

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΓΕΛΗΣ
ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ**



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΤΣΑΛΑΜΑΔΟΥΡΟΥ ΧΑΡΑ (Α.Μ. 7793)

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΙΑΜΑΝΤΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΠΔ 407)**

ΠΑΤΡΑ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην επίδραση των εγκλεισμάτων αερογέλης όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάς. Είναι γνωστό ότι η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς κυρίως όσον αφορά την κατασκευή των κτηρίων. Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί επιδιώκουν να επιτύχουν βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες σε οικοδομικές κατασκευές με τη χρήση θερμομονωτικών υλικών.

Στην αρχή της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας ορίζονται βασικές έννοιες για την εκτενέστερη κατανόηση του θέματος. Στη συνέχεια αναλύεται η μεθοδολογία χρήσης και λειτουργίας του εμπορικού προγράμματος προσομοίωσης Digimat, με το οποίο πραγματοποιούνται όλες οι προσεγγίσεις-αναλύσεις της παρούσας εργασίας. Τέλος, αναπτύσσονται εκτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος αριθμητικής προσομοίωσης Digimat.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Διαμαντάκο Ιωάννη, Επίκουρο Καθηγητή ΠΔ 407 του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, καθώς και το Εργαστήριο Αντοχής Υλικών για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την εκπόνηση της Εργασίας.

Τσαλαμαδούρου Χαρά

Μάιος 2022

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

Σημείωση: Εάν η εργασία εκπονείται από δύο Φοιτητές γράφεται το αντίστοιχο κείμενο σύμφωνα με την υπόδειξη του άρθρου 8.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στη μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων Προηγμένης Θερμομονωτικής Τσιμεντοκονίας, η οποία χαρακτηρίζεται από το χαμηλό της κόστος και την αυξημένη θερμομόνωση. Η εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς θα επιτευχθεί με ανάπτυξη προηγμένων προσομοιωμάτων αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε Κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται ο σκοπός της εργασίας, οι βασικές έννοιες ομογενοποίησης υλικών, οι μέθοδοι ομογενοποίησης, το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, καθώς και ο ορισμός της θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας και καταγράφονται γενικές πληροφορίες σχετικά με αυτή. Ορίζεται και εξηγείται αναλυτικά ο όρος Aerogel Silica, από τον οποίον αποτελούνται τα εγκλείσματα της τσιμεντοκονίας.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο εξηγείται το εμπορικό πρόγραμμα προσομοίωσης μοντέλων για την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων του τσιμεντοκονιάματος με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος Digimat, ο τρόπος ανάλυσης καθώς και οι επιλογές που προσφέρονται από αυτό.

Στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σχετικά με το πως πραγματοποιούνται οι αναλύσεις τσιμέντου με εγκλείσματα Aerogel Silica με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του εμπορικού προγράμματος προσομοίωσης Digimat.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο υπολογίζεται ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων για διάφορες περιπτώσεις κατανομής των εγκλεισμάτων στο χώρο της μικροδομής του RVE. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται με τη χρήση του προγράμματος Digimat καθώς επίσης και με μαθηματικούς υπολογισμούς. Οι διαφορετικές περιπτώσεις για τις οποίες υπολογίστηκε ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων είναι η ύπαρξη μοναδικού εγκλείσματος, η μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα εγκλεισμάτων που επιτεύχθηκε και η τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων δίχως τη δυνατότητα εισχώρησης ενός εγκλείσματος μέσα στο άλλο.

Το πέμπτο Κεφάλαιο αναφέρεται στα συμπεράσματα που λήφθηκαν κατά τους υπολογισμούς του τέταρτου Κεφαλαίου καθώς και οι παρατηρήσεις που έγιναν μεταξύ των περιπτώσεων και με άλλη ερευνητική εργασία.

Στο Παράρτημα 1 καταγράφονται σε αναλυτικούς πίνακες τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για το προσομοιωμένο μοντέλο αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου με μοναδικό έγκλεισμα. Στο Παράρτημα 2 καταγράφονται σε αναλυτικούς πίνακες τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για τη μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα εγκλεισμάτων καθώς και ο πίνακας με τις υπολογισμένες συντεταγμένες για την επίτευξή της. Στο Παράρτημα 3 καταγράφονται σε αναλυτικούς πίνακες τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για την τυχαία κατανομή-διασπορά εγκλεισμάτων στο προσομοιωμένο μοντέλο αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
1 Εισαγωγή και Βασικές Έννοιες.....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.1.1 Σκοπός Εργασίας.....	8
1.2 Βασικές Έννοιες.....	8
1.2.1 Ομογενοποίηση Ιδιοτήτων Υλικών	8
1.2.2 Τεχνικές Αριθμητικής Μελέτης Ομογενοποίησης	10
1.2.3 Αντιπροσωπευτικού Στοιχείο Όγκου RVE.....	12
1.3 Προηγμένη Θερμομονωτική Τσιμεντοκονία.....	13
1.3.1 Aerogel Silica	14
2 Πρόγραμμα Digimat.....	17
2.1 Πρόγραμμα Επίλυσης Μοντέλων Προσομοίωσης Με Τη Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων	17
2.1.1 Digimat.....	17
2.1.2 Digimat-FE.....	17
2.2 Μεθοδολογία Επίλυσης	18
3 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων Με Τη Χρήση ΠΣ	37
3.1 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων ΠΣ Για Την Εκτίμηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Προηγμένης Θερμομονωτικής Τσιμεντοκονίας	37
3.2 Μοναδικό Έγκλεισμα.....	40
3.3 Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα εγκλεισμάτων	52
3.4 Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων	66
4 Εκτιμήσεις Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων λ.....	80
4.1 Εκτίμηση Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων Λόγω Ύπαρξης Εγκλεισμάτων Αερογέλης.....	80
4.2 Εκτίμηση λ Για Μοναδικό Έγκλεισμα.....	80
4.3 Εκτίμηση λ Για Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα Εγκλεισμάτων	81
4.4 Εκτίμηση λ Για Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων	82
5 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις.....	84
5.1 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων Προσεγγίσεων	84
Βιβλιογραφία	87

Παράρτημα Α	89
Παράρτημα Β	91
Παράρτημα Γ	93

1 Εισαγωγή και Βασικές Έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Ένας από τους κύριους στόχους των μηχανικών είναι η μείωση της ενέργειας που δαπανάται για τη θέρμανση και ψύξη των κτηρίων. Το πρόβλημα εστιάζεται κυρίως σε παλαιά κτήρια με κακή θερμομόνωση. Μια λύση σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η εφαρμογή θερμομονωτικών τύπου πολυστρωματικών κελύφων (ETICS), οι οποίες είναι αρκετά αποδοτικές και αποτελούνται από στρώματα θερμομονωτικών και υγρομονωτικών υλικών, τα οποία επικολλώνται στις εξωτερικές επιφάνειες των κτηρίων.

Η εναλλακτική λύση, αντί για πολυστρωματικά κελύφη, είναι η χρήση θερμομονωτικών επιχρισμάτων, τα οποία συνεισφέρουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, στη βελτίωση του εσωτερικού της κατασκευής καθώς και στη θερμική μόνωση. Το πλεονέκτημα τους σε σχέση με τα κελύφη είναι πως εφαρμόζονται πολύ ευκολότερα, καθώς απαιτούν συνήθως μία μόνο στρώση υλικού και μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα σε κάθε τύπο επιφάνειας, χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερης προετοιμασίας της.

Ένα τέτοιο υλικό, το οποίο αναπτύσσεται με σκοπό την επίτευξη υψηλής θερμικής μόνωσης, είναι η προηγμένη θερμομονωτική τσιμεντοκονία με εγκλείσματα αερογέλης που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η προσθήκη κόκκων αερογέλης βοηθά στην επίτευξη χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στο υλικό, ταυτόχρονα, όμως, υποβαθμίζει τις μηχανικές του ιδιότητες. Αυτές οι μηχανικές ιδιότητες μελετώνται στην παρούσα πτυχιακή εργασία.

1.1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων μιας προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας χαμηλού κόστους. Πιο συγκεκριμένα, η προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης (aerogel) στη σύνθεση των παρασκευασμένων μιγμάτων τσιμεντοκονίας, τα οποία χρησιμοποιούνται ως επιχρίσματα στα κτήρια, οδηγεί στη βελτίωση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Ωστόσο, υπάρχει ταυτόχρονη αρνητική επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των επιχρισμάτων.

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εκτίμηση της επίδρασης της περιεκτικότητας των εγκλεισμάτων αερογέλης σε μίγμα τσιμεντοκονίας στις μηχανικές ιδιότητες του τελικού υλικού.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού μοντελοποιήθηκε, με τη χρήση του εμπορικού προγράμματος αριθμητικής προσομοίωσης Digimat, η μηχανική συμπεριφορά αντιπροσωπευτικών όγκων της μικροδομής του υλικού με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

1.2 Βασικές Έννοιες

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται και αναλύονται βασικές έννοιες που αφορούν την παρούσα πτυχιακή εργασία.

1.2.1 Ομογενοποίηση Ιδιοτήτων Υλικών

Η ομογενοποίηση σύνθετων υλικών συναντάται σε πολλές σημαντικές πρακτικές εφαρμογές, τόσο στην επιστήμη των υλικών όσο και στην εφαρμοσμένη μηχανική. Ωστόσο, η διατύπωση της έννοιας ομογενοποίηση είναι αρκετά σύνθετη. Πιο συγκεκριμένα το κάθε υλικό έχει διαφορετικές ιδιότητες. Συνεπώς, σκοπός είναι, με τον κατάλληλο συνδυασμό του σύνθετου υλικού, η δημιουργία ενός και μόνο υλικού το οποίο θα έχει λάβει τις καλές ιδιότητες από το κάθε συστατικό.

Στην ουσία ως ομογενοποίηση ορίζεται ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ισοδύναμου ομογενούς υλικού, το οποίο παρουσιάζει τις ίδιες μακροσκοπικές ιδιότητες με το σύνθετο (ετερογενές) υλικό. Στην περίπτωση των μηχανικών ιδιοτήτων η ιδιότητα που ενδιαφέρει είναι η μακροσκοπική ακαμψία του σύνθετου και του ισοδύναμου υλικού κάτω από τις ίδιες συνοριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, έστω ένα κομμάτι τσιμεντοκονιάματος το οποίο σποτελείται από τσιμέντο και αδρανή υλικά τα οποία έχουν διαφορετικά μέτρα

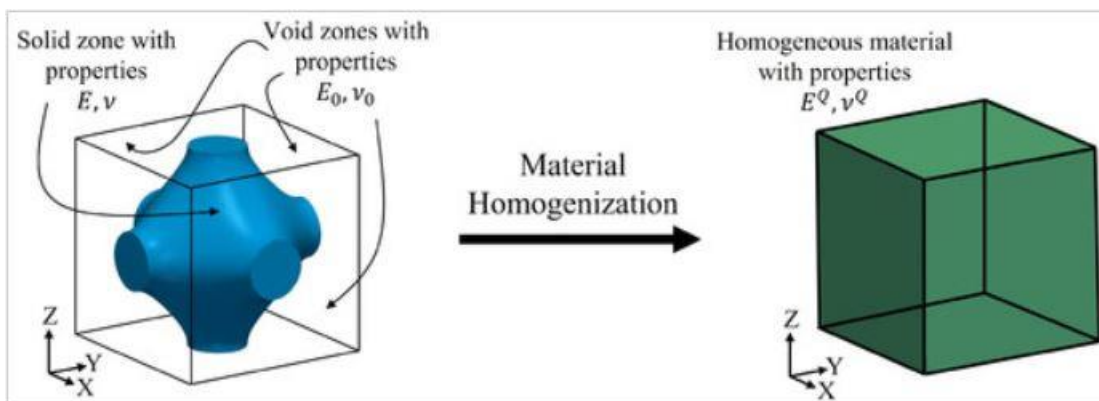
ελαστικότητας (E) μεταξύ τους. Το ισοδύναμο ομογενές υλικό που θα υπολογιστεί θα πρέπει να έχει το ίδιο μακροσκοπικό μέτρο ελαστικότητας με το μίγμα τσιμέντου και αδρανών υλικών.

Για τη δημιουργία ενός τέτοιου σύνθετου υλικού απαιτούνται πειραματικές δοκιμές, όμως εξαιτίας του όγκου και του κόστους αυτών των δοκιμών οι πειραματικές μετρήσεις είναι πολύ συχνά ανέφικτες. Για τον συγκεκριμένο λόγο έχουν αναπτυχθεί μαθηματικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ευκολότερη προσέγγιση των ιδιοτήτων του ομογενούς υλικού.

Αξιοσημείωτες είναι οι πρωτοποριακές εργασίες των Lions και Duvaut, καθώς ήταν εκείνες που προσέφεραν στην επιστήμη τα μαθηματικά εργαλεία για την επίλυση μηχανικών προβλημάτων ομογενοποίησης. Έπειτα, την δεκαετία του 1980, ο Hill έκανε μια βασική επέκταση όσον αφορά την μικρομηχανική με στόχο την επίτευξη τεχνικών ομογενοποίησης για σύνθετα υλικά (Nicola Charalambakis, 2010). Στο έργο του πλαισίωσε την έννοια RVE και τις οριακές συνθήκες τα οποία γεφυρώνουν την εικονική αρχή μεταξύ των αποτελεσματικών και ετερογενών μέσων.

Η μελέτη των σύνθετων υλικών γίνεται σε δύο κλίμακες: την μακροσκοπική και την μικροσκοπική. Για λόγους μηχανικής η ομογενοποίηση ενός υλικού οφείλεται να γίνεται με τη μελέτη της παραμόρφωσης του και στις δύο κλίμακες με τέτοιο τρόπο ώστε οι πληροφορίες που θα εξαχθούν να σχετίζονται με τις ομογενοποιημένες τιμές της καταπόνησης, αλλά και με τις πιθανές αστοχίες.

Στόχος της ομογενοποίησης είναι η δημιουργία καινοτόμων υλικών με νέες βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή πιο ενισχυμένα υλικά με ετερογενή απλοποιημένες φάσεις. Αυτό είναι εφικτό με μετάβαση από τη μικροσκοπική ταλαντευόμενη παραμόρφωση προς τη μακροσκοπική. Το πλεονέκτημα είναι η αποτελεσματικότητα στην προσέγγιση μετατοπίσεων ακόμη και σε πιο περίπλοκες πλέξεις. Αντίθετα μειονεκτεί στην προσέγγιση τάσεων λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζει στη γεωμετρία του υλικού.



Εικόνα 1: Γραφική αναπαράσταση ομογενοποίησης υλικού (<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3858/htm>)

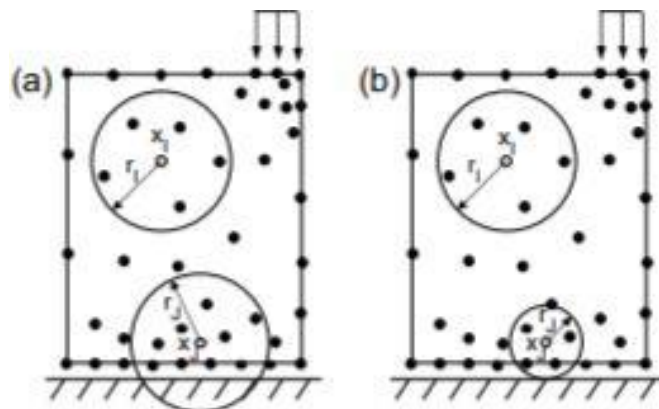
1.2.2 Τεχνικές Αριθμητικής Μελέτης Ομογενοποίησης

Λόγω της πολυπλοκότητας των καινούριων κατασκευών με χρήση σύνθετων υλικών απαιτείται πιο αποτελεσματική και ακριβής ανάλυση, όσον αφορά την προσέγγιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στην ενότητα 1.2.1 της παρούσας πτυχιακής εργασίας, η ανάλυση που πραγματοποιείται για ένα σύνθετο υλικό γίνεται με δύο ξεχωριστές προσεγγίσεις: τη μακρομηχανική και τη μικρομηχανική.

Ωστόσο, υφίστανται αρκετά μαθηματικά εργαλεία τα οποία συνεισφέρουν στην καλύτερη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών με ίνες και αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE). Οι μέθοδοι ομογενοποίησης που υπάρχουν είναι αυτές χωρίς πλέγμα ή αλλιώς Meshless ενώ η FE με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Οι μέθοδοι Meshless είναι προηγμένες τεχνικές διακριτοποίησης που μπορούν να αντικαταστήσουν με ευχέρεια τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

1.2.2.1 Μέθοδος Ακτινικής Παρεμβολής Σημείου (RPIM)

Η Σκτινική Παρεμβολή Σημείου (RPIM) είναι μια αριθμητική μέθοδος χωρίς πλέγμα που αφορά προβλήματα με διακριτοποίηση κόμβων ανεξάρτητων μεταξύ τους. Χρησιμοποιεί τη πολυωνυμική συνάρτηση βάσης και μια ακτινική. Εφαρμόζεται σε προβλήματα τρισδιάστατης μορφής, δυναμική ανάλυση σύνθετων πλακών και κελύφων καθώς και σε ελαστικά στερεά. Ωστόσο, η RPIM χρησιμοποιείται στα σύνθετα υλικά για την μικρομηχανική προσέγγιση με τη χρήση RVE, με τα τελευταία να είναι ορισμένα σε επίπεδα παραμόρφωσης. Ουσιαστικά οι μεταβλητές του πεδίου βρίσκονται μέσα σε έναν τομέα ο οποίος ονομάζεται τομέας επιρροής και συμπεριλαμβάνει έναν ορισμένο αριθμό κόμβων. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ευκολία χειρισμού σε διάφορες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα σε ένα πρόβλημα όπου υπάρχουν μεγάλες παραμορφώσεις. Ακόμη, πλεονεκτεί στο ότι έχει μια απλούστερη διαδικασία με την οποία δύναται να επιτευχθεί βελτίωση του πλέγματος. Η βελτίωση αυτή μπορεί να διαφοροποιηθεί εάν προστεθούν ή αφαιρεθούν κόμβοι. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ενδέχεται να παρουσιάζονται ακριβέστερα σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 2: α) Τομέας επιρροής μεταβλητού μεγέθους, β) Τομέας επιρροής σταθερού μεγέθους (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2603636318300034>)

1.2.2.2 Επιπλέον Μέθοδοι Meshless

Πέραν της μεθόδου Ακτινικής Παρεμβολής Σημείου (RPIM), σαν αριθμητικά εργαλεία αναφέρονται και άλλες μέθοδοι χωρίς πλέγμα. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη τεχνική χωρίς πλέγμα που αναπτύχθηκε το 1977 (Rodrigues, J. Belinha, et al., 2018) ήταν η SPH, γνωστή και ως Υδροδυναμική Μέθοδος, η οποία δημιουργήθηκε με σκοπό την προσέγγιση πολλαπλών κυψελών. Επιπροσθέτως, υπάρχουν οι ακόλουθοι μέθοδοι: Galerkin Free Element (EFGM), Αναπαραγωγής Σωματιδίων Πυρήνα (RKPM), Τοπική Μέθοδος Petron-Galerkin (MLPG), Μέθοδος Παρεμβολής (PIM), Μέθοδος Παρεμβολής Ακτινικού Σημείου Φυσικού Ορίου (NNRPIM) και πολλές ακόμη. Οι προαναφερθείσες μέθοδοι έχει αποδεικτεί ότι είναι αξιόπιστα και ακριβή μαθηματικά εργαλεία τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές μηχανικές εφαρμογές.

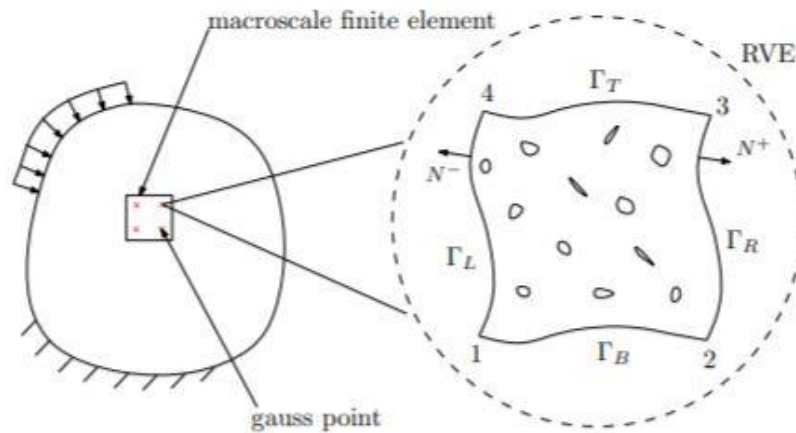
1.2.2.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FE)

Η ομογενοποίηση, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών εργαλείων και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FE), μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα μοντέλο 2D ή 3D. Αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών με ευρή φάσμα εφαρμογών και χρησιμοποιείται κυρίως σε μηχανικά προβλήματα συνεχών μέσων. Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με σκοπό την προσομοίωση μιας κατασκευής με συστατικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από έναν αριθμό κόμβων. Σε μια φυσική κατασκευή είναι γνωστό ότι ο διαχωρισμός των σημείων πραγματοποιείται τεχνητά και αυτά συνδέονται κατά μήκος των άκρων τους. Επομένως, με τον όρο πεπερασμένα στοιχεία αναφερόμαστε στα τεχνητά στοιχεία τα οποία έχουν τριγωνική ή τετραπλευρική μορφή.

Για να γίνει η χρήση των μαθηματικών μεθόδων θα πρέπει η κατασκευή να προσομοιωθεί σε έναν αριθμό πεπερασμένων μεταβλητών, οι οποίες είναι οι μετατοπίσεις και οι παράγωγοι των κόμβων. Η ύπαρξη συμβατότητας μεταξύ των μετατοπίσεων στο εσωτερικό των στοιχείων με τις μετατοπίσεις των κόμβων είναι απαραίτητη. Έτσι, το σύστημα πλέον έχει ως μοναδικό άγνωστο τις μετατοπίσεις στους κόμβους πράγμα που το καθιστά διακριτό. Τελικά, το πρόβλημα αποτελείται από γραμμικές εξισώσεις οι οποίες είναι εφικτό να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους.

Ο αλγόριθμος της ομογενοποίησης με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδανικός για πολλαπλής κλίμακας μοντελοποίηση, η οποία ακολουθεί μια σειρά από επαναλήψεις ανάμεσα στη μακροκλίμακα και στη μικροκλίμακα. Η μοντελοποίηση αυτή αντιπροσωπεύεται από το RVE έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση. Ωστόσο, οι

πληροφορίες που είναι μέσω επικοινωνίας των δύο κλιμάκων βρίσκονται στα σημεία της διακριτοποίησης, τα οποία ονομάζονται σημεία Gauss.



Εικόνα 3: 2D απεικόνιση του FE² αλγοριθμιακού πλαισίου. Το πρόβλημα της οριακής τιμής μακροκλίμακας διακρίνεται σε πεπερασμένα στοιχεία. Οι υπολογισμοί του επιπέδου του σημείου Gauss για τη μακροκλίμακα BVP λειτουργούν σε συνδιασμό με την επίλυση κλίμακας RVE που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο Gauss. (<https://arxiv.org/pdf/2003.11372.pdf>)

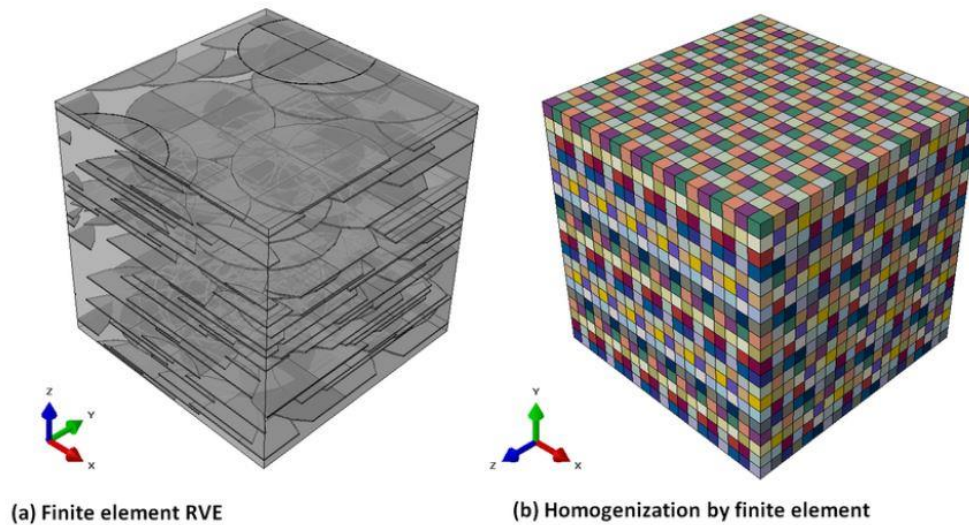
Οι λύσεις που προκύπτουν από την ανάλυση με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων στο RVE έχουν ανάλογο αριθμό με τα σημεία Gauss τα οποία αντιστοιχούν στο πλέγμα της μακροκλίμακας.

1.2.3 Αντιπροσωπευτικού Στοιχείο Όγκου RVE

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει αποκτήσει η προσέγγιση της μικροκλίμακας και της μακροκλίμακας με τη χρήση μηχανικών μεθόδων, καθώς επίσης και οι μεθοδολογίες που μπορούν να τις συνδυάσουν. Στις συγκεκριμένες προσεγγίσεις η μικροκλίμακα αναφέρεται ως αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) και η μακροκλίμακα ως ομογενοποιημένο συνεχές.

Όπως είναι γνωστό η ομογενοποίηση αφορά τη διαδικασία μελέτης μιας ομογενούς αναπαράστασης του σύνθετου υλικού, που αντιπροσωπεύει το υλικό σημείο στο οποίο είναι εφαρμοσμένες οι οριακές συνθήκες. Επομένως, η επιλογή του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) οφείλει να γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο, ώστε η δομή του υλικού που θα παρασκευαστεί να έχει σαν υλικό ενίσχυσης μικρο ή νανο σωματίδια. Τα πολλαπλά σωματίδια RVE αποτελούνται από ένα ή περισσότερα επίπεδα. Σε μια πολύστρωτη δομή του RVE κάθε στρώμα έχει τη δική του μικροδομή καθώς και από στρώμα σε στρώμα το πάχος μπορεί να διαφέρει.

Σκοπός είναι η ύπαρξη μιας αλληλουχίας από RVEs, προς όλες τις κατευθύνσεις, δίχως να γίνει εμπλοκή και κάλυψη των ορίων τους. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν το μέγεθος το οποίο θα έχει το RVE. Αυτό διότι, επιβάλεται να είναι μεγάλο στην τελική του μορφή, ταυτοχρόνα όμως, είναι αναγκαίο να είναι μικρό για εξοικονόμηση χρόνου υλοποίησης των υπολογισμών και της προσωμείωσης του υλικού.



Εικόνα 4: α) Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων RVE. β) Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για ομογενοποίηση σταθερών θερμικής αγωγιμότητας ανισότροπων RVEs. (https://www.researchgate.net/figure/a-Finite-element-modeling-of-representative-volume-RVE-of-graphene-epoxy_fig7_256677943)

1.3 Προηγμένη Θερμομονωτική Τσιμεντοκονία

Ο τομέας της μηχανικής που σχετίζεται με την κατασκευή των οικοδομικών κτηρίων αποτελεί κύριο παράγοντα κατανάλωσης της ενέργειας στο περιβάλλον. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι απαιτήσεις των κατασκευαστών αυξάνονται με σκοπό την παραγωγή αποδοτικότερων ενεργειακά κτηρίων. Λόγω των συγκεκριμένων απαιτήσεων οι μηχανικοί οφείλουν να μελετήσουν και να φέρουν στο προσκήνιο της αγοράς, καινοτόμα σύνθετα υλικά χαμηλού κόστους, αλλά εξαιρετων θερμομονωτικών ιδιοτήτων. Στόχος είναι η εξοικονόμηση ενέργειας.

Κύριο ζήτημα είναι η θερμική προστασία του κελύφους που υφίσταται ή τοποθετείται στο κτήριο, καθώς το κέλυφος καθιστά το μέσο ελαχιστοποίησης της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του κτηρίου και του περιβάλλοντος. Ως επί το πλείστον, έως τώρα, βασικό υλικό για τη θερμομόνωση σε ένα κτήριο ήταν τα πολυστρωματικά κελύφη ETICS, τα οποία κατέχουν άριστη αποδοτικότητα. Ωστόσο, μειονεκτούν λόγω του υψηλού κόστους τους και της πολύπλοκης εφαρμογής τους.

Πλέον εναλλακτική λύση των ETICS αποτελεί η εφαρμογή θερμομονωτικών επιχρισμάτων, τα οποία έχουν σαφώς ευκολότερη εφαρμογή, όμως η αποδοτικότητά τους φτάνει περίπου στο μισό των ETICS. Όπως είναι κατανοητό, εξαιτίας της ιδιαιτερότητας της αποδοτικότητας, η εφαρμογή τους θεωρείται μη επαρκής στο κομμάτι που αφορά την ικανοποίηση της θερμικής προστασίας του κελύφους.

Η ανάγκη για καινοτόμα σύνθετα υλικά οδήγησε στην μελέτη για παρασκευή επιχρισμάτων με προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης, τα οποία αφενός για τη δημιουργία τους απαιτούν υψηλό κόστος. Αφετέρου στοχεύουν στη μείωση του κόστους παραγωγής υλικών με υψηλή θερμομονωτική ικανότητα με τη χρήση καινοτόμων διεργασιών.

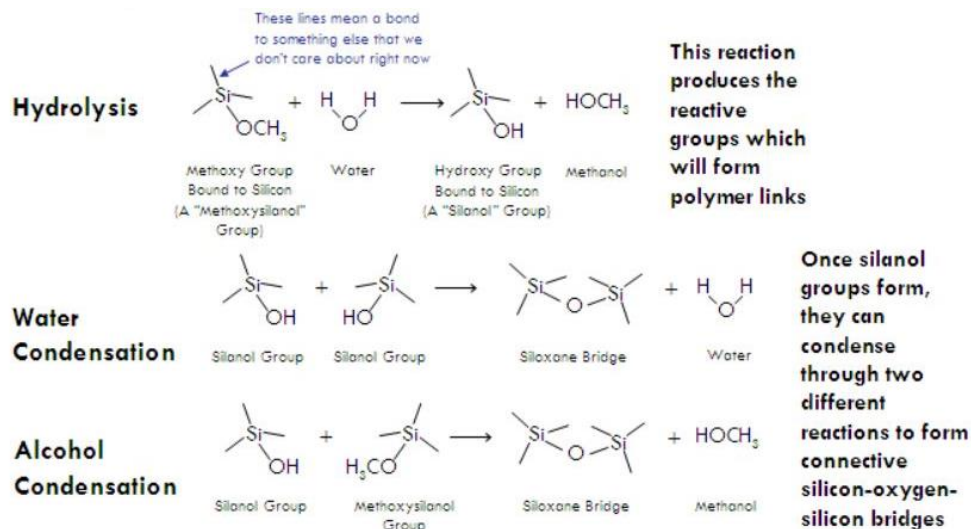
Η Τσιμεντοκονία είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από το τσιμέντο και από τα εγκλείσματα αερογέλης (Aerogel). Θεωρείται ένα καινοτόμο προηγμένο θερμομονωτικό υλικό με βελτιωμένες θερμομονωτικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος. Πιο ιδιαίτερα, η θερμομονωτική τσιμεντοκονία φέρεται να στοχεύει στην καλύτερη ποιότητα, στη μεγαλύτερη αντοχή, στην ανθεκτικότητα και βασικότερα στην εξοικονόμηση της ενέργειας, ως προς το περιβάλλον.

Βασικό ρόλο στην μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων της θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας παίζει η περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων και η επίδραση τους σε αυτές. Η τσιμεντοκονία είναι ένα ομογενοποιημένο υλικό, επομένως αναμφίβολα είναι εφικτό να υλοποιηθούν προσεγγιστικές μελέτες με τη χρήση αριθμητικών εργαλείων. Η αριθμητική προσέγγιση των μηχανικών ιδιοτήτων επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FE), όπως αναφέρθηκε αναλυτικά προηγουμένως. Η μέθοδος εφαρμόζεται στο μοντελοποιημένο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE. Έπειτα, με τη βοήθεια της διακριτοποίησης επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά η προσέγγιση της επίδρασης των εγκλεισμάτων, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

1.3.1 Aerogel Silica

Η ιστορική αναδρομή σχετικά με την εύρεση και την ανάπτυξη της αερογέλης ξεκινά από το 1930 από τον Samuel Stephens Kistler. Ο συγκεκριμένος ερευνητής παρήγαγε αερογέλη πυριτίου (Aerogel Silica) αντικαθιστώντας την υγρή φάση από ένα αέριο μόνο με μια ελαφριά συρρίκνωση της γέλης. Πέρα από την αερογέλη πυριτίου κατάφερε να δημιουργήσει αερογέλη και με άλλα υλικά όπως: αλουμίνα, οξείδιο του σιδήρου, οξείδιο του βαλφραμίου, κ.ο.κ. Ωστόσο, η μέθοδος του ήταν αρκετά χρονοβόρα και δυσλειτουργική. Σε συνέχιση του έργου του, το 1968, μια ομάδα γάλλων ερευνητών απλοποίησαν τη διαδικασία παρασκευής της αερογέλης, πραγματοποιώντας μια μετάπτωση του πηκτώματος σε διαλύτη (Jyoti L., 2010).

Πλέον η σύνθεση της αερογέλης γίνεται με επεξεργασία κolloειδούς γέλης, διότι επιβάλλεται ειδικό στέγνωμα με σκοπό την αντικατάσταση του υγρού μέρους της γέλης με αέρα. Η αναφερόμενη διαδικασία επιτυγχάνεται αφαιρώντας το υγρό υπό τη μορφή ατμοσφαιρικής πίεσης έπειτα από τη χημική τροποποίηση της εσωτερικής επιφάνειας, αφήνοντας ένα πορώδες δίκτυο γεμάτο αέρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται sol-gel και αναφέρεται σε τρεις αντιδράσεις: την υδρόλυση, τη συμπύκνωση του νερού και τη συμπύκνωση αλκοόλης (Εικόνα 5). Οι τρεις χημικές αντιδράσεις σκοπεύουν στον σχηματισμό του νανοσωματιδίου πυριτίου. Όταν τα νανοσωματίδια διασυνδεθούν μεταξύ τους σχηματίζουν ένα πήκτωμα το οποίο είναι ένα συνεχές δίκτυο που καταλαμβάνει χώρο σε όλο το χώρο του υγρού διαλύματος.



Εικόνα 5: Απεικόνιση των τριών χημικών αντιδράσεων τη Sol (<http://www.aerogel.org/wp-content/uploads/2009/03/sol-gel-alkoxide-fit.gif>).

Στις μέρες της τεχνολογίας τα Aerogel Silica έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής υψηλής τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στο ότι διαθέτουν μεγάλη ποικιλία εξαιρετικών ιδιοτήτων όπως τη χαμηλή πυκνότητα (3 kg/m^3), τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα ($0,012 \text{ W/ m}^{-1}\text{K}^{-1}$) σε συνδυασμό με την υψηλή οπτική διαφάνεια, καθώς και το υψηλό πορώδες (80-99,8%) (C. Buratti, 2016). Η χρήση της αερογέλης σε μίγματα επιχρισμάτων συναντάται συχνά σε πειράματα με laser, σε αισθητήρες, σε καταλύτες αυτοκινήτων, σε φυτοφάρμακα, στη θερμομόνωση και σε άλλες ακόμη εφαρμογές.

Η αρκετά χαμηλή αγωγιμότητα (μειωμένη κατά 90-96% σε σχέση με παλαιότερες εφαρμογές χωρίς αερογέλη) , μαζί με την καλύτερη ηχομόνωση και την ικανοποιητική μείωση της υγρασίας, συμβάλλουν στην κατασκευή ενός σύγχρονου καινοτόμου κτηρίου με βελτιωμένες ιδιότητες.

Παρόλα αυτά, στον οικοδομικό τομέα χρησιμοποιούνται δύο τύποι αερογέλης πυριτίου: η αδιαφανής πυριτική βάση Aerogel και η ημιδιαφανής. Η αδιαφανής πυριτική βάση χρησιμοποιείται ως μόνωση πάνελ για εξοικονόμηση ενέργειας, με μικρό πάχος. Αντίθετα, η ημιδιαφανής πυριτική βάση συνδυάζει την υψηλή διαπερατότητα της ηλιακής ενέργειας με τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 6: Απεικόνιση σφαιριδίων aerogel Silica (<https://kingflex.coowor.com/shop/product-detail/j33ucovi71XY.htm>)

2 Πρόγραμμα Digimat

2.1 Πρόγραμμα Επίλυσης Μοντέλων Προσομοίωσης Με Τη Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσέγγισης των μηχανικών ιδιοτήτων ενός ομογενοποιημένου σύνθετου υλικού. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία για την επίλυση των μοντέλων προσομοίωσης με σκοπό την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων της τσιμεντοκονίας με εγκλείσματα αερογέλης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FE). Για τα μοντέλα έγινε προσομοίωση και εκτίμηση της επίδρασης της περιεκτικότητας των εγκλεισμάτων, της κοκκομετρίας και των μηχανικών ιδιοτήτων. Η μηχανική προσομοίωση έγινε με αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (Representative Volume Element - RVE), μέσω του προγράμματος Digimat.

2.1.1 Digimat

Το Digimat είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης RVE και έχει την δυνατότητα να επιλύει προβλήματα ομογενοποίησης. Κατέχει αρκετές επιλογές που σχετίζονται με τις μεθόδους εκτίμησης των μηχανικών αλλά και θερμικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού, όπως Digimat-FE, Digimat-MF, Digimat -CAE, Digimat-MX (για το παρόν πρόγραμμα) καθώς και πολλές ακόμη. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα λογισμικά όπως, ANSYS, Abaqus, Marc κ.ο.κ. Είναι ένα αρκετά προσιτό και με σαφήνεια πρόγραμμα.

2.1.2 Digimat-FE

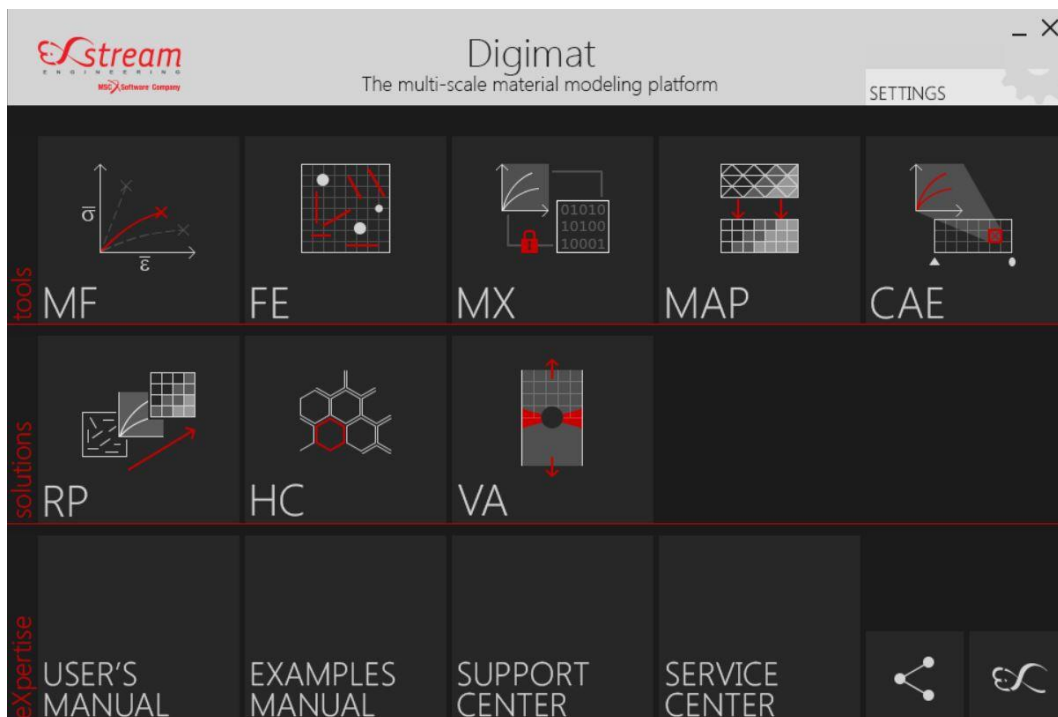
Το Digimat-FE είναι το υπολογιστικό εργαλείο του προγράμματος Digimat που σχετίζεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το σύνολο των δυνατοτήτων που προσφέρεται είναι εκτεταμένο και ο χρήστης μπορεί να κάνει εφικτή την επίλυση εξαιρετικά πολύπλοκων υλικών μικροδομής, με μεγάλη ακρίβεια και με λογικό κόστος CPU. Ωστόσο, η επίλυση του ομογενοποιημένου στοιχείου γίνεται ευκολότερα λόγω της ύπαρξης των επεξεργαστών mesher, solver και post.

Σε μια μοντελοποίηση, με τη χρήση του Digimat-FE, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο τύποι διαφορετικών RVE: 2D ή 3D. Η χρήση των 3D είναι η πιο κοινή, διότι γίνεται επιτρεπτή η ακριβέστερη τρισδιάστατη μοντελοποίηση, με μεγάλο εύρος, μικροδομών και φυσικών φαινομένων. Αντίθετα τα 2D βρίσκουν εφαρμογή μόνο για συγκεκριμένες μικροδομές, και ως παράδειγμα φέρεται η ενισχυμένη μήτρα συνεχών μεγάλων ινών.

2.2 Μεθοδολογία Επίλυσης

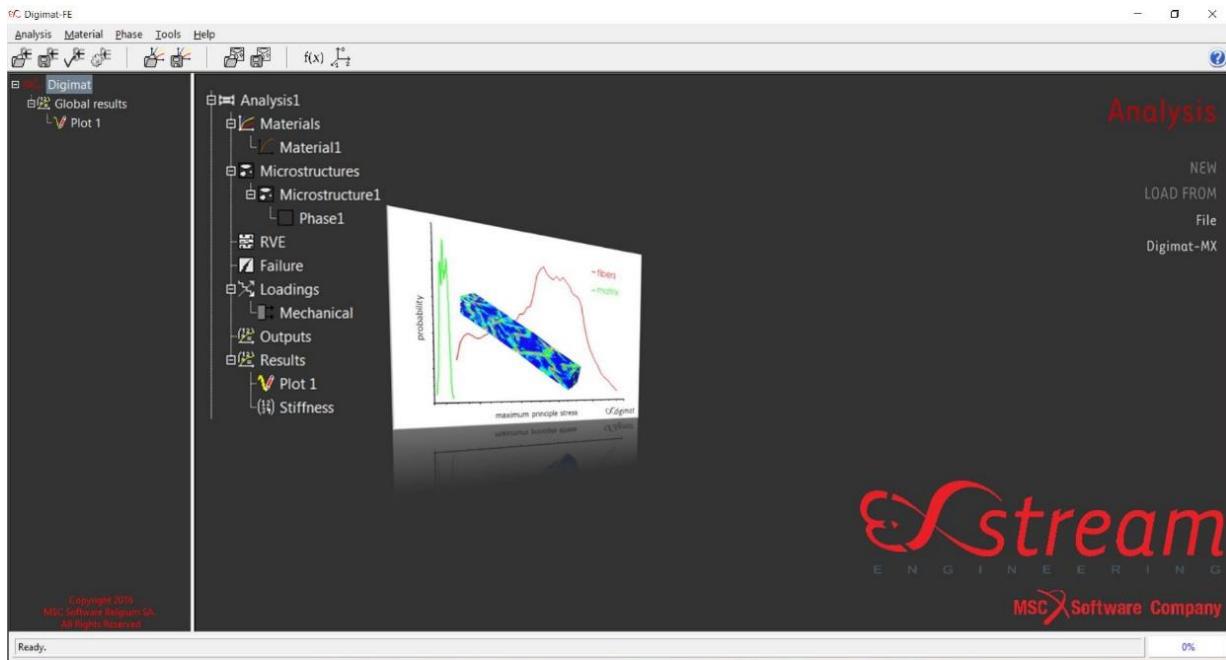
Η διαδικασία επίλυσης ενός ομογενοποιημένου RVE μέσω του προγράμματος Digimat, αποτελείται από μια ακολουθία συγκεκριμένων βημάτων που καταγράφονται παρακάτω.

Αρχικά, ο χρήστης ανοίγοντας το πρόγραμμα του Digimat, οφείλει να επιλέξει την ανάλυση κατά την οποία θα γίνει η επίλυση. Αυτό μπορεί να γίνει είτε επιλέγοντας απευθείας το όνομα της ανάλυσης στο περιβάλλον του προγράμματος, είτε επιλέγοντας την κατάλληλη ανάλυση από τη λίστα που διατίθεται στις γενικές παραμέτρους.

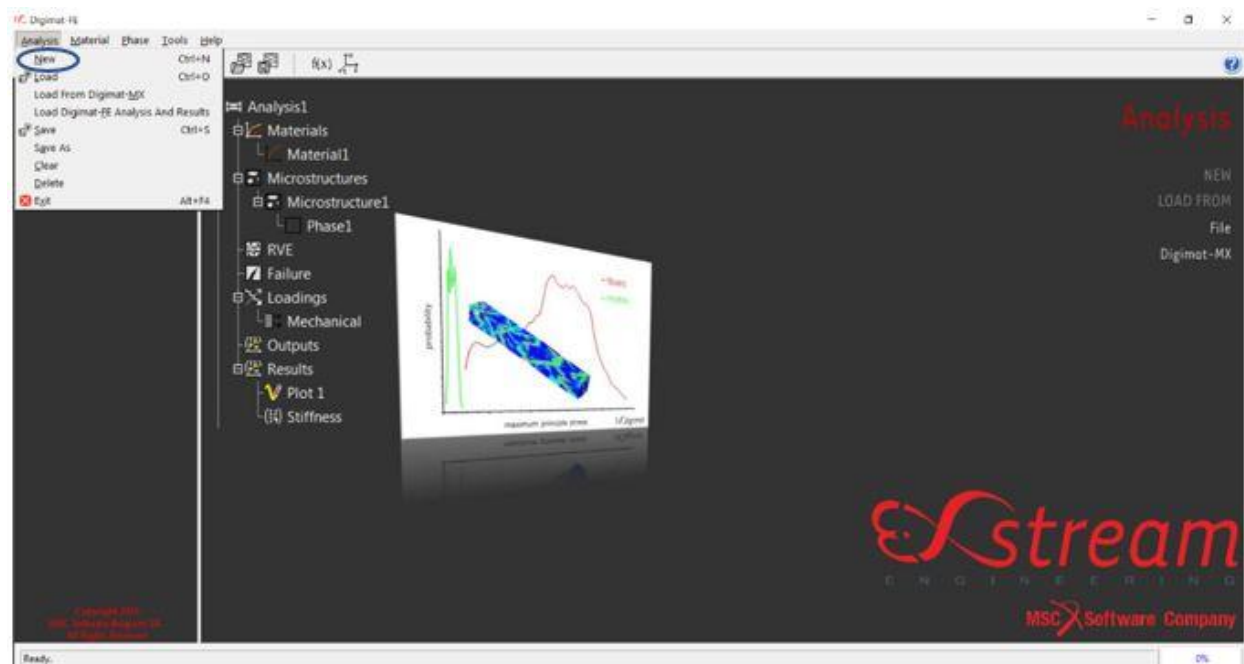


Εικόνα 7: Κύριο menu για την επιλογή ανάλυσης μέσω Digimat (Digimat)

Στην παρούσα ενότητα η μεθοδολογία επίλυσης αφορά την επίλυση με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων (FE). Επομένως, η ανάλυση που επιλέγεται από τον χρήστη αντιστοιχεί στο εικονίδιο FE. Εφόσον πραγματοποιηθεί η επιλογή το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία της ανάλυσης που πρόκειται να υλοποιηθεί. Για τη δημιουργία της ανάλυσης ο χρήστης επιλέγει τη μπάρα με την λέξη 'Analysis' και δημιουργεί ένα καινούριο αρχείο (Εικόνα 9).

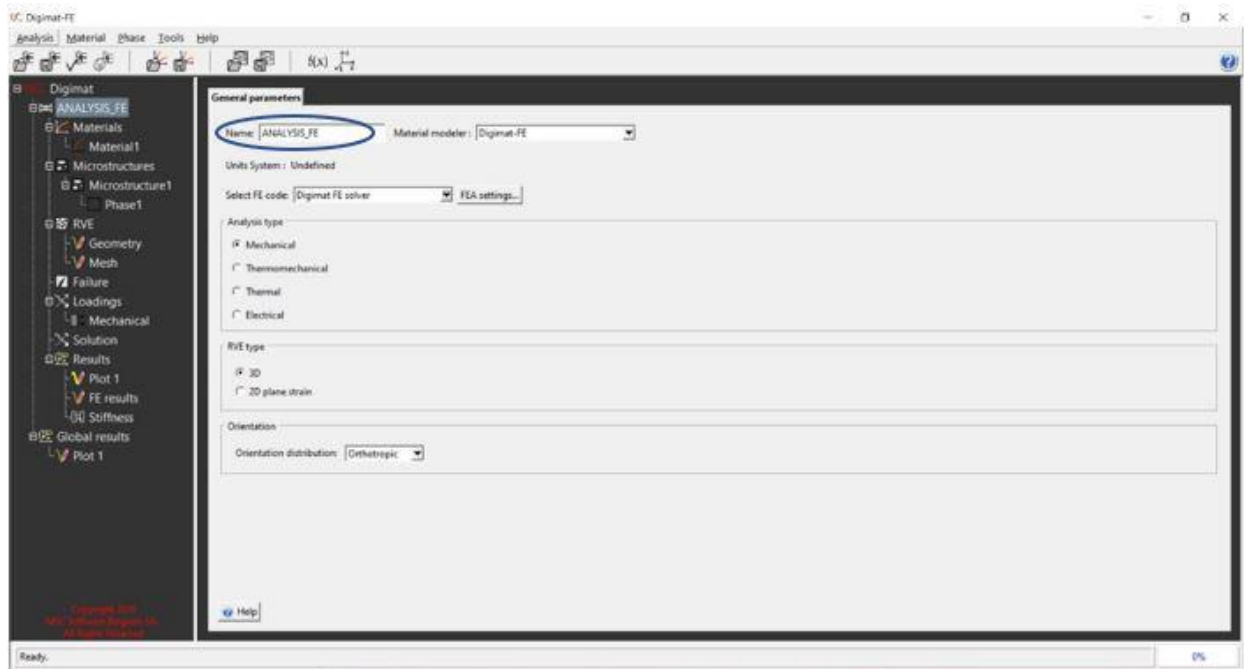


Εικόνα 8: Menu Digimat-FE (Digimat)



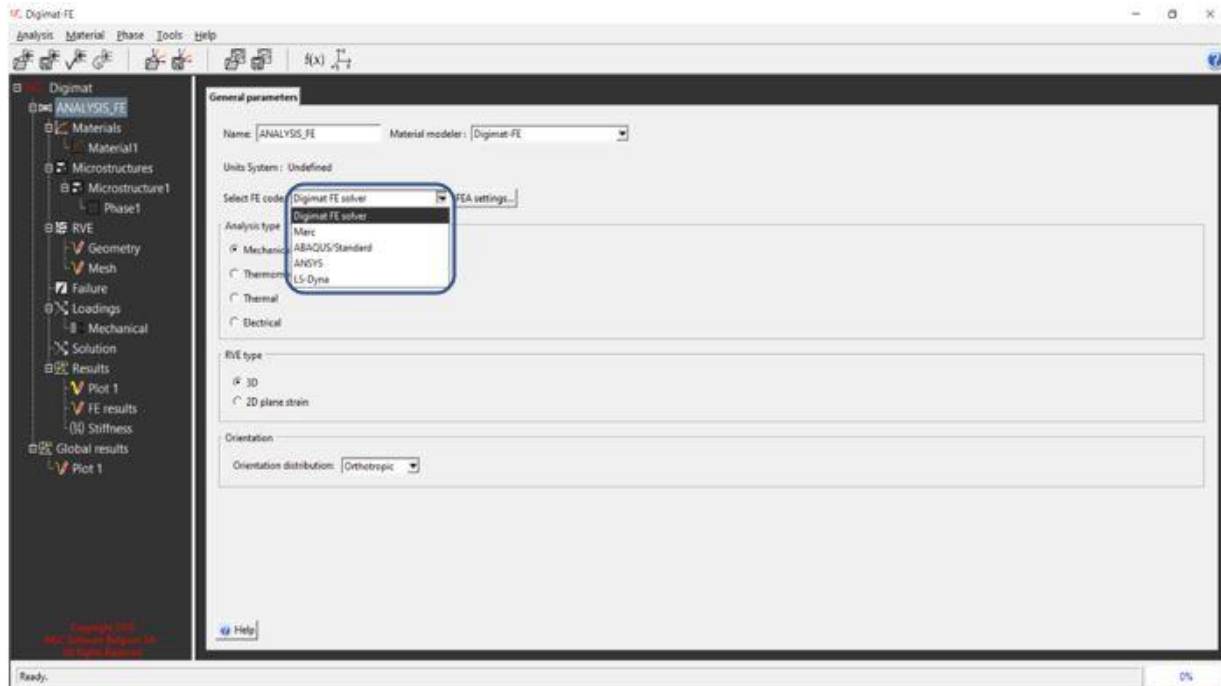
Εικόνα 9: Δημιουργία νέας ανάλυσης στο Digimat-FE (Digimat)

Με τη δημιουργία της ανάλυσης αυτόματα ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο ο χρήστης ορίζει το όνομα, τον επεξεργαστή solver καθώς και άλλες παραμέτρους.



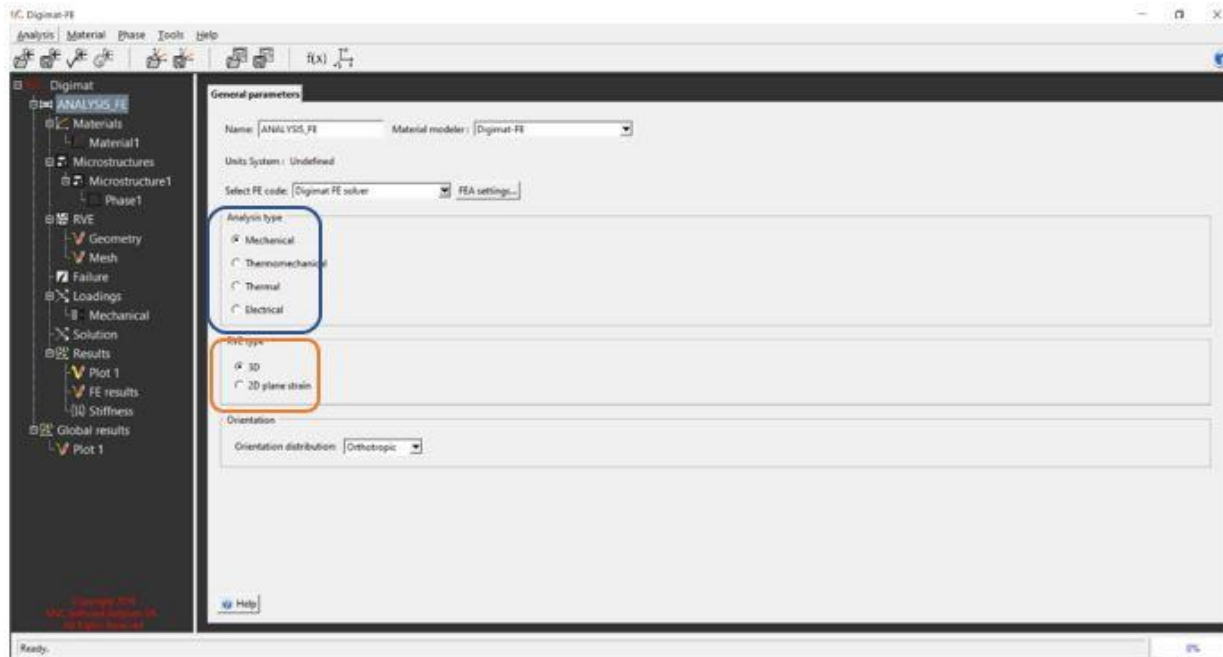
Εικόνα 10: Αλλαγή ονόματος ανάλυσης. (Digimat)

Για την επιλογή του solver που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά την επίλυση οφείλεται να επιλεγεί από την αρχή. Η επιλογή θα επηρεάσει ποια μοντέλα υλικών και ποιες επιλογές μοντελοποίησης καθώς και πλέγματος είναι διαθέσιμες. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι τύποι/λογισμικά που μπορούν να επιλεγούν πέρα από το Digimat FE Solver, όπως Ansys, Abaqus κτλ. Στην προκειμένη ανάλυση η επιλογή του solver είναι Digimat FE.



Εικόνα 11: Επιλογή επεξεργαστή solver. (Digimat)

Το πρόγραμμα προσφέρει τέσσερις επιλογές επίλυσης της ανάλυσης για τον υπολογισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι τέσσερις τύποι είναι: μηχανική ανάλυση, θερμοδυναμική ανάλυση, θερμική ανάλυση και ηλεκτρική ανάλυση. Οι τύποι είναι καθοριστικοί για τα φορτία που πρόκειται να εφαρμοστούν. Η συγκεκριμένη ανάλυση θα είναι μηχανική, καθώς στόχος της μελέτης είναι η εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Επιπρόσθετα, έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα πως το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) είναι 2D ή 3D, έτσι ανάμεσα στις γενικές παραμέτρους μπορεί ο χρήστης να επιλέξει ποιον τύπο επιθυμεί. Στην παρακάτω απεικόνιση η επιλογή είναι 3D.

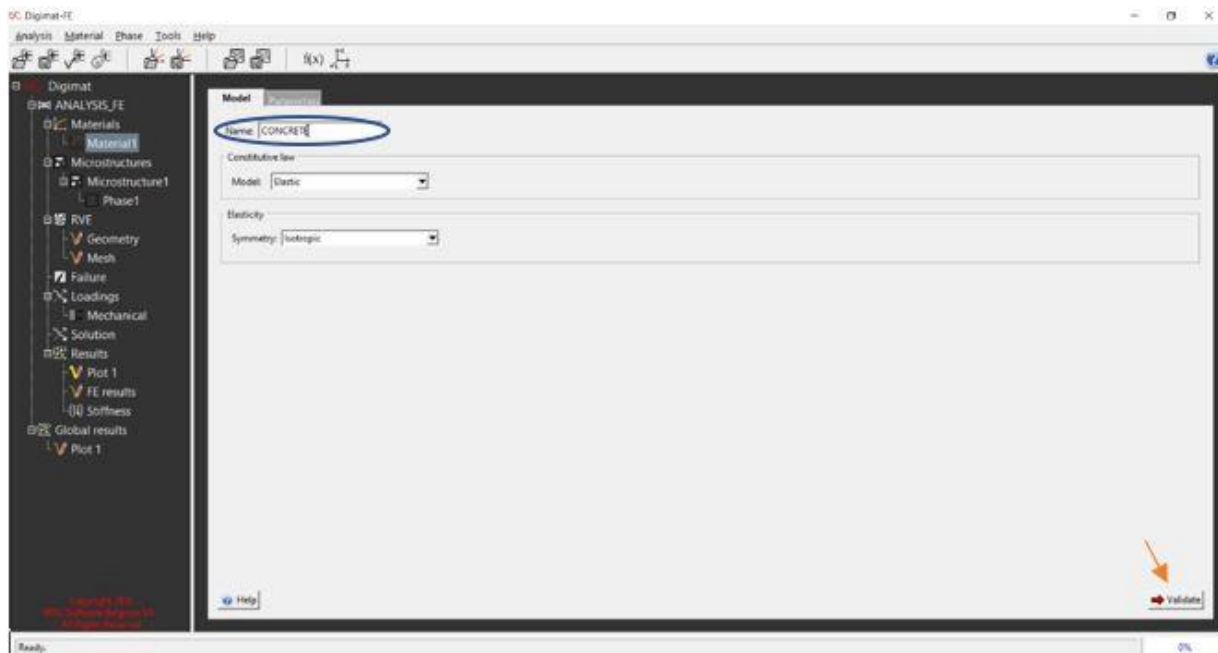


Εικόνα 12: Επιλογή τύπων ανάλυσης και RVE. (Digimat)

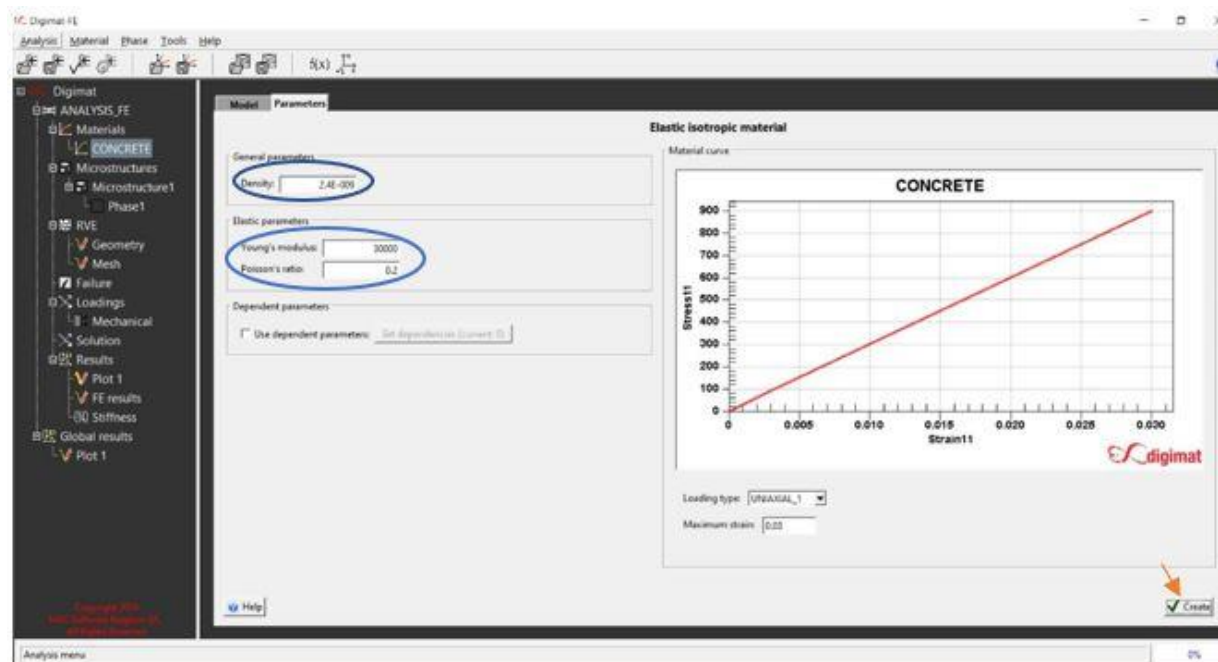
Στη συνέχεια ο χρήστης εισάγει το όνομα και τις παραμέτρους του υλικού, επιλέγοντας τη μπάρα Material1. Η ανάλυση αφορά την επίδραση των εγκλεισμάτων αερογέλης στη θερμομονωτική τσιμεντοκονία. Η τσιμεντοκονία είναι όπως ήδη έχει αναλυθεί, ένα ομογενοποιημένο υλικό το οποίο αποτελείται από τσιμέντο και από aerogel. Οι βασικές πληροφορίες που αφορούν το κύριο υλικό, το τσιμέντο, είναι γνωστές και έχουν τις αντίστοιχες τιμές.

Πυκνότητα	Young's modulus	Poisson's ration
2400 (kg/m ³)	30 (GPa)	0,2

Επιβάλλεται στο πρόγραμμα όλες οι παράμετροι να συμβαδίζουν σε ίδια κλίμακα μονάδας μέτρησης!



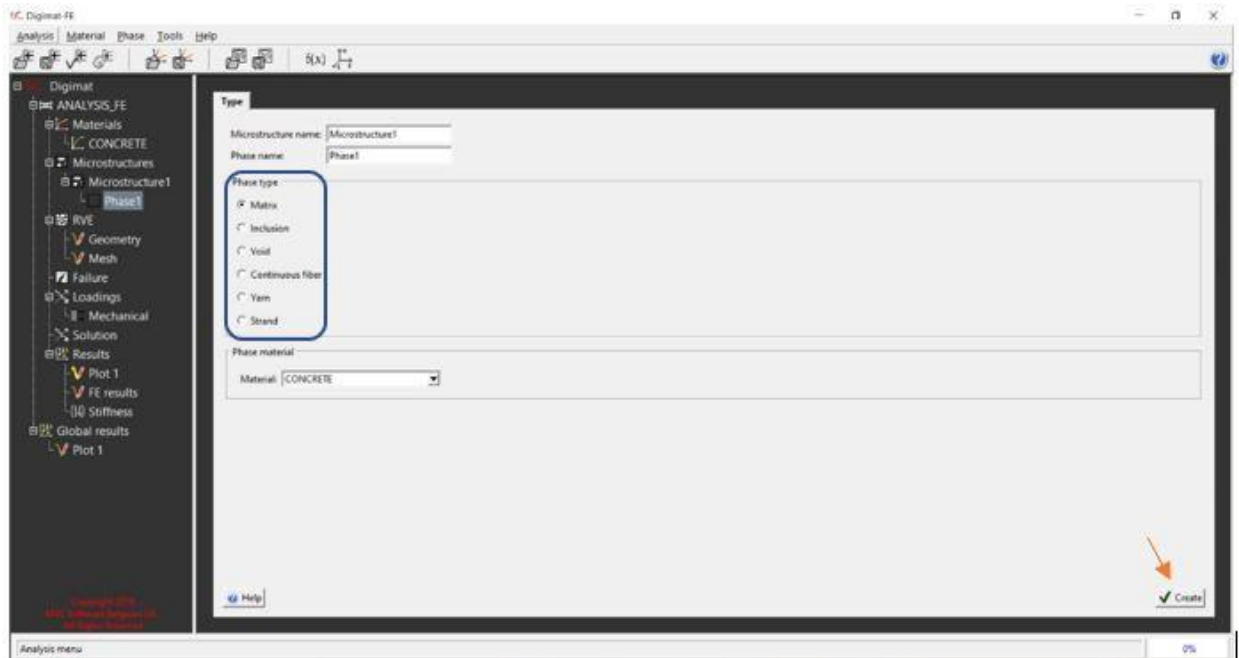
Εικόνα 13: Επιλογή ονόματος υλικού και καταχώρηση του. (Digimat)



Εικόνα 14: Εισαγωγή παραμέτρων τσιμέντου (Digimat)

Πλέον το υλικό έχει καθοριστεί και απομένει ο ορισμός της μικροδομής του. Η μικροδομή του συγκεκριμένου υλικού αποτελείται από μια μήτρα (Matrix) και τα εγκλείσματα αέρα, τα οποία πρέπει να οριστούν μέσω παραμέτρων. Για την εισαγωγή των παραμέτρων ο χρήστης επιλέγει τη μπάρα Phase1, όπου εάν επιθυμεί γίνεται αλλαγή του ονόματος στο

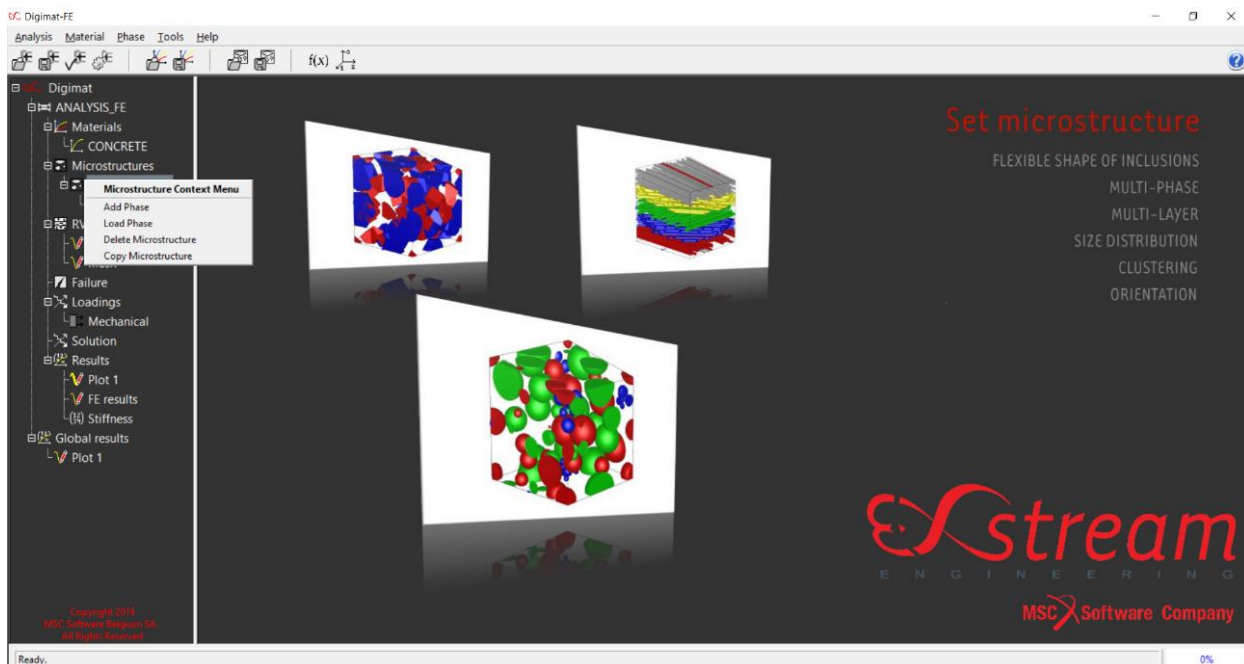
αντίστοιχο πλαίσιο. Έπειτα, υπάρχει ένα πλαίσιο με μια ποικιλία επιλογών για τον τύπο της φάσης, όπου επιλέγεται η λέξη Matrix.



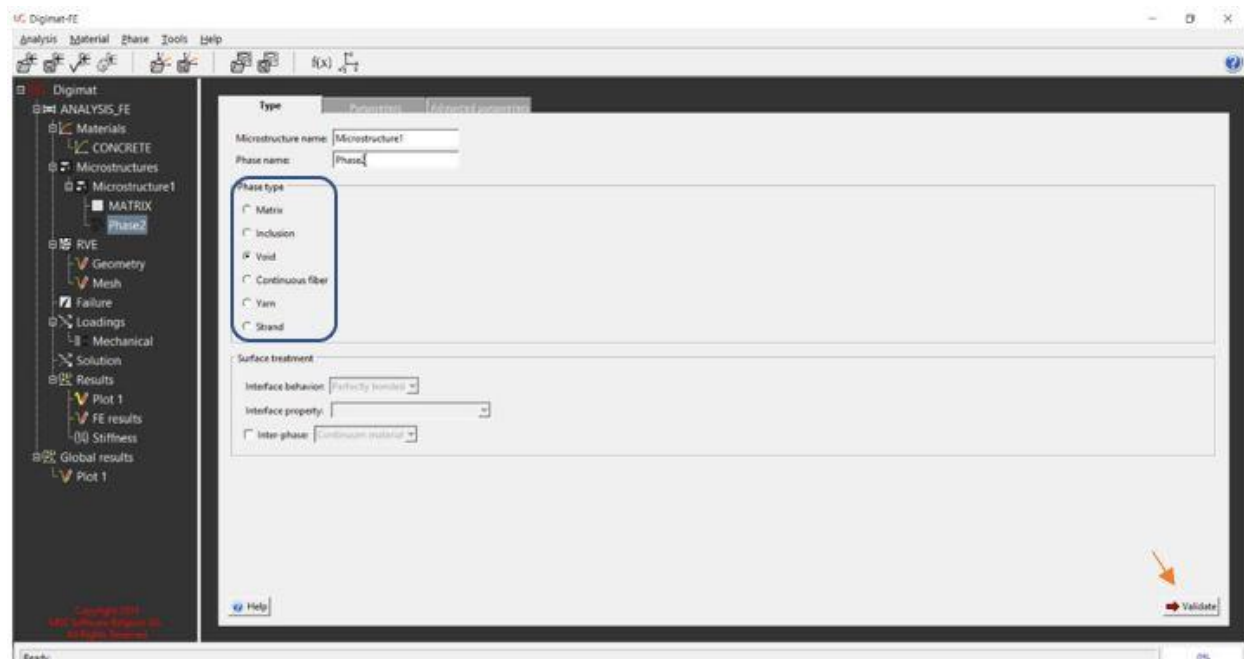
Εικόνα 14: Επιλογή τύπου φάσης και δημιουργία της. (Digimat)

Η μήτρα έχει πλέον δημιουργηθεί και απομένουν τα σφαιρίδια. Για τη δημιουργία τους ο χρήστης πατάει δεξί κλικ στην μπάρα Phase1 (ή Matrix) και επιλέγει προσθήκη φάσης.

Αναφέρεται πως για την παρούσα πτυχιακή εργασία τα εγκλείσματα αερογέλης θεωρήθηκαν σαν κενά (Voids), διότι οι μηχανικές ιδιότητες είναι πολύ μικρότερες. Επομένως, ακολουθεί η ίδια διαδικασία όπως πριν μόνο που για τον ορισμό των εγκλεισμάτων-κενών η επιλογή τύπου είναι Void.



Εικόνα 15: Προσθήκη φάσης. (Digimat)



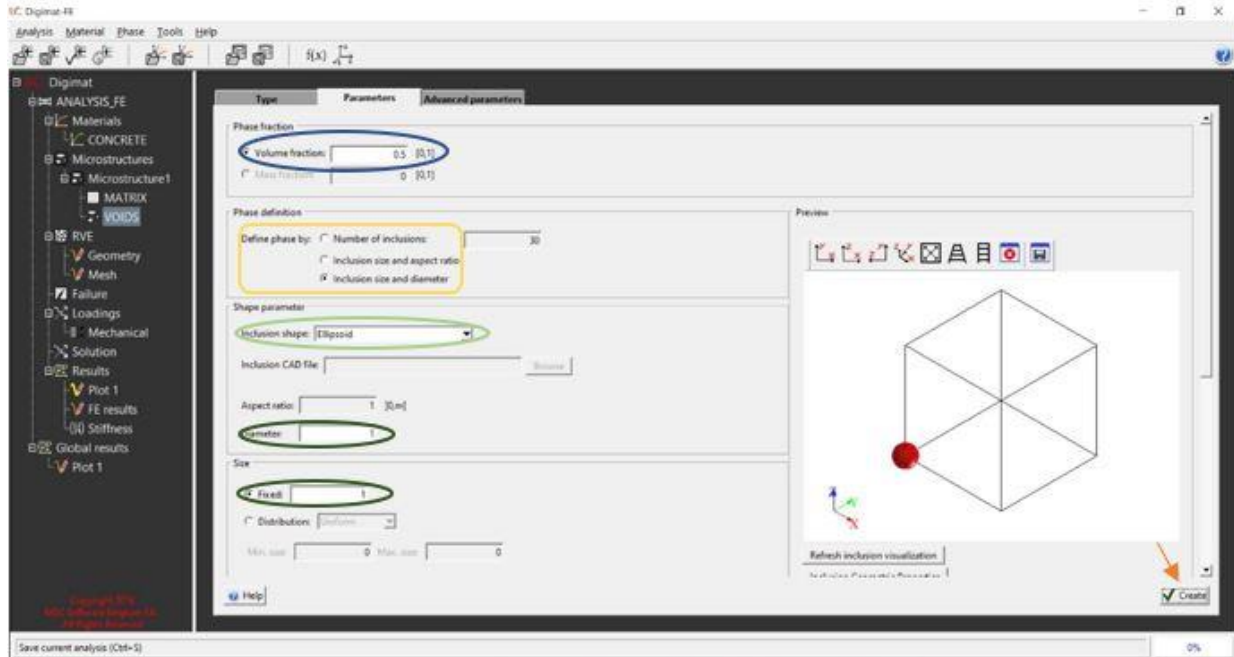
Εικόνα 16: Επιλογή τύπου Void. (Digimat)

Οι παράμετροι των σφαιριδίων που πρέπει να καταχωρηθούν είναι: η περιεκτικότητά τους, το σχήμα τους και το μέγεθος τους, το οποίο μπορεί να επιλεγεί βάση διαμέτρου ή ακτίνας.

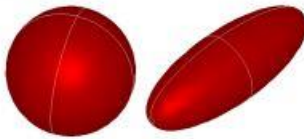







Για το παράδειγμα αυτό οι τιμές που αντικαθίστανται στα αντίστοιχα πλαίσια είναι οι εξής:

Περιεκτικότητα	Διάμετρος
50 (%)	1 (mm)

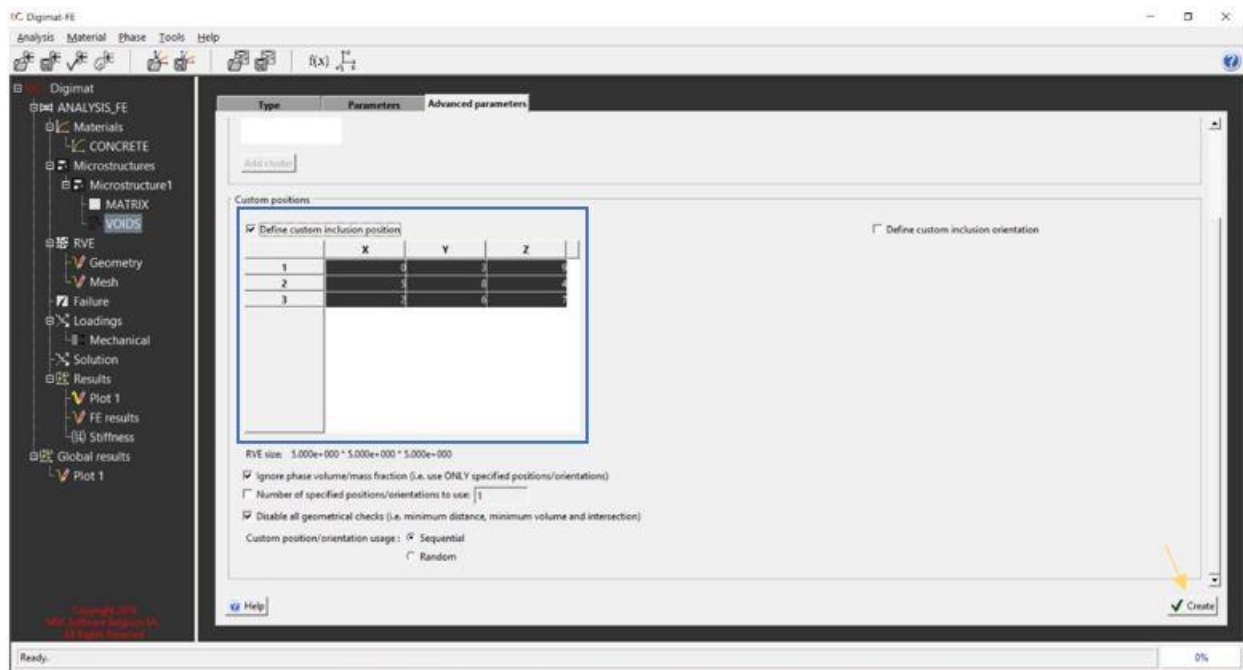
Ωστόσο, εάν ο χρήστης επιθυμεί τη δημιουργία μικροδομής με συγκεκριμένες συντεταγμένες το Digimat προσφέρει αυτή τη δυνατότητα πηγαίνοντας στη μπάρα του παραθύρου με τις λέξεις Advanced Parameters.



Εικόνα 17: Εισαγωγή παραμέτρων Voids, επιλογή μεγέθους, απεικόνιση μοντέλου και δημιουργία. (Digimat)

Shape	Illustration
Ellipsoid	
Sphero-cylinder	
Platelet	
Cylinder	
Prism	
Icosahedron	
Curved beam	
Straight beam	

Εικόνα 18: Ποικιλία επιλογής σχημάτων Voids. (Digimat manual)



Εικόνα 19: Δημιουργία πίνακα προσωποποιημένων συντεταγμένων σφαιριδίων. (Digimat)

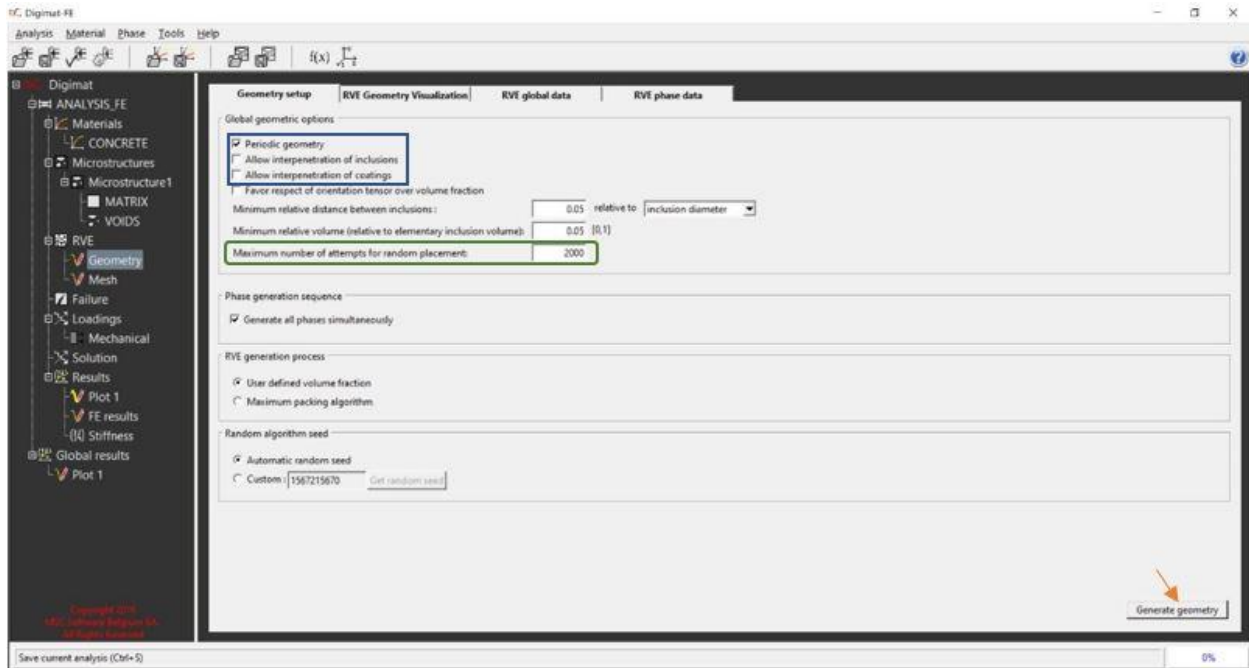
Είναι σημαντικό ο χρήστης να επιλέξει τα συγκεκριμένα κουτάκια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19, διότι έτσι εάν έχει ορισθεί στο προηγούμενο παράθυρο περιεκτικότητα το πρόγραμμα το αγνοεί. Ως αποτέλεσμα, όταν τρέξει το πρόγραμμα και δημιουργηθεί η γεωμετρία θα εμφανιστεί η περιεκτικότητα που αντιστοιχεί στον προσωποποιημένο πίνακα.

Έχοντας τη δημιουργία της μικροδομής, επέρχεται ο ορισμός του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE), όπου ο χρήστης επιλέγοντας την μπάρα RVE, στο παράθυρο του προγράμματος εμφανίζονται οι διαστάσεις του. Οι διαστάσεις x, y, z είναι είτε αυτοματοποιημένες από το πρόγραμμα, είτε εισάγονται από τον ίδιο το χρήστη. Από τη στιγμή που το RVE έχει μοντελοποιηθεί ακολουθούν δύο σημαντικές διαδικασίες. Η διαδικασία της γεωμετρίας και η διαδικασία της διακριτοποίησης.

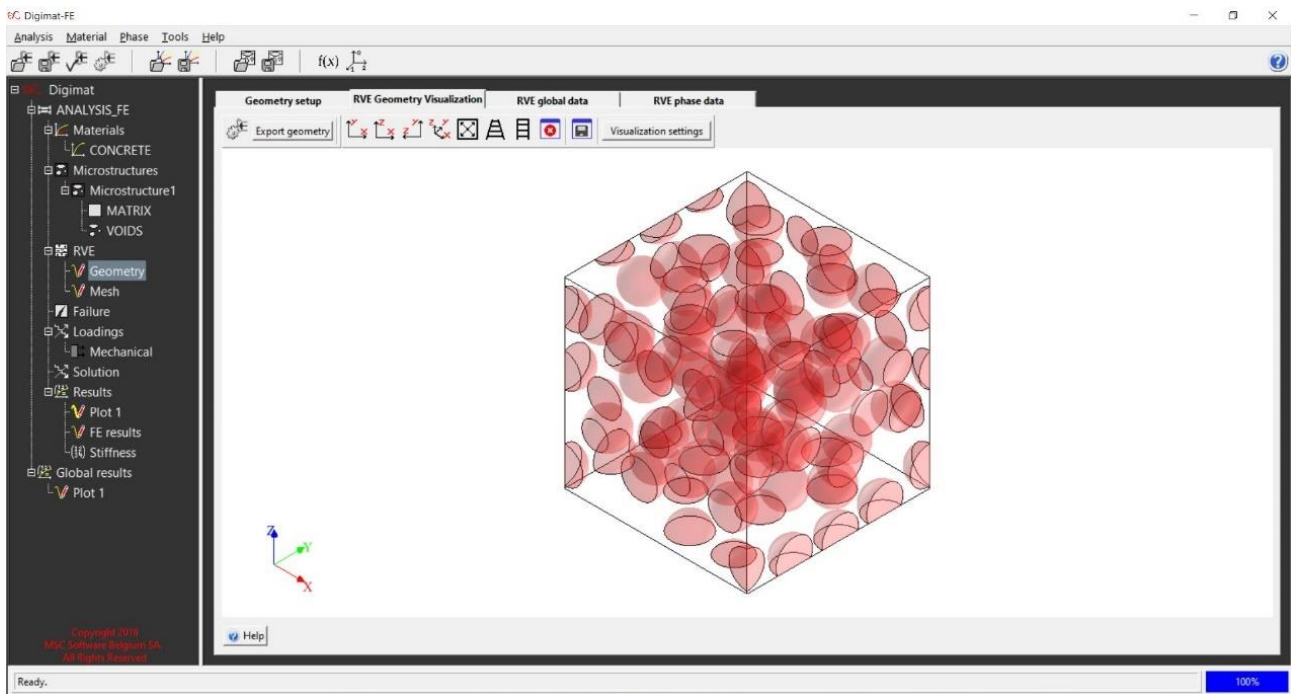
Στην πρώτη διαδικασία ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τη γεωμετρία του RVE προσομοιώνοντας τη μικροδομή που έχει ορισθεί. Στο παράθυρο Geometry Setup υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές: περιοδική γεωμετρία, αλληλοδιείσδυση στοιχείων, αλληλοδιείσδυση ορίων, όπου κάθε φορά ο χειριστής επιλέγει τι επιθυμεί. Στην προκειμένη περίπτωση είχε επιλεγεί μόνο η περιοδική γεωμετρία, ουσιαστικά ορίστηκαν συνοριακές συνθήκες συμμετρίας στα όρια του RVE.

Ένα σημαντικό σημείωμα είναι ο μέγιστος αριθμός δοκιμών τυχαίων τοποθετήσεων, ο οποίος εάν λάβει τιμές 4000-6000 ενδέχεται να δημιουργήσει τη γεωμετρία σε λιγότερο χρόνο CPU. Όταν η γεωμετρία ολοκληρωθεί το προσομοιωμένο μοντέλο εμφανίζεται στην οθόνη. Σε ξεχωριστό παράθυρο αναφέρονται σημαντικές πληροφορίες όπως: ο χρόνος εκτέλεσης της μοντελοποίησης, ο αριθμός των στοιχείων της μικροδομής, η περιεκτικότητα που έχει επιτευχθεί καθώς και η περιεκτικότητα που είχε δηλωθεί στο αντίστοιχο πλαίσιο στις παραμέτρους των Voids. Τέλος, σε διαφορετικό παράθυρο έχουν

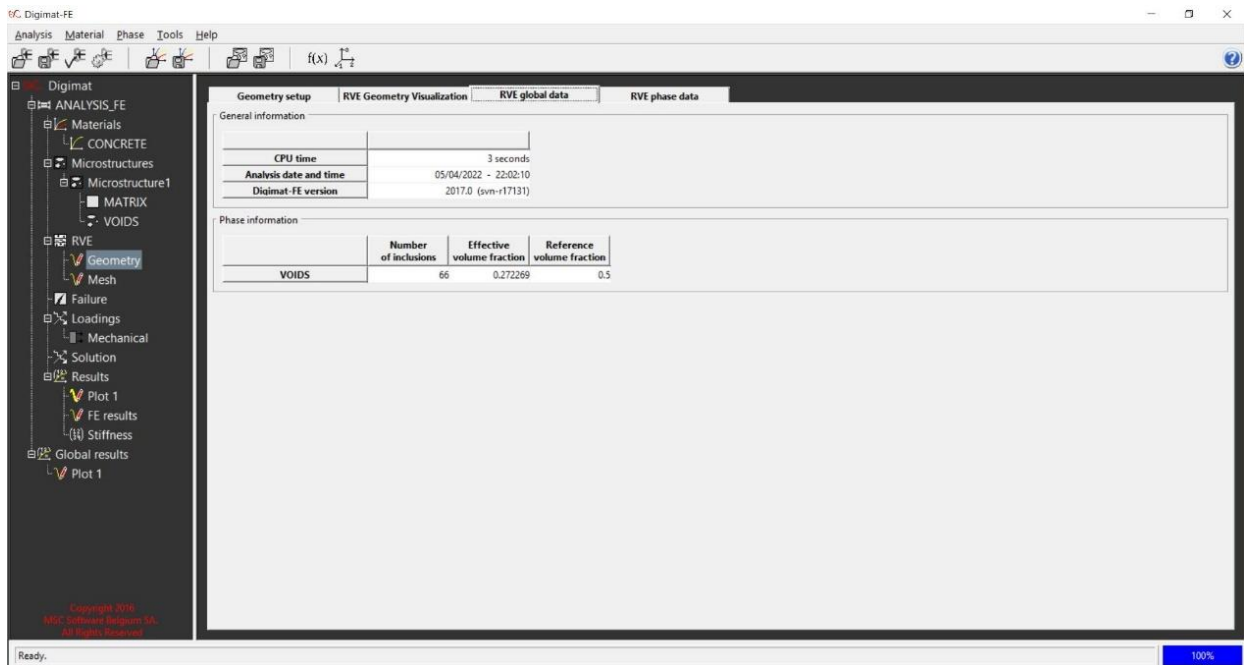
καταγραφεί ένας πίνακας με τις αντίστοιχες συντεταγμένες των στοιχείων και ένα 2D σχήμα με την απεικόνιση των στοιχείων.



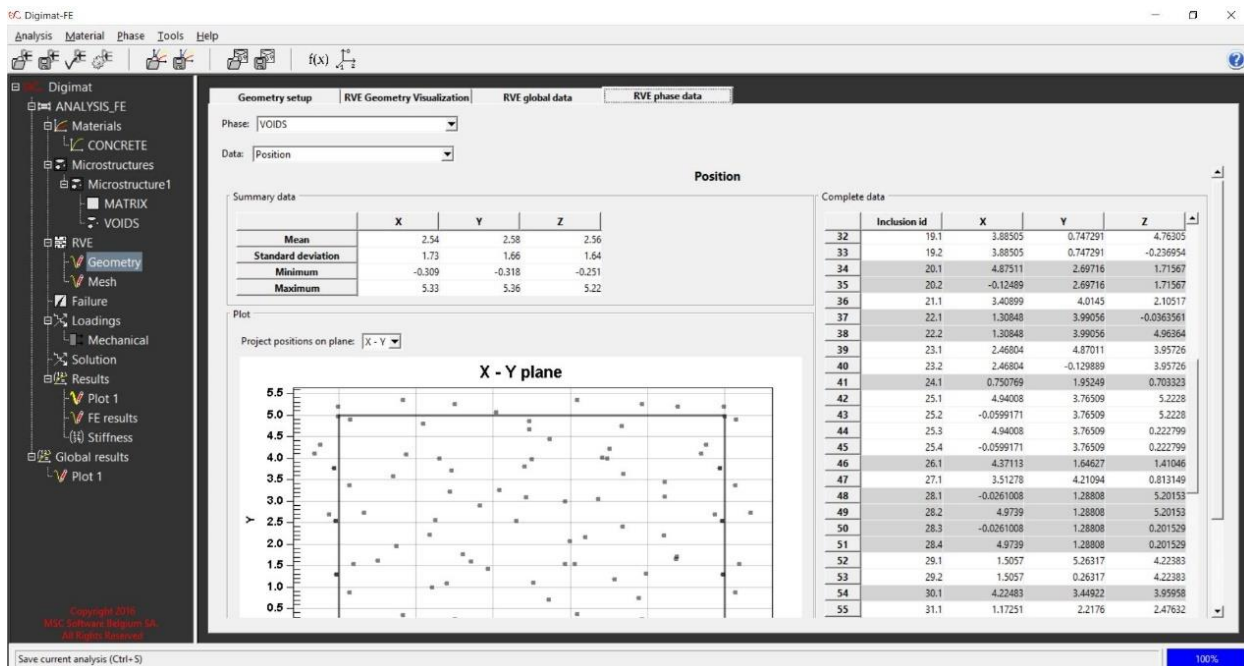
Εικόνα 20: Εξαγωγή γεωμετρίας. (Digimat)



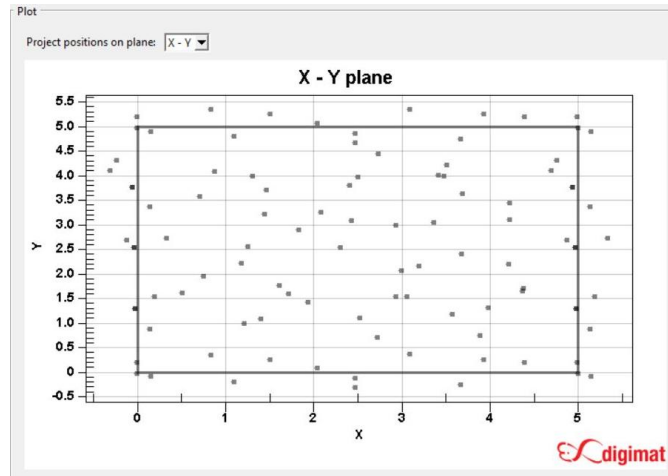
Εικόνα 21: Απεικόνιση μοντέλου γεωμετρίας RVE. (Digimat)



Εικόνα 22: Πληροφορίες από την εξαγωγή γεωμετρίας RVE. (Digimat)

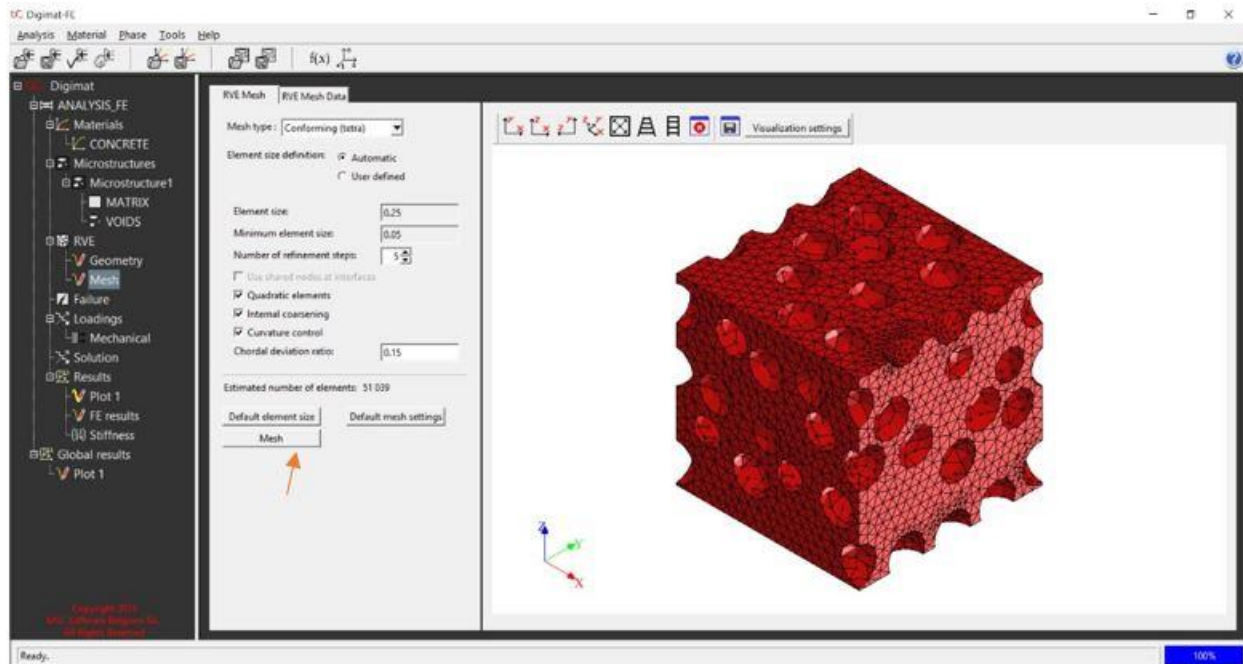


Εικόνα 23: Πίνακας συντεταγμένων στοιχείων μικροδομής του RVE. (Digimat)

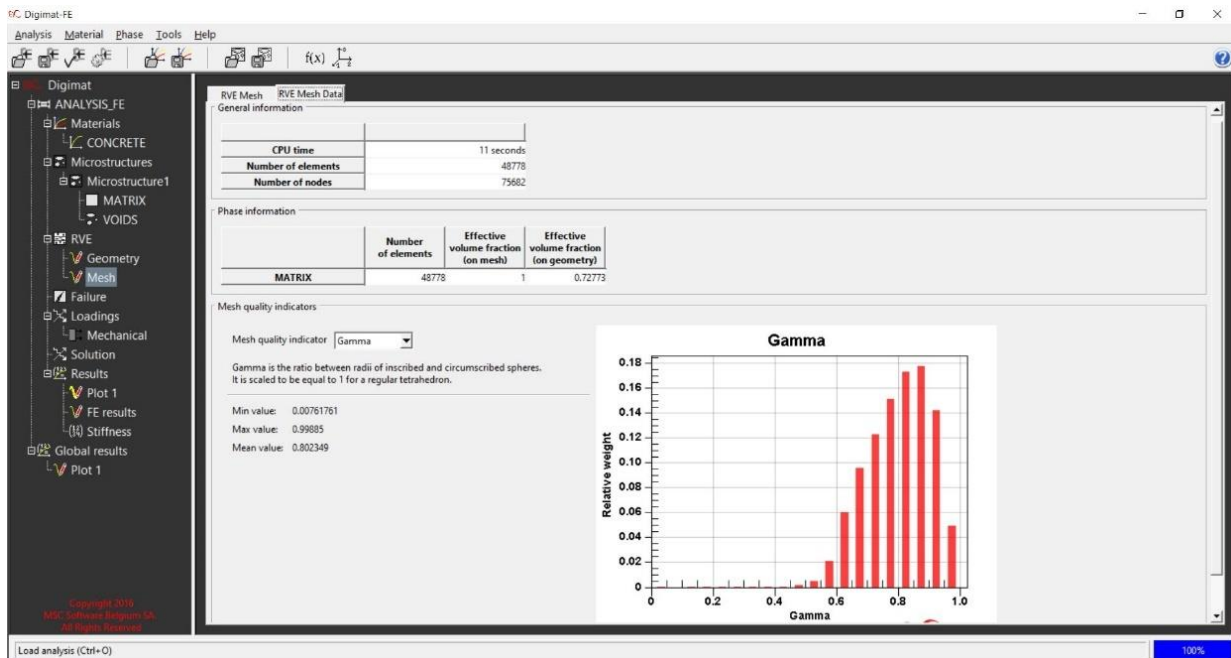


Εικόνα 24: 2D απεικόνιση σημείων των στοιχείων RVE. (Digimat)

Η δεύτερη διαδικασία είναι αυτή της διακριτοποίησης. Όταν η γεωμετρία του RVE είναι έτοιμη ακολουθεί το Mesh, το οποίο χωρίζει την γεωμετρία σε πεπερασμένα στοιχεία. Από την διακριτοποίηση είναι γνωστοί οι κόμβοι καθώς και τα διακριτοποιημένα στοιχεία. Παρά τις βασικές αυτοποιημένες επιλογές ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει το Mesh size. Βάσει αυτού αλλάζουν οι πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω της διακριτοποίησης. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι όταν η τιμή του Mesh size γίνει αρκετά χαμηλή τότε η διακριτοποίηση καθυστερεί να πραγματοποιηθεί ή μπορεί να είναι ανέφικτη.



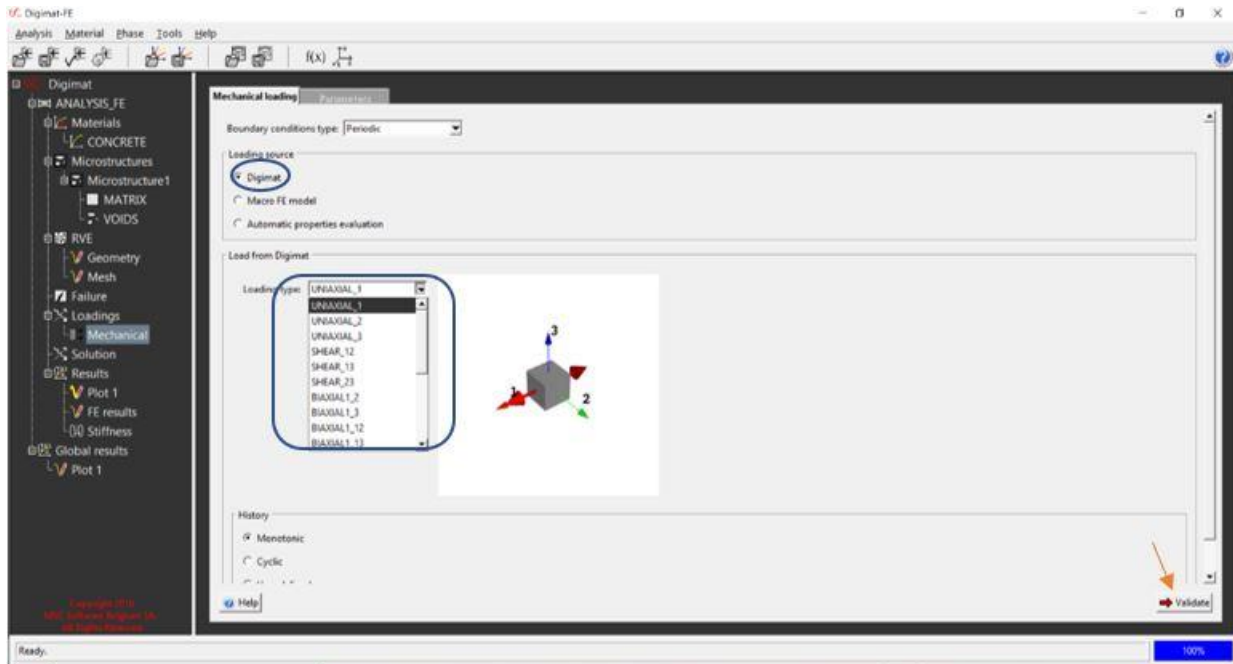
Εικόνα 25: Διακριτοποίηση RVE. (Digimat)



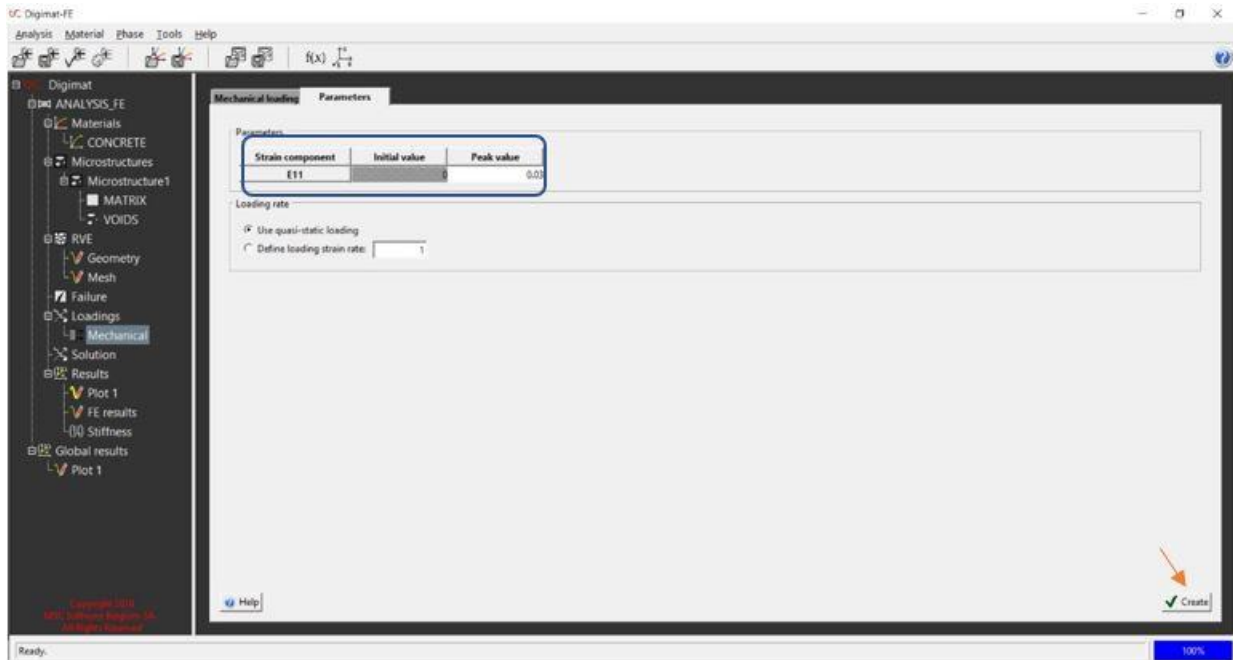
Εικόνα 26: Πληροφορίες διακριτοποίησης RVE. (Digimat)

Η τελευταία διαδικασία για την επίλυση είναι η εφαρμογή τάσεων, η παραμόρφωση καθώς και η εύρεση των μέτρων ελαστικότητας. Η εφαρμογή τάσης γίνεται κάθε φορά μόνο σε έναν άξονα μέσω του παραθύρου Mechanical, στη στήλη Digimat, τον οποίο επιλέγει ο χρήστης, στη συνέχεια ορίζεται η παραμόρφωση και έπειτα γίνεται η επίλυση μέσω της μπάρας Solution. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε μορφή χρωμοδιαγράμματος και υπάρχουν πολλές επιλογές για το τι είδους μηχανικής ιδιότητας αποτέλεσμα επιθυμεί ο χρήστης να απεικονίσει. Για τις μηχανικές ιδιότητες του προς μελέτη υλικού, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η απεικόνιση και η λήψη διαγραμμάτων γίνεται για τις τάσεις: Von mises, Maximum και Minimum. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται και για τις τρεις φορτίσεις.

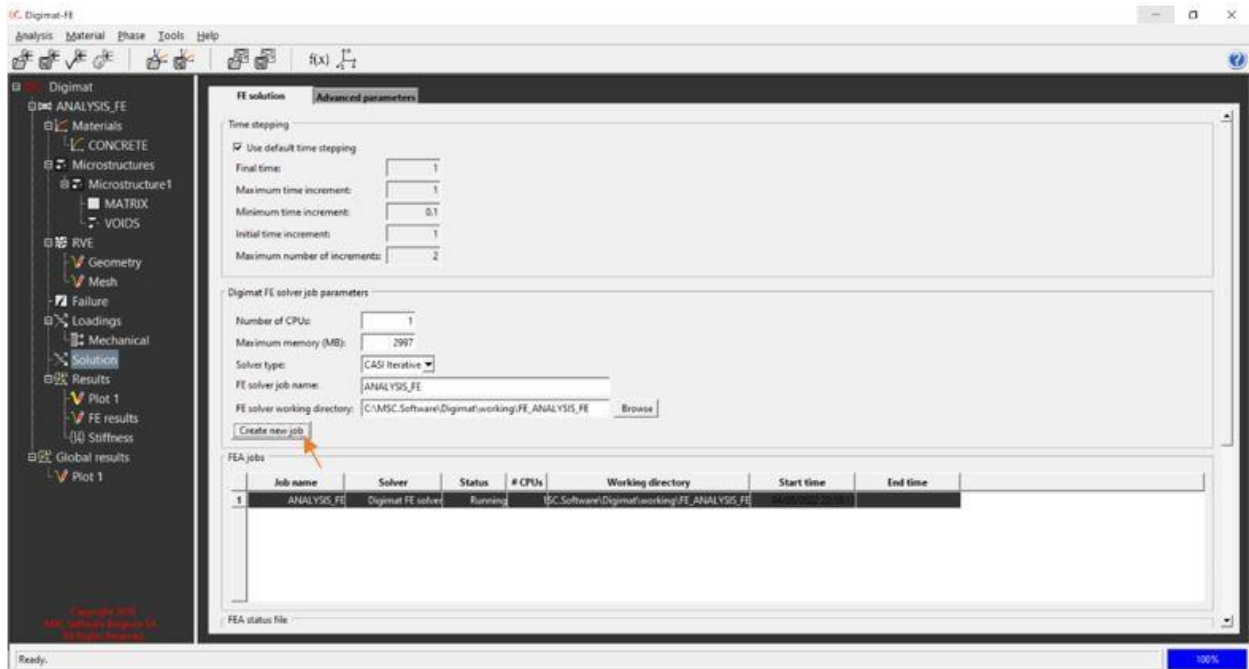
Τέλος, για την εύρεση των μέτρων ελαστικότητας γίνεται επιλογή μέσω του παραθύρου Mechanical, για αυτοματοποιημένες ιδιότητες. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει ποιες μηχανικές ιδιότητες θέλει να υπολογίσει και στη συνέχεια στο παράθυρο solution εκτελείται ο υπολογισμός. Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα και είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της εφαρμοσμένης τάσης παρακάτω.



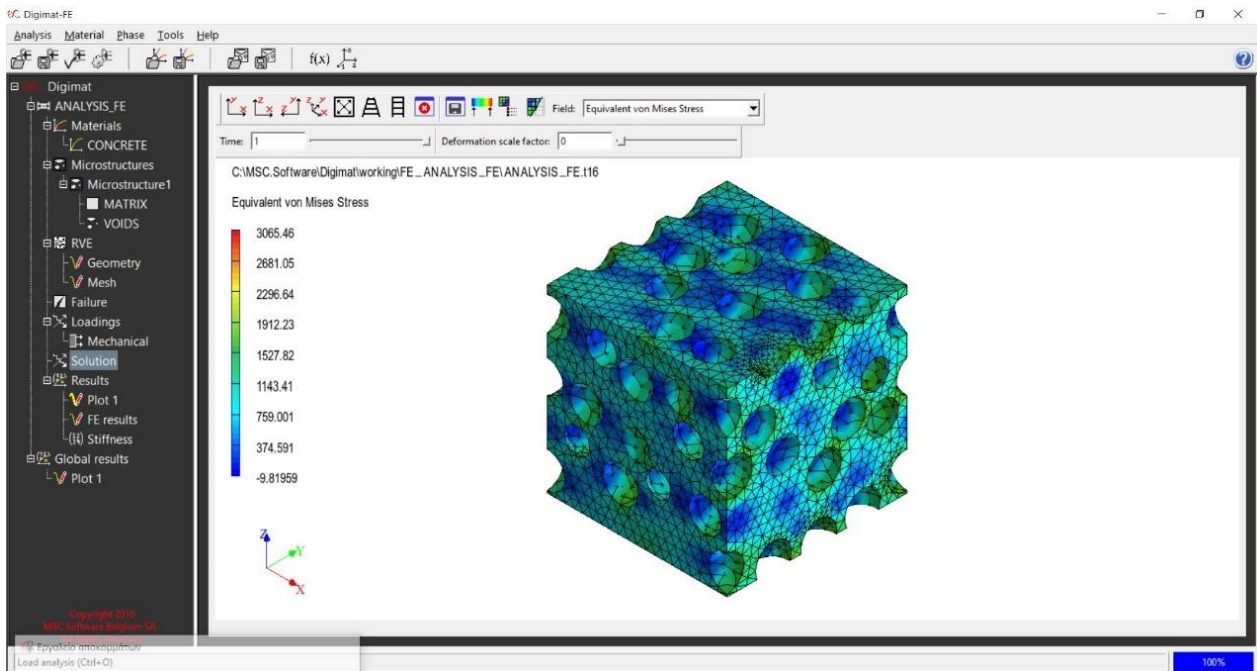
Εικόνα 27: Επιλογή άξονα καταπόνησης. (Digimat)



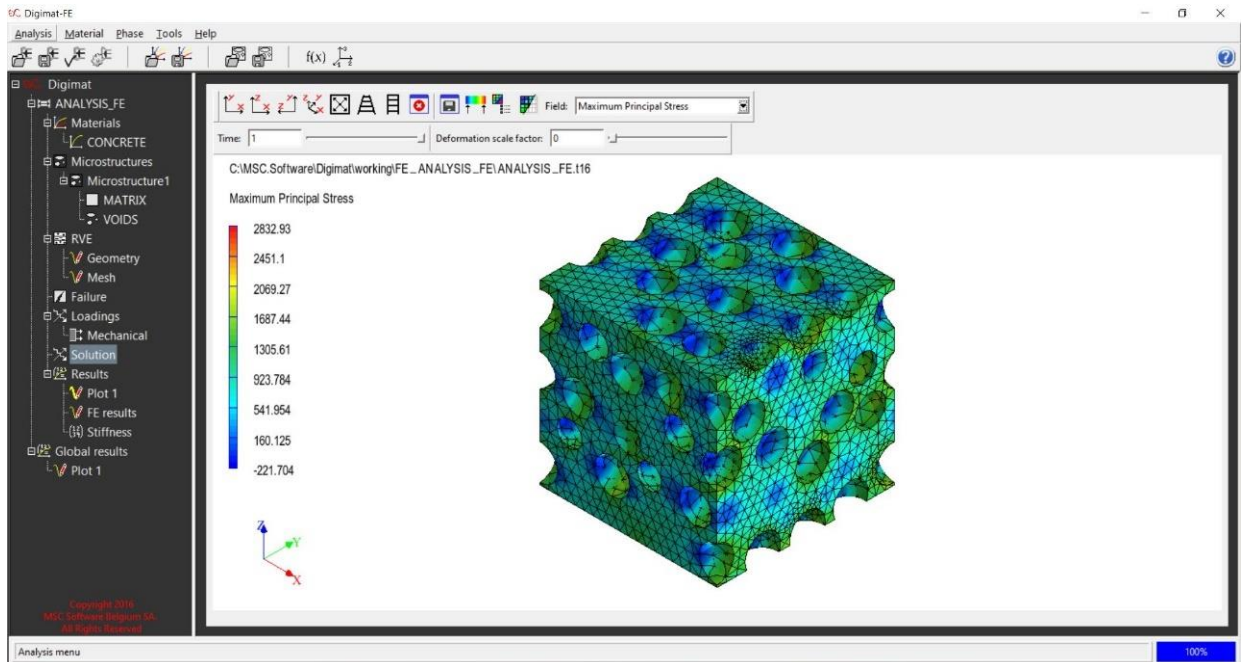
Εικόνα 28: Τιμή παραμόρφωσης. (Digimat)



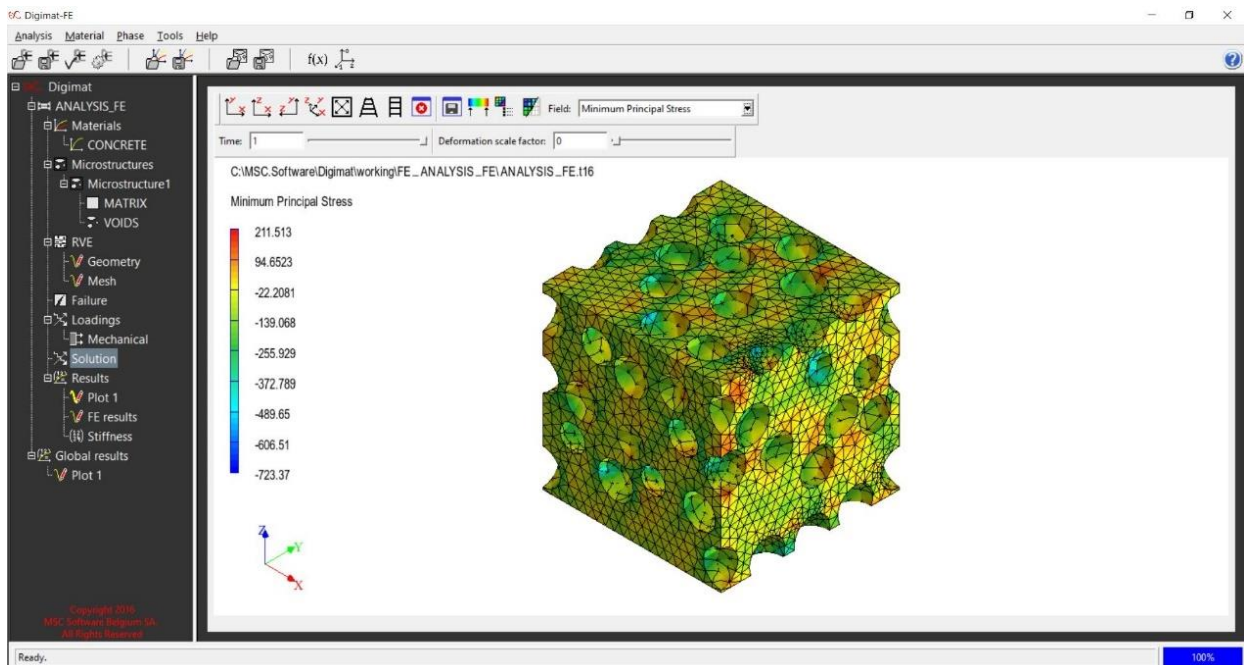
Εικόνα 29: Επίλυση. (Digimat)



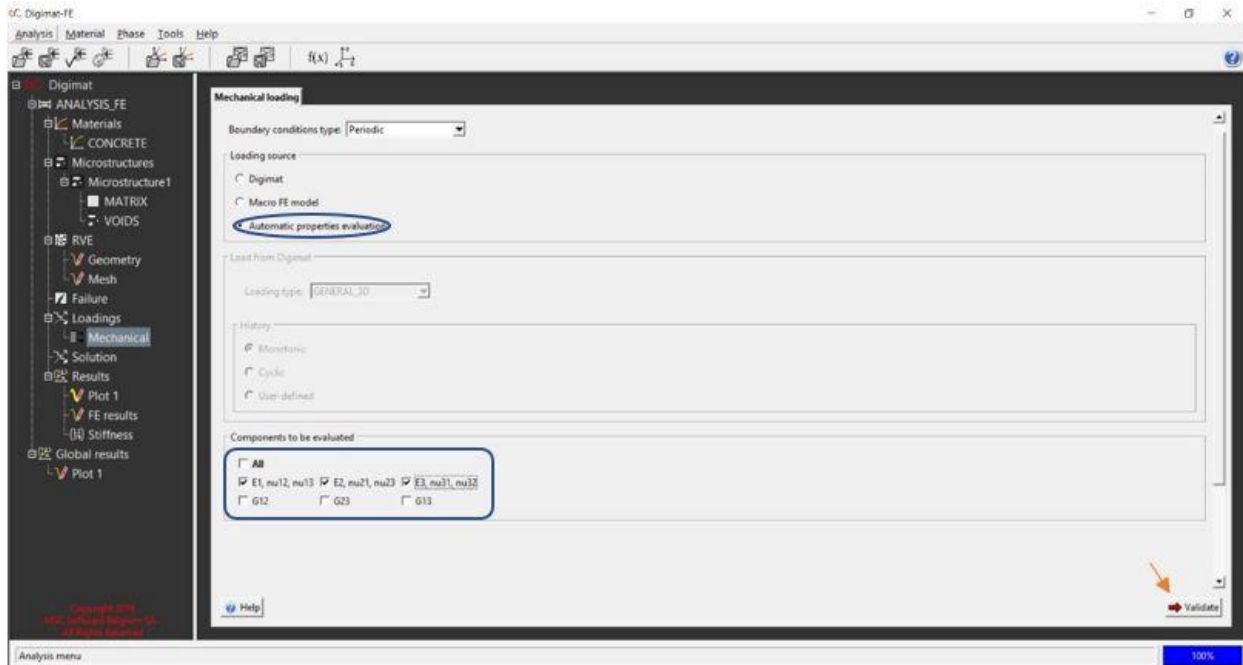
Εικόνα 30: Εκτίμηση τάσης von Mises για εφελκιστική καταπόνηση (άξοναχ), απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



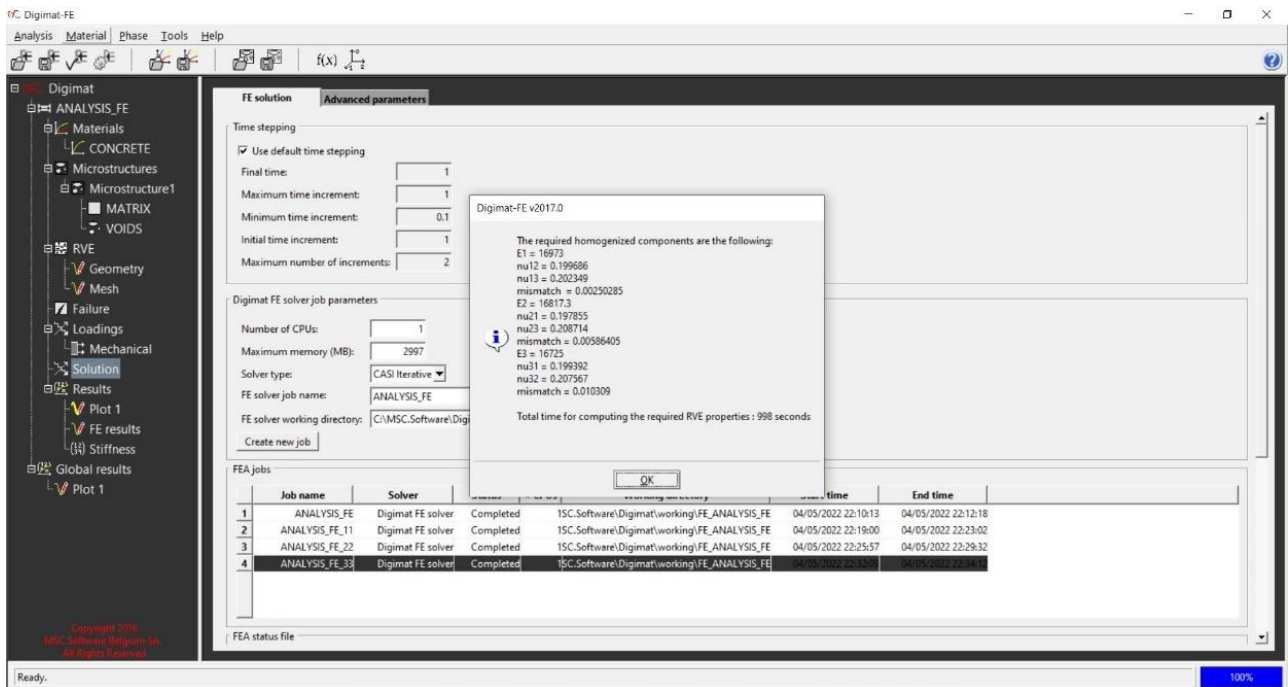
Εικόνα 31: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 32: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση (άξονας x), απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 33: Επιλογή υπολογισμού μηχανικών ιδιοτήτων. (Digimat)



Εικόνα 34: Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)

3 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων Με Τη Χρήση ΠΣ

3.1 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων ΠΣ Για Την Εκτίμηση Μηχανικών Ιδιοτήτων Προηγμένης Θερμομονωτικής Τσιμεντοκονίας

Η ανάπτυξη των μοντέλων για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας με εγκλείσματα αερογέλης πραγματοποιείται, όπως αναφέρεται και στα προηγούμενα κεφάλαια με τη βοήθεια του εμπορικού προγράμματος Digimat-FE. Η μεθοδολογία για την προσομοίωση των μοντέλων αναλύθηκε στην ενότητα 2.1.2 και χρησιμοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο με σκοπό την ανάπτυξη και την επίλυση των παρόντων μοντέλων.

Για να γίνει εφικτή η ανάπτυξη, απαιτείται ο ορισμός ορισμένων παραμέτρων που αφορούν το τσιμέντο καθώς και την αερογέλη. Λόγω του λογισμικού του προγράμματος έχει επισημανθεί πως όλες οι μονάδες μέτρησης οφείλουν να είναι στην ίδια κλίμακα για την αποφυγή λαθών ή αποκλίσεων στα τελικά αποτελέσματα. Επειδή, η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων όλες οι εκτιμήσεις πραγματοποιήθηκαν με ευλάβεια και αυστηρή τήρηση της μεθοδολογίας για τις καλύτερες δυνατές προσεγγίσεις.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τσιμέντου καθώς και της αερογέλης που αξιοποιήθηκαν για τη διενέργεια των μετρήσεων αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά τσιμέντου

Πυκνότητα	2400 kg/m ³
Young's modulus	30000 N/mm ²
Poisson's ration	0,2

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αερογέλης αφορούν την αερογέλη της εταιρίας CABOT (ENOVA P150), όπως αναφέρεται και χρησιμοποιήθηκε στο αντίστοιχο πειραματικό έργο από την εταιρεία ISOMAT.

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αερογέλης (ISOMAT)

Εύρος μεγέθους σωματιδίων	0,1-0,5 mm
Διάμετρος πόρων	~20 nm
Porosity	>90%
Πυκνότητα σωματιδίων	120-180 kg/m ³
Υδροφοβική επιφάνεια	600-800 m ² /g
Απορρόφηση λαδιού	540-650 g DBP/100 g σωματιδίων

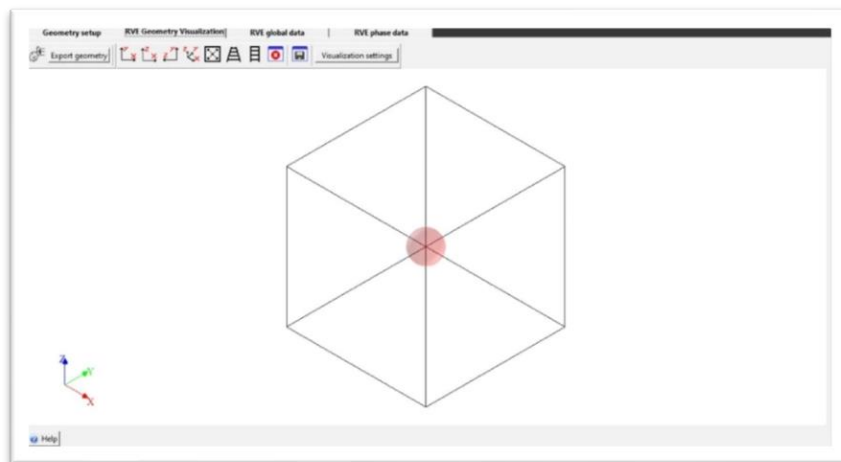
Για όλες τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν αξιοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα που αναγράφονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Δεδομένα μετρήσεων

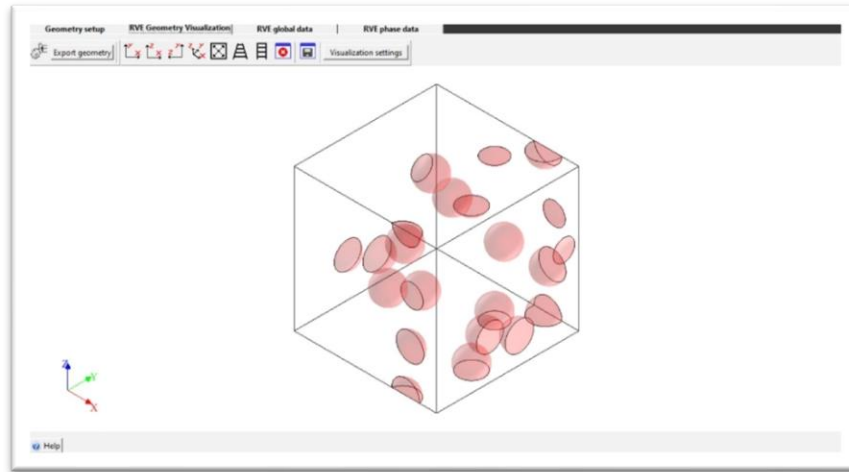
Διάμετρος σφαιριδίων d	1 mm
RVE	5x5x5 mm

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μορφές μοντέλων: μοναδικό έγκλεισμα, τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων και μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα. Ιδιαίτερα, η ύπαρξη της αερογέλης ευθύνεται για τη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας και της κατανομής των εγκλεισμάτων, κάτι που οδήγησε στην πιο λογική εκτίμηση της συγκέντρωσης τάσεων. Οι τρεις διαφορετικές μορφές μοντέλων πραγματοποιήθηκαν αρκετές φορές η καθεμία με σκοπό την κατανόηση τυχόν αποκλίσεων. Έπειτα, όλες οι μετρήσεις επιλύθηκαν μέσω του Digimat-FE, ακολουθώντας τη μεθοδολογία και, εν συνεχεία, καταγράφηκαν σε πίνακες που αναγράφονται στα παραρτήματα. Το σύνολο των προαναφερθέντων αναφέρεται πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

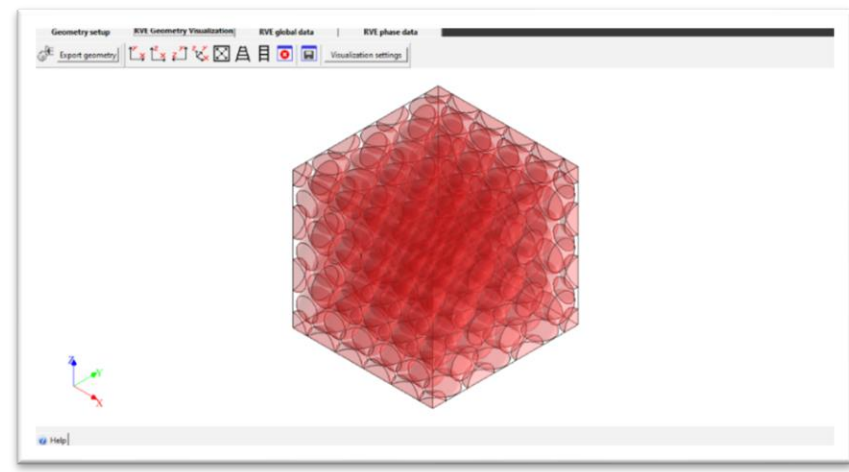
Μοντέλο μοναδικού εγκλείσματος



Μοντέλο τυχαίας διασποράς εγκλεισμάτων



Μοντέλο μέγιστης κατ'όγκο περιεκτικότητας



Όσον αφορά τη μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα που επιτεύχθηκε με τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων ήταν γύρω στο 30%. Παρατηρήθηκε πως ήταν εγγενής περιορισμός του προγράμματος. Αυτό έγινε αντιληπτό διότι, κάθε φορά που ορίστηκε μεγάλη περιεκτικότητα το μέγιστο ποσοστό που επιτυγχανόταν ήταν γύρω στο 30%. Για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί για τη μορφή μοντέλου με μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα με μέγιστη κατανομή εγκλεισμάτων. Για τους υπολογισμούς για το μοντέλο με τη μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα κατασκευάστηκε ένας πίνακας με τις συντεταγμένες των εγκλεισμάτων που αντιστοιχούν για την επίτευξη της μέγιστης κατανομής στη μικροδομή του RVE. (Παράρτημα Β)

3.2 Μοναδικό Έγκλεισμα

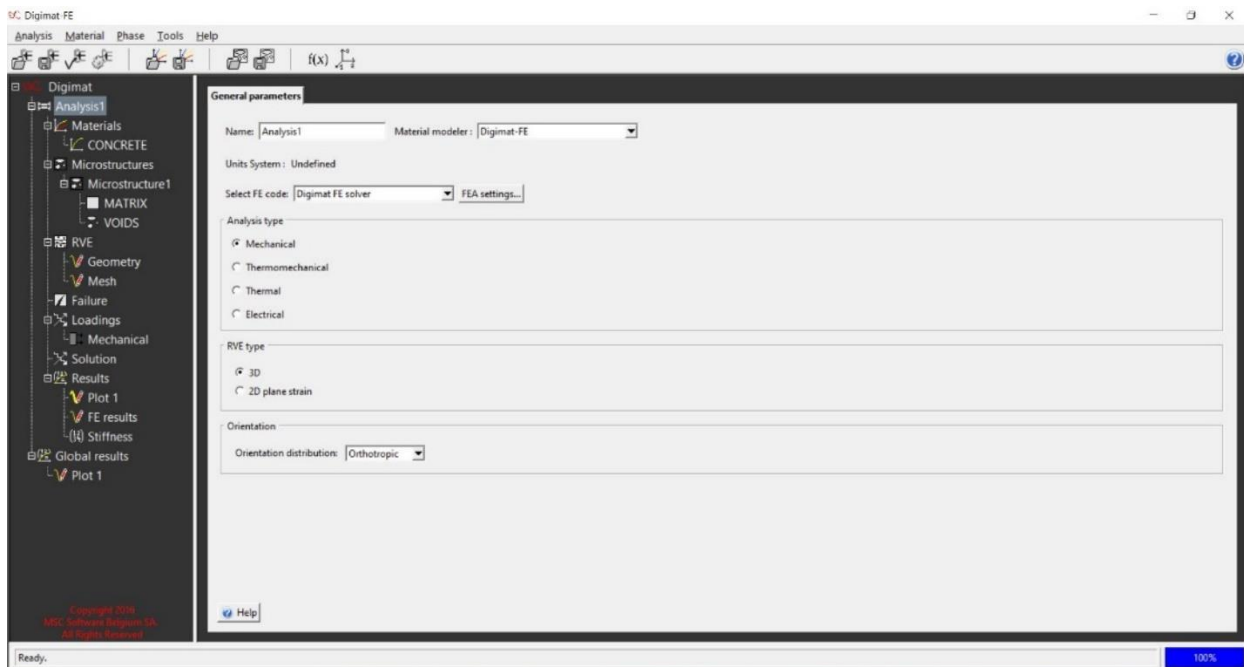
Οι πρώτες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση του συντελεστή συνγέντρωσης τάσεων λ , λόγω των εγκλεισμάτων αερογέλης αφορούν ένα μοναδικό έγκλεισμα στο κέντρο της μικροδομής του RVE. Για την καλύτερη προσέγγιση των τάσεων διενεργήθηκαν πέντε διαφορετικές μετρήσεις, στις οποίες κάθε φορά άλλαζε το element size του RVE. Ο λόγος ήταν ο έλεγχος για τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των εκτιμώμενων τάσεων. Η ανάπτυξη και η επίλυση σε κάθε προσπάθεια έγινε και στους τρεις άξονες καταπόνησης (x , y , z) καθώς και πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας (Κεφάλαιο 5).

Η ανάπτυξη και η επίλυση πραγματοποιήθηκε ακριβώς με τον τρόπο που αναλύθηκε στο 2 Κεφάλαιο. Ακολούθως απεικονίζεται ολόκληρη η διαδικασία βήμα προς βήμα για μια προσέγγιση - εκτίμησης τάσεων για το μοναδικό έγκλεισμα, η οποία επαναλήφθηκε αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες προσπάθειες προσέγγισης.

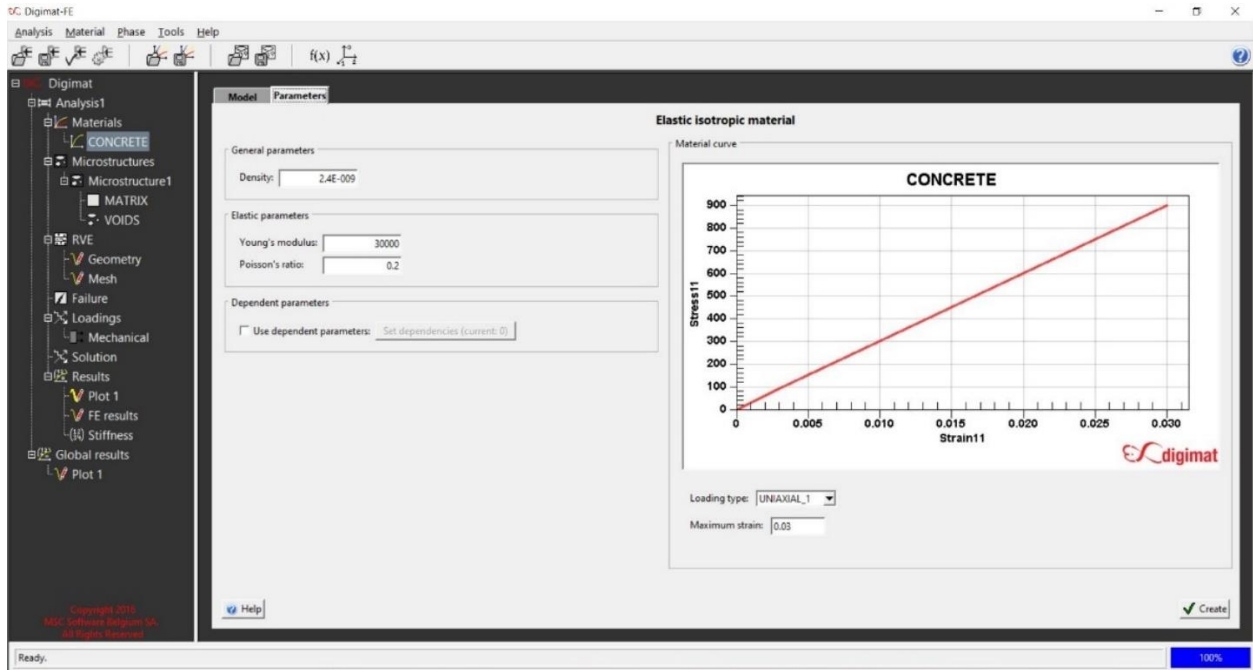
Για όλες τις μετρήσεις που αφορούν το μοναδικό έγκλεισμα ισχύουν τα ακόλουθα που αναγράφονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοναδικό έγκλεισμα.

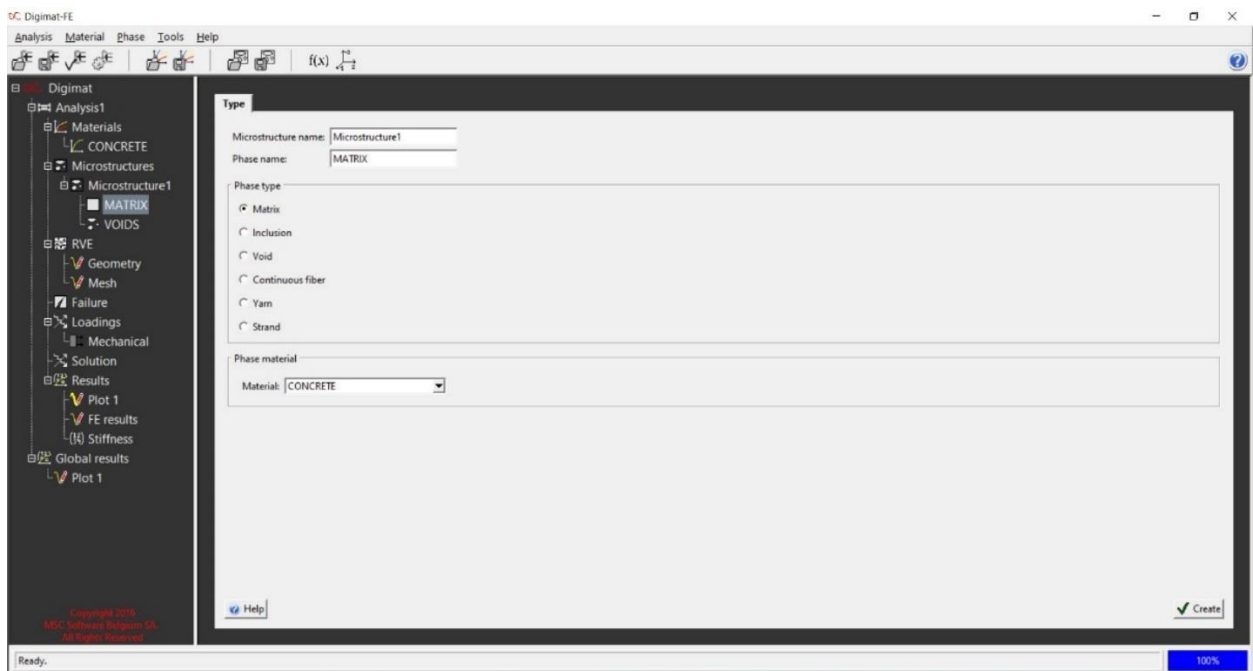
Διάμετρος εγκλισμάτων	1 mm
Συντεταγμένες RVE	5x5x5 mm
Συντεταγμένες Void	2.5x2.5x2.5 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm



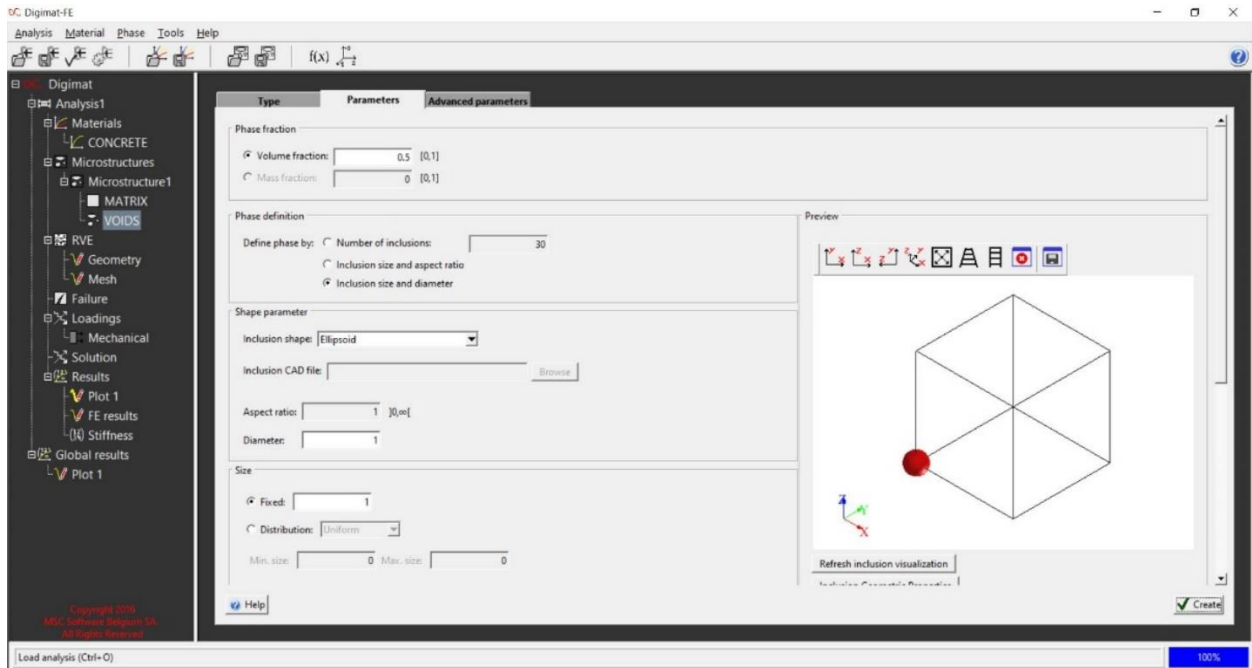
Εικόνα 35: Δημιουργία ανάλυσης για μοναδικό έγκλεισμα (Digimat)



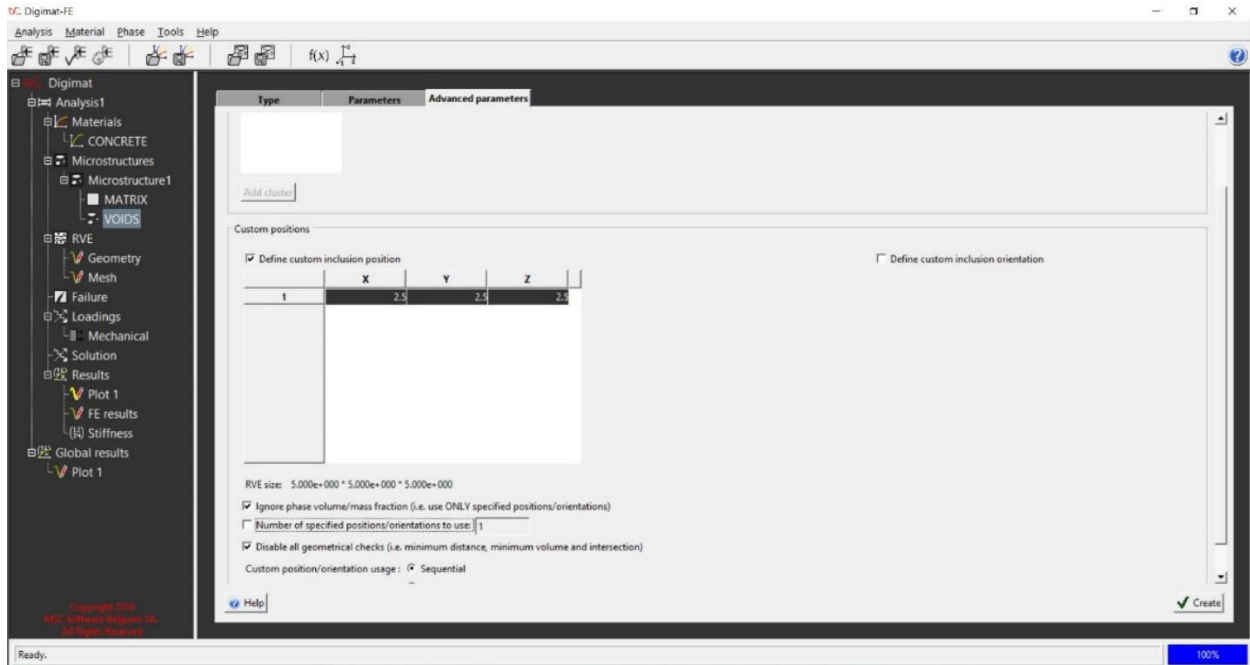
Εικόνα 36: Ορισμός παραμέτρων τσιμέντου (Digimat)



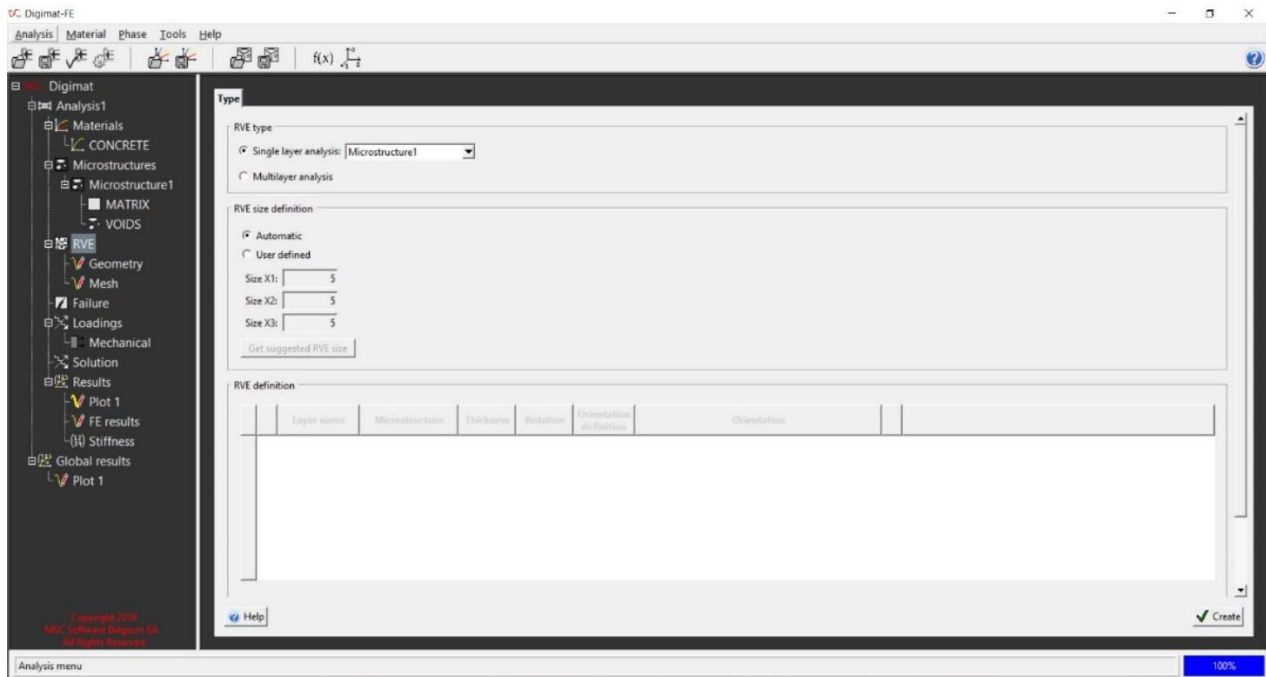
Εικόνα 37: Ορισμός μήτρας (Digimat)



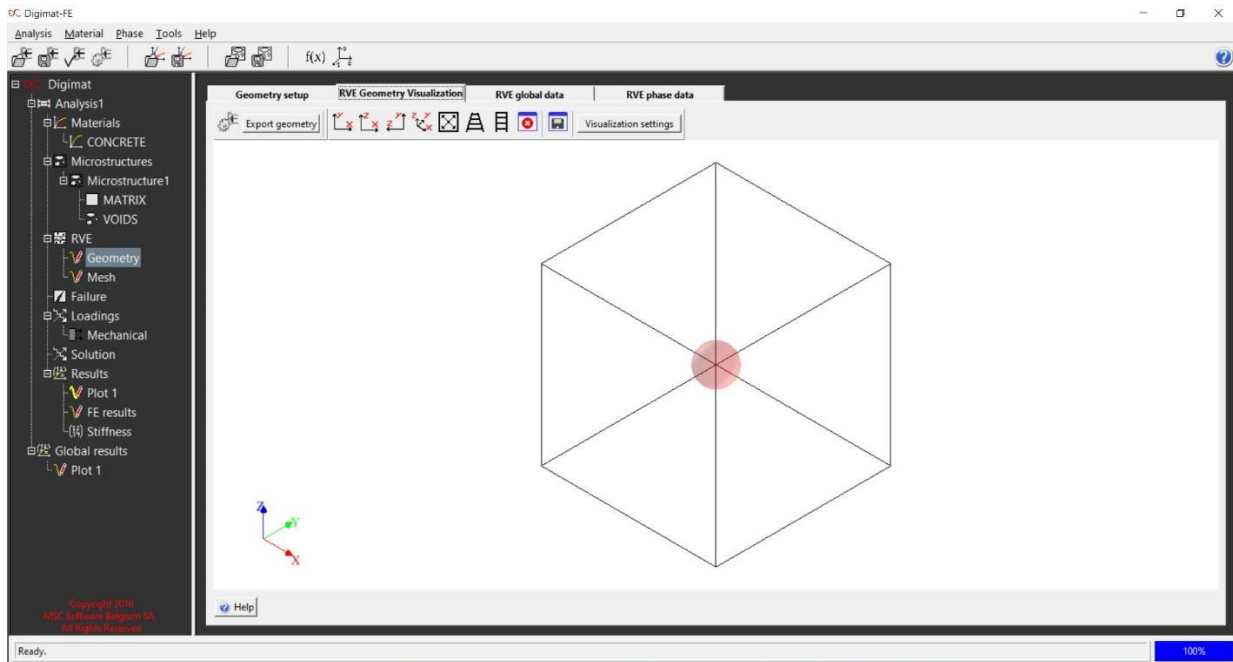
Εικόνα 38: Ορισμός εγκλεισμάτων (Digimat)



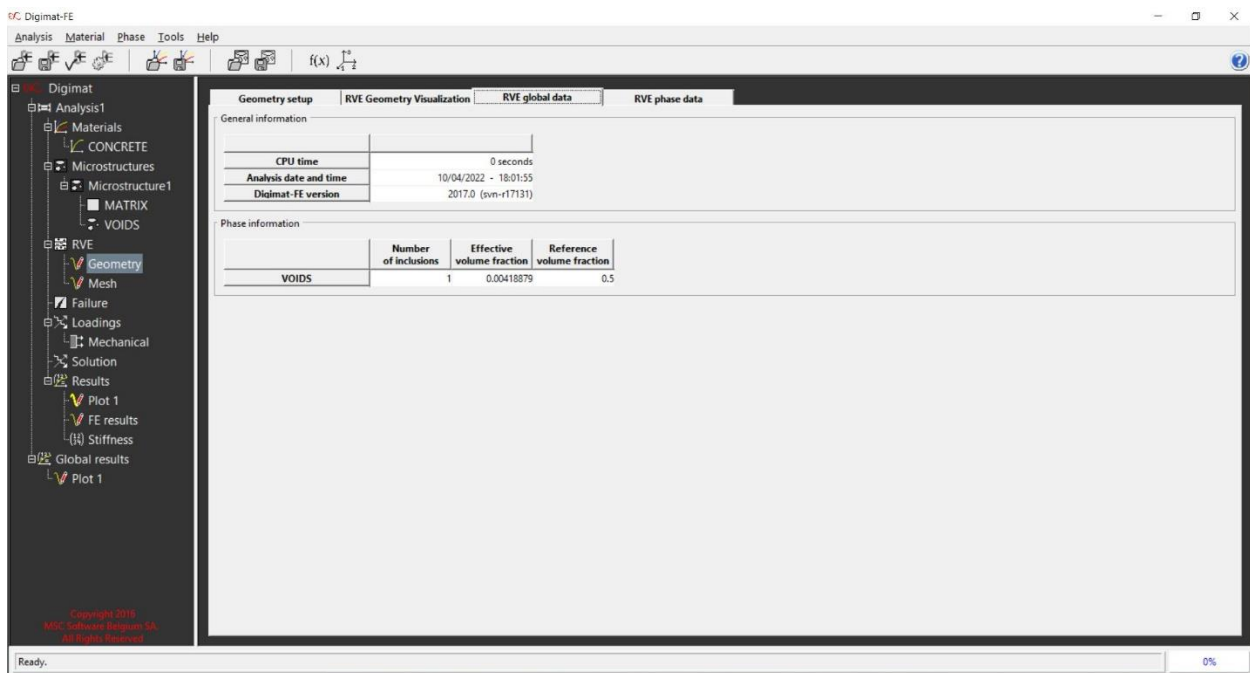
Εικόνα 39: Ορισμός μοναδικού εγκλείσματος στη μικροδομή του RVE. (Digimat)



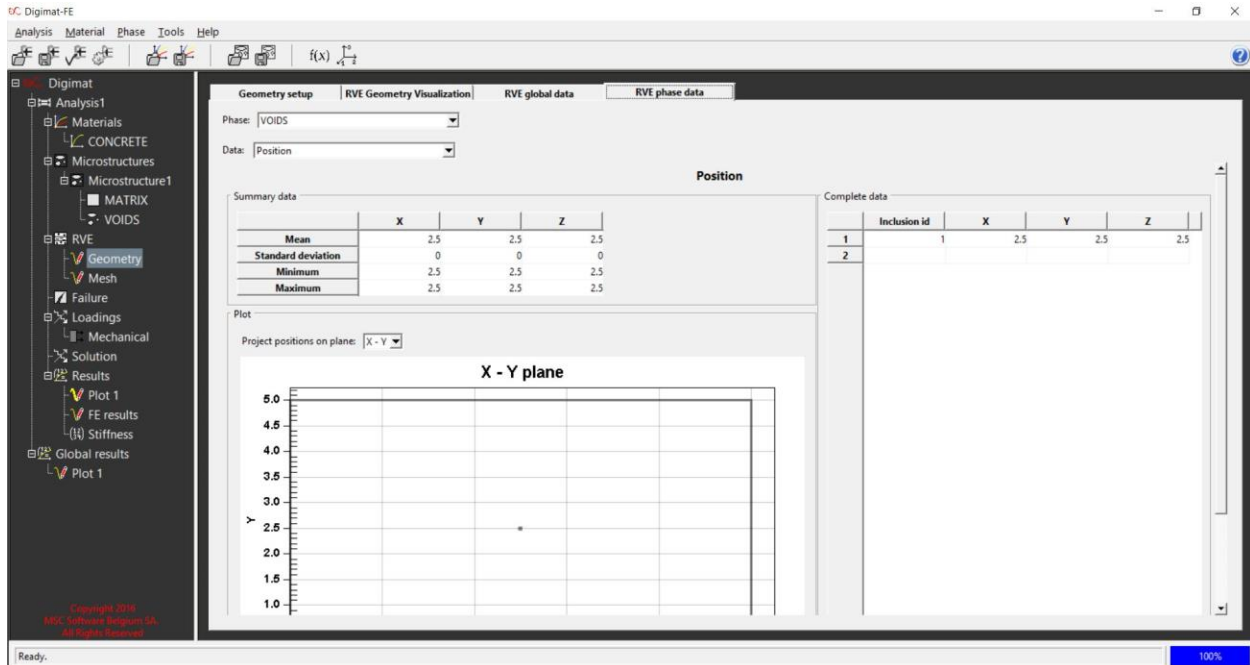
Εικόνα 40: Συντεταγμένες του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου RVE. (Digimat)



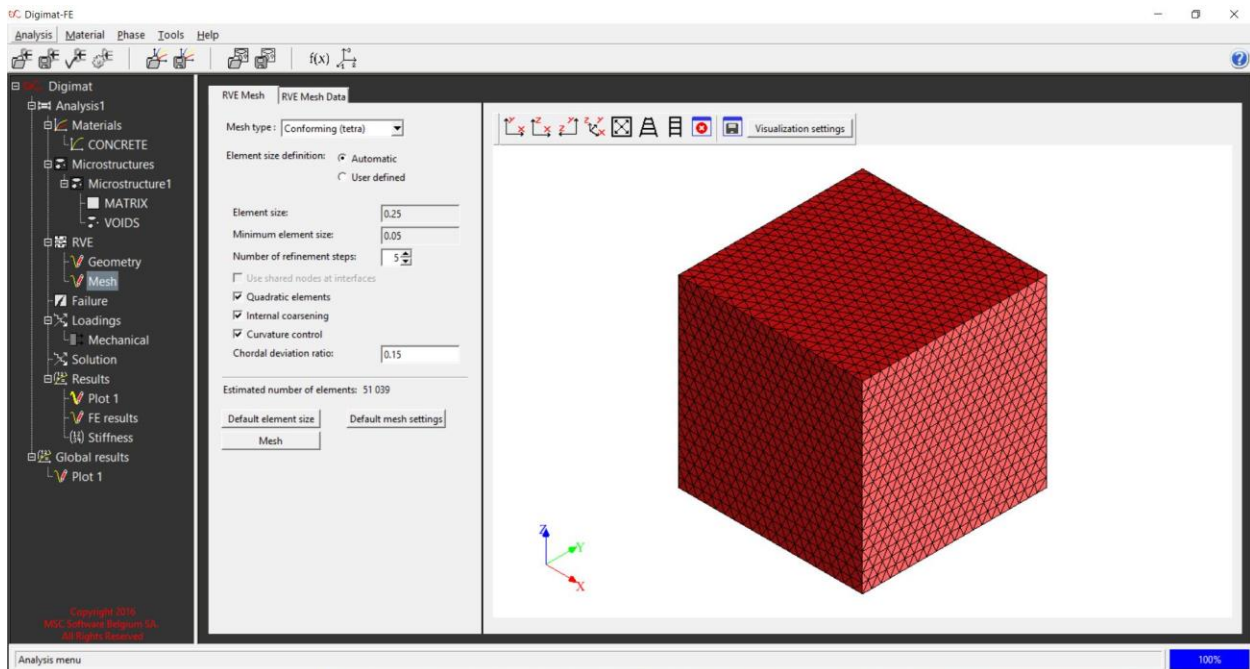
Εικόνα 41: Απεικόνιση μικροδομής με μοναδικό έγκλεισμα στο RVE. (Digimat)



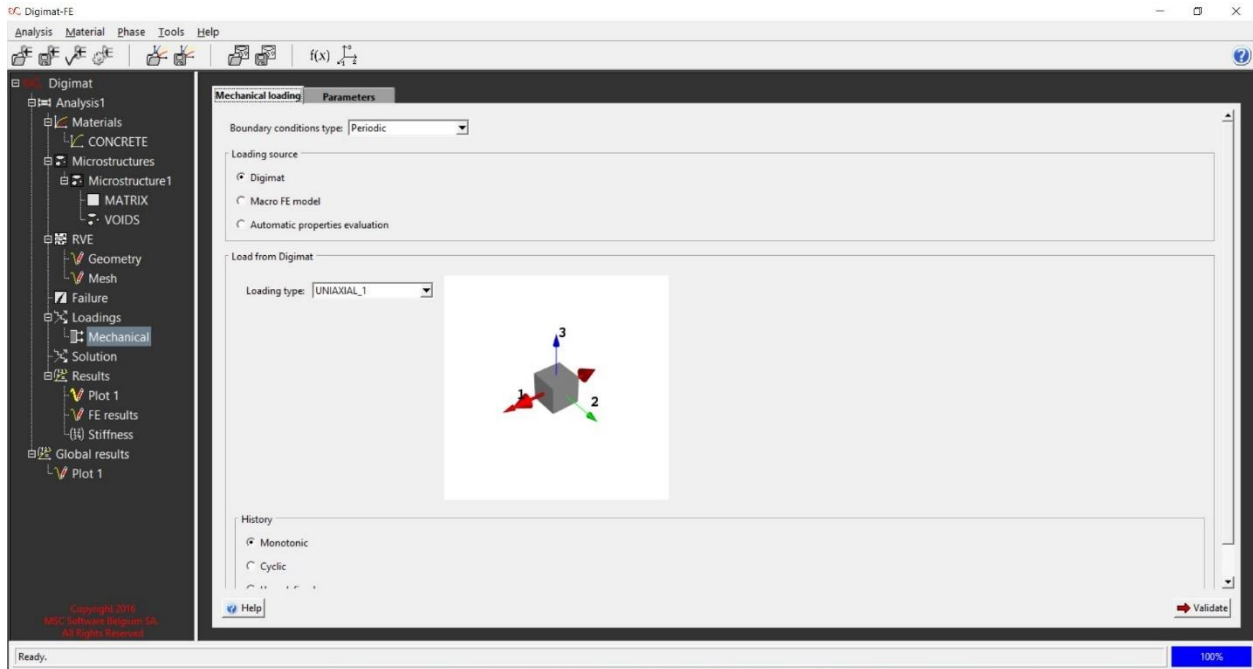
Εικόνα 42: Απεικόνιση περιεκτικότητας που επιτεύχθηκε. (Digimat)



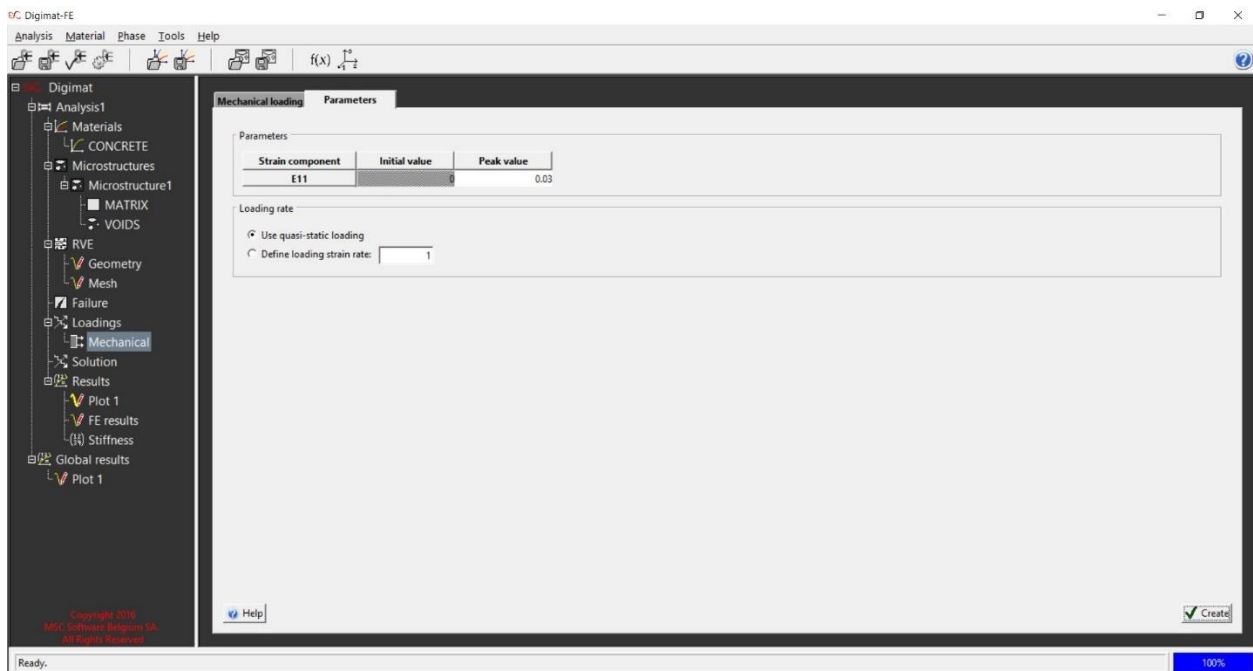
Εικόνα 43: Απεικόνιση των δεδομένων της γεωμετρίας του RVE. (Digimat)



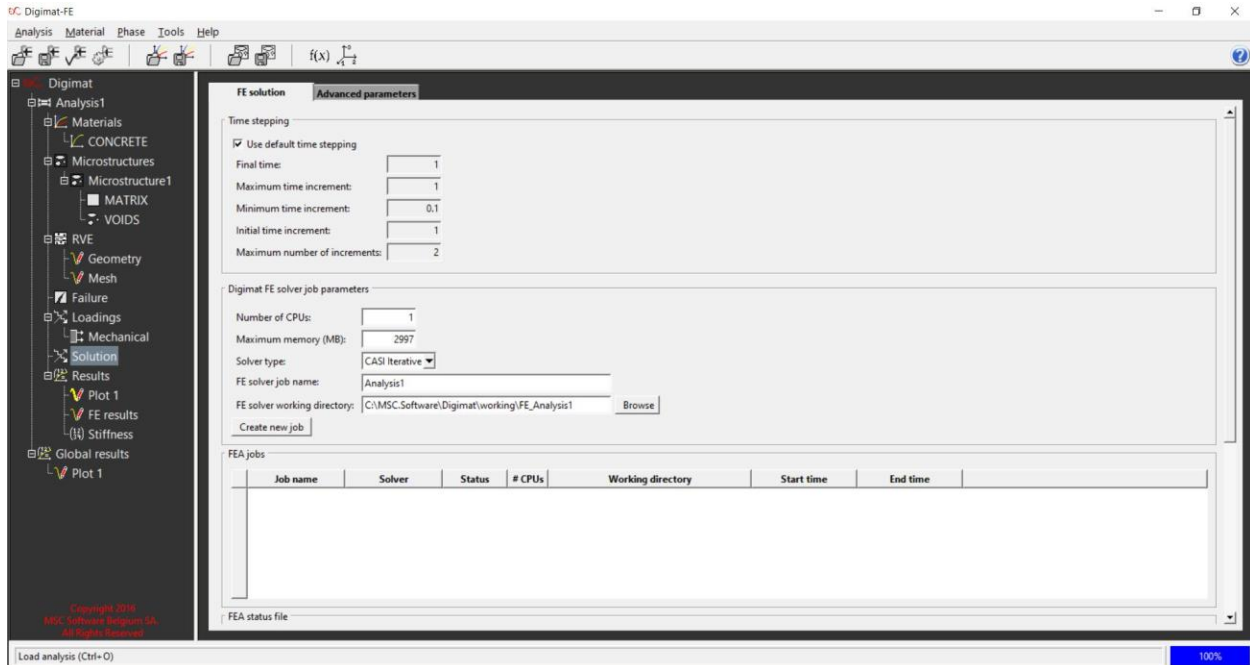
Εικόνα 44: Διακριτοποίηση RVE με μοναδικό έγκλεισμα. (Digimat)



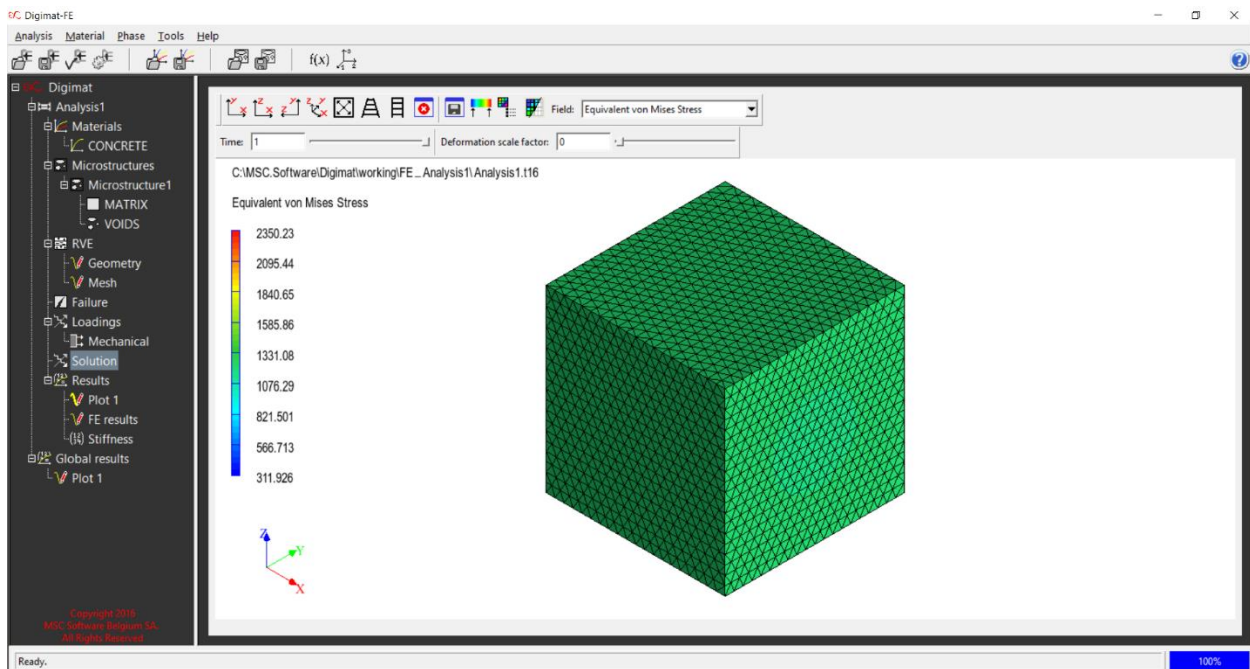
Εικόνα 45: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



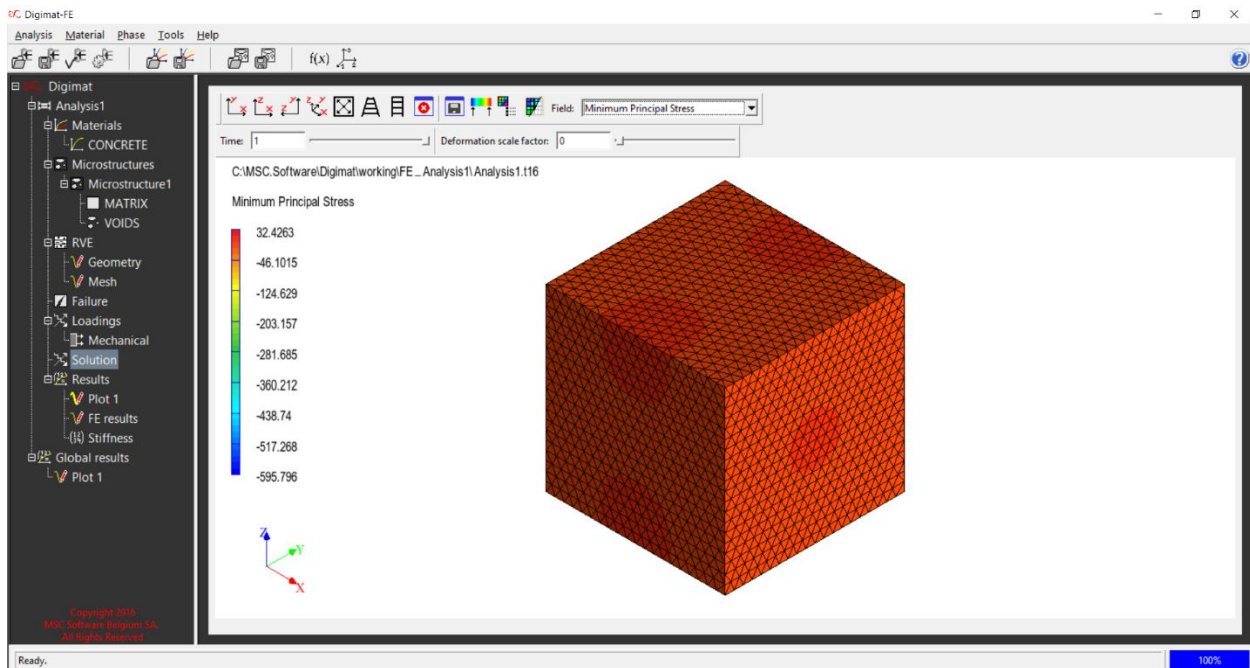
Εικόνα 46: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



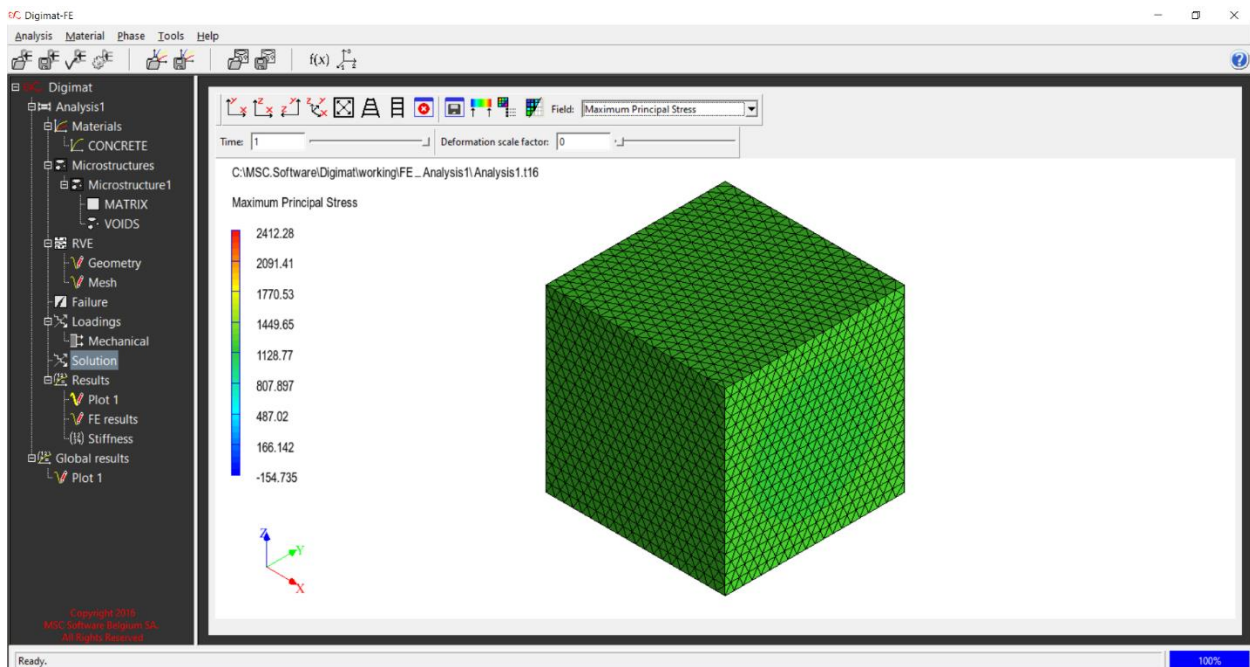
Εικόνα 47: Δημιουργία επίλυσης. (Digimat)



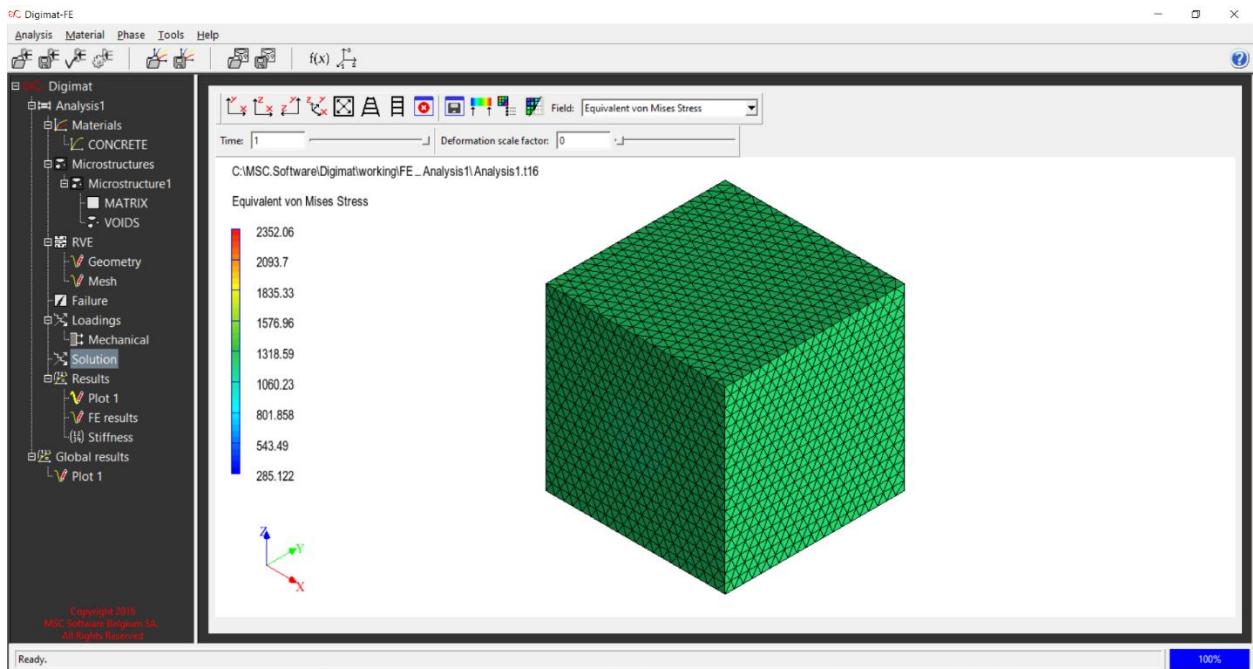
Εικόνα 48: Εκτίμηση τάσης Von Mises για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



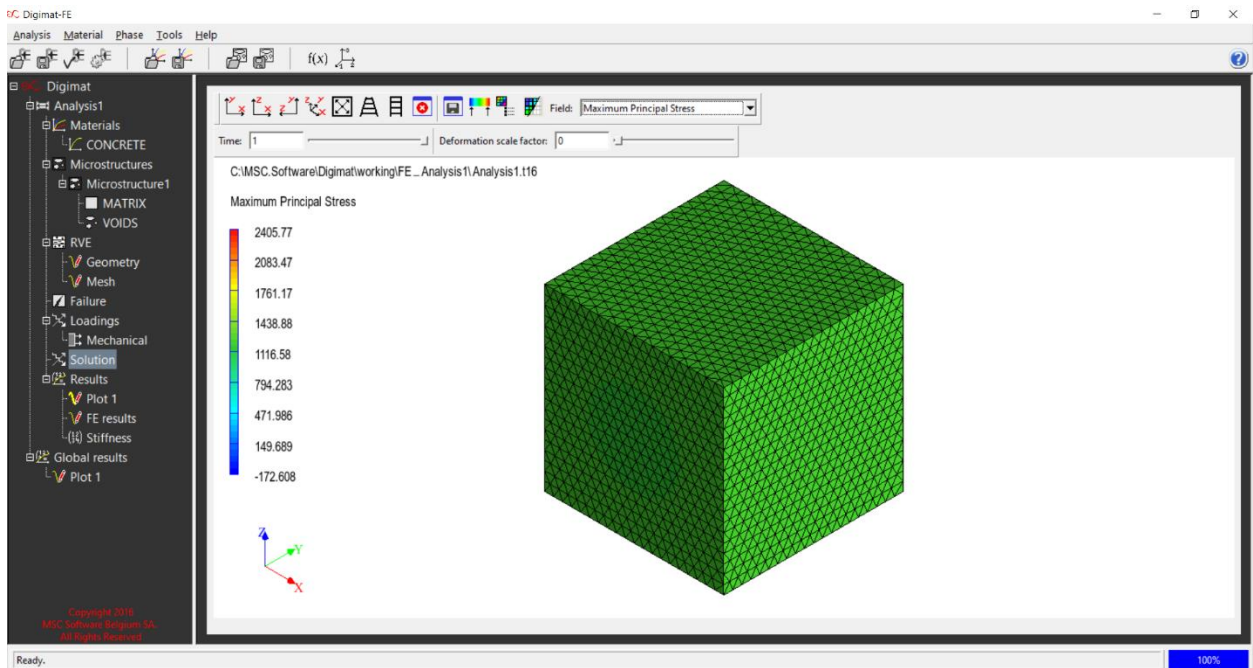
Εικόνα 49: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για εφελκυστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα (Digimat)



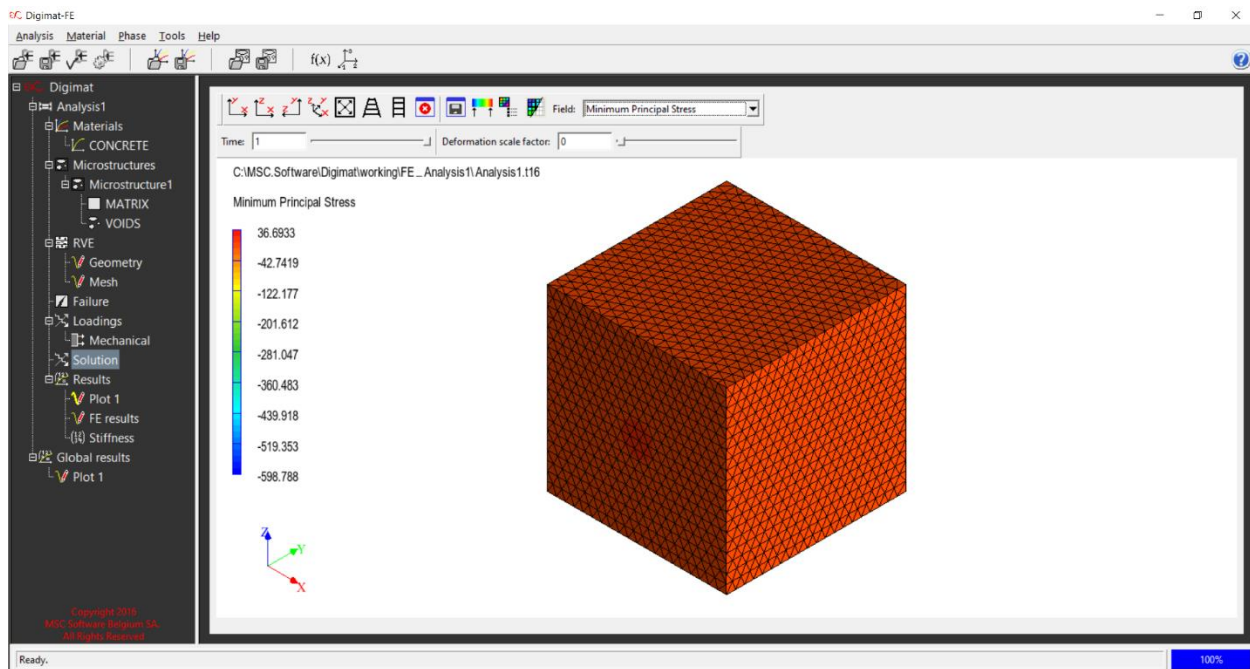
Εικόνα 50: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για εφελκυστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



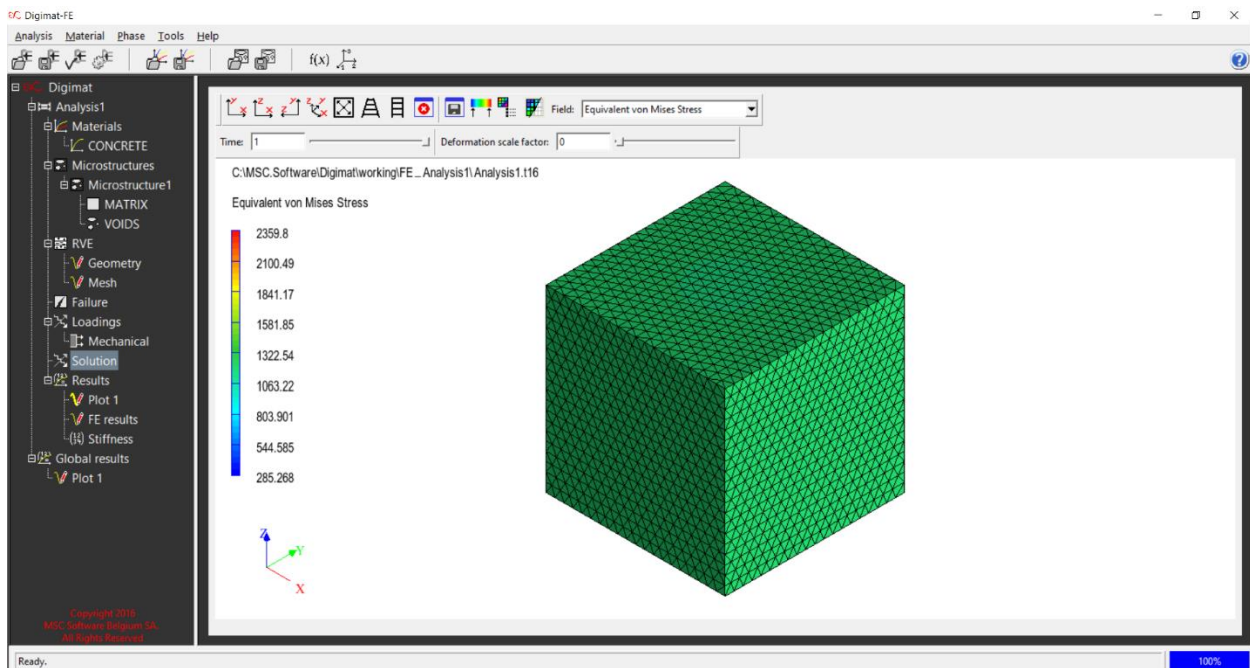
Εικόνα 51: Εκτίμηση τάσης Von Mises για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



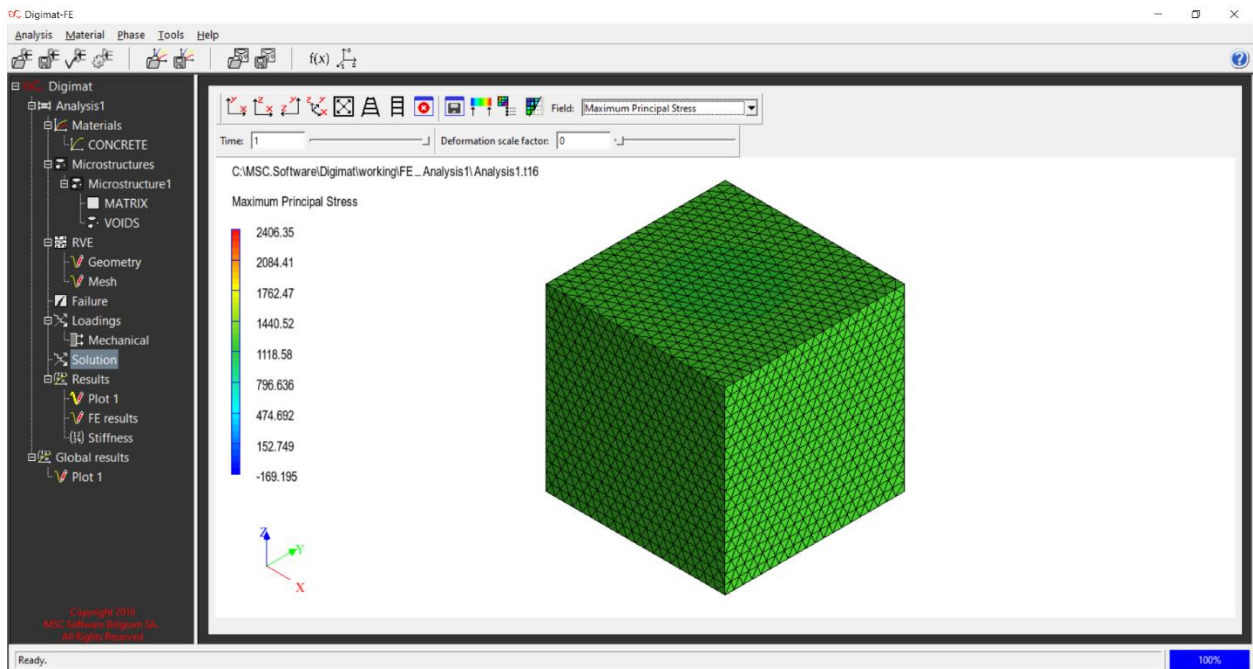
Εικόνα 52: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



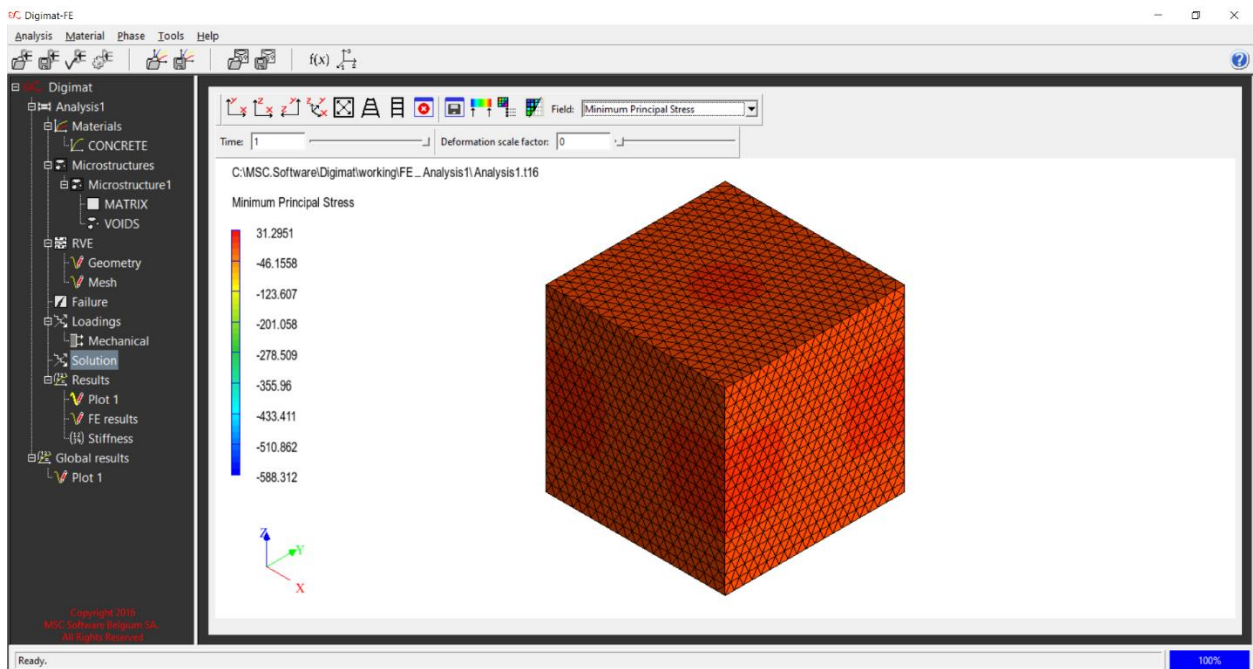
Εικόνα 53: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 54: Εκτίμηση τάσης Von Mises για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 55: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 56: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)

3.3 Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα εγκλεισμάτων

Για την επίτευξη της μέγιστης περιεκτικότητας εγκλεισμάτων στην μικροδομή του RVE κατασκευάστηκε ένας πίνακας με τα εγκλείσματα (Παράρτημα Β), οι τιμές των συντεταγμένων υπολογίστηκαν με μαθηματικές πράξεις και ο τελικός αριθμός των εγκλεισμάτων ήταν 180.

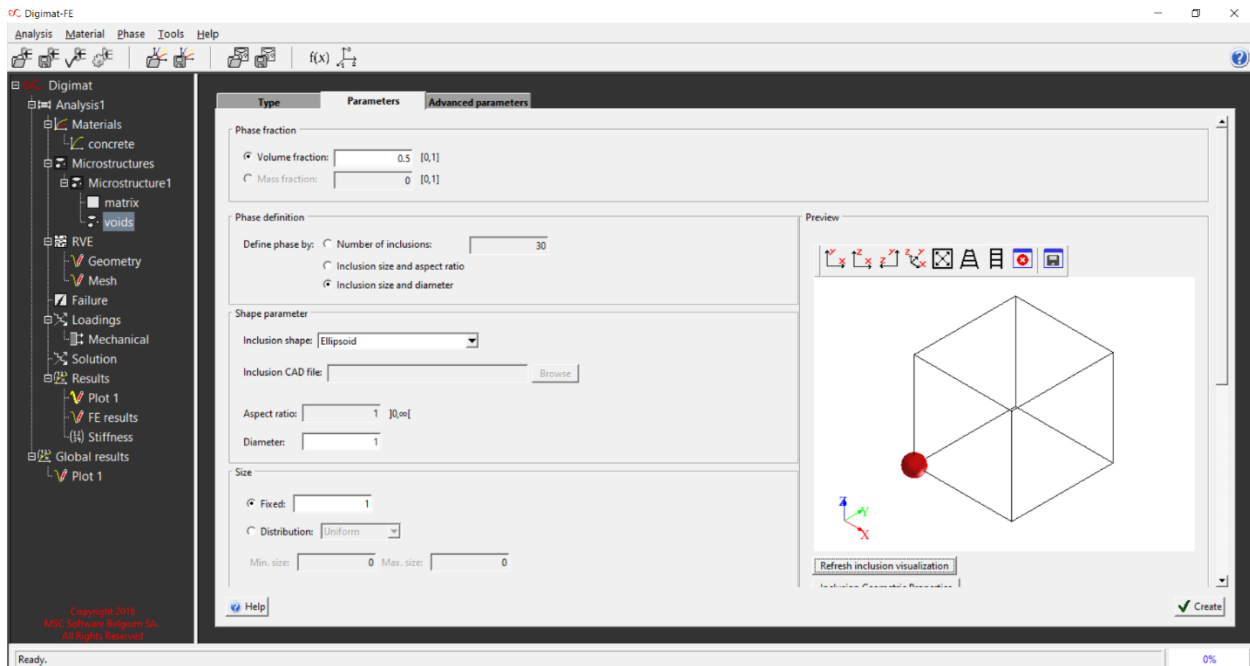
RVE	5x5x5 (mm)
Διάμετρος σφαιριδίων-εγκλεισμάτων	1 (mm)
Διάμετρος σφαιριδίων για υπολογισμό συντεταγμένων	1.05 (mm)

Η εύρεση των συντεταγμένων έγινε με σκοπό την πλήρη συμμετρική κατανομή των στοιχείων στο χώρο της μικροδομής για την επίτευξη της μέγιστης περιεκτικότητας της αερογέλης. Ο στόχος των διαφόρων επαναλήψεων οφείλεται στην μελέτη και παρατήρηση τυχόν αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων των τάσεων καθώς και των μέτρων ελαστικότητας. Ωστόσο, σε κάθε προσπάθεια υπήρξε διαφοροποίηση του element size με κοινό σκοπό.

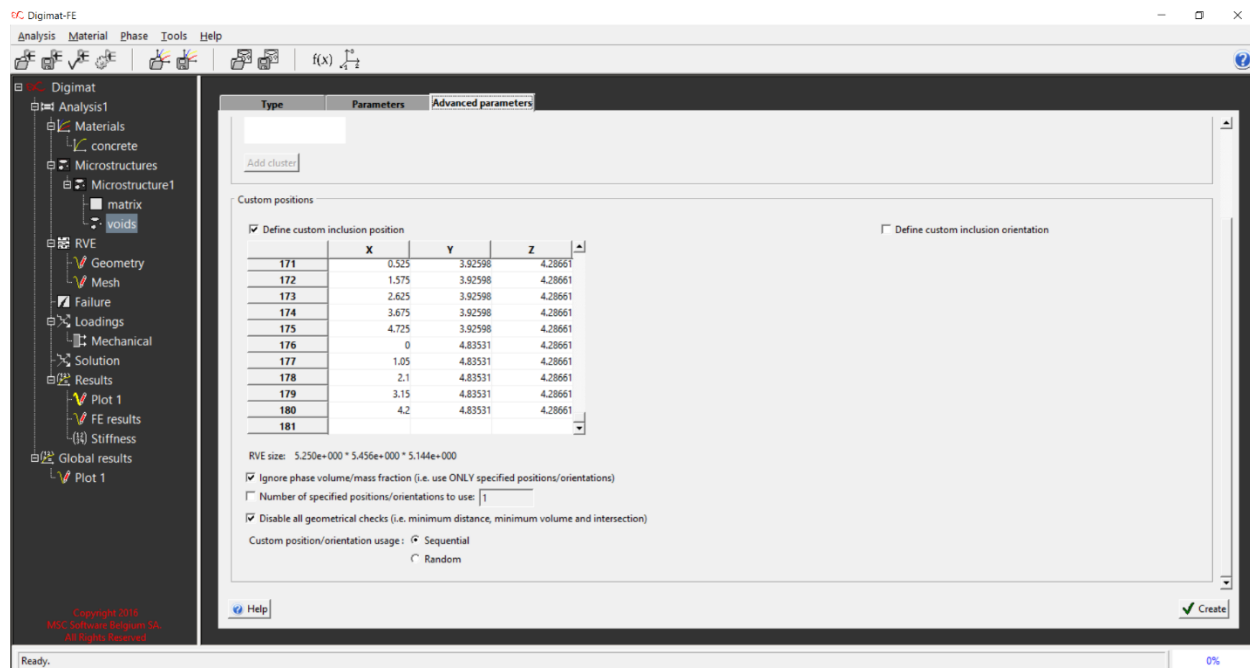
Η ανάπτυξη και η επίλυση των προσπαθειών και των προσεγγίσεων των τάσεων πραγματοποιήθηκαν όπως ακριβώς και προηγουμένως, με την χρήση της μεθοδολογίας του προγράμματος Digimat. Στις απεικονίσεις που επισυνάπτονται ακολούθως παραλείπονται τα αρχικά στάδια απεικόνισης λόγω του ότι προ-επισυνάπτηκαν.

Στο παρόν υποκεφάλαιο απεικονίζεται η μεθοδολογία μοντελοποίησης της γεωμετρίας του RVE με πλήρη κατανομή στοιχείων-εγκλείσματα για μία προσέγγιση τάσεων και μέτρων ελαστικότητας (Κεφάλαιο 50. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα και διαφοροποιήθηκαν όσον αφορά το μέγεθος του στοιχείου στη διακριτοποίηση (αναφέρονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β).

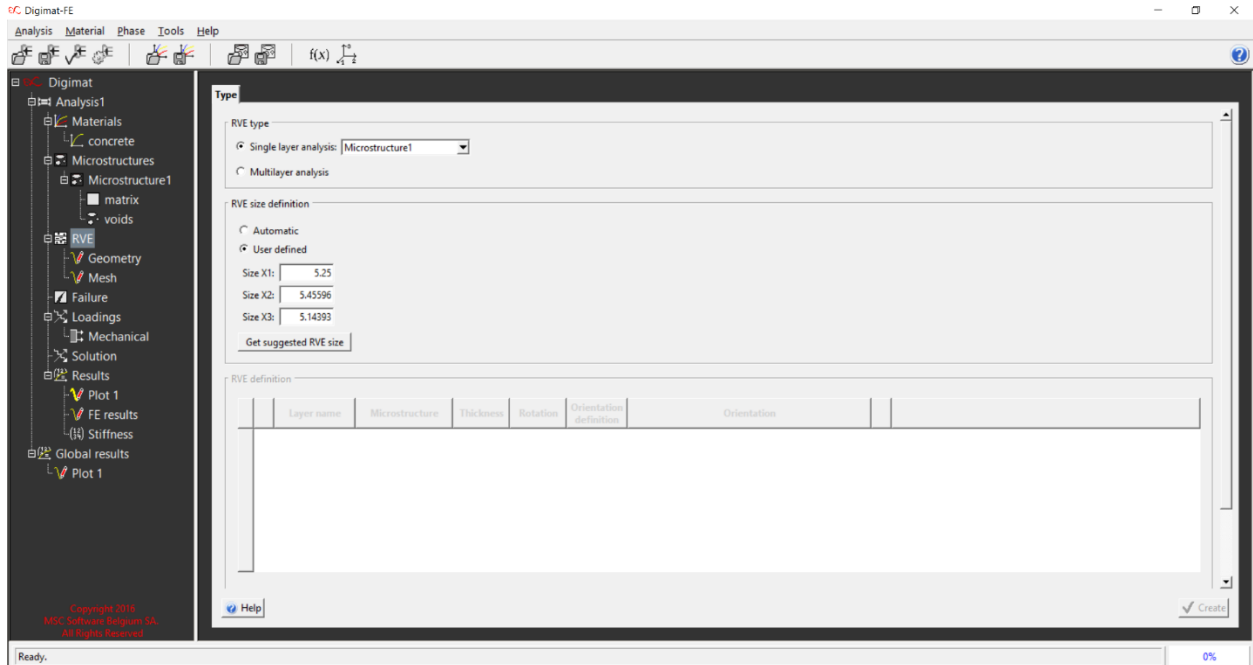
Διάμετρος σφαιριδίων	1 mm
Αριθμός σφαιριδίων	180
Διαστάσεις RVE	5.25x5.45596x5.14393 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm



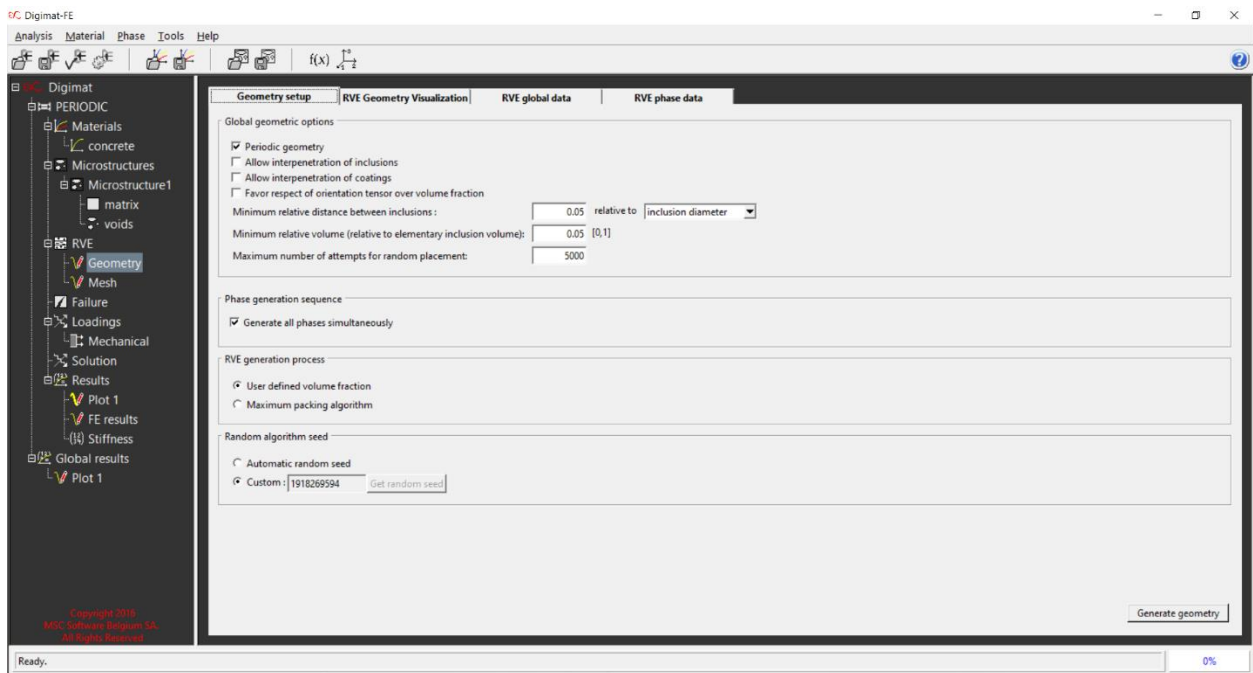
Εικόνα 57: Ορισμός εγκλεισμάτων. (Digimat)



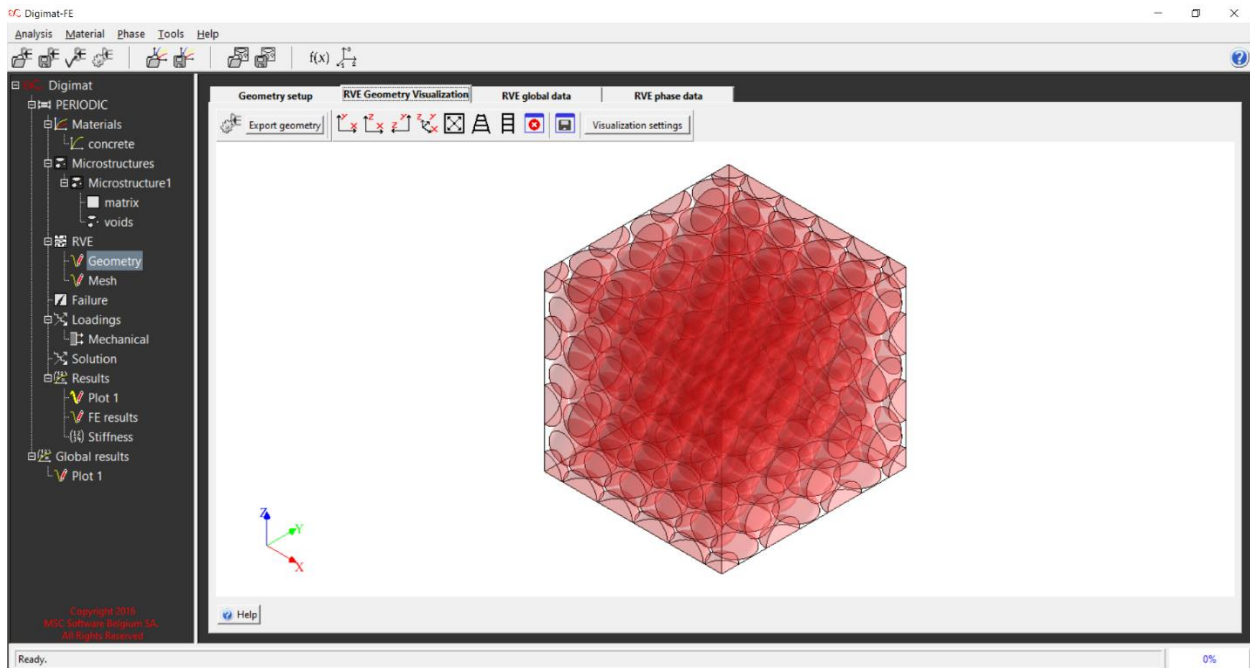
Εικόνα 58: Ορισμός συντεταγμένων 180 εγκλεισμάτων. (Digimat)



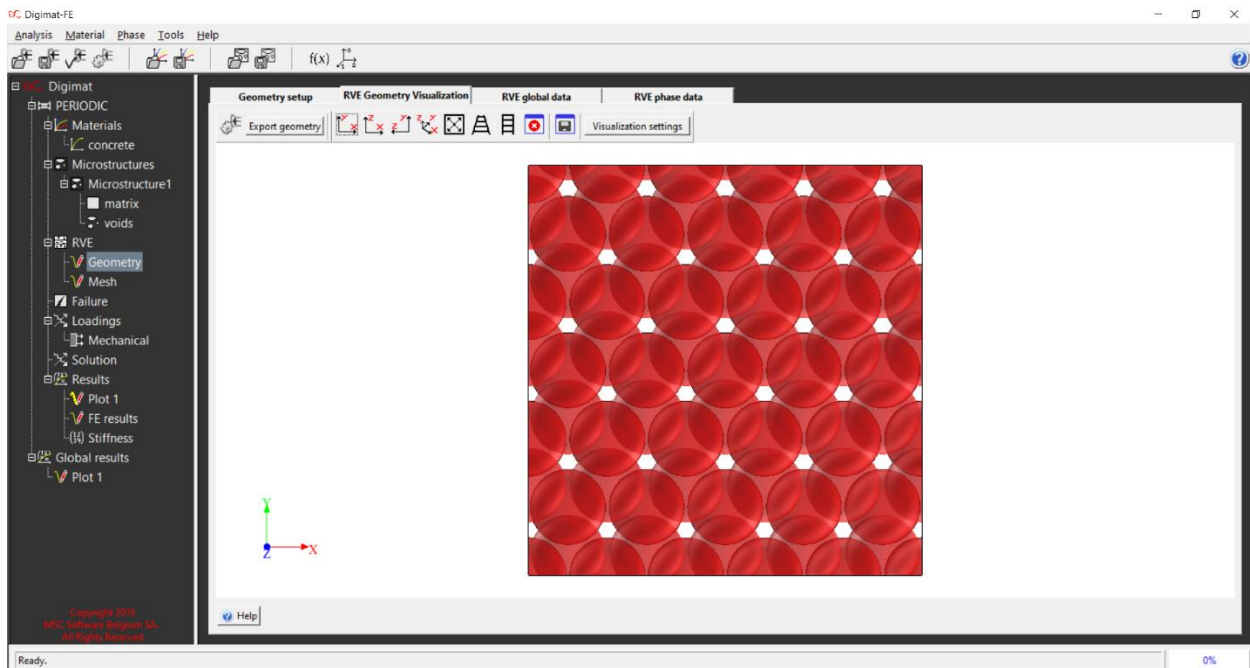
Εικόνα 59: Διαστάσεις RVE. (Digimat)



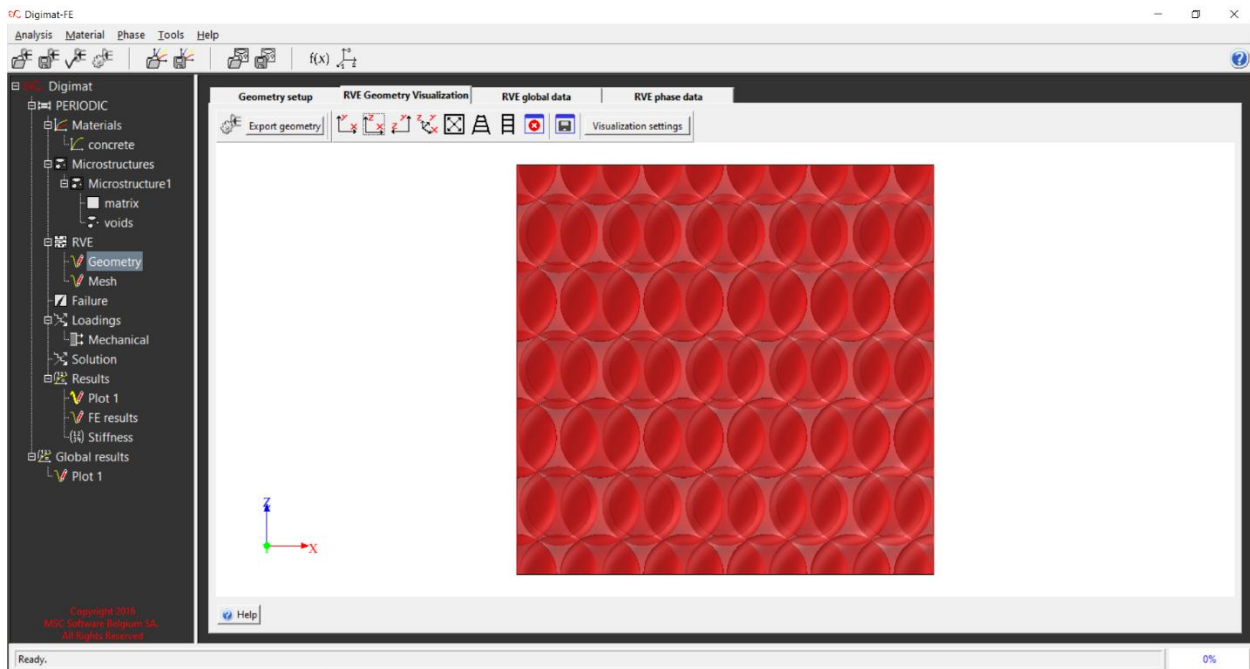
Εικόνα 60: Επιλογή για εξαγωγή γεωμετρίας RVE. (Digimat)



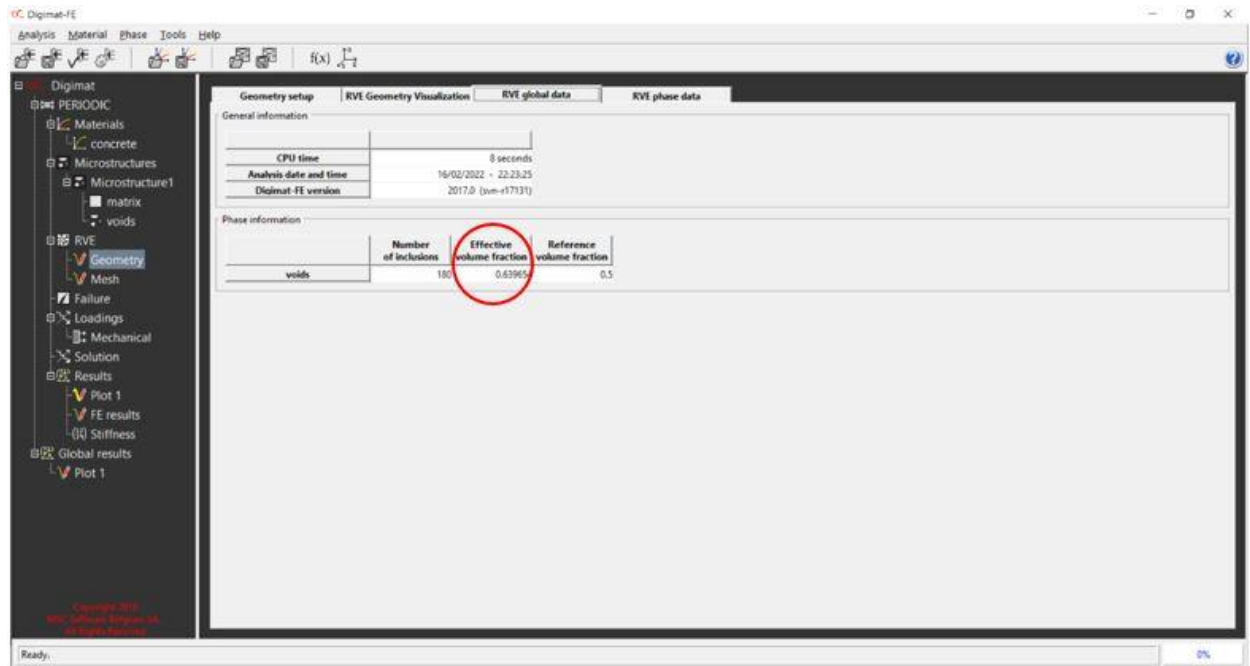
Εικόνα 61: Απεικόνιση γεωμετρίας μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane x-z), με πλήρη κατανομή των εγκλεισμάτων. (Digimat)



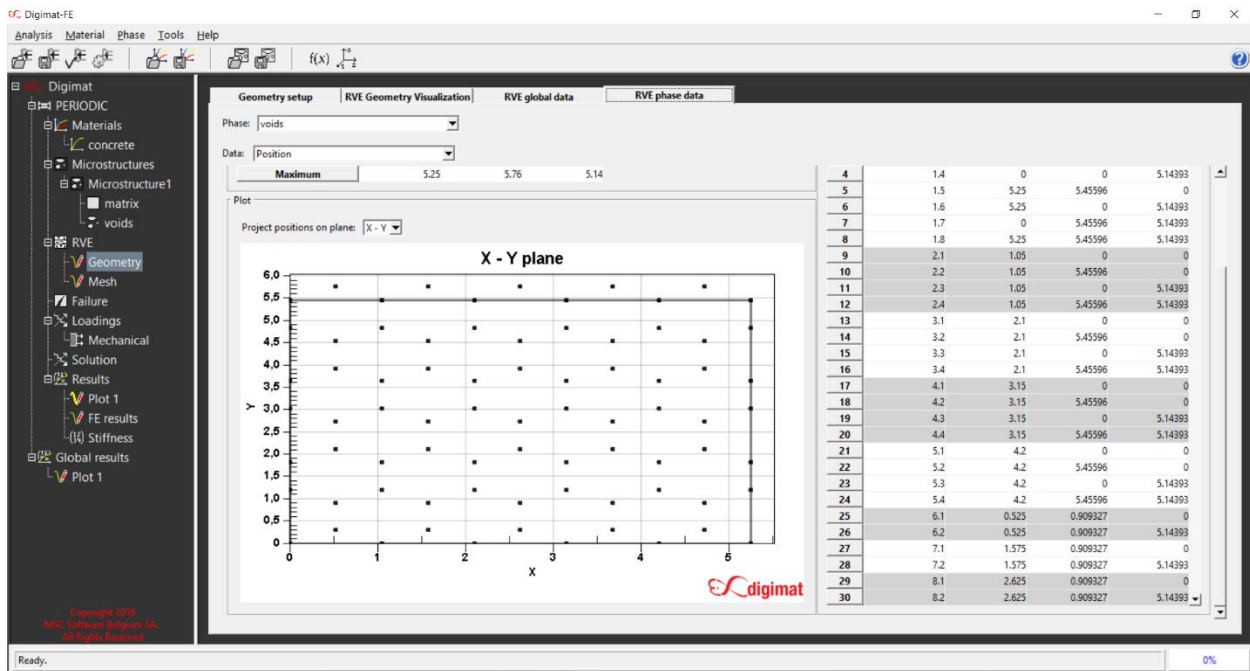
Εικόνα 62: Απεικόνιση γεωμετρίας μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane y-x), με πλήρη κατανομή εγκλεισμάτων. (Digimat)



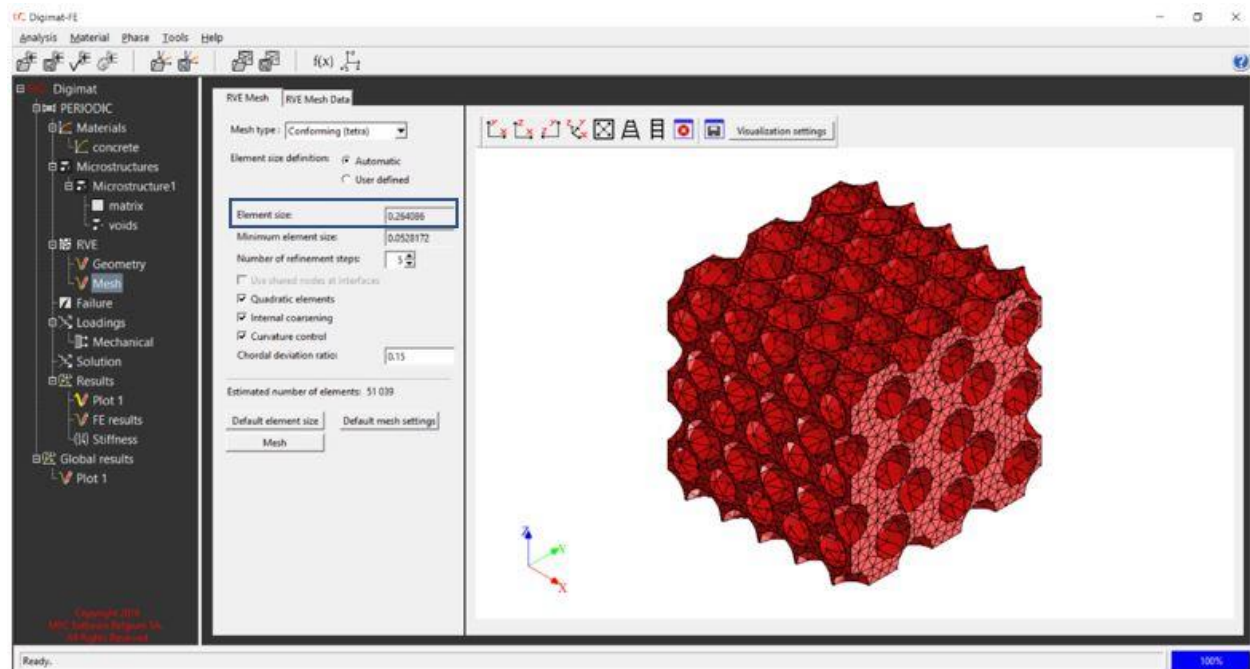
Εικόνα 63: Απεικόνιση γεωμετρίας μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-x), με πλήρη κατανομή εγκλεισμάτων



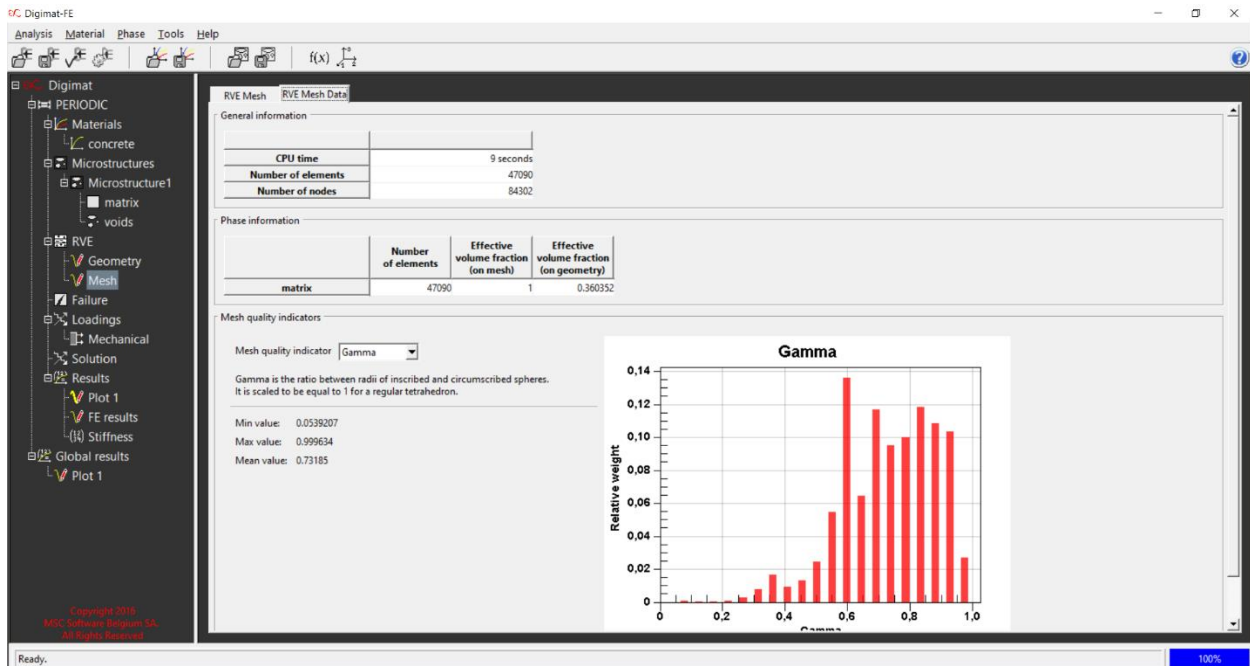
Εικόνα 64: Απεικόνιση της μέγιστης κατ'όγκο περιεκτικότητας με πλήρη κατανομή εγκλεισμάτων. (Digimat)



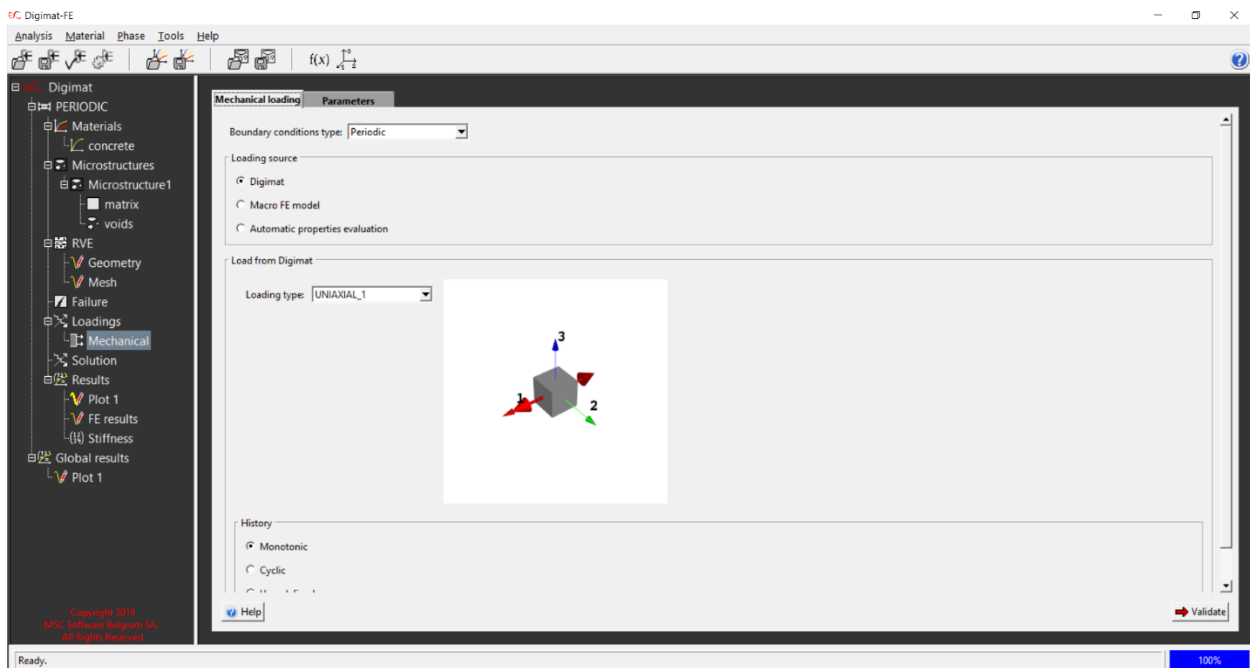
Εικόνα 65: Απεικόνιση των δεδομένων του RVE. (Digimat)



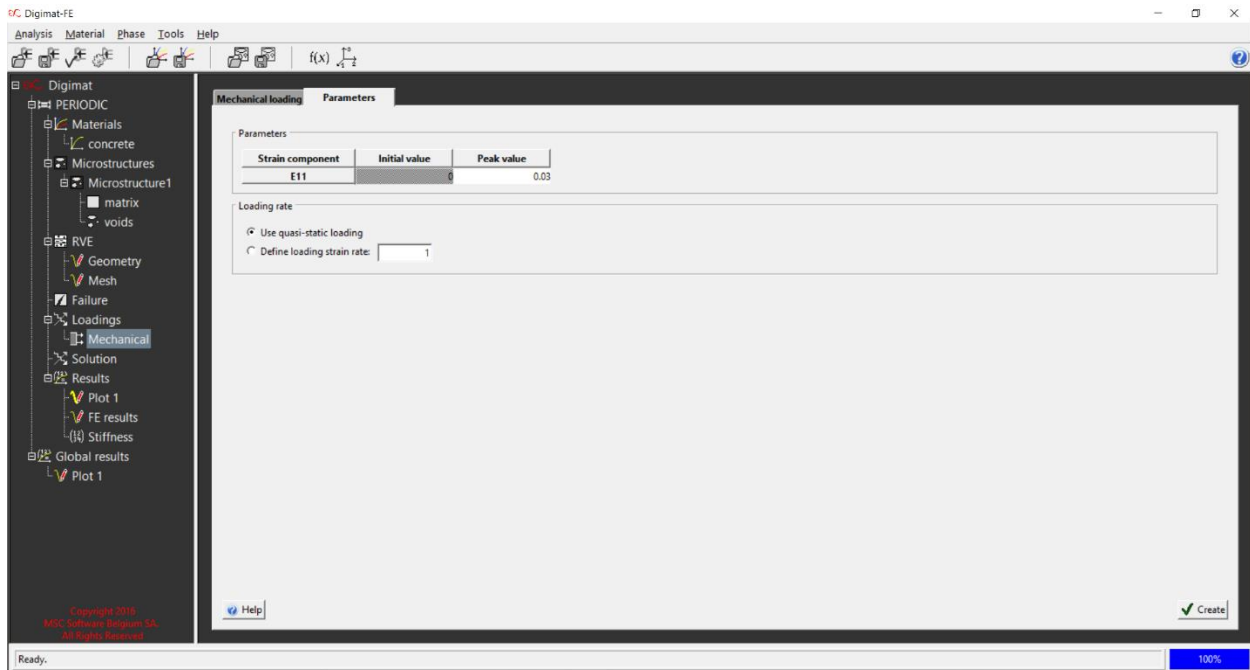
Εικόνα 66: Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE. (Digimat)



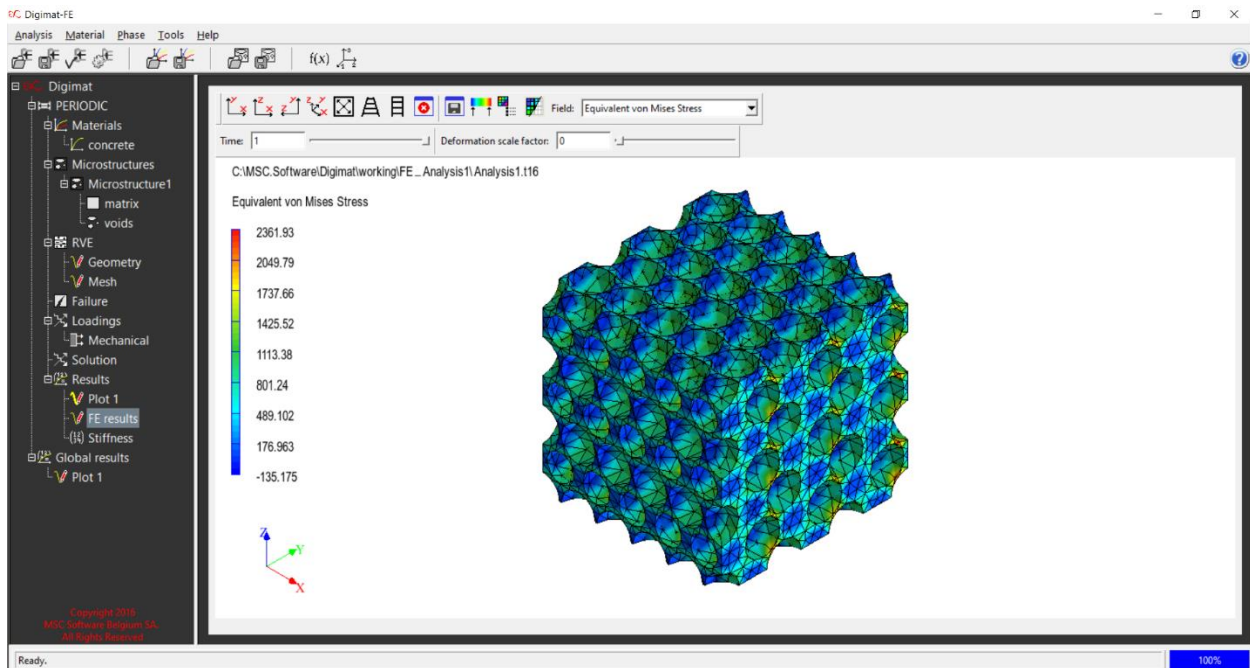
Εικόνα 67: Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης. (Digimat)



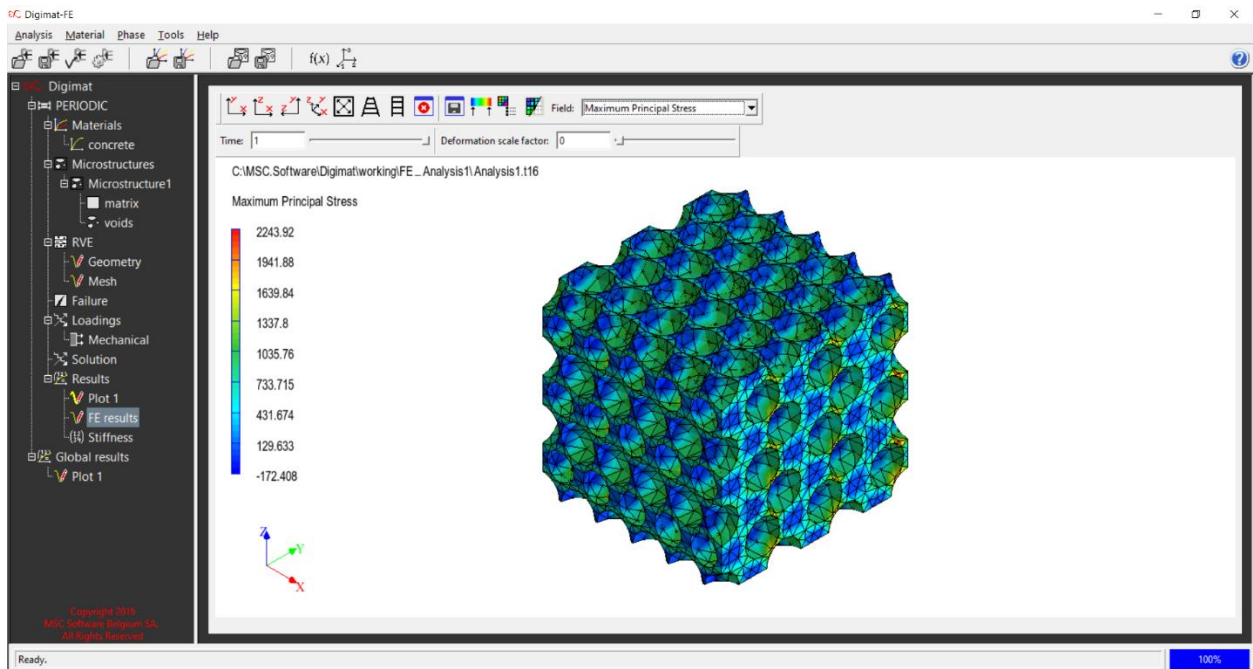
Εικόνα 68: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



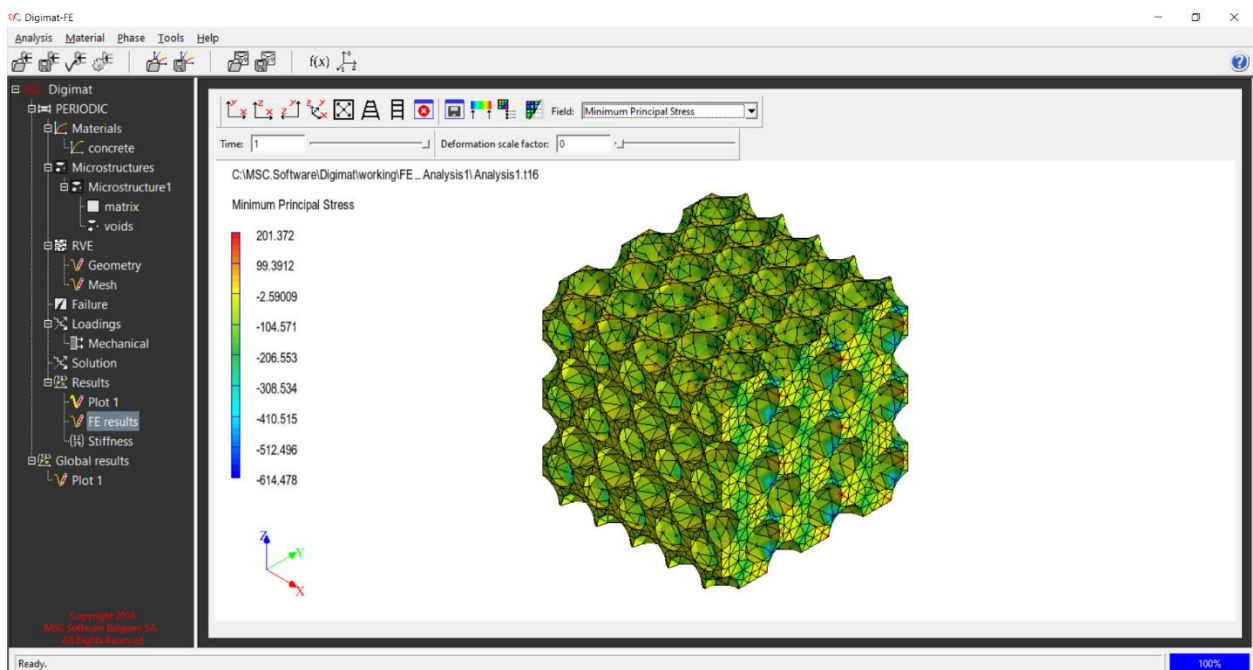
Εικόνα 69: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



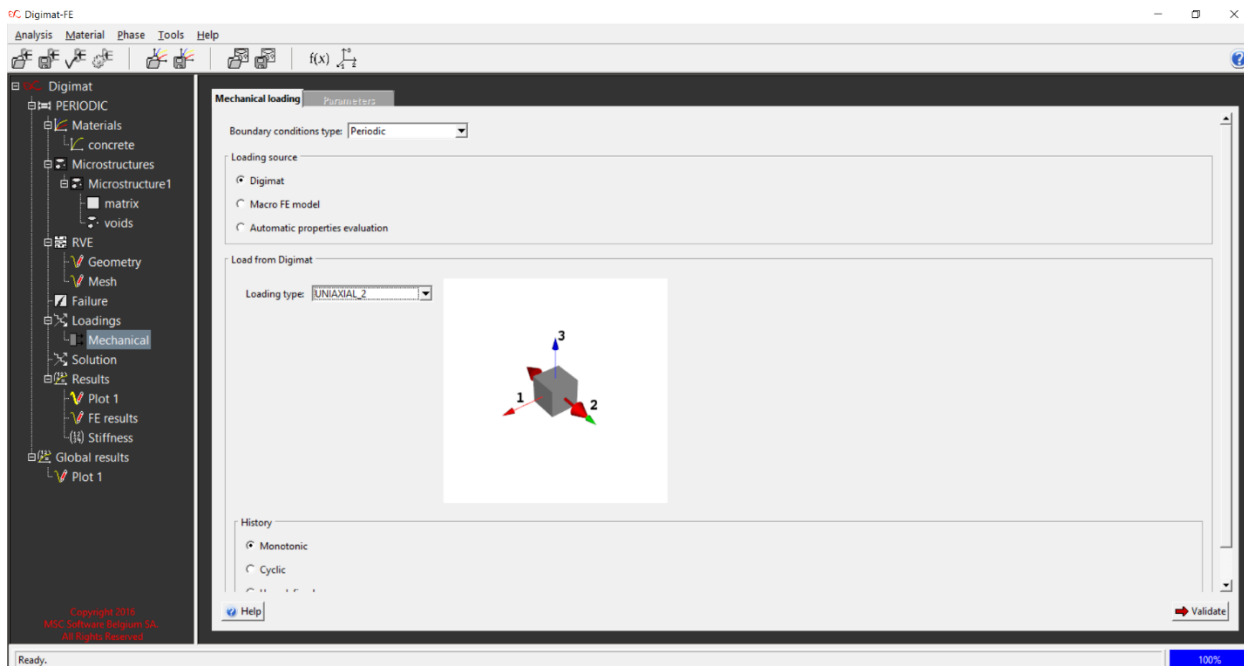
Εικόνα 70: Εκτίμηση τάσης Von Mises για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



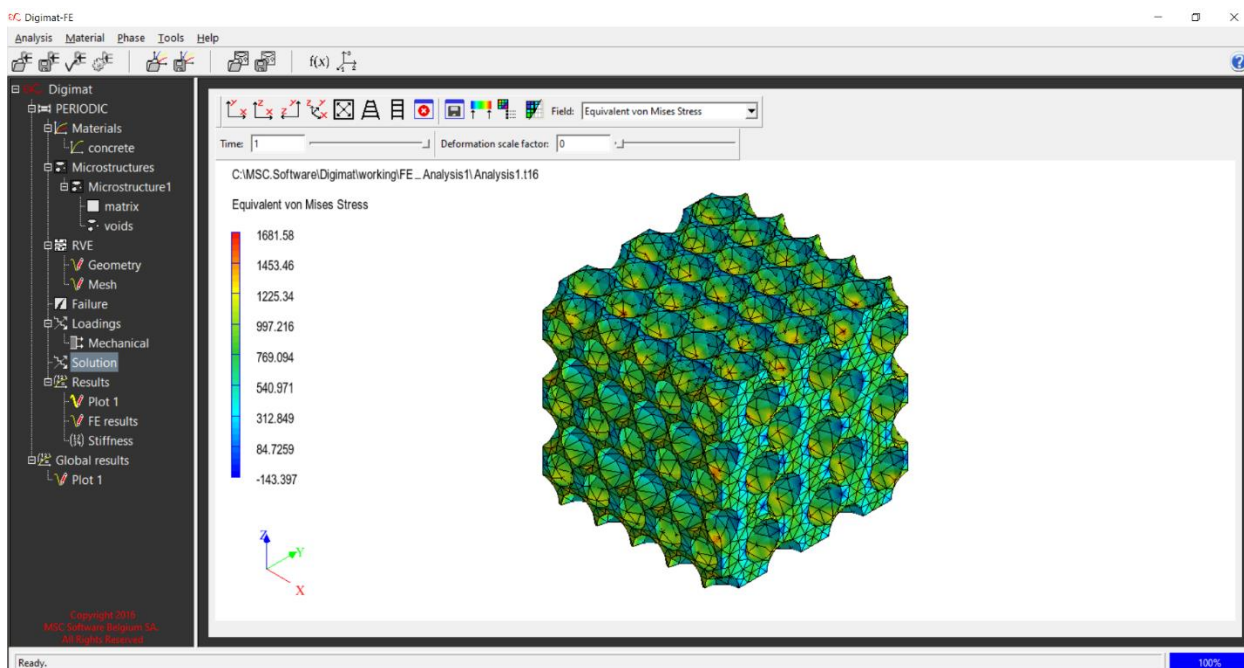
Εικόνα 71: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



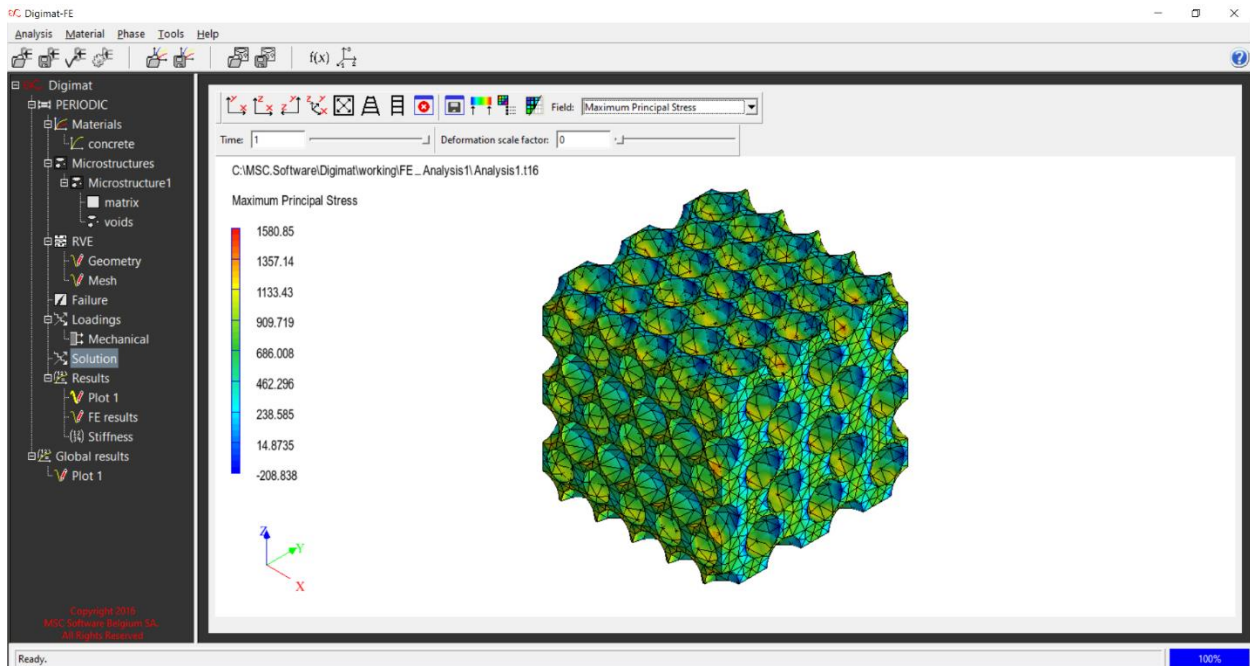
Εικόνα 72: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



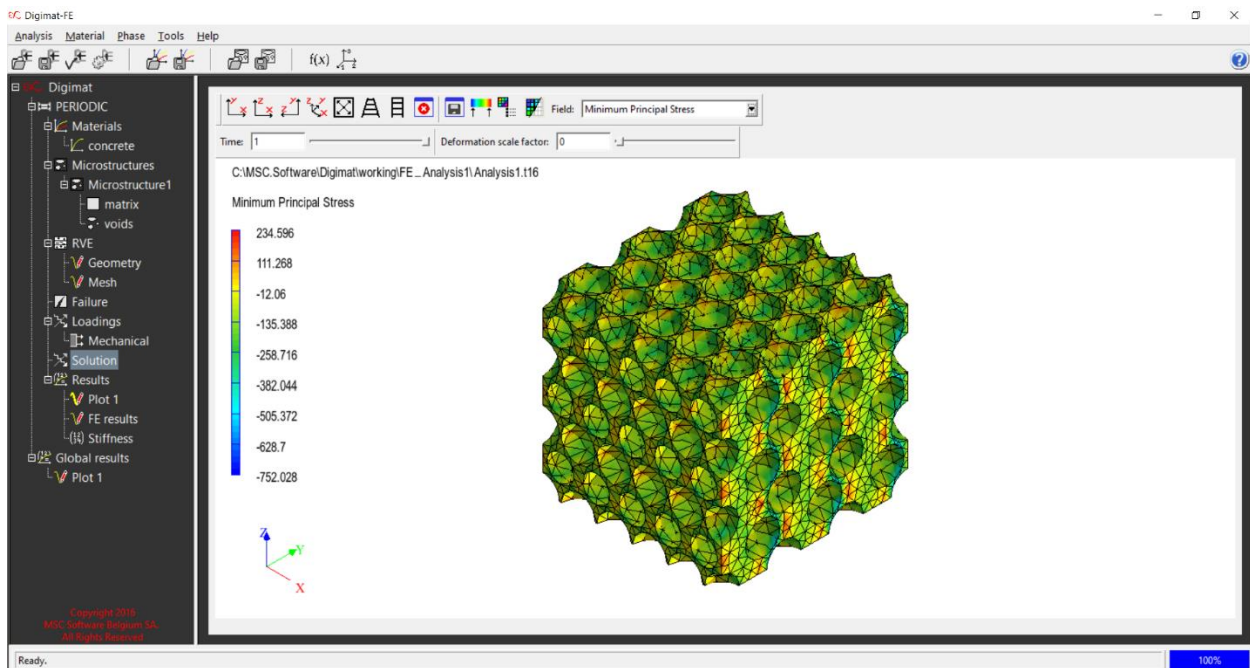
Εικόνα 73: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



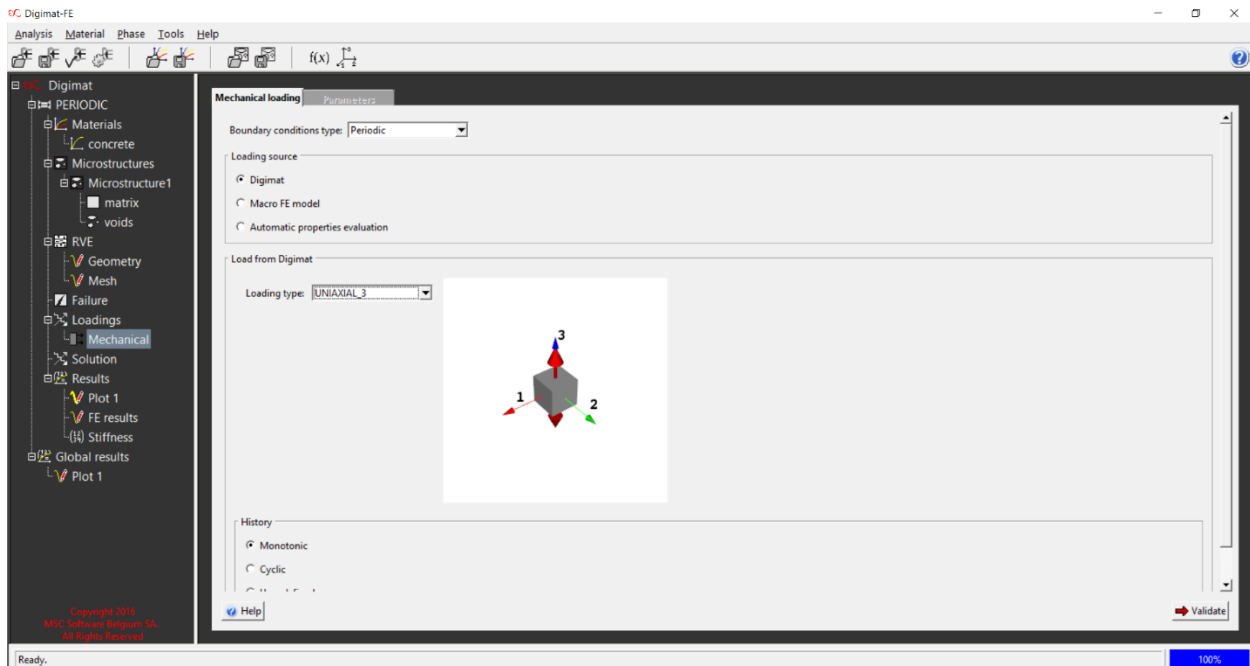
Εικόνα 74: Εκτίμηση τάσης Von Mises για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



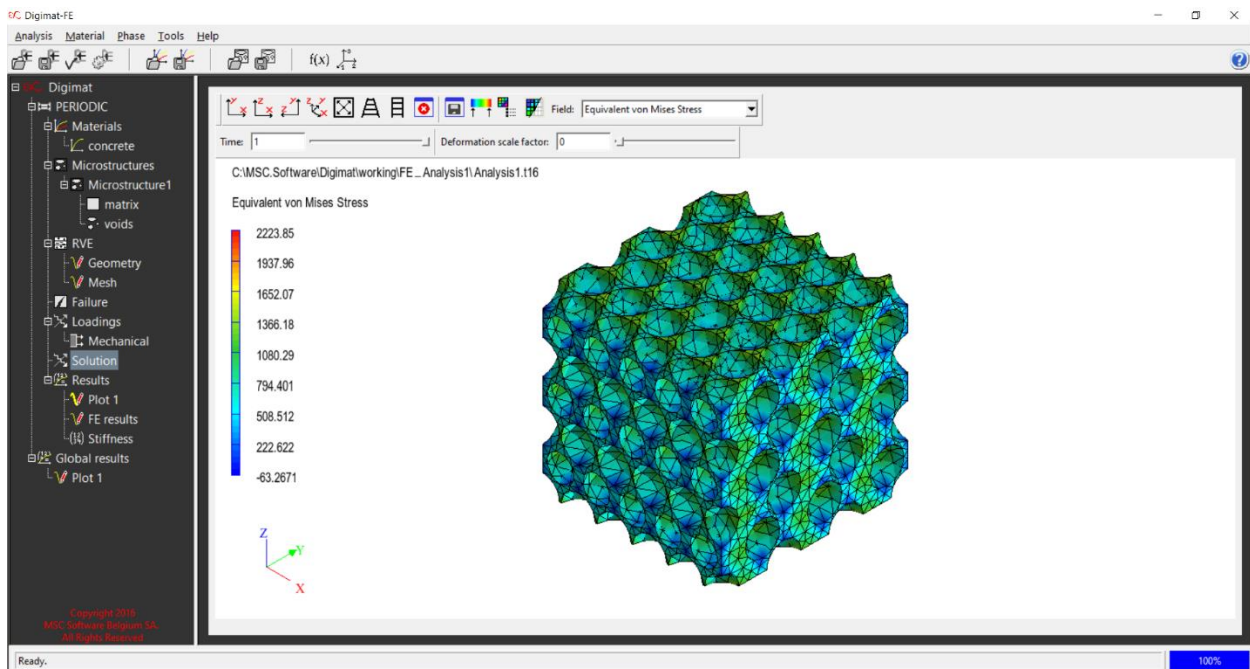
Εικόνα 75: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



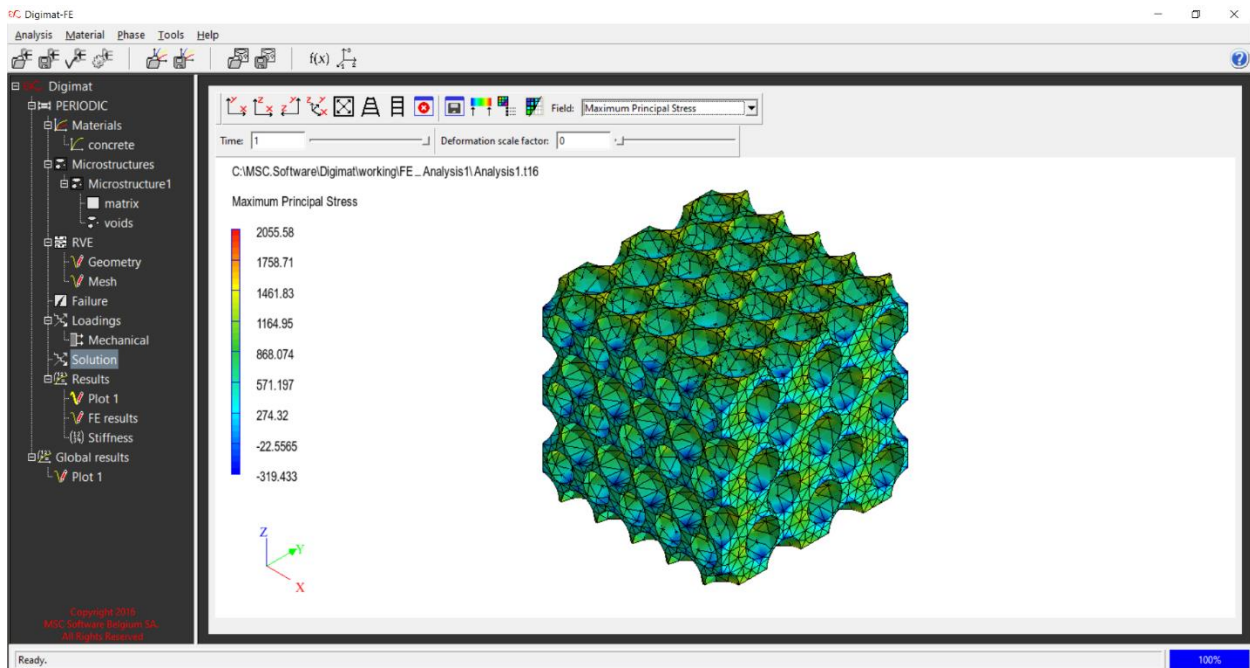
Εικόνα 76: Εκτίμηση ελάχιστη τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



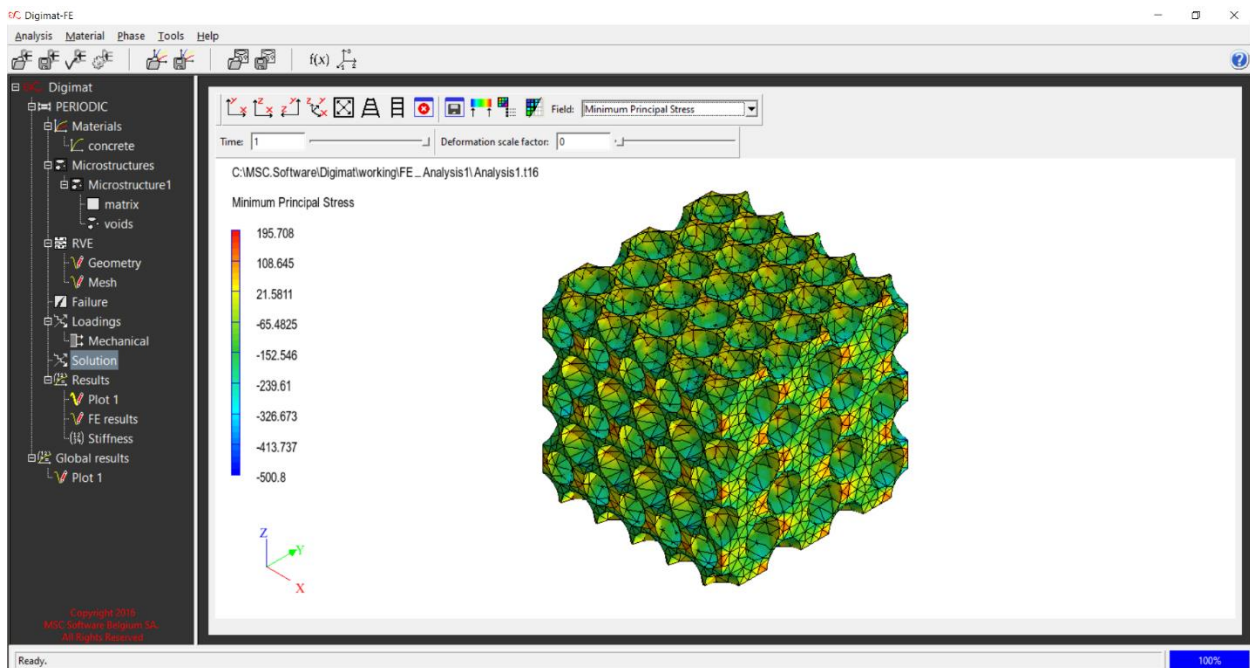
Εικόνα 77: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



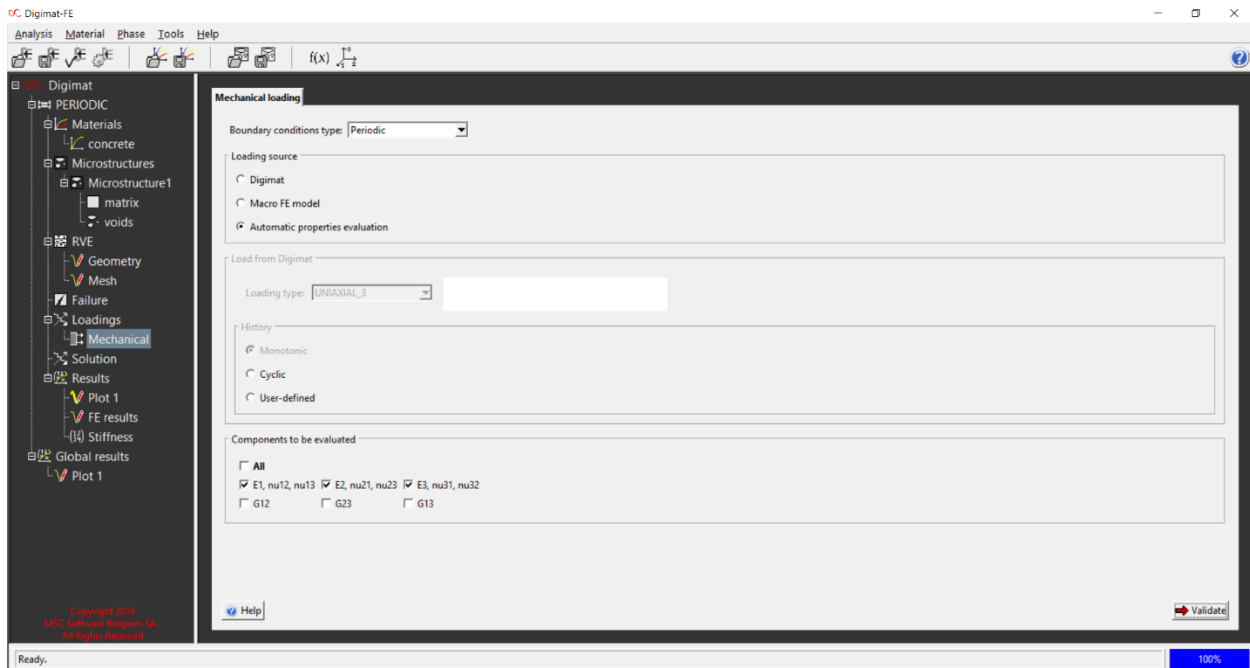
Εικόνα 78: Εκτίμηση τάσης Von Mises για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



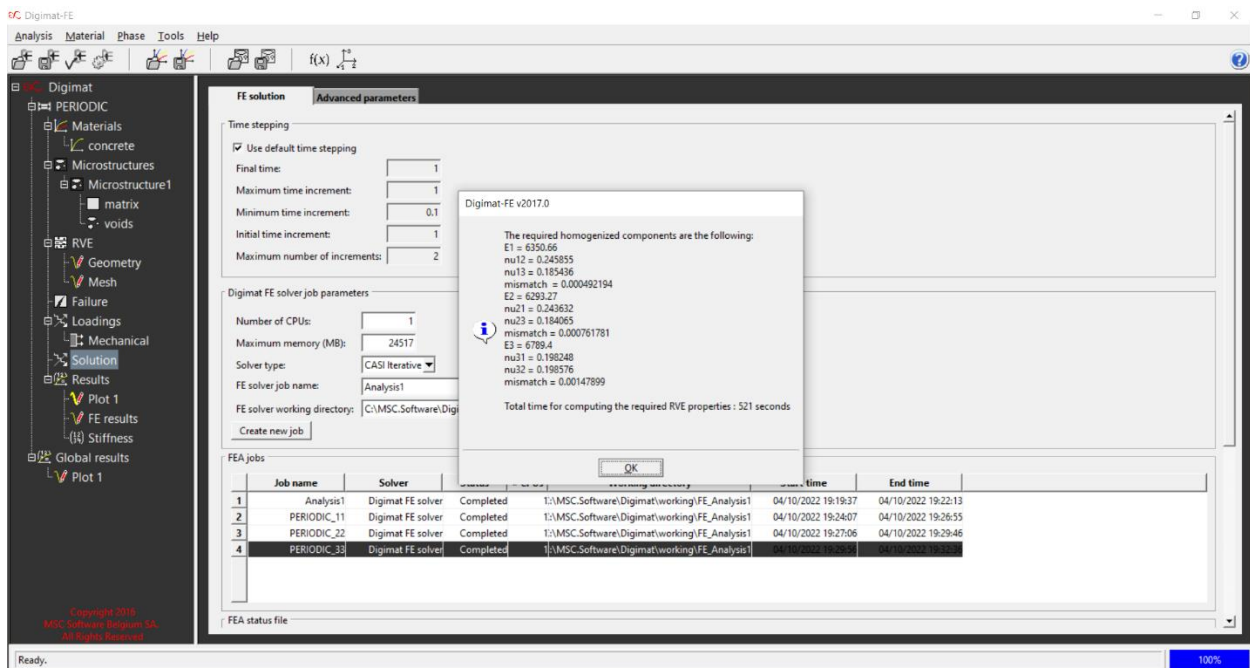
Εικόνα 79: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 80: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για καμπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 81: Ορισμός για εύρεση μετρων ελαστικότητας. (Digimat)



Εικόνα 82: Αποτελέσματα μετρων ελαστικότητας. (Digimat)

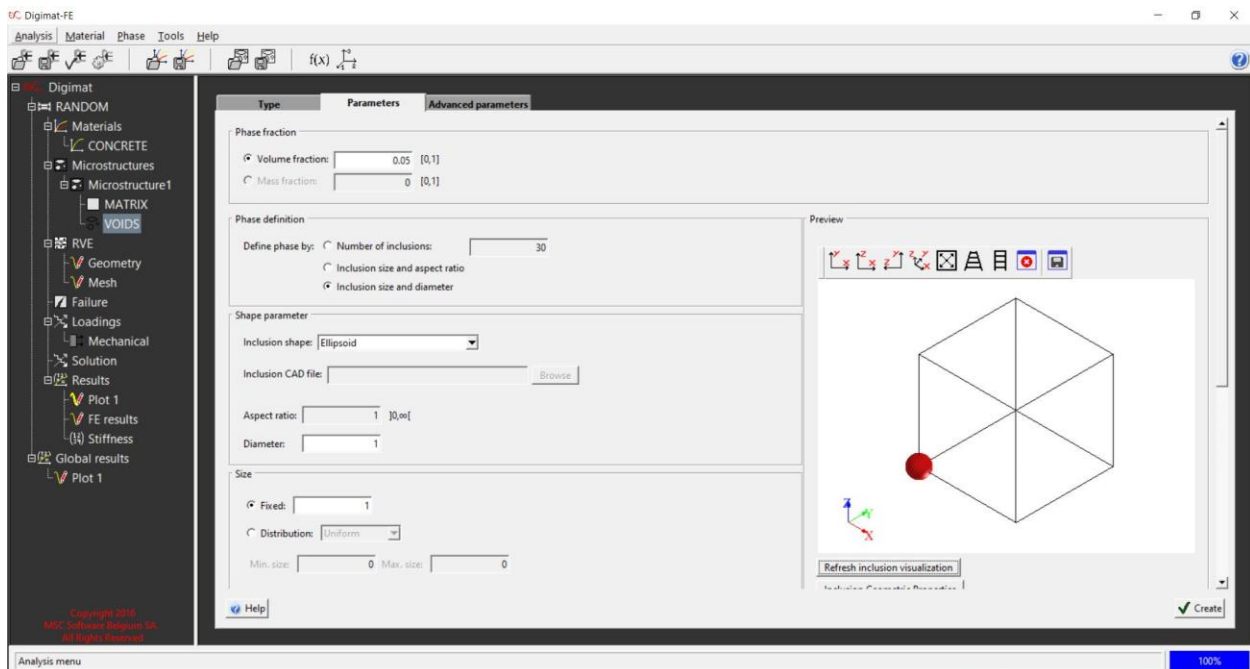
3.4 Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων

Οι τελευταίες επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν για το μοντέλο με τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, χωρίς την αλληλοδιείσδυση των σφαιριδίων. Στην προκείμενη διενεργήθηκαν αρκετές προσεγγίσεις για διαφορετικές περιεκτικότητες σφαιριδίων. Πιο συγκεκριμένα οι περιεκτικότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 5%, 15%, 20% και 30% και η κάθε μια επαναλήφθηκε τρεις φορές.

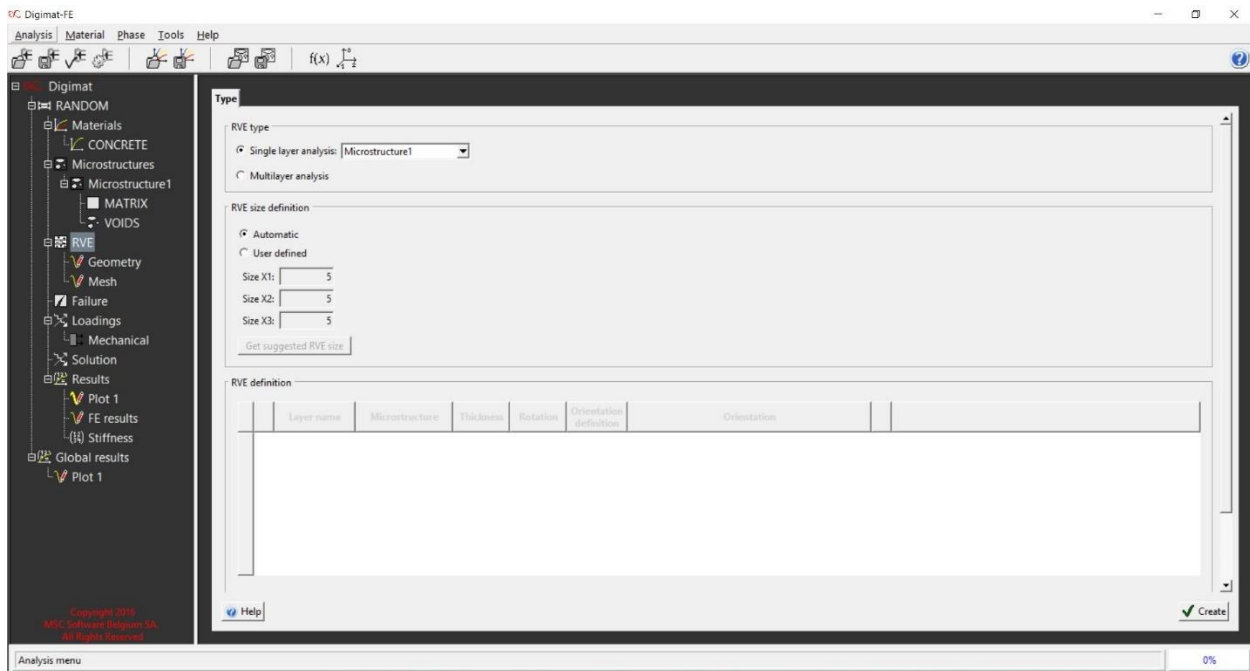
Η ανάλυση και η επίλυση υλοποιήθηκε με όμοιο τρόπο με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, μέσω του εμπορικού προγράμματος Digimat-FE. Ακολουθώς αναλύεται η προσπάθεια εκτίμησης που αφορά τη μία από τις τέσσερις περιεκτικότητες. Από τις απεικονίσεις που επισυνάπτονται παρακάτω παραλείπονται τα αρχικά στάδια της μεθοδολογίας λόγω του ότι έχουν ήδη απεικονηθεί και παραμένουν ίδια για όλες τις περιπτώσεις.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα καθώς και όλα τα αποτελέσματα καταγράφηκαν σε πίνακες (αναλυτικά στο Παράρτημα Γ).

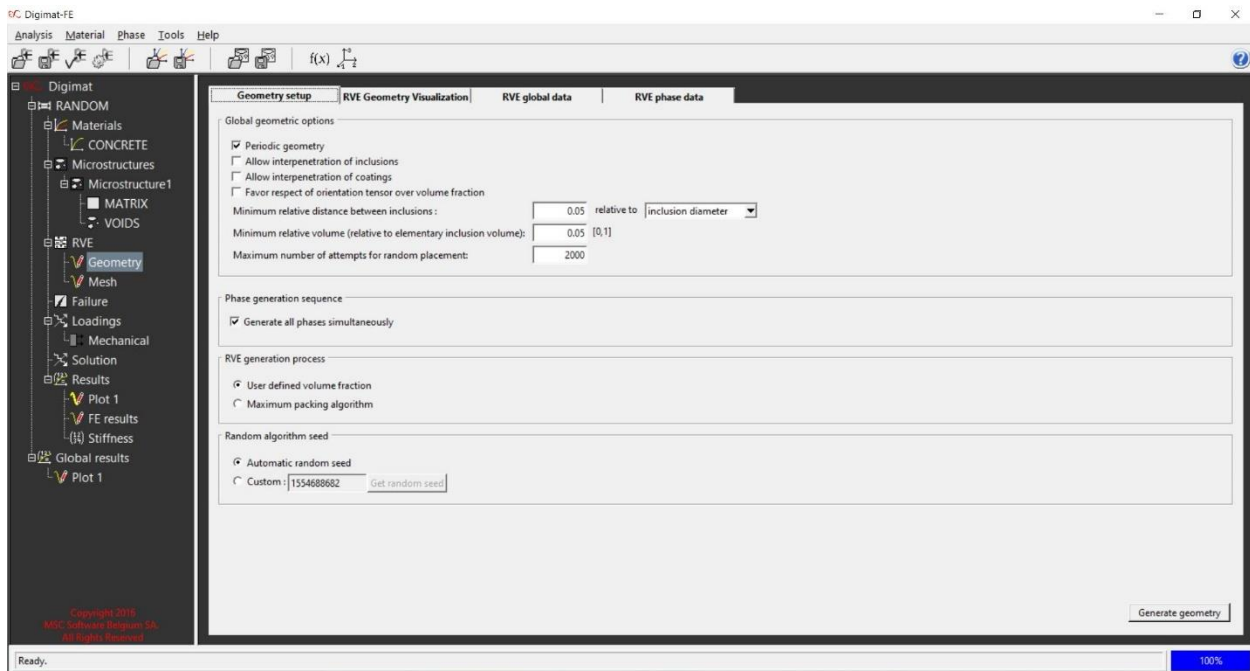
Διάμετρος σφαιριδίων d	1 mm
Μέγεθος RVE	5x5x5 mm



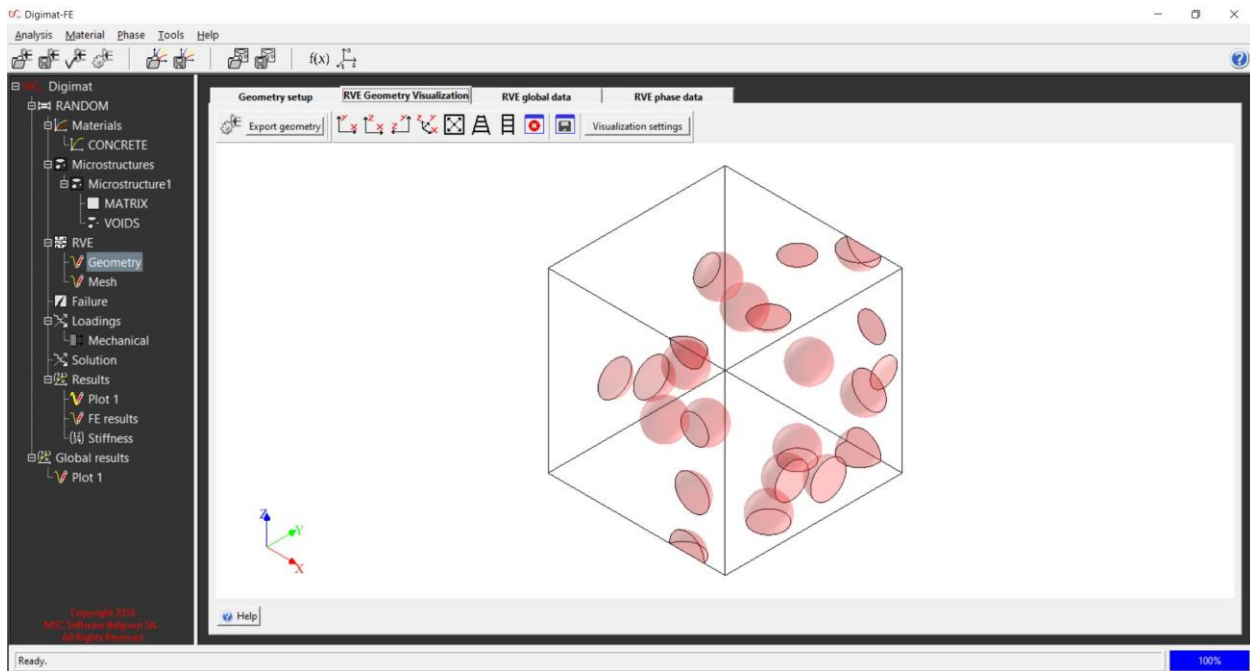
Εικόνα 83: Ορισμός περιεκτικότητας σφαιριδίων. (Digimat)



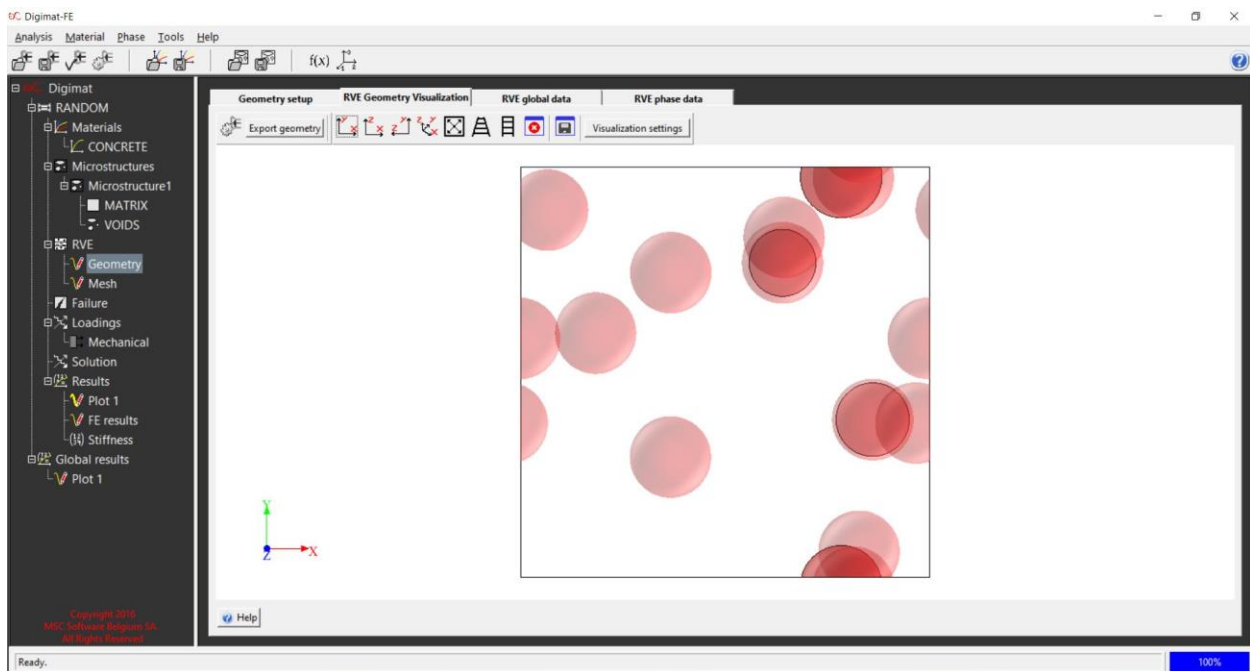
Εικόνα 84: Διαστάσεις RVE. (Digimat)



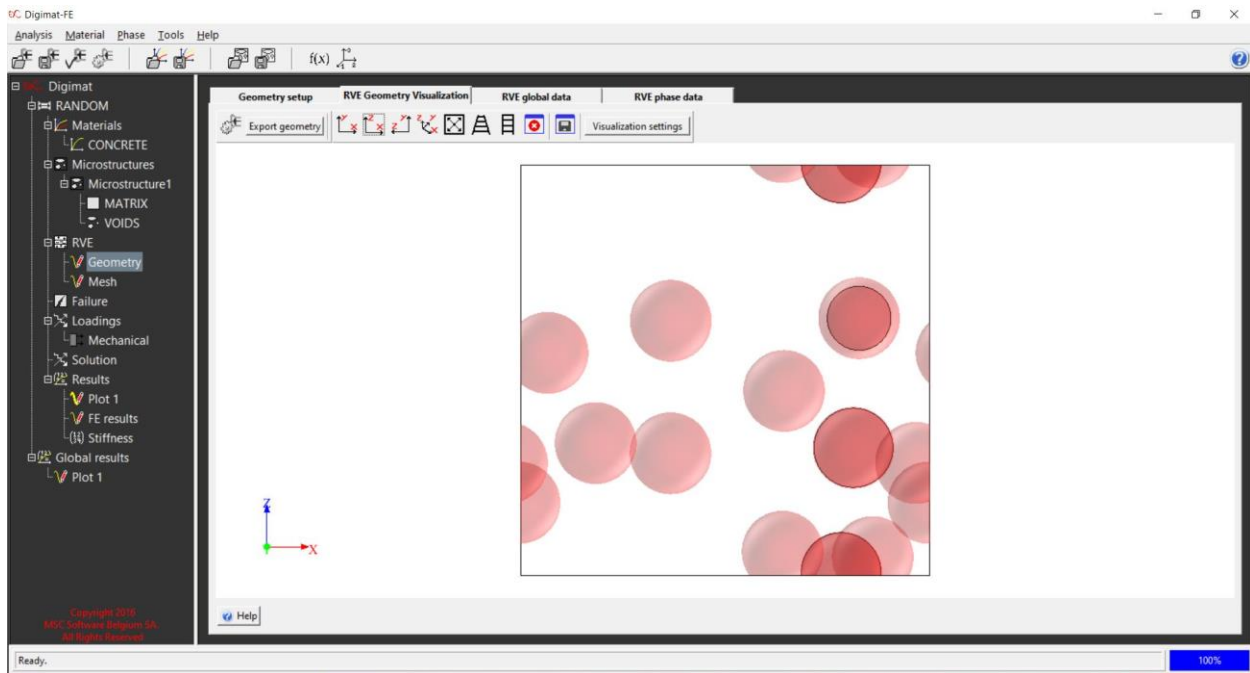
Εικόνα 85: Εξαγωγή γεωμετρίας RVE. (Digimat)



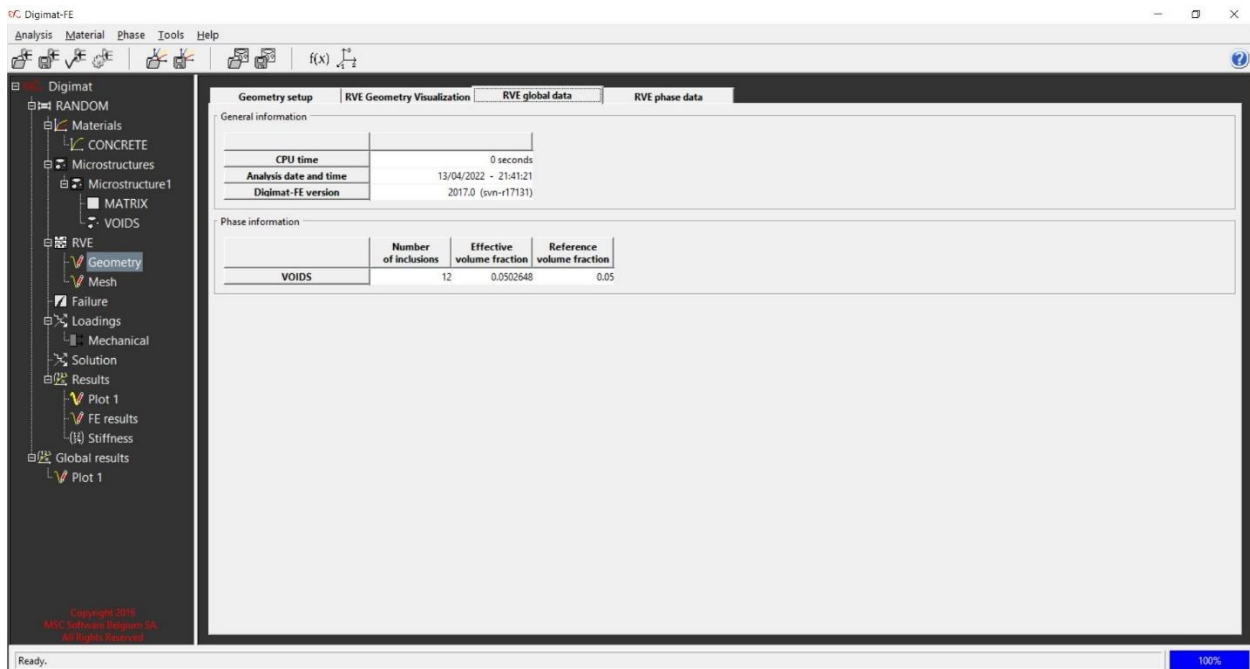
Εικόνα 86: Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane y-x). (Digimat)



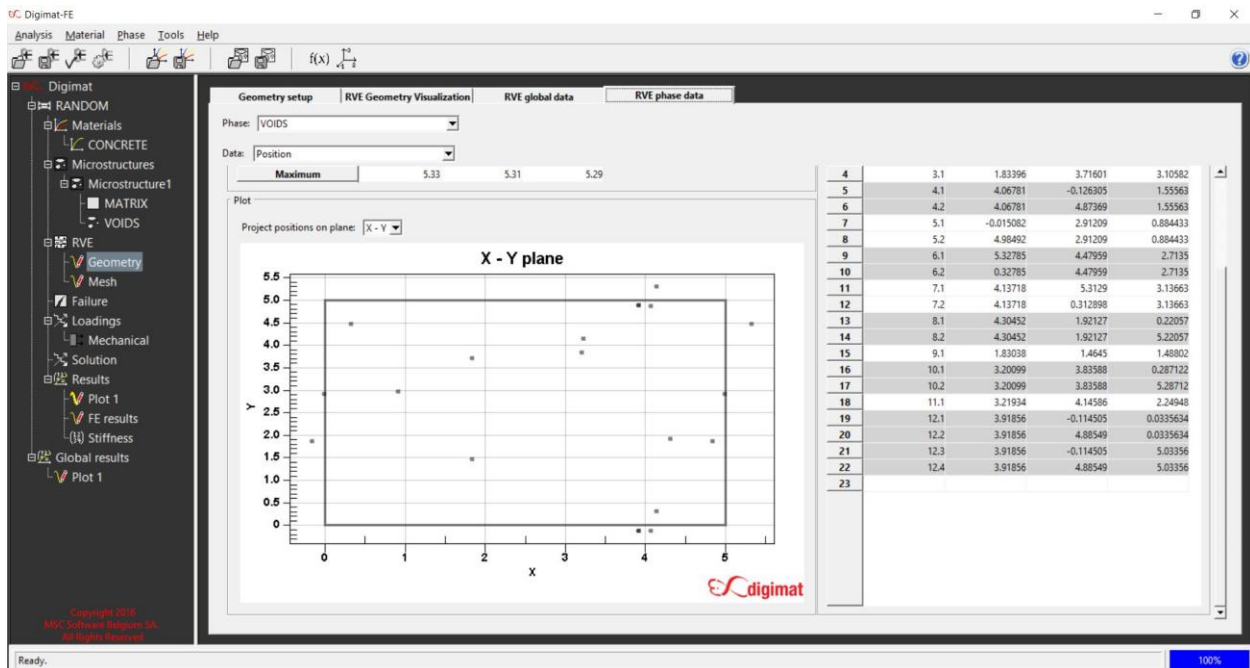
Εικόνα 87: Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane y-x). (Digimat)



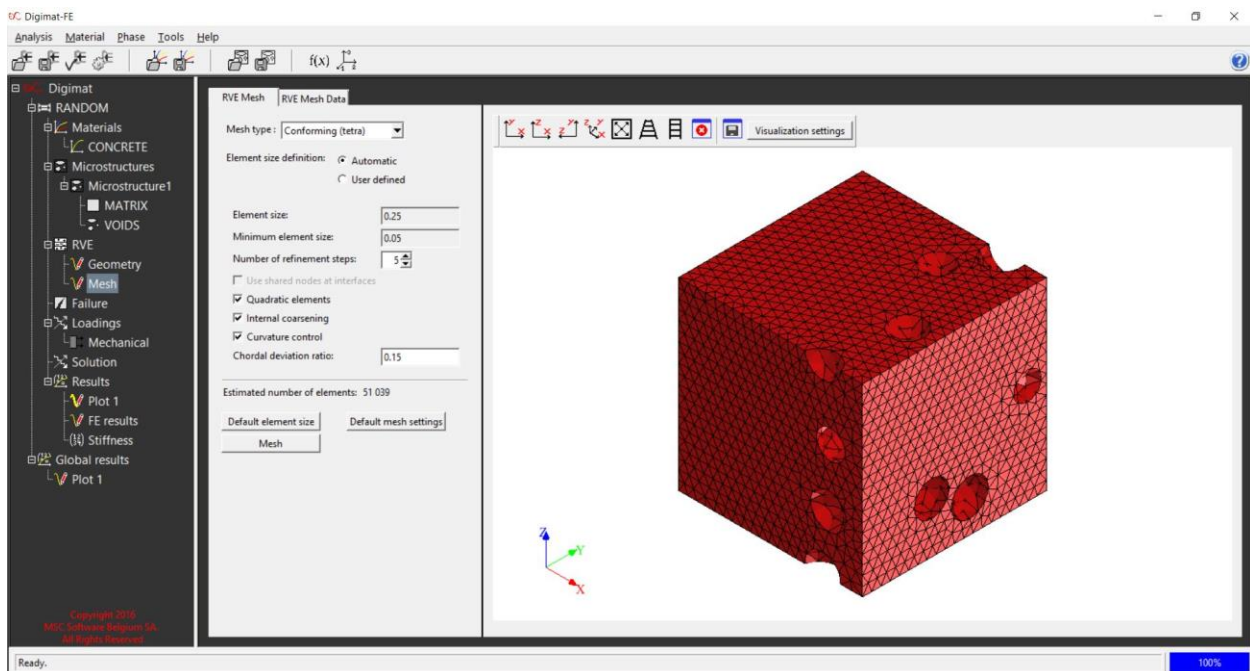
Εικόνα 88: Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-x). (Digimat)



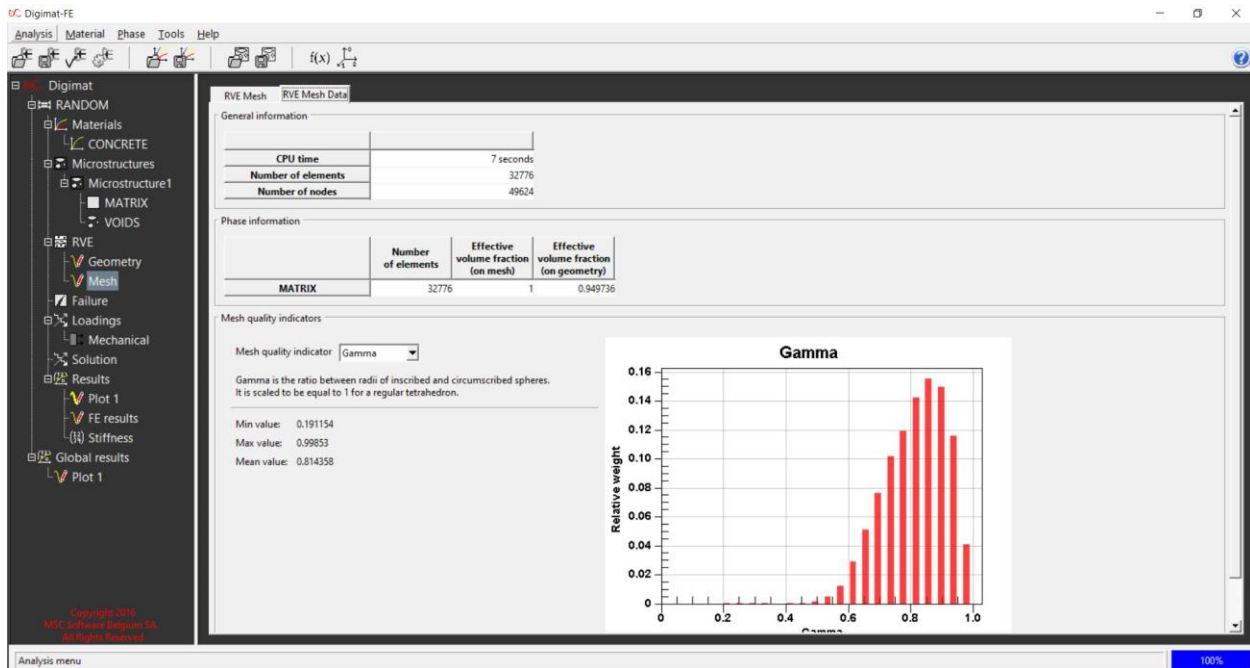
Εικόνα 89: Απεικόνιση περιεκτικότητας. (Digimat)



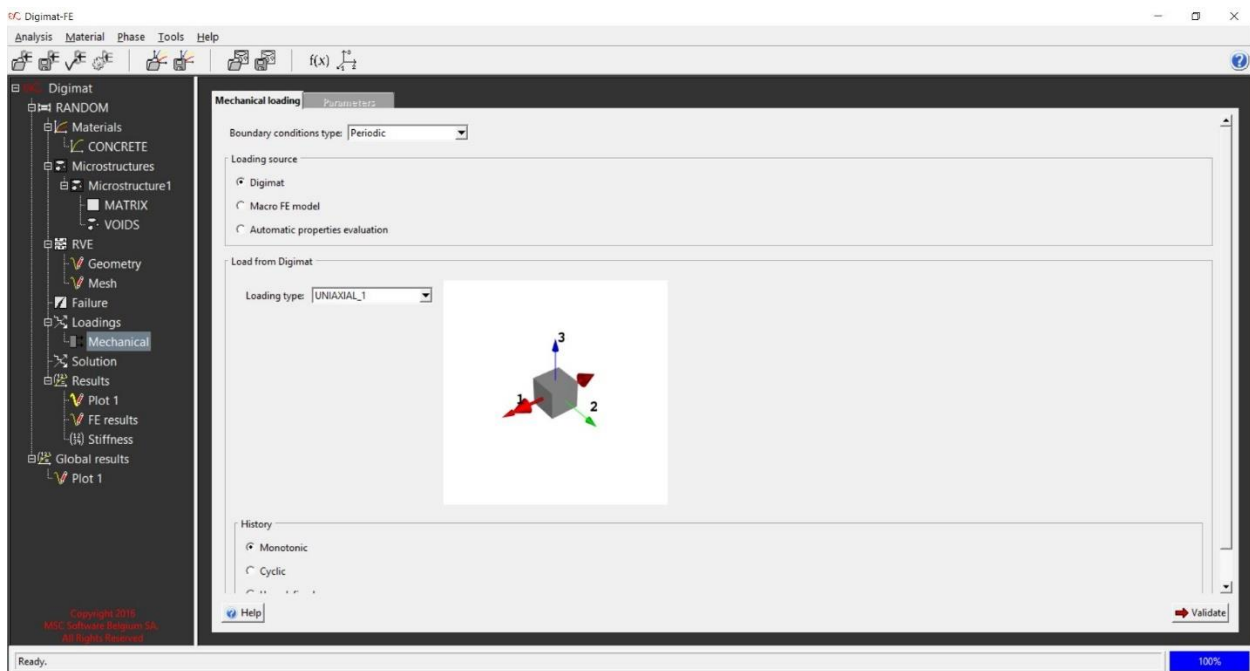
Εικόνα 90: Απεικόνιση δεδομένων της γεωμετρίας. (Digimat)



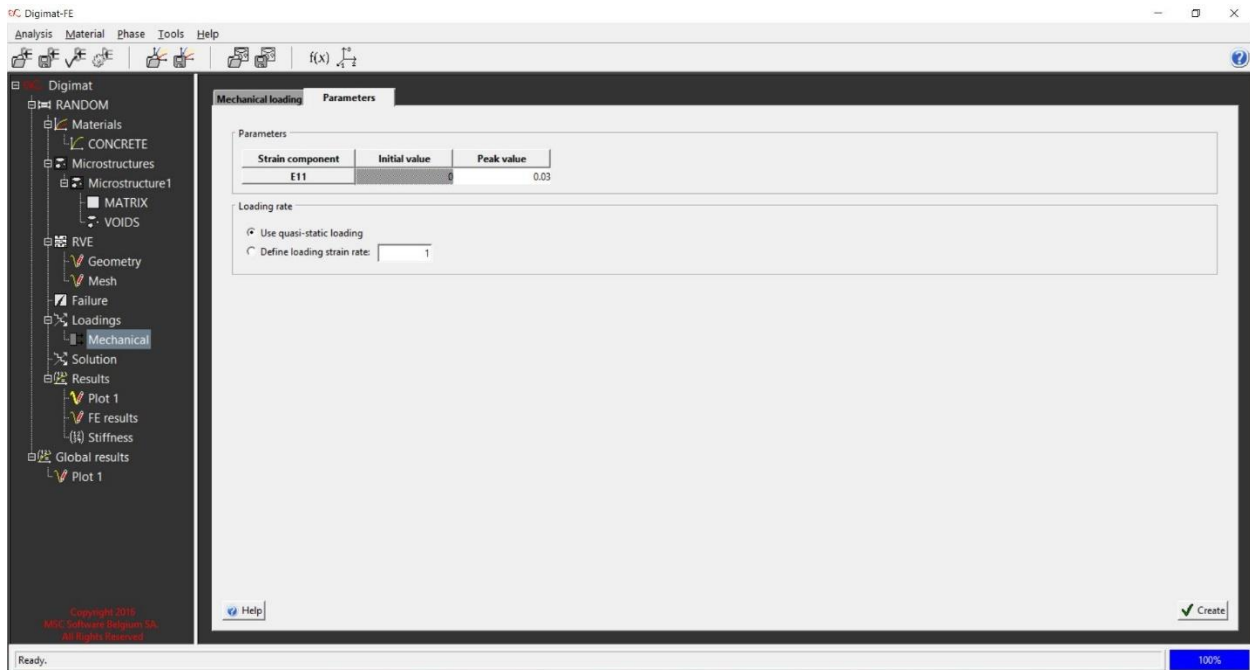
Εικόνα 91: Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE. (Digimat)



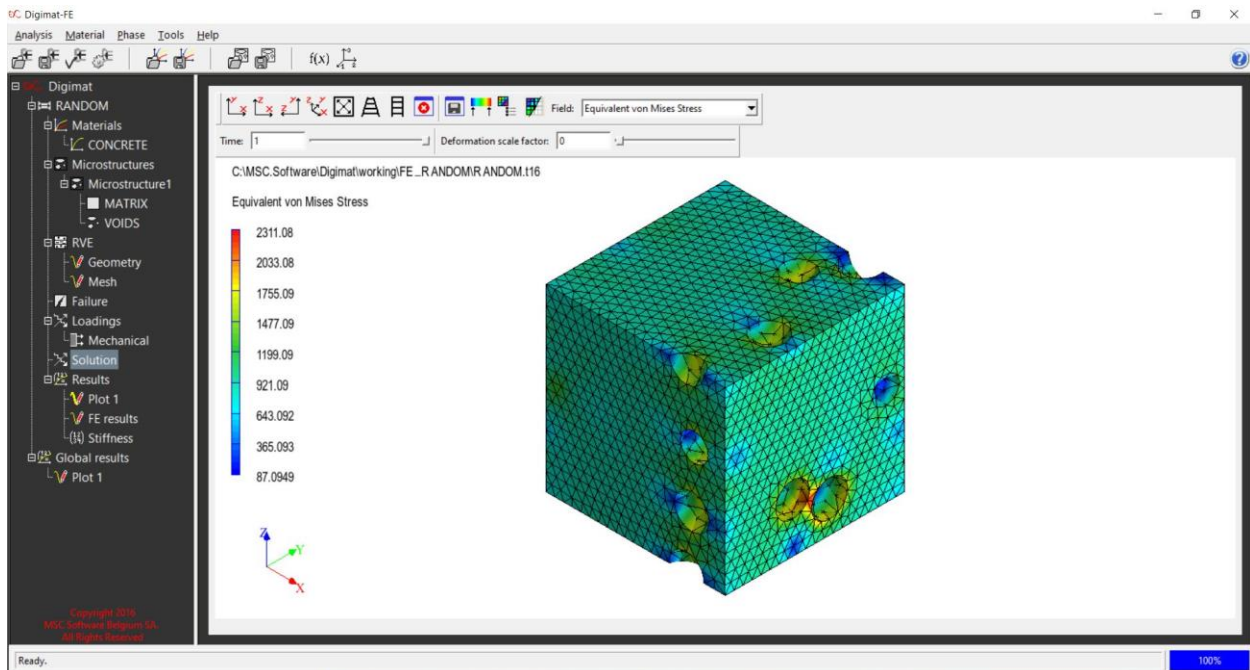
Εικόνα 92: Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης. (Digimat)



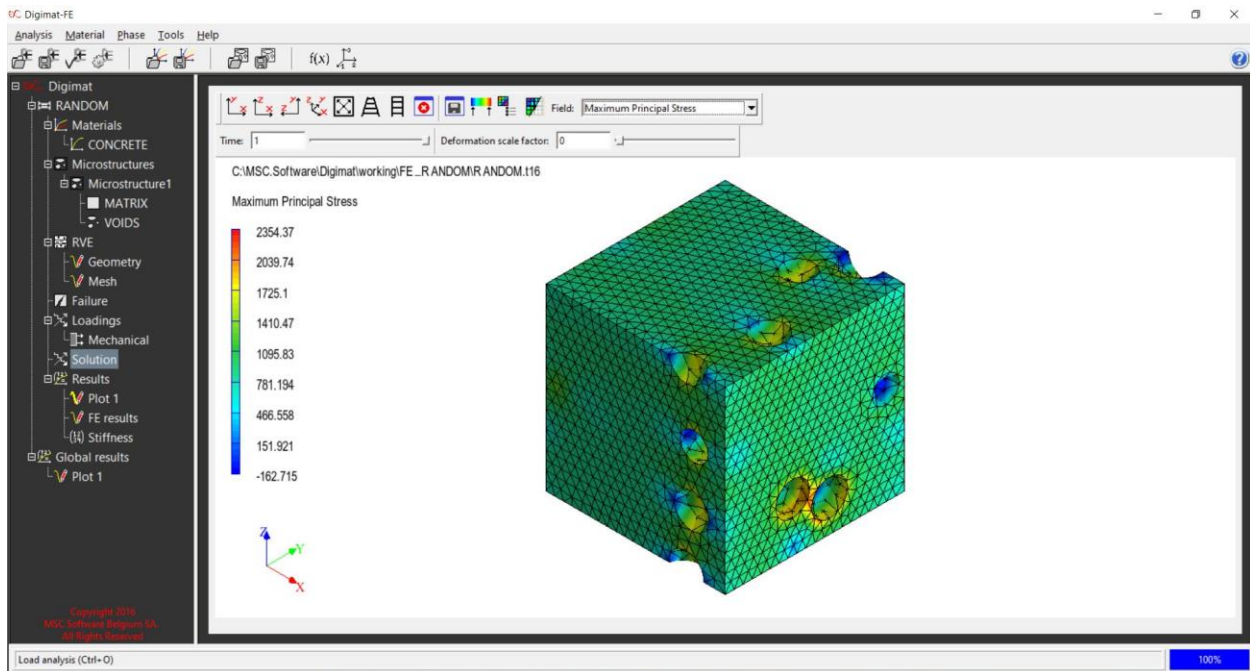
Εικόνα 93: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



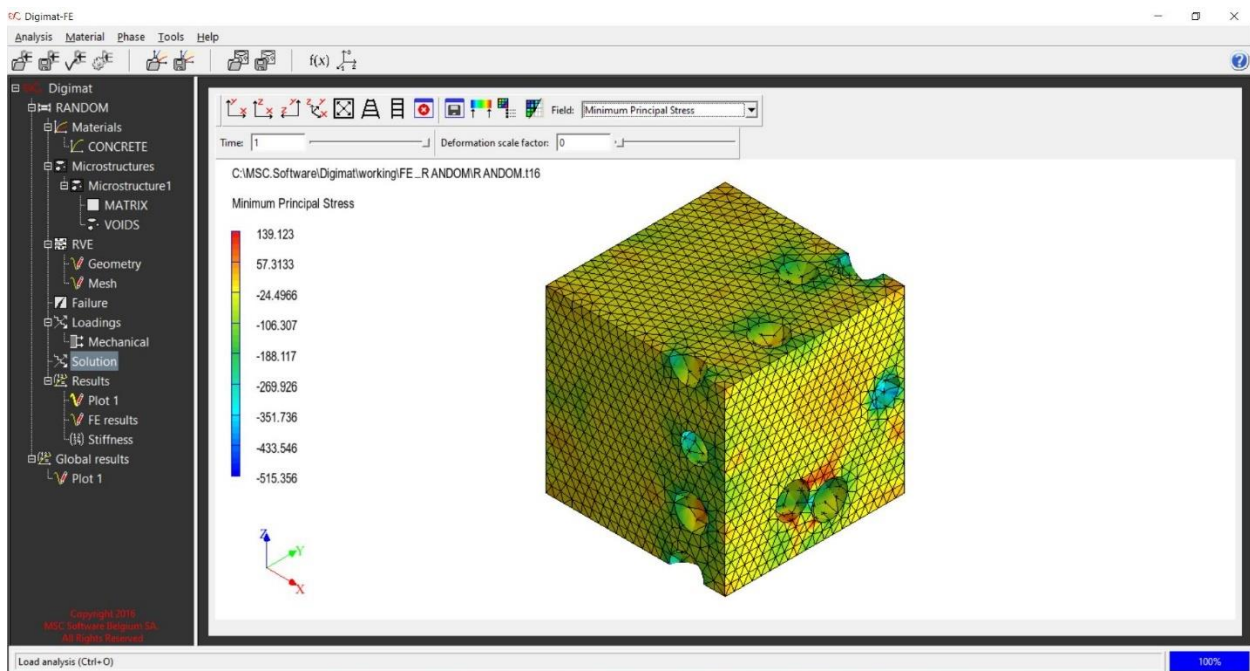
Εικόνα 94: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



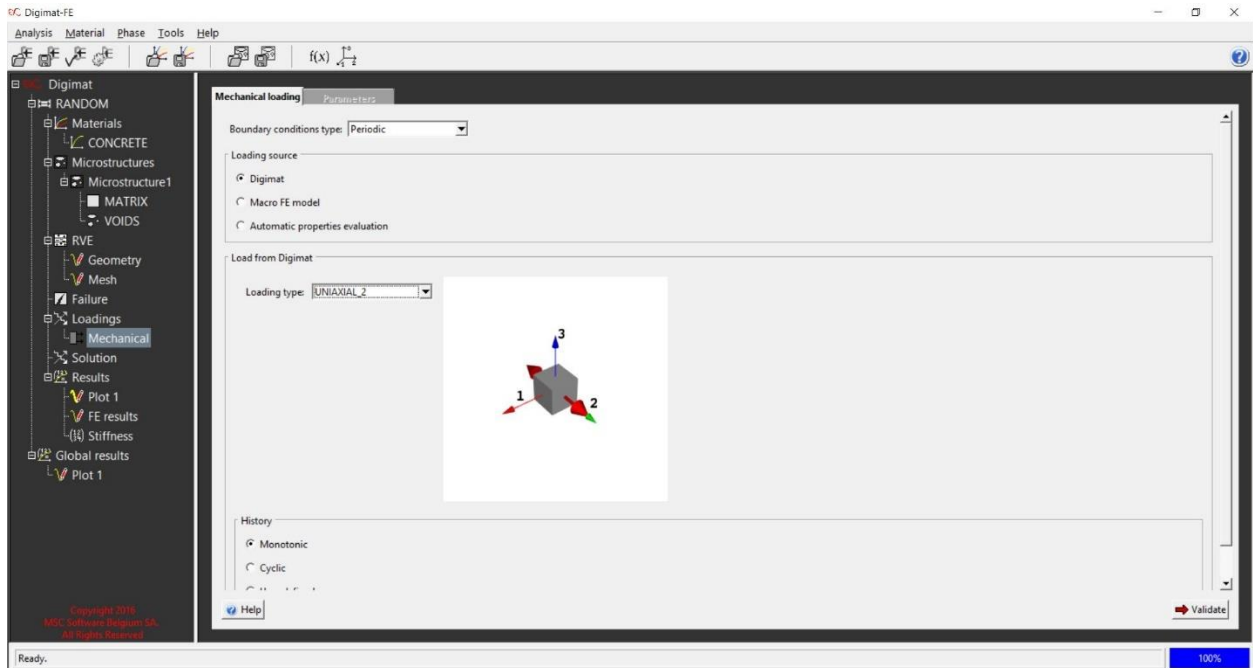
Εικόνα 95: Εκτίμηση τάσης Von Mises για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



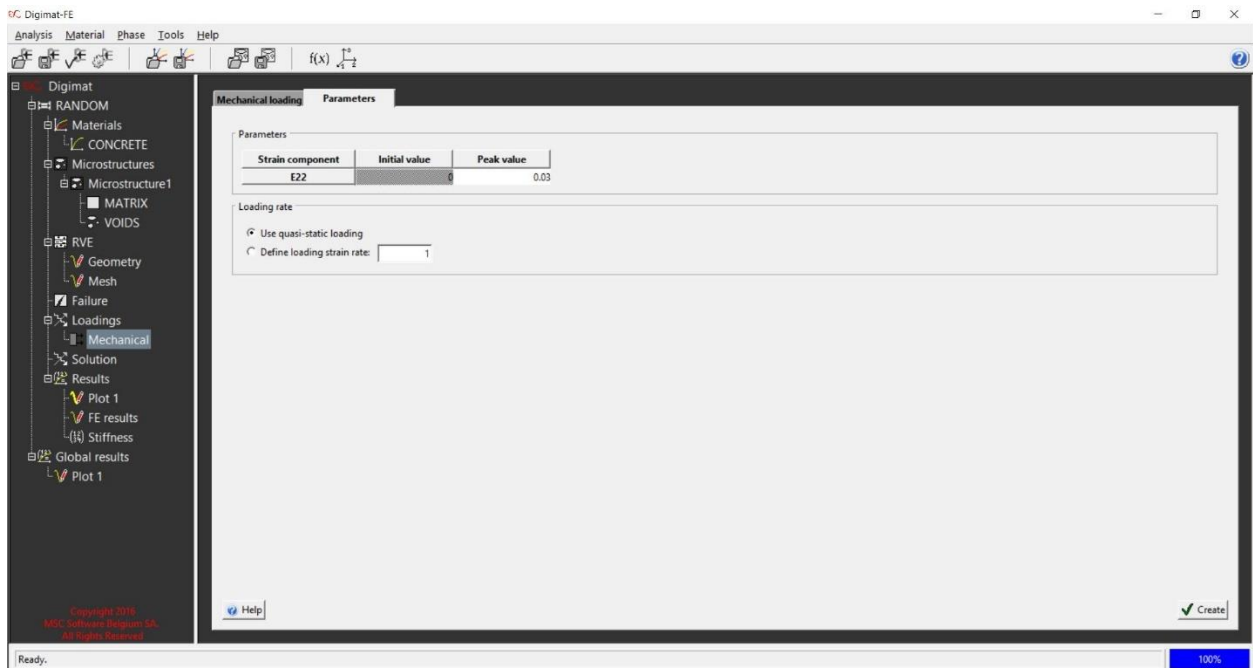
Εικόνα 96: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



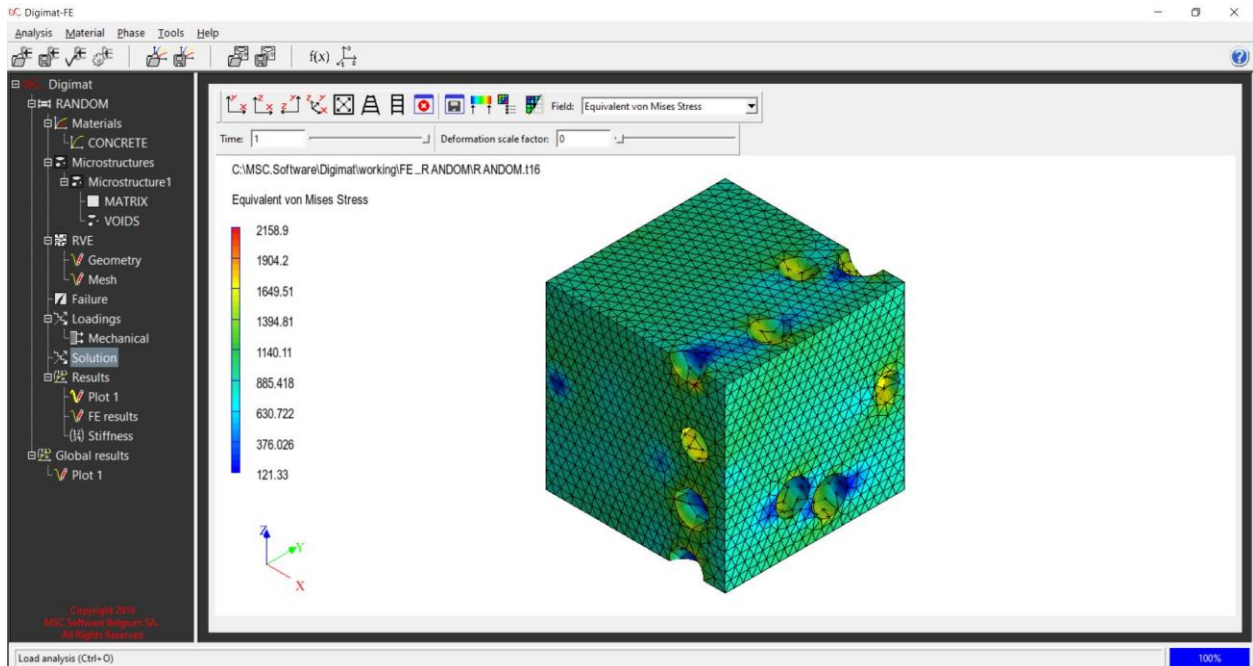
Εικόνα 97: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για εφελκιστική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



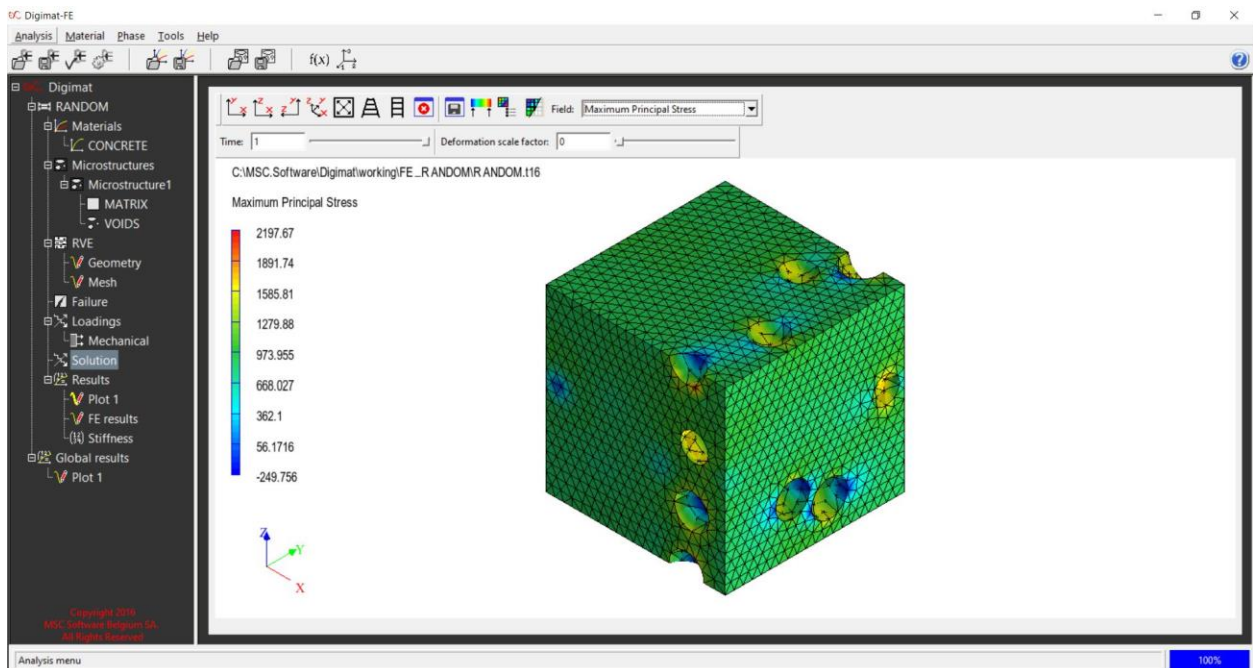
Εικόνα 98: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



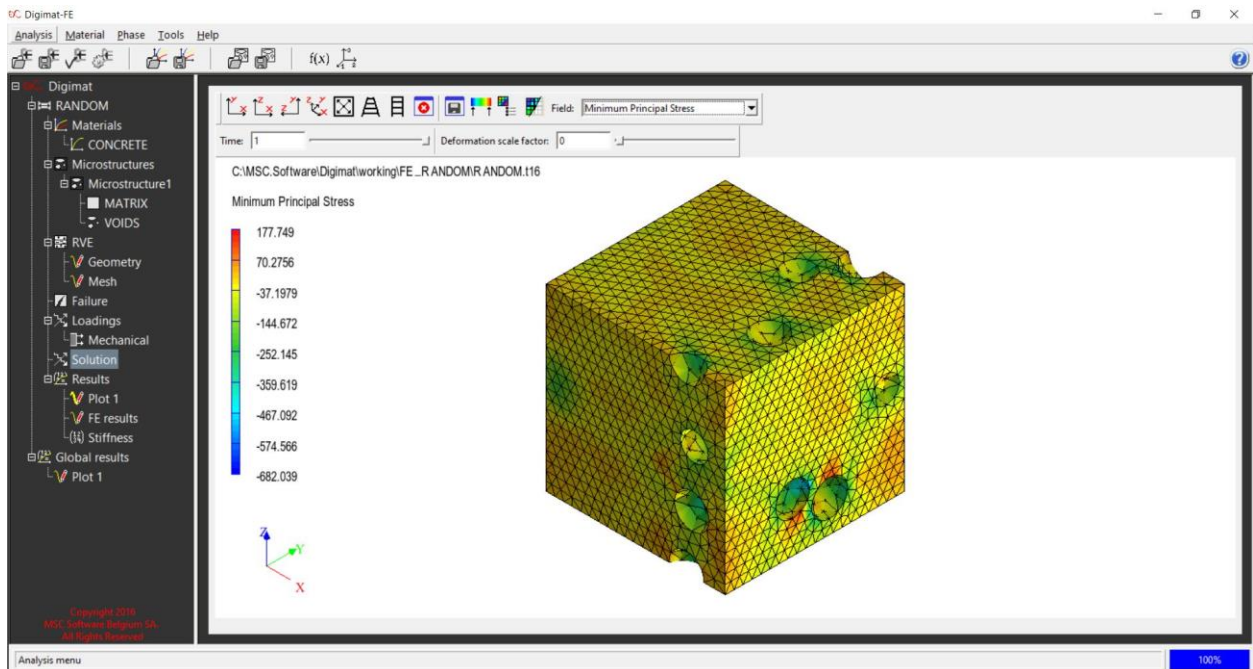
Εικόνα 99: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



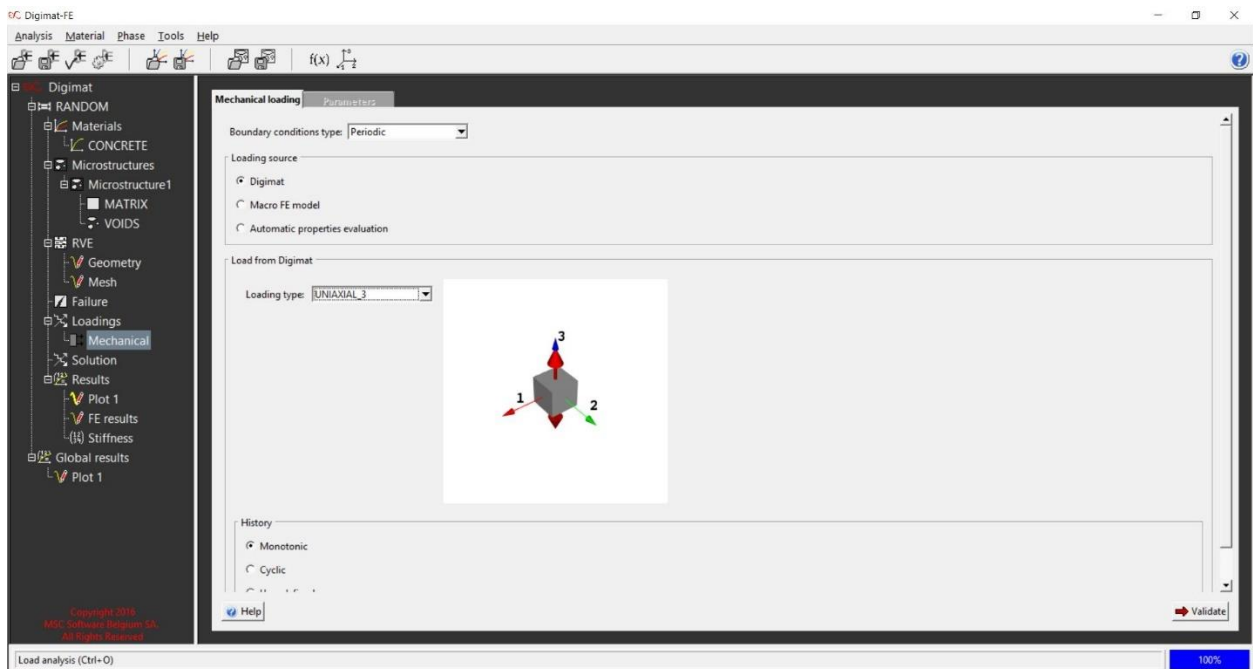
Εικόνα 100: Εκτίμηση τάσης Von Mises για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



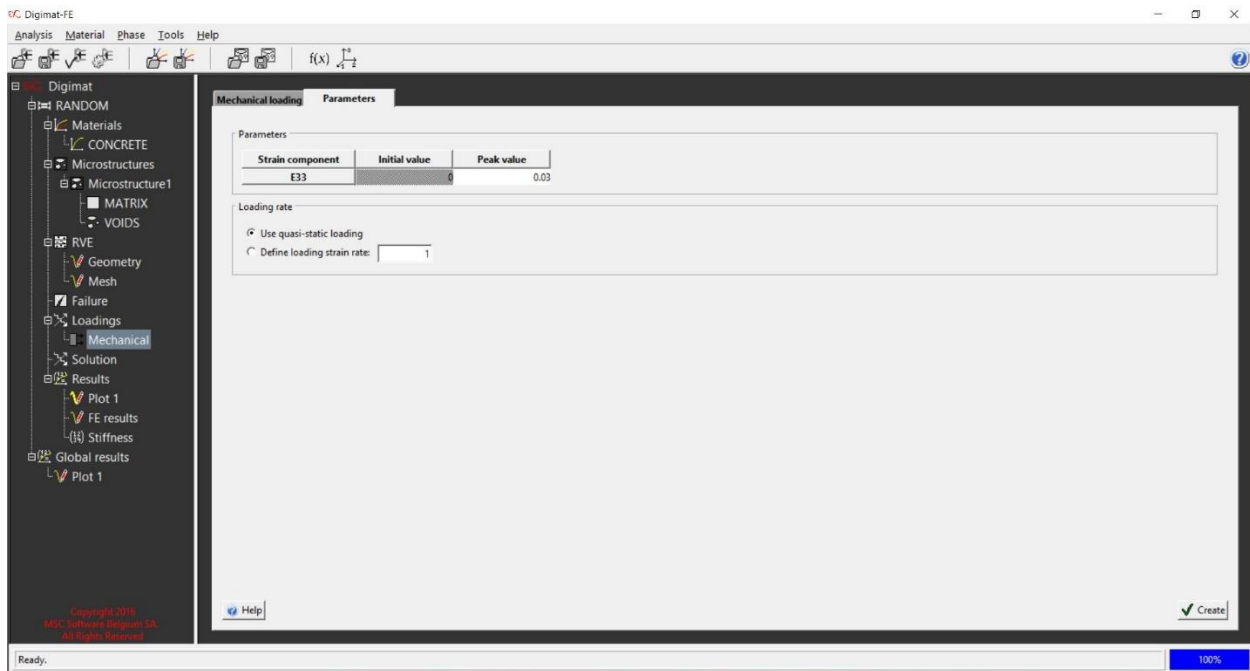
Εικόνα 101: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



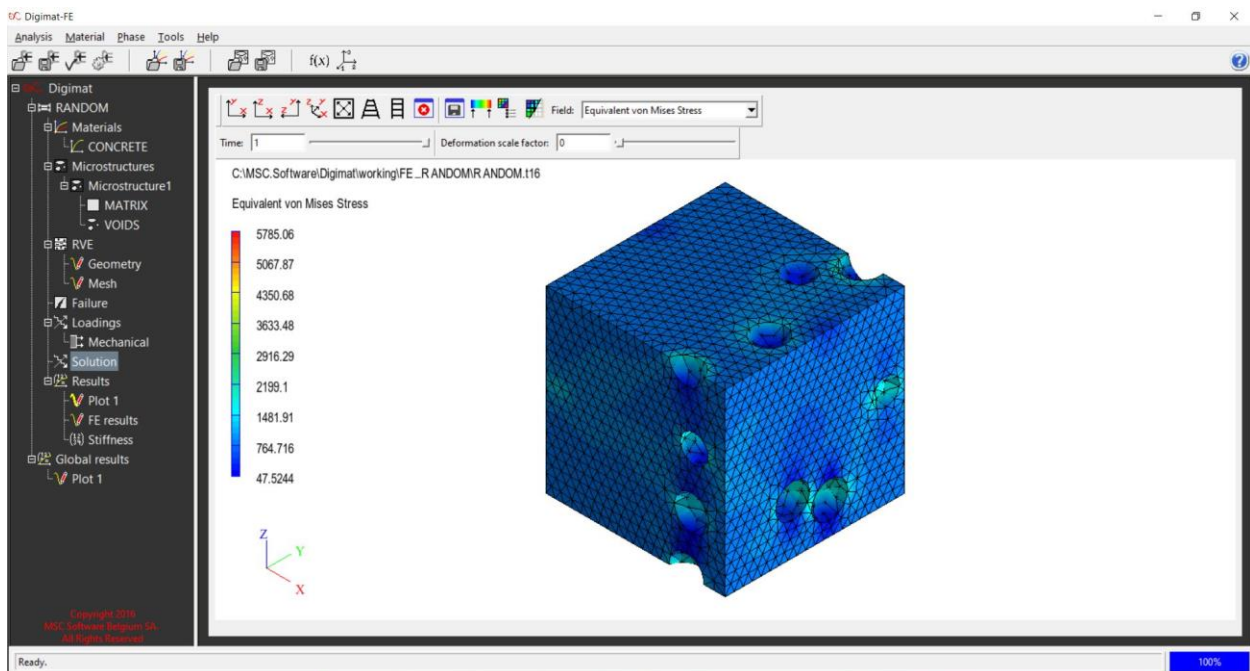
Εικόνα 102: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για θλιπτική καταπόνηση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



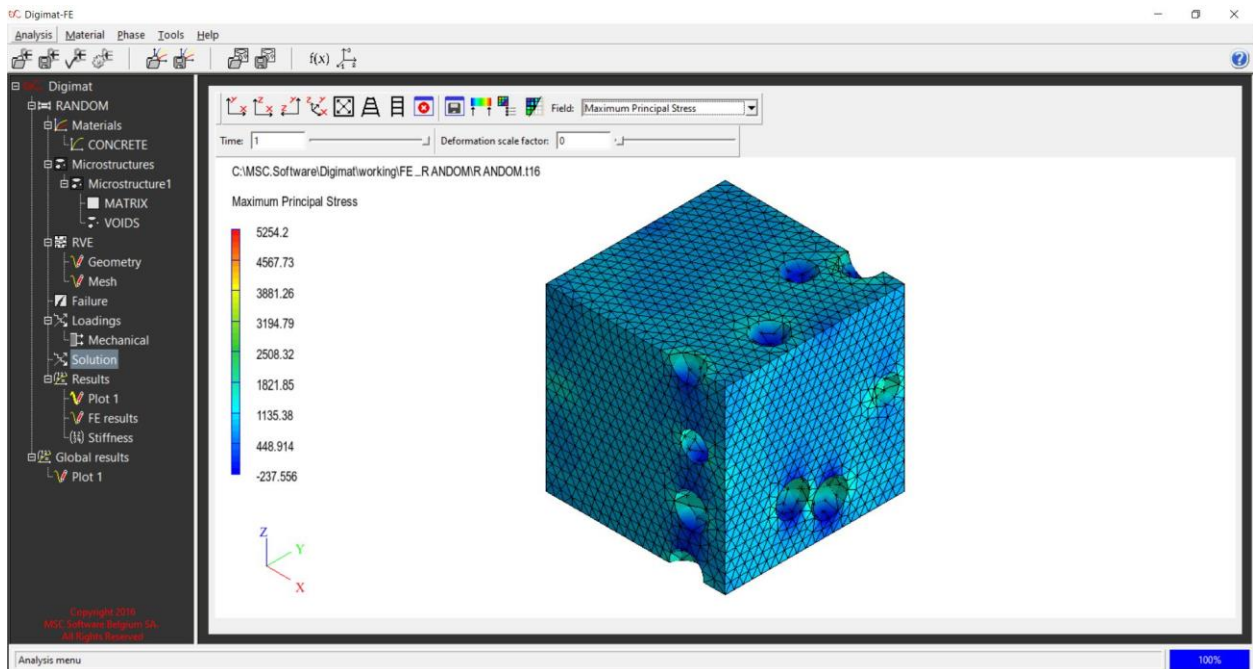
Εικόνα 103: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



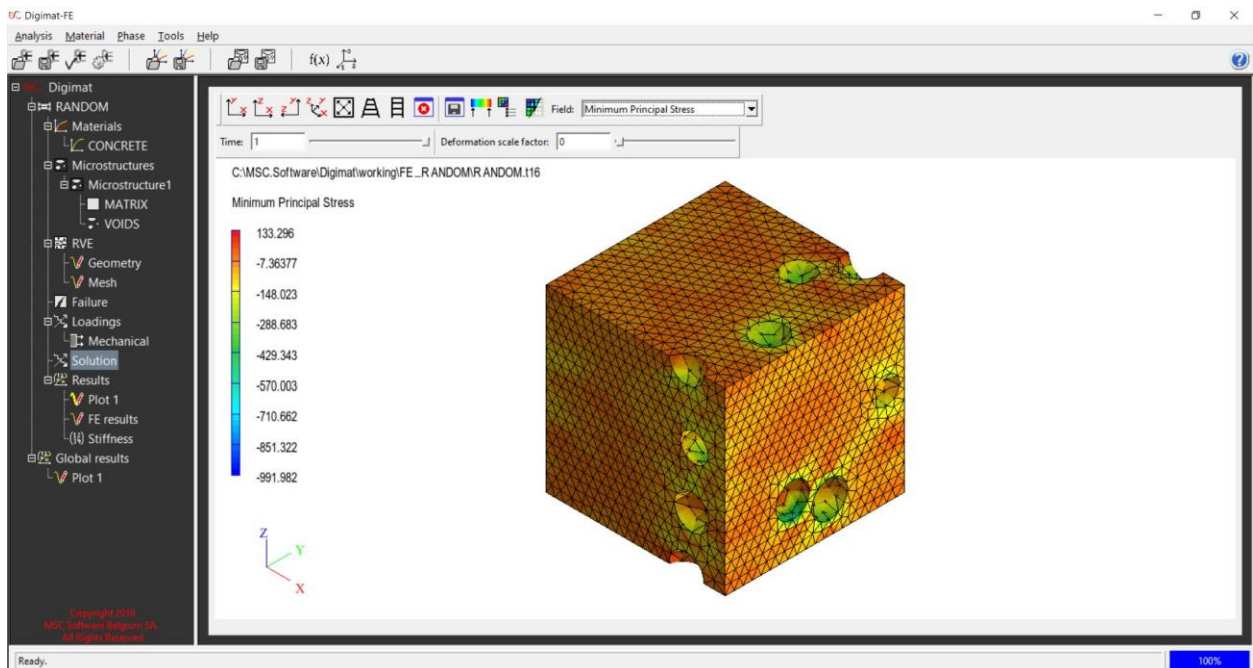
Εικόνα 104: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



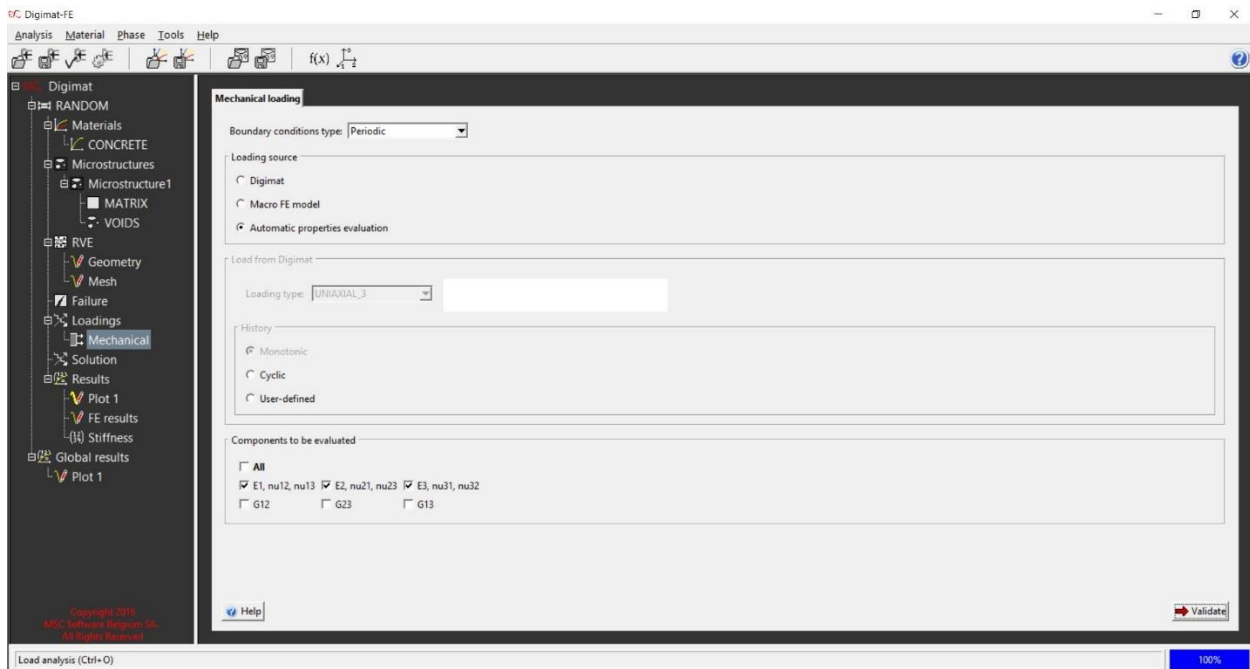
Εικόνα 105: Εκτίμηση τάσης Von Mises για καμπτική παραμόρφωση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



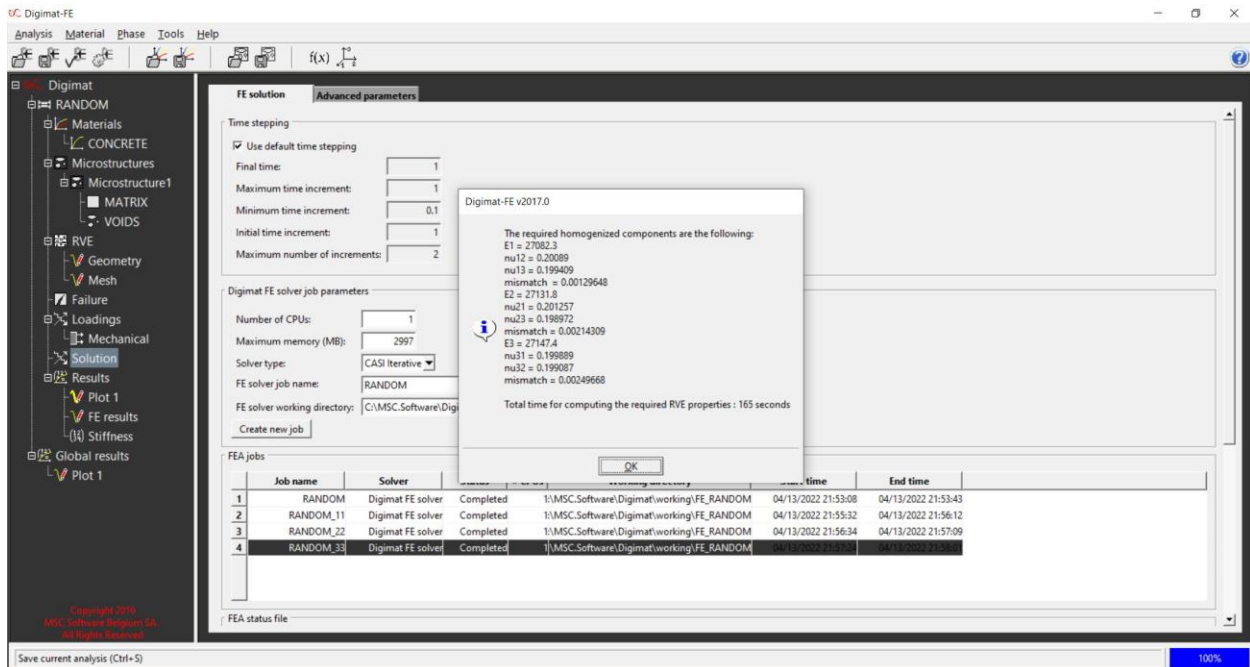
Εικόνα 106: Εκτίμηση μέγιστης τάσης για καμπτική παραμόρφωση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 107: Εκτίμηση ελάχιστης τάσης για καμπτική παραμόρφωση, απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



Εικόνα 108: Ορισμός για εύρεση μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)



Εικόνα 109: Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)

4 Εκτιμήσεις Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων λ

4.1 Εκτίμηση Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων Λόγω Ύπαρξης Εγκλεισμάτων Αερογέλης

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται οι υπολογισμοί για τα τρία μοντέλα: το μοναδικό έγκλεισμα, η μέγιστη κατόγκο περιεκτικότητα εγκλεισμάτων και η τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων με σκοπό την εκτίμηση των συγκεντρώσεων τάσεων λόγω των υφιστάμενων εγκλεισμάτων αερογέλης στη μικροδομή του τσιμέντου. Οι εκτιμήσεις που υπολογίστηκαν είναι για τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Σύμφωνα με τον συντελεστή που πολλαπλασιάζονται τοπικά οι τάσεις (συγκέντρωση τάσεων) θεωρούμε ότι υποπολλαπλασιάζεται (υποβαθμίζεται) η αντοχή του υλικού.

Ο συντελεστής συντέντρωσης τάσεων λ υπολογίστηκε με βάση τον τύπο $\lambda = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$, όπου σ_{max} η μέγιστη τάση κάθε καταπόνησης (εφελκιστική, θλιπτική, καμπτική) και όπου $\sigma = E \cdot \epsilon$ αντίστοιχα.

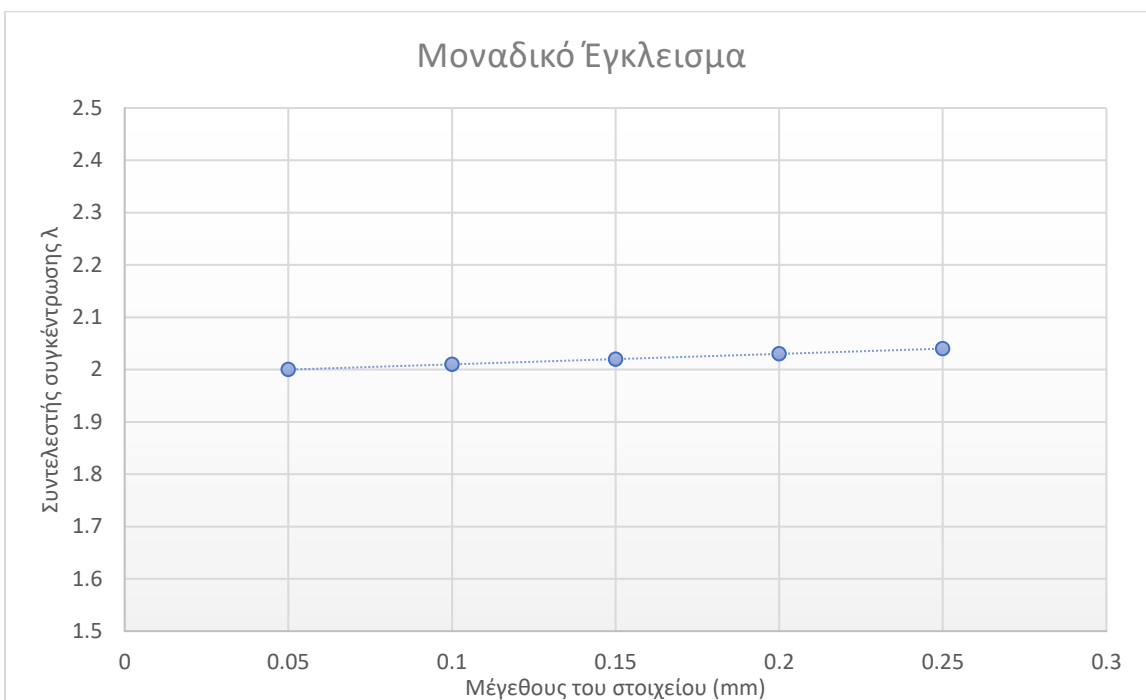
4.2 Εκτίμηση λ Για Μοναδικό Έγκλεισμα

Οι εκτιμήσεις του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων λ, λόγω των εγκλεισμάτων αερογέλης αφορούν το μοντέλο με το μοναδικό έγκλεισμα στο κέντρο της μικροδομής του RVE. Η προσέγγιση των τάσεων και των μέτρων ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε με αριθμητική προσομοίωση ακριβώς όπως αναλύθηκε στο 2 Κεφάλαιο.

Ομοίως ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες προσεγγίσεις και υπολογισμούς τάσεων καθώς και μέτρων ελαστικότητας, για όλων των ειδών καταπονήσεων. Ο αριθμός των επαναλήψεων ήταν πέντε και οι τιμές του Element size ήταν οι εξής: 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25.

Έπειτα, υπολογίστηκε με μαθηματικές πράξεις ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λ, για όλες τις προσεγγίσεις (αναλυτικότερα στο Παράρτημα Α) και συγκεντρωτικά κατασκευάστηκε το αντίστοιχο διάγραμμα ως προς το Element size.

Διάγραμμα 1: Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λ συναρτήσει του μεγέθους του στοιχείου.

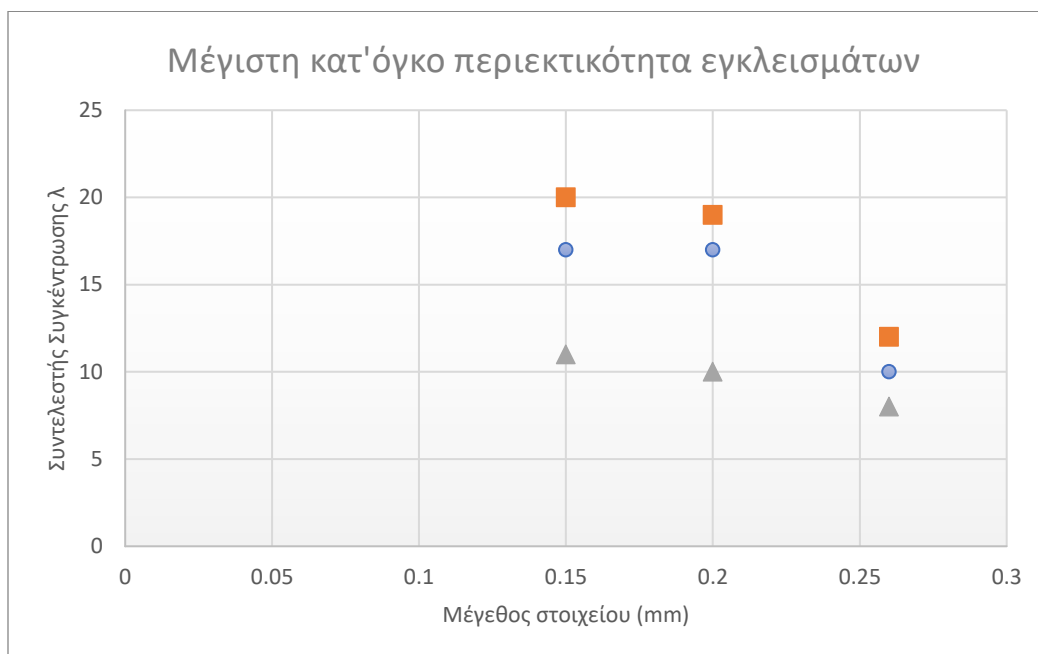


4.3 Εκτίμηση λ Για Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα Εγκλεισμάτων

Οι εκτιμήσεις του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων λ , λόγω των εγκλεισμάτων αερογέλης αφορούν το μοντέλο με μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα εγκλεισμάτων. Ο αριθμός των εγκλεισμάτων είναι 180, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες. Οι επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν τρεις και οι τιμές του Element size ήταν οι εξής: 0.15, 0.20, 0.26.

Έπειτα από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος Digimat, ακολούθησαν με τη χρήση μαθηματικών πράξεων υπολογισμοί των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων λ για όλες τις μετρήσεις και επαναλήψεις για την μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα. Συγκεντρωτικά κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα και για τις τρεις καταπονήσεις εφελκιστική, θλιπτική και καμπτική.

Διάγραμμα 2: Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λ συναρτήσει του μεγέθους του στοιχείου.

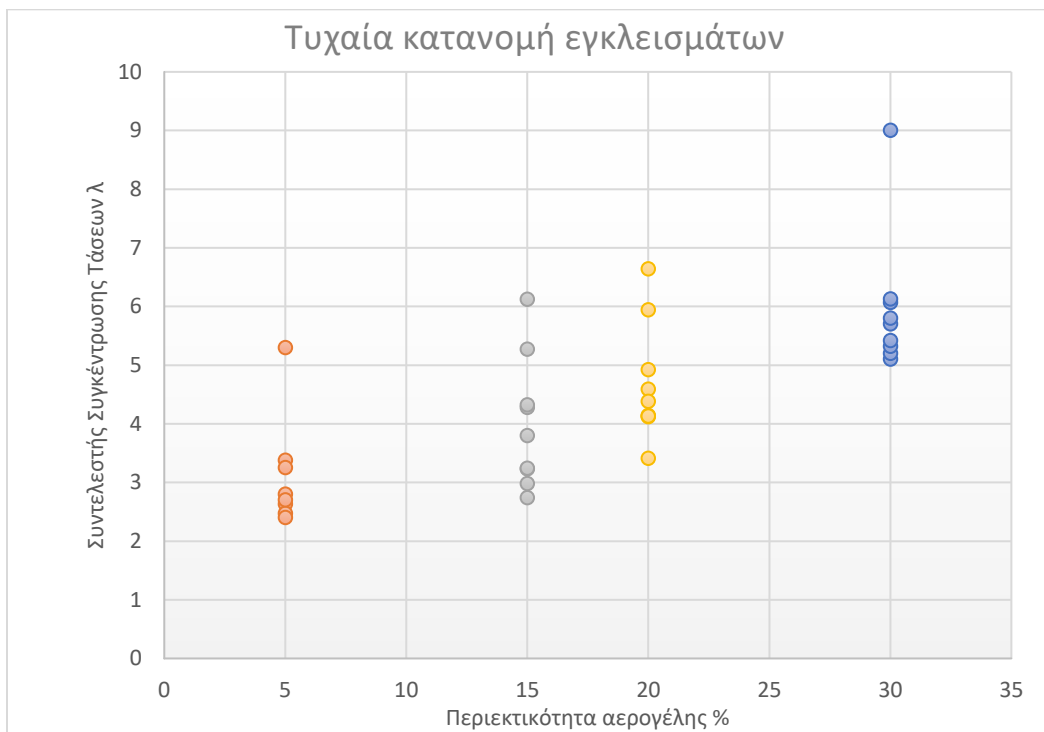


4.4 Εκτίμηση λ Για Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων

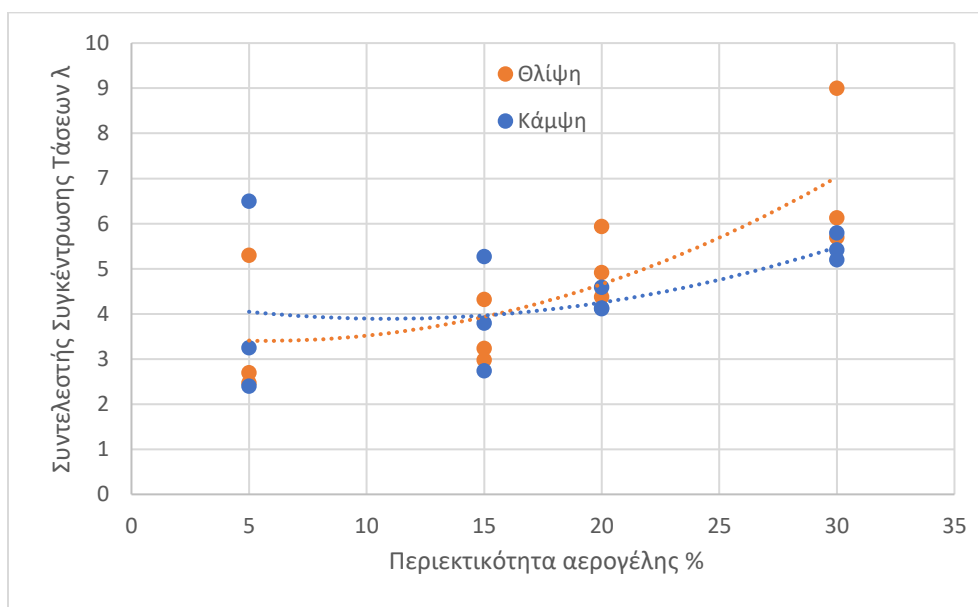
Οι τελευταίες προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν ήταν για το μοντέλο με τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, χωρίς την αλληλοδιδείσδυση των σφαιριδίων. Παρακάτω, σύμφωνα με την αντίστοιχη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 2 έγινε η εκτίμηση των συντελεστών που αφορά τις τέσσερις περιεκτικότητες: 5%, 15%, 20% και 30%. Για κάθε περιεκτικότητα που αναφέρθηκε επαναλήφθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καταγράφηκαν σε πίνακες (Παράρτημα Γ). Εν συνεχεία, με μαθηματικούς υπολογισμούς βρέθηκαν οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων για όλες τις περιεκτικότητες και επαναλήψεις. Ακολούθως κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.

Διάγραμμα 3: Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λ συναρτήσει της περιεκτικότητας σε αερογέλη %.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα αποτελεσμάτων τυχαίας κατανομής για θλίψη και κάμψη. (Digimat)



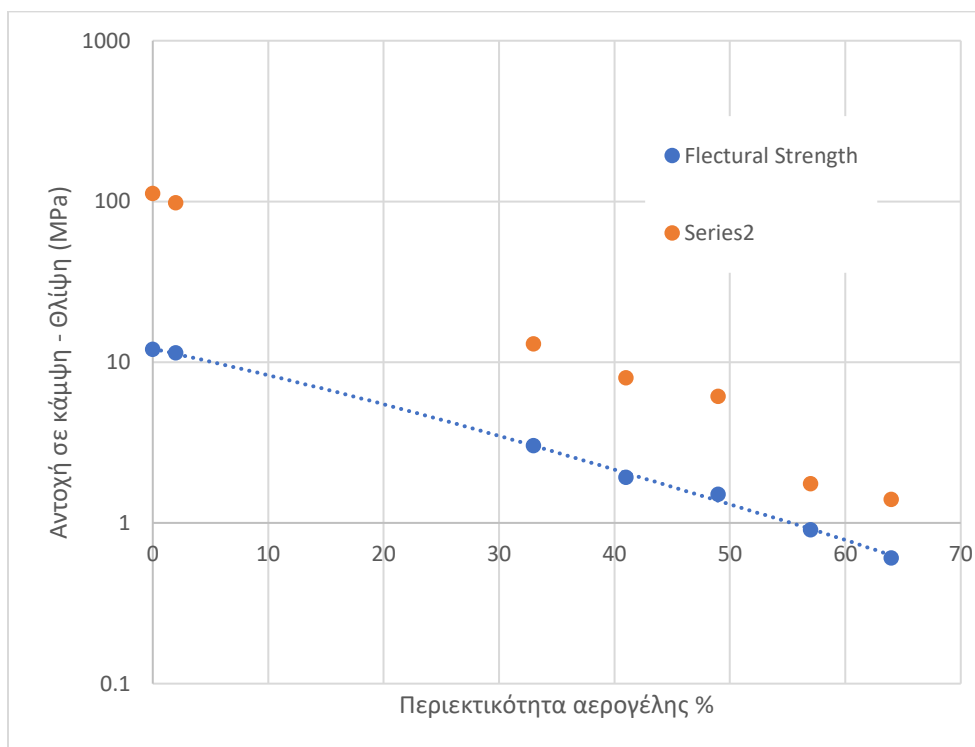
5 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις

5.1 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων Προσεγγίσεων

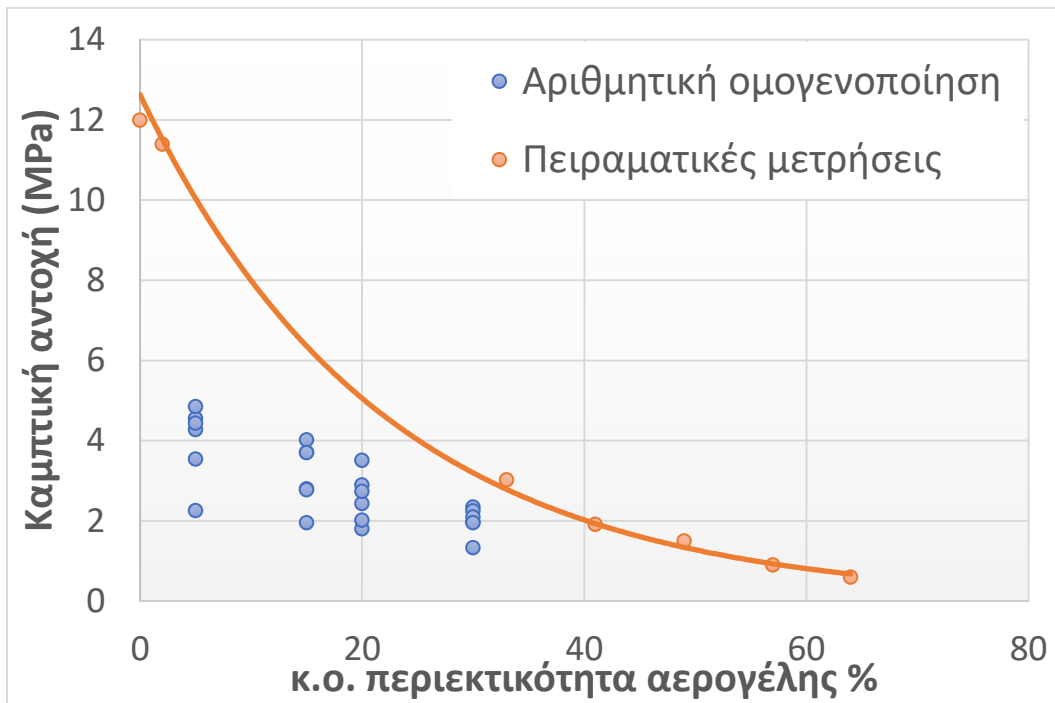
Με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε μια προσομοιωμένη εκτίμηση της επίδρασης των εγκλεισμάτων στις μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούν τις εκτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων που πραγματοποιήθηκαν για τις τρεις μορφές μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα για το μοντέλο με μοναδικό έγκλεισμα παρατηρήθηκε με βάση του διαγράμματος, ότι το μέγεθος του στοιχείου δεν επιδρά στον υπολογισμό συγκέντρωσης τάσεων. Σχετικά με το μοντέλο με μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα ο παρατηρήθηκε πως ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων είναι μεγάλος αξιαιτίας των εγκλεισμάτων τα οποία είναι πυκνά σε κάποια σημεία και για τις τρεις διευθύνσεις φόρτισης που εξετάστηκαν.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της τυχαίας κατανομής εγκλεισμάτων έγινε μια σύγκριση με αντίστοιχες τιμές θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, οι οποίες μετρήθηκαν πειραματικά στη δημοσίευση 'Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels' (Pinghua Zhu, 2019). Η σύγκριση έγινε με τη βοήθεια διαγραμμάτων για τις αντίστοιχες καταπονήσεις τα οποία παρατέθονται ακολούθως.

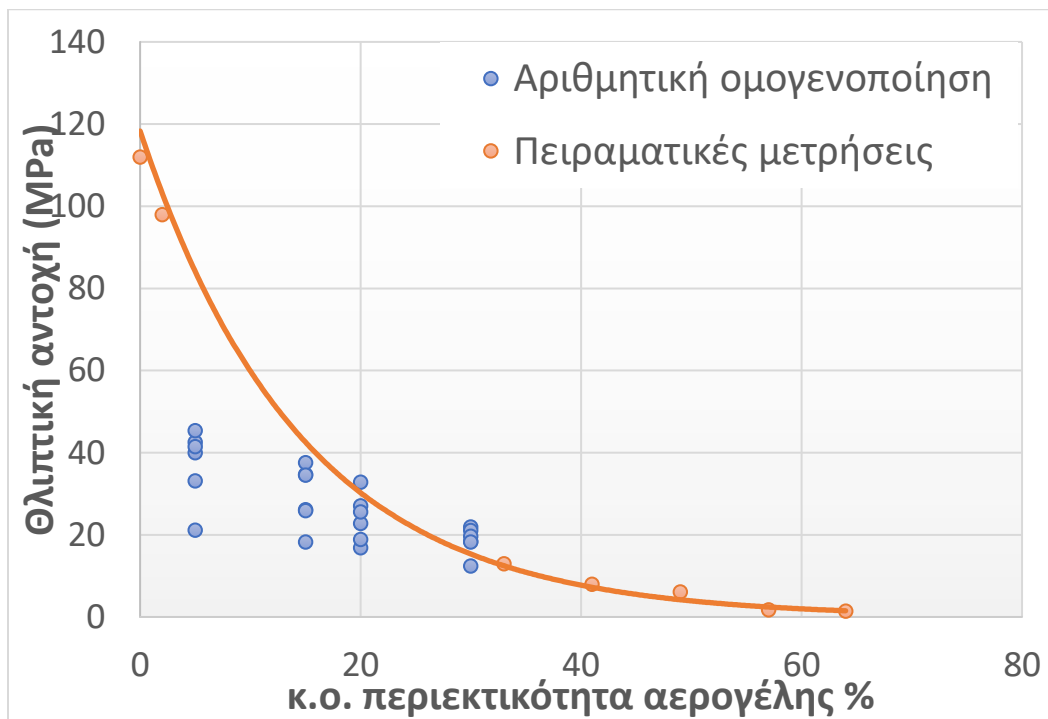
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα πειραματικών μετρήσεων για αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη. (Pinghua Zhu, 2019)



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα σύγκρισης υπολογισμών αριθμητικής ομογενοποίησης με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την αντοχή σε εφελκυσμό.



Διάγραμμα 7: Σύγκριση υπολογισμών αριθμητικής ομογενοποίησης με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που αφορούν την αντοχή σε θλίψη.



Συμπερασματικά από τα δύο αυτά διαγράμματα παρατηρήθηκε πως στις μικρότερες περιεκτικότητες υπήρξε απόκλιση των πειραματικών τιμών σε σχέση με τους υπολογισμών αριθμητικής ομογενοποίησης. Αντίθετα, παρατηρήθηκε ότι όσο μεγάλωναν οι περιεκτικότητες δεν υπήρξε σημαντική απόκλιση.

Βιβλιογραφία

1. Charalambakis, N. (2010). Homogenization techniques and micromechanics. A survey and perspectives. *Applied Mechanics Reviews*, 63(3).
2. Hassani, B., & Hinton, E. (1998). A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure. *Computers & Structures*, 69(6), 707-717.
3. Montoya-Zapata, D., Acosta, D. A., Cortés, C., Pareja-Corcho, J., Moreno, A., Posada, J., & Ruiz-Salguero, O. (2020). Approximation of the mechanical response of large lattice domains using homogenization and design of experiments. *Applied Sciences*, 10(11), 3858.
4. Liu, G. R., Zhang, G. Y., Gu, Y., & Wang, Y. Y. (2005). A meshfree radial point interpolation method (RPIM) for three-dimensional solids. *Computational Mechanics*, 36(6), 421-430.
5. Rodrigues, D. E. S., Belinha, J., Pires, F. M. A., Dinis, L. M. J. S., & Jorge, R. N. (2018). Material homogenization technique for composites: A meshless formulation. *Science and Technology of Materials*, 30(1), 50-59.
6. Gyselinck, J., & Dular, P. (2005). Frequency-domain homogenization of bundles of wires in 2-D magnetodynamic FE calculations. *IEEE transactions on magnetics*, 41(5), 1416-1419.
7. Dana, S., & Wheeler, M. F. (2020). A machine learning accelerated FE homogenization algorithm for elastic solids. *arXiv preprint arXiv:2003.11372*.
8. Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures Solutions Manual*. Prentice Hall.
9. Κοκαλιάρη, Α. (2021). Σχεδιασμός βελτιστοποιημένων νάνο-σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας για τον προσδιορισμό της θερμομηχανικής συμπεριφοράς τους.
10. Mortazavi, B., Benzerara, O., Meyer, H., Bardou, J., & Ahzi, S. (2013). Combined molecular dynamics-finite element multiscale modeling of thermal conduction in graphene epoxy nanocomposites. *Carbon*, 60, 356-365.
11. Κωνσταντίνου, Ζ. Επιδαπέδια θέρμανση κτιρίων-χώρων με χρήση σύγχρονων υλικών.
12. Benmansour, N., Agoudjil, B., Gherabli, A., Kareche, A., & Boudenne, A. (2014). Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 81, 98-104.
13. Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., & Nadargi, D. Y. (2010). Silica aerogel: synthesis and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2010.
14. Ibrahim, M., Biwole, P. H., Achard, P., & Wurtz, E. (2015). Aerogel-based materials for improving the building envelope's thermal behavior: a brief review with a focus on a new aerogel-based rendering. *Energy Sustainability Through Green Energy*, 163-188.
15. Buratti, C., Moretti, E., & Belloni, E. (2016). Aerogel plasters for building energy efficiency. In *Nano and biotech-based materials for energy building efficiency* (pp. 17-40). Springer, Cham.

16. Schaefer, D. W., & Keefer, K. D. (1986). Structure of random porous materials: silica aerogel. *Physical review letters*, 56(20), 2199.
17. Fickler, S., Milow, B., Ratke, L., Schnellenbach-Held, M., & Welsch, T. (2015). Development of high-performance aerogel concrete. *Energy Procedia*, 78, 406-411.
18. Strzałkowski, J., & Garbalińska, H. (2016). Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles. *Advances in Cement Research*, 28(9), 567-575.
19. Garbalińska, H., & Strzałkowski, J. (2018). Thermal and strength properties of lightweight concretes with variable porosity structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018326.
20. Bostancı, L., Ustundag, O., Celik Sola, O., & Uysal, M. (2019). Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties. *Građevinar*, 71(08.), 651-661.
21. Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels.
22. Huang, K. L., Li, S. J., & Zhu, P. H. (2021). Effect of early curing temperature on the tunnel fire resistance of self-compacting concrete coated with aerogel cement paste. *Materials*, 14(19), 5782.
23. Huang, L. (2012). Feasibility study of using silica aerogel as insulation for buildings. *Master of Science thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden*.
24. Zhu, P., Brunner, S., Zhao, S., Griffa, M., Leemann, A., Toropovs, N., ... & Lura, P. (2019). Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103414.
25. <https://ikee.lib.auth.gr/record/332876/files/Stoupas.pdf>
26. Digimat manual
27. <http://www.aerogel.org/?p=16>
28. <https://kingflex.coowor.com/shop/product-detail/j33ucovi71XY.htm>

Παράρτημα Α

Στο παρόν παράρτημα επισυνάπτονται όλοι οι πίνακες με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τάσεων, του συντελεστή συγκέντρωσης τάσης λ καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας σε κάθε περίπτωση, για τις δοκιμές με μοναδικό έγκλεισμα στο κέντρο του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου. Σε κάθε προσέγγιση διαφοροποιήθηκε η τιμή του μεγέθους του στοιχείου για πέντε περιπτώσεις.

Διαστάσεις RVE	2.5x2.5x2.5 mm
Διάμετρος σφαιριδίου	1 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,05.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2382	2387	-594	39668	1190	2.01
Φόρτιση 2	2380	2386	-594	39668	1190	2.01
Φόρτιση 3	2381	2386	-592	39668	1190	2.01

Πίνακας 2: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,1.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2395	2399	-603	39668	1190	2.02
Φόρτιση 2	2355	2401	-599	39668	1190	2.02
Φόρτιση 3	2383	2395	-598	39668	1190	2.01

Πίνακας 3: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,15.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2352	2389	-597	39521	1186	2.01
Φόρτιση 2	2378	2396	-588	39522	1186	2.02
Φόρτιση 3	2375	2392	-601	39521	1186	2.02

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,2.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2355	2395	-590	39489	1185	2.02
Φόρτιση 2	2358	2401	-584	39490	1185	2.03
Φόρτιση 3	2356	2396	-582	39503	1185	2.02

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,25.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2350	2412	-596	39670	1190	2.03
Φόρτιση 2	2352	2406	-599	39670	1190	2.02
Φόρτιση 3	2360	2406	-588	39670	1190	2.02

Πίνακας 2: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,2.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	4804	4629	-1068	7943	238	19
Φόρτιση 2	2366	2344	-1782	7893	237	10
Φόρτιση 3	4698	4223	-1866	8469	254	17

Πίνακας 3: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,15.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	5288	4753	-2579	7761	233	20
Φόρτιση 2	2578	2517	-1419	7682	231	11
Φόρτιση 3	4241	4131	-1019	8302	249	17

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για Element size: 0,26.

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	3149	2992	-819	8468	254	12
Φόρτιση 2	2242	2108	-1003	8391	272	8
Φόρτιση 3	2965	2741	-666	9053	272	10

Παράρτημα Γ

Στο παρόν παράρτημα επισυνάπτονται όλοι οι πίνακες με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τάσεων, του συντελεστή συγκέντρωσης τάσης λ καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας σε κάθε περίπτωση, για τις δοκιμές με τυχαία κατανομή σφαιριδίων, χωρίς αλληλοδιείσδυση, στη μικροδομή του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου. Η κάθε προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε αφορούσε διαφορετικές περιεκτικότητες αερογέλης.

Διαστάσεις RVE	5x5x5 mm
Διάμετρος σφαιριδίου	1 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για περιεκτικότητα αερογέλης 5%.

		Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
1 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2178	2136	-570	27100	813	2.63
	Φόρτιση 2	1966	2009	-557	27142	814	2.47
	Φόρτιση 3	1973	1953	-555	27100	813	2.40
2 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2912	2748	-752	27147	814	3.38
	Φόρτιση 2	4881	4313	-1316	27116	814	5.30
	Φόρτιση 3	2784	2649	-651	27125	814	3.25
3 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2311	2354	-515	27082	813	2.90
	Φόρτιση 2	2159	2198	-682	27132	814	2.70
	Φόρτιση 3	5785	5254	-992	27147	814	6.5

Πίνακας 2: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για περιεκτικότητα αερογέλης 15%.

		Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
1 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	3912	2826	-810	22007	660	4.28
	Φόρτιση 2	3597	3296	-1118	22075	662	2.98
	Φόρτιση 3	3422	3153	-1039	22153	665	4.74
2 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2446	2438	-825	22121	664	3.23
	Φόρτιση 2	2359	2143	-730	22004	660	3.24
	Φόρτιση 3	2705	2505	-638	21991	660	3.8
3 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	4048	4048	-883	22041	661	6.12
	Φόρτιση 2	2859	2859	-645	22062	662	4.32
	Φόρτιση 3	3467	3467	-833	21925	658	5.27

Πίνακας 3: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για περιεκτικότητα αερογέλης 20%.

		Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
1 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	4228	39444	-942	19792	594	6.64
	Φόρτιση 2	2942	2897	-684	19618	589	4.92
	Φόρτιση 3	3422	2734	-1341	19837	595	4.59
2 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2535	2462	-655	19796	594	4.14
	Φόρτιση 2	3921	3522	-1115	19772	593	5.94
	Φόρτιση 3	2487	2451	-618	19838	595	4.12
3 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2028	1960	-634	19841	595	3.41
	Φόρτιση 2	2744	2591	-711	19708	591	4.38
	Φόρτιση 3	2510	2441	-655	19682	591	4.13

Πίνακας 4: Αποτελέσματα εκτίμησης τάσεων για περιεκτικότητα αερογέλης 30%.

		Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	Μέγιστη κύρια τάση (MPa)	Ελάχιστη κύρια τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
1 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2730	2391	-459	28769	465	5.14
	Φόρτιση 2	2878	2644	-471	28779	466	5.67
	Φόρτιση 3	2477	2393	-472	28778	464	5.16
2 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2516	2502	-737	15654	470	5.32
	Φόρτιση 2	3063	2888	-675	15702	471	6.13
	Φόρτιση 3	3306	2536	-1147	15582	468	5.42
3 ^η Εκτίμηση	Φόρτιση 1	2762	2828	-820	15545	466	6.07
	Φόρτιση 2	4279	4204	-976	15573	467	9
	Φόρτιση 3	2867	2680	-876	15405	462	5.8