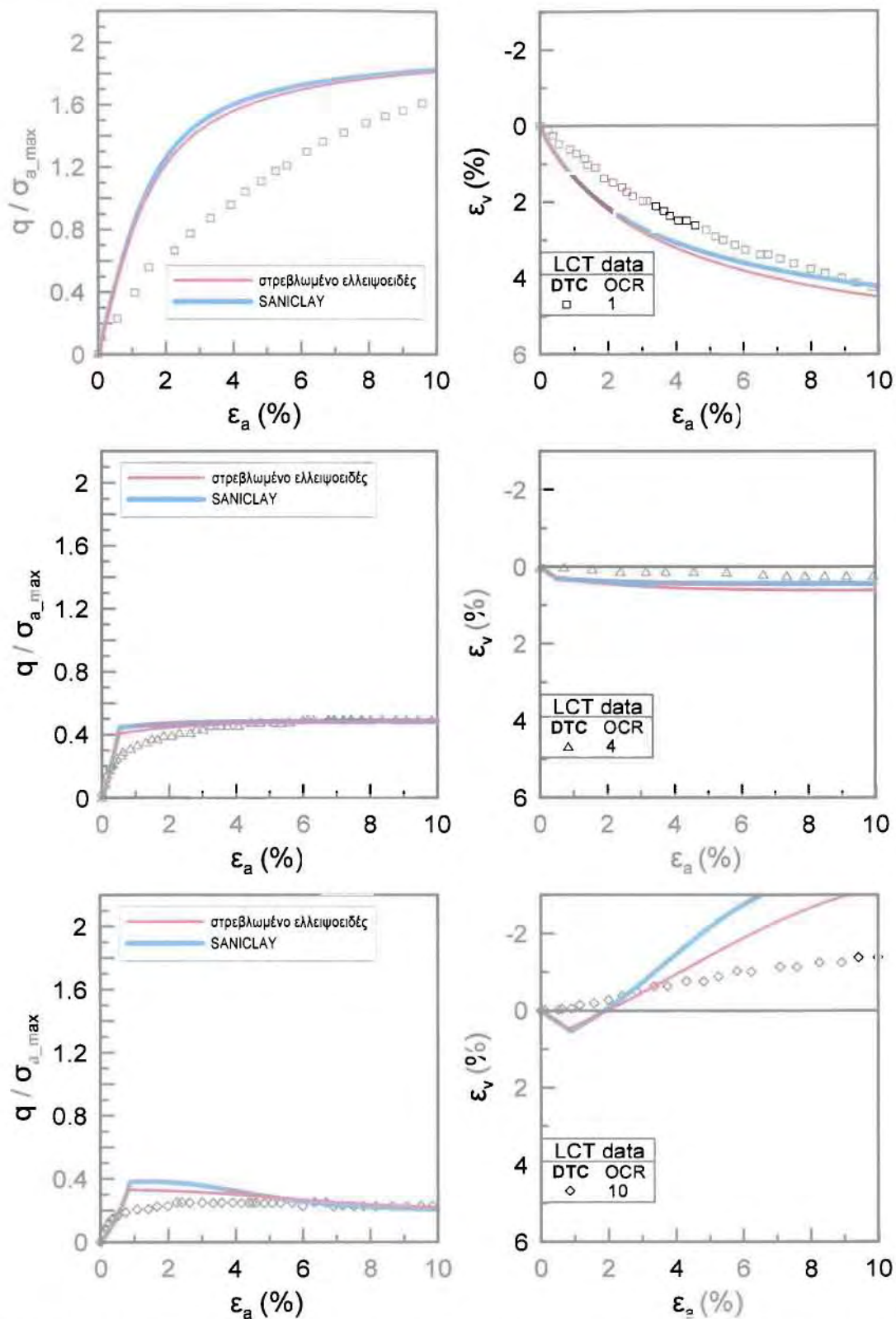
Σχήμα 5.14. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 1.2, 0.8)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 5.15. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.85, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές αστραγγιστής τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).



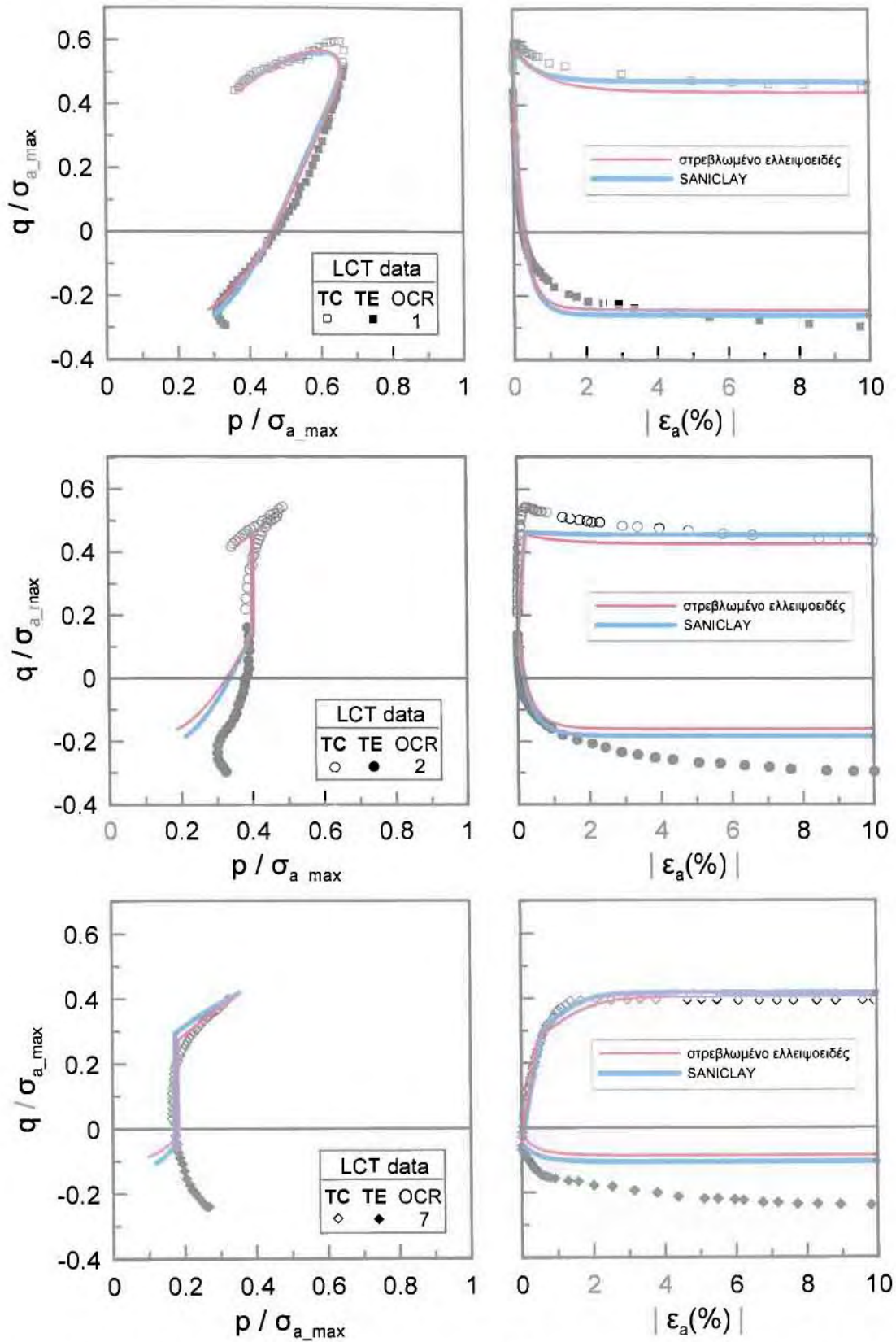
Σχήμα 5.16. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 1.2, 0.8)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



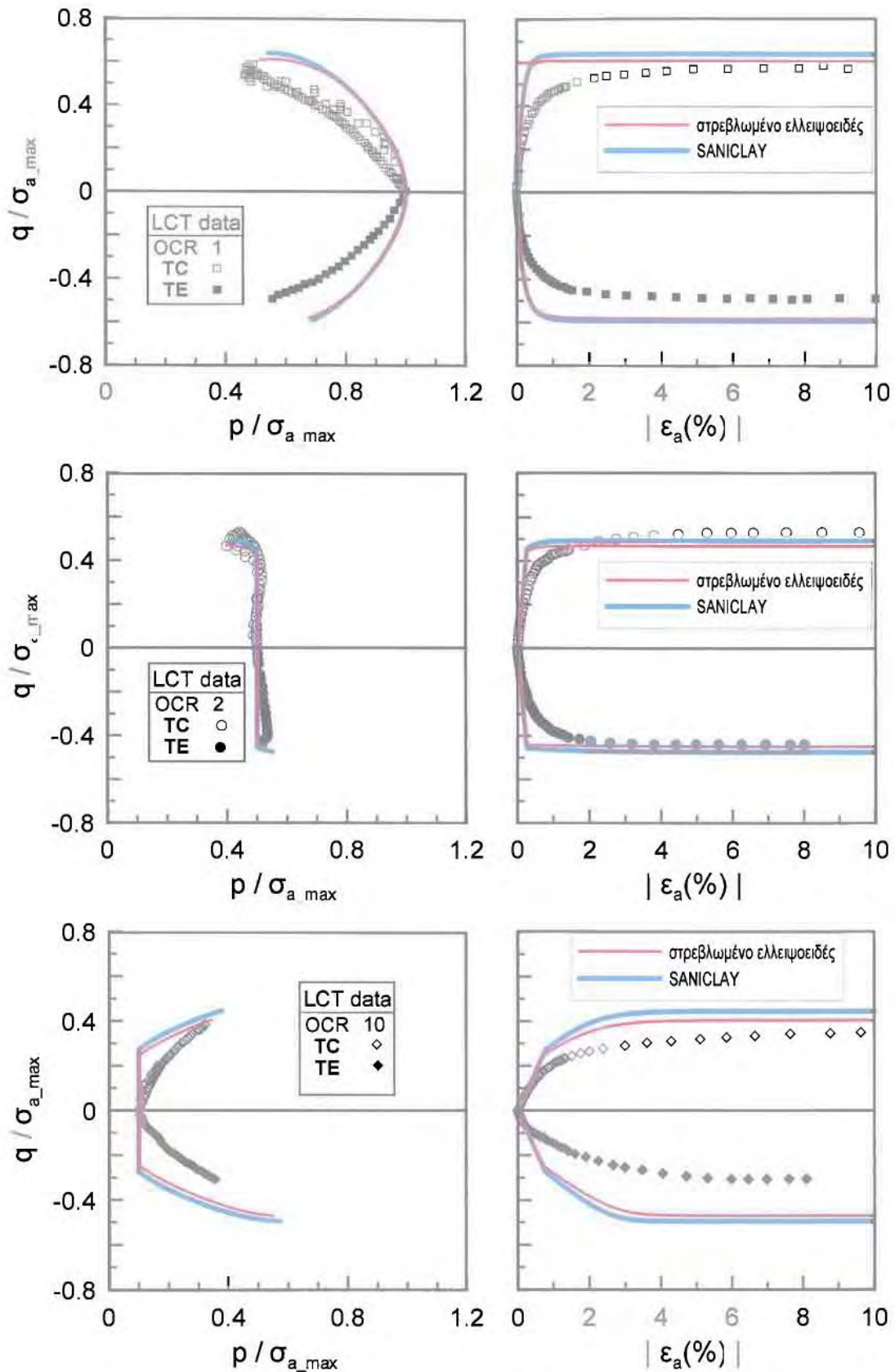
Σχήμα 5.17. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.85, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Με βάση τις συγκρίσεις των Σχημάτων 5.14 έως 5.17, προκύπτει ότι με κατάλληλη επιλογή τιμών των σταθερών ( $N, z, n$ ) το νέο προσομοίωμα μπορεί να προσφέρει, κατά περίπτωση, καλύτερες προβλέψεις της συμπεριφοράς αργίλων, σε σχέση με το προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY. Όμως, στην πράξη (δηλαδή σε προβλήματα συνοριακών συνθηκών), δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιείται το προσομοίωμα με διαφορετικές τιμές στις σταθερές, ανά περίπτωση.

Έτσι, στα Σχήματα 5.18 έως 5.21 που ακολουθούν, η σύγκριση των προβλέψεων του SANICLAY γίνεται με μια καινούρια ομάδα προβλέψεων του νέου προσομοιώματος για τιμές  $(N, z, n) = (0.88, 0.8, 0.8)$ . Η ομάδα αυτή αποτελεί μία μέση λύση των σταθερών ( $N, z, n$ ) που προκρίθηκαν ως οι βέλτιστες ανάλογα με το είδος της στερεοποίησης που προηγήθηκε της διάτμησης και επιφέρει τη βέλτιστη προσομοίωση για το σύνολο των δοκιμών. Οι συγκρίσεις γίνονται και πάλι για τις γνωστές τέσσερις κατηγορίες φορτίσεων: δοκιμές CKoUC και CKoUE (Σχήμα 5.18), δοκιμές CIUC και CIUE (Σχήμα 5.19), δοκιμές CKoDC (Σχήμα 5.20) και δοκιμές CIDC (Σχήμα 5.21).

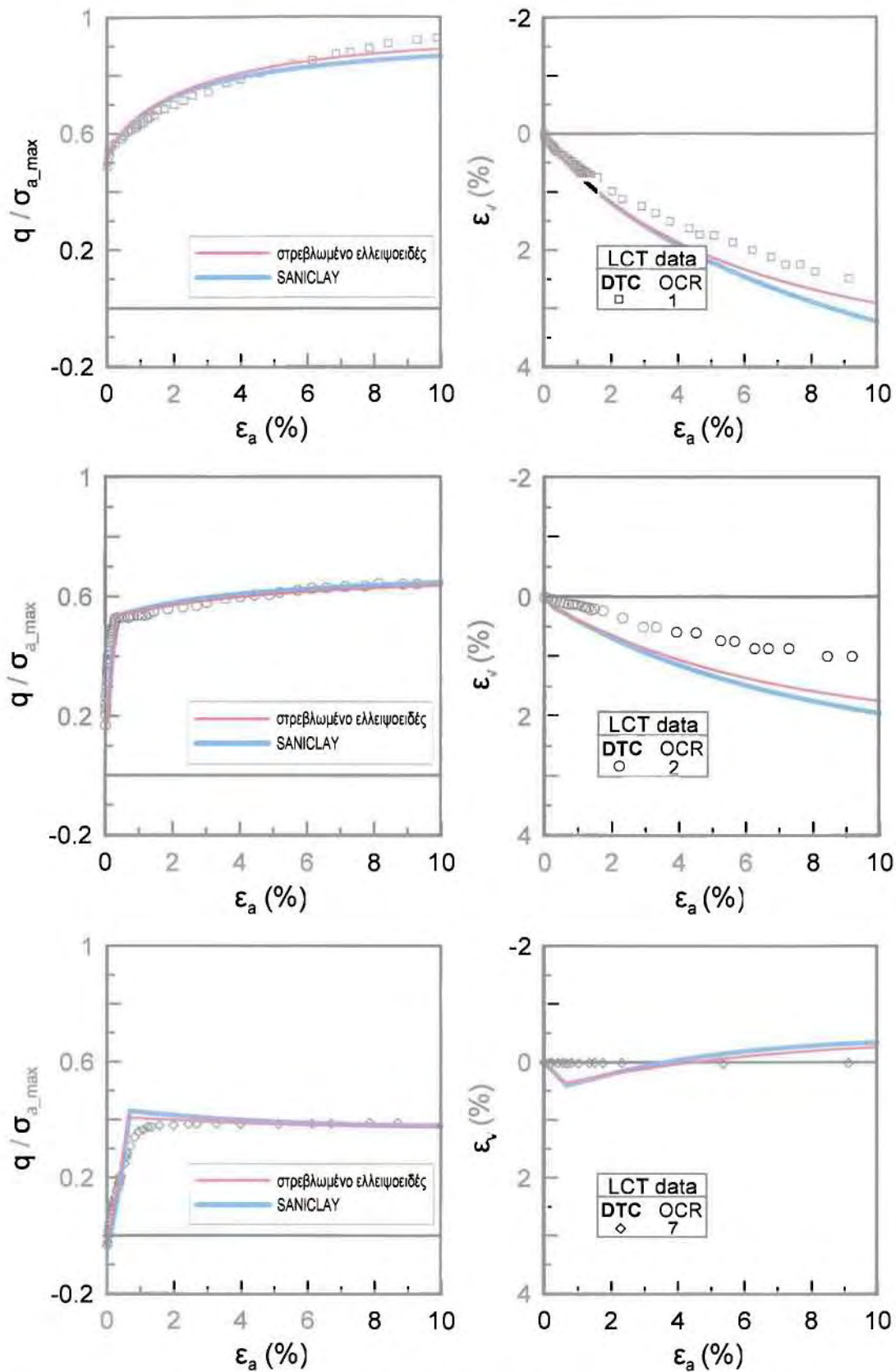


Σχήμα 5.18. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).

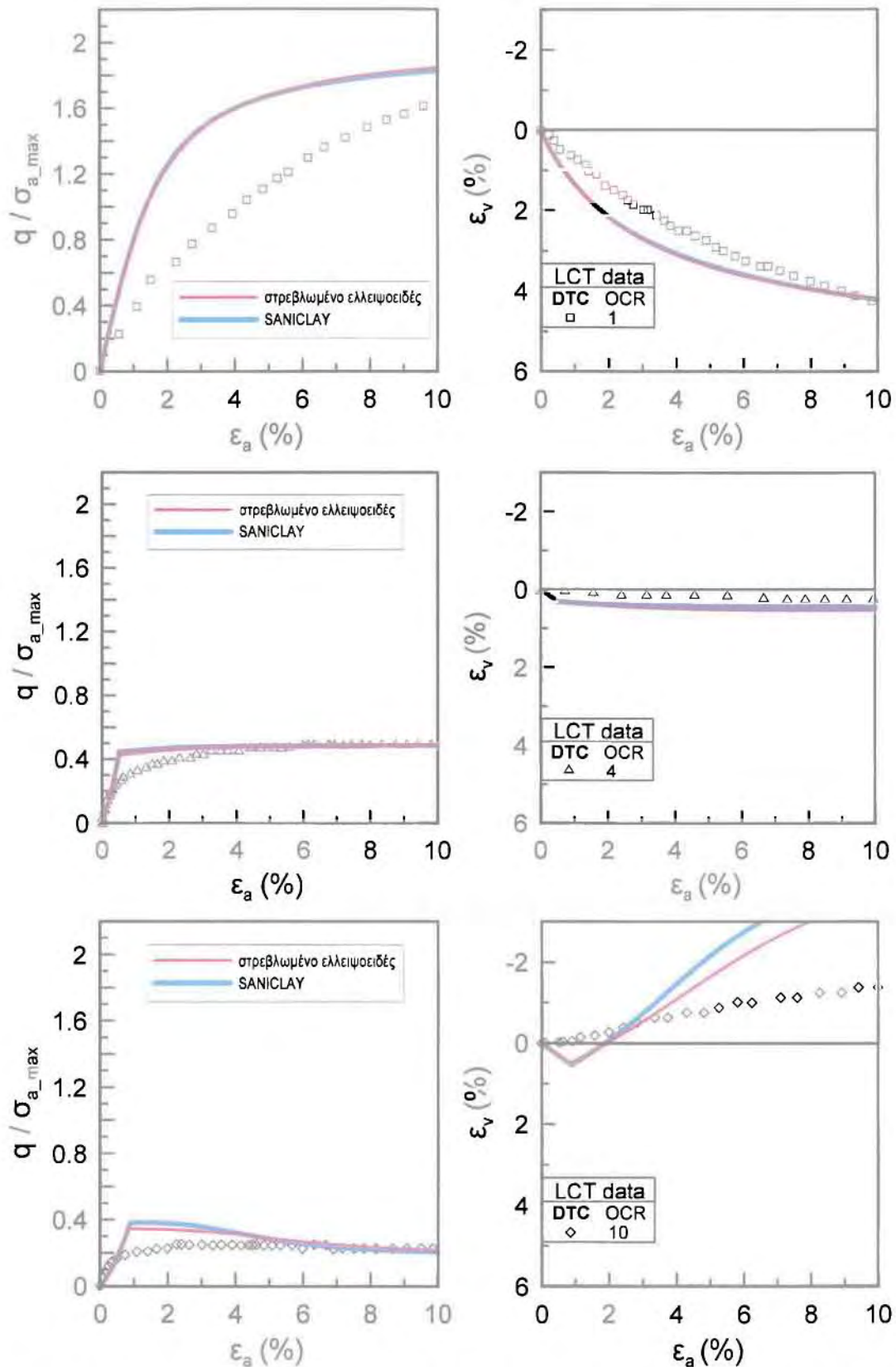


Σχήμα 5.19. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ισοτροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).





Σχήμα 5.20. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση ( $K_0$ -φόρτιση).



Σχήμα 5.21. Σύγκριση μετρήσεων και αναλύσεων για την άργιλο LCT με χρήση SANICLAY και «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» με  $(N, z, n) = (0.88, 0.8, 0.8)$ , για δοκιμές στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης για διαφορετικές τιμές OCR, μετά από ιστροπική στερεοποίηση ( $q=0$  φόρτιση).

Σύμφωνα με τα Σχήματα (5.18) έως (5.21), το νέο καταστατικό προσομοίωμα παρουσιάζει ικανοποιητική βελτίωση στην απόκριση της αργίλου, για τις ακόλουθες περιπτώσεις φορτίσεων:

- αστράγγιστης τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 5.19), για  $OCR=1, 10$
- στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης μετά από μονοδιάστατη στερεοποίηση (Σχήμα 5.20), για  $OCR=1, 2$  και  $7$
- στραγγιζόμενης τριαξονικής θλίψης μετά από ισοτροπική στερεοποίηση (Σχήμα 5.21), για  $OCR=1$  και  $10$ .

Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις, το νέο προσομοίωμα παρουσιάζει λίγο έως πολύ απόδοση αντίστοιχη με εκείνη του SANICLAY.

Η ύπαρξη ωστόσο πρακτικώς μίας επιπλέον σταθεράς στο «στρεβλωμένο ελλειψοειδές» (της  $z$ ) σε σύγκριση με το καταστατικό προσομοίωμα αναφοράς SANICLAY, καθιστά το νέο προσομοίωμα σχετικώς πιο πολύπλοκο. Συνεπώς, αν θεωρείται ικανοποιητική η βελτίωση για το κόστος μίας επιπλέον παραμέτρου, τότε το νέο προσομοίωμα είναι προτιμότερο. Στην αντίθετη περίπτωση, που η βελτίωση θεωρείται οριακή, και δεν υπάρχει λόγος αύξησης της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος, τότε η επιλογή του SANICLAY μοιάζει προτιμότερη. Έτσι, σε κάθε περίπτωση, η τελική επιλογή επαφίεται στην κρίση του κάθε χρήστη.

## Κεφάλαιο 6: Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν προσπάθειες βελτίωσης ενός υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος της μηχανικής συμπεριφοράς συνεκτικών εδαφών. Για το σκοπό αυτό, ως αφετηρία θεωρήθηκε ένα σύγχρονο αλλά σχετικά απλό καταστατικό προσομοίωμα, το SANICLAY των Dafalias et al (2006). Πρόκειται για ένα προσομοίωμα ανισοτροπικής πλαστικότητας που ενσωματώνει τις αρχές της Εδαφομηχανικής Κρίσιμης Κατάστασης και χαρακτηρίζεται από μη συσχετισμένο νόμο ροής. Έτσι, στην παρούσα εργασία, έγινε κατ' αρχήν μια αξιολόγηση του εν λόγω προσομοιώματος σε ό,τι αφορά στην ικανότητά του για ακριβή απόδοση της αστράγγιστης και στραγγιζόμενης συμπεριφοράς της αργίλου.

Στη συνέχεια, έγινε μια πρώτη απόπειρα βελτίωσής του χωρίς αλλαγή στις επιφάνειες του προσομοιώματος και το πλήθος των παραμέτρων κράτυνσης. Πιο συγκεκριμένα, η έμφαση δόθηκε στη διαφοροποίηση του μη συσχετισμένου νόμου ροής του προσομοιώματος, ο οποίος επηρεάζει κυρίως τις στραγγιζόμενες παρά τις αστράγγιστες δοκιμές διάτμησης. Η διαφοροποίηση συνίσταται στη μεταβολή της παραμέτρου  $x$  από σταθερά του προσομοιώματος σε γραμμική συνάρτηση του λόγου αποκλίνουσας τάσης  $\eta$ . Η εν λόγω διαφοροποίηση δρομολογήθηκε με βάση προβλέψεις που έδειξαν ότι τιμές της σταθεράς  $x$  μεγαλύτερες της τιμής αναφοράς  $x_0$  (που δίνει ορθή πρόβλεψη της μονοδιάστατης στερεοποίησης) οδηγούν σε ορθότερες προβλέψεις των δοκιμών στραγγιζόμενης διάτμησης. Όπως προέκυψε, μια συσχέτιση της  $x$  με τον αποκλίνοντα λόγο τάσεων  $\eta$  δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις προβλέψεις του προσομοιώματος για δοκιμές διάτμησης, καθώς ο λόγος  $\eta$  μεταβάλλεται γρήγορα κατά τη διάρκεια αυτών, με αποτέλεσμα την αντίστοιχα γρήγορη επαναφορά της τιμής της μεταβλητής  $x$  σε τιμές πλησίον της  $x_0$ .

Σε μια δεύτερη προσπάθεια βελτίωσης προτάθηκε και αξιολογήθηκε ένα νέο προσομοίωμα με το όνομα «στρεβλωμένος λημνίσκος» το οποίο διατηρεί πολλά από τα χαρακτηριστικά του SANICLAY και διαθέτει μία νέα μορφή επιφάνειας διαρροής, η οποία έχει προταθεί από τους Whittle & Kavvas (1994) και από την οποία πήρε το όνομά του. Η νέα αυτή επιφάνεια διαρροής απαιτεί τη βαθμονόμηση δύο σταθερών ( $m$  και  $n$ ) στη θέση της μίας σταθεράς  $N$  του SANICLAY, γεγονός που το καθιστά συγκριτικά πιο πολύπλοκο. Εκτεταμένες συγκρίσεις προβλέψεων του νέου προσομοιώματος με το προσομοίωμα αναφοράς έδειξαν ότι μπορούν να προκύψουν

συγκριτικά καλύτερες προβλέψεις, αλλά μόνο με διαφορετικά ζεύγη τιμών ( $m$ ,  $n$ ) ανάλογα με το αν η διάτμηση ξεκινά από ισοτροπική ή μονοδιάστατη στερεοποίηση (δηλαδή ανάλογα με το λόγο  $K = \sigma_{ho}' / \sigma_{vo}'$  στο τέλος της στερεοποίησης). Όμως, η χρήση διαφορετικών ζευγών τιμών ( $m$ ,  $n$ ) για διαφορετικές τιμές του  $K$  δεν είναι πρακτικώς εύχρηστη σε προβλήματα συνοριακών συνθηκών, και σε συνδυασμό με την επαύξηση των σταθερών του προσομοιώματος κατά μία, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο «στρεβλωμένος λημνίσκος» δεν εξασφαλίζει ικανοποιητική βελτίωση χωρίς ραγδαία αύξηση της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης.

Η προαναφερθείσα ανεπάρκεια του «στρεβλωμένου λημνίσκου» οδήγησε στη διερεύνηση ενός δεύτερου νέου προσομοιώματος, με την ονομασία «στρεβλωμένο ελλειψοειδές». Όπως και το προηγούμενο, το προσομοίωμα αυτό διατηρεί πολλά χαρακτηριστικά του SANICLAY και διαθέτει νέα επιφάνεια διαρροής, που προτάθηκε πρόσφατα από τον Taibat (2008) ως μια στρεβλωμένη εκδοχή της ελλειψοειδούς επιφάνειας διαρροής του SANICLAY. Η νέα αυτή επιφάνεια διαρροής απαιτεί κατ' όνομα τη βαθμονόμηση δύο νέων σταθερών ( $n$  και  $z$ ) επιπλέον της μίας σταθεράς  $N$  του SANICLAY, αλλά πρακτικώς εκφυλίζεται στην επιφάνεια διαρροής του SANICLAY για  $n=1$  ή/και  $z=0$ . Όμως, όπως αποδεικνύεται στην παρούσα εργασία, υπάρχουν άπειρα ζεύγη τιμών ( $n$  και  $z$ ) που σχηματίζουν πρακτικώς την ίδια μορφή επιφάνειας διαρροής, γεγονός που συνεπάγεται ότι το νέο αυτό προσομοίωμα έχει πρακτικά μόνο μία επιπλέον σταθερά, την  $z$ . Εκτεταμένες συγκρίσεις προβλέψεων του νέου προσομοιώματος με το προσομοίωμα αναφοράς έδειξαν ότι προσφέρει ικανοποιητική βελτίωση των προβλέψεων σε κάποιες περιπτώσεις φόρτισης, ενώ στις υπόλοιπες η απόδοσή του είναι αντίστοιχη με εκείνη του SANICLAY. Συνολικά κρίνεται ότι η βελτίωση στην απόδοση είναι σαφής, αλλά δεδομένης της ανάγκης για βαθμονόμηση μιας επιπλέον σταθεράς, η τελική επιλογή μεταξύ του νέου και του υπάρχοντος προσομοιώματος επαφίεται στην κρίση του κάθε χρήστη.

Περαιτέρω έρευνα στο παρόν θέμα μπορεί να ακολουθήσει δύο άξονες: α) τη μετατροπή της σταθεράς  $N$  σε παράμετρο κράτυνσης, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση της πολυπλοκότητας του προσομοιώματος, και β) ενσωμάτωση του νέου προσομοιώματος «στρεβλωμένου ελλειψοειδούς» σε κώδικα αριθμητικών αναλύσεων (π.χ. πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών) για τη διερεύνηση της ακρίβειάς του σε προβλήματα συνοριακών συνθηκών.

## Βιβλιογραφία

1. Burland J. B (1965), «The yielding and dilation of clay», *Geotechnique*, 15(2): 211-214
2. Dafalias Y. F. (1986), «An anisotropic critical state soil plasticity model», *Mechanics Research Communications*, 13(6): 341-347
3. Dafalias Y. F., Manzari M. T., Papadimitriou A. G. (2006), «SANICLAY: simple anisotropic clay plasticity model», *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 30, 1231-1257.
4. Καραμπετάκης Ν. (2002), «Εισαγωγή στην Fortran 90/95», εκδόσεις Ζήτη
5. Κωμοδρόμος Α. Μ. (2001), «Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική – γραμμική–μη γραμμική ανάλυση», εκδόσεις Ζήτη
6. Liu M. D., Carter J. P., Chai J. C. (2004), «Behaviour of natural soft clay simulated by the Structured Cam Clay model», *Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology*, ISLT2004, Bangkok, 79-84
7. Παπαδημητρίου Α. Γ. (1999), «Ελαστοπλαστική προσομοίωση της μονοτονικής και δυναμικής συμπεριφοράς εδαφών», *Διδακτορική Διατριβή*, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.
8. Pestana J. M., Whittle A. J. (1999), «Formulation of a unified constitutive model for clays and sands», *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 23, 1215-1243
9. Taiebat M. (2008), «Advanced elastic – plastic constitutive and numerical modeling in Geomechanics», *PhD Thesis*, University of California, Davis, September
10. Wood D. M. (1990), «Soil behaviour and critical state soil mechanics», *Cambridge University Press*