

Εφαρμογή ενός νέου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS

Application of a new elastoplastic model in finite elements code ABAQUS

ΜΠΕΛΟΚΑΣ, Γ.
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ.

Δρ Πολιτικός Μηχανικός
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η εργασία αυτή παρουσιάζει την εφαρμογή του Προσομοιώματος για Εδάφη με Δομή (*MSS-2*) στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Πρόκειται για ένα ελαστοπλαστικό προσομοίωμα οριακής περιβάλλουσας με δύο ανισότροπες περιβάλλουσες διαρροής. Η ενσωμάτωση του *MSS-2* στον κώδικα ABAQUS έγινε στον πλήρη τανυστή, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση τριδιάστατων προβλημάτων. Παρουσιάζεται η διαδικασία επαλήθευσης και επιλύονται ορισμένα βασικά προβλήματα εδαφομηχανικής σε τριδιάστατο φορέα.

ABSTRACT : This paper presents the application of the Model for Structured Soils (*MSS-2*) to the finite element code ABAQUS. This model is an elastoplastic bounding surface plasticity model with anisotropic yield surfaces. The *MSS-2* was implemented in ABAQUS code in a fully tensorial formulation, in order to be able to use it in three dimensional problems. The verification process is presented and some basic soil mechanics problems are solved in a three dimensional mesh.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία το Προσομοίωμα για Εδάφη με Δομή (*MSS-2*) των Μπελόκας & Καββαδάς (2010), Belokas & Kavvadas (2010) εφαρμόζεται στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Το προσομοίωμα αυτό είναι ένα ελαστοπλαστικό προσομοίωμα οριακής περιβάλλουσας με δύο ανισότροπες περιβάλλουσες διαρροής (την οριακή και πλαστικής διαρροής). Παρουσιάζεται η επαλήθευση (*verification*) της ενσωμάτωσης του προσομοιώματος μέσω επίλυσης τυπικών προβλημάτων εδαφομηχανικής.

Στα σύνθετα ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα, όπως είναι το *MSS-2*, δεν είναι δυνατή η εύρεση ακριβούς ή αναλυτικής λύσης της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων. Έτσι, για την επαλήθευση ενσωμάτωσης έγινε μια σειρά από αναλύσεις οι οποίες περιελάμβαναν προσομοίωση στον κώδικα ABAQUS: α) τυπικών εργαστηριακών δοκιμών υπό στατικές συνθήκες και β) προβλημάτων συζευγμένης στερεοποίησης σε διακριτοποιημένο φορέα. Τα προβλήματα αυτά

αφορούν αξονοσυμμετρικές συνθήκες φόρτισης, ωστόσο επιλέχθηκε η εφαρμογή τριδιάστατου φορέα, διότι το προσομοίωμα είναι διατυπωμένο στον πλήρη τανυστή. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με την ευθεία εφαρμογή του *MSS-2* σε υλικό σημείο. Επίσης, προσομοιώθηκε και επαληθεύτηκε η μονοδιάστατη στερεοποίηση Terzaghi.

Στα επόμενα, η έντονη γραφή (**bold face**) αντιστοιχεί σε τανυστικά μεγέθη.

2. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια μεθοδολογία επίλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς ενός συνεχούς σώματος. Δεδομένης της γεωμετρίας, των συνοριακών συνθηκών (μετατοπίσεις και φορτία), των καθολικών δυνάμεων (*body forces*) και των καταστατικών σχέσεων τάσης – παραμόρφωσης του σώματος, υπολογίζονται οι συνοριακές και οι εσωτερικές μετατοπίσεις, παραμορφώσεις και τάσεις. Το συνεχές μέσο προσομοιώνεται από ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους

στους κόμβους συνιστώντας έτσι το διακριτοποιημένο φορέα. Η επίλυση του φορέα δίνει τις παραμορφώσεις και τάσεις σε όλα τα στοιχεία και τις μετατοπίσεις και δυνάμεις σε όλους τους κόμβους.

Σε κάθε κόμβο, η εξίσωση ισοροπίας (εξίσωση 1) συνδέει την επαύξηση των επικόμβιων μετατοπίσεων $\{\Delta d\}_n$ με την επαύξηση των επικόμβιων φορτίων $\{\Delta R_E\}$ του στοιχείου (εξίσωση 2), μέσω του μητρώου στιβαρότητας του στοιχείου (K_E , *element stiffness*). Ο δείκτης n αναφέρεται στον κόμβο και για ένα στοιχείο με q συνολικά κόμβους είναι $n=1$ έως q .

$$[K_E]\{\Delta d\}_n = \{\Delta R_E\} \quad (1)$$

$$\{\Delta u\}_n = \left\{ \begin{array}{c} \text{node 1} \\ u_{x,1} \quad u_{y,1} \quad u_{z,1} \\ \dots \\ \text{node } q \\ u_{x,q} \quad u_{y,q} \quad u_{z,q} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Οι μετατοπίσεις εσωτερικά στα στοιχεία προσδιορίζονται με εφαρμογή στις επικόμβιες μετατοπίσεις των συναρτήσεων παρεμβολής ή σχήματος σύμφωνα με την εξίσωση 3, όπου $[N]$ το μητρώο συναρτήσεων σχήματος που μορφώνεται από τις συναρτήσεις σχήματος.

$$\{\Delta u\} = [N]\{\Delta u\}_n \quad (3)$$

Οι παραμορφώσεις προσδιορίζονται μέσω του μητρώου συνάρτησης σχήματος παραμόρφωσης (*strain shape function matrix*, $[B]$), που είναι ο τελεστής του μητρώου συναρτήσεων σχήματος $[N]$ (εξίσωση 4). Έτσι, οι παραμορφώσεις εσωτερικά στα στοιχεία συνδέονται απευθείας με τις επικόμβιες μετατοπίσεις με την εξίσωση 5.

$$[B]=[SN] \text{ ή } [J^{-1}N] \quad (4)$$

$$\{\Delta \epsilon\} = [B]\{\Delta u\}_n \quad (5)$$

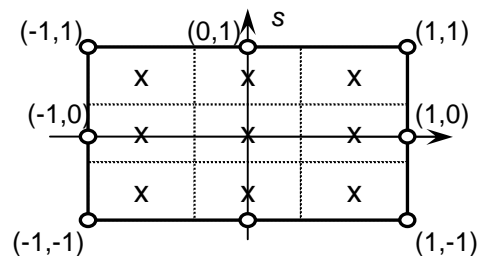
Το μητρώο στιβαρότητας του στοιχείου (K_E , *element stiffness*) υπολογίζεται από την αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης 6, όπου C ο τανυστής στιβαρότητας του καταστατικού προσομοιώματος (εξίσωση 7). Η αριθμητική ολοκλήρωση εισάγει τα σημεία ολοκλήρωσης (Σχήμα 1). Σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης αντιστοιχεί μια συνάρτηση στάθμισης (a_{ijk}) και

όσο αυξάνουν τα σημεία ολοκλήρωσης, τόσο αυξάνει και η τάξη ολοκλήρωσης και κατά συνέπεια και η ακρίβεια στην ολοκλήρωση. Το μητρώο F υπολογίζεται σε κάθε στοιχείο (εξίσωση 8) κάνοντας χρήση των συντελεστών στάθμισης (a_{ijk}) για κάθε σημείο ολοκλήρωσης (είναι $\sum a_{ijk}=1.00$).

$$[K_E] = \int_{vol} [B]^T [C][B] dV = \int_{vol} F dV \quad (6)$$

$$\{\Delta \sigma\} = [C]\{\Delta \epsilon\} \quad (7)$$

$$\int_{vol} F(x,y,z) dV = \sum_{ijk} a_i a_j a_k F = \sum_{ijk} a_{ijk} F(r_i, s_j, t_k) \quad (8)$$



Σχήμα 1. Τετράπλευρο στοιχείο πλήρους ολοκλήρωσης (x τα σημεία ολοκλήρωσης).
Figure 1. Full integration quadrilateral element (x the integration points).

Το ολικό μητρώο στιβαρότητας του φορέα (K_G , *global stiffness matrix*) προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους μητρώων στιβαρότητας. Η επίλυση της συνολικής εξίσωσης ισοροπίας (εξίσωση 9) μας δίνει τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας (επικόμβιες μετατοπίσεις, Δd_{nG} ή και επικόμβια φορτία ΔR_G).

$$[K_G]\{\Delta d_{nG}\} = \{\Delta R_G\} \quad (9)$$

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

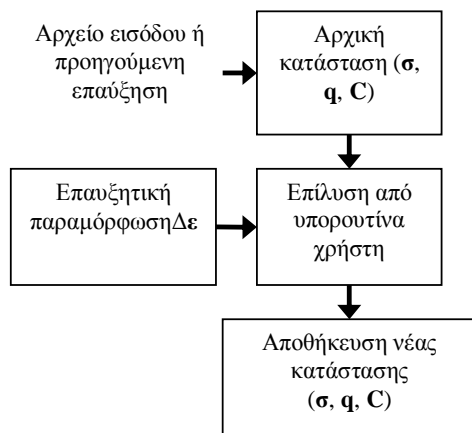
Το MSS-2 προσομοίωμα ενσωματώθηκε στον αριθμητικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Standard, ο οποίος εφαρμόζει την όπισθεν ολοκλήρωση (*implicit integration*) για την επίλυση του φορέα. Τα ισχυρά μη γραμμικά συστήματα ο κώδικας ABAQUS/Std τα επιλύει επαυξητικά γραμμικά. Σε κάθε επαύξηση, για την εξεύρεση ισοροπίας εφαρμόζει την επαναληπτική διαδικασία «τροποποιημένη Newton – Raphson»

Όταν ικανοποιηθούν οι εξισώσεις ισοροπίας σε όλο το φορέα, τότε στα σημεία ολοκλήρωσης αποθηκεύονται οι παράμετροι κατάστασης (σ , ϵ) και κράτυνσης (q) και ο

τανυστής στιβαρότητας (**C**) για να χρησιμοποιηθούν στην επόμενη επαύξηση.

Από την επιλογή του τανυστή στιβαρότητας εξαρτάται η ταχύτητα επίλυσης και η δυνατότητα σύγκλισης του προβλήματος στην επαναληπτική διαδικασία. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται ο εφαπτομενικός τανυστής στιβαρότητας του τέλους της προηγούμενης επαύξησης (ελαστικός C_i^e ή ελαστοπλαστικός C_i^{ep}). Ο C_i^e προκύπτει από τον τύπο ελαστικότητας που εφαρμόζεται, ενώ ο C_i^{ep} με έμπροσθεν ολοκλήρωση (*explicit integration*) του νόμου ροής.

Σε κάθε επαύξηση της παραμόρφωσης το καταστατικό προσομοίωμα επιλύεται απευθείας στα σημεία ολοκλήρωσης και τα μεγέθη σ , ϵ και q αποθηκεύονται αυτούσια, χωρίς να σταθμιστούν για όλο το στοιχείο. Έτσι, είναι δυνατή η ευθεία εφαρμογή μη γραμμικών ελαστοπλαστικών προσομοιωμάτων με μη σημειακές περιβάλλουσες διαρροής και πολλές παραμέτρους κράτυνσης, όπως το MSS-2. Το MSS-2 εισήχθη στον κώδικα ABAQUS σαν υπορουτίνα χρήστη η οποία εφαρμόζεται στα σημεία ολοκλήρωσης. Απλοποιητικά, η διαδικασία επίλυσης σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Απλοποιητικό διάγραμμα ροής εφαρμογής υπορουτίνας χρήστη σε ένα σημείο ολοκλήρωσης.

Figure 3. Simplified flow chart of the user subroutine application at an integration point.

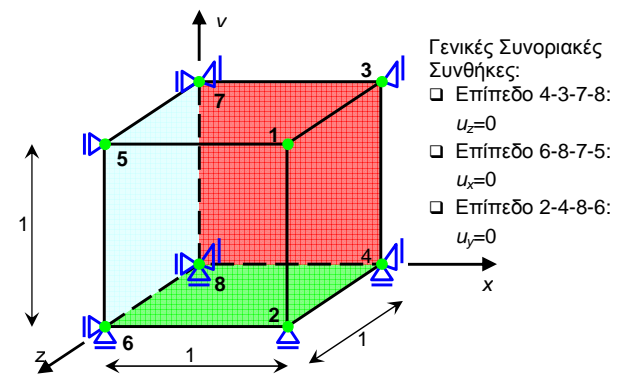
Αντίθετα, σε κώδικες πεπερασμένων διαφορών όπως το FLAC, το κάθε στοιχείο (ζώνη) χωρίζεται σε υποζώνες, οι οποίες επιλύονται ανεξάρτητα. Η τρέχουσα κατάσταση και οι παράμετροι κράτυνσης προκύπτουν από μια στάθμιση των λύσεων των υποζωνών σε ολόκληρη τη ζώνη. Η μεθοδολογία της στάθμισης σε σύνθετα προσομοιώματα δεν είναι μονοσήμαντη και επηρεάζει τις τελικές

τιμές των παραμέτρων κατάστασης και κράτυνσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να εισαχθούν τρόποι «διόρθωσης» της λύσης, που ενδεχομένως οδηγούν σε αριθμητική αστάθεια και ανακρίβεια.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ ABAQUS

Η ενσωμάτωση του προσομοιώματος επαληθεύτηκε μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων στον κώδικα ABAQUS με τα αποτελέσματα των ίδιων αναλύσεων σε υλικό σημείο στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Οι αναλύσεις αυτές περιλαμβάνουν αξονοσυμμετρικές συνθήκες φόρτισης που αντιστοιχούν σε τυπικές εργαστηριακές δοκιμές.

Οι προσομοιώσεις στο ABAQUS έγιναν για τριδιάστατο κυβικό φορέα διαστάσεων 1m x 1m x 1m (Σχήμα 4) και αναλύσεις στατικές (απουσία υγρού πόρων) ή συζευγμένης στερεοποίησης. Στην επαναληπτική διαδικασία επιλέχθηκε η μέθοδος της αυτόματης επαύξησης (*automatic incrementation*).



Σχήμα 4. Συνοριακές συνθήκες κυβικού φορέα στις αναλύσεις με το ABAQUS.

Figure 4. Boundary conditions of a cubic body for the analyses with ABAQUS.

Οι αναλύσεις έγιναν για ένα υλικό που έχει τις σταθερές εγγενούς συμπιεστότητας: $\ln N_{iso}=1.140$, $\ln \Gamma=1.020$, $\rho_c=0.0835$, $M=1.035$, $n=0.288$ και περιβάλλουσας κρίσιμης κατάστασης: $k=0.7367$, $\xi=0.1084$.

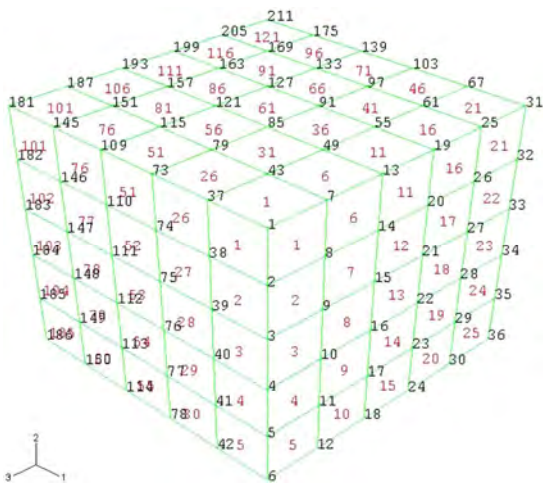
Όσον αφορά τις υπόλοιπες σταθερές λήφθηκαν: $A=20$, $B=20000$, $\rho_s=0.014$, $\psi=1$, $\lambda_1=0.425$, $\lambda_2=0.1$, $\gamma_1=20$, $\mu=5$, $k_c=-2.0$, $\sigma_k/a=1$. Για την ελαστική ζώνη λήφθηκε $\xi=0.05$ και για την SSE $C_1=1.0=C_2=C_3=C_4=C_5$. Για τις παραμέτρους που αφορούν μόνο το δομημένο υλικό, λήφθηκαν $\theta_\sigma=\zeta_\sigma=\eta_\sigma=1$, $\zeta_\nu=\eta_\nu=1$, και $\gamma_2=20$. Στις αναλύσεις συζευγμένης στερεοποίησης επιλέχθηκε διαπερατότητα

$k=10^{-3}$ m/day= 1.16×10^{-8} m/sec που αντιστοιχεί σε μια χαμηλής περατότητας άργιλο. Στην αρχική κατάσταση ο ειδικός όγκος ήταν $v=1.936$ και η τασική κατάσταση και οι υπόλοιπες παράμετροι κατάστασης ήταν: $\sigma=\sigma_I$ ($\sigma=10$ kPa), $\sigma_K=\sigma_K I$ ($\sigma_K=500$ kPa) και $\sigma_L=\sigma_L I$ ($\sigma_L=25$ kPa). Έτσι, στην αρχική κατάσταση ήταν $a/a^*=2.57$ και $\sigma_o/\sigma=20$.

Οι παράμετροι του MSS-2 παρουσιάστηκαν αναλυτικά από τους Μπελόκας & Καββαδάς (2010) και Belokas & Kavvadas (2010).

4.1 Στατικές αναλύσεις

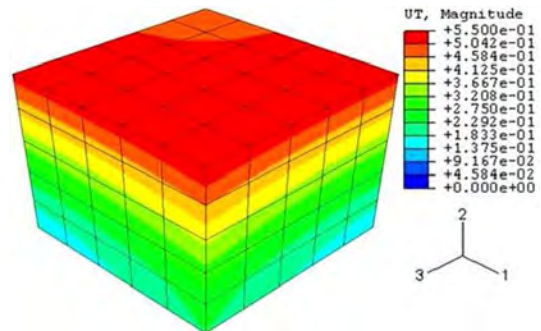
Οι στατικές αναλύσεις προσομοιώνουν πλήρως στραγγισμένες συνθήκες και συνθήκες χωρίς υγρό πόρων. Χρησιμοποιήθηκαν οκτακομβικά συνεχή εξαεδρικά στοιχεία (*continua elements*) πλήρους ολοκλήρωσης (8 σημεία ολοκλήρωσης). Προσομοιώθηκαν: α) ισότροπη συμπίεση σε φορέα στοιχείο και διακριτοποιημένο φορέα, β) μονοδιάστατη συμπίεση με κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης – επαναφόρτισης σε φορέα στοιχείο και διακριτοποιημένο φορέα και γ) τριαξονικές θλίψεις και εφελκυσμοί για λόγους προφόρτισης $\sigma_o/\sigma=1.13, 2.0$ και 10.0 σε διακριτοποιημένο φορέα. Στο Σχήμα 5 φαίνεται ο διακριτοποιημένος φορέας.



Σχήμα 5. Διακριτοποιημένος φορέας του Σχήματος 4.
Figure 5. Discretized body of Figure 4.

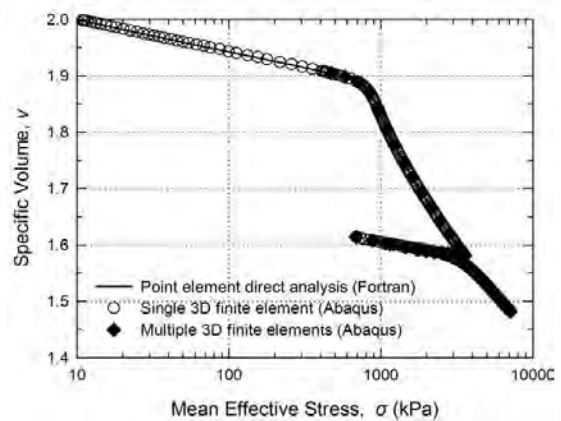
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ισοτιμές κατακόρυφης μετατόπισης στον παραμορφωμένο φορέα για την τριαξονική θλίψη από $\sigma=1000$ kPa. Στα Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων υλικού σημείου (*material point*) σε FORTRAN και σε φορείς μονού στοιχείου (*single element*) και

πολλαπλών στοιχείων (*multiple elements*) στο ABAQUS για συνθήκες μονοδιάστατης παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η σύγκριση για τις συνθήκες τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού. Τα αποτελέσματα αφορούν το στοιχείο 121.

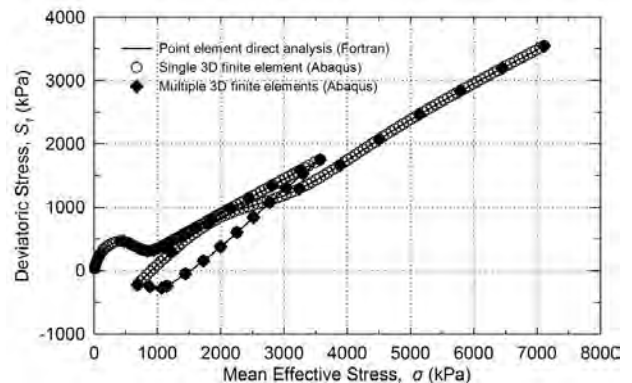


Σχήμα 6. Ισοτιμές κατακόρυφες μετατόπισης στον παραμορφωμένο φορέα για τριαξονική θλίψη.

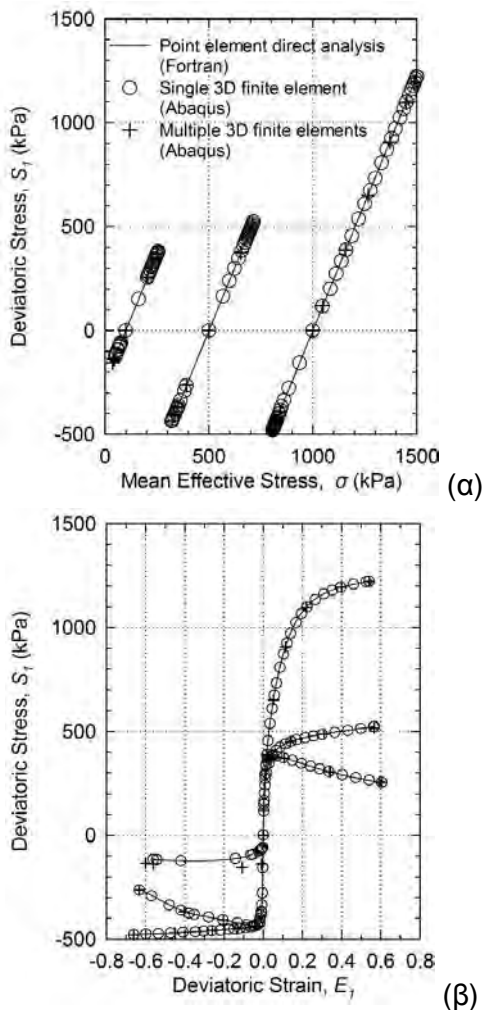
Figure 6. Vertical displacement contours at the deformed mesh for triaxial compression.



Σχήμα 7. Μονοδιάστατη παραμόρφωση – σύγκριση αποτελεσμάτων στο επίπεδο $v - \sigma$.
Figure 7. One dimensional deformation – comparison of results in $v - \sigma$ plane.



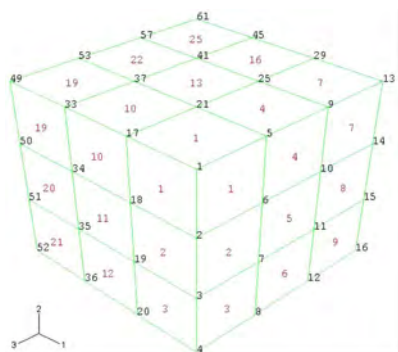
Σχήμα 8. Μονοδιάστατη παραμόρφωση – σύγκριση αποτελεσμάτων τασικών οδεύσεων.
Figure 8. One dimensional deformation – comparison of stress paths results.



Σχήμα 9. Τριαξονική διάτμηση: α) τασικές οδεύσεις, β) διεκτροπική τάση – διεκτροπική παραμόρφωση.
Figure 9. Triaxial shearing: a) stress paths, b) deviatoric stress – deviatoric strain.

4.2 Αναλύσεις συζευγμένης στερεοποίησης

Οι αναλύσεις συζευγμένης στερεοποίησης έγιναν όλες στο διακριτοποιημένο φορέα του Σχήματος 10, ο οποίος έχει 27 στοιχεία.



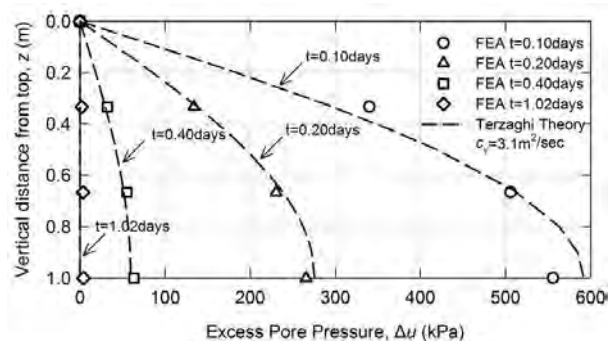
Σχήμα 10. Διακριτοποιημένος φορέας του Σχήματος 4.
Figure 10. Discretized body of Figure 4.

Προσομοιώθηκαν: α) Terzaghi μονοδιάστατη στερεοποίηση με επιβολή εξωτερικού φορτίου σε ένα βήμα, β) μονοδιάστατη συμπίεση (βαθμιδωτής επιβολής φορτίου, συνεχόμενα μεταβαλλόμενου φορτίου και συνεχόμενα μεταβαλλόμενης παραμόρφωσης), γ) τριαξονική θλίψη για λόγους προφόρτισης $\sigma_o/\sigma=1.13$ και 10.0. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν το στοιχείο 25. Στις αναλύσεις αυτές αγνοείται η επίδραση της βαρύτητας.

4.1.1 Στερεοποίηση κατά Terzaghi

Προσομοιώθηκε η μονοδιάστατη στερεοποίηση για συνολικά εξωτερικά επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο $\sigma_v=1000\text{kPa}$, δηλαδή για μεταβολή κατακόρυφης τάσης ίση με $\Delta\sigma_v=900\text{kPa}$ για συνολική διάρκεια $t=10\text{days}$. Στράγγιση επιτράπηκε μόνο στην πάνω επιφάνεια του κυβικού φορέα.

Η θεωρία στερεοποίησης Terzaghi απαιτεί την επιλογή του συντελεστή στερεοποίησης $c_v=kD/\gamma_w$, όπου k είναι ο συντελεστής διαπερατότητας, $D=\sigma_v/\epsilon_v$ είναι το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης και γ_w είναι το ειδικό βάρος του νερού. Επειδή αυτή η θεωρία υποθέτει γραμμική ελαστικότητα, ο συντελεστής στερεοποίησης είναι σταθερός. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η σύγκριση των προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων με τη θεωρία στερεοποίησης Terzaghi για $c_v=3.1\text{m}^2/\text{day}$.



Σχήμα 11. Μεταβολή υπερπίεσεων πρώων εντός του φορέα συναρτήσει του χρόνου.
Figure 11. Excess pore pressures variation within the mesh as time proceeds.

Η μη πλήρης ταύτιση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους, η οποία οδηγεί σε μεταβλητή τιμή του συντελεστή

στερεοποίησης, c_v (Πίνακας 1). Στα αρχικά στάδια της στερεοποίησης, το c_v υπολογισμένο από τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μεγαλύτερο από αυτό της θεωρίας Terzaghi. Ωστόσο, όσο ο χρόνος περνάει, το c_v των πεπερασμένων στοιχείων τείνει να ταυτιστεί με την τιμή $3.1\text{m}^2/\text{day}$.

Πίνακας 1. Συντελεστής στερεοποίησης εντός του φορέα πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες χρονικές στιγμές

Table 1. Coefficient of consolidation within the finite elements mesh at various times.

| Στοιχείο | Μέσο Βάθος Z (m) | c_v (m^2/day) | | | |
|----------|------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| | | χρόνος στερεοποίησης t (days) | | | |
| | | 0.10 | 0.20 | 0.40 | 1.02 |
| 1 | 0.167 | 3.83 | 3.67 | 3.42 | 3.09 |
| 2 | 0.500 | 4.07 | 3.79 | 3.52 | 3.15 |
| 3 | 0.833 | 4.20 | 3.86 | 3.56 | 3.18 |

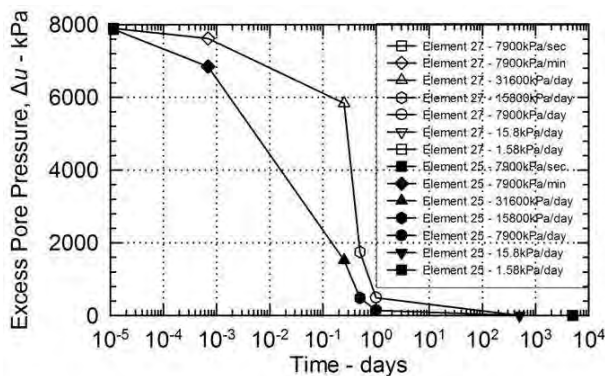
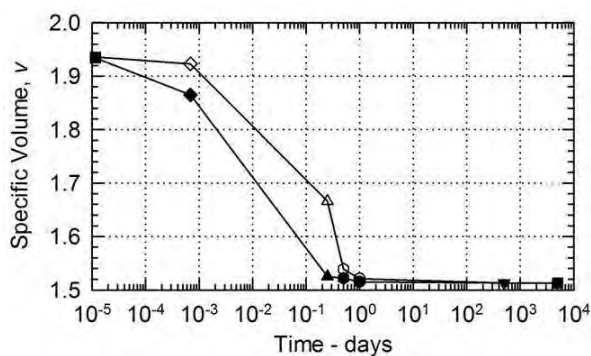
4.1.2 Δοκιμή μονοδιάστατης παραμόρφωσης

Προσομοιώθηκε η μονοδιάστατη παραμόρφωση για τις περιπτώσεις:

α) Συνεχώς μεταβαλλόμενου φορτίου. Η εξωτερική επιβαλλόμενη τάση μεταβαλλόταν γραμμικά με το χρόνο από $\sigma_v=100\text{kPa}$ έως $\sigma_v=8000\text{kPa}$ για χρονικά διαστήματα από 1sec έως 5000days. Στο Σχήμα 12 φαίνεται η επίδραση του ρυθμού φόρτισης στο τέλος της δοκιμής.

Στην περίπτωση αυτή για διάρκεια φόρτισης 1 sec οι συνθήκες ήταν πρακτικά αστράγγιστες με μηδενική μεταβολή όγκου. Για διάρκεια φόρτισης 5000days οι συνθήκες είναι πρακτικά στραγγισμένες για όλα τα στοιχεία (Σχήμα 12). Οι υπόλοιπες περιπτώσεις είναι μερικώς στραγγισμένες με τις μικρότερες υπερπίεσεις πόρων να αναπτύσσονται στο πάνω στοιχείο (No 25). Για διάρκεια φόρτισης 1day και μεγαλύτερη, οι καμπύλες συμπίεσης είναι ανεξάρτητες του ρυθμού φόρτισης, ωστόσο, στο τέλος των δοκιμών ο ειδικός όγκος διαφέρει (Σχήμα 12). Τέλος, για διάρκεια φόρτισης 2days και μεγαλύτερη η ροή είναι ομοιόμορφη.

Από τις δοκιμές αυτές προκύπτει πως για $k/(\Delta h/\Delta t) < 10^{-8}$, όπου Δh η μέγιστη διαδρομή στράγγισης και Δt ο χρόνος επιβολής του φορτίου, οι συνθήκες είναι αστράγγιστες, ενώ για $k/(\Delta h/\Delta t) > 10^{-3}$ οι συνθήκες είναι στραγγισμένες.



Σχήμα 12. Ειδικός όγκος και υπερπίεσεις πόρων στο τέλος των δοκιμών για τους διάφορους ρυθμούς φόρτισης.

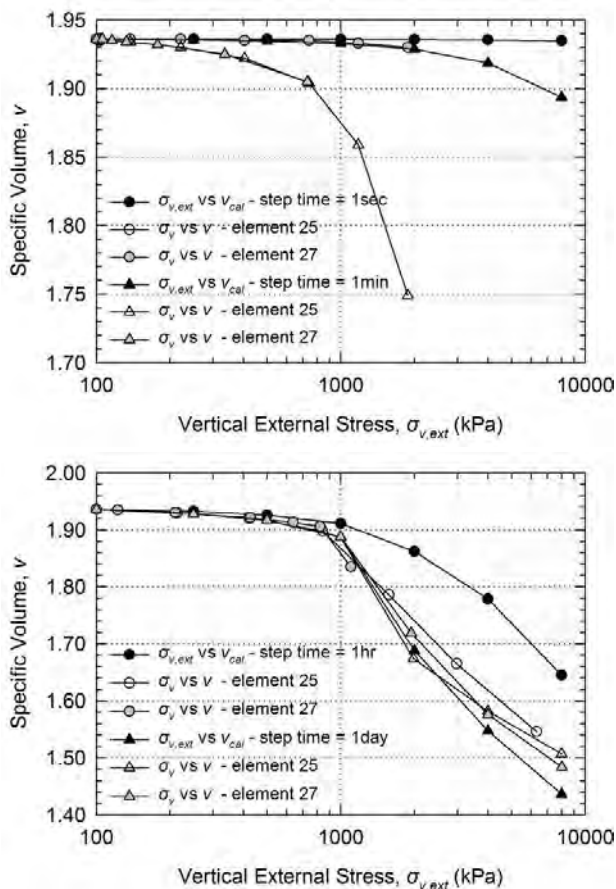
Figure 12. Specific volume and excess pore pressures at the end of the tests for various loading rates.

β) Βαθμιδωτού φορτίου με τις ακόλουθες βαθμίδες φόρτισης: $\sigma_v=100\text{kPa}$ (αρχική κατάσταση), 250kPa, 500kPa, 1000kPa, 2000kPa, 4000kPa και 8000kPa. Οι χρόνοι επιβολής της κάθε βαθμίδας ήταν $\Delta t=1\text{sec}$, 1min, 1hour και 1day (4 διαφορετικές δοκιμές).

Για $\Delta t=1\text{hour}$ η ροή του υγρού είναι πρακτικά ομοιόμορφη προς το σύνολο στράγγισης. Στο Σχήμα 13 συγκρίνονται οι καμπύλες συμπίεσης που δίνει ο αριθμητικός κώδικας στα στοιχεία 25 και 27 με την καμπύλη συμπίεσης που προκύπτει από την εξωτερική τάση και την κατακόρυφη μετατόπιση της άνω παρειάς. Η μη ταύτιση των καμπυλών οφείλεται στην ανομοιόμορφη ανάπτυξη των πιέσεων πόρων, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα η πραγματική κατακόρυφη τάση εσωτερικά των στοιχείων 25 και 27 να είναι γενικά μικρότερη από την εξωτερικά επιβαλλόμενη. Αυτή η διαφορά στις καμπύλες ελαχιστοποιείται όταν το χρονικό βήμα είναι ίσο με μία ημέρα.

Συγκρίνοντας μάλιστα τις καμπύλες συμπίεσης που προκύπτουν από την εξωτερική μετατόπιση, διαπιστώνεται πως εάν η χρονική διάρκεια του βήματος είναι μικρή, υπάρχει ο κίνδυνος υπερεκτίμησης της

(«φαινόμενης») τάσης προφόρτισης του υλικού και λανθασμένης εκτίμησης του συντελεστή συμπίεσιμότητας.



Σχήμα 13. Σύγκριση των καμπυλών συμπίεσης στα στοιχεία 25 και 27 με την καμπύλη συμπίεσης που υπολογίζεται βάσει της κατακόρυφης μετατόπισης και της εξωτερικής τάσης.

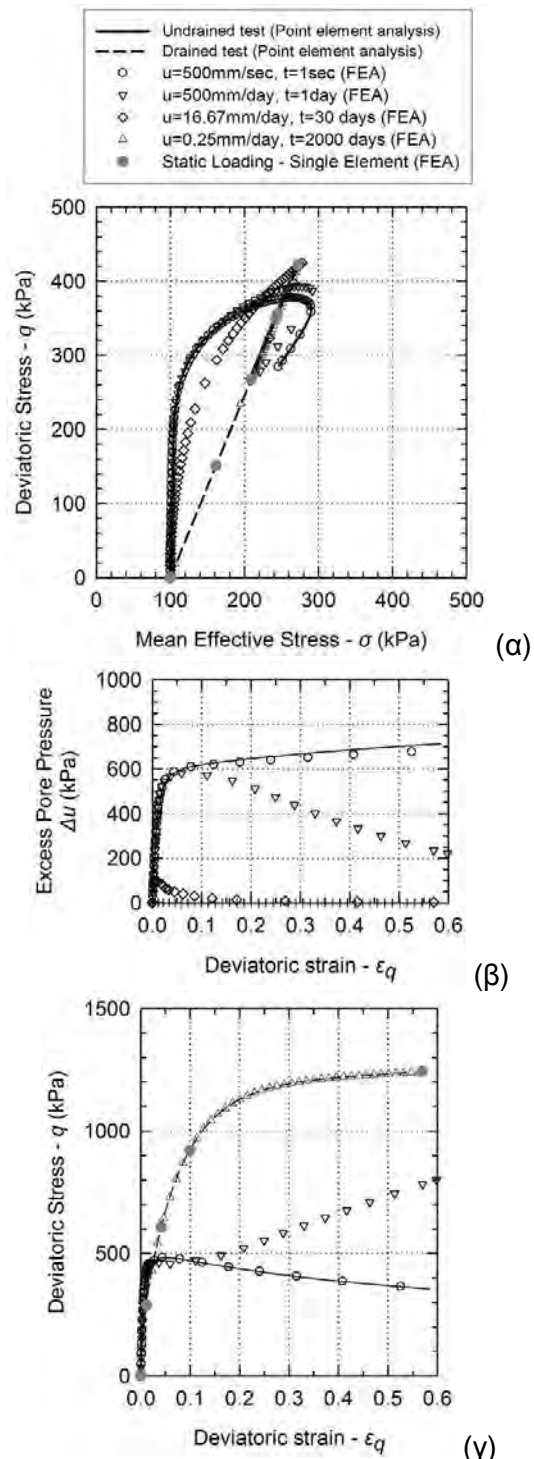
Figure 13. Comparison of the compression curves at the elements 25 and 27 with the compression curves calculated by the vertical displacement and the external stress.

Από τις δοκιμές αυτές προκύπτει πως για $k/(\Delta h/\Delta t) < 10^{-8}$ οι συνθήκες είναι αστραγγιστές, ενώ για $k/(\Delta h/\Delta t) > 0.5$ οι συνθήκες είναι στραγγισμένες.

4.1.3 Δοκιμή τριαξονικής θλίψης

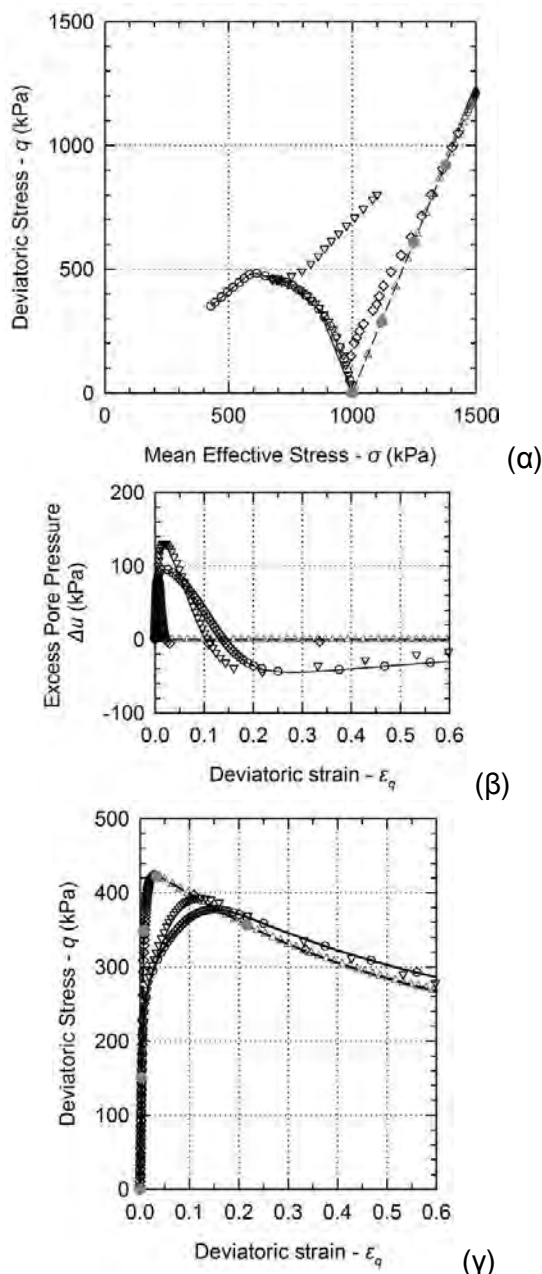
Προσομοιώθηκε η τριαξονική θλίψη κατά την οποία το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν η κατακόρυφη παραμόρφωση της άνω παρειάς για ρυθμούς μετατόπισης $\dot{u}_2 = 500\text{mm/sec}$, 500mm/min , 500mm/hr , 500mm/day , 16.67mm/day , 1.00mm/day και 0.25mm/day . Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν για αρχικές ισότροπες κατάστασεις: α) $\sigma = 100\text{kPa}$ με λόγο

προφόρτισης $\sigma_o/\sigma = 10.0$ και β) $\sigma = 1000\text{kPa}$ με λόγο προφόρτισης $\sigma_o/\sigma = 1.13$. Οι συγκρίσεις από επιλεγμένα αποτελέσματα των αναλύσεων με αυτών σε υλικό σημείο φαίνονται στα Σχήματα 14 και 15.



Σχήμα 14. Προσομοίωση τριαξονικής θλίψης για διάφορους ρυθμούς φόρτισης – σύγκριση με αναλύσεις σε υλικό σημείο.

Figure 14. Simulation of triaxial compression for different loading rates – comparison to analyses at material point.



Σχήμα 15. Προσομοίωση τριαξονικής θλίψης για διάφορους ρυθμούς φόρτισης – σύγκριση με αναλύσεις σε υλικό σημείο.

Figure 15. Simulation of triaxial compression for different loading rates – comparison to analyses at material point.

Διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός επιβολής φορτίου επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του φορέα. Για πολύ μεγάλο ρυθμό μετατόπισης της άνω επιφάνειας (π.χ. $u=500\text{mm/sec}$) η συμπεριφορά είναι πρακτικά αστράγγιστη, ενώ για πολύ μικρό ρυθμό μετατόπισης είναι πρακτικά στραγγισμένη. Για ενδιάμεσους ρυθμούς μετατόπισης υπάρχει μερική στράγγιση, η οποία επηρεάζει το μέγεθος των υπερπλίσεων πόρων και

συνεπώς της μορφή των τασικών οδεύσεων και της διαστολικότητας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή προσομοιωμάτων με πολλές παραμέτρους κράτυνσης σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων έχει το εξής βασικό πλεονέκτημα: το προσομοίωμα επιλύεται στα σημεία ολοκλήρωσης στα οποία και αποθηκεύονται όλες οι παράμετροι κατάστασης και κράτυνσης. Συνεπώς, δεν απαιτείται στάθμιση των μεγεθών αυτών.

Το Προσομοίωμα Εδαφών με Δομή (MSS-2) ενσωματώθηκε στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία ενσωμάτωσης επαληθεύτηκε μέσω προσομοίωσης επιβολής συνοριακών συνθηκών τυπικών εργαστηριακών δοκιμών. Ειδικότερα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε τριδιάστατο κυβικό φορέα με τα αποτελέσματα της ευθείας εφαρμογής σε υλικό σημείο. Προσομοιώθηκαν ισότροπη συμπίεση, μονοδιάστατη συμπίεση και τριαξονική διάτμηση για στατική φόρτιση (απουσία υγρού πόρων) και για φόρτιση συζευγμένης στερεοποίησης (αγνοώντας τις βαρυτικές δυνάμεις).

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Belokas G. and Kavvadas, M. (2010), "An Anisotropic Model for Structured Soils. Part I: Theory". Computers and Geotechnics (accepted for publication).
- Μπελόκας, Γ. και Καββαδάς, Μ. (2010). "Ένα νέο ανισότροπο καταστατικό προσομοίωμα για δομημένα εδάφη". 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωπεριβαλλοντικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής.
- Μπελόκας, Γ. (2008), "Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Δομημένων και Ανισότροπων Εδαφικών Υλικών". Διδακτορική Διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.