

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΕΓΧΑΡΑΞΗΣ

Βασιλική Γκουντσίδου
Φυσικός Ραδιοηλεκτρολόγος

Χαρίτων.Μ.Πολατογλου
Αν. Καθηγητής Τομέας Φυσικής Στερεάς Κατάστασης, Τμήμα Φυσικής Α.Π.Θ.

Λέξεις-Κλειδιά: δομικά υλικά, μικροεγχαράξη, μοντελοποίηση, μηχανικές ιδιότητες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της μεθόδου μικροεγχαράξης, του προσδιορισμού και της αποτίμησης των πειραματικών διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης με τη βοήθεια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και με τη μέθοδο της μοντελοποίησης με τη χρήση Η/Υ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιδέα της ενίσχυσης μαλακών υλικών είναι απλή και πανάρχαια. Πριν από 4.500 χρόνια χρησιμοποιήθηκαν ίνες από αμίαντο για να γίνουν ποιο ανθεκτικά τα πήλινα αντικείμενα.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των δομικών υλικών εδραιώνεται η ανάγκη της μελέτης υμενίων πολλαπλών στρώσεων, η μελέτη της μικροσκληρότητας και η γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά των πολυλειτουργικών υλικών. Η προσεκτική μοντελοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χρήση λεπτομερούς γεωμετρικής αναπαράστασης και με τη βοήθεια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis-F.E.A.) (Zhangxin C.,2005) μπορεί να οδηγήσει στην ανακάλυψη ιδιαίτερης συμπεριφοράς των συμμετεχόντων υλικών και των συνδετικών κονιαμάτων, που αποτελούν κυρίαρχο παράγοντα στη συνένωση των δομικών υλικών. Επίσης είναι δυνατή η χρήση μοντέλων με οπές για να μελετηθούν οι ιδιότητες των υλικών όταν αυτά δεν παρουσιάζουν ομοιογενή μορφή, ή όταν έχει διεισδύσει σ'αυτά υγρασία που δημιουργεί προβλήματα στη μόνωση, ή υλικών πάνω σε μεγάλης έκτασης σαθρού υποστρώματος κ.λ.π.

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την πειραματική μελέτη είναι ακριβά και η διαδικασία χειρισμού εξειδικευμένη. Με τη βοήθεια προγραμμάτων H/Y είναι δυνατόν να επιτύχουμε εικονική εγχάραξη (virtual indentation) μια ευρέως γνωστή μη καταστρεπτική μέθοδος. Υπάρχει η δυνατότητα εύκολης κατασκευής των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν σε όσες στρώσεις, οποιαδήποτε σχήματα ή διαστάσεις επιθυμούμε. Υλικά μπορούν να επιλεγούν τόσο γραμμικά όσο και μη γραμμικά, να ληφθούν διαγράμματα τάσης, παραμόρφωσης, κ.λ.π. και για πιο εποπτικές παρατηρήσεις να γίνει λήψη και επίδειξη εικονικής πραγματικότητας.

Η χρήση όμως μικρών, διακριτών στοιχείων για ενίσχυση και η δημιουργία στη συνέχεια κατάλληλων δομικών υλικών είναι σχετικά νέα (Swamy, R.N., 2006). Στο Workshop “Cementitious Materials as model porous media: Nanostructure and Transport processes” που διεξήχθη στην Ελβετία τον Ιούλιο του 2005 παρουσιάστηκαν περίπλοκα πειράματα, μαθηματικά και υπολογιστικά εργαλεία από επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων που στόχευαν στη μελέτη της δομής των υλικών με βάση το κονίαμα που ομολογουμένως είναι πολύ σύνθετα υλικά.

Πολύ δύσκολα μπορούν να μετρηθούν ποσοτικά οι πολύπλοκες μικροδομές των υλικών που έχουν ως βάση το κονίαμα. Μελετώντας σε μεγαλύτερη κλίμακα τον όγκο και των προσανατολισμό των τριχοειδών πόρων και τον όγκο και την κατανομή των φυσαλίδων αέρα μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις μακροσκοπικές ιδιότητές τους. Έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια ότι η πολλαπλής κλίμακας μοντελοποίηση είναι ένας πολλά υποσχόμενος κλάδος για το συσχετισμό των ιδιοτήτων νανοδομών με αυτές του συμπαγούς κρυστάλλου (bulk) των κονιαμάτων (Jennings, H.M., 2007). Με τη μελέτη γενικά των ιδιοτήτων των νανοδομών που είναι ως επί το πλείστον διαφορετικές από αυτές του αντίστοιχου συμπαγούς κρυστάλλου (bulk), μπορούμε να φτάσουμε όπως είναι ο μελλοντικός στόχος ακόμα και σε αυτοεπιδιορθούμενες δομές.

Το βασικό υλικό και οι πρόσθετες ίνες είναι ανομοιογενή, με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας των οποίων η ελαστικότητα διαταράσσεται από την παρουσία των ινών που προστίθενται για την ενίσχυση. Η ελαστικότητα και η μεταφορά των φορτίων δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των συστατικών αλλά και από την τοπική ποσόστωση και τον προσανατολισμό των ινών (Bayard, O., 2002).

Οι Nemecek et al (Nemecek, J., 2004) πειραματίστηκαν με μία κατηγορία υλικών που έχουν ως βάση εύθραυστη μήτρα από κονίαμα σε διαφορετικές φάσεις και ενίσχυση από επιφανειακές κυρίως ίνες (Engineered Cementitious Composites) και προχώρησαν στη εγχάραξη με Berkowich εγχάρακτη. Η μικροδομή του υλικού ήταν πολύπλοκη και διακρινόταν 3

περιοχές εκτός των ινών. Στα διαγράμματα που έλαβαν φαίνεται η μεταβολή του elastic modulus σε σχέση με την απόσταση της ίνας από την περιοχή διείδυσης.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια είναι σύνηθες να χρησιμοποιούμε μεθόδους που βασίζονται στη μικροεγχάραξη για να ανακαλύψουμε τη συμπεριφορά και να μελετήσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Η μικροεγχάραξη είναι μια απλή διαδικασία που μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλη γκάμα υλικών και με τη βοήθεια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων να γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των ερευνητών. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούμε να αντιμετωπίσουμε 2 κατηγορίες επεξεργασίας: α) γνωρίζουμε τις ιδιότητες του υλικού και μελετάμε τη μικροεγχάραξη ή τις μηχανικές ιδιότητες της δομής και β) το αντίστροφο πρόβλημα όταν γνωρίζουμε τις ιδιότητες της μικροεγχάραξης και μελετάμε τις ιδιότητες του υλικού. Σύμφωνα με την ακολουθούμενη τακτική ασκείται επαφή ανάμεσα στο υλικό της διείδυσης που μπορεί να έχει οποιαδήποτε γεωμετρία και είναι συνήθως διαμάντι και το υλικό του οποίου θα μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Με τη μέθοδο αυτή μετρήθηκε σε μικροκλίμακα η μηχανική απόκριση μικρών όγκων C-S-H γέλης σε τσιμέντο που υπέστη σκλήρυνση. Εφαρμογή μπορούμε να έχουμε και σε ανομοιογενή υλικά για μεγάλο αριθμό πειραμάτων διείδυσης που θα μελετηθούν στατιστικά. Μπορούμε επίσης να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα για τις ιδιότητες του υλικού όταν το βάθος διείδυσης είναι μικρότερο από την έκταση της ανομοιογένειας.

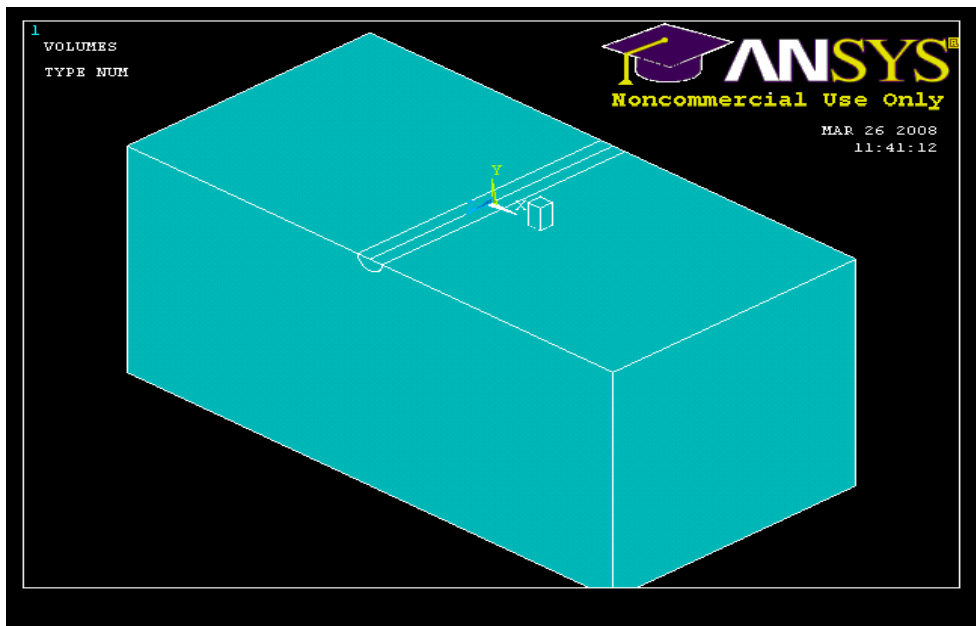
Σκοπός της εργασίας είναι η κατασκευή μοντέλου του υλικού με την ημικυλινδρική ίνα και με εικονική μικροεγχάραξη. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε πώς μεταβάλλονται οι ιδιότητες του υλικού σε σχέση με την απόσταση από την ίνα. Αναμφίβολα για περισσότερο από έναν αιώνα η εγχάραξη χρησιμοποιείται στην επιστήμη των υλικών σε μία ευρεία κλίμακα εφαρμογών για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Πολλές μέθοδοι χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων των υλικών που βασίζονται στην μικροεγχάραξη είναι απλές και πολύ χρήσιμες ως πειραματικές τεχνικές για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς μεγάλου αριθμού υλικών σε διαφορετικές κλίμακες, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, πολυμερών, κεραμικών υλικών, απλών κρυστάλλων, πολυκρυστάλλων, κ.λ.π.

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση έγινε με ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία επίλυσης σύνθετων προβλημάτων μηχανικής, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η διαφορά του με τα υπόλοιπα

προγράμματα οφείλεται στο γεγονός ότι μας εξυπηρετεί σε περιπτώσεις πολυσύνθετης γεωμετρίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για υλικά που έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Το γραφικό του περιβάλλον είναι πάρα πολύ φιλικό για το χρήστη. Γίνεται επιλογή με πολλές δυνατότητες της κατάλληλης γεωμετρίας, σε οσοδήποτε μικρές διαστάσεις ακόμη και σε τρισδιάστατη μορφή και υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας τόσο αυτόματης τρισδιάστατης διακριτοποίησης, όσο και επιλεγόμενης η οποία μπορεί να είναι πιο λεπτομερής σε επιφάνειες που χρήζουν μεγαλύτερης προσοχής. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στον καθορισμό των πεπερασμένων στοιχείων και των ιδιοτήτων τους, διαγραμμάτων x-y, κίνησης, τομών, επεξηγηματικών κειμένων και κειμένων παρατηρήσεων, ιστομικών καμπύλων και πολύ εξυπηρετικό σύστημα βοήθειας και τεκμηρίωσης. Όπως είχαμε προαναφέρει τα παραπάνω προγράμματα παρέχουν εκτεταμένες μη γραμμικές δυνατότητες και δυνατότητες προσομοίωσης μεγάλης καταπόνησης, μεγάλης παραμόρφωσης, πλαστικότητας υλικού, υπερελαστικότητας, ιδιοτήτων εξαρτωμένων από τη θερμοκρασία κ.λ.π.

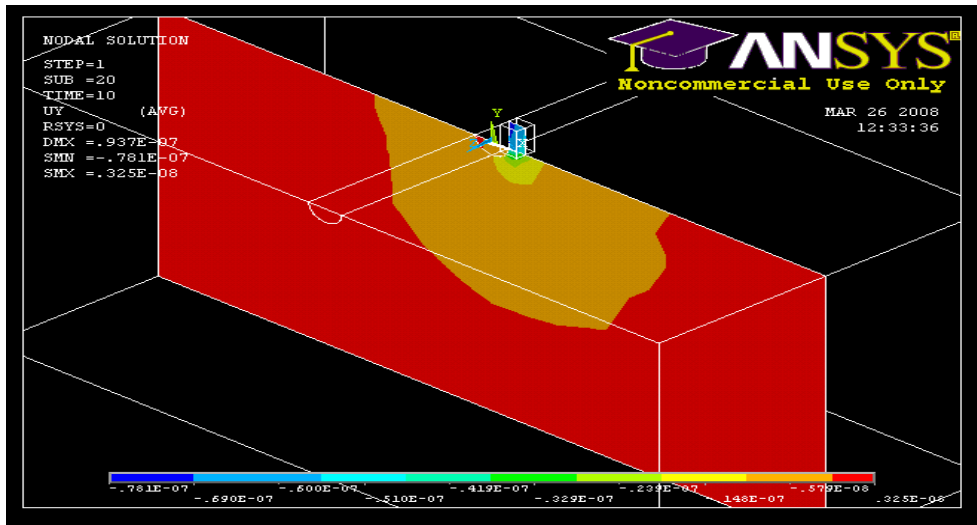
Προχωρήσαμε σε μοντελοποίηση με τη βοήθεια H/Y και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και κατασκευάσαμε ένα υλικό σε σχήματος ορθογωνίου με Young modulus=750 kPa και Poisson ratio=0.28. Τοποθετήσαμε στην άνω επιφάνεια ένα μαλακότερη, ημικυλινδρικής μορφής, με Young modulus=75 kPa και πήραμε επίσης Poisson ratio=0.28. Ο μικροεγχαράκτης είχε σχήμα ορθογωνίου και ήταν από πολύ σκληρότερο υλικό (Young modulus=7.5 MPa και Poisson ratio=0.28).

Όπως φαίνεται στη συνέχεια από τις εικόνες που ακολουθούν πακτώσαμε την κάτω επιφάνεια του μεγάλου ορθογωνίου και ασκήσαμε πίεση 2.000 Pa στην επάνω επιφάνεια του ορθογωνίου μικροεγχαράκτη. Στην Εικόνα 1 δείχνουμε το απλό μοντέλο του υλικού με την ημικυλινδρική ίνα που αποτελείται από μαλακότερο υλικό και το μικροεγχαράκτη σε αρκετή απόσταση από αυτήν. Μοντελοποίηση έγινε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο μικροεγχαράκτης είναι ακριβώς δίπλα στην ημικυλινδρική ίνα, στη δεύτερη αρκετά μακριά και στην τρίτη περίπτωση ακριβώς επάνω της. Και στις τρεις περιπτώσεις εξετάζουμε τη μετατόπιση του υλικού, την τάση και την παραμόρφωση. Η μελέτη μπορεί επίσης να γίνει τόσο με ελαστικά όσο και με μη ελαστικά υλικά, όσο και με την τοποθέτηση στο μοντέλο περισσότερων ινών κ.λ.π..

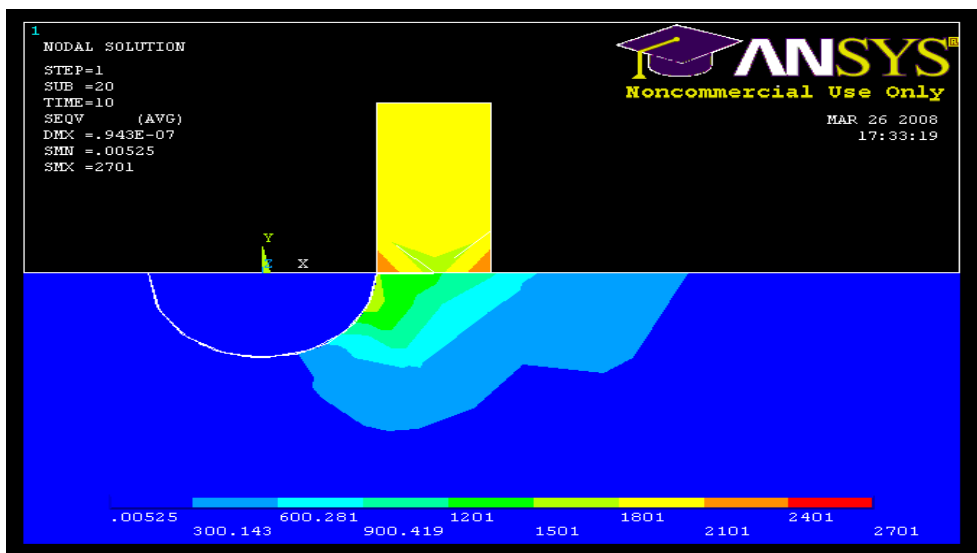


Εικόνα 1. Απεικόνιση της γεωμετρίας του υλικού σχήματος ορθογωνίου, της ημικυλινδρικής ίνας και του ορθογώνιου εγχαρακτή. Στην περίπτωση αυτή ο εγχαρακτής είναι κοντά στην ημικυλινδρική ίνα.

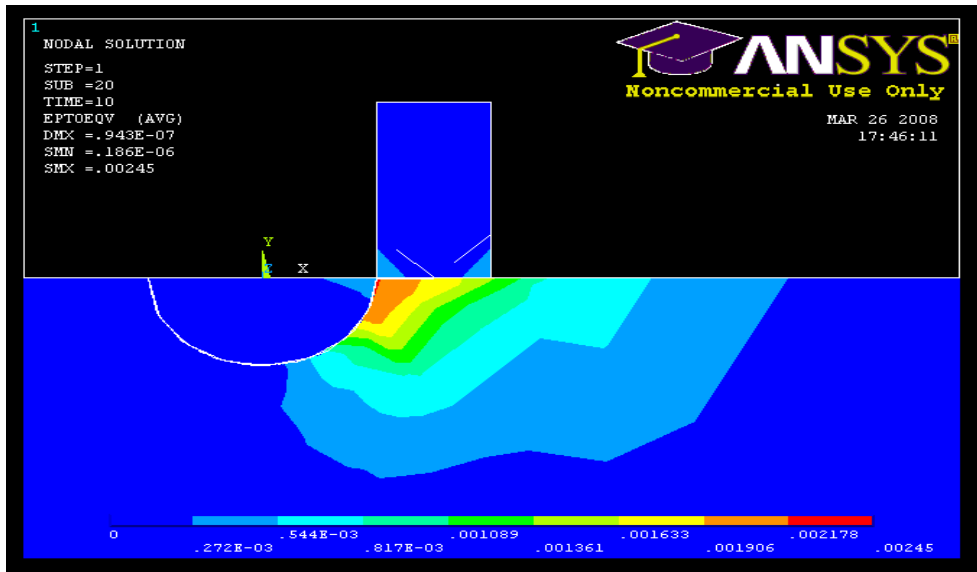
Ξεκινάμε με την περίπτωση που ο εγχαρακτής είναι ακριβώς δίπλα στην ίνα. Στην Εικόνα 2 διακρίνουμε τομή του μοντέλου και την ισοτιμική καμπύλη μετατόπισης κατά τον κατακόρυφο άξονα. Στην Εικόνα 3 έχουμε τομή του μοντέλου και την ισοτιμική καμπύλη τάσης κατά τον κατακόρυφο άξονα, ενώ στην Εικόνα 4 ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα. Επειδή το υλικό του ορθογωνίου είναι πιο σκληρό από της ίνας υφίσταται αυτό όλη την παραμόρφωση και δεν προχωράει τίποτε στην ίνα. Στη δεύτερη περίπτωση ο εγχαρακτής είναι μακριά από την ίνα. Στην Εικόνα 5 έχουμε τομή του μοντέλου και την ισοτιμική καμπύλη τάσης κατά τον κατακόρυφο άξονα, ενώ στην Εικόνα 7 ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα. Στην Εικόνα 6 βλέπουμε καθαρά την προς τα άνω μετατόπιση που υφίσταται η μαλακότερη ίνα. Στην τρίτη περίπτωση ο εγχαρακτής είναι πάνω στην ίνα και η επιρροή του είναι σε ολόκληρο το μήκος της. Στην Εικόνα 9 έχουμε τομή του μοντέλου και την ισοτιμική καμπύλη τάσης κατά τον κατακόρυφο άξονα, ενώ στην Εικόνα 8 ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα.



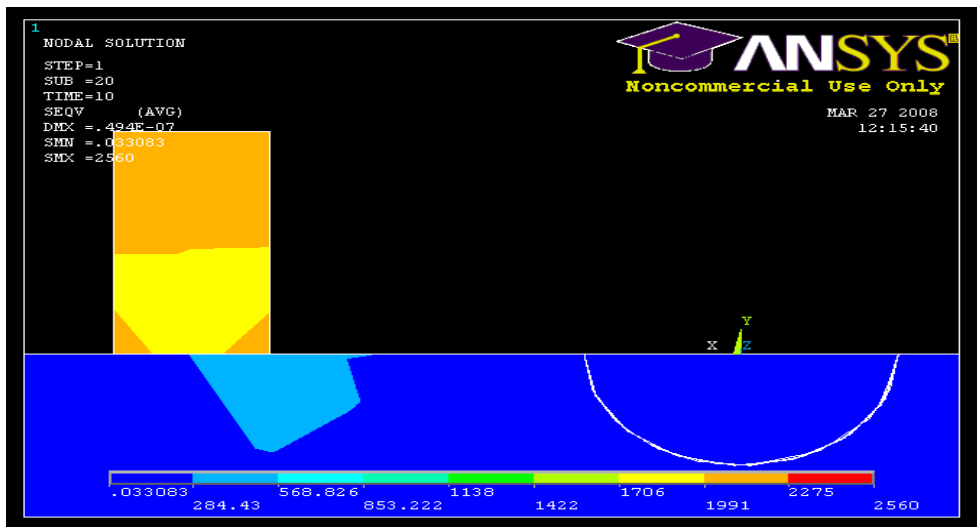
Εικόνα 2. Στην εικόνα διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή ο εγχαράκτης είναι ακριβώς δίπλα στην ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη μετατόπισης κατά τον κατακόρυφο άξονα



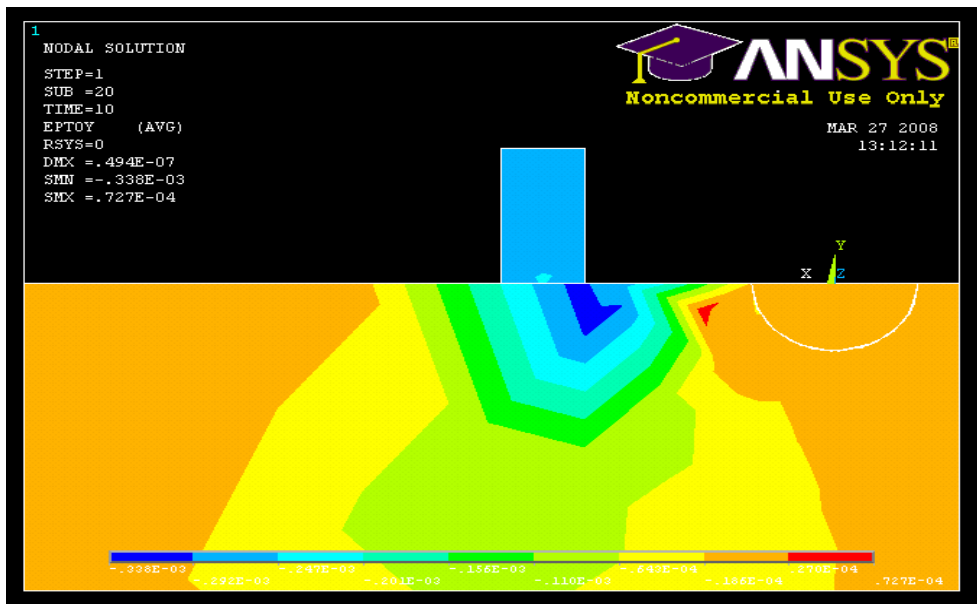
Εικόνα 3. Στην εικόνα διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή ο αυτή ο εγχαράκτης είναι ακριβώς δίπλα στην ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη τάσης κατά τον κατακόρυφο άξονα.



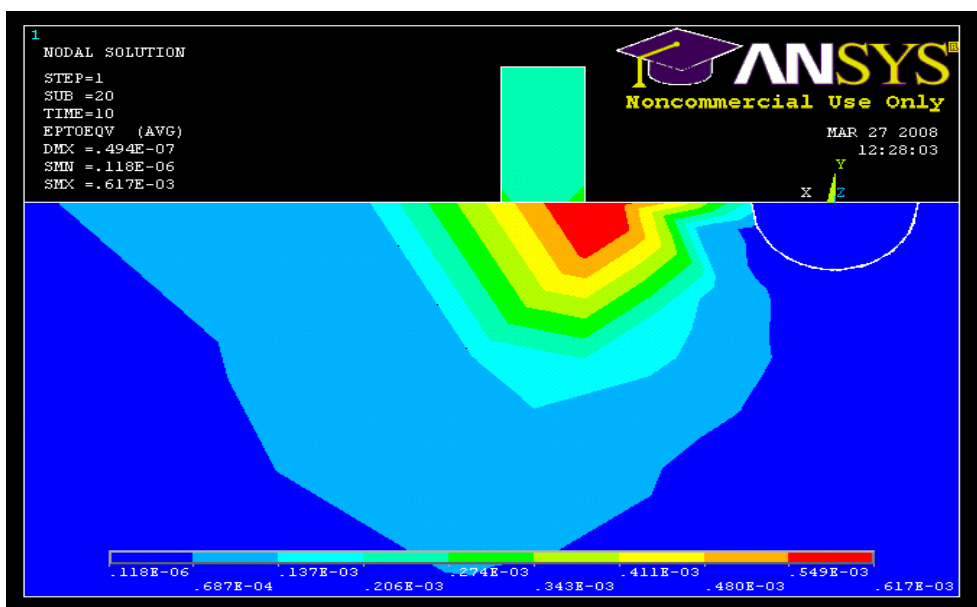
Εικόνα 4. Στην εικόνα διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή ο εγχαράκτης είναι ακριβώς δίπλα στην ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα.



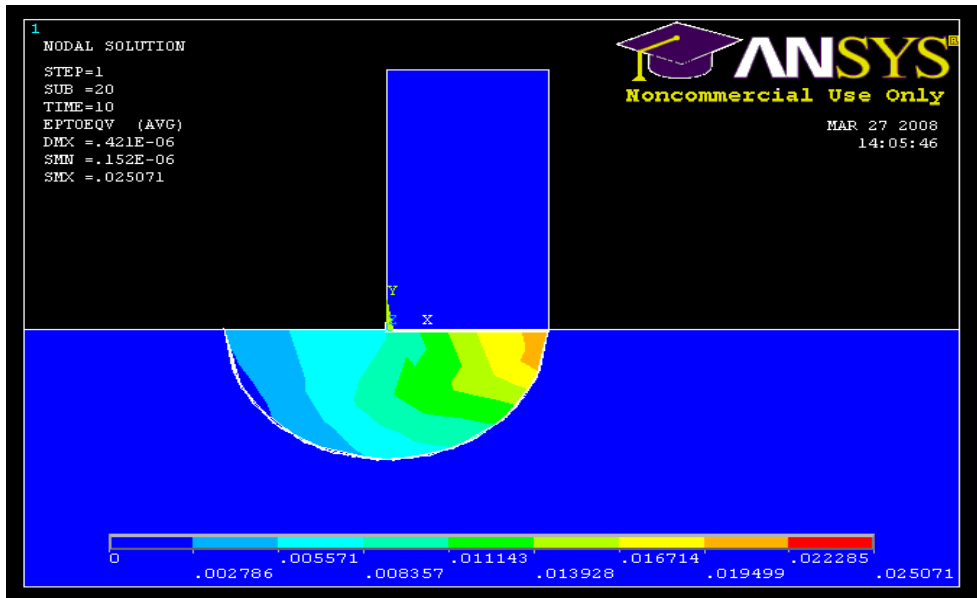
Εικόνα 5. Στην εικόνα διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή ο εγχαράκτης είναι μακριά από την ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη τάσης von Mises.κατά τον κατακόρυφο άξονα.



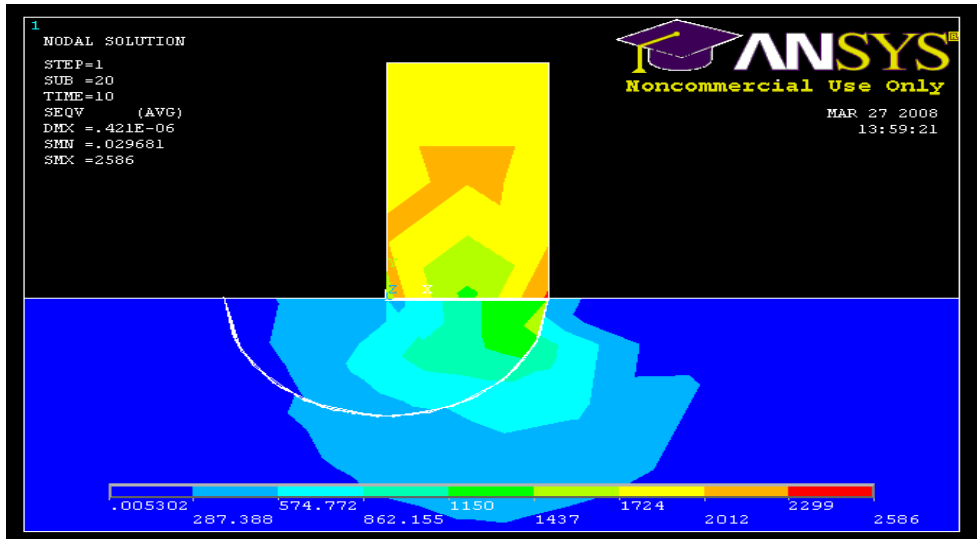
Εικόνα 6. Απεικόνιση της παραμόρφωσης κατά τον άξονα y. Φαίνεται καθαρά η μεγαλύτερη ανύψωση από δεξιά όπου υπάρχει η ίνα με μαλακότερο υλικό.



Εικόνα 7 Στην εικόνα διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Στην περίπτωση αυτή ο εγχαράκτης είναι μακριά από την ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα.

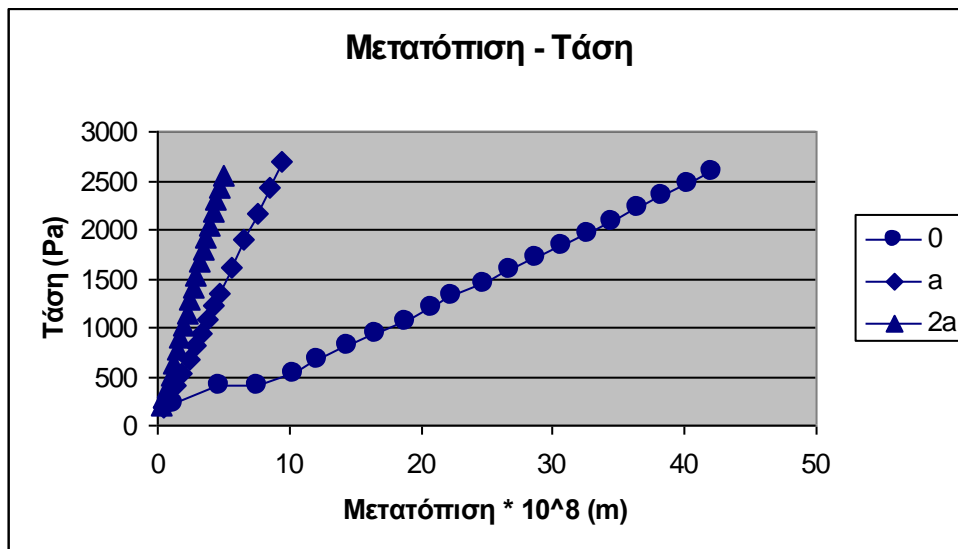


Εικόνα 8. Διακρίνουμε τομή του μοντέλου με τον εγχάρκτη πάνω από την ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη παραμόρφωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα.



Εικόνα 9. Διακρίνουμε τομή του μοντέλου. Με το εγχάρκτη πάνω από την ίνα. Εδώ απεικονίζεται ισοτιμική καμπύλη τάσης, κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Από το σύνολο των περιπτώσεων που μελετήσαμε καταγράψαμε την μετατόπιση κατά την διεύθυνση της κίνησης του εγχαράκτη καθώς και την τάση σε κάθε βήμα της εγχάραξης. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζουμε τις καμπύλες για τις τρεις θέσεις του εγχαράκτη, τις οποίες συμβολίζουμε με 0, a και 2a, όπου a είναι το μήκος της βάσης του εγχαράκτη. Παρατηρούμε ότι το υλικό εμφανίζεται να έχει καμπύλες μετατόπισης-τάσης που έχουν μικρότερη κλίση, άρα μικρότερο Young modulus, όσο πλησιάζει ο εγχαράκτης την ημικυλινδρική ίνα. Αυτό το αποτέλεσμα μας δείχνει ότι δεν είναι απαραίτητο να είναι διαφορετικές οι ιδιότητες του υλικού κοντά στην ίνα ώστε να παρατηρήσουμε αυτή την φαινόμενη μεταβολή του Young modulus. Συνεπώς το συμπέρασμα που κατέληξαν οι Nemecek et al (Nemecek, J., 2004), ότι δηλαδή η αντίστοιχη μεταβολή του Young modulus στα πειράματά τους οφείλεται στην διαφοροποίηση του υλικού κοντά στην ίνα αποδίδει μερικώς την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού.



Εικόνα 10. Καμπύλες μετατόπισης-τάσης για τις τρεις θέσεις του εγχαράκτη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις παραπάνω τομές διακρίνεται καθαρά η μεταβολή της τάσης και της παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την απόσταση του μικροεγχαράκτη από την ημικυλινδρική ίνα. Παρατηρούμε ότι το υλικό έχει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την θέση του εγχαράκτη. Όσο πιο κοντά είναι ο εγχαράκτης στην ίνα τόσο το υλικό εμφανίζεται να έχει μικρότερο Young

modulus. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε πειραματικά, μόνο που αποδόθηκε στην διαφοροποίηση του υλικού κοντά στην ίνα. Δείξαμε ότι είναι δυνατό να υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά παρόλο που δεν διαφοροποιούμε τις ιδιότητες του υλικού κοντά στην ίνα. Συνεπώς μόνο μέρος της παρατηρούμενης πειραματικά μεταβολής του Young modulus οφείλεται στην διαφοροποίηση του υλικού.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Bayard, O., Ple “Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modeling and experimental investigations” *Engineering Fracture Mechanics* 70(2003) 839-851

[2] Constantinides, G., Ulm, F.-J., Vliet, K.V., “On the use of nanoindentation for cementitious materials” *Materials and Structures* 36(2003) 191-196

[3] Jennings, H.M., Thomas J.J., Gevrenof J.S., Constantinidis G., Ulm F.-J., “A multi-technique investigation of the nanoporosity cement paste”. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 329-336

[4] Nambiar, E.K.K., Ramamurthy K., “Models for strength prediction of foam concrete” *Materials and structures* 41 247-254 (2008)

[5] Nemecek, J., Kabele P., Zdenek B. “Nanoindentation based assessment of micromechanical properties of fiber reinforced cementitious composite” 6th RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC)-BEFIB 2004 20-22 September 2004, Varenna, Italy, 401-410

[6] Papayianni I., Stefanidou M., “Strength-porosity relationships in lime-pozzolan mortars” *Construction and Building Materials* 20 (2006) 700-705

[7] Swamy R.N., “Fibre reinforcement of cement and concrete” *Materials and Structures* 8 (2006) 235-254

[8] Zhangxin Chen., “Finite Element Methods and Their Applications”, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2005)

