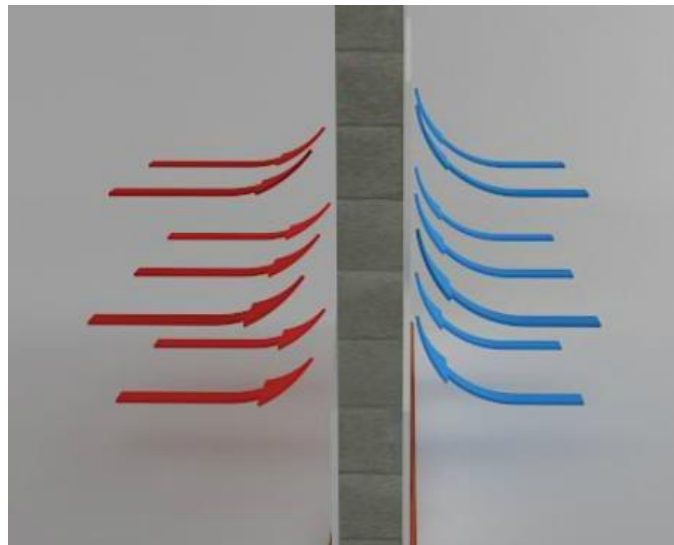


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΓΕΛΗΣ
ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ**



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΤΖΑΝΝΕΤΟΥΛΑΚΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ (Α.Μ.7781)

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

ΠΑΤΡΑ 2023

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 θερμικές ιδιότητες τσιμεντοκονίας. Είναι γνωστό ότι η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς κυρίως όσον αφορά την κατασκευή των κτηρίων. Έτσι, οι μηχανικοί επιδιώκουν να επιτύχουν τις βέλτιστες θερμικές ιδιότητες σε οικοδομικές κατασκευές με τη χρήση θερμομονωτικών υλικών.

Στην αρχή της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας δίνονται οι 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 αναλύσεις της παρούσας εργασίας. Τέλος, προσεγγίζονται οι εκτιμήσεις των θερμικών ιδιοτήτων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος μοντελοποίησης Digimat.

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

Τζαννετουλάκου Αναστασία

Μάϊος 2023

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.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες.....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.1.1 Σκοπός εργασίας.....	5
1.2 Βασικές έννοιες.....	6
1.2.1 Ομογενοποίηση των υλικών	6
1.2.2 Μέθοδοι-Τεχνικές ομογενοποίησης.....	7
1.2.3 Τεχνικές αριθμητικής μελέτης ομογενοποίησης.....	11
1.2.4 Θερμική αγωγιμότητα.....	14
1.2.5 Στοιχείο όγκου RVE.....	15
1.3 Προηγμένη θερμομονωτική τσιμεντοκονία.....	16
1.3.1 Aerogel.....	17
1.3.2 Aerogel Silica.....	19
2. Πρόγραμμα DIGIMAT.....	20
2.1 Πρόγραμμα επίλυσης μοντέλων με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.....	20
2.2 Digimat.....	20
2.3 Digimat FE.....	20
2.3.1 Μεθοδολογία εξαγωγής αποτελεσμάτων.....	21
3. Δεδομένα και αποτελέσματα (αριθμητικοί υπολογισμοί).....	42
3.1 Ανάπτυξη και επίλυση μοντέλων ΠΣ για την εκτίμηση θερμικών ιδιοτήτων προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας.....	42
3.2 Τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων.....	43
3.3 Διαφοροποίηση διαμέτρου εγκλεισμάτων.....	62
3.4 Διαφοροποίηση μεγέθους στοιχείων.....	77
4. Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k	92
4.1 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λόγω εγκλεισμάτων αερογέλης..	92
4.2 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων.....	92
4.3 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για διαφορετικές διαμέτρους εγκλεισμάτων αερογέλης.....	94
4.4 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων.....	95
5. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις.....	96
5.1 Συμπεράσματα και αποτελέσματα προσεγγίσεων.....	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων και την εκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας με την προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται κυρίως σε οικοδομικές κατασκευές, σαν επίστρωση για την βελτίωση των θερμικών αλλά και μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής, καθώς χαρακτηρίζεται για το χαμηλό κόστος και την αυξημένη θερμομόνωση του.

Οι εκτίμηση των αποτελεσμάτων, θα γίνει με την ανάπτυξη προσομοιώσεων αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στα παρακάτω πέντε κεφάλαια αναπτύσσονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για το θέμα που μελετάται. Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύεται το αντικείμενο της εργασίας, μέθοδοι και τεχνικές επίλυσης της όπως και βασικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναπτύσσεται το εμπορικό πρόγραμμα επίλυσης μοντέλων με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την εξέταση των θερμικών ιδιοτήτων του τσιμεντοκονιάματος και βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος. Έπειτα, περιγράφεται αναλυτικά και η διαδικασία ανάλυσης και εξαγωγής αποτελεσμάτων όπως και οι δυνατότητες που παρέχει.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι προδιαγραφές και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μοντέλο χωριστά. Έπειτα, το πως πραγματοποιούνται οι αναλύσεις της κάθε περίπτωσης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν ενδεικτικά μέσω αναλυτικών απεικονίσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναφέρονται οι εκτιμήσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τη κάθε περίπτωση κατανομής και διαφοροποίησης εγκλεισμάτων στη μικροδομή του στοιχείου όγκου που μετρήθηκαν, όπως και τις επαναλήψεις και τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, γραμμικά και μέσω πινάκων συγκεντρωτικά.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο επισημαίνονται τα σχόλια, οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από όλη την πειραματική διαδικασία άλλα και μεταξύ των περιπτώσεων.

1. Εισαγωγή και βασικές έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Κύριο μέλημα των μηχανικών, σε ό,τι αφορά τις κτιριακές δομές, πέρα από την στιβαρότητα της κατασκευής είναι, με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης θερμικής μόνωσης. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με την τοποθέτηση (εφαρμογή) θερμομονωτικών πολυστρωματικών κελυφών, αυτά επιλέγονται λόγω της μεγάλης απόδοσης τους.

Τα πολυστρωματικά κελύφη, είναι μία αξιόλογη μέθοδος, ωστόσο μία ακόμα πρακτική είναι η εφαρμογή θερμαντικών επιχρισμάτων, όπου επιτυγχάνεται η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, με αποτέλεσμα την βελτίωση της θερμομόνωσης της κατασκευής τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Τα επιχρίσματα αυτά αποτελούνται από μόνο μια στρώση υλικού και ως εκ τούτου είναι ευκολότερη η εφαρμογή τους.

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη θερμική μόνωση, οι επιστήμονες αναπτύσσουν ένα καινοτόμο υλικό, την προηγμένη θερμομονωτική τσιμεντοκονία με εγκλείσματα αερογέλης, η οποία ανήκει στα υλικά που βοηθούν να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα που προαναφέρθηκε. Η προσθήκη κόκκων αερογέλης βοηθά στην επίτευξη χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετώνται αναλυτικά οι θερμικές ιδιότητες του υλικού καθώς και η επιρροή τους σε αυτό.

1.1.1 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι, η μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων ενός μίγματος προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας χαμηλού κόστους, με προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης (aerogel). Συγκεκριμένα η προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης στη σύνθεση των παρασκευασμένων μιγμάτων τσιμεντοκονίας, τα οποία χρησιμοποιούνται ως επιχρίσματα στα κτήρια καθώς οδηγεί στη βελτίωση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών. Ταυτόχρονα, όμως, επηρεάζονται αρνητικά οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

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

Για το σκοπό αυτό μοντελοποιήθηκε, με τη χρήση του εμπορικού προγράμματος αριθμητικής προσομοίωσης Digimat, η θερμική συμπεριφορά των αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων (representative volumes) της μικροδομής του υλικού με τη χρήση της αριθμητικής μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

1.2 Βασικές έννοιες

Οι παρακάτω παράγραφοι αναλύουν τις βασικές έννοιες, οι οποίες θα αναπτυχθούν στην παρούσα πτυχιακή εργασία.

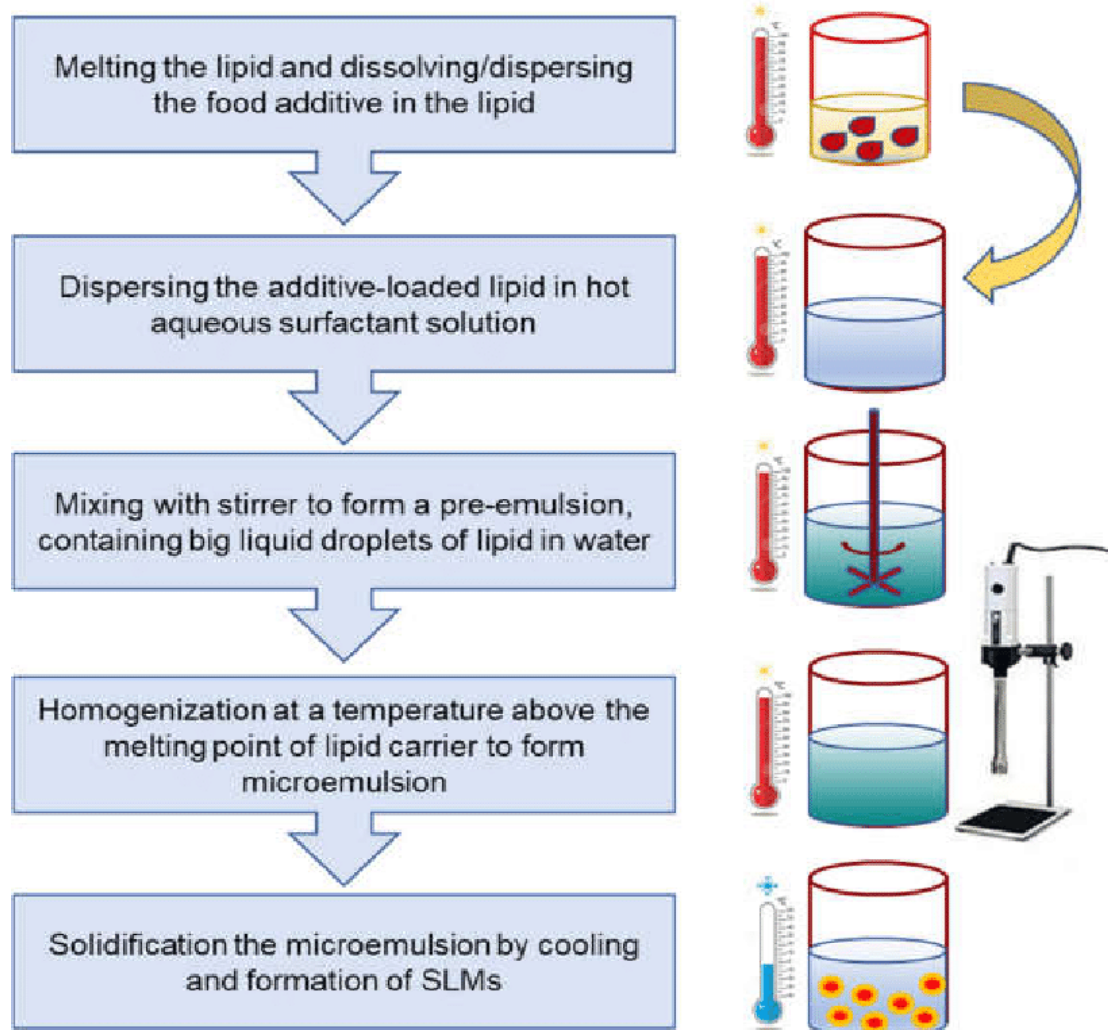
1.2.1 Ομογενοποίηση των υλικών

Η ομογενοποίηση συναντάται σε πολλές σημαντικές και πρακτικές εφαρμογές στην επιστήμη των υλικών και στην εφαρμοσμένη μηχανική, καθώς τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως στην βιομηχανία. Το ενδιαφέρον είναι ότι ένα σύνθετο υλικό έχει γενικά καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά των συστατικών του μεμονωμένα.

Ως ομογενοποίηση ορίζεται, οποιαδήποτε διεργασία χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός ομοιογενούς μείγματος, το οποίο προκύπτει από την πρόσμιξη δύο αδιάλυτων μεταξύ τους υγρών. Η σύσταση και η δομή του τελικού προϊόντος μείξης, θα πρέπει να είναι ίδια σε κάθε σημείο του όγκου του. Αυτό επιτυγχάνεται τροποποιώντας το ένα από τα δύο υγρά με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτελείται από εξαιρετικά μικρά σωματίδια, τα οποία μετά την μείξη, να είναι σε θέση να κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του άλλου υγρού. Με αυτή τη μέθοδο αντικαθίστανται οι γνωστές λεπτομερείς ιδιότητες των γεωμετριών και των υλικών πολλαπλών φάσεων, σε λεπτότερη κλίμακα με απλούστερες, πιο αποτελεσματικές, γεωμετρικές περιοχές, που κατατάσσονται ομοιόμορφα στο υγρό καθώς και μονοφασικές, στερεές, ιδιότητες των υλικών σε πιο χονδροειδή κλίμακα. Έτσι δημιουργούνται τα ομοιογενή υλικά, τα οποία ορίζονται ως υλικά ομοιόμορφης σύνθεσης, που δεν μπορούν να διαχωριστούν μηχανικά, ακόμα και να διακριθούν με γυμνό μάτι ή κοινό μικροσκόπιο στα επιμέρους συστατικά του, η ύπαρξη ενός ισοδύναμου ομοιογενούς υλικού που έχει την ίδια αποτελεσματική μακροκαμψία με το πραγματικό ετερογενές υλικό, κάτω από τις ίδιες οριακές συνθήκες. Έστω, ένα κομμάτι από τσιμεντοκονίαμα όπου το τσιμέντο καθώς και τα κονιάματα έχουν διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (E), το ομοιογενές υλικό που θα προκύψει πρέπει να έχει ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας.

Με σκοπό την δημιουργία και την μελέτη ενός ομογενοποιημένου υλικού, έχει αναπτυχθεί ποικιλία μαθηματικών μεθόδων για την ευκολότερη προσέγγιση των ιδιοτήτων του ομοιογενούς μείγματος. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου και κόστους των πειραματικών μετρήσεων είναι πολύ συχνά ανέφικτες οι μετρήσεις αυτές για αυτό τον λόγο καταφεύγονται οι μελετητές στις αριθμητικές μετρήσεις.

Το κύριο ζητούμενο της ομογενοποίησης, είναι η δημιουργία ενός ομοιογενούς μείγματος πιο ενισχυμένο από τα επιμέρους συστατικά του, με σκοπό τις καλύτερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 1: Διαδικασία ομογενοποίησης

1.2.2 Μέθοδοι-Τεχνικές ομογενοποίησης

Για την υλοποίηση της μεθόδου ομογενοποίησης, αναπτύχθηκαν κάποιες πρακτικές τεχνικές που υπάρχουν και αναλύονται παρακάτω.

1.2.2.1 Ομογενοποίηση υψηλής πίεσης

Η συγκεκριμένη τεχνική ομογενοποίησης υψηλής πίεσης ωθεί το υγρό ή το περιεχόμενο χρησιμοποιώντας υψηλή πίεση 100-2000 bar μέσω ενός στενού διακένου στην περιοχή λίγων μικρών. Η ταχύτητα που αναπτύσσει το ρευστό μέσα στο μικρό στόμιο είναι 1000 km/h. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας, η διατμητική τάση και οι δυνάμεις στην κοιλότητα σπάζουν τα σωματίδια μέχρι το εύρος των υπομικρονίων. Κατά την προετοιμασία χρησιμοποιείται 5%-10% της περιεκτικότητας σε λιπίδια, αλλά μπορεί να επεκταθεί έως και 40%. Η ομογενοποίηση υψηλής πίεσης υιοθετείται ως επί το πλείστον σε διάφορα ερευνητικά έργα, που μπορούν να ταξινομηθούν στην Θερμή Ομογενοποίηση και στην Ψυχρή Ομογενοποίηση.

Η θερμή ομογενοποίηση περιλαμβάνει την εφαρμογή της θερμότητας με θερμοκρασιακές τιμές πάνω από το σημείο τήξης των λιπιδίων που υπάρχει σύνθεση.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο φάσεις: α)ανάδευση φαρμάκων σε λιωμένο λιπίδιο σε ομοιογενή κατάσταση και β)επιφανειοδραστικό ζεστό υδατικό μείγμα. Οι δύο αυτές φάσεις διατηρούνται σε θερμοκρασίες μεταξύ 60 °C έως 70 °C. Αντιθέτως η ψυχρή ομογενοποίηση χρησιμοποιείται ως εναλλακτική λύση της θερμής ομογενοποίησης, σκοπός είναι να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την θερμή διαδικασία. Η θερμοκρασία ελέγχεται, η παραγωγή σωματιδίων είναι σε μεγαλύτερη κλίμακα μεγέθους και έχουν ευρύτερη κατανομή μεγέθους και η συνολική θερμική έκθεση είναι μικρότερη σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο.

Τα πλεονεκτήματα της ομογενοποίησης υψηλής πίεσης είναι ότι λειτουργεί καλά σε εργαστηριακή κλίμακα και είναι αρκετά αποδοτική. Τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας που χρειάζεται, η μη αποδεδειγμένη επεκτασιμότητα και ενδέχεται τα βιομόρια να υποστούν βλάβη όταν εκτελούνται σε εργαστηριακή κλίμακα.

1.2.2.2 Υπερηχοποίηση και ομογενοποίηση υψηλής διάτμησης

Οι συγκεκριμένες τεχνικές απαιτούνται για την απόκτηση σωματιδίων στην περιοχή των νανοσωματιδίων καθώς και για την παρασκευή των SLN. Η υπερηχοποίηση και η ομογενοποίηση υψηλής διάτμησης είναι τεχνικές εργαστηριακής κλίμακας και μπορούν να εφαρμοστούν σε μικρότερους όγκους παρασκευμάτων, όπως 500mL έως 1 L. Ενδέχεται να απαιτούνται εφαρμογές θερμοκρασίας για την επίτευξη των σταθερών νανοσωματιδίων.

Τα πλεονεκτήματα της υπερηχοποίησης και ομογενοποίησης υψηλής διάτμησης είναι η μείωση της διατμητικής τάσης, η προετοιμασία είναι απλή και εύκολη και μπορεί να δώσει καλύτερα αποτελέσματα σε λιγότερο παχύρρευστα σκευάσματα. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μόλυνση μετάλλων, η δυσκολία κλιμάκωσης και τα πιθανά ζητήματα φυσικής σταθερότητας (ανάπτυξη σωματιδίων κατά την αποθήκευση).

1.2.2.3 Τεχνική Υπερκρίσιμων Υγρών

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές όπως χρωματογραφία, επεξεργασία υλικού κατά την παρασκευή SLN και εκχύλιση. Οι συνήθεις τρόποι για την διαμόρφωση σωματιδίων στην τεχνική του υπερκρίσιμου υγρού είναι η διαδικασία του υπερκρίσιμου διαλύματος SAS και η ταχεία επέκταση του υπερκρίσιμου διαλύματος RESS. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει και άλλες διάφορες διαδικασίες όπως το κορεσμένο με αέριο διάλυμα σωματιδίων PGSS, ο διαλύτης εκχύλισης με διαλύτη αερολύματος και η εκχύλιση υπερκρίσιμου υγρού γαλακτώματος SFEE.

Κατά την διαδικασία SAS η διαλυμένη ουσία διαλύεται σε κατάλληλο οργανικό διαλύτη και έπειτα το διάλυμα ψεκάζεται σε περίσσεια αντί-διαλύτη. Στην συγκεκριμένη διαδικασία RESS περιλαμβάνονται δύο στάδια, το πρώτο στάδιο είναι η διαδικασία εκχύλισης όπου το υπερκρίσιμο υγρό είναι κορεσμένο διαλύοντας το υπόστρωμα, ενώ το δεύτερο στάδιο συνεπάγεται την εφαρμογή αποσυμπίεσης στο διάλυμα περνώντας το μέσω ενός ακροφυσίου. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η ισχύς του διαλύτη και η αντίστοιχη θερμοκρασία του υγρού οδηγεί στην καθίζηση της διαλυμένης ουσίας.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνική υπερκρίσιμων υγρών είναι η ελαχιστοποίηση της χρήση του διαλύτη, η πίεση και η πίεση θερμοκρασίας είναι μικρότερη, η συλλογή σωματιδίων ως ξηρή σκόνη αντί για εναιώρημα, το 99,99% διαλύτης διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται για αυτήν τη μέθοδο και τα SLN μπορούν να παρασκευαστούν με την ταχεία επέκταση της μεθόδου διαλύματος υπερκρίσιμου υγρού διοξειδίου του άνθρακα με το RESS. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μη αποδοτικό κόστος.

1.2.2.4 Εξάτμιση διαλύτη

Είναι μία ακόμα μέθοδος ομογενοποίησης η οποία περιλαμβάνει τη διάλυση του λιπόφιλου υλικού σε έναν μη αναμίξιμο με νερό οργανικό διαλύτη, όπως το κυκλοεξάνιο ή ο αιθέρα κ.α. Ο οργανικός αυτός διαλύτης μπορεί να απομακρυνθεί με τη χρήση ροτα-εξατμιστή υπό μειωμένη πίεση 40-60 bar. Είναι δυνατόν να υπάρχει απαίτηση γαλακτωματοποιητών όπως πολυσορβικά και φωσφατιδύλοχολίχη καθώς και συνεπιφανειοδραστικά, όπως πολοξαμερές και μονο-οκτυλο φωσφορικό νάτριο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η καταλληλότητα της για κλιμάκωση, έχει μια συνεχή διαδικασία και είναι μια εμπορικά επιτυχημένη μέθοδος. Τα μειονεκτήματα είναι ότι τα βιομόρια ενδέχεται να υποστούν βλάβη καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, το PDI μπορεί να είναι υψηλό και η εφαρμογή της γίνεται με υψηλή ενέργεια.

1.2.2.5 Μέθοδος γαλακτωματοποίησης (διάχυση διαλύτη)

Σε αυτή τη μέθοδο, το μέγεθος των σωματιδίων στο παρασκεύασμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε λιπίδια ή την συγκέντρωση στην οργανική φάση, τον τύπο του γαλακτωματοποιητή και την τιμή HLB. Χρησιμοποιείται για να παρασκευαστούν τα SLN. Τα νανοσωματίδια σχηματίζονται σε διασπορές των κατακρημνίσεων. Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών.

1.2.2.6 Μέθοδος μικρογαλακτώματος

Με τη μέθοδο αυτή τα SLN παρασκευάζονται με αραίωση του μικρογαλακτώματος. Το μικρογαλάκτωμα είναι ένα διφασικό σύστημα που περιλαμβάνει μια εσωτερική και μια εξωτερική φάση, μπορούν να παρασκευαστούν με ανάδευση του μείγματος στους 65°C έως 70°C. Οι ουσίες που απαιτούνται για τη σύνθεση του νανογαλακτώματος μπορεί να είναι το χαμηλό σημείο τήξης, τα λιπαρά οξέα, οι γαλακτωματοποιητές (πολυσορβικά) και οι γαλακτωματοποιητές (βουτανόλη και νερό). Η διαδικασία της αραίωσης προσδιορίζεται από τη σύνθεση του μικρογαλακτώματος. Επίσης μπορούν να παραχθούν νανοσωματίδια από διαλύτες, οι οποίοι διαλύονται γρήγορα στην υδατική φάση (υδρόφιλοι διαλύτες), ενώ οι περισσότεροι λιπόφιλοι παράγουν νανοσωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους.

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η εφαρμογή χαμηλής μηχανικής τάσης και τα μειονεκτήματα είναι ότι τα σωματίδια που επιτυγχάνονται βρίσκονται σε χαμηλή συγκέντρωση και είναι ευαίσθητη στην αλλαγή.

1.2.2.7 Τεχνική διασποράς τήγματος

Το στερεό λιπίδιο τήκεται μεταξύ 70ο C έως 80ο C με οργανικό διαλύτη υπό μαγνητικές συνθήκες ανάδευσης. Υπάρχει όμως και μια άλλη φάση, στην οποία το φάρμακο επιφανειοδραστικό διάλυμα της υδατικής φάσης θερμαίνεται στους 70ο C έως 80ο C. Οι δύο αυτές φάσεις πρέπει να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία και η ανάδευση πρέπει να διαρκέσει για κάποιες ώρες σε μέτριες με υψηλές στροφές από 1500 έως 2500 rpm. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτελεί, ότι είναι καλύτερη από την μέθοδο υπερήχων.

1.2.2.8 Μέθοδος καθίζησης

Το λιπίδιο διαλύεται σε κατάλληλο οργανικό διαλύτη, όπως το χλωροφόρμιο, η ακετόνη κ.α. , έπειτα υποβάλλεται σε υπερήχων για να διαλυτοποιηθεί πλήρως για περίπου 5-10 λεπτά με την βοήθεια αλουμινόχαρτου για να αποτραπεί η εξάτμιση του διαλύτη. Το μίγμα των οργανικών λιπιδίων εγχύνεται σε μια εξωτερική υδατική φάση, η οποία περιέχει το συνεπιφανειοδραστικό όπως το Pluronic F-68 και το Tween 80, αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια σύριγγας με στάγδην τρόπο. Η μηχανική ανάδευση υψηλής ταχύτητας είναι 500-1500 rpm με σκοπό την επιτυχή επιθυμητή νανοδιασπορά. Στη συνέχεια η νανοδιασπορά μεταφέρεται σε συνθήκες μαγνητικής ανάδευσης των 500 rpm για 4 ώρες (τουλάχιστον) μέχρι να εξατμιστούν τα οργανικά διαλύματα. Τέλος, η διασπορά υποβάλλεται σε περιστροφική εξάτμιση υπό μειωμένη πίεση στους 60ο C με αποτέλεσμα την απομάκρυνση ιχνών οργανικών διαλυτών που υφίστανται.

1.2.2.9 Επιπλέον μέθοδοι ομογενοποίησης

Πίνακας 1 : επιπλέον τεχνικών/μεθόδων της ομογενοποίησης

Τεχνική	Χρήση διαλύτη	Απαιτούμενα όργανα	Θερμοκρασία εργασίας	Βέλτιστες συνθήκες
PGSS(Κορεσμένο με αέριο διάλυμα σωματιδίων)	-	Συσκευές GAMA	5-10 °C πάνω από το σημείο τήξης του λιπιδίου	Πίεση 74 bar
SFEE(Ειχύλιση υπερκρίσιμου υγρού γαλακτώματος)	Χλωριομένοι διαλύτες	Ομογενοποίηση υψηλής πίεσης/ SFEE συσκευή	31 °C	Πίεση 74 bar
Κρυογονική μικροποίηση	-	-	-80°C	-
Μέθοδος αναδόχου μεμβράνης	-	Συσκευές αναδόχου μεμβράνης	5-10 °C πάνω από το σημείο τήξης του λιπιδίου	-
Ξήρανση με ψεκασμό	Αιθανόλη	Στεγνωτήριο ψεκασμού	70°C	-
Ηλεκτροψεκασμός	Αλειφατικές αλοόλες	Ηλεκτροψεκαστικά μηχανήματα	25°C	Υψηλής τάσης
Ψύξη με σπρέι	-	Συσκευές ψύξης με σπρέι	5-10 °C πάνω από το σημείο τήξης του λιπιδίου	-

1.2.3 Τεχνικές αριθμητικής μελέτης ομογενοποίησης

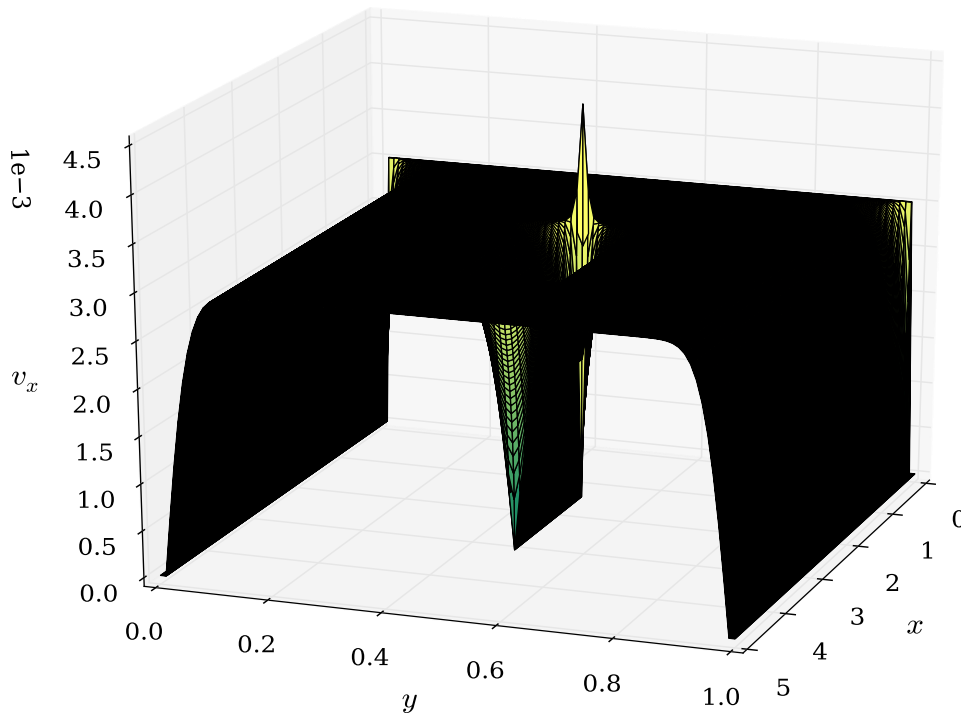
Η πολύπλοκη σύνθεση των σύνθετων υλικών, οδήγησε τους ερευνητές στην εύρεση πιο αποτελεσματικών και λεπτομερών μεθόδων ανάλυσης, με σκοπό οι αναλύσεις των υλικών αυτών να γίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για ένα σύνθετο υλικό είναι η μακρομηχανική και η μικρομηχανική.

Οι μέθοδοι αριθμητικής μελέτης ομογενοποίησης που υπάρχουν αναλύονται παρακάτω και είναι: η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών, η Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων, η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

1.2.3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μία αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων με προσέγγιση παραγώγων με πεπερασμένες διαφορές. Τόσο το χωρικό πεδίο όσο και το χρονικό διάστημα (εάν υπάρχει) διακριτοποιούνται ή χωρίζονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων και η τιμή της λύσης σε αυτά τα διακριτά σημεία προσεγγίζεται με την επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων που περιέχουν πεπερασμένες διαφορές και τιμές από κοντινά σημεία.

Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών μετατρέπουν συνηθισμένες διαφορικές εξισώσεις (ODE) ή μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE), οι οποίες μπορεί να είναι μη γραμμικές, σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν με τεχνικές άλγεβρας πινάκων. Οι σύγχρονοι υπολογιστές μπορούν να εκτελούν αποτελεσματικά αυτούς τους υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, γεγονός που, μαζί με τη σχετική ευκολία εφαρμογής τους, έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση του FDM στη σύγχρονη αριθμητική ανάλυση. Σήμερα, το FDM είναι μια από τις πιο κοινές προσεγγίσεις στην αριθμητική λύση του PDE, μαζί με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων. Για να χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να προσεγγίσουμε τη λύση ενός προβλήματος, πρέπει πρώτα να διακριτοποιήσουμε τον τομέα του προβλήματος. Αυτό γίνεται συνήθως με διαίρεση του τομέα σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα. Αυτό σημαίνει ότι οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών παράγουν σύνολα διακριτών αριθμητικών προσεγγίσεων στην παράγωγο.



Εικόνα 2: Διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ροής αέρα γύρω από ένα εμπόδιο

1.2.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method)

Η μέθοδος πεπερασμένου όγκου (FVM) είναι μια μέθοδος για την αναπαράσταση και την αξιολόγηση διαφορικών εξισώσεων με τη μορφή αλγεβρικών εξισώσεων. Στη μέθοδο πεπερασμένου όγκου, τα ολοκληρώματα όγκου σε μια μερική διαφορική εξίσωση που περιέχουν έναν όρο απόκλισης μετατρέπονται σε επιφανειακά ολοκληρώματα, χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης. Οι όροι αυτοί στη συνέχεια αξιολογούνται ως ροές στις επιφάνειες κάθε πεπερασμένου όγκου. Επειδή η ροή που εισέρχεται σε έναν δεδομένο όγκο είναι πανομοιότυπη με αυτή που εξέρχεται από τον διπλανό όγκο, αυτές οι μέθοδοι είναι συντηρητικές. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένου όγκου είναι ότι διαμορφώνεται εύκολα για να επιτρέψει αδόμητα πλέγματα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε πολλά πακέτα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Ο "πεπερασμένος όγκος" αναφέρεται στον μικρό όγκο που περιβάλλει κάθε σημείο κόμβου σε ένα πλέγμα.

Οι μέθοδοι πεπερασμένου όγκου μπορούν να συγκριθούν και με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες προσεγγίζουν τις παραγώγους χρησιμοποιώντας κομβικές τιμές ή τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες δημιουργούν τοπικές προσεγγίσεις μιας λύσης χρησιμοποιώντας τοπικά δεδομένα και κατασκευάζουν μια συνολική προσέγγιση συρράπτοντάς τις μεταξύ τους. Αντίθετα, μια μέθοδος πεπερασμένου όγκου αξιολογεί ακριβείς εκφράσεις για τη μέση τιμή της λύσης σε κάποιο όγκο και χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να κατασκευάσει προσεγγίσεις της λύσης μέσα στα κελιά.

1.2.3.3 Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων

Η μέθοδος οριακών στοιχείων (BEM) είναι μια αριθμητική υπολογιστική μέθοδος επίλυσης γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων που έχουν διαμορφωθεί ως ολοκληρωτικές εξισώσεις (δηλαδή σε οριακή ακέραια μορφή), συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής ρευστών, της ακουστικής, της ηλεκτρομαγνητικής κτλ.

Η ολοκληρωτική εξίσωση μπορεί να θεωρηθεί ως ακριβής λύση της κυρίαρχης μερικής διαφορικής εξίσωσης. Η μέθοδος των οριακών στοιχείων προσπαθεί να χρησιμοποιήσει τις δεδομένες οριακές συνθήκες για να προσαρμόσει οριακές τιμές στην ολοκληρωτική εξίσωση, αντί για τιμές σε όλο το χώρο που ορίζεται από μια μερική διαφορική εξίσωση. Μόλις γίνει αυτό η ολοκληρωτική εξίσωση μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ξανά για να υπολογιστεί αριθμητικά η λύση απευθείας σε οποιοδήποτε επιθυμητό σημείο στο εσωτερικό της περιοχής λύσης.

Το BEM είναι εφαρμόσιμο σε προβλήματα για τα οποία μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις του Green. Αυτά συνήθως περιλαμβάνουν πεδία σε γραμμικά ομοιογενή μέσα. Αυτό θέτει σημαντικούς περιορισμούς στο εύρος και τη γενικότητα των προβλημάτων στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν χρήσιμα τα οριακά στοιχεία.

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων είναι συχνά πιο αποτελεσματική από άλλες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένων των πεπερασμένων στοιχείων, όσον αφορά τους υπολογιστικούς πόρους για προβλήματα όπου υπάρχει μικρή αναλογία επιφάνειας/όγκου. Ωστόσο, για πολλά προβλήματα οι μέθοδοι οριακών στοιχείων είναι σημαντικά λιγότερο αποτελεσματικές από τις μεθόδους διακριτοποίησης όγκου.

Ένα καλό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων είναι ο αποτελεσματικός υπολογισμός των φυσικών συχνοτήτων της εκκένωσης υγρών σε δεξαμενές.

1.2.3.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι μια δημοφιλής μέθοδος για την αριθμητική επίλυση διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν στη μηχανική και τη μαθηματική μοντελοποίηση.

Η μέθοδος αυτή είναι μια γενική αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων σε δύο ή τρεις μεταβλητές χώρου (δηλαδή, ορισμένα προβλήματα οριακών τιμών). Για να λυθεί ένα πρόβλημα, το FEM υποδιαιρεί ένα μεγάλο σύστημα σε μικρότερα, απλούστερα μέρη που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό επιτυγχάνεται με μια ιδιαίτερη διακριτοποίηση χώρου στις διαστάσεις του χώρου, η οποία υλοποιείται με την κατασκευή ενός πλέγματος του αντικείμενου, το αριθμητικό πεδίο για τη λύση, το οποίο έχει έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων.

Η διατύπωση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ενός προβλήματος οριακής τιμής καταλήγει τελικά σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Η μέθοδος προσεγγίζει την άγνωστη συνάρτηση στον τομέα. Οι απλές εξισώσεις που μοντελοποιούν αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία στη συνέχεια συναρμολογούνται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα εξισώσεων που μοντελοποιεί ολόκληρο το πρόβλημα. Στη συνέχεια, το FEM προσεγγίζει μια λύση ελαχιστοποιώντας μια σχετική συνάρτηση σφάλματος μέσω του λογισμού των μεταβολών.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία για την μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων ενός μίγματος προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας, με προσθήκη εγκλεισμάτων αερογέλης θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

1.2.4 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα είναι το μέτρο μεταφοράς θερμότητας μεταξύ σωμάτων ή σωματιδίων που έρχονται σε άμεση επαφή με διαφορετικές θερμοκρασίες, στην οποία ανταλλάσσεται η ενέργεια της κίνησης των δομικών σωματιδίων (μόρια, άτομα, ελεύθερα ηλεκτρόνια) και συνήθως συμβολίζεται με k ή λ .

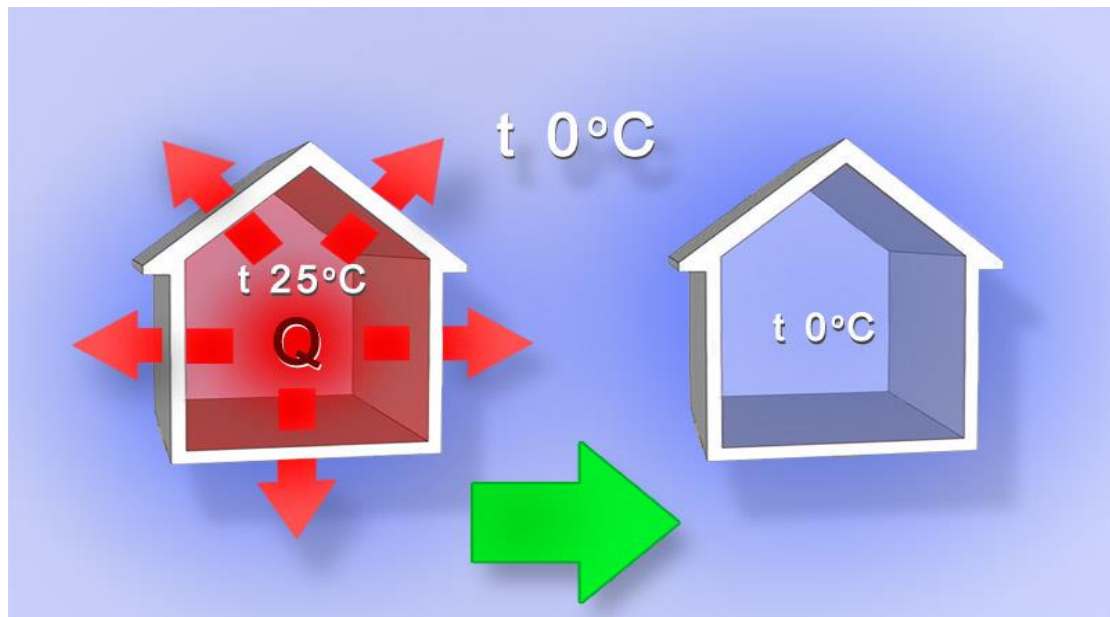
Με απλά λόγια, η θερμική αγωγιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να μεταφέρει τη θερμότητα. Αν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα στο σώμα, τότε η θερμική ενέργεια περνά από το θερμότερο μέρος του στο ψυχρότερο. Η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει λόγω της μεταφοράς ενέργειας κατά τη σύγκρουση των μορίων μιας ουσίας. Αυτό συμβαίνει έως ότου η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σώματος γίνει ίδια. Μια τέτοια διαδικασία μπορεί να συμβεί σε στερεές, υγρές και αέριες ουσίες.

Η Θερμική αγωγιμότητα μετριέται με τον "συντελεστή αγωγιμότητας" ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα. Για να ποσοτικοποιηθεί η θερμική αγωγιμότητα, υπάρχει ένας συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για κάθε υλικό, ο οποίος εξαρτάται από την θερμοκρασία, την πίεση, την μοριακή μάζα, τη κρυσταλλική δομή και τις διαστάσεις του υλικού. Αυτός ο συντελεστής αντικατοπτρίζει την ιδιότητα ενός υλικού να μεταφέρει θερμική ενέργεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού, τόσο καλύτερα μεταφέρεται τη θερμότητα. Αν πρόκειται για μόνωση ενός σπιτιού, τότε πρέπει να επιλεγούν υλικά με μικρή τιμή αυτού του συντελεστή. Όσο μικρότερο είναι, τόσο το καλύτερο. Ανάλογα με την ευκολία της διάδοσης της θερμότητας τα υλικά διακρίνονται σε ευθερμαγωγά, ή καλοί αγωγοί θερμότητας, (όπως π.χ. τα μέταλλα) και σε δυσθερμαγωγά, ή κακοί αγωγοί θερμότητας, ή θερμομονωτικά.

Σύμφωνα με το νόμο αγωγής θερμότητας ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας ή αλλιώς ροή θερμότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Όπου k η θερμική αγωγιμότητα, A το εμβαδό της διατομής δια μέσω της οποίας έχουμε αγωγή, και $\Delta T/\Delta x$ η μεταβολή της θερμοκρασίας σε απόσταση Δx κατά τη φορά αγωγής.



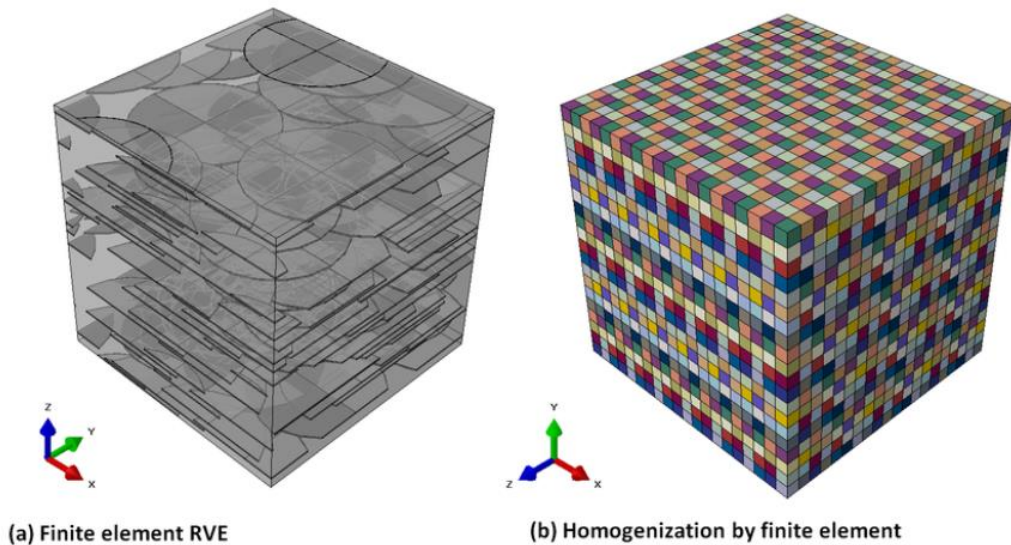
Εικόνα 3: Αναπαράσταση μετάδοσης θερμότητας

1.2.5 Στοιχείο όγκου RVE

Η ομογενοποίηση αφορά τη διαδικασία εξέτασης μιας ομογενούς αναπαράστασης του σύνθετου υλικού που αντιπροσωπεύει το υλικό σημείο όπου είναι εφαρμοσμένες οι οριακές συνθήκες, το οποίο ονομάζεται αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE.

Στη θεωρία των σύνθετων υλικών, ο αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (REV) (ονομάζεται επίσης αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) ή μοναδιαία κυψέλη) είναι ο μικρότερος όγκος στον οποίο μπορεί να γίνει μια μέτρηση που θα δώσει μια τιμή αντιπροσωπευτική του συνόλου. Στην περίπτωση των περιοδικών υλικών, απλώς επιλέγουμε ένα περιοδικό κελί μονάδας (το οποίο, ωστόσο, μπορεί να είναι μη μοναδικό), αλλά στα τυχαία μέσα, η κατάσταση είναι πολύ πιο περίπλοκη. Για όγκους μικρότερους από το RVE, δεν μπορεί να οριστεί μια αντιπροσωπευτική ιδιότητα και η συνεχής περιγραφή του υλικού περιλαμβάνει στατιστικό στοιχείο όγκου (SVE) και τυχαία πεδία. Η ιδιότητα που μας ενδιαφέρει μπορεί να περιλαμβάνει μηχανικές ιδιότητες όπως μέτρο ελαστικότητας, υδρογεωλογικές ιδιότητες, ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες, θερμικές ιδιότητες και άλλες ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή φυσικών συστημάτων.

Τα πολλαπλά σωματίδια RVE αποτελούνται από ένα ή περισσότερα επίπεδα, ειδικότερα τρεις τομείς-μήτρα, 27CB σφαιρικά σωματίδια και τις ενδιάμεσες φάσεις, όπου τα ελαττώματα διαμορφώνονται από τα ημισφαίρια που βρίσκονται στην διασύνδεση μεταξύ σωματιδίων και μήτρας. Αυτό το ομογενοποιημένο στοιχείο θεωρείται για σκοπούς υπολογισμού των τάσεων της μήτρα και της ίνας. Σε μία πολύστρωτη δομή του RVE κάθε στρώμα έχει την δική του μικροδομή. Επίσης, το πάχος είναι δυνατόν να διαφέρει από στρώμα σε στρώμα.



Εικόνα 4: a) Απεικόνιση πεπερασμένων στοιχείων RVE
 b) Απεικόνιση ομογενοποίησης πεπερασμένων στοιχείων

1.3 Προηγμένη θερμομονωτική τσιμεντοκονία

Από τους σημαντικότερους στόχους των μηχανικών, όσων αφορά τις κτιριακές δομές, είναι οι μέγιστες θερμομονωτικές ιδιότητες που μπορούν να αποδοθούν. Εξαιτίας αυτών των απαιτήσεων οι μηχανικοί καλούνται να εξάγουν στην αγορά καινοτόμα σύνθετα υλικά χαμηλού κόστους αλλά λαμβάνοντας υπόψιν και την εξοικονόμηση ενέργειας που απαιτείται σε όλες τις κατασκευές, έτσι οδηγήθηκαν οι επιστήμονες στην εφαρμογή μιας νέας προσέγγισης.

Η Τσιμεντοκονία είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από το τσιμέντο και από τα εγκλείσματα αερογέλης (Aerogel). Είναι ένα καινοτόμο προηγμένο θερμομονωτικό υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες όπως και από το χαμηλό του κόστος. Επιπλέον προτιμάται καθώς χαρακτηρίζεται για την βελτιωμένη ποιότητα, τη μεγαλύτερη αντοχή, την ανθεκτικότητα και βασικότερα στην εξοικονόμηση της ενέργειας, ως προς το περιβάλλον.

Βασικό ρόλο στην μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων της θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας παίζει η περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων και η επίδραση τους σε αυτές. Η τσιμεντοκονία είναι ένα ομογενοποιημένο υλικό, για αυτό το λόγω μπορούν να γίνουν προσεγγιστικές μελέτες με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών ομογενοποίησης. Η αριθμητική προσέγγιση των θερμικών ιδιοτήτων επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FE). 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 θερμικές ιδιότητες του υλικού.

1.3.1 Aerogel

Aerogel (από το λατινικό aer - air και gelatus - frozen) είναι μία κατηγορία υλικών, η οποία αποτελείται από μία γέλη στην οποία η υγρή φάση αντικαθίσταται από την αέρια, χωρίς σημαντική υποβάθμιση της δομής της γέλης. Αποτέλεσμα αυτών, τέτοια υλικά να έχουν ρεκόρ χαμηλής πυκνότητας παρουσιάζουν έναν αριθμό μοναδικών ιδιοτήτων: διαφάνεια, εξαιρετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, κ.λπ. Aerogel που βασίζονται σε άμορφο διοξείδιο του πυριτίου, αλουμίνα και οξειδία χρωμίου και κασσιτέρου είναι κοινά.

Τα Aerogel έχουν ένα πορώδες, συμπαγές δίκτυο που περιέχει θύλακες αέρα, με τους θύλακες αέρα να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του χώρου μέσα στο υλικό. Η έλλειψη στερεού υλικού επιτρέπει στο Aerogel να είναι ελαφρύ. Οι κοιλότητες καταλαμβάνουν τουλάχιστον το 50% του όγκου. Κατά κανόνα, αυτό το ποσοστό φτάνει τα 90-99 και η πυκνότητα κυμαίνεται από 1 έως 150 kg/m³. Δομικά, τα Aerogel είναι ένα δίκτυο που μοιάζει με δέντρο από συγκεντρωμένα νανοσωματίδια μεγέθους 2-5nm και πόρων μεγέθους έως 100nm αυτό κάνει το υλικό παρόλο που είναι επιρρεπής σε ρωγμές, να είναι πολύ ισχυρό δομικά. Το μέσο μέγεθος πόρων και η πυκνότητα μπορούν να ελεγχθούν κατά τη διαδικασία κατασκευής.

Η δομή ενός Aerogel είναι το αποτέλεσμα του πολυμερισμού κολλοειδούς γέλης, όταν μονομερή (απλά μόρια) αντιδρούν με άλλα μονομερή για να σχηματίσουν ένα κολλοειδές διάλυμα ή μια ουσία που αποτελείται από συνδεδεμένα, διασταυρωμένα μακρομόρια με εναποθέσεις υγρού διαλύματος μεταξύ τους. Όταν το υλικό θερμαίνεται έντονα, το υγρό εξατμίζεται και η δεσμευμένη διασταυρούμενη δομή των μακρομορίων παραμένει. Το αποτέλεσμα του πολυμερισμού και της κρίσιμης θέρμανσης είναι η δημιουργία ενός υλικού με πορώδη ισχυρή δομή, το οποίο ταξινομείται ως αερογέλη. Οι παραλλαγές στη σύνθεση μπορούν να αλλάξουν την επιφάνεια και το μέγεθος των πόρων της αερογέλης. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των πόρων, τόσο πιο επιρρεπές στην καταστροφή της αερογέλης.

Το Aerogel δημιουργήθηκε για πρώτη φορά από τον χημικό Samuel Steven Kistler από το Pacific College στο Stockton της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, ως αποτέλεσμα ενός στοιχείου με τον Charles Learned για το ποιος θα μπορούσε να αντικαταστήσει το υγρό στο "ζελέ" με ένα αέριο χωρίς να προκαλέσει συρρίκνωση. Τα πρώτα του αποτελέσματα τα δημοσίευσε το 1931 στο περιοδικό Nature.

Τα Aerogel παράγονται με εκχύλιση του υγρού συστατικού της γέλης με υπερκρίσιμη ξήρανση ή ξήρανση με κατάψυξη. Ο Kistler αντικατέστησε το υγρό στο πήκτωμα με μεθανόλη και στη συνέχεια θέρμανε το πήκτωμα υπό πίεση μέχρι να επιτευχθεί η κρίσιμη θερμοκρασία της μεθανόλης (240 °C). Η μεθανόλη άφησε το πήκτωμα χωρίς να μειώσει τον όγκο. Κατά συνέπεια, το τζελ να «στεγνώνει» αργά σχεδόν χωρίς να συρρικνώνεται και χωρίς να προκαλέσει την κατάρρευση της στερεάς μήτρας στο πήκτωμα λόγω τριχοειδούς δράσης, όπως στη συμβατική εξάτμιση.

Στην αφή, τα Aerogel μοιάζουν με ελαφρύ αλλά σταθερό αφρό. Υπό βαρύ φορτίο, η αερογέλη ραγίζει, αλλά γενικά είναι ένα πολύ ισχυρό υλικό - ένα δείγμα αερογέλης μπορεί να αντέξει φορτίο 2000 φορές το βάρος του.

Τα αεροτζέλ είναι ημιδιαφανή στην εμφάνιση. Λόγω της σκέδασης του φωτός Rayleigh σε δομές που μοιάζουν με δέντρα, εμφανίζονται μπλε στο ανακλώμενο φως και ανοιχτό κίτρινο στο μεταδιδόμενο φως.

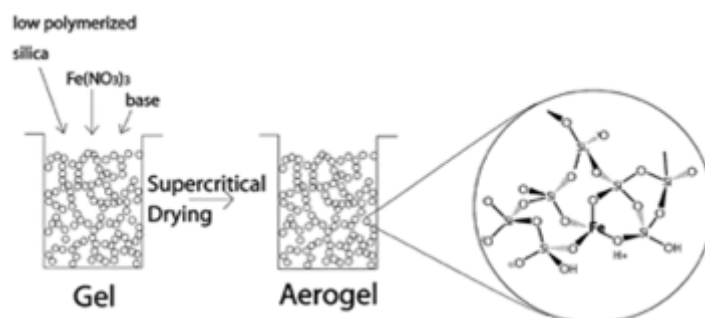
Τα πρώτα αερογέλη κατασκευάστηκαν από σιλικάζέλ. Η μεταγενέστερη εργασία του Kistler περιλάμβανε αερογέλη με βάση την αλουμίνα, το οξείδιο του χρωμίου και το διοξείδιο του κασσιτέρου. Τα αερόπηκτα άνθρακα αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1980.

Τα αερογέλη είναι καλοί θερμικοί μονωτές επειδή ουσιαστικά αναιρούν δύο από τις τρεις μεθόδους μεταφοράς θερμότητας - τη θερμική αγωγιμότητα (αποτελούνται κυρίως από ένα μονωτικό αέριο) και τη μεταφορά (η μικροδομή εμποδίζει την καθαρή κίνηση του αερίου). Είναι καλοί μονωτές επειδή αποτελούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου από αέρια, τα οποία είναι πολύ κακοί αγωγοί της θερμότητας. (Το αερογέλη διοξειδίου του πυριτίου είναι ιδιαίτερα καλός μονωτήρας επειδή το πυρίτιο είναι επίσης κακός αγωγός της θερμότητας· από την άλλη πλευρά, το αερογέλη από μέταλλο ή άνθρακα θα ήταν λιγότερο αποτελεσματικό.) Είναι καλοί αναστολείς μεταφοράς, επειδή ο αέρας δεν μπορεί να κυκλοφορήσει μέσω του πλέγματος.

Τα αερογέλη είναι τα ίδια υδρόφιλα και εάν απορροφούν υγρασία συνήθως υφίστανται δομικές αλλαγές όπως συστολή και φθορά, αλλά η αποσύνθεση μπορεί να αποτραπεί μέσω χημικής επεξεργασίας.

Τέλος εκτός από τις πολυάριθμες τεχνικές εφαρμογές λόγω των παραπάνω μοναδικών ιδιοτήτων, το αεροζέλ είναι περισσότερο γνωστό για τη χρήση του στο έργο Stardust ως υλικό για την παγίδευση κοσμικής σκόνης. Επίσης δεδομένου ότι ο δείκτης διάθλασης των αεροπηκτών είναι ενδιάμεσος μεταξύ των δεικτών διάθλασης αερίων και υγρών (στερεών) ουσιών, το αερογέλη χρησιμοποιείται ως θερμαντικό σώμα σε ανιχνευτές Cherenkov φορτισμένων σωματιδίων. Τα αεροζέλ ακόμη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φίλτρα αερίων και υγρών. Επιπλέον ένα αεροζέλ με βάση το οξείδιο του σιδήρου με νανοσωματίδια αλουμινίου μπορεί να χρησιμεύσει ως εκρηκτικό (αναπτύχθηκε από το Lawrence Livermore National Laboratory, ΗΠΑ).

Τα Αεροζέλ μπορούν να κατασκευαστούν από μια ποικιλία χημικών ενώσεων με διαφορετικές χρήσεις και ιδιότητες κάθε φορά. Γιαυτό υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη αεροτζέλ όπως : αεροτζέλ άνθρακα χαλαζία πυριτίου κτλ. Στη παρούσα πτυχιακή εργασία θα χρησιμοποιηθεί το αεροτζέλ πυριτίου αλλιώς Αεροζέλ Silica.



Εικόνα 5: Χημική παραγωγή Aerogel

1.3.2 Aerogel Silica

Aerogel Silica ή αεροτζέλ πυριτίου είναι ο πιο κοινός τύπος αερογέλης και ο κύριος τύπος που χρησιμοποιείται ή μελετάται στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής υψηλής τεχνολογίας. Το πυρίτιο στερεοποιείται σε τρισδιάστατα, αλληλένδετα συμπλέγματα που αποτελούν μόνο το 3% του όγκου. Επομένως, η αγωγιμότητα μέσω του στερεού είναι πολύ χαμηλή. Το υπόλοιπο 97% του όγκου αποτελείται από αέρα σε εξαιρετικά μικρούς νανοπόρους. Ο αέρας έχει λίγο χώρο να κινηθεί, αναστέλλοντας τόσο τη μεταφορά όσο και την αγωγιμότητα της αέριας φάσης.

Λόγω της εξαιρετικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς ($0,012 \text{ W/ m}^1\text{K}^{-1}$) τους, σε συνδυασμό με την υψηλή οπτική διαφάνεια, καθώς και το υψηλό πορώδες (80-99,8%) και τη χαμηλή πυκνότητα (3 kg/m^3), τα αεροτζέλ πυριτίου χρησιμοποιούνται ευρέως στη θερμομόνωση, στη φυσική, στην περιβαλλοντική αποκατάσταση, στις οπτικές συσκευές και σε άλλες εφαρμογές. Η θερμομόνωση είναι μακράν η μεγαλύτερη αγορά για αερογέλη πυριτίου, τα οποία είναι ιδανικά υλικά όταν ο χώρος είναι περιορισμένος. Ένα μειονέκτημα των αερογέλη πυριτίου είναι η ευθραυστότητά τους. Ο σπλισμός ινών και τα συνδετικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεραστεί αυτό για εφαρμογές μεγάλου όγκου σε κτιριακές και βιομηχανικές μονώσεις. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε που Μέχρι το 2011, το silica aerogel κατείχε 15 εγγραφές στα World Records Guinness για ιδιότητες υλικών, συμπεριλαμβανομένου του καλύτερου μονωτικού και στερεού χαμηλότερης πυκνότητας

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 Aerogel Silica

2. Πρόγραμμα DIGIMAT

2.1 Πρόγραμμα επίλυσης μοντέλων με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι προσέγγισης των θερμικών ιδιοτήτων ενός ομογενοποιημένου σύνθετου υλικού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την επίλυση των μοντέλων προσομοίωσης, με σκοπό την εύρεση θερμικών ιδιοτήτων τσιμεντοκονίας με εγκλείσματα αερογέλης. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FE) και πιο συγκεκριμένα η θερμική προσομοίωση έγινε με το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE (Representative Volume Element) μέσω του προγράμματος Digimat.

2.2 Digimat

Το Digimat είναι μια προηγμένη τεχνολογία μοντελοποίησης υλικών που επιταχύνει την διαδικασία επίλυσης προβλημάτων ομογενοποίησης, είναι ένα εύχρηστο και προσιτό πρόγραμμα. Επίσης χρησιμοποιείται για την εκτέλεση λεπτομερών αναλύσεων υλικών παρέχοντας από διάφορους προμηθευτές ένα εκτενές σύνολο υλικών και μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω με την προσθήκη δεδομένων οποιουδήποτε υλικού επιθυμεί ο χρήστης να εισάγει ακόμα και επιλογές που σχετίζονται με τις μεθόδους εκτίμησης των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού όπως, Digimat-FE, Digimat-MF, Digimat-CAE, Digimat-MX και πολλές άλλες. Ακόμη παρέχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα λογισμικά όπως ANSYS, Abaqus, Marc και άλλα.

2.3 Digimat FE

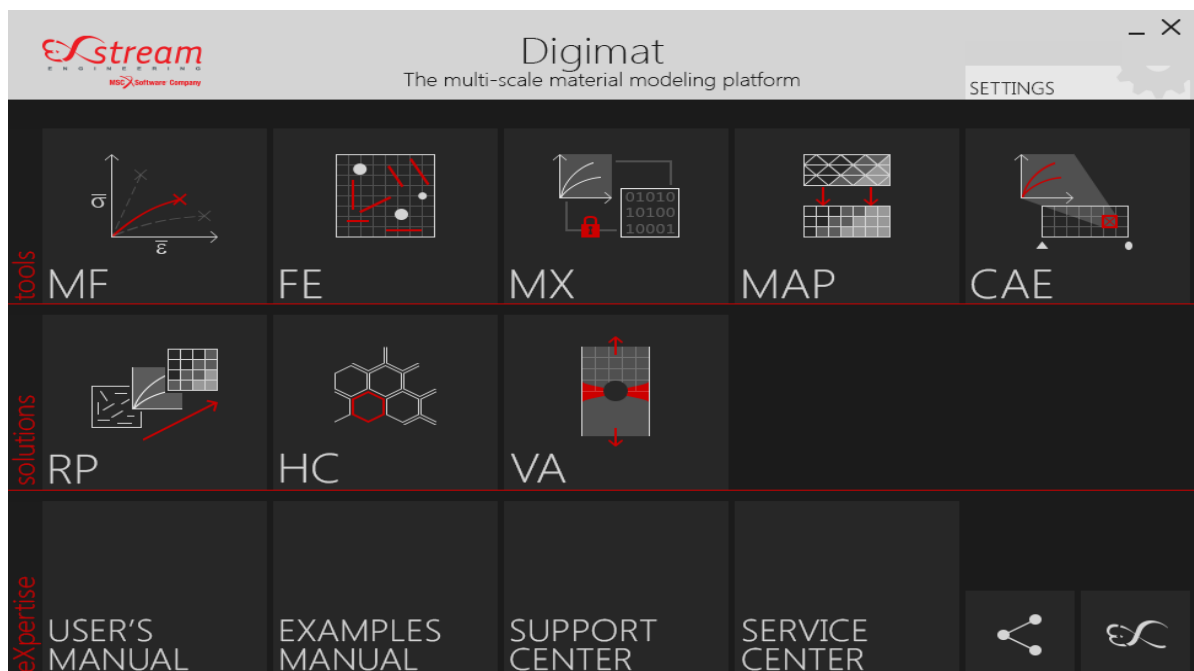
Το Digimat-FE, είναι το υπολογιστικό εργαλείο του προγράμματος που σχετίζεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή αποτελεσμάτων στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Το σύνολο των δυνατοτήτων που προσφέρεται είναι εκτεταμένο και ο χρήστης μπορεί να κάνει εφικτή την επίλυση εξαιρετικά πολύπλοκων υλικών μικροδομής, με μεγάλη ακρίβεια και σχετικά μικρό κόστος CPU για γραμμικά προβλήματα. Ωστόσο η επίλυση του ομογενοποιημένου στοιχείου γίνεται ευκολότερα λόγω της ύπαρξης των επεξεργαστών meshing, solver και post.

Σε ένα Digimat-FE μπορούν να δημιουργηθούν δύο διαφορετικοί τύποι RVE οι οποίοι είναι 2D ή 3D. Τα 3D RVE τα οποία είναι τα πιο κοινά. Επιτρέπουν την ακριβέστερη τρισδιάστατη μοντελοποίηση με μεγάλο εύρος μικροδομών και φυσικών φαινομένων. Αντίθετα τα 2D επίπεδα στελέχους RVE. Ισχύουν μόνο για συγκεκριμένες μικροδομές π.χ.: Όταν η μήτρα είναι ενισχυμένη με μεγάλες συνεχής ίνες.

2.3.1 Μεθοδολογία εξαγωγής αποτελεσμάτων

Η διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων ενός ομογενοποιημένου στοιχείου όγκου (RVE) μέσω του προγράμματος Digimat με μία σειρά βημάτων που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω :

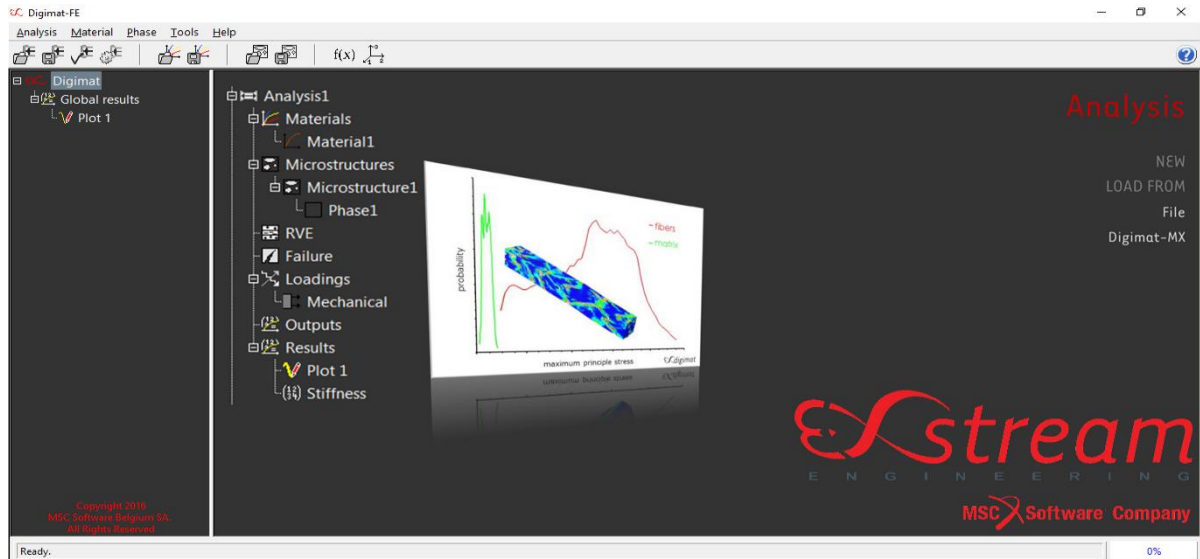
Ανοίγοντας το πρόγραμμα Digimat εμφανίζεται μία σειρά εργαλείων, που δίνουν τη δυνατότητα στον χειριστή να επιλέξει την μέθοδο επίλυσης του προβλήματος ομογενοποίησης του RVE, όπως και αναλυτικά εγχειρίδια με σκοπό την εκμάθηση λειτουργίας του προγράμματος διευκολύνοντας τον χρήστη. Έτσι επιλέγοντας το κατάλληλο εργαλείο ξεκινάει η διαδικασία επίλυσης.



Εικόνα 7 : Menu για την επιλογή ανάλυσης Digimat

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, η μέθοδος επίλυσης που θα ακολουθηθεί, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή επιλέγεται το εικονίδιο FE.

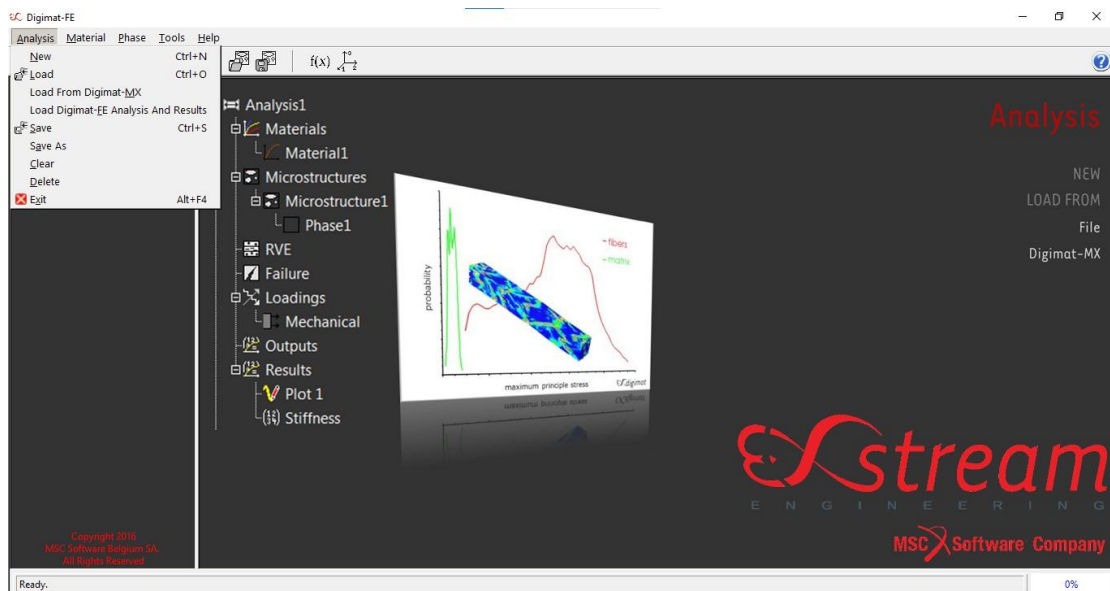
Στη συνέχεια αφού επιλεχθεί το κουμπί FE, εμφανίζεται το γενικό menu του Digimat-FE στο οποίο επιλέγουμε το κουμπί Analysis και στη συνέχεια την επιλογή new για να δημιουργήσουμε ένα νέο αρχείο προκυμμένου να ξεκινήσει η διαδικασία επίλυσης .



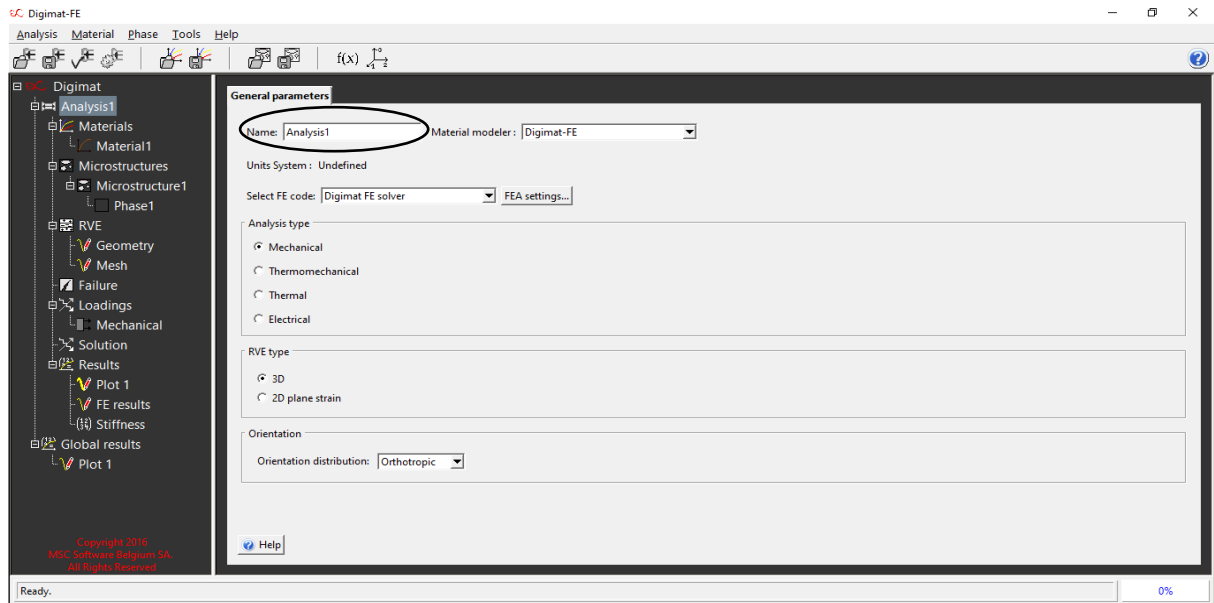
Εικόνα 8 : Menu Digimat-FE

Στη συνέχεια με την δημιουργία νέας ανάλυσης αυτόματα ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο ο χρήστης ορίζει το όνομα της ανάλυσης, τον τύπο της ανάλυσης το τύπο του στοιχείου όγκου RVE, τον επεξεργαστή solver και άλλες παραμέτρους.

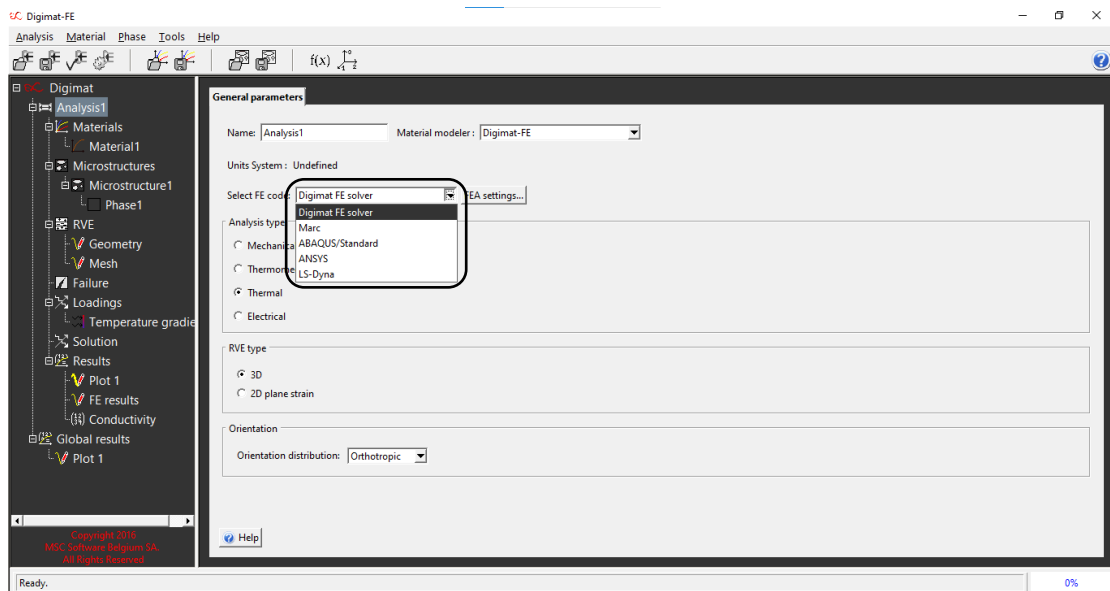
Για την επιλογή του solver που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά την επίλυση οφείλεται να επιλεγεί από την αρχή, η επιλογή επηρεάζει ποια μοντέλα υλικών, ποιες επιλογές μοντελοποίησης και πλέγματος είναι διαθέσιμες. Υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι τύποι-λογισμικά όπως Ansys, Abaqus/standard, Marc κτλ., όμως στην προκειμένη ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί η επιλογή Digimat FE solver.



Εικόνα 9 : Menu Analysis



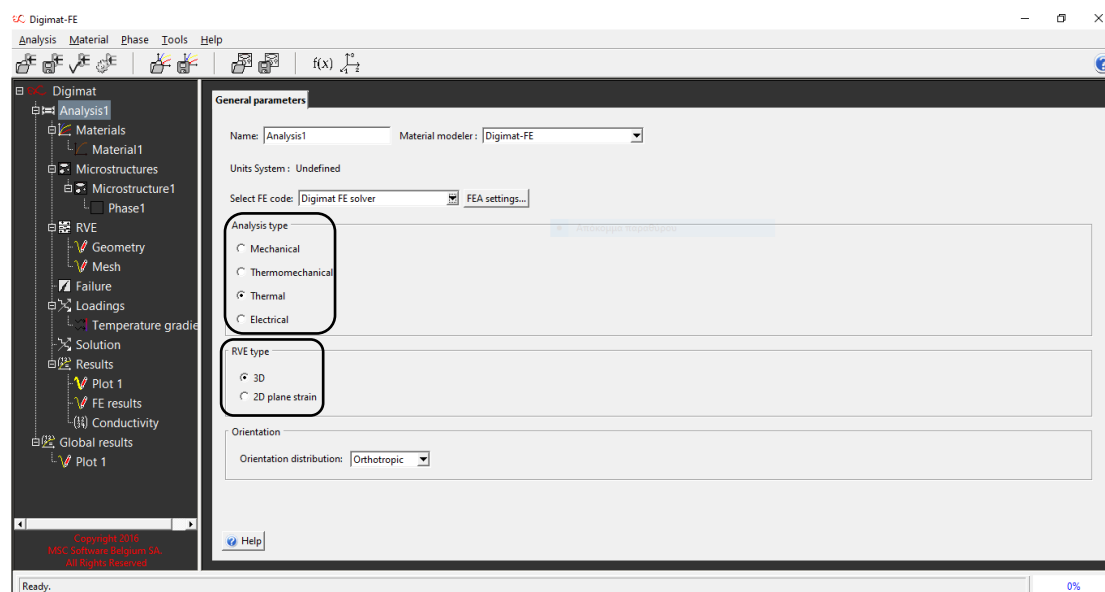
Εικόνα 10 : Ονομασία ανάλυσης



Εικόνα 11 : Επιλογή επεξεργαστή solver

Το πρόγραμμα προσφέρει τέσσερις επιλογές της ανάλυσης για τον υπολογισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι τέσσερις αυτοί τύποι είναι η μηχανική ανάλυση που ορίζει την αντίστοιχη μηχανική φόρτιση, η θερμοδυναμική ανάλυση που ορίζει την αντίστοιχη θερμική και μηχανική φόρτισης, η θερμική ανάλυση που ορίζει την αντίστοιχη θερμική φόρτιση. και η ηλεκτρική ανάλυση που ορίζει την αντίστοιχη ηλεκτρική φόρτωση. Οι τύποι είναι καθορισμένοι για τα φορτία που πρόκειται να εφαρμοστούν. Η συγκεκριμένη ανάλυση θα είναι θερμική, καθώς ο κύριος στόχος της ανάλυσης αυτής είναι η εύρεση των θερμικών ιδιοτήτων του υλικού. Αυτή η επιλογή απαιτεί τον ορισμό της αντίστοιχης θερμικής φόρτισης, δηλ. μια διαβάθμιση θερμοκρασίας, προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική απόκριση του RVE. Για θερμικές αναλύσεις, πρέπει να εφαρμοστεί μια διαβάθμιση θερμοκρασίας σε όλο το στοιχείο όγκου. Τέτοια φόρτωση είναι μονοαξονική και μπορεί να εφαρμοστεί ακολουθώντας τους τρεις τύπους συνoriaκών συνθηκών .

Έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη πως το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE είναι 2D ή 3D, έτσι ανάμεσα στις γενικές παραμέτρους μπορεί ο χρήστης να επιλέξει ποιον τύπο επιθυμεί, παρακάτω η επιλογή είναι 3D.



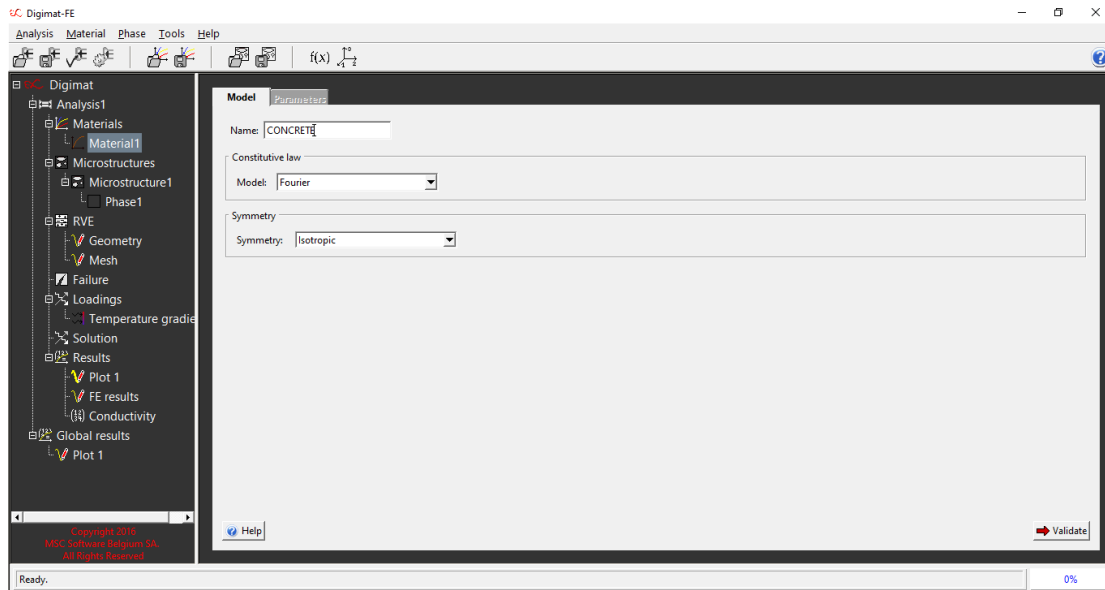
Εικόνα 12 : Τύποι ανάλυσης και τύποι RVE

Στη συνέχεια ο χρήστης εισάγει το όνομα του υλικού, το μαθηματικό μοντέλο ανάλυσης όπου το πρόγραμμα δίνει πολλές διαφορετικές επιλογές όπως Ohm, Fourier κτλ. Και την συμμετρία του υλικού. Η ανάλυση αφορά την επίδραση των εγκλεισμάτων αερογέλης στη θερμομονωτική τσιμεντοκονία, η οποία όπως ήδη έχει αναφερθεί, ένα ομογενοποιημένο υλικό που αποτελείται από τσιμέντο και αερόγελη. Οι βασικές ιδιότητες που αφορούν το κύριο υλικό, το τσιμέντο, είναι γνωστές και έχουν τις παρακάτω τιμές, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο βήμα που θα συμπληρωθούν οι παράμετροι του τσιμέντου.

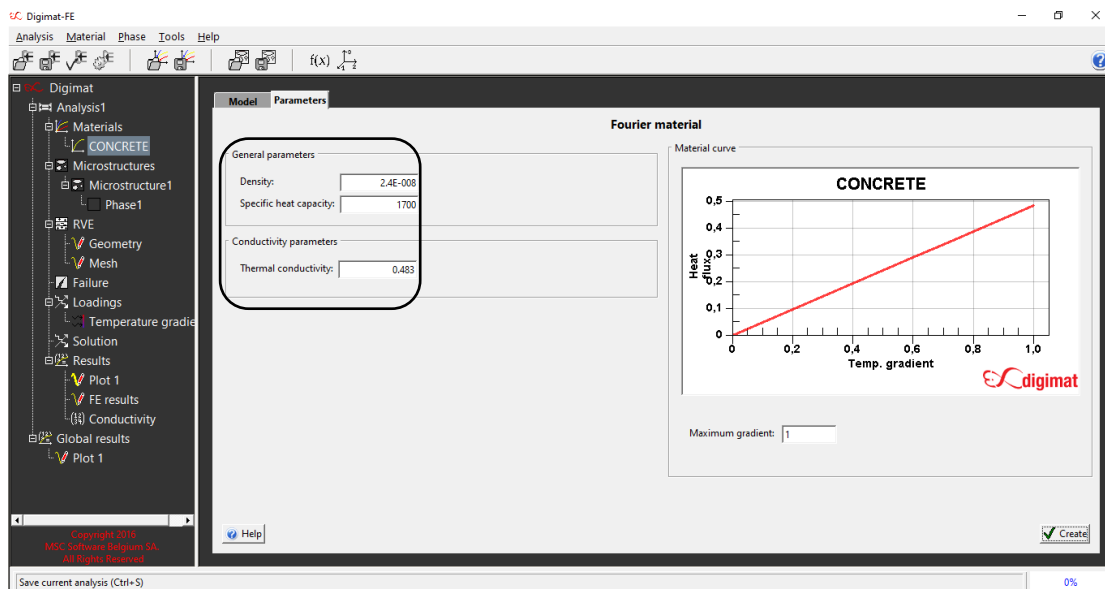
Πίνακας 2 : Παράμετροι του τσιμέντου

Πυκνότητα	Ειδική θερμοχωρητικότητα	Θερμική αγωγιμότητα
2400 (kg/m ³)	1700 (J×kg ⁻¹ ×K ⁻¹)	0.483 (W/m×K)

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



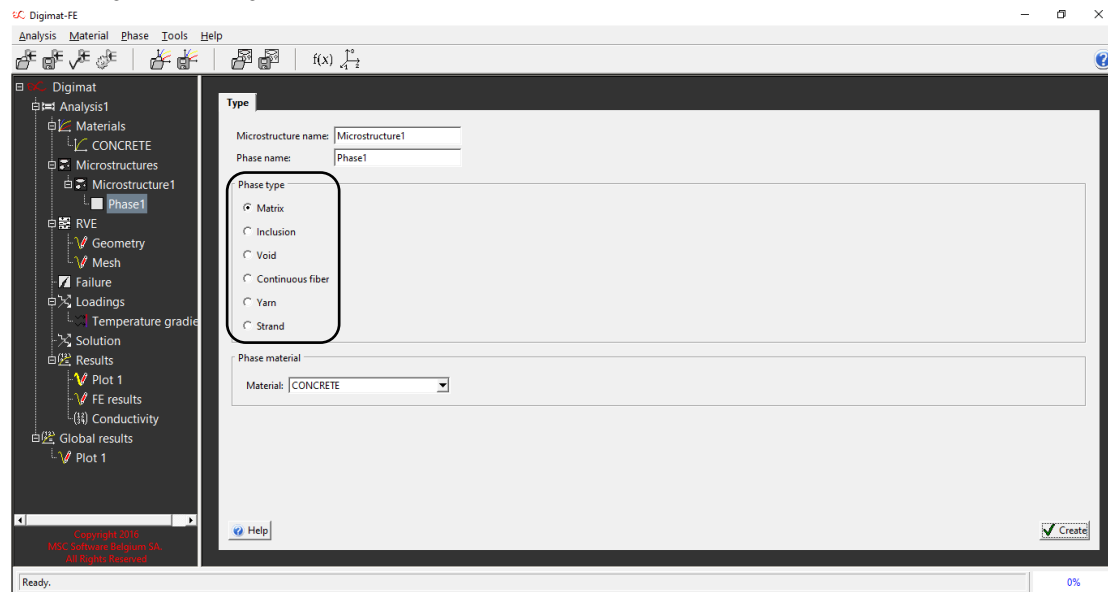
Εικόνα 13 : Εισαγωγή ονόματος υλικού και καταχώρησης του



Εικόνα 14 : Εισαγωγή παραμέτρων τσιμέντου

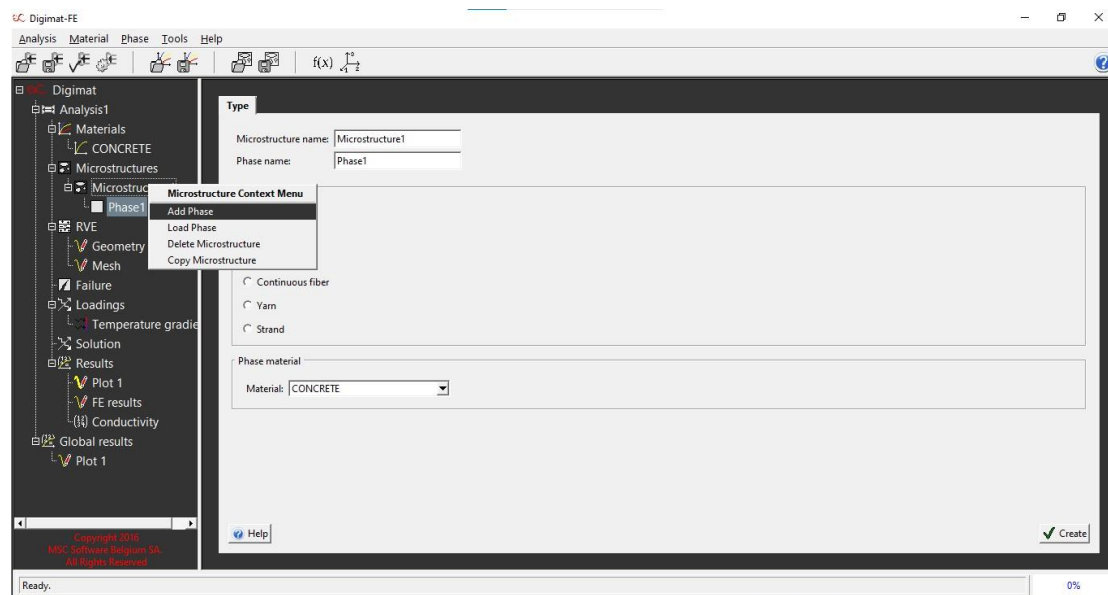
Αφού καθορίστηκε το υλικό στα προηγούμενα βήματα πλέον απομένει ο ορισμός της μικροδομής του. Η μικροδομή του υλικού καθορίζεται από μία ποικιλία επιλογών ανάλογα τον τύπο φάσης που επιθυμεί ο χειριστής. Το συγκεκριμένο υλικό αποτελείται από μια μήτρα (Matrix) και από εγκλείσματα αέρα όπου αυτά πρέπει να οριστούν μέσω παραμέτρων. Για αυτή την εισαγωγή των παραμέτρων ο χρήστης επιλέγει το κουμπί Phase 1, όπου εάν επιθυμεί γίνεται αλλαγή του ονόματος στο αντίστοιχο πλαίσιο.

Ορισμός ανάλυσης:



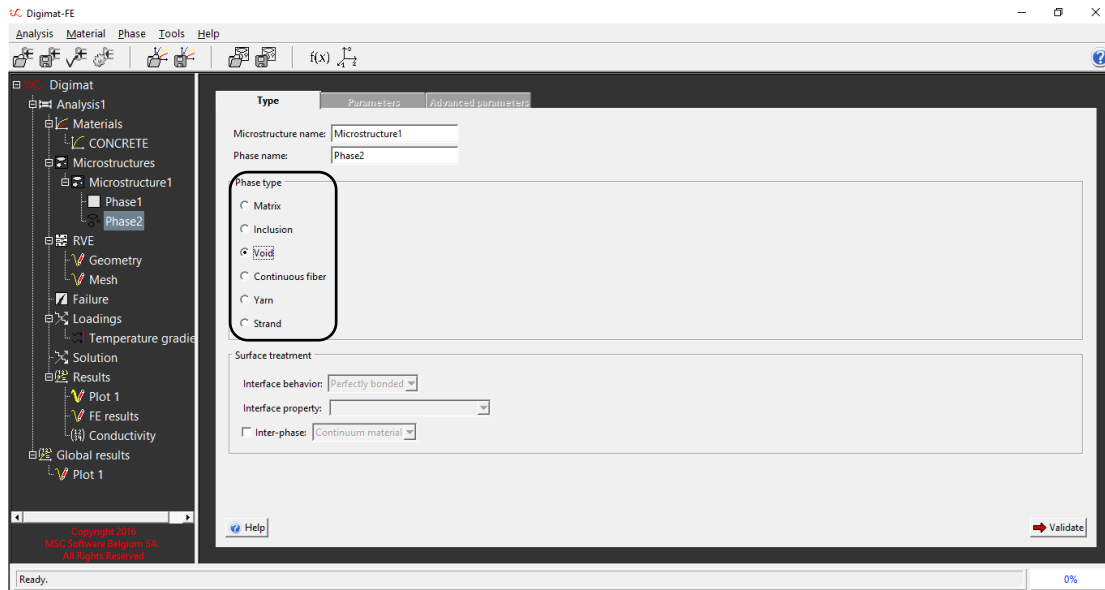
Εικόνα 15 : Επιλογή τύπου φάσης και δημιουργίας της

Αφού έχει πλέον δημιουργηθεί η μήτρα απομένει να οριστούν τα εγκλείσματα αέρα. Για τον ορισμό των εγκλεισμάτων αέρα απαιτείται να δημιουργηθεί μία νέα φάση με διαφορετικό τύπο φάσης αυτή τη φορά όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 16 : Δημιουργία νέας φάσης

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία τα εγκλείσματα αερογέλης θεωρήθηκαν ως κενά (Voids), διότι οι τιμές των θερμικών ιδιοτήτων είναι πολύ μικρές επομένως τις θεωρούμε αμελητέες. Ακολουθεί λοιπόν, η ίδια διαδικασία όπως πριν με τη διαφορά ότι αντί για την επιλογή Matrix θα επιλεγεί η επιλογή Voids.



Εικόνα 17 : Επιλογή τύπου φάσης και δημιουργίας της

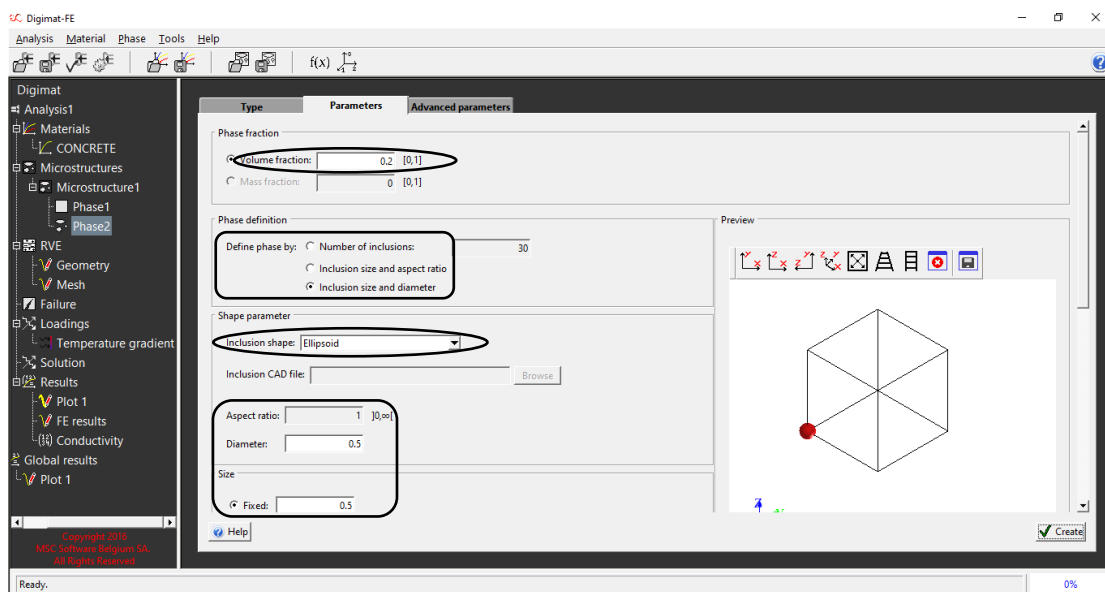
Αφού πλέον ορίστηκε η νέα φάση σειρά έχουν να συμπληρωθούν οι παράμετροι των σφαιριδίων που πρέπει να καταχωρηθούν όπως η περιεκτικότητα τους σύμφωνα με τα όρια που δίνει το ίδιο το πρόγραμμα [0,1] ,το σχήμα τους και το μέγεθος τους όπου μπορεί να γραφτεί ως διάμετρος ή και ακτίνα.

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση οι τιμές που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 3 : Παράμετροι σφαιριδίων

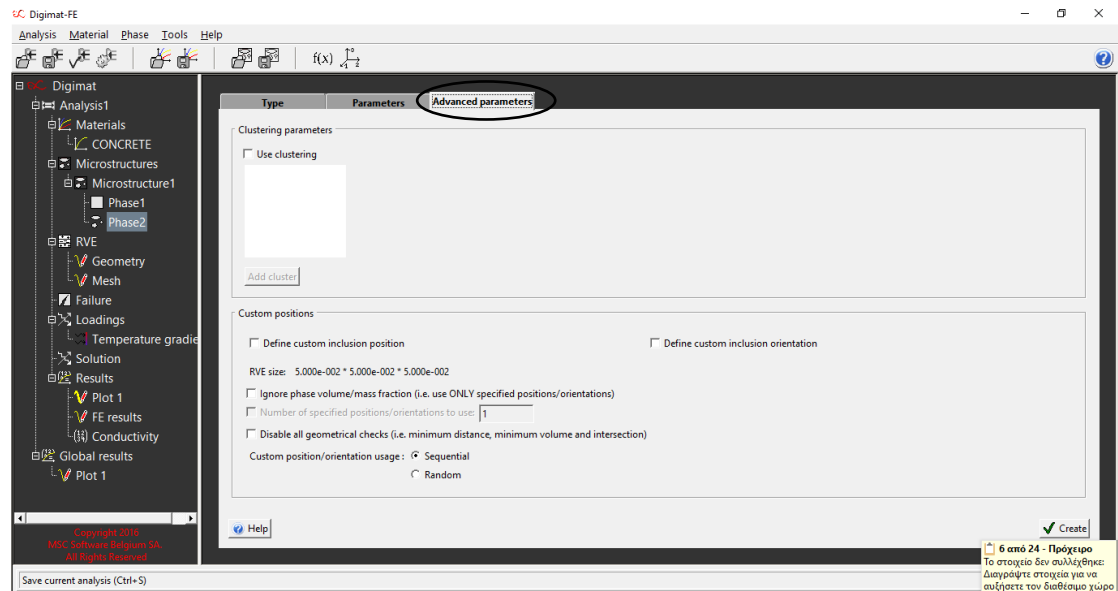
Περιεκτικότητα	Διάμετρος
20 (%)	0.5 (mm)

Το σχήμα των σφαιριδίων για αυτή τη περίπτωση θα είναι ελλειψοειδείς μεταξύ πολλών άλλων που δίνει τη δυνατότητα το Digimat.

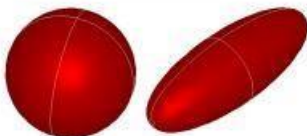









Εικόνα 18 : Ορισμός παραμέτρων των Voids

Ωστόσο, εάν ο χρήστης επιθυμεί τη δημιουργία μικροδομής με συγκεκριμένες συντεταγμένες το Digimat έχει τη δυνατότητα αυτή πηγαίνοντας στο παράθυρο Advanced parameters. Είναι σημαντικό ο χρήστης να επιλέξει τις συγκεκριμένες συντεταγμένες, επειδή εάν έχει ήδη ορισθεί η περιεκτικότητα από το προηγούμενο παράθυρο το πρόγραμμα αγνοεί τις νέες συντεταγμένες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν τρέξει το πρόγραμμα και δημιουργηθεί η γεωμετρία θα εμφανιστεί η περιεκτικότητα που αντιστοιχεί στον προσωποποιημένο πίνακα.

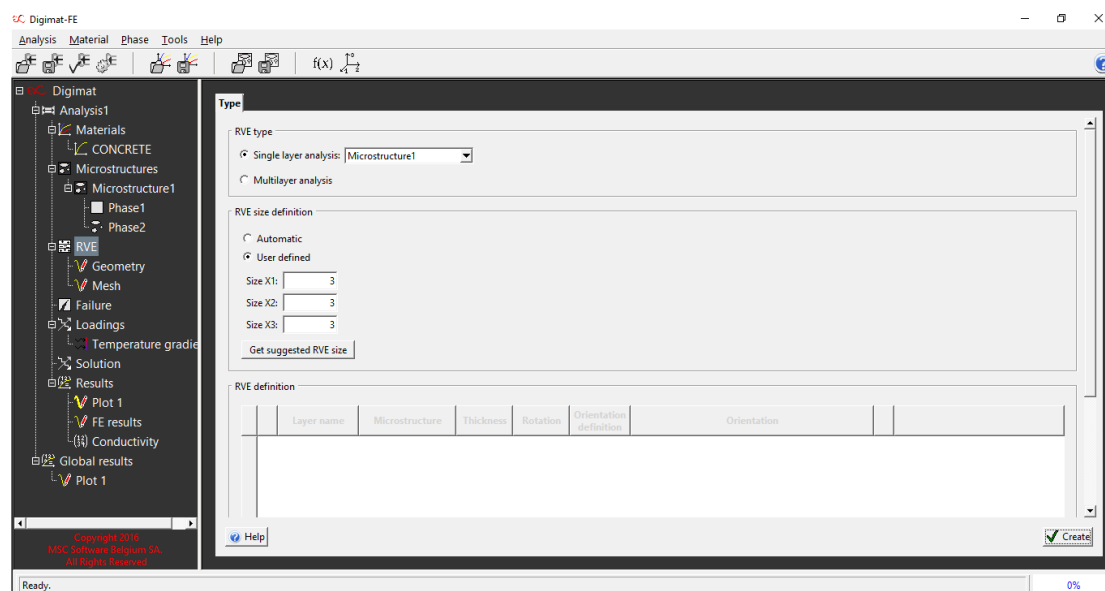


Εικόνα 19 : Advanced parameters

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

Εικόνα 20 : Επιλογές σχημάτων των Voids

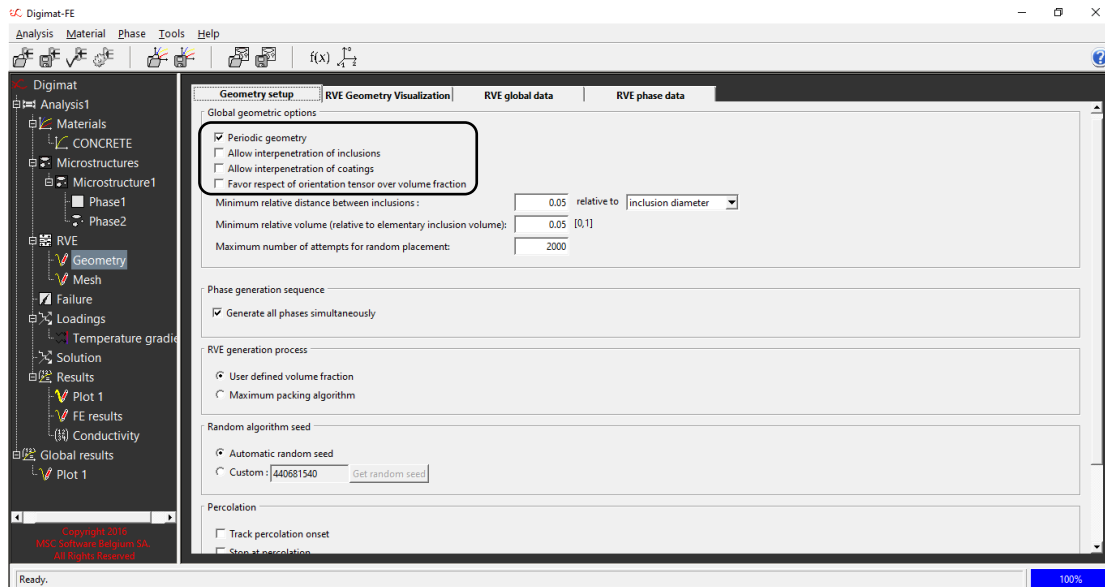
Αφού δημιουργήθηκε η μικροδομή του υλικού, εντάσσεται πλέον στην ανάλυση ο ορισμός του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου RVE, όπου επιλέγοντας το κουμπί RVE μπορούν να προσαρμοστούν οι διαστάσεις του RVE που επιθυμεί ο χρήστης. Οι διαστάσεις x, y, z είναι είτε αυτοματοποιημένες από το πρόγραμμα, είτε εισάγονται από τον χρήστη. Ύστερα από όλη την διαδικασία που ακολουθήθηκε παραπάνω για την μοντελοποίηση του RVE ακολουθεί η διαδικασία της γεωμετρίας και της διακριτοποίησης.



Εικόνα 21 : Διαστάσεις RVE

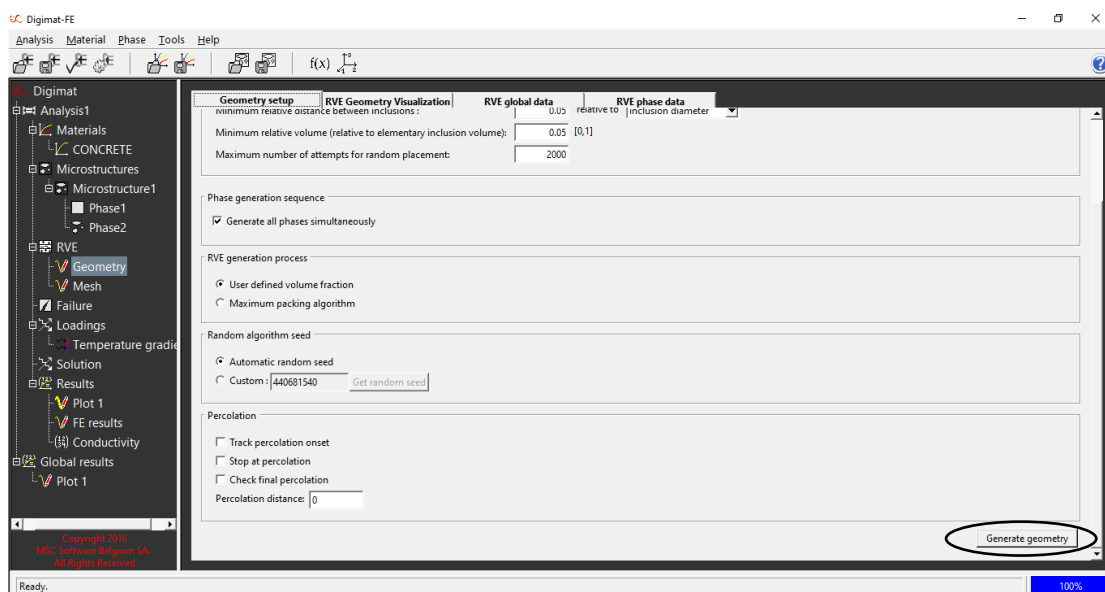
Ύστερα από όλη την διαδικασία που ακολουθήθηκε παραπάνω για την μοντελοποίηση του RVE ακολουθεί η διαδικασία της γεωμετρίας και της διακριτοποίησης.

Στην διαδικασία της γεωμετρίας ο χειριστής μπορεί να δημιουργήσει τη γεωμετρία του RVE προσομοιώνοντας τη μικροδομή που έχει οριστεί. Στο πρώτο παράθυρο Geometry Setup υπάρχουν οι επιλογές : περιοδική γεωμετρία, αλληλοδιείσδυση στοιχείων, αλληλοδιείσδυση ορίων, όπου κάθε φορά ο χειριστής επιλέγει ότι χρειάζεται κάθε φορά. Σε αυτή την ανάλυση έχει επιλεγεί μόνο η περιοδική γεωμετρία, δηλαδή ορίστηκαν συνοριακές συνθήκες συμμετρίας στα όρια του RVE. Έπειτα πατώντας το κουμπί Generate geometry δημιουργείτε αυτόματα η επιθυμητή γεωμετρία.



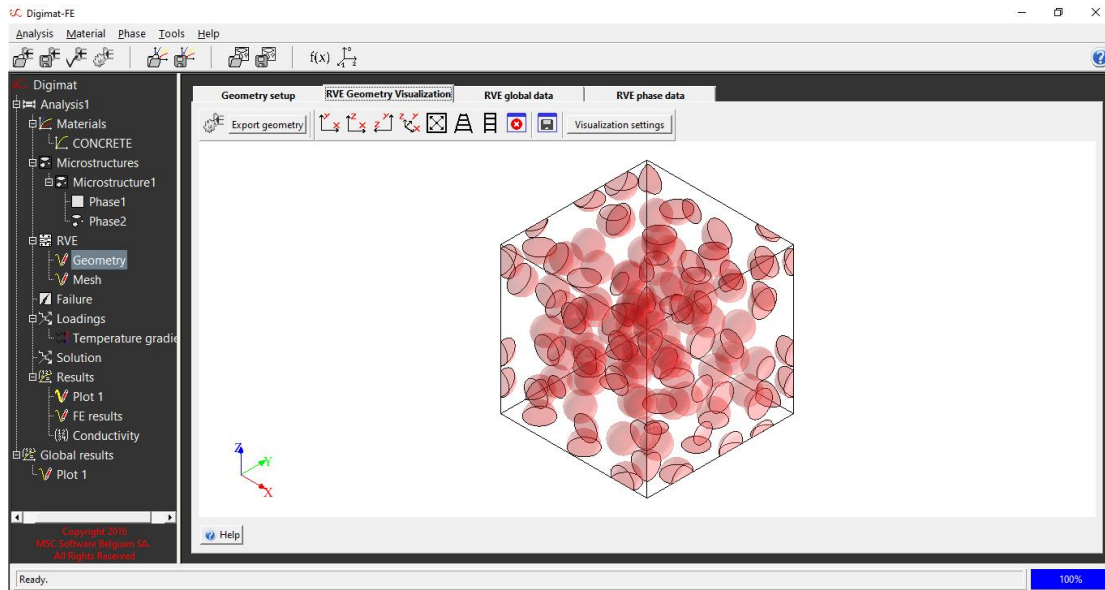
Εικόνα 22 : Ορισμός συνοριακών συνθηκών συμμετρίας στα όρια του RVE

Έπειτα πατώντας το κουμπί Generate geometry δημιουργείτε αυτόματα η επιθυμητή γεωμετρία.



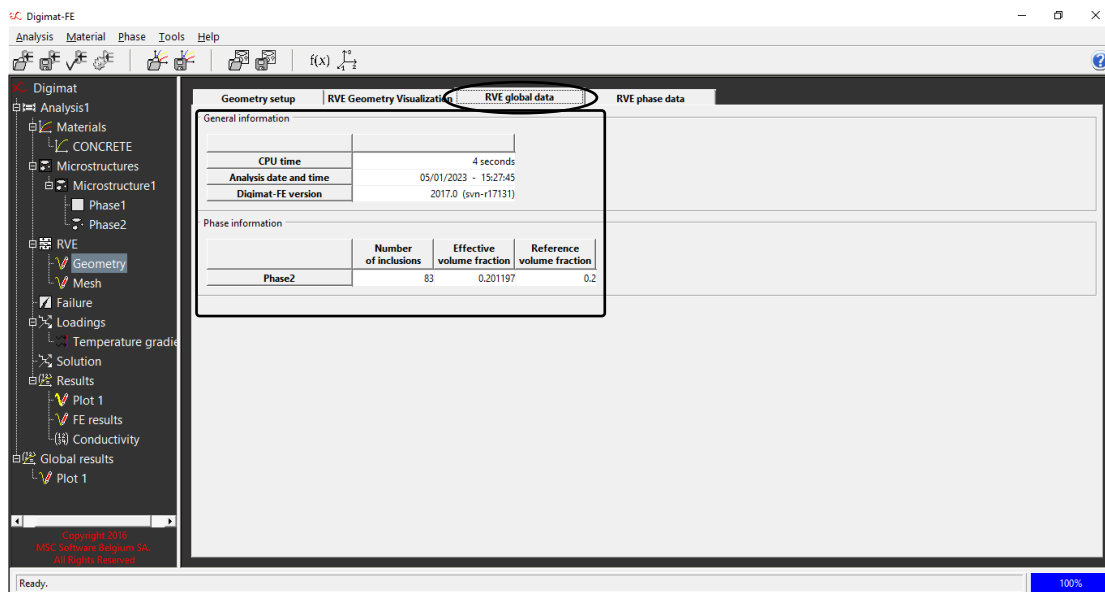
Εικόνα 23 : Δημιουργία γεωμετρίας

Όταν η φόρτωση της γεωμετρίας ολοκληρωθεί το προσομοιωμένο μοντέλο εμφανίζεται αυτόματα, στην οθόνη σε ξεχωριστό παράθυρο που ονομάζεται RVE Geometry Visualization.



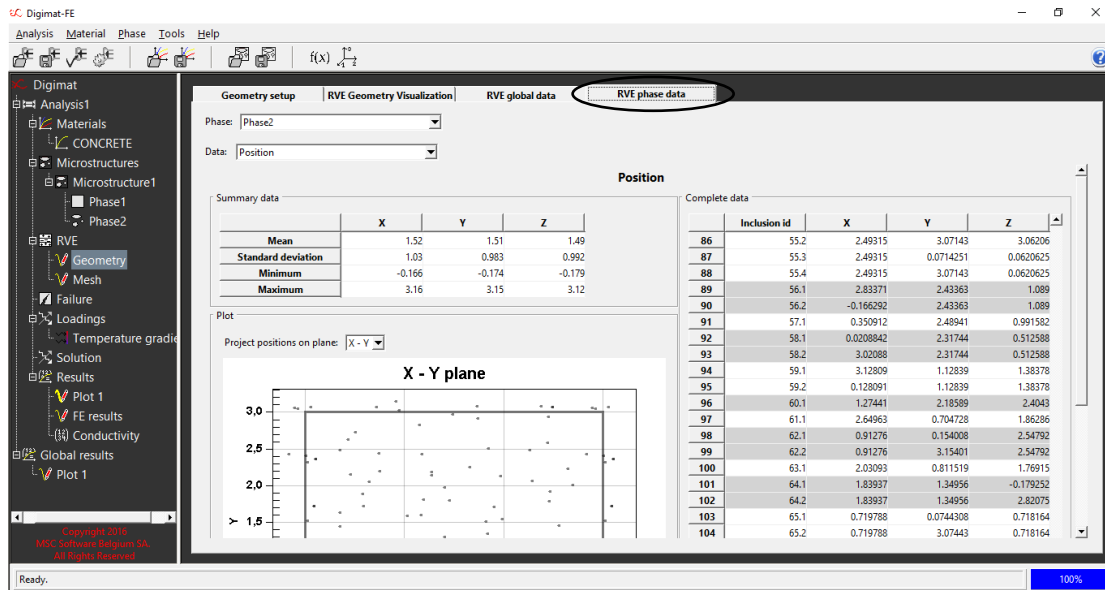
Εικόνα 24 : Απεικόνιση μοντέλου RVE

Στο επόμενο παράθυρο με ονομασία RVE Global data καταγράφονται σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που κατάφεραν να επιτευχθούν όπως ο χρόνος εκτέλεσης της μοντελοποίησης, ο αριθμός των στοιχείων της μικροδομής, η περιεκτικότητα που έχει επιτευχθεί καθώς και η περιεκτικότητα που είχε δηλωθεί από τον χρήστη στο αντίστοιχο πλαίσιο στις παραμέτρους των Voids.

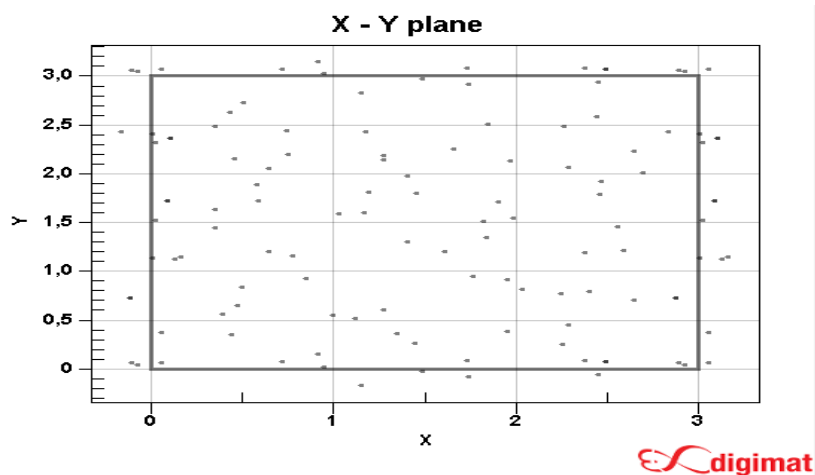


Εικόνα 25 : Πληροφορίες αναφορικά της γεωμετρίας RVE

Στο παρακάτω παράθυρο, αναγράφεται ένας πίνακας με τις συντεταγμένες των στοιχείων και ένα διάγραμμα 2D με την απεικόνιση των στοιχείων.

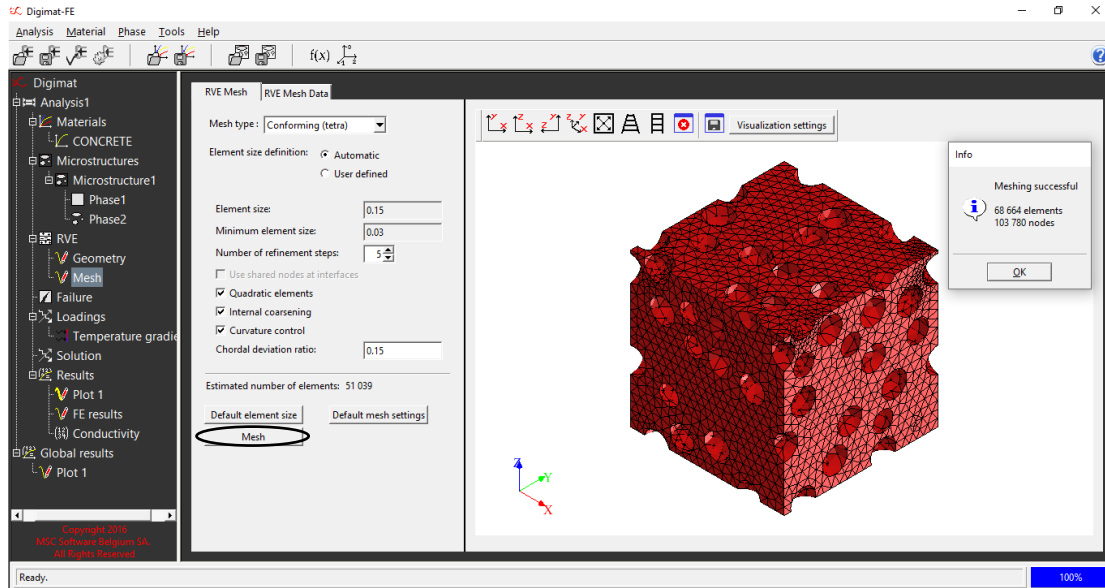


Εικόνα 26 : Πίνακας συντεταγμένων γεωμετρίας RVE



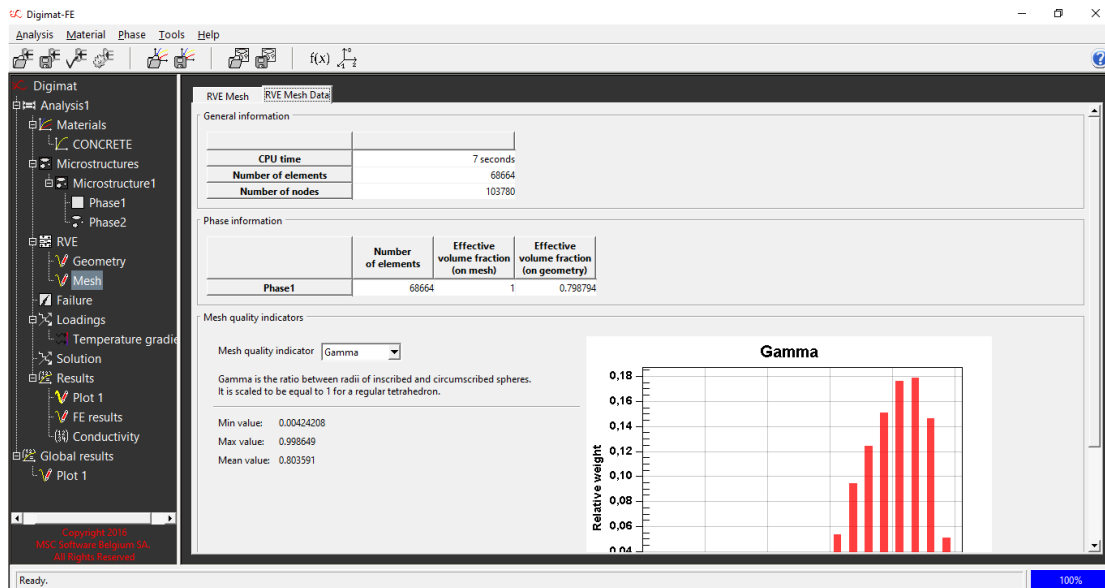
Εικόνα 26 : 2D απεικόνιση διαγράμματος συντεταγμένων γεωμετρίας RVE

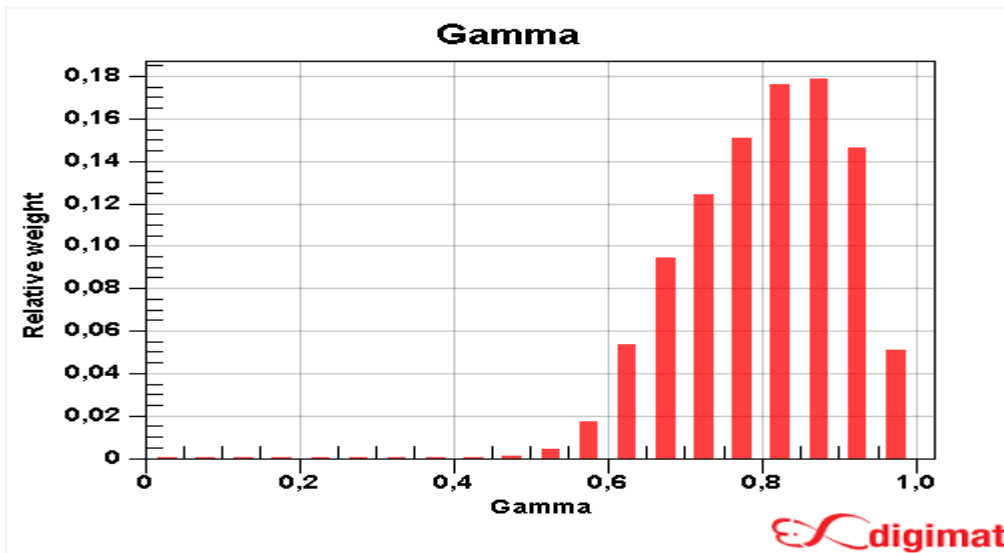
Στο επόμενο βήμα, σειρά έχει η διαδικασία της διακριτοποίησης. Αφού η διαδικασία της δήλωσης της γεωμετρίας ολοκληρωθεί σειρά έχει το Mesh, όπου χωρίζει την γεωμετρία σε πεπερασμένα στοιχεία. Από την διακριτοποίηση γνωστοποιούνται οι κόμβοι καθώς και τα διακριτοποιημένα στοιχεία. Παρόλο που υπάρχουν βασικές αυτοματοποιημένες επιλογές, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει το Mesh size. Από αυτό εξαρτώνται και αλλάζουν οι πληροφορίες που λαμβάνονται μέσω της διακριτοποίησης. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι όταν η τιμή του Mesh size γίνει πολύ χαμηλή τότε η διακριτοποίηση καθυστερεί να γίνει ακόμα και να μην πραγματοποιηθεί. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας και την εξαγωγή του μοντέλου διακριτοποίησης επιλέγεται το κουμπί Mesh όπως φαίνεται παρακάτω και έτσι εμφανίζεται ένα 3D μοντέλο όπως και ο αριθμός των Voids που επιτεύχθηκαν.



Εικόνα 28 : Απεικόνιση μοντέλου διακριτοποίησης RVE

Στο επόμενο παράθυρο, με ονομασία RVE Mesh data καταγράφονται σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά που κατάφεραν να επιτευχθούν, όπως ο χρόνος εκτέλεσης της μοντελοποίησης, ο αριθμός των στοιχείων της μικροδομής κ.α. πληροφορίες που αφορούν την διακριτοποίηση που πραγματοποιήθηκε.

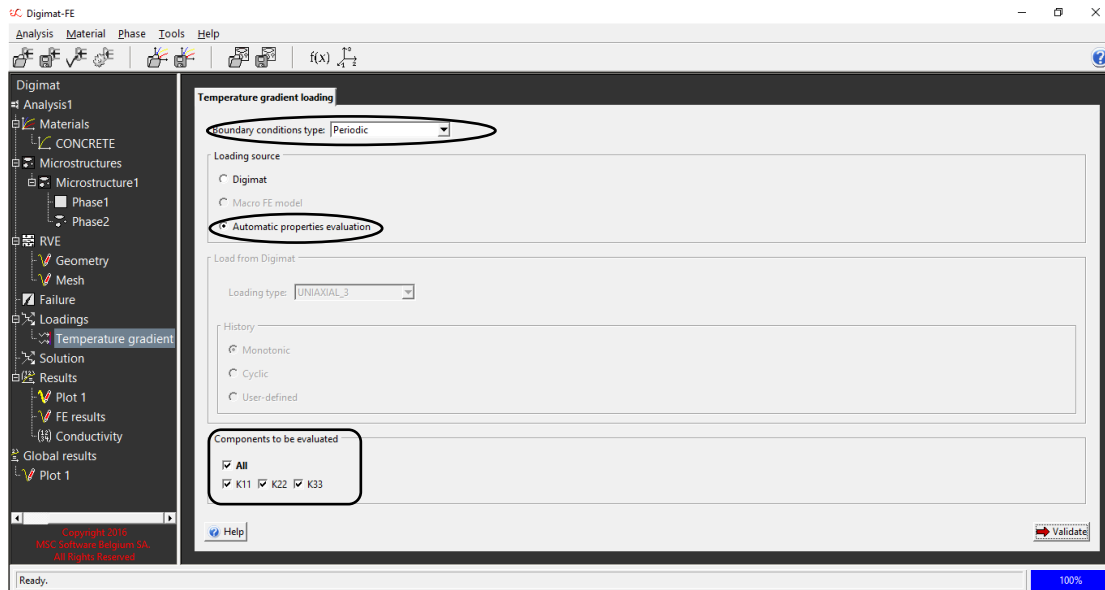




Εικόνα 29 : Πληροφορίες διακριτοποίησης RVE

Για να ολοκληρωθεί η ανάλυση απομένει να οριστούν οι διευθύνσεις εφαρμογής της θερμικής αγωγιμότητας, με σκοπό την εύρεση της θερμικής αγωγιμότητας του συγκεκριμένου στοιχείου όγκου, με τις παραμέτρους που έχουν συμπληρωθεί από τον χειριστή. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής είναι τα ίδια, σε όποια διεύθυνση και να εξεταστεί, τις διευθύνσεις τις ορίζει ο χρήστης με το κουμπί Temperature gradient στη στήλη επιλογών του κύριου menu. Παρακάτω ορίζεται ο τύπος συνοριακών οριακών συνθηκών που είναι κατάλληλος για την συγκεκριμένη ανάλυση, δηλαδή Dirichlet BC, Mixed BC, Periodic BC, Periodic in plane BC. Χρησιμοποιώντας τον πρώτο τύπο αυτήν την επιλογή, θα εφαρμοστούν συνθήκες ορίου πεδίου σε όλες τις όψεις του στοιχείου έντασης. Στις όψεις όπου δεν έχουν καθοριστεί τιμές πεδίου, επιβάλλεται η μεταβλητή πεδίου ή η συνιστώσα της κανονικά στην όψη του στοιχείου όγκου να είναι σταθερή. Χρησιμοποιώντας την δεύτερη επιλογή, οι συνθήκες ορίου πεδίου θα εφαρμοστούν στις όψεις του στοιχείου έντασης όπου ορίζεται μια συνθήκη. Στις άλλες όψεις, δεν θα εφαρμοστούν συνθήκες ορίου πεδίου, διασφαλίζοντας μια ελεύθερη κατάσταση.

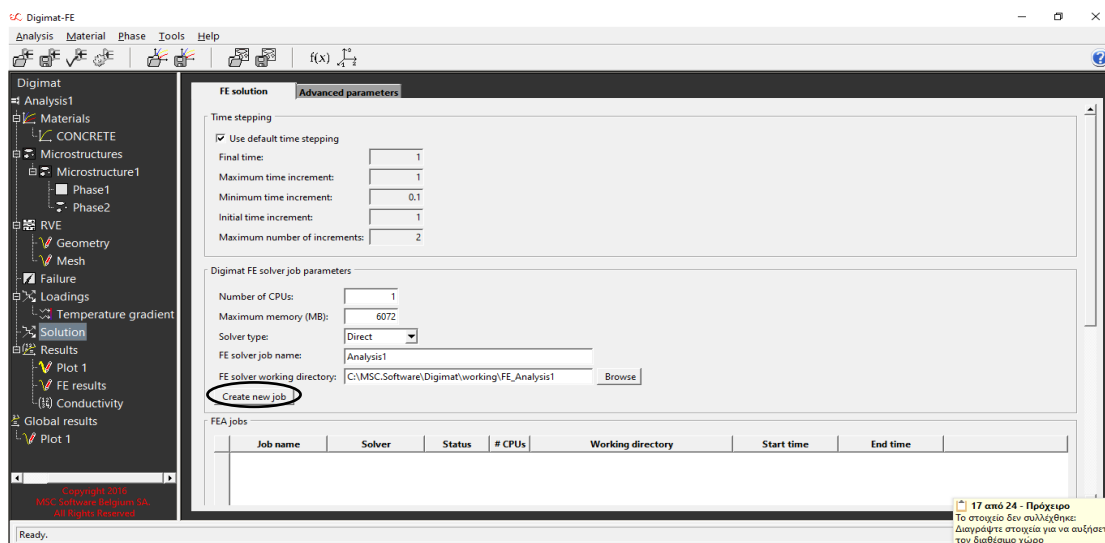
Η χρήση της τρίτης επιλογής θα επιβάλει περιοδικές οριακές συνθήκες σε όλες τις όψεις του στοιχείου έντασης. Οι περιοδικές οριακές συνθήκες διασφαλίζουν ότι η ροή της μεταβλητής πεδίου (μετατόπιση, θερμοκρασία, ηλεκτρικό δυναμικό) είναι περιοδική σε σχέση με τις όψεις του στοιχείου όγκου. Αυτό επιβάλλεται μέσω ενός μεγάλου συνόλου εξισώσεων που σχετίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας. Τέλος η χρήση της τέταρτης επιλογής θα επιβάλει περιοδικές συνθήκες ορίου μόνο στις όψεις με την κατεύθυνση x και y . Η όψη στην κατεύθυνση z παραμένει ελεύθερη. Αυτή η συνθήκη ορίου ταιριάζει ιδιαίτερα σε RVE πολλαπλών στρωμάτων που περιγράφει όλο το πάχος της δομής που θέλουμε να αντιπροσωπεύσουμε. Έπειτα την πηγή φόρτισης όπου υπάρχει η επιλογή μέσω του κουμπιού Digimat να γίνει μονοαξονικά, διαξονικά ή και τριαξονικά, ειδάλλως μπορεί να γίνει αυτόματα με το κουμπί Automatic properties evaluation που φαίνεται να χρησιμοποιείται για αυτή την ανάλυση και τέλος έχει την επιλογή να επιλέξει ο χρήστης που θέλει να γίνει η εφαρμογή θερμότητας, δηλαδή στον άξονα ένα, δύο, τρία ακόμα και στους τρεις άξονες μαζί. Στην θερμική ανάλυση παρακάτω φαίνεται να επιλέγονται και οι τρεις διευθύνσεις ταυτόχρονα καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε όποια διεύθυνση και να εξεταστεί η θερμική αγωγιμότητα είναι ίδια.



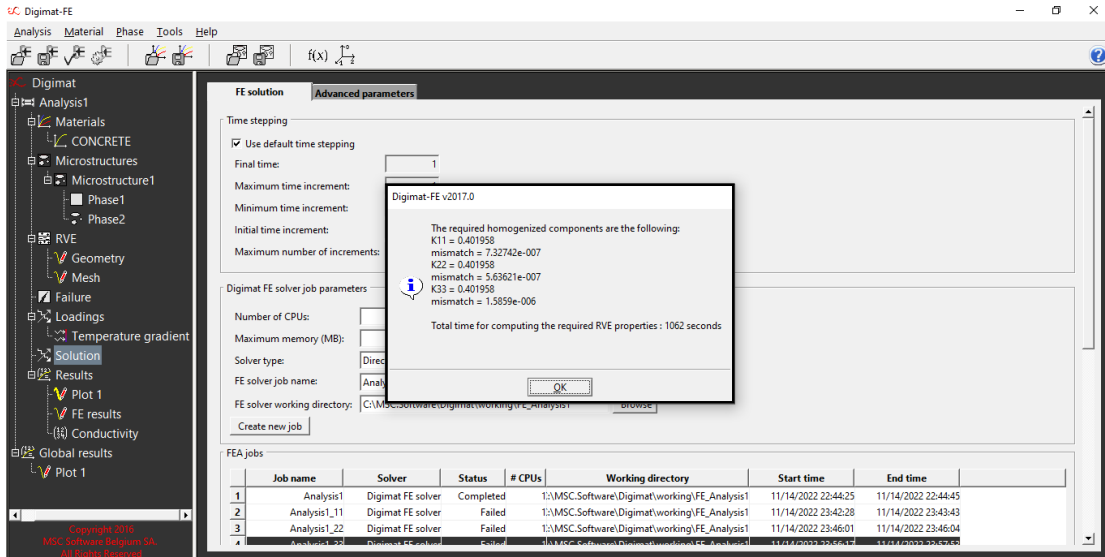
Εικόνα 30 : Επιλογή διεύθυνσης καταπόνησης

Αφού ορίστηκαν οι διευθύνσεις εφαρμογής της θερμότητας, γίνεται η επίλυση με το κουμπί Solution από το κύριο menu, πατώντας το κουμπί Create new job. Τα αποτελέσματα της θερμικής αγωγιμότητας, εμφανίζονται σε ξεχωριστό παράθυρο σε μορφή πίνακα όπως εμφανίζεται παρακάτω αυτόματα από το πρόγραμμα Digimat. Η τιμή K είναι απλώς συντομογραφία της θερμικής αγωγιμότητας, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C168.

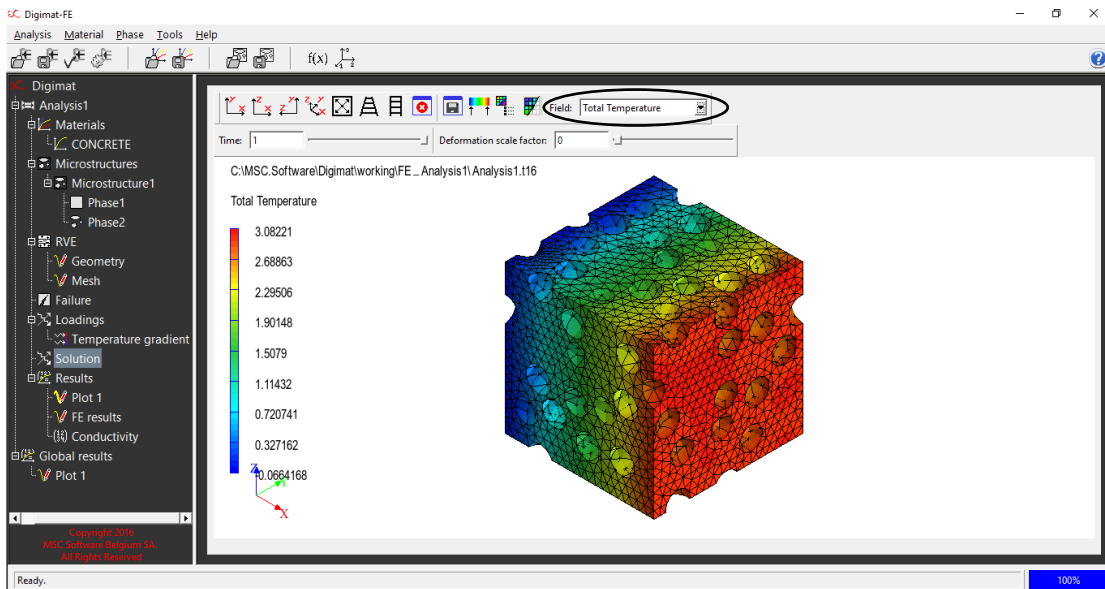
Στη συνέχεια αυτόματα σε μορφή χρωμοδιαγράμματος και ενός 3D μοντέλου, υπάρχουν πολλές επιλογές για το είδος θερμικής ιδιότητας, που επιθυμεί ο χειριστής να απεικονίσει, όπως οι φορτίσεις Temperature Gradient, Thermal Flux, Total Temperature, External και Reaction Heat Flux. Οι συγκεκριμένες φορτίσεις πραγματοποιούνται για διάφορες φορτίσεις θερμότητας και για τις τρεις διαθέσιμες διευθύνσεις x, y, z.



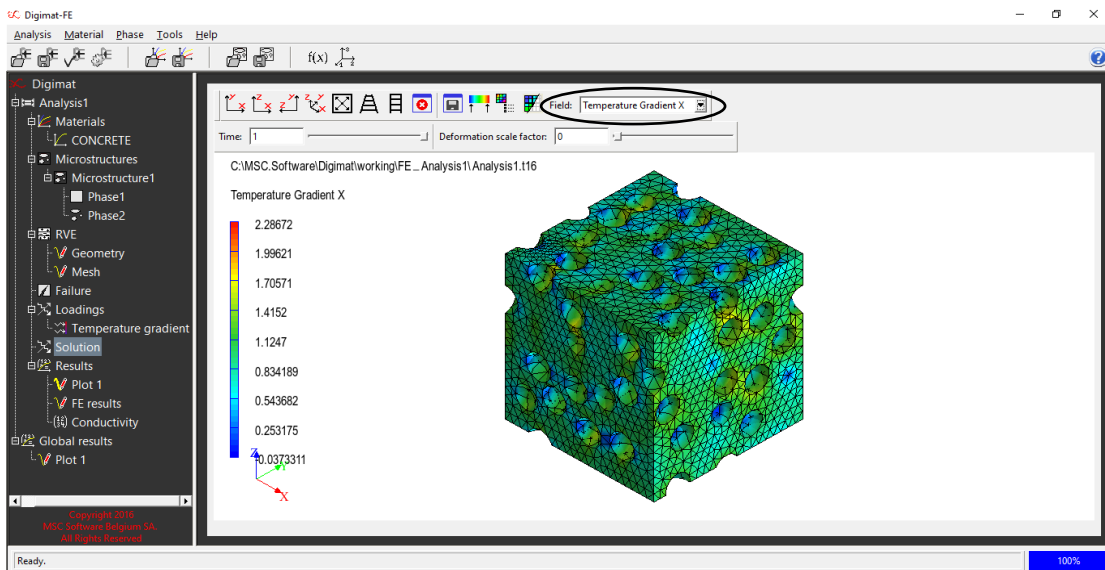
Εικόνα 31 : Επίλυση



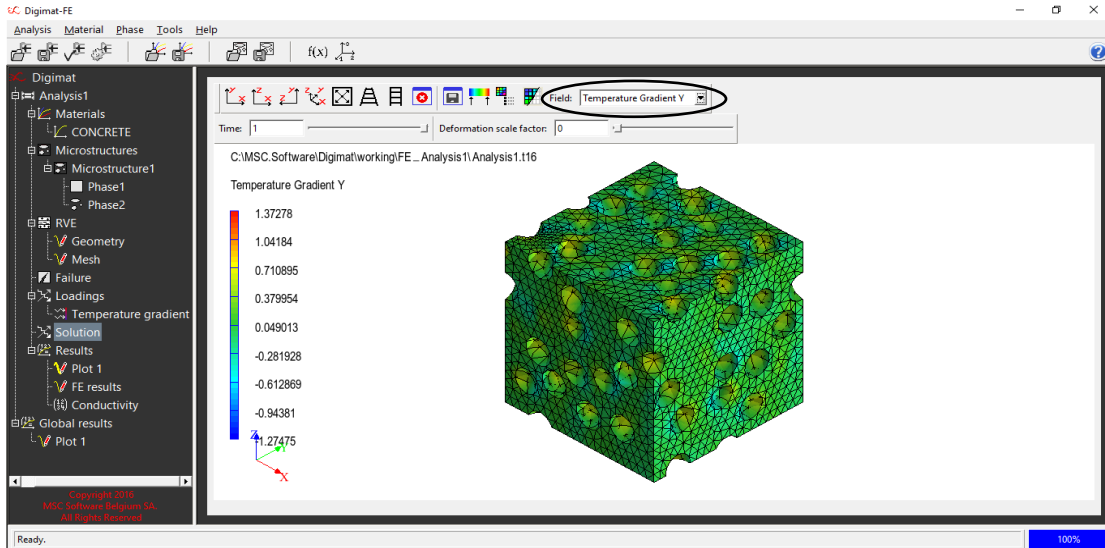
Εικόνα 32 : Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας



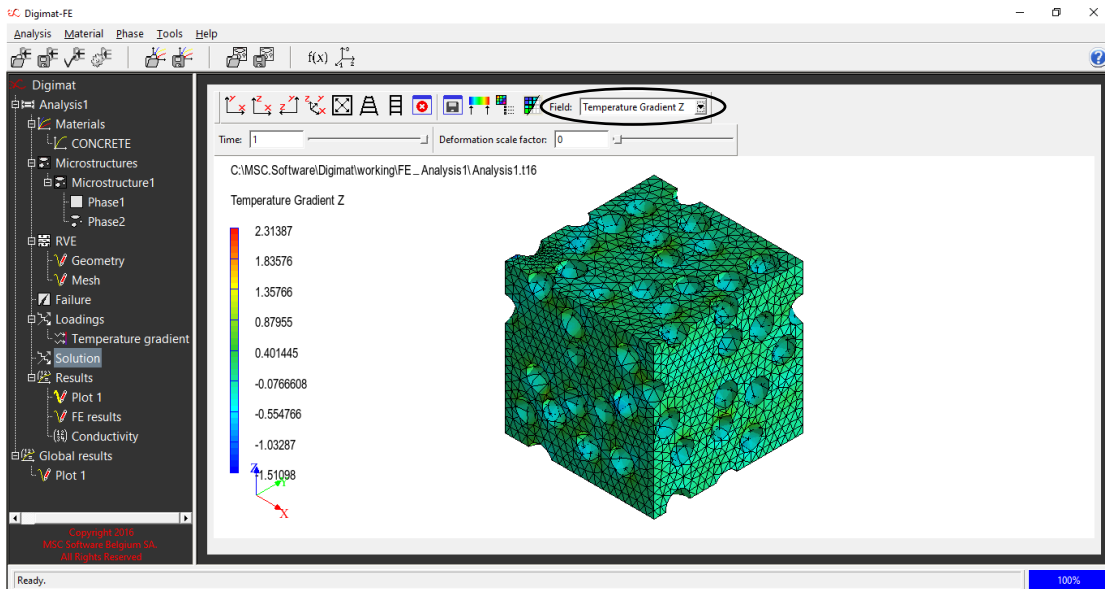
Εικόνα 33 : Total Temperature



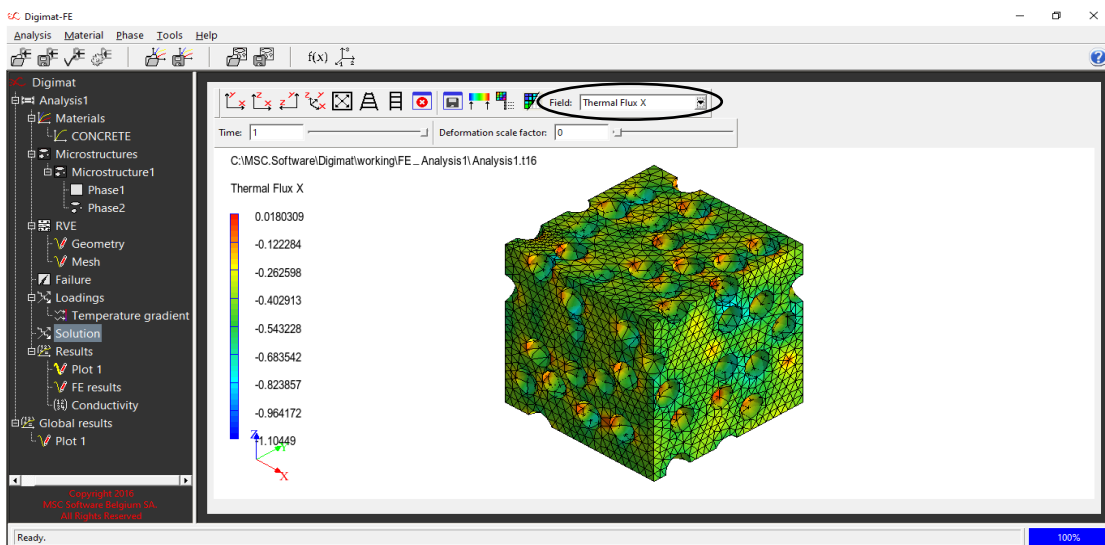
Εικόνα 34 : Temperature Gradient στον άξονα X



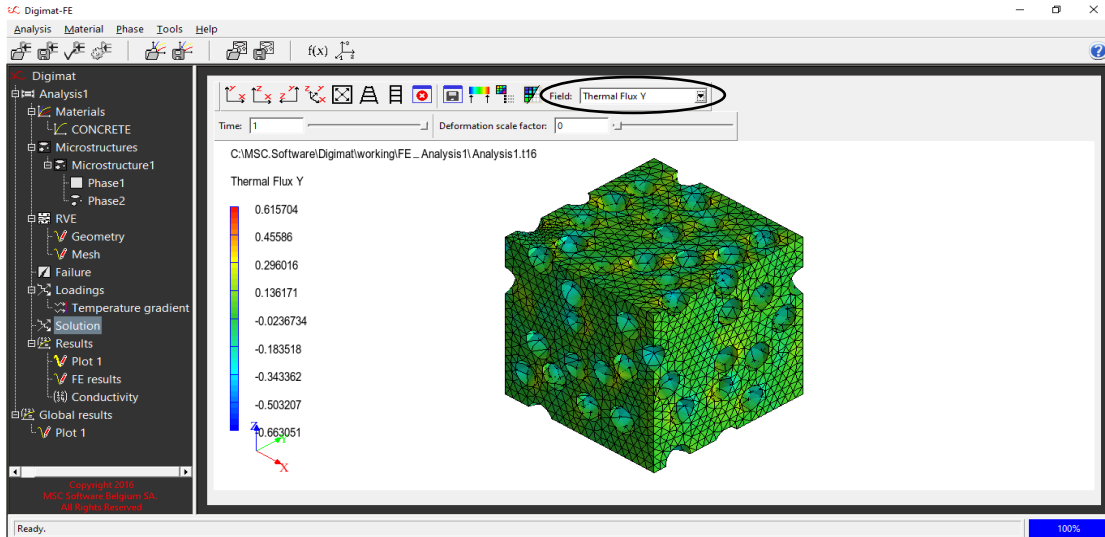
Εικόνα 35 : Temperature Gradient στον άξονα Y



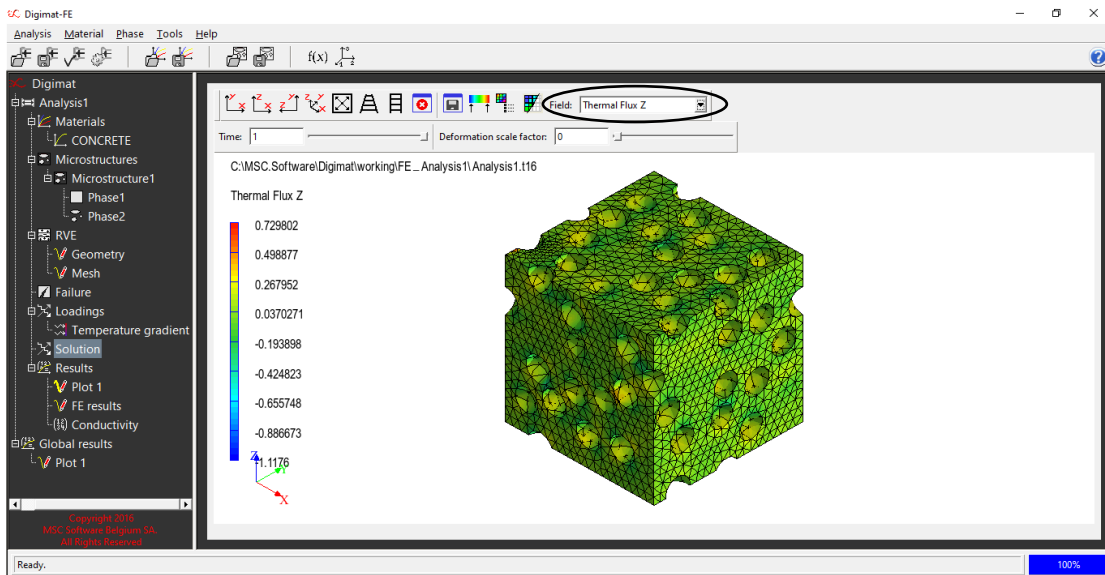
Εικόνα 36 : Temperature Gradient στον άξονα Z



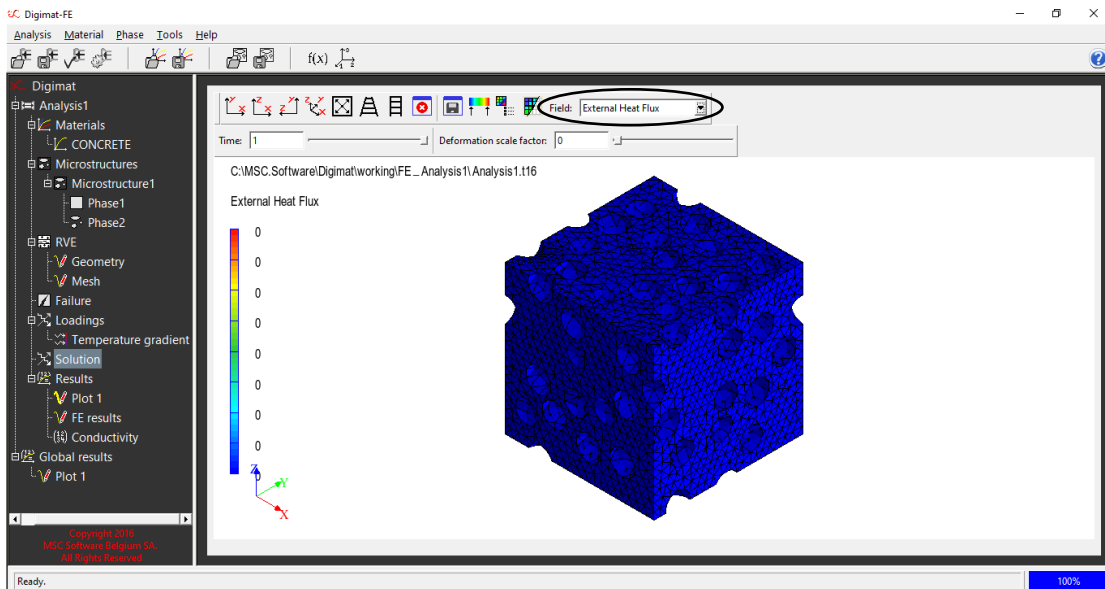
Εικόνα 37 : Thermal Flux στον άξονα X



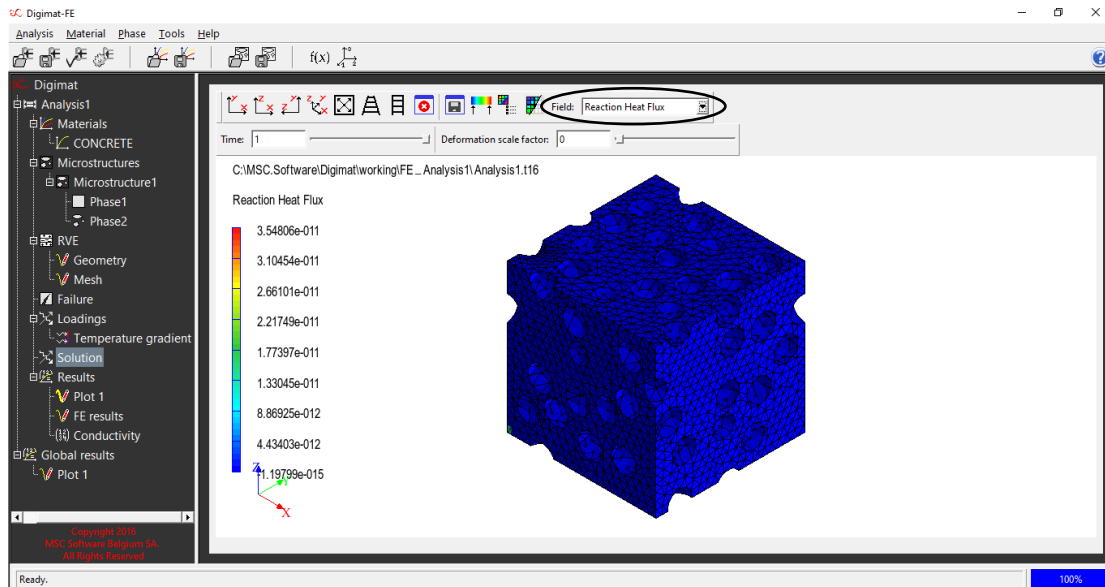
Εικόνα 38 : Thermal Flux στον άξονα Y



Εικόνα 39 : Thermal Flux στον άξονα Z

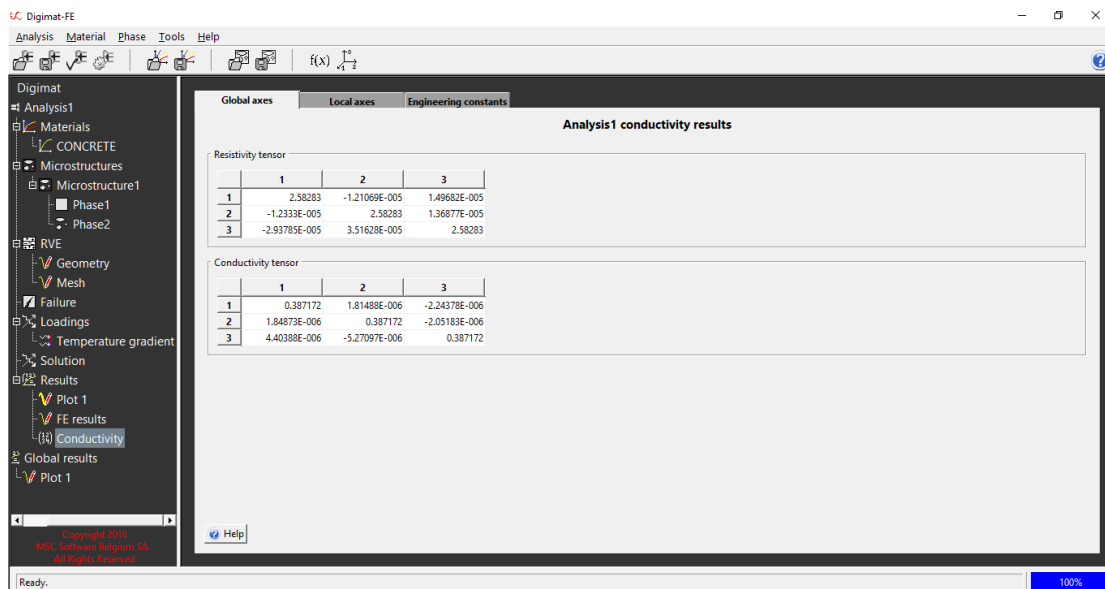


Εικόνα 40 : External Heat Flux

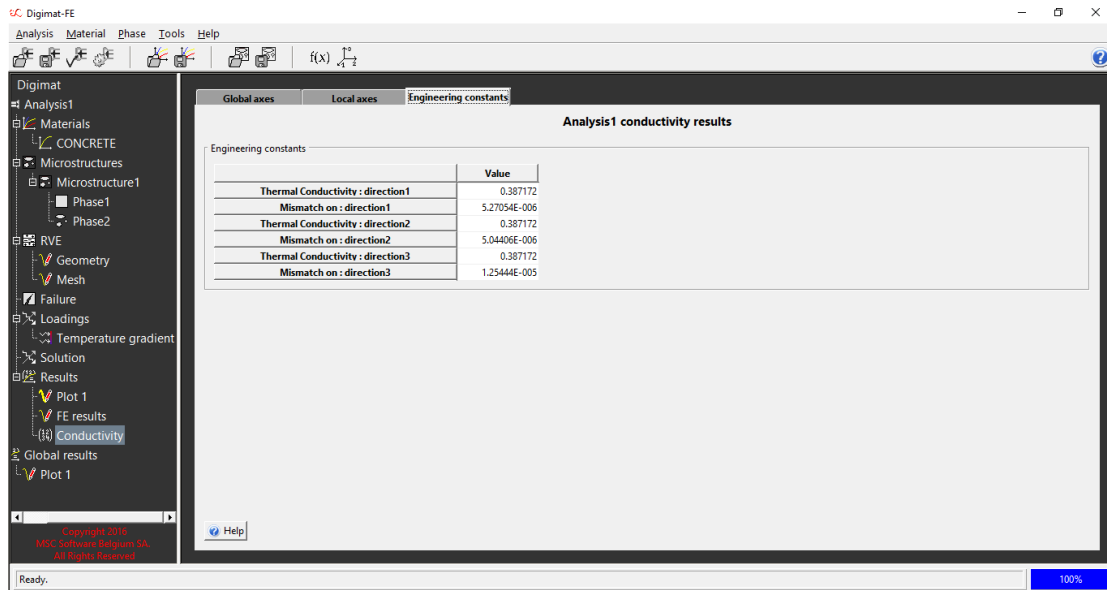


Εικόνα 41 : Reaction Heat Flux

Τέλος, στο τελευταίο παράθυρο εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης (resistivity), και του ταυιστή αγωγιμότητα όπου είναι σταθερές υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική αντίσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίστασή του. Η θερμική αντίσταση, R_{th} , εκφράζεται σε K/W . Περιγράφει την αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος αντίστασης υπό εφαρμοζόμενο φορτίο και παρακάτω φαίνονται αυτές οι τιμές για το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE της .



Εικόνα 42 : Ειδική αντίσταση και ταυιστής αγωγιμότητας RVE



Εικόνα 43 : Μηχανικές σταθερές RVE

3. Δεδομένα και αποτελέσματα (αριθμητικοί υπολογισμοί).

3.1 Ανάπτυξη και επίλυση μοντέλων ΠΣ για την εκτίμηση θερμικών ιδιοτήτων προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας.

Η επίλυση των μοντέλων για την προσέγγιση των θερμικών ιδιοτήτων προηγμένης θερμομονωτικής τσιμεντοκονίας με εγκλείσματα αερογέλης πραγματοποιείται, όπως αναφέρεται και στα προηγούμενα κεφάλαια με το εμπορικό πρόγραμμα Digimat με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων FE. Η μεθοδολογία για την επίλυση των μοντέλων αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.1 και χρησιμοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο με σκοπό την ανάπτυξη και την επίλυση αυτών των μοντέλων παρακάτω.

Οι ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και της αερογέλης που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, αναγράφονται στους παρακάτω πίνακες. Ο ορισμός αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητο να οριστούν για να μπορέσει να γίνει η ανάπτυξη των μοντέλων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όλες οι μονάδες μέτρησης οφείλουν να είναι στην ίδια κλίμακα για την αποφυγή σφαλμάτων στα τελικά αποτελέσματα. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την εκτίμηση των θερμικών ιδιοτήτων του ομοιογενές υλικού, όλες οι εκτιμήσεις πραγματοποιήθηκαν με ευλάβεια και αυστηρή τήρηση της μεθοδολογίας για τις καλύτερες δυνατές προσεγγίσεις.

Πίνακας 4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τσιμέντου

Πυκνότητα	Ειδική θερμοχωρητικότητα	Θερμική αγωγιμότητα
2400 (kg/m ³)	1000 (J×kg ⁻¹ ×K ⁻¹)	0.47 (W/m×K)

Πίνακας 5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά αερογέλης

Πυκνότητα	Ειδική θερμοχωρητικότητα	Θερμική αγωγιμότητα
2400 (kg/m ³)	700 (J×kg ⁻¹ ×K ⁻¹)	0.013 (W/m×K)

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 6 : 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

Πίνακας 7 : Δεδομένα μετρήσεων

Διάμετρος σφαιριδίων d	RVE
1 mm	5×5×5 mm

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μορφές μοντέλων ώστε να παρατηρηθεί και να καταγραφεί η επίδραση της περιεκτικότητας, της διαμέτρου και του μεγέθους των εγκλεισμάτων αερογέλης κάθε φορά, στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού που μελετάται συνολικά. Η ύπαρξη της αερογέλης ευθύνεται για τη διαφοροποίηση της περιεκτικότητας και της κατανομής των εγκλεισμάτων, κάτι που οδήγησε στην πιο ακριβή εκτίμηση των θερμικών ιδιοτήτων του ομοιογενές υλικού. Οι τρεις διαφορετικές μορφές μοντέλων πραγματοποιήθηκαν αρκετές φορές η καθεμία με σκοπό την διαπίστωση τυχόν σφαλμάτων. Έπειτα, όλες οι μετρήσεις επιλύθηκαν μέσω του Digimat με την αριθμητική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων FE, ακολουθώντας τη απαραίτητη μεθοδολογία. Στα παρακάτω υπό-κεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικά και οι τρεις μορφές των μοντέλων που προαναφέρθηκαν.

3.2 Τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων

Οι πρώτες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , ήταν για το μοντέλο με τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE). Στην προκείμενη περίπτωση διενεργήθηκαν αρκετές προσεγγίσεις για διαφορετικές περιεκτικότητες σφαιριδίων. Πιο συγκεκριμένα οι περιεκτικότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% και 35% η κάθε μια επαναλήφθηκε τέσσερις φορές. Για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων ο λόγος ήταν ο έλεγχος για τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών. Η ανάπτυξη και η επίλυση σε κάθε προσπάθεια έγινε και στους τρεις άξονες καταπόνησης (x, y, z).

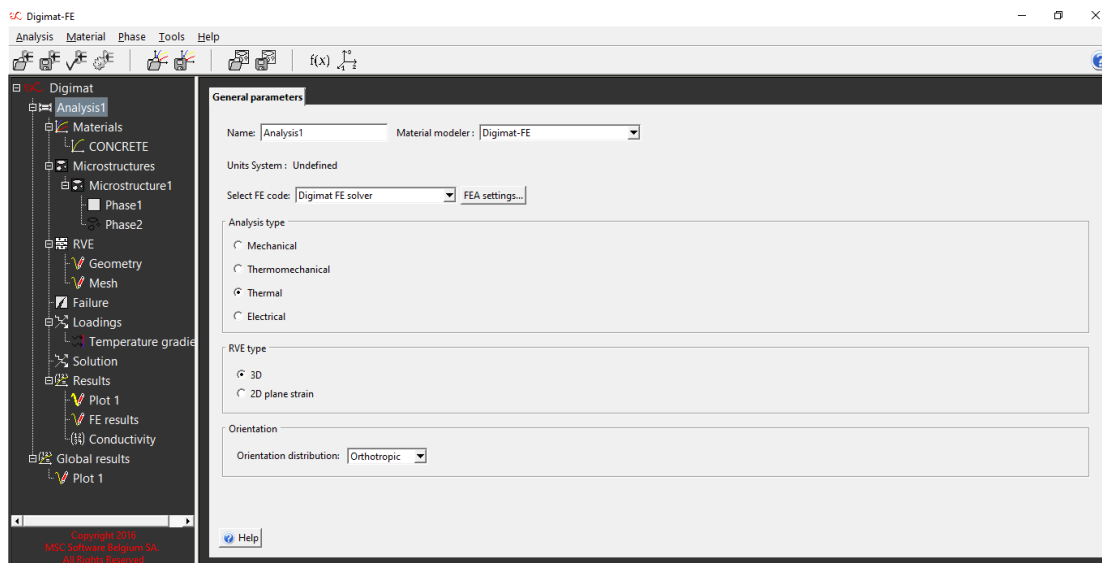
Η ανάπτυξη και η επίλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε ακριβώς με τον τρόπο που αναλύθηκε στο 2 Κεφάλαιο. Ακολουθώντας αναλύεται η προσπάθεια εκτίμησης ολόκληρης της διαδικασίας βήμα προς βήμα για την εκτίμηση των θερμικών τάσεων αυτής της περίπτωσης, η οποία επαναλήφθηκε αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες προσπάθειες προσέγγισης που αφορά τη μία από τις παραπάνω 8 προσεγγίσεις περιεκτικότητας που πάρθηκαν.

Παρατηρήθηκε, πως η μέγιστη περιεκτικότητα που επιτεύχθηκε με τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων ήταν γύρω στο 28%. Παρατηρήθηκε επίσης, πως ήταν περιορισμός του προγράμματος να μην επιτυγχάνονται μεγαλύτερες περιεκτικότητες εγκλεισμάτων. Αυτό έγινε αντιληπτό επειδή, κάθε φορά που οριζόταν μεγαλύτερη περιεκτικότητα το μέγιστο ποσοστό που επιτυγχάνοταν ήταν γύρω στο 28%.

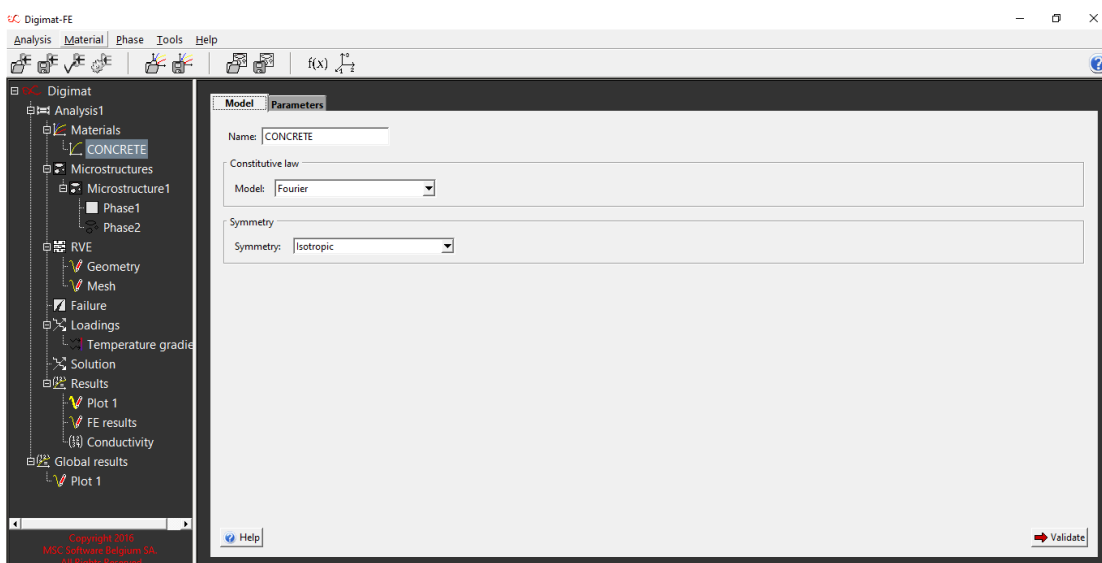
Οι παρακάτω ενδεικτικές απεικονίσεις αφορούν την 20% περιεκτικότητα εγκλεισμάτων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις μετρήσεις που αφορούν το μοναδικό έγκλεισμα αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα .

Πίνακας 8 : Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοναδικό έγκλεισμα

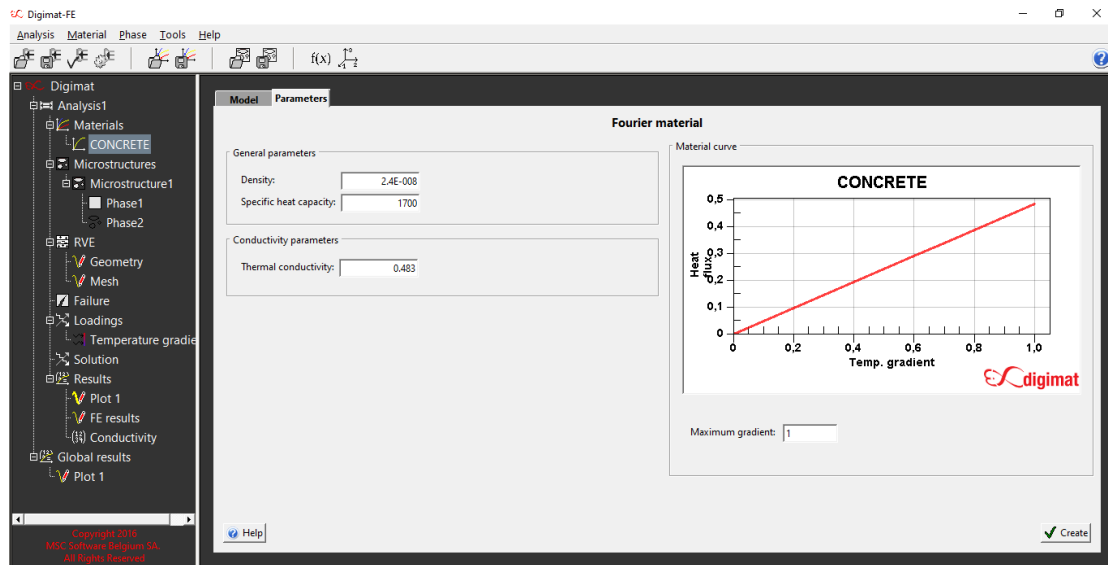
Διάμετρος εγκλεισμάτων	1 mm
Συντεταγμένες RVE	5×5×5 mm



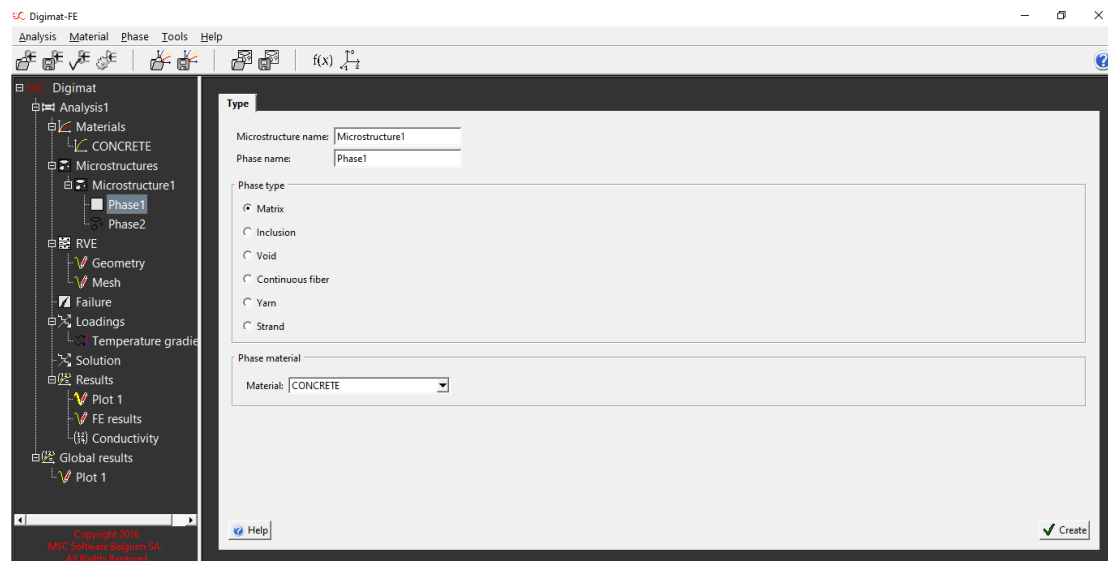
Εικόνα 44 : Δημιουργία ανάλυσης για μοναδικό έγκλεισμα



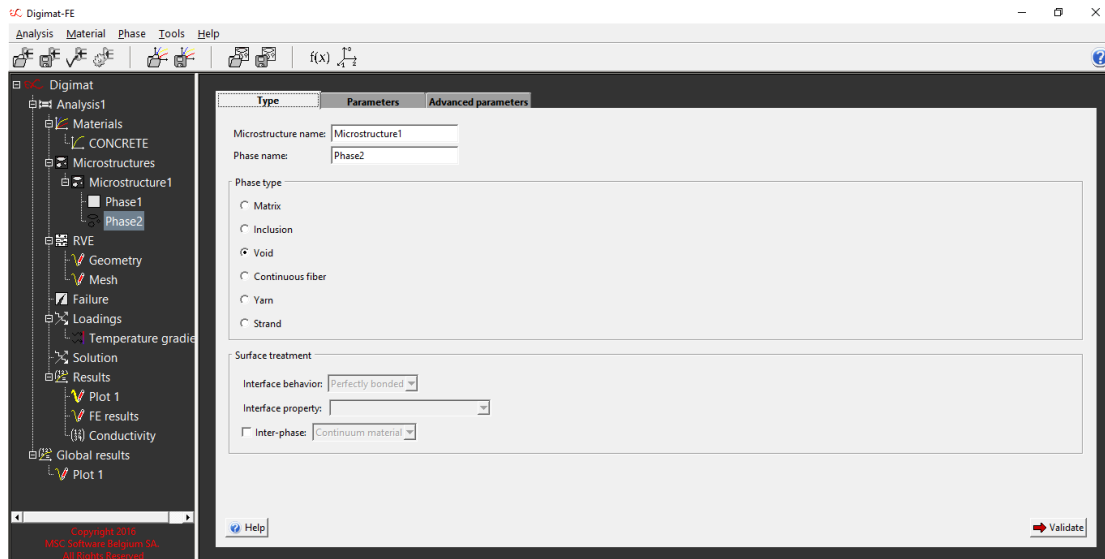
Εικόνα 45 : Ορισμός υλικού



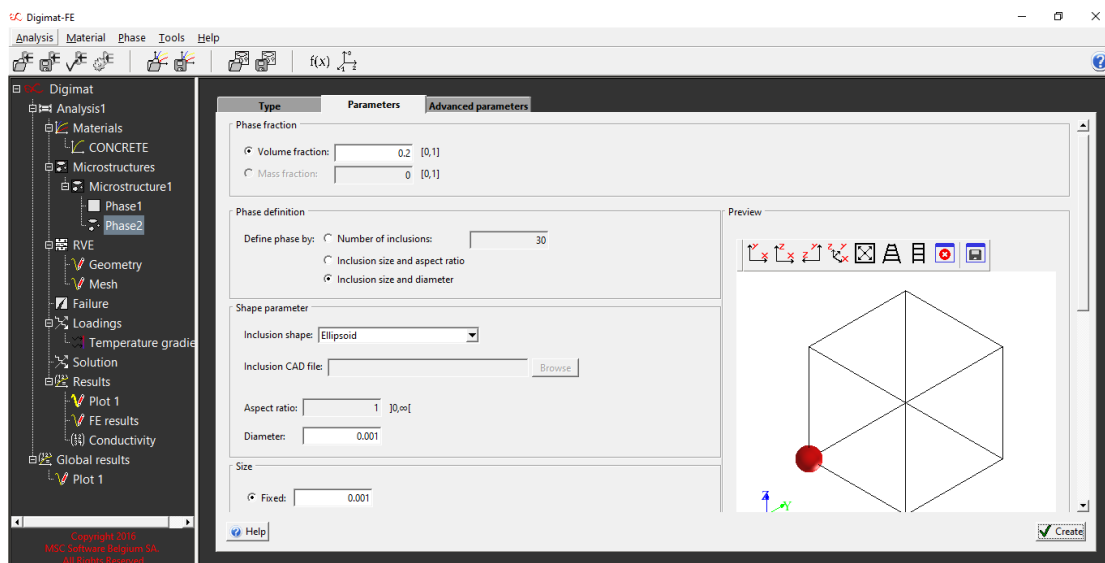
Εικόνα 46 : Ορισμός παραμέτρων τσιμέντου



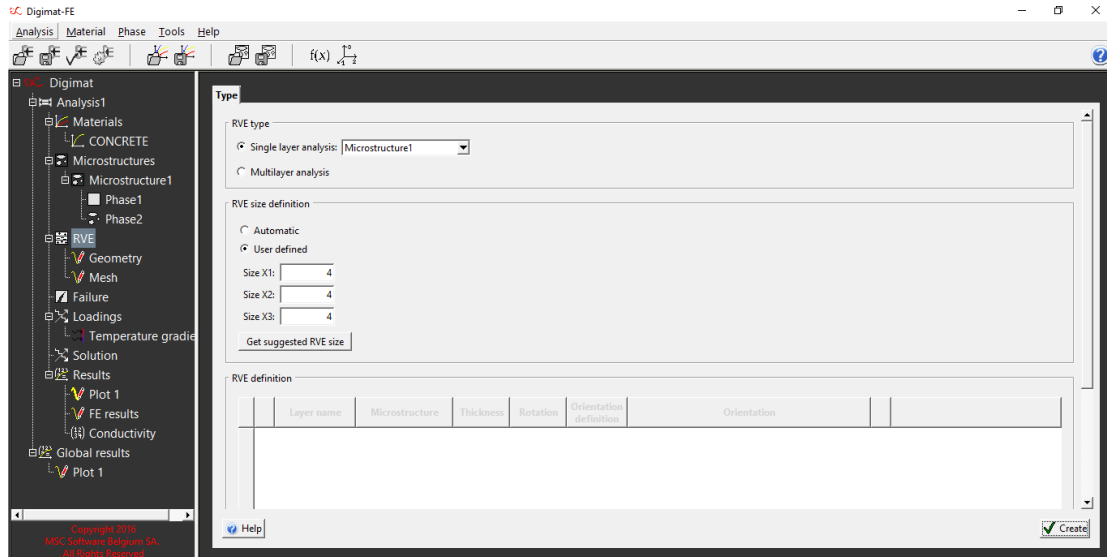
Εικόνα 47 : Ορισμός μήτρας



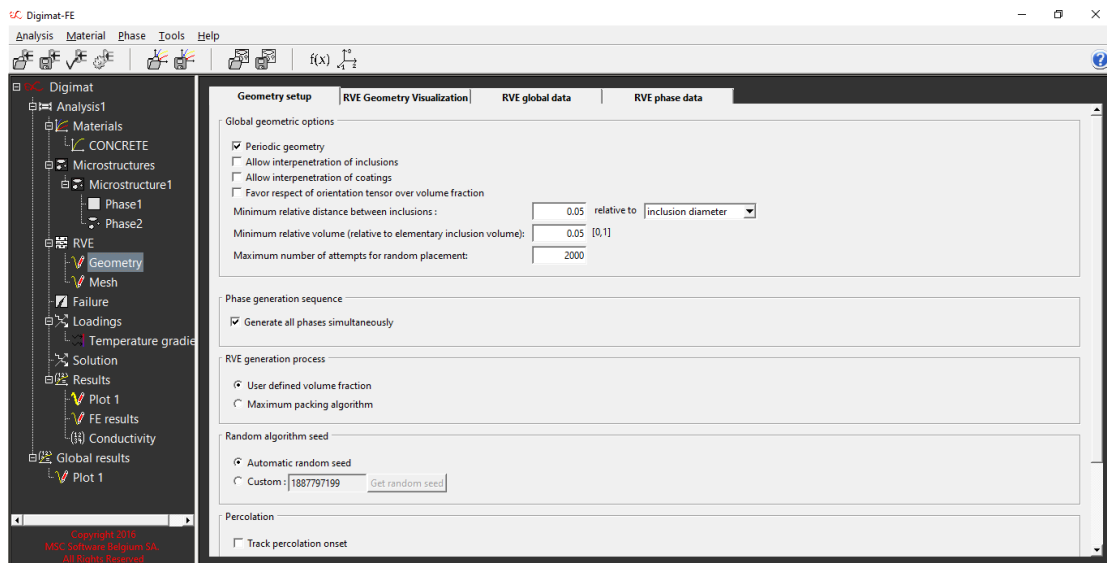
Εικόνα 48 : Ορισμός εγκλεισμάτων



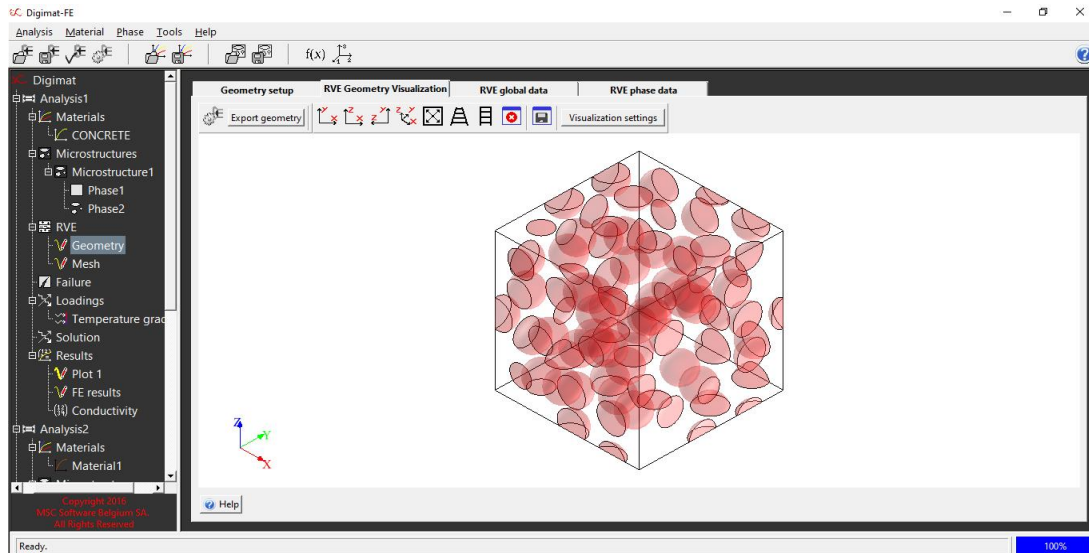
Εικόνα 49 : Ορισμός περιεκτικότητας σφαιριδίων



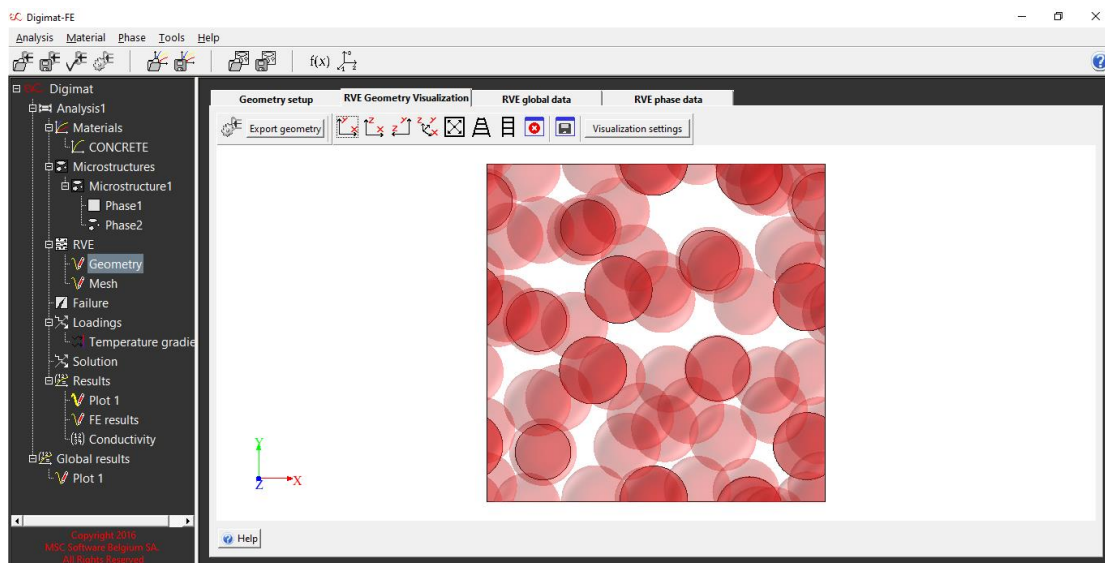
Εικόνα 50 : Διαστάσεις RVE



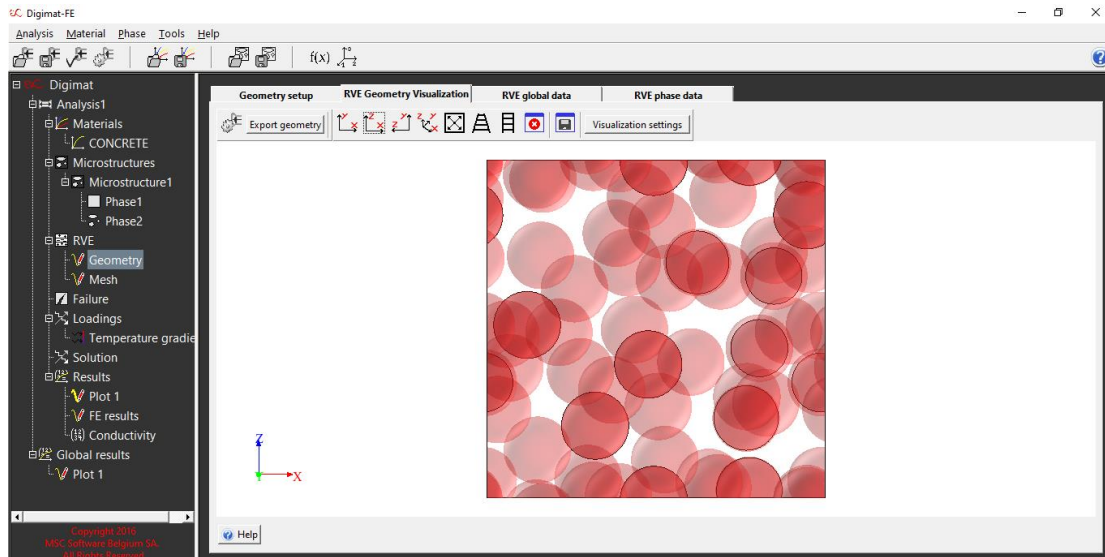
Εικόνα 51 : Εξαγωγή γεωμετρίας RVE



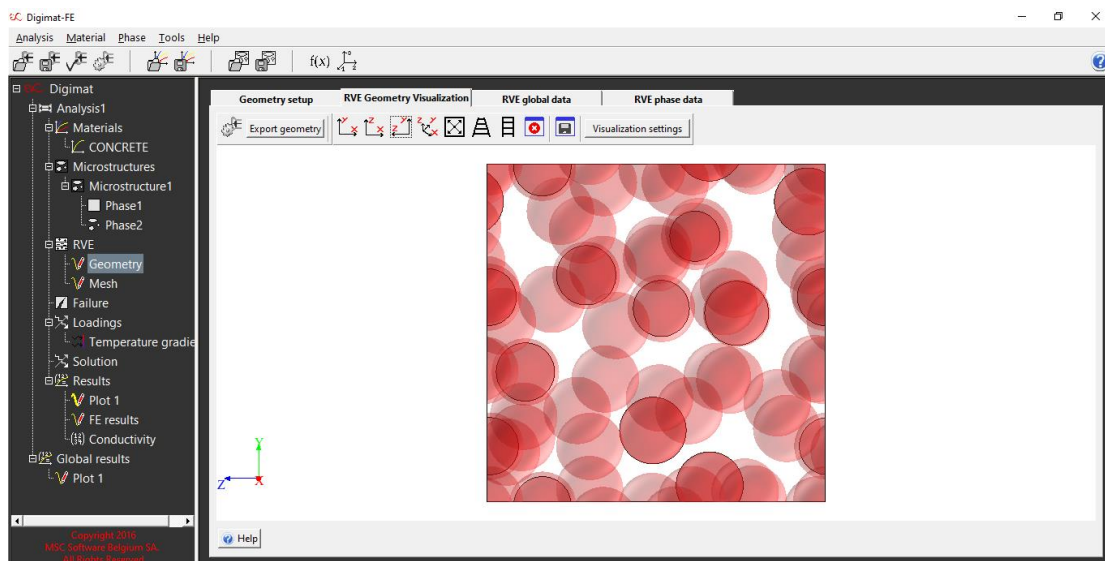
Εικόνα 52 : Απεικόνιση της γεωμετρία της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane x-y-z)



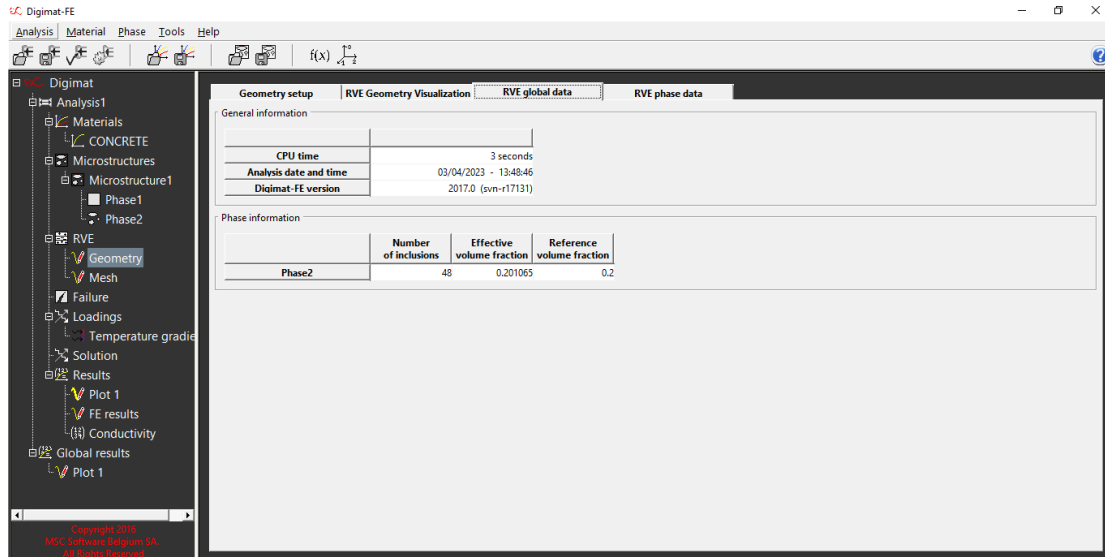
Εικόνα 53 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane y-x)



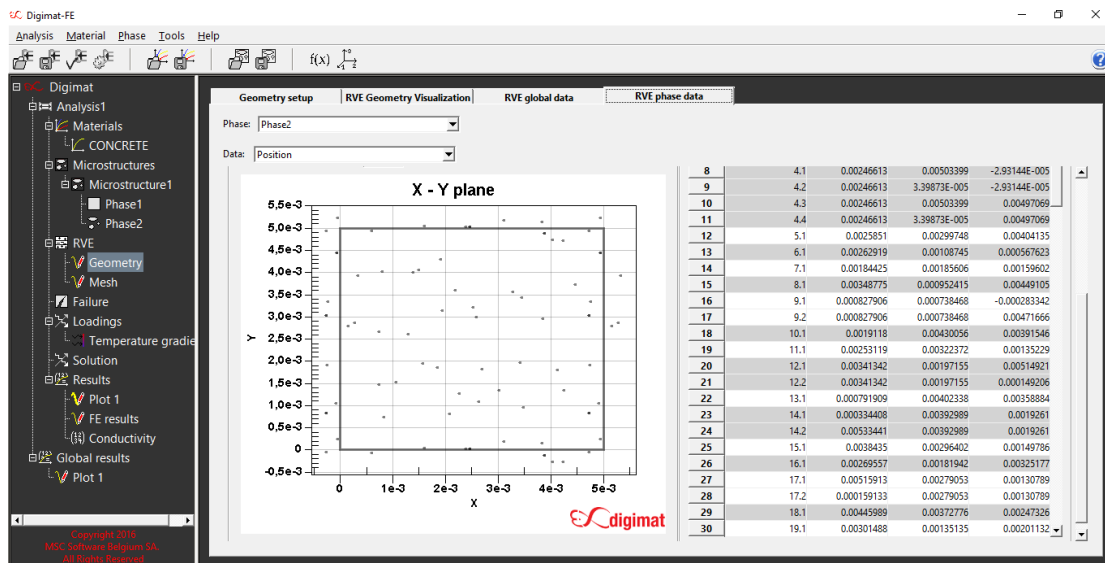
Εικόνα 54 : Απεικόνιση της γεωμετρία της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-x)



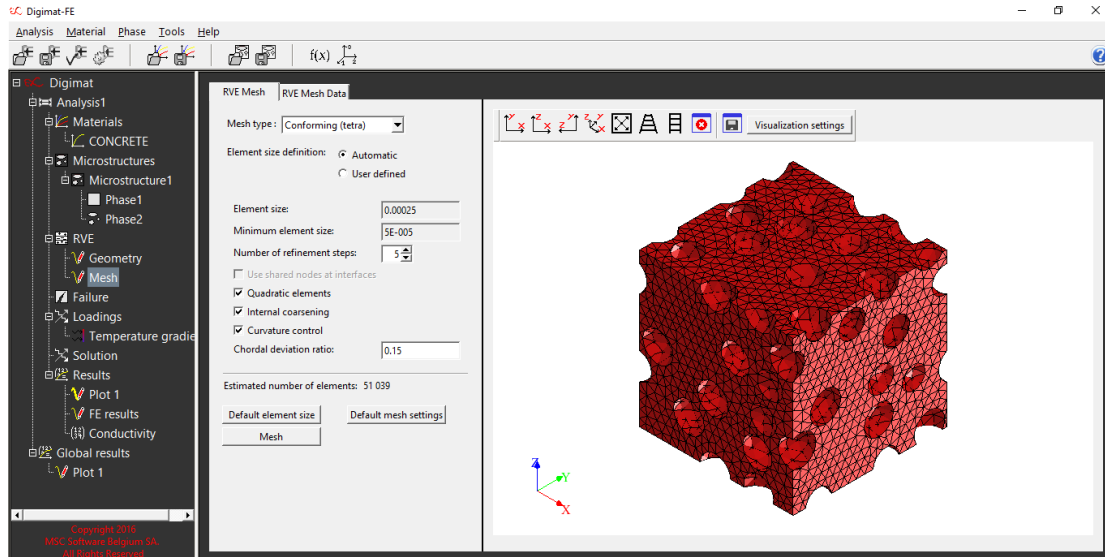
Εικόνα 55 : Απεικόνιση της γεωμετρία της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-y)



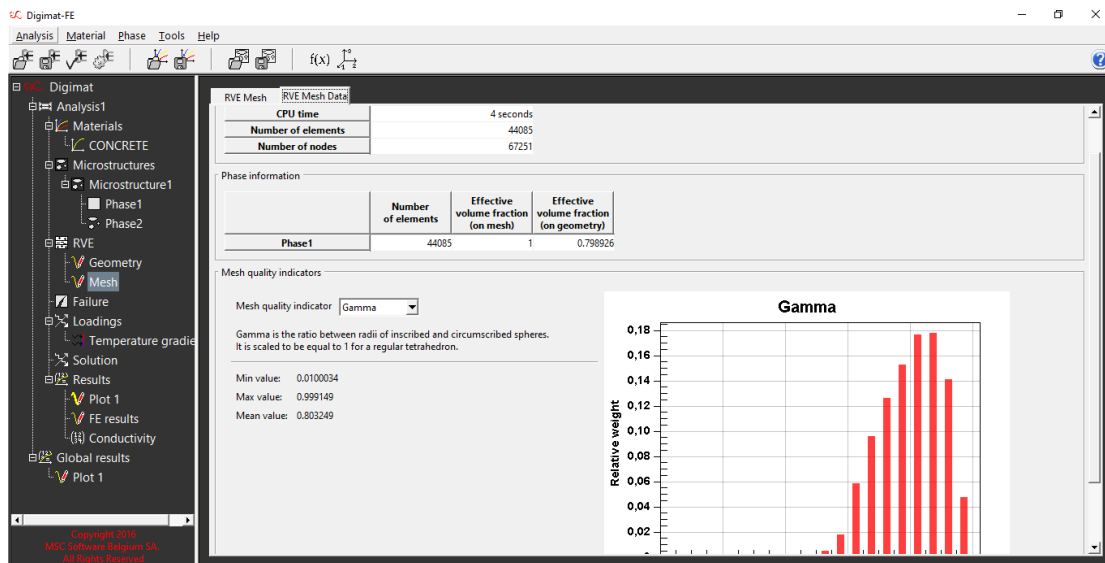
Εικόνα 56 : Απεικόνιση περιεκτικότητας.



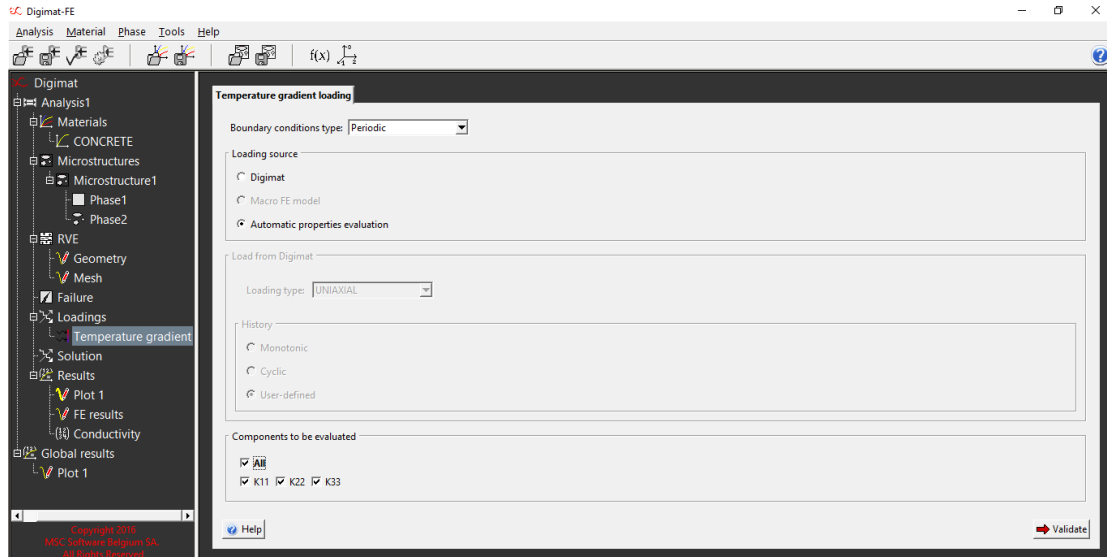
Εικόνα 57 : Απεικόνιση δεδομένων της γεωμετρίας



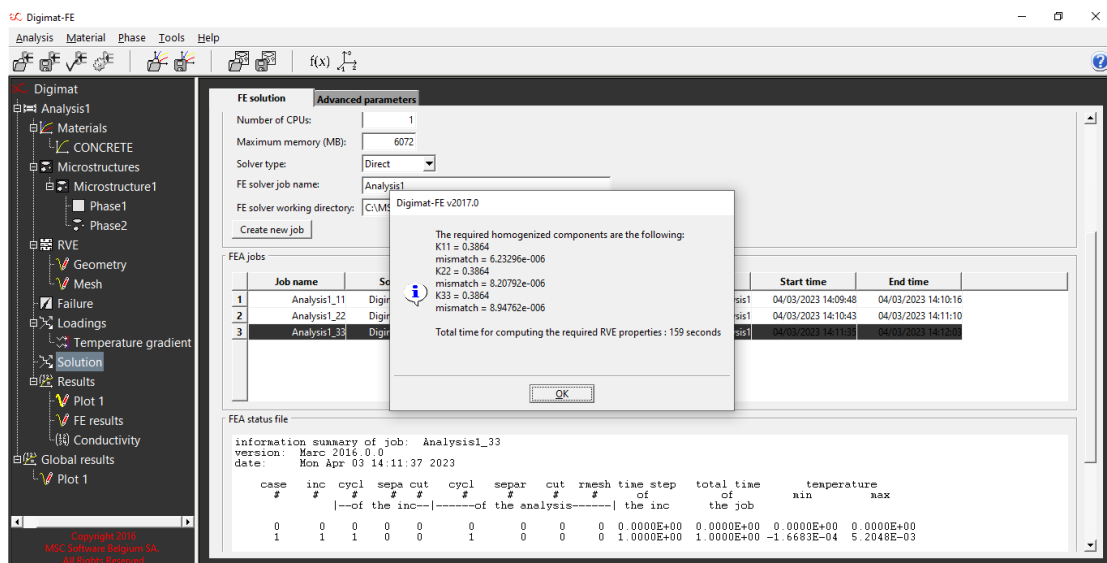
Εικόνα 58 : Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE



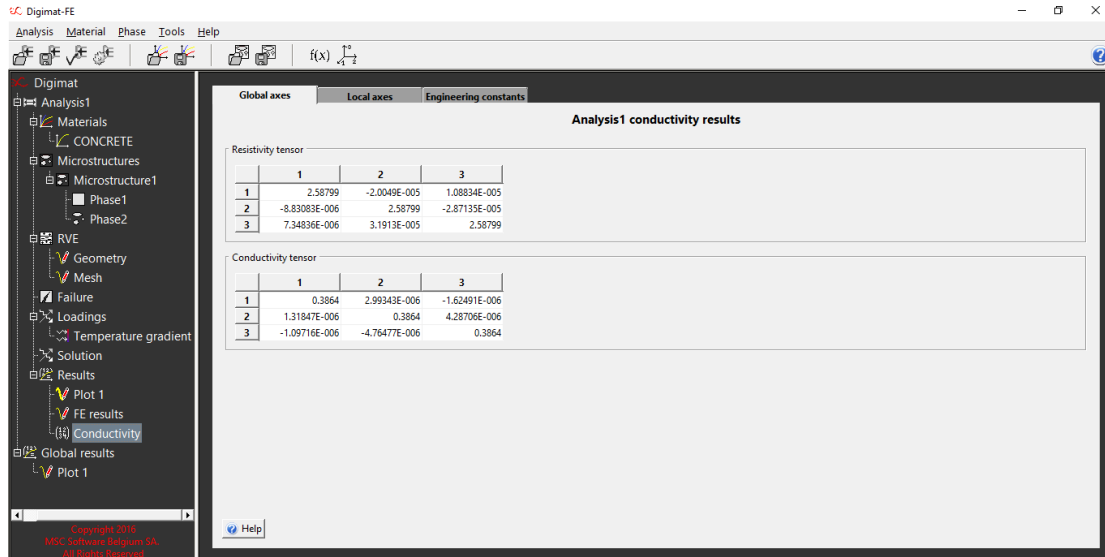
Εικόνα 59 : Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης



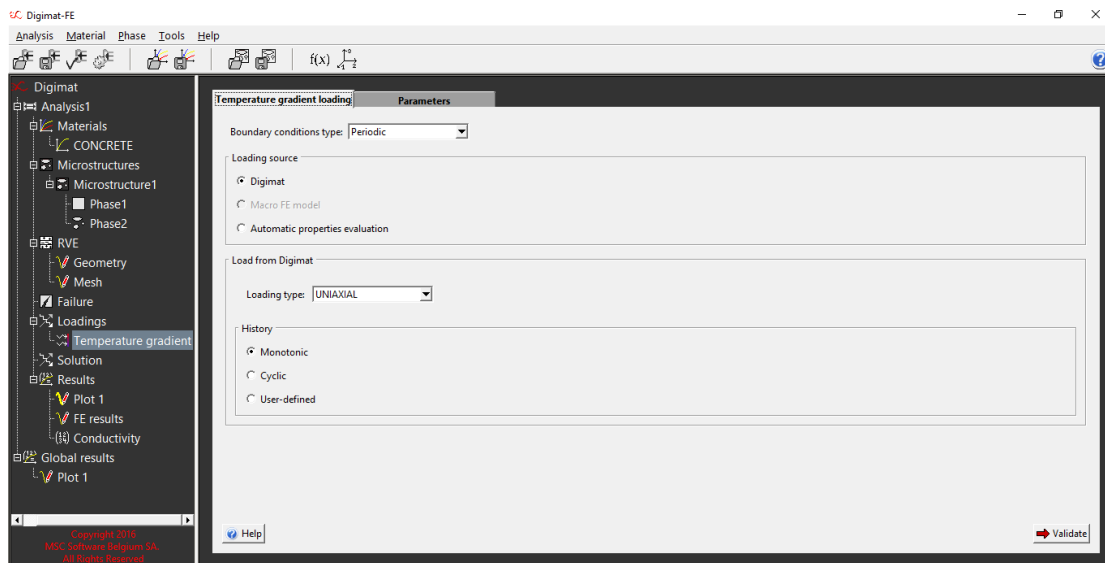
Εικόνα 60 : Ορισμός εύρεσης θερμικής αγωγιμότητας



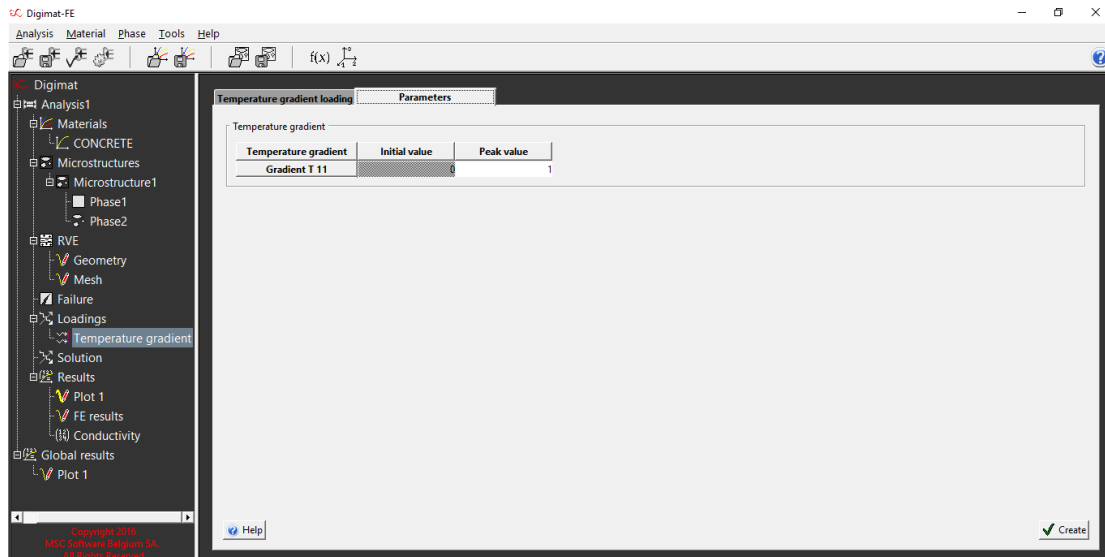
Εικόνα 61 : Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας



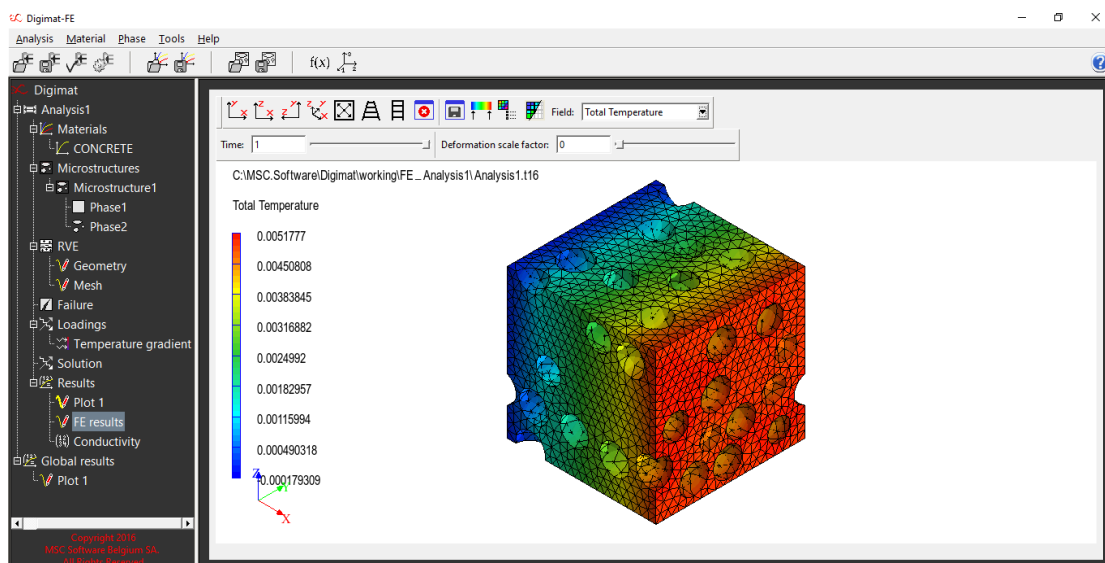
Εικόνα 62 : Λεπτομέρειες αγωγιμότητας



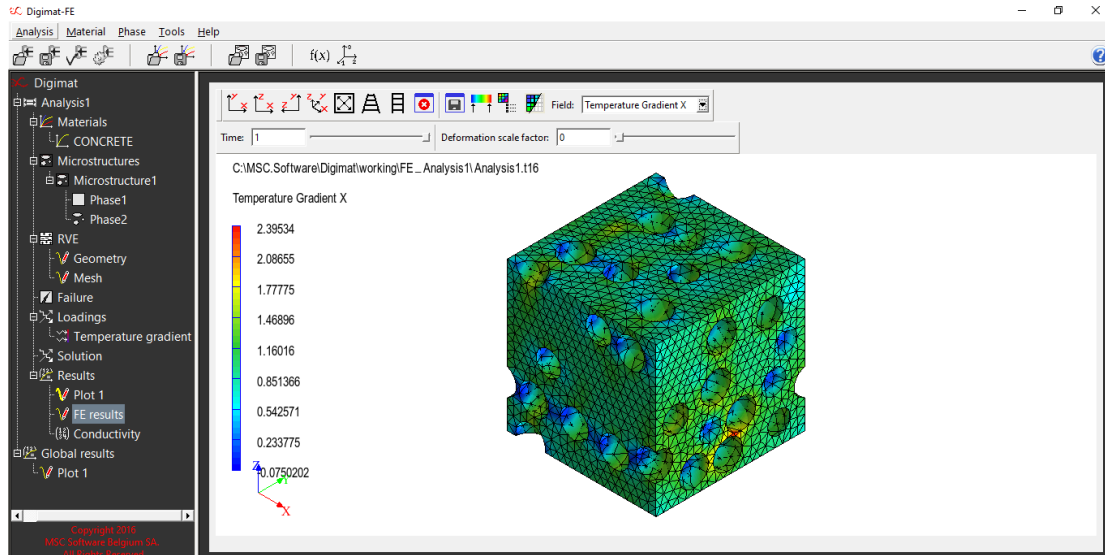
Εικόνα 63 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (μονοαξονικά)



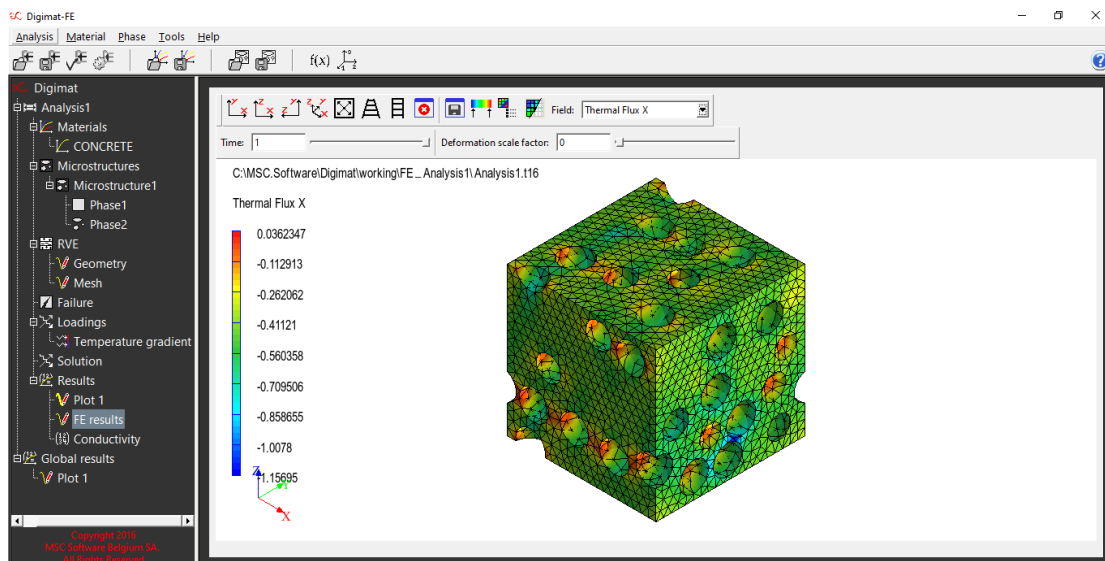
Εικόνα 64 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



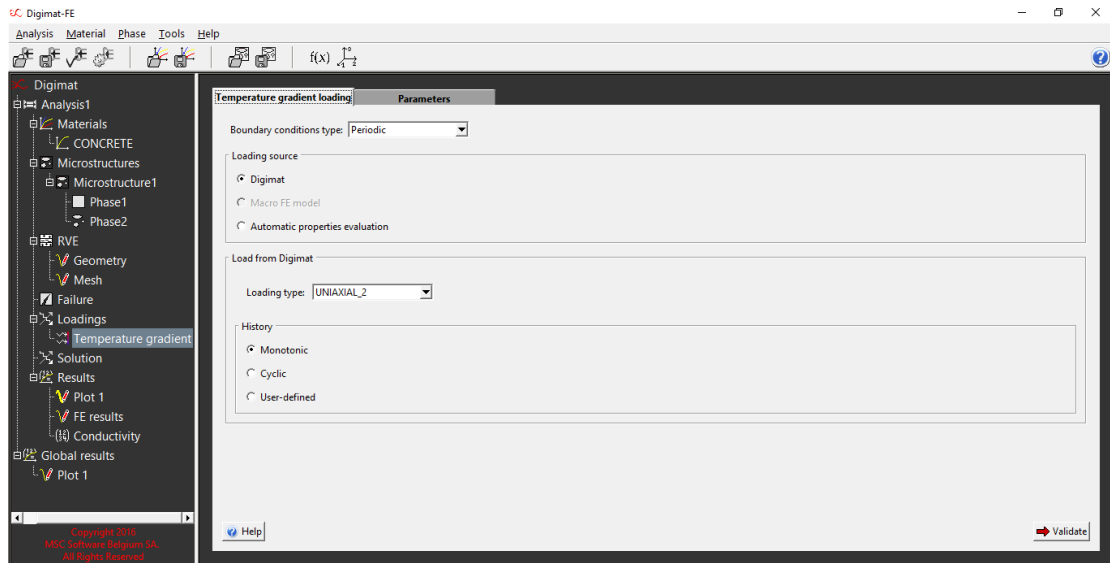
Εικόνα 65 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



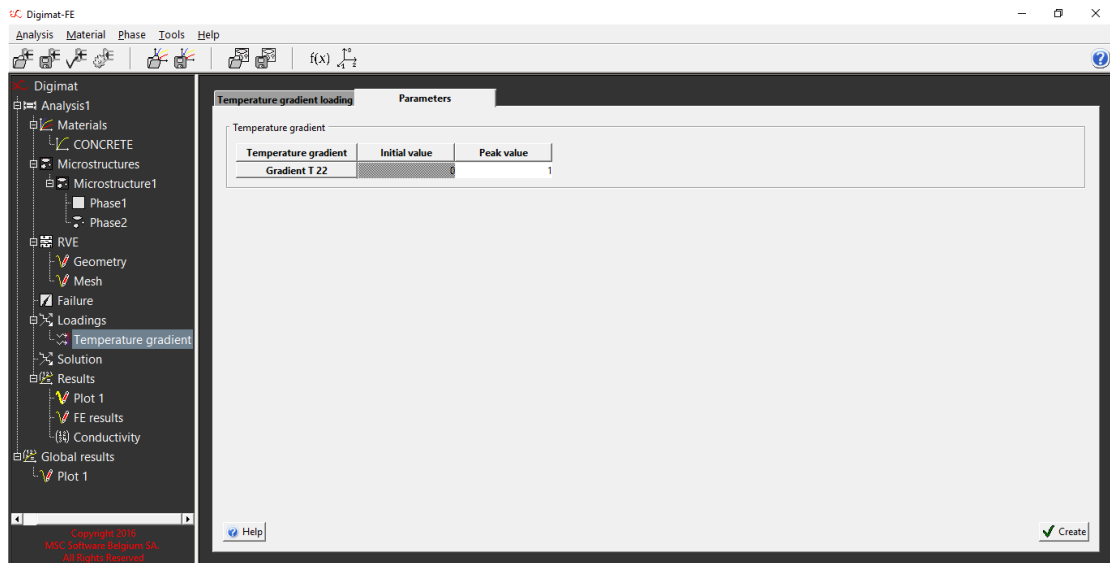
Εικόνα 66 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



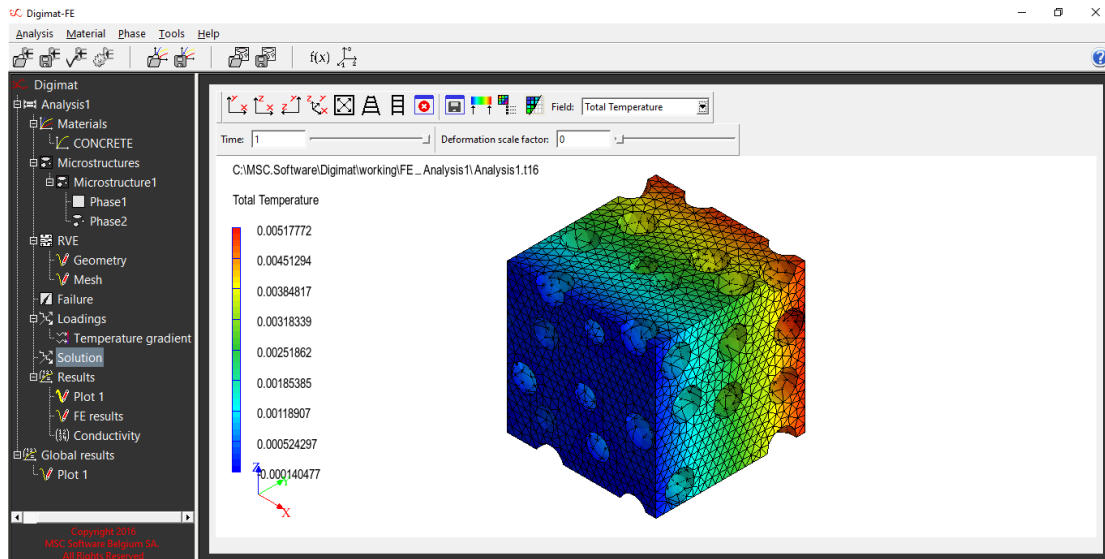
Εικόνα 67 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



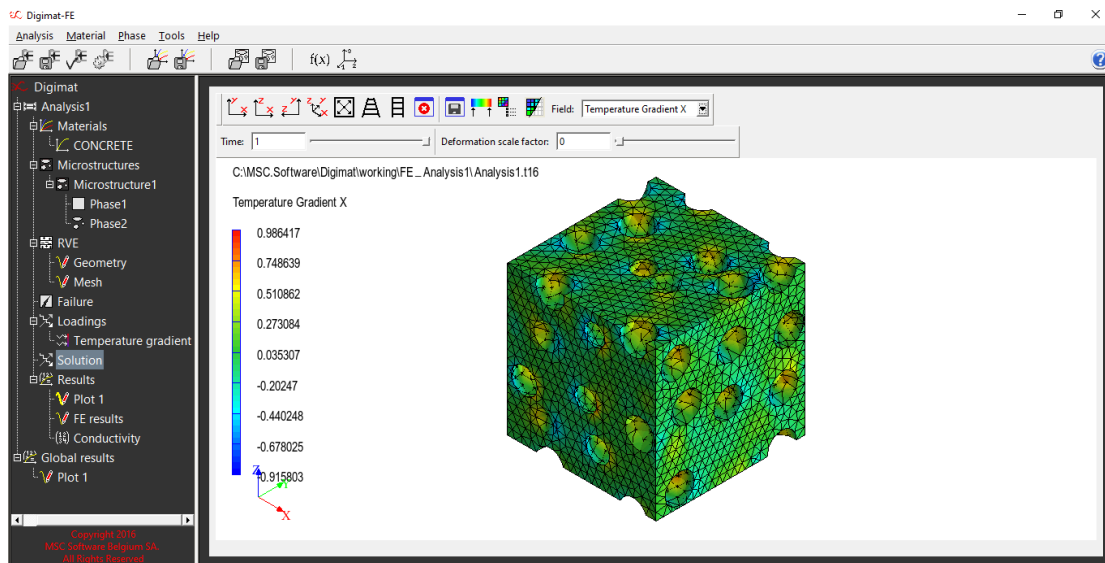
Εικόνα 68 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (διαξονικά)



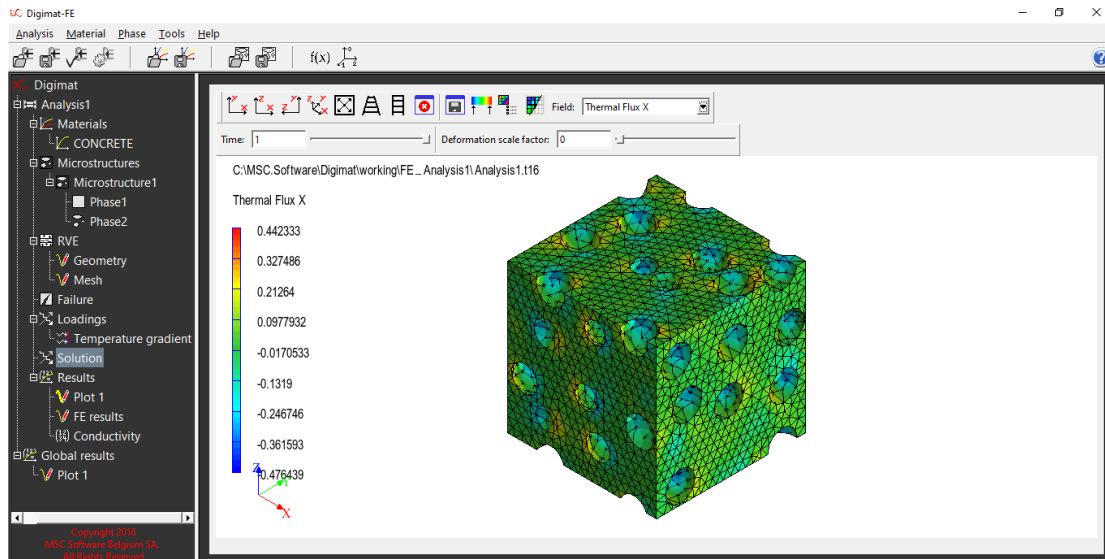
Εικόνα 69 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



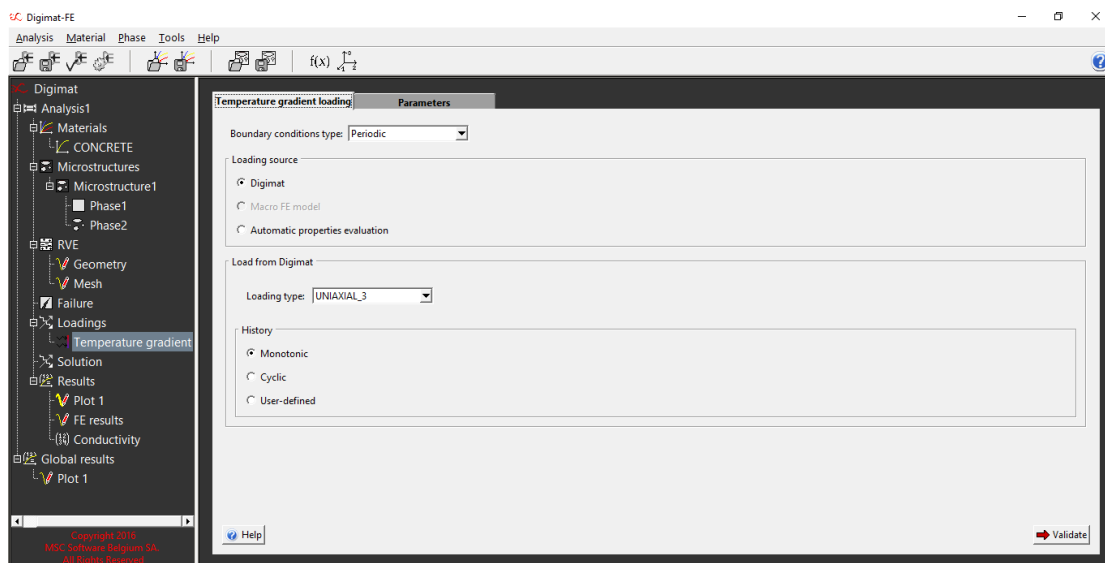
Εικόνα 70 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



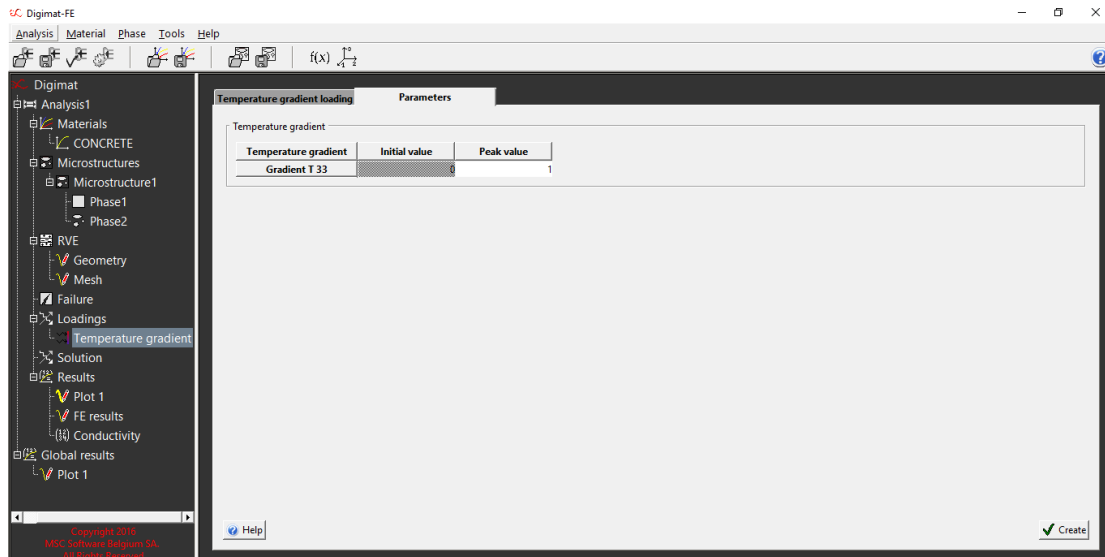
Εικόνα 71 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



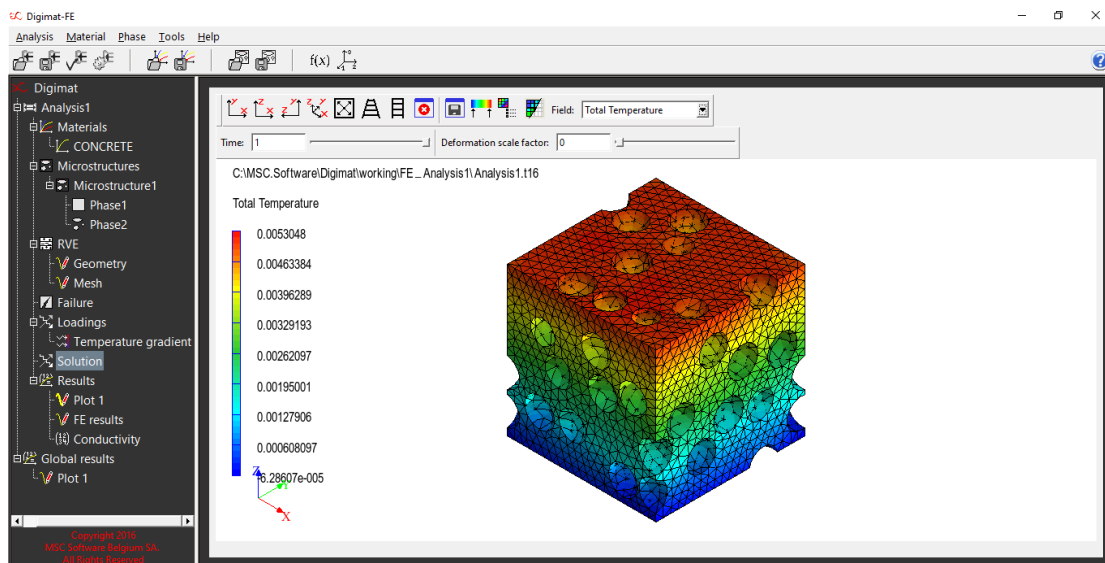
Εικόνα 72 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



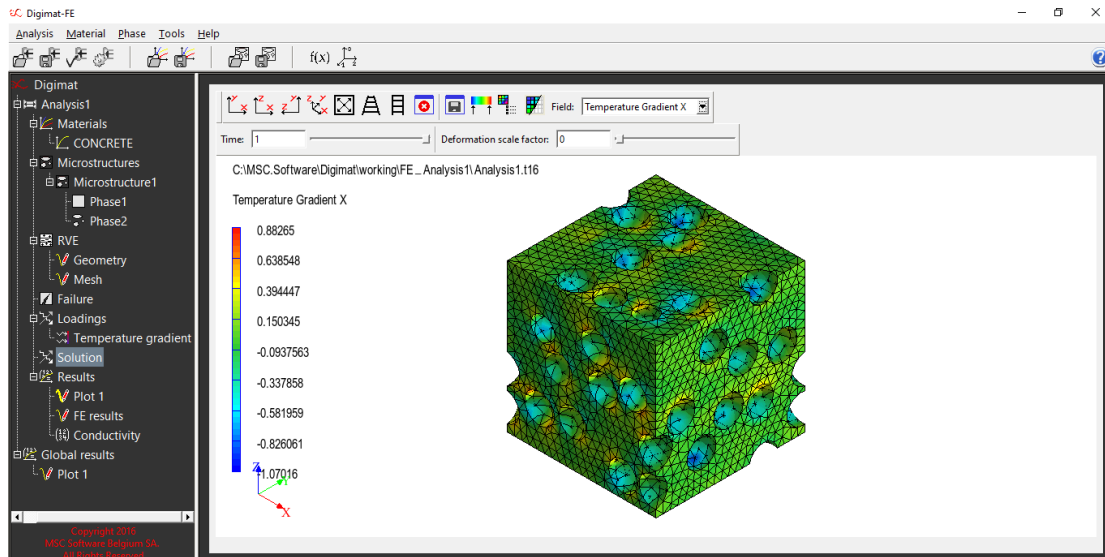
Εικόνα 73 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (τριαξινικά)



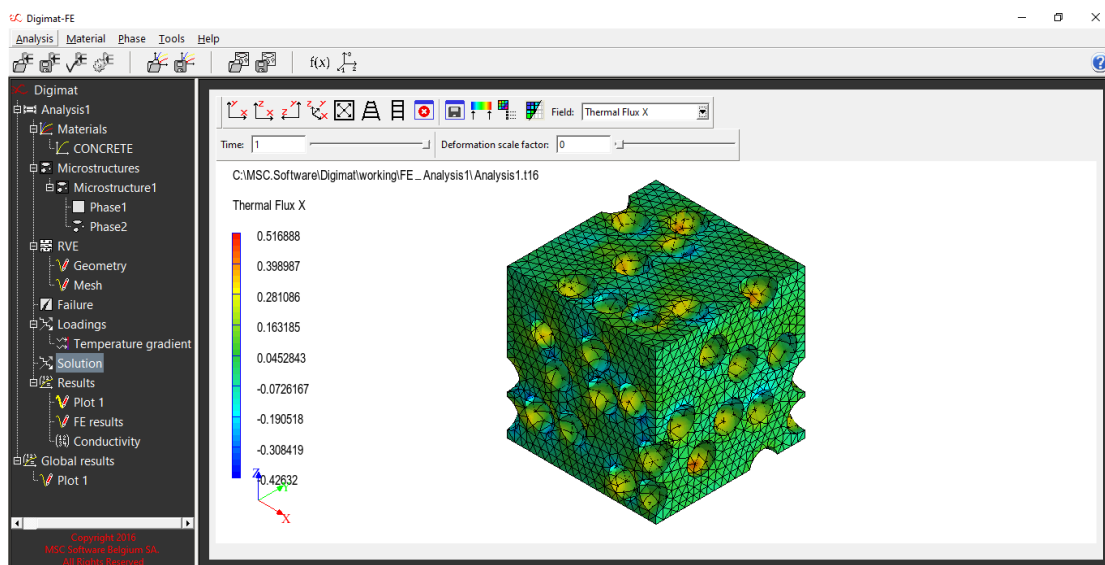
Εικόνα 74 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



Εικόνα 75 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



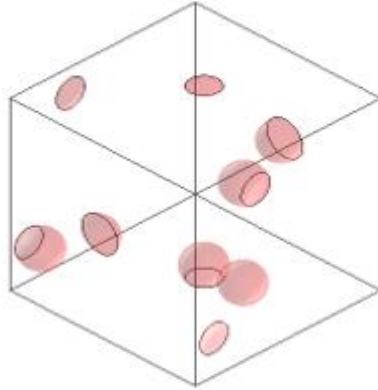
Εικόνα 76 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



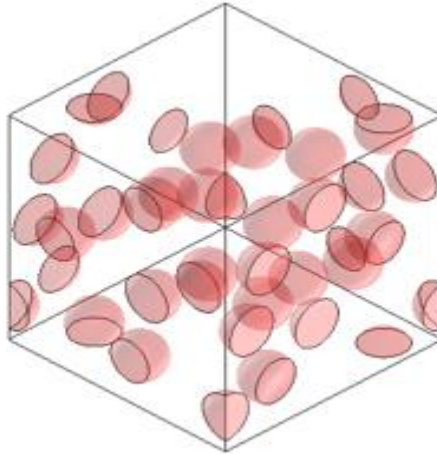
Εικόνα 77 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας

Παρακάτω απεικονίζονται κάποιες ενδεικτικές γεωμετρίες του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου για διαφορετικές περιεκτικότητες κάθε φορά.

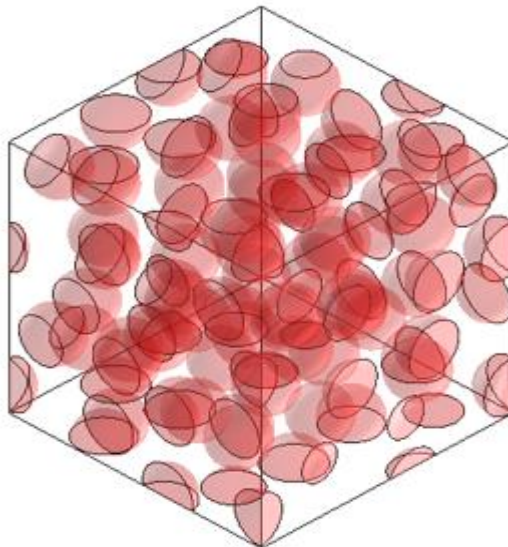
Γεωμετρία με 2% περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης:



Γεωμετρία με 10% περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης:



Γεωμετρία με 28% περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης:



3.3 Διαφοροποίηση διαμέτρου εγκλεισμάτων

Οι επόμενες μετρήσεις που υλοποιήθηκαν, ήταν για την μελέτη της επίδρασης της διαμέτρου των εγκλεισμάτων αερογέλης, ως προς τις θερμικές ιδιότητες του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου και πιο συγκεκριμένα του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k .

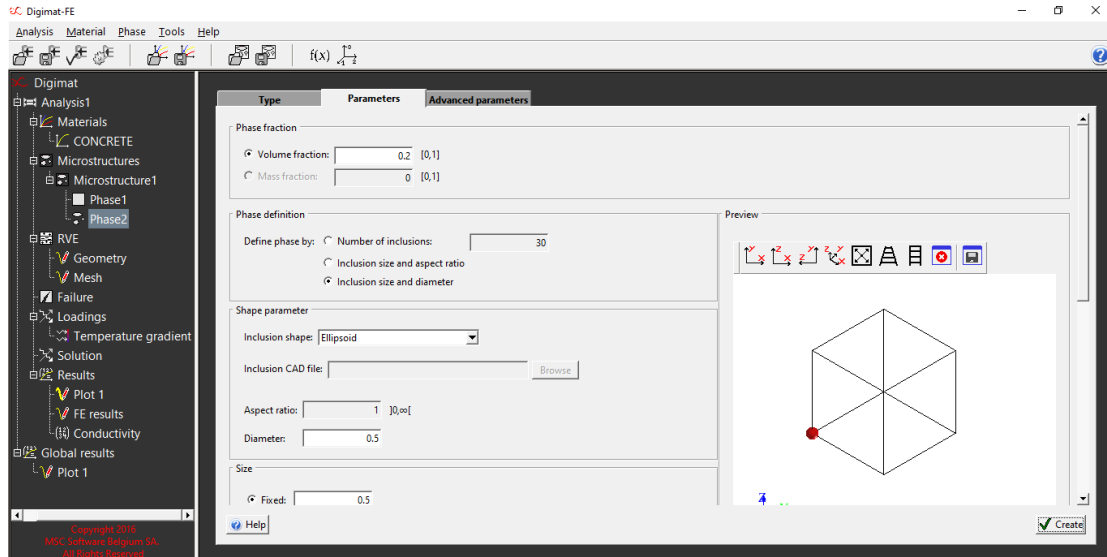
Σε αυτή τη παράγραφο πραγματοποιήθηκαν ποικίλες προσεγγίσεις, συγκεκριμένα οι τιμές των διαμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 0.8mm, 1.0mm, 1.5mm και για 2.0mm. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με σταθερή περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης 20% και πραγματοποιήθηκαν για την κάθε μέτρηση 3 επαναλήψεις. Ο σκοπός των διαφόρων επαναλήψεων οφείλεται στην μελέτη και παρατήρηση τυχόν αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων των θερμικών τάσεων καθώς και των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας.

Η ανάπτυξη και η επίλυση των μοντέλων και των προσεγγίσεων των παρακάτω μοντέλων, έγιναν όπως ακριβώς προηγουμένως για τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων αερογέλης, με την χρήση της μεθοδολογίας του προγράμματος Digimat. Στις απεικονίσεις που επισυνάπτονται ακολουθώντας παραλείποντας τα αρχικά στάδια απεικόνισης, διότι ήδη επισημάνθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο.

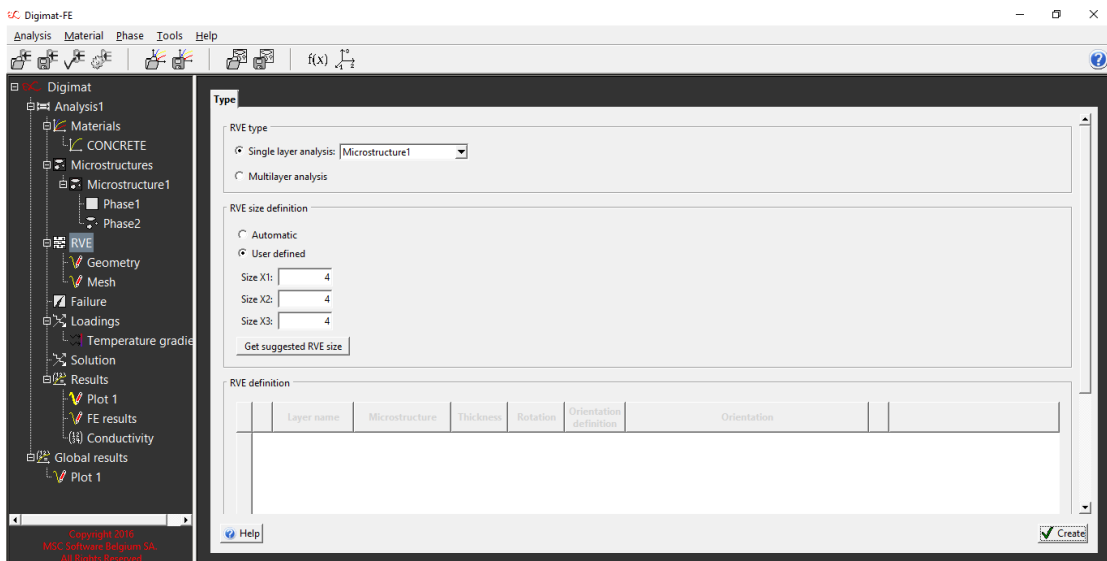
Για όλες τις μετρήσεις που αφορούν το μοναδικό έγκλεισμα ισχύουν τα ακόλουθα που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα και διαφοροποιήθηκαν όσον αφορά τη διάμετρο των εγκλεισμάτων. Οι παρακάτω ενδεικτικές απεικονίσεις είναι για την διάμετρο εγκλεισμάτων 0.5mm.

Πίνακας 9: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοναδικό έγκλεισμα.

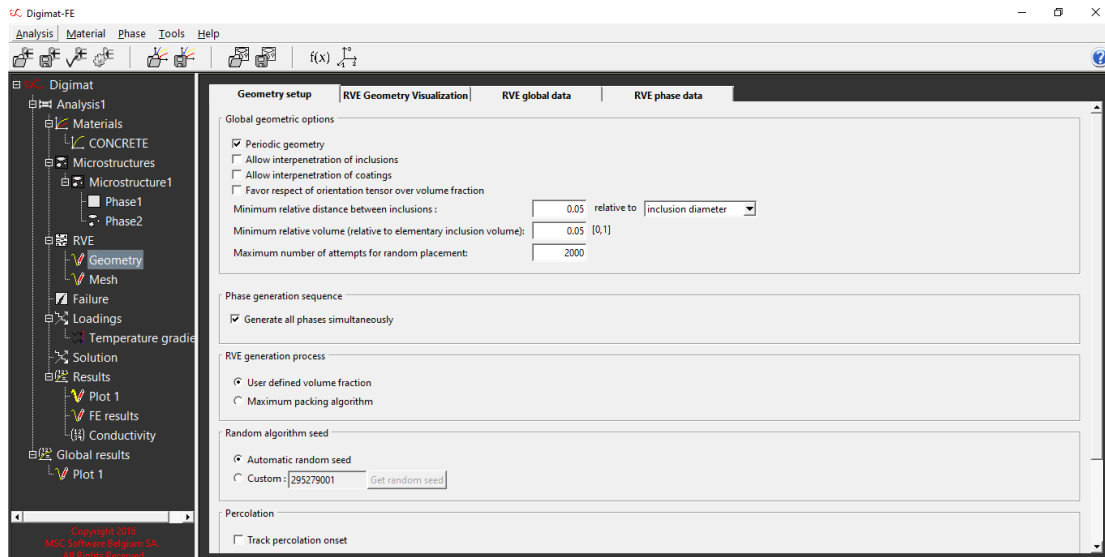
Περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης	20%
Συντεταγμένες RVE	4x4x4 mm
Μέγεθος στοιχείων	0.2 mm
Διάμετρος εγκλεισμάτων	0.5 mm



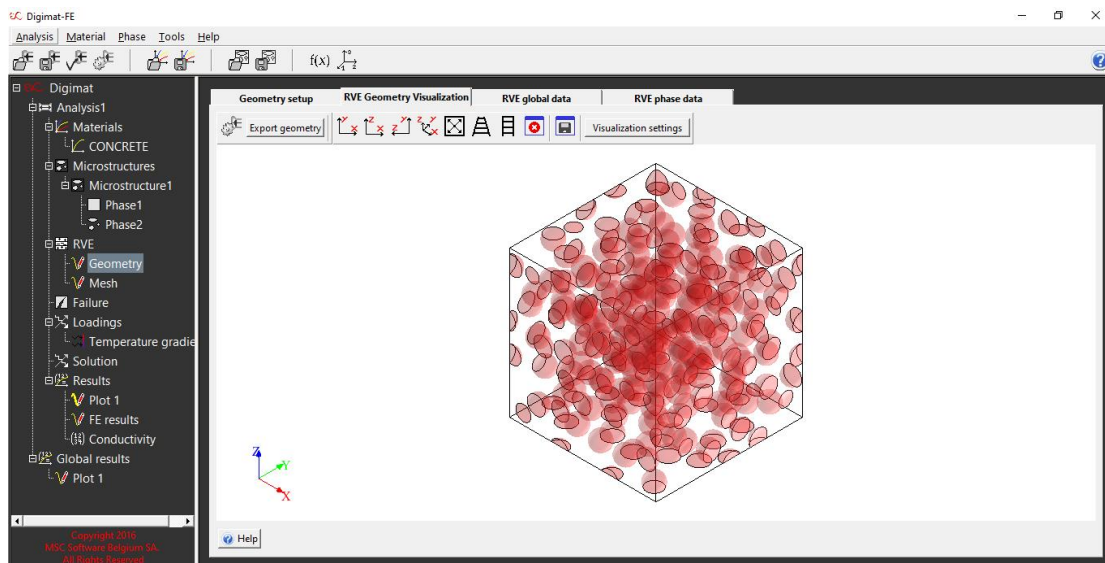
Εικόνα 78 : Ορισμός διαμέτρου εγκλεισμάτων.



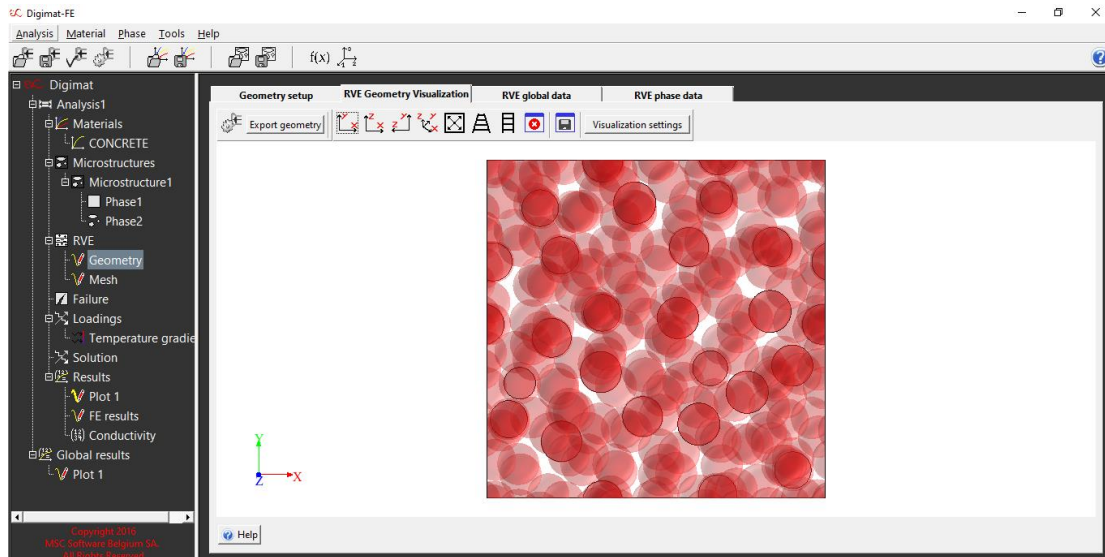
Εικόνα 79 : Διαστάσεις RVE



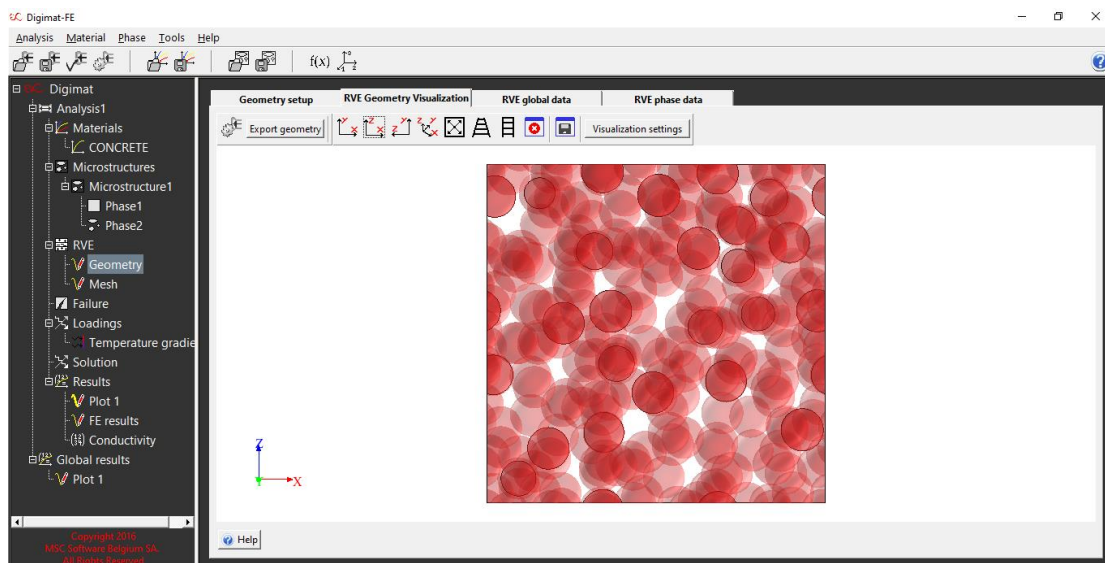
Εικόνα 80 : Επιλογή για εξαγωγή γεωμετρίας RVE



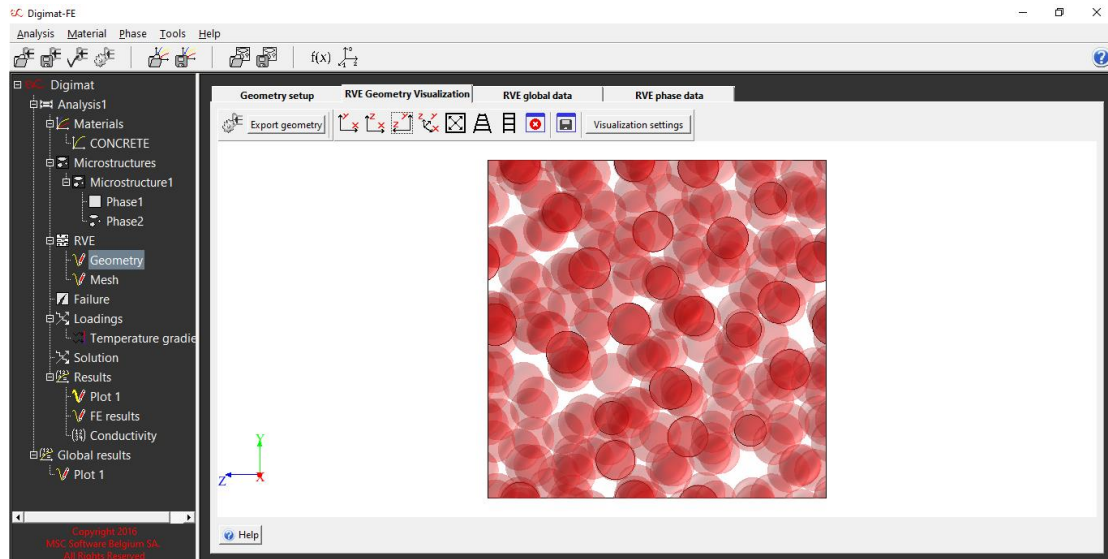
Εικόνα 81 : Απεικόνιση γεωμετρίας μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane x-y-z)



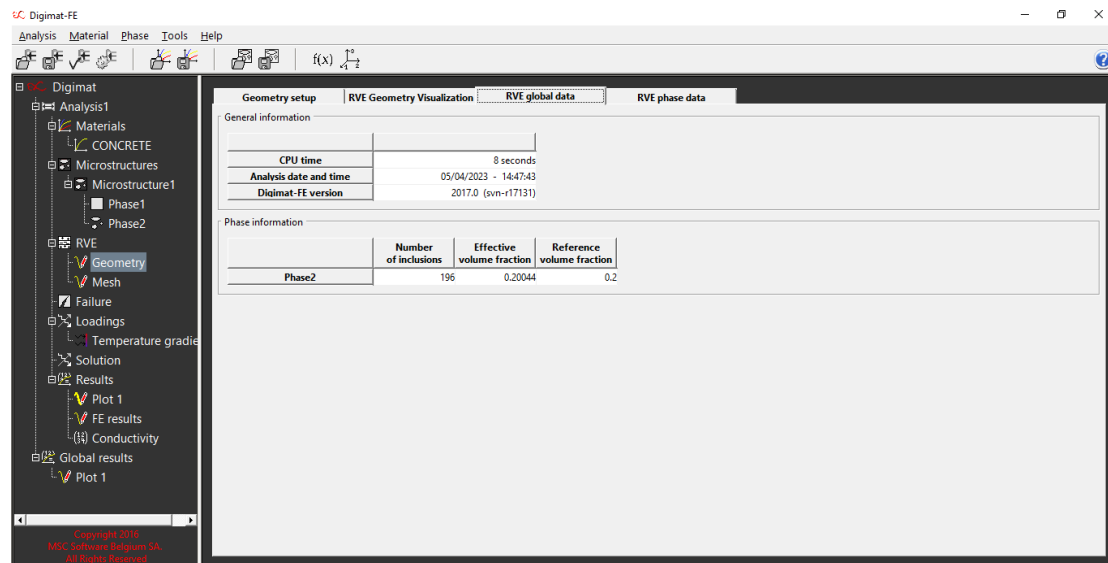
Εικόνα 82 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane y-x)



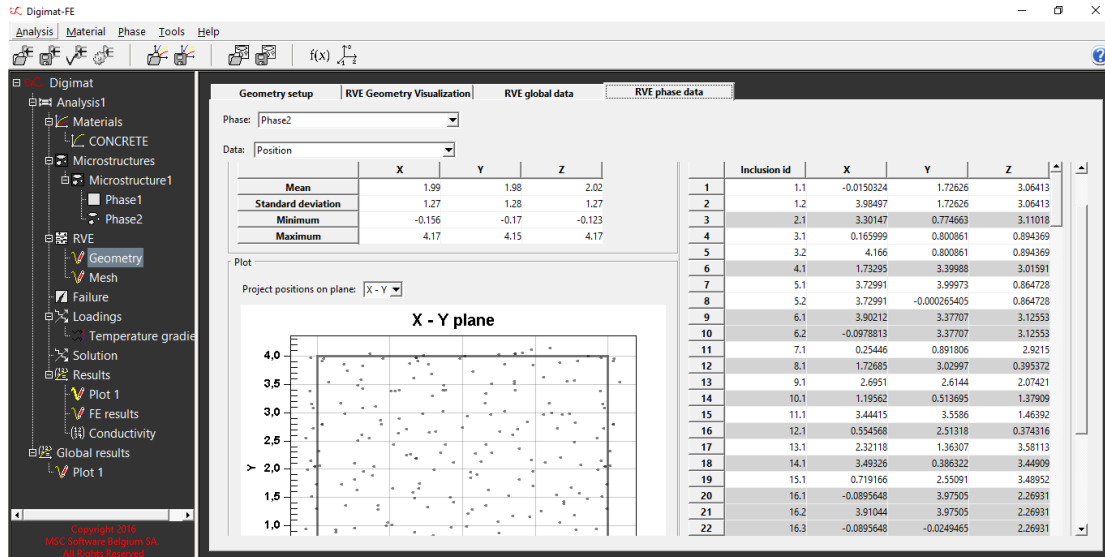
Εικόνα 83 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-x)



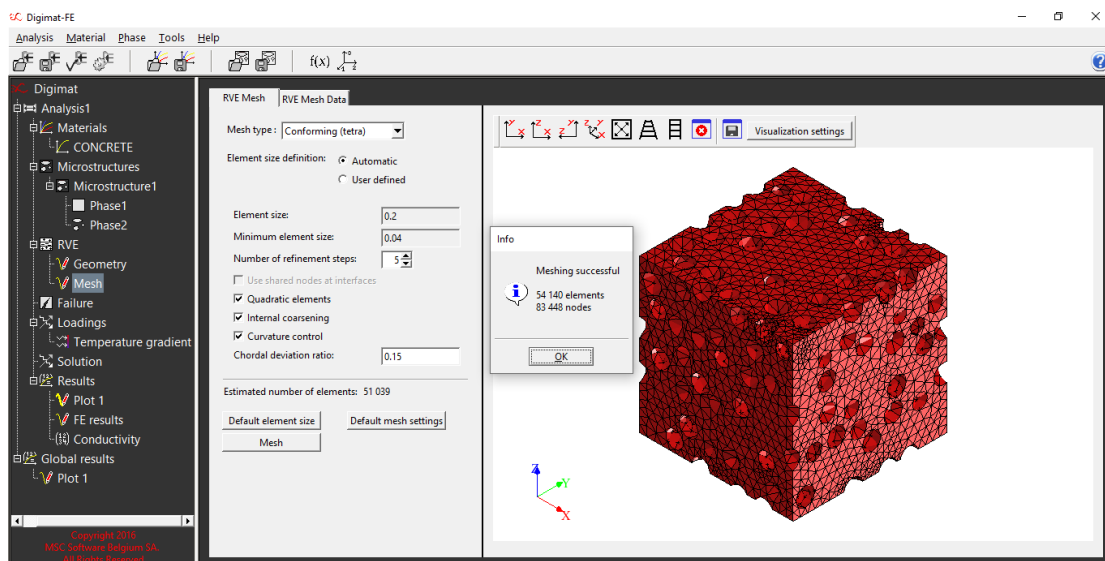
Εικόνα 84 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-y)



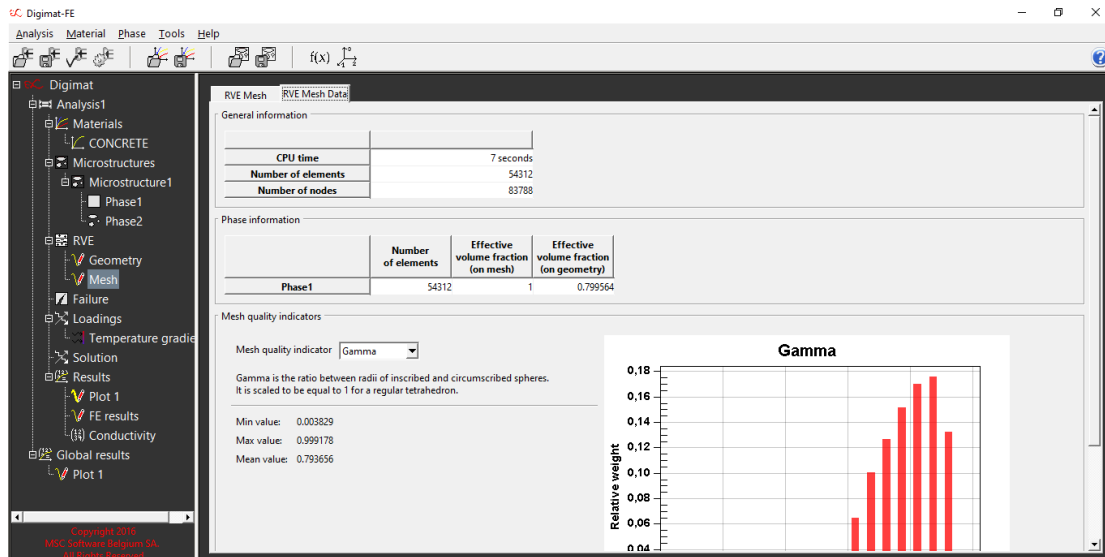
Εικόνα 85 : Απεικόνιση περιεκτικότητας



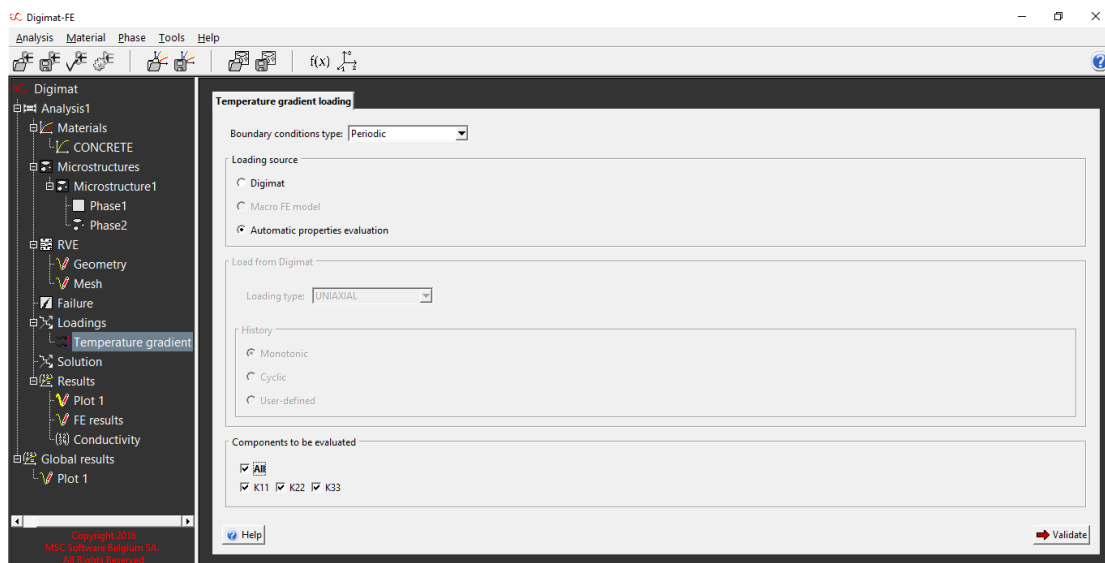
Εικόνα 86 : Απεικόνιση των δεδομένων του RVE



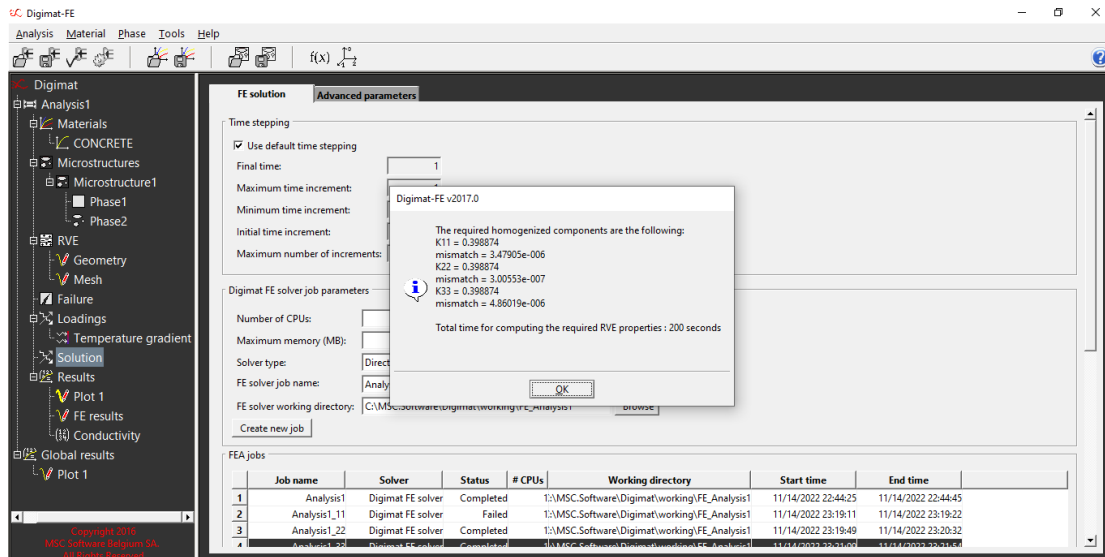
Εικόνα 87 : Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE



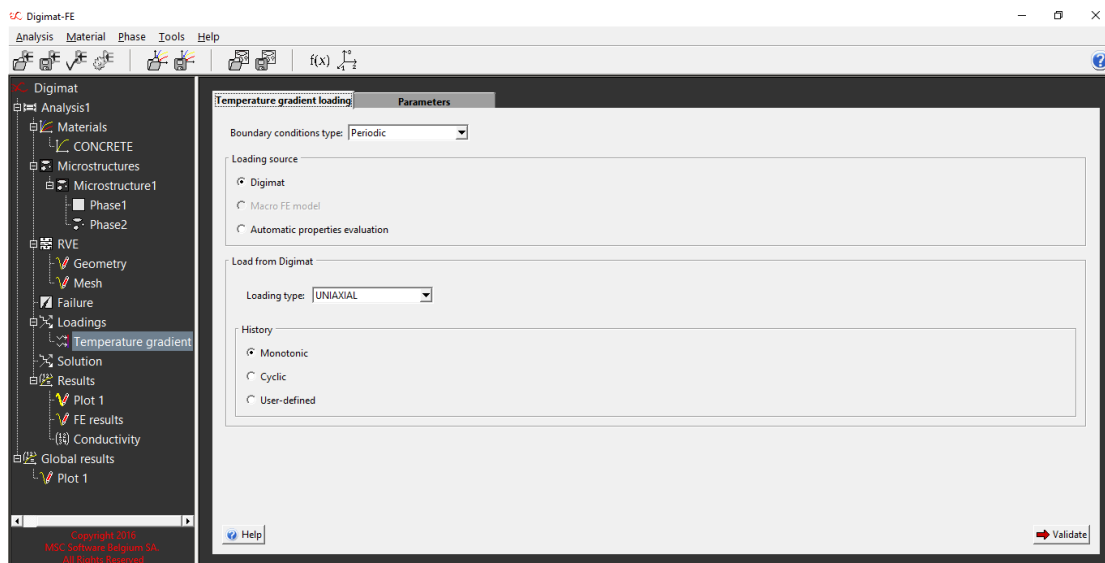
Εικόνα 88 : Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης



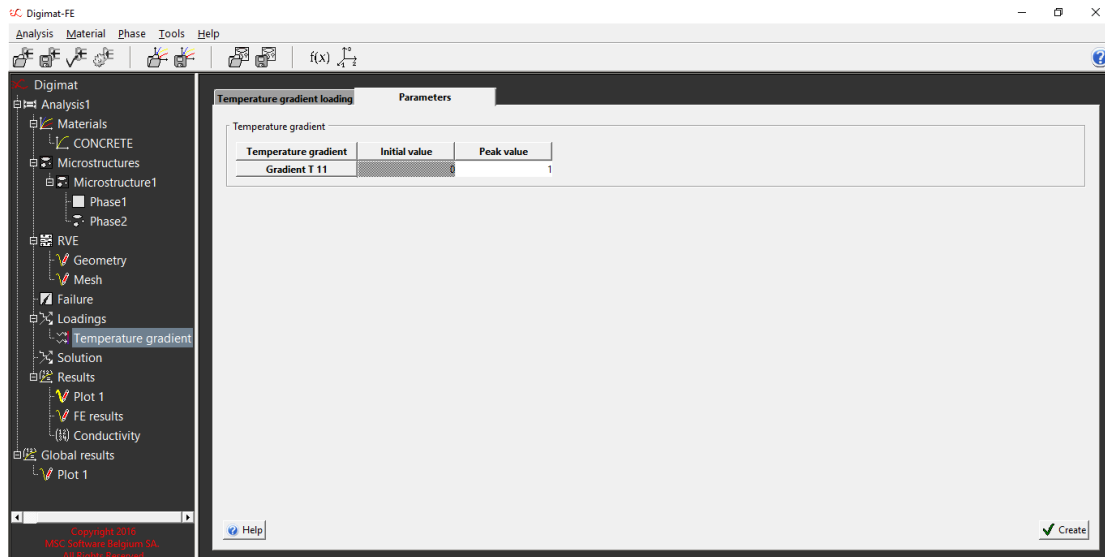
Εικόνα 89 : Ορισμός εύρεσης θερμικής αγωγιμότητας



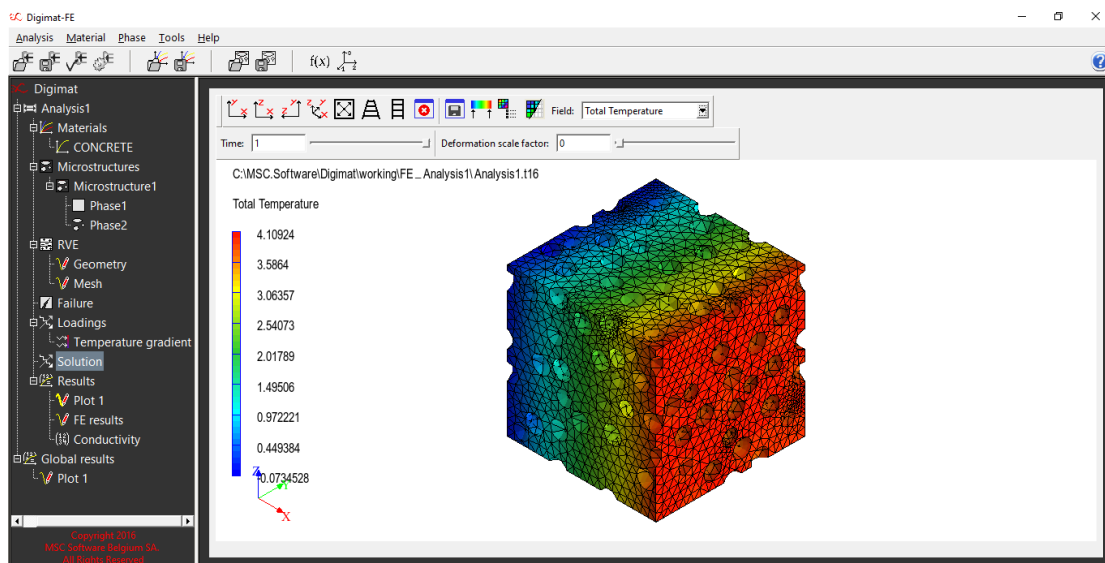
Εικόνα 90 : Αποτελέσματα συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας



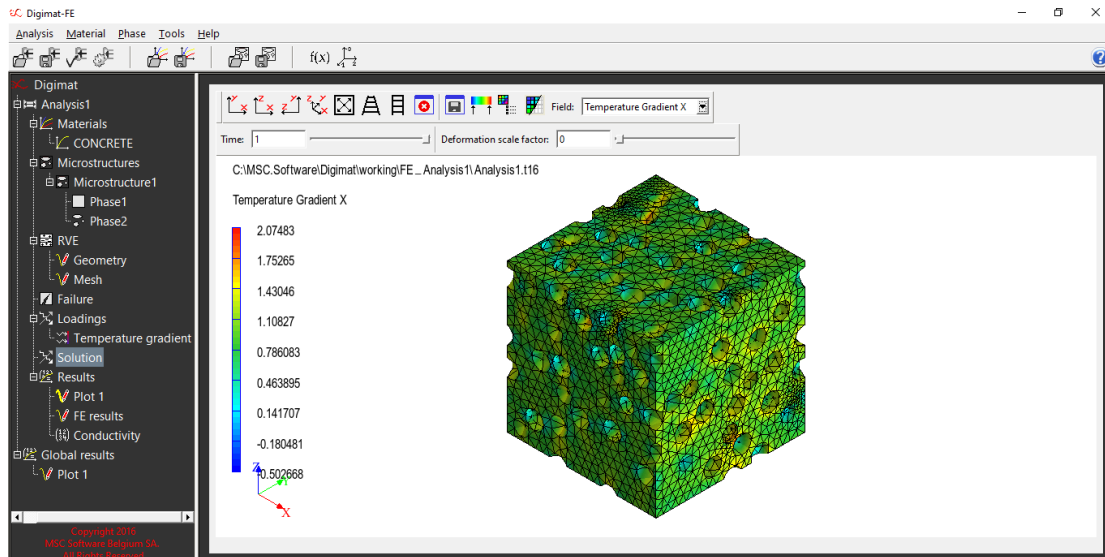
Εικόνα 91 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (μονοαξονικά)



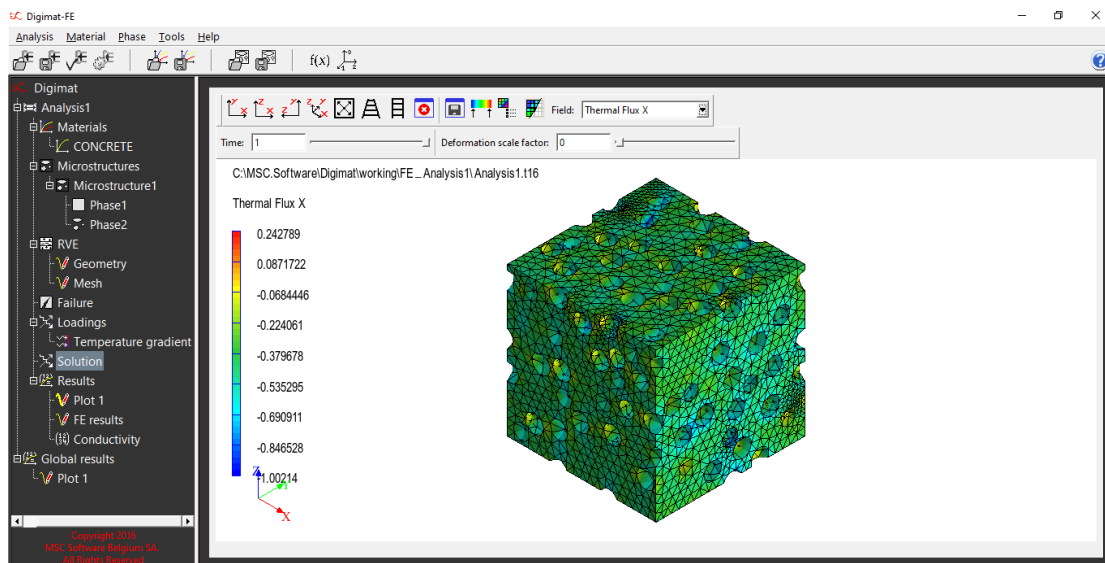
Εικόνα 92 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



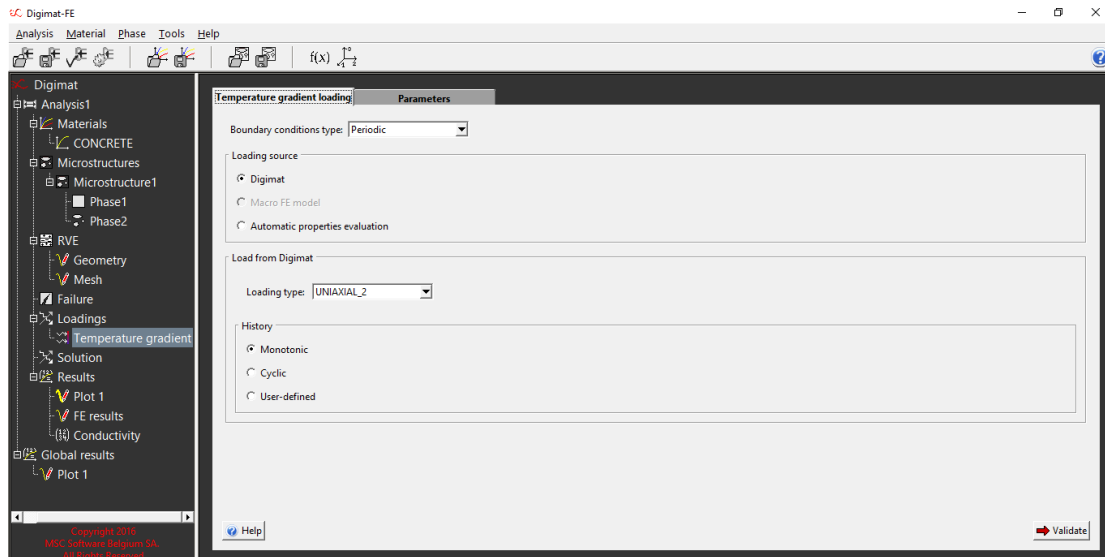
Εικόνα 93 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



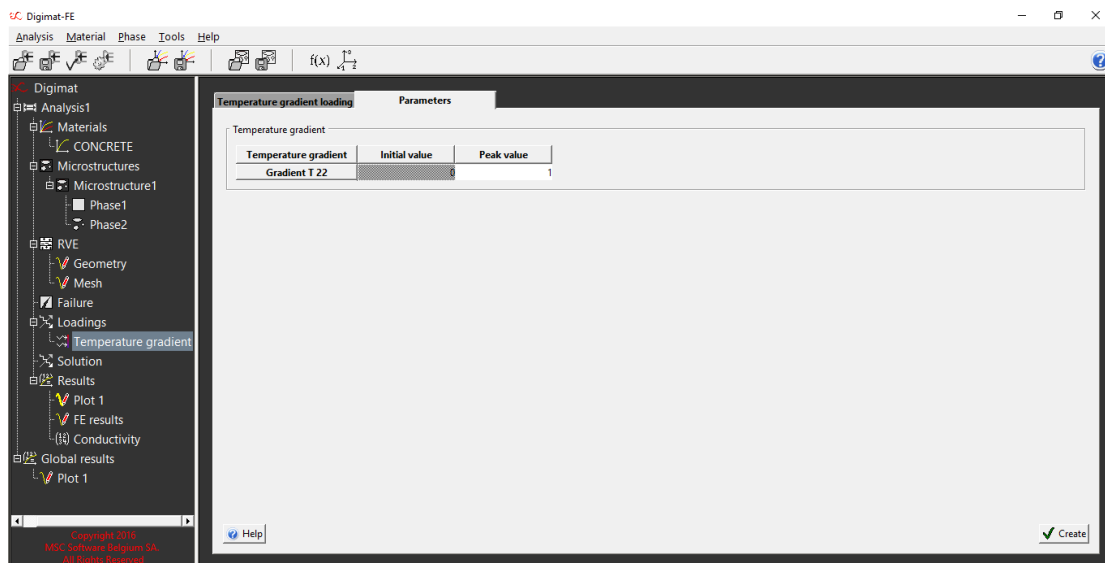
Εικόνα 94 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



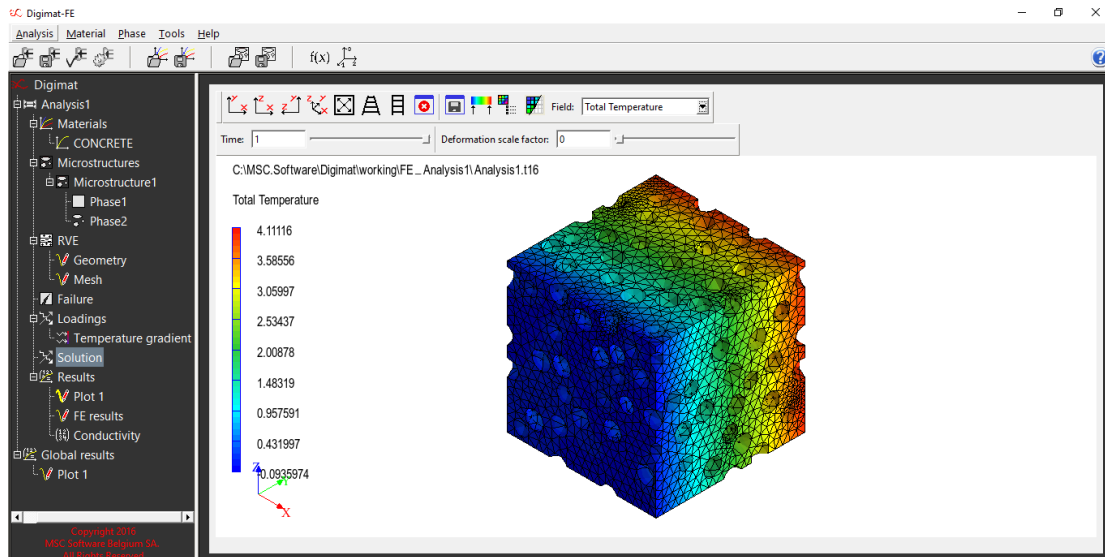
Εικόνα 95 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



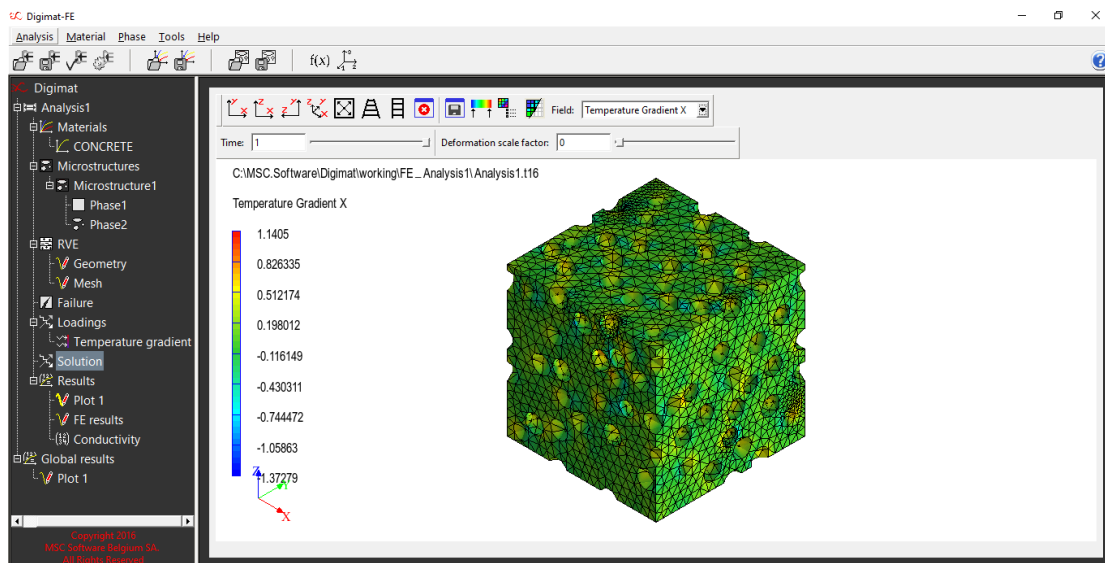
Εικόνα 96 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (διαξονικά)



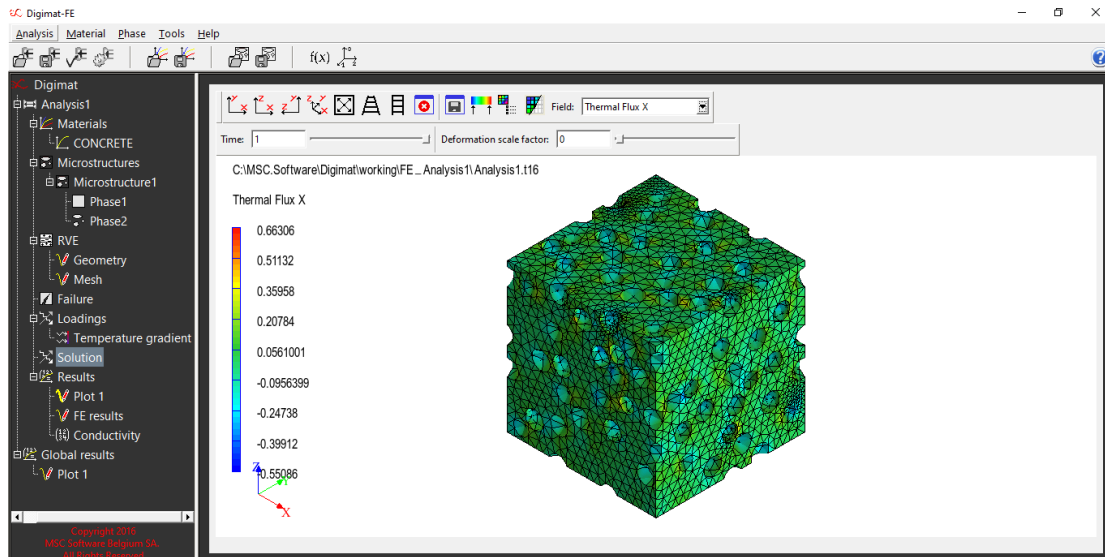
Εικόνα 97 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



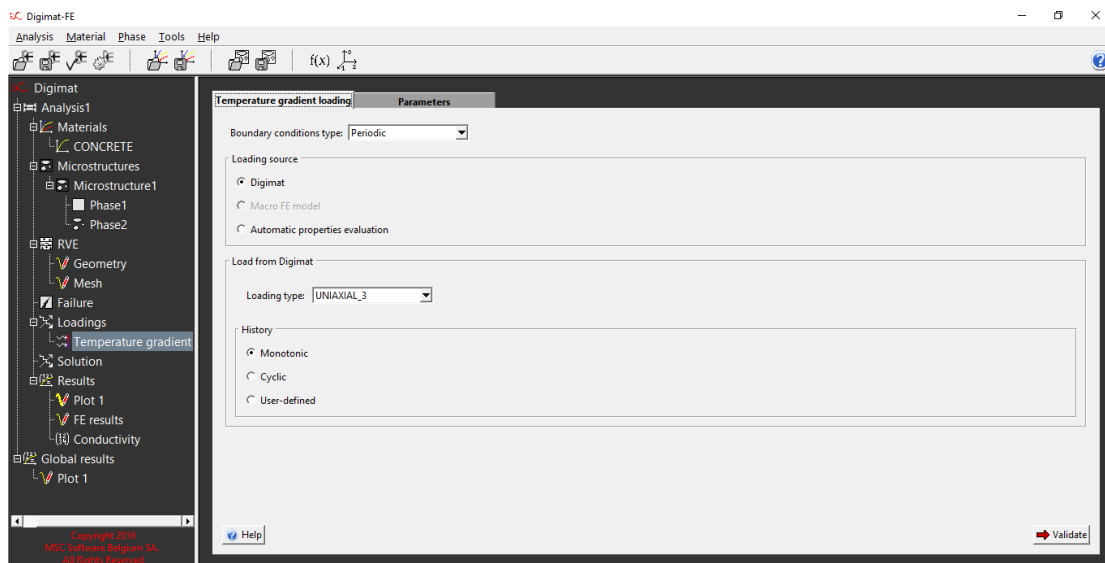
Εικόνα 98 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



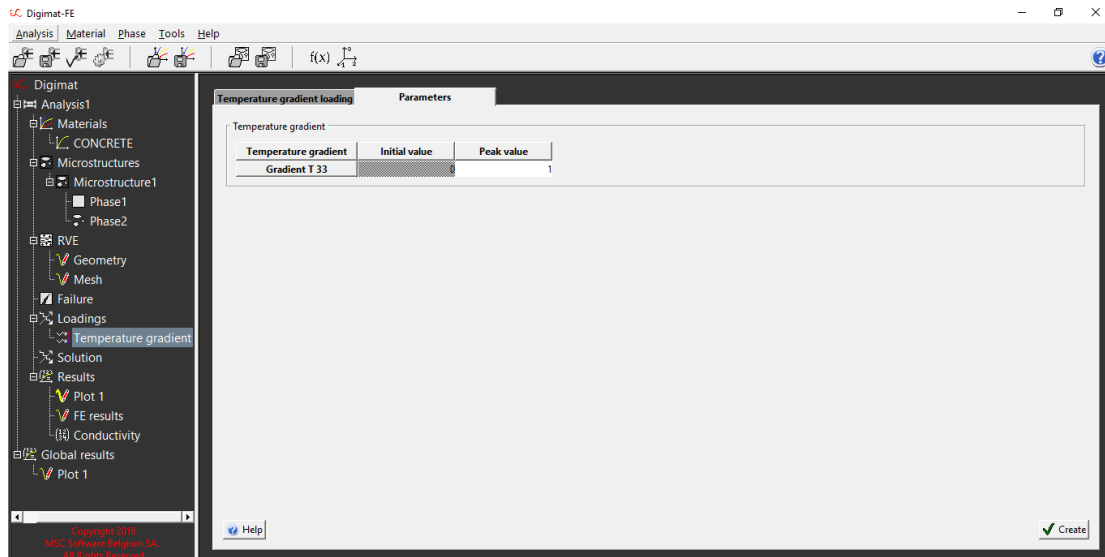
Εικόνα 99 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



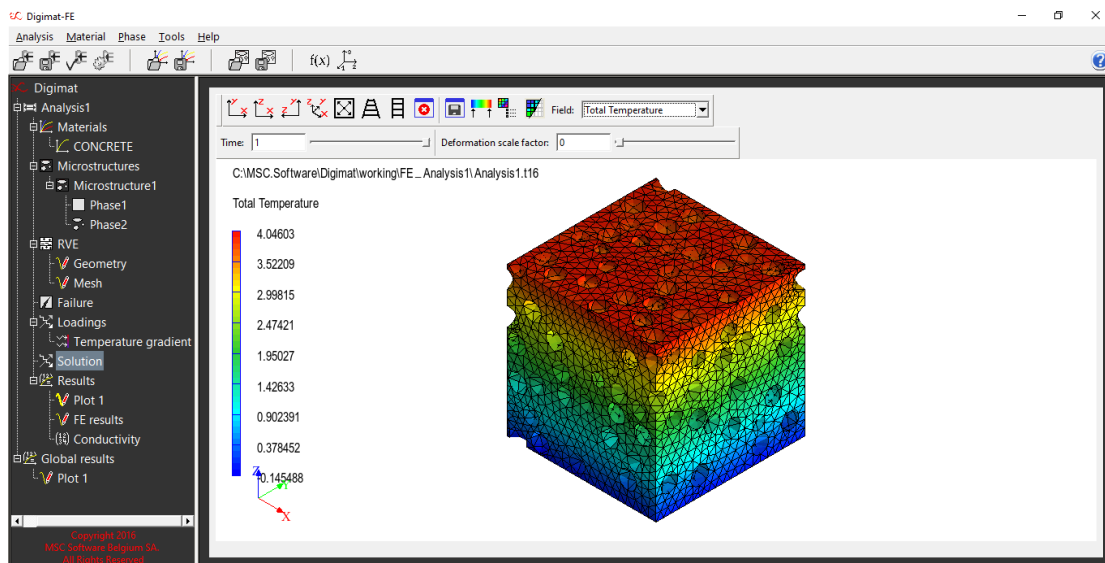
Εικόνα 100 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



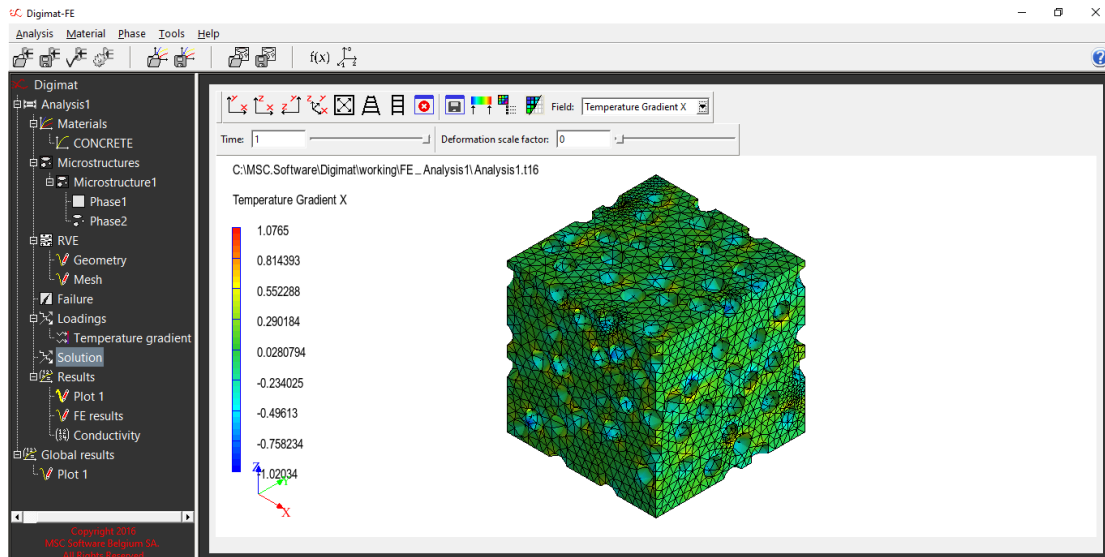
Εικόνα 101 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (τριαξινικά)



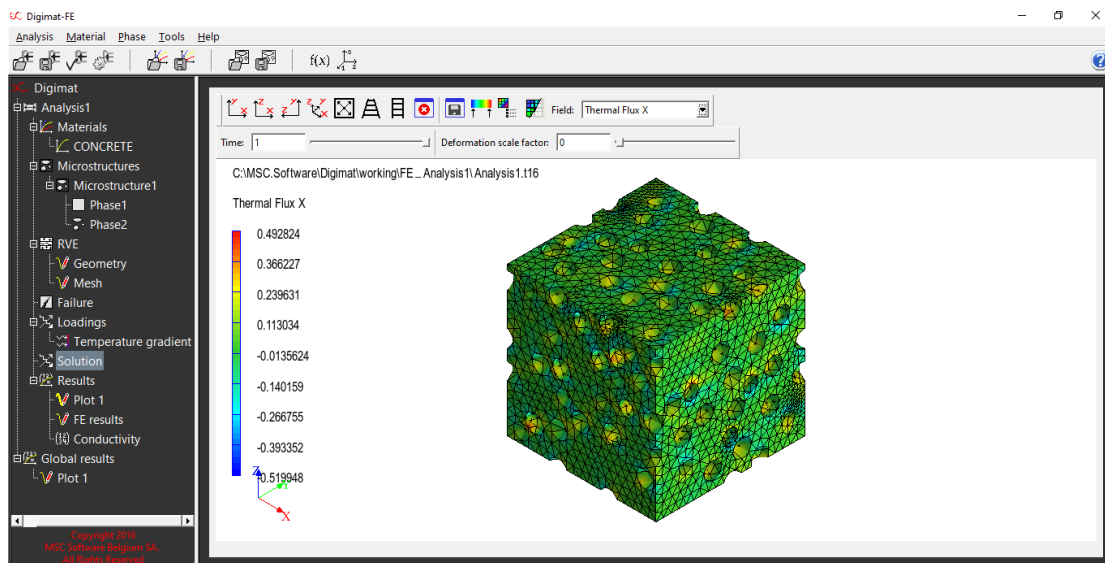
Εικόνα 102 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



Εικόνα 103 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



Εικόνα 104 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



Εικόνα 105 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας

3.4 Διαφοροποίηση μεγέθους στοιχείων

Οι τελευταίες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν για την μελέτη της επίδρασης του μεγέθους των στοιχείων, ως προς τις θερμικές ιδιότητες του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου και πιο συγκεκριμένα του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k .

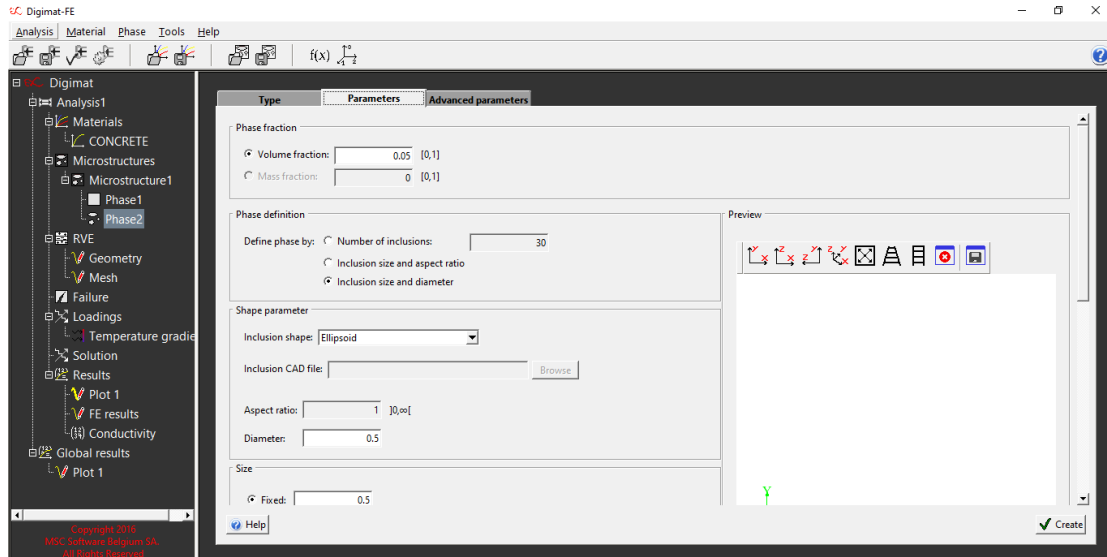
Στην προκειμένη περίπτωση διενεργήθηκαν αρκετές προσεγγίσεις για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων καθώς και διαφορετικές περιεκτικότητες. Πιο συγκεκριμένα οι περιεκτικότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 2%, 5%, 10%, 15%, 20% και 25% και για τη κάθε περιεκτικότητα πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις με διαφορετικό μέγεθος στοιχείων κάθε φορά: 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30. Ο σκοπός των τόσων επαναλήψεων ήταν για να γίνει πλήρως αντιληπτή η επίδραση του μεγέθους στοιχείων και για την παρατήρηση τυχόν αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων των θερμικών τάσεων καθώς και των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας.

Η ανάλυση και η επίλυση των μετρήσεων έγινε με όμοιο τρόπο με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, μέσω του εμπορικού προγράμματος Digimat-FE. Ακολούθως αναλύεται η προσπάθεια εκτίμησης που αφορά τη μία από τις παραπάνω περιεκτικότητες και την μία από τις πέντε διαφορετικές επαναλήψεις μεγέθους στοιχείων. Από τις απεικονίσεις που επισυνάπτονται παρακάτω παραλείπονται πάλι τα αρχικά στάδια της μεθοδολογίας επειδή παραμένουν ίδια για όλες τις περιπτώσεις.

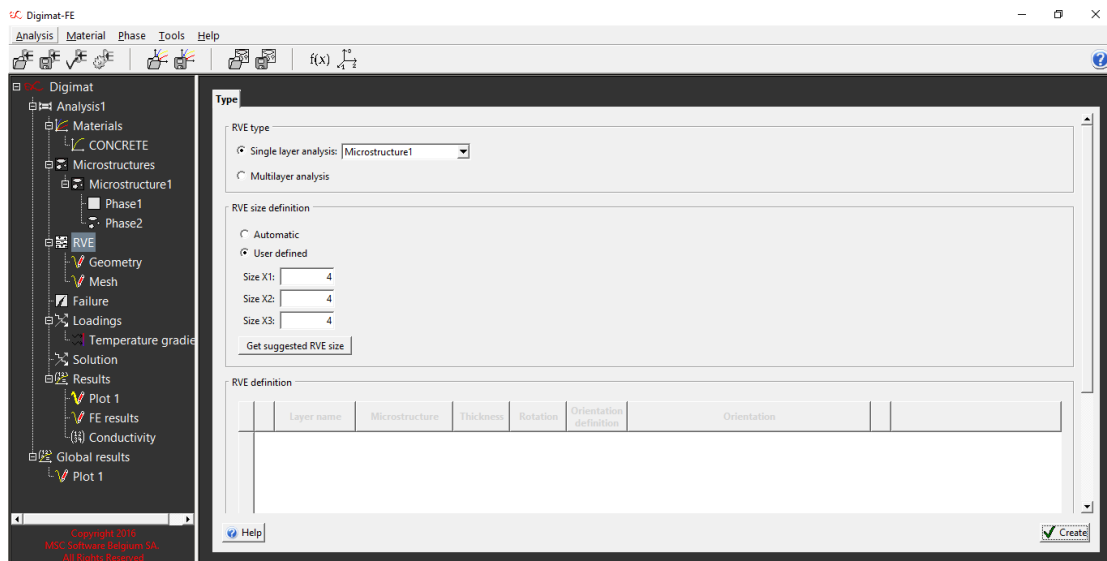
Για όλες τις μετρήσεις που αφορούν το μοναδικό έγκλεισμα ισχύουν τα ακόλουθα που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα και διαφοροποιήθηκαν όσον αφορά το μέγεθος στοιχείων και την περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων. Οι παρακάτω ενδεικτικές απεικονίσεις είναι για την μέγεθος στοιχείων 0.10mm και περιεκτικότητα 5%.

Πίνακας 10: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοναδικό έγκλεισμα.

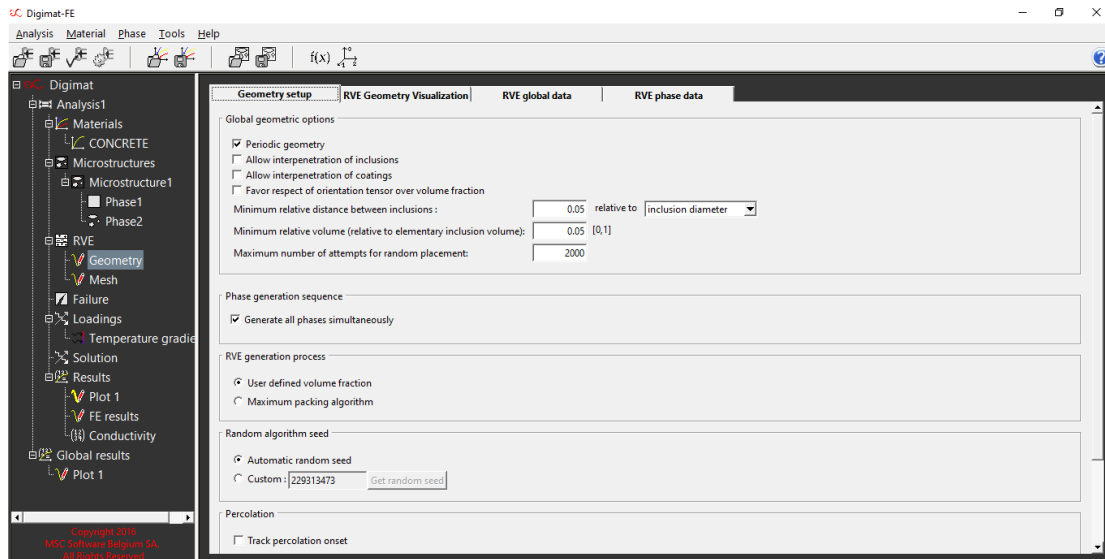
Περιεκτικότητα εγκλεισμάτων αερογέλης	5%
Συντεταγμένες RVE	4x4x4 mm
Μέγεθος στοιχείων	0.10 mm
Διάμετρος εγκλεισμάτων	0.5 mm
Minimum μέγεθος στοιχείων	0.05 mm



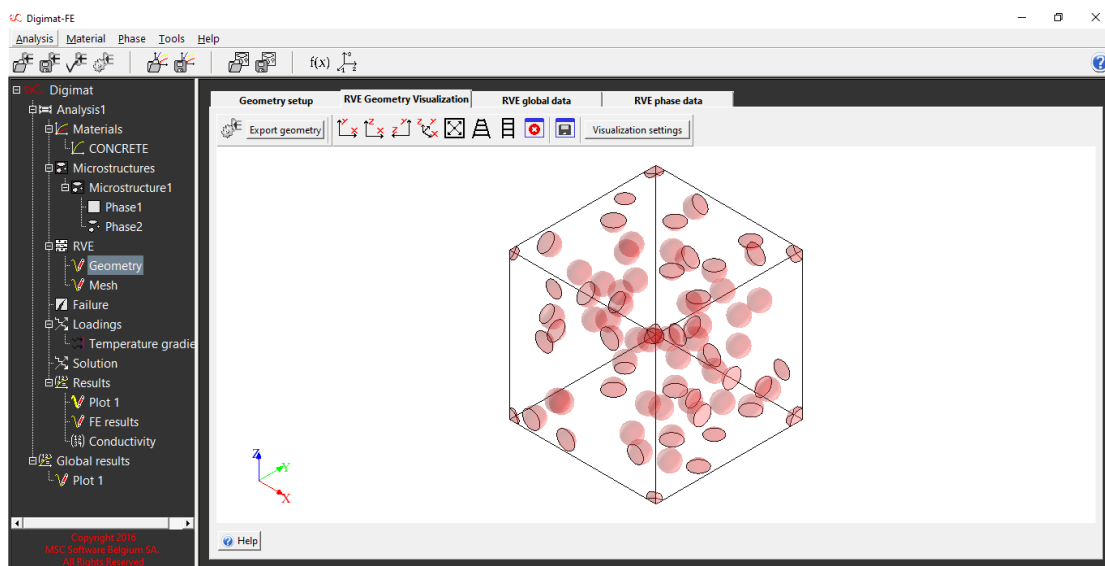
Εικόνα 106 : Ορισμός διαμέτρου εγκλεισμάτων.



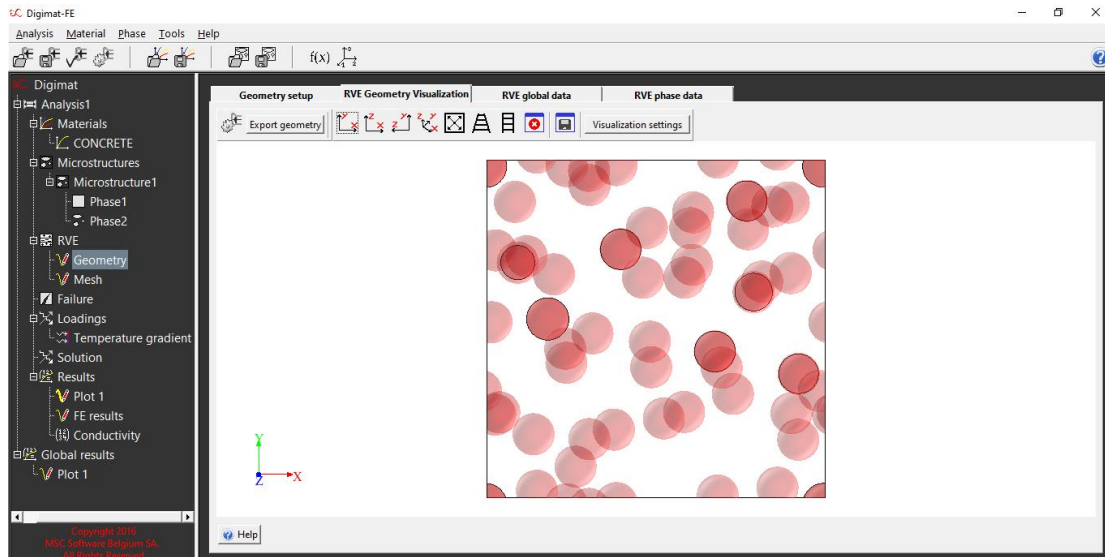
Εικόνα 107 : Διαστάσεις RVE



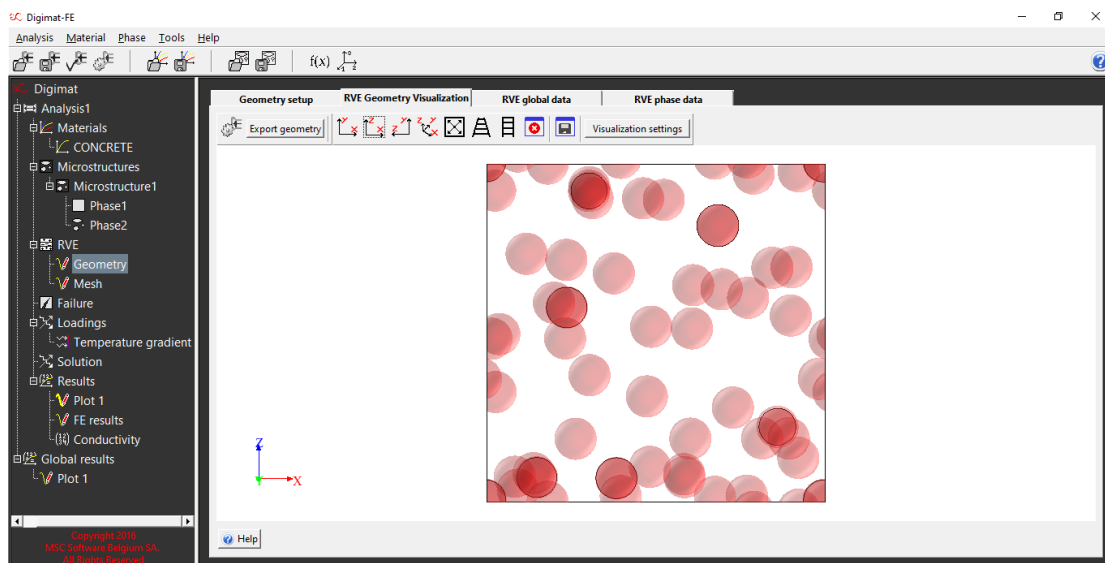
Εικόνα 108 : Επιλογή για εξαγωγή γεωμετρίας RVE



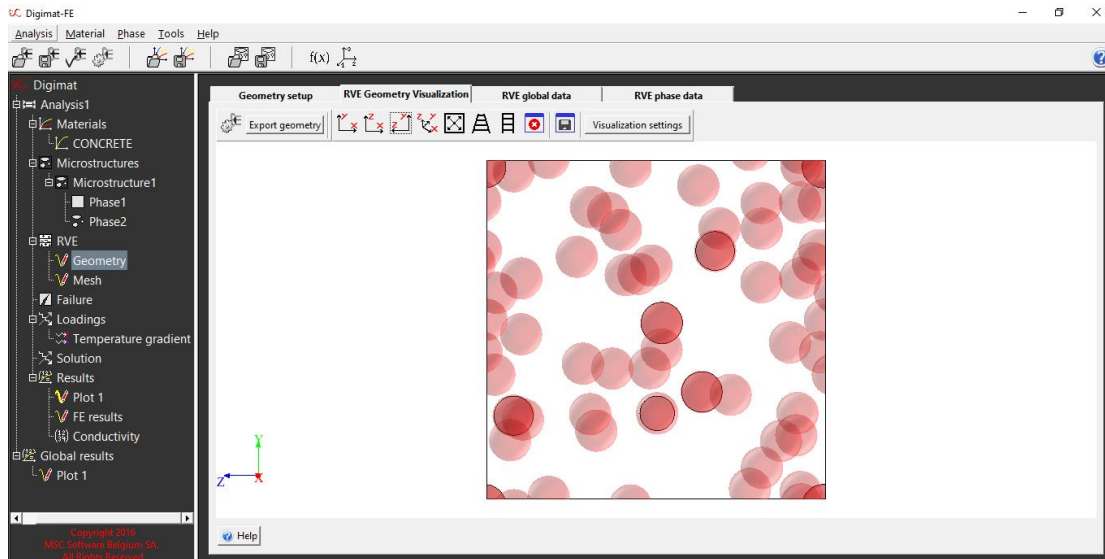
Εικόνα 109 : Απεικόνιση γεωμετρίας μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane x-y-z)



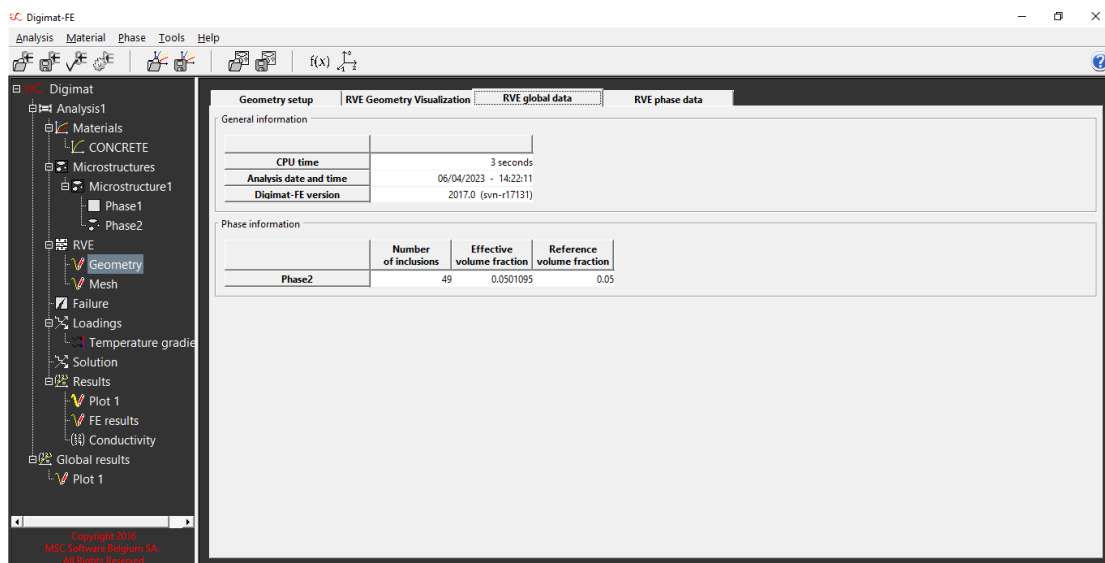
Εικόνα 110 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane $y-x$)



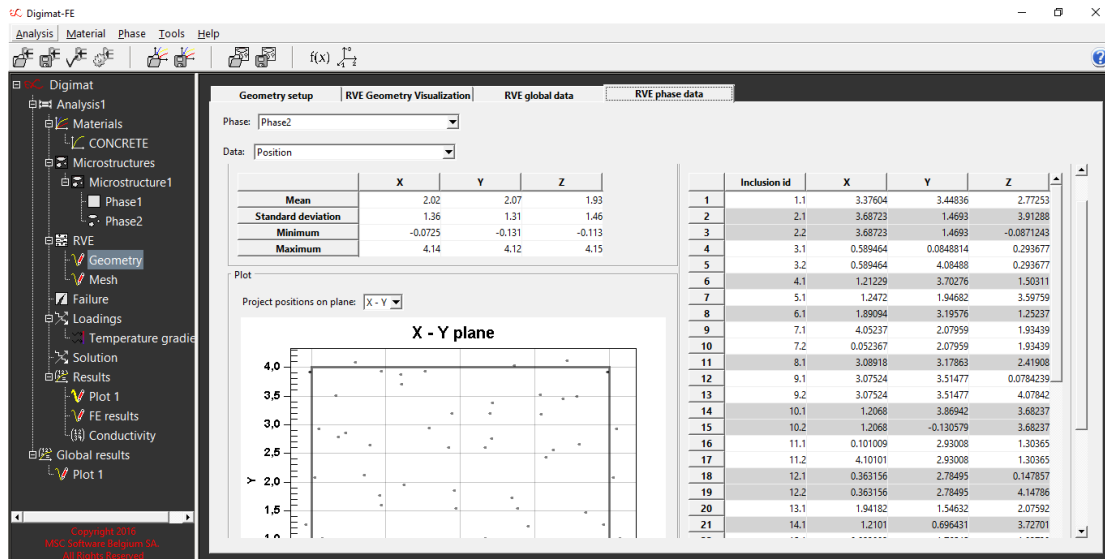
Εικόνα 111 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane $z-x$)



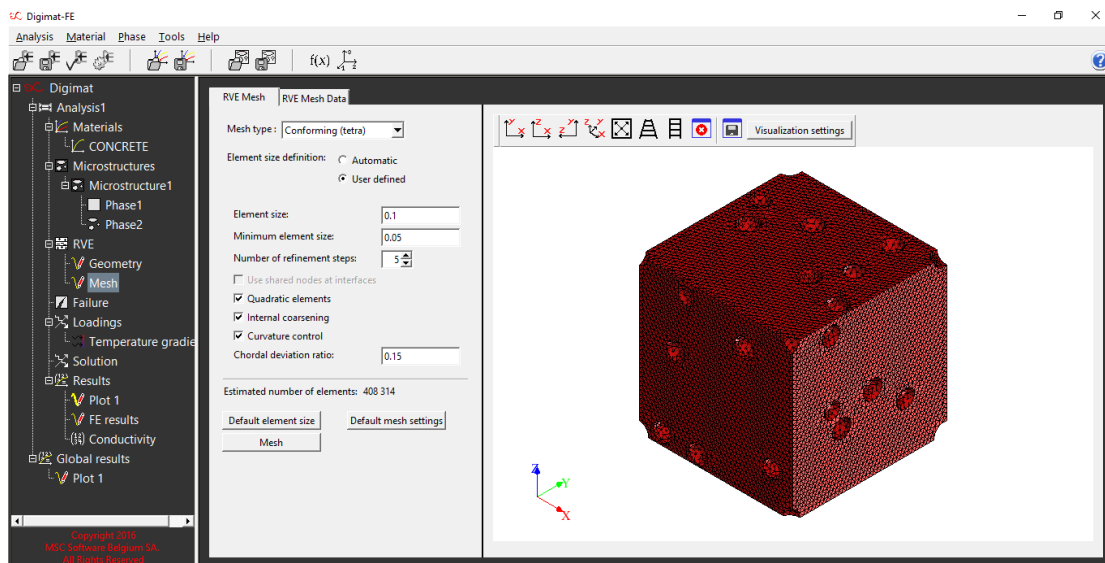
Εικόνα 112 : Απεικόνιση της γεωμετρίας της μικροδομής στο χώρο του RVE (Plane z-y)



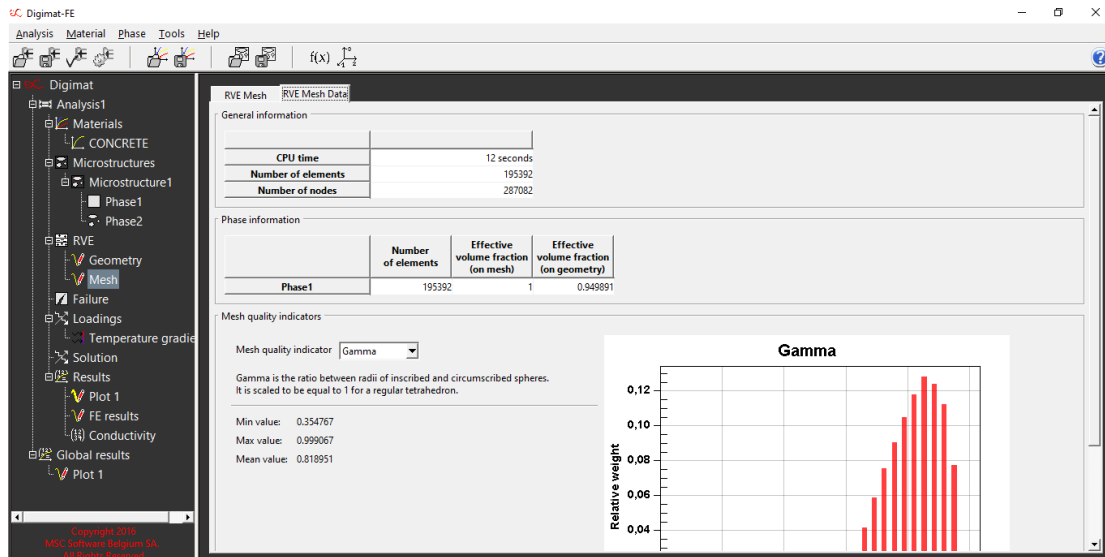
Εικόνα 113 : Απεικόνιση περιεκτικότητας



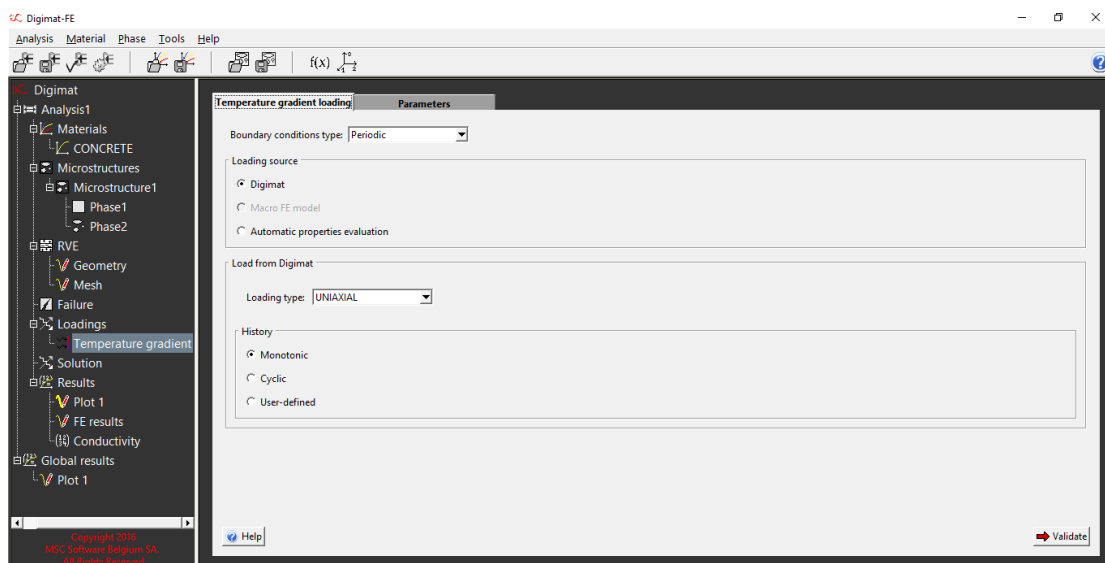
Εικόνα 114 : Απεικόνιση των δεδομένων του RVE



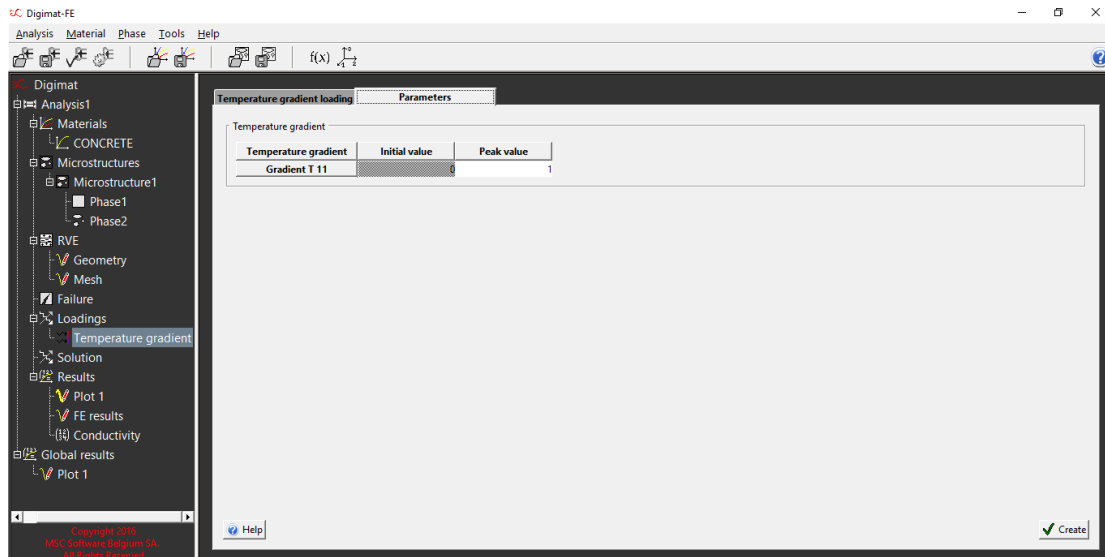
Εικόνα 115 : Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE



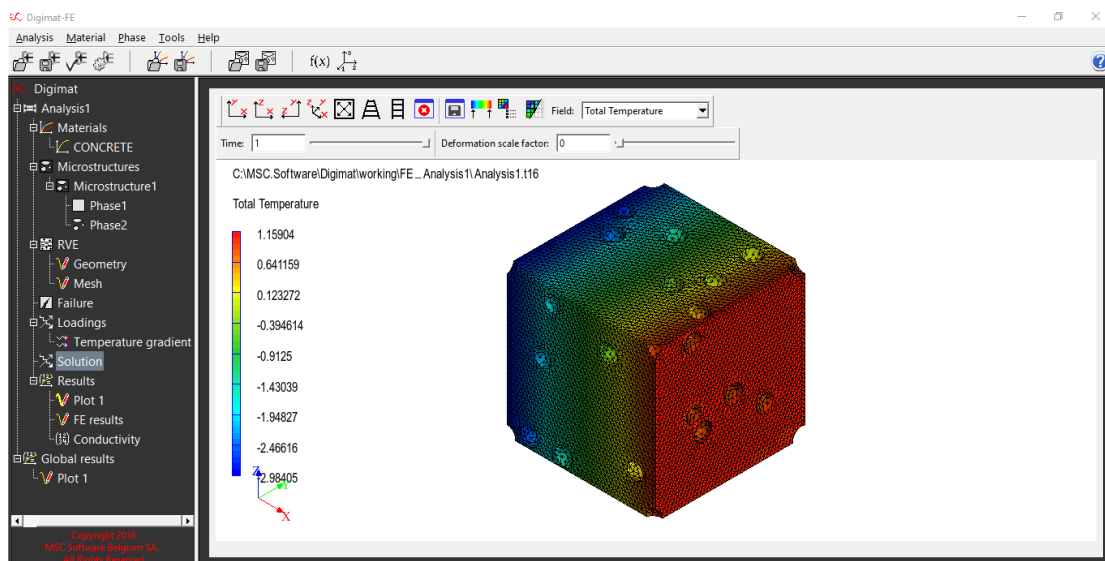
Εικόνα 116 : Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης



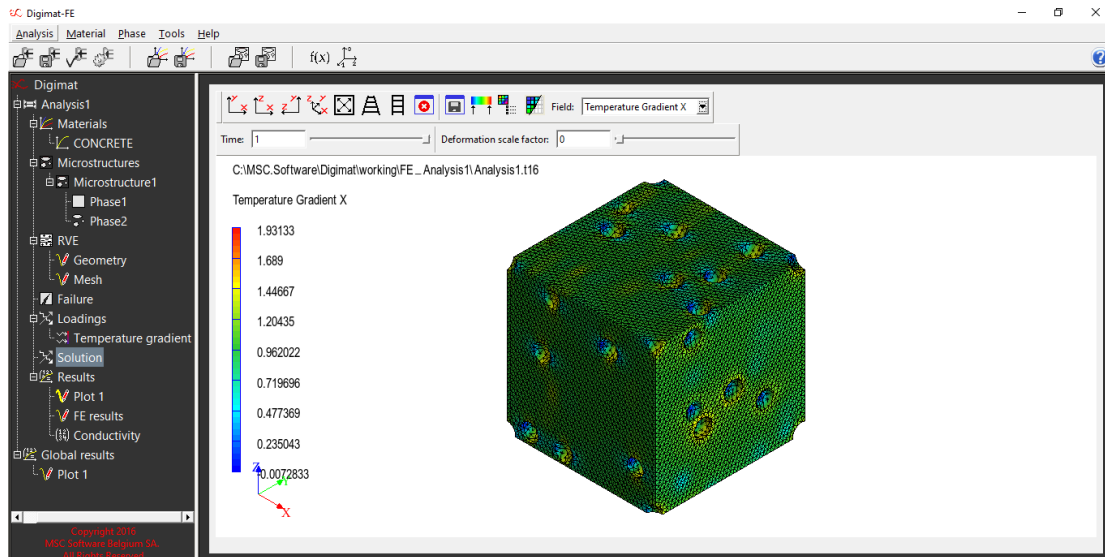
Εικόνα 117 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (μονοαξονικά)



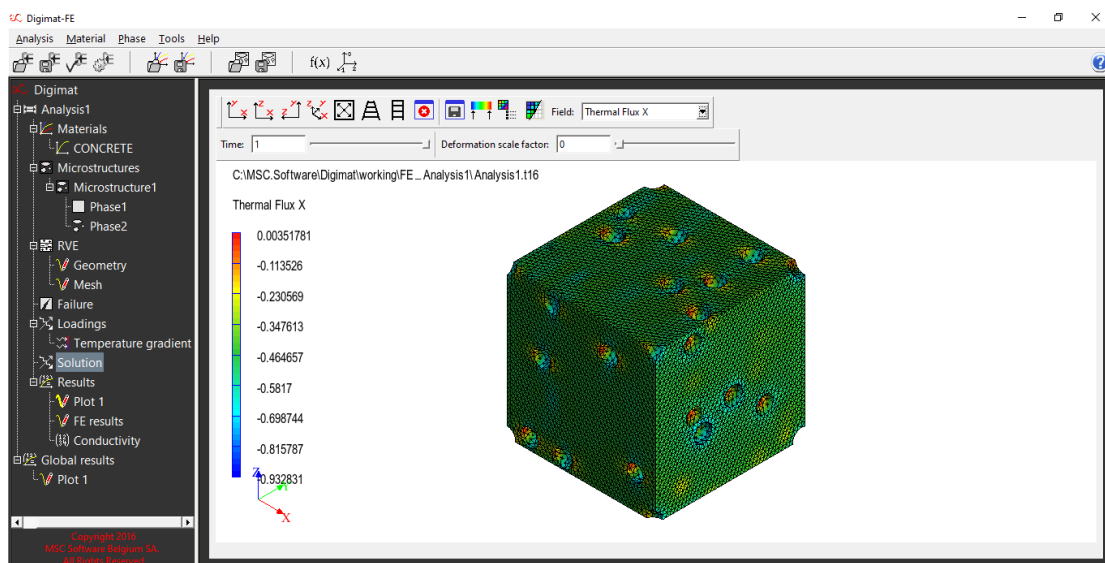
Εικόνα 118 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



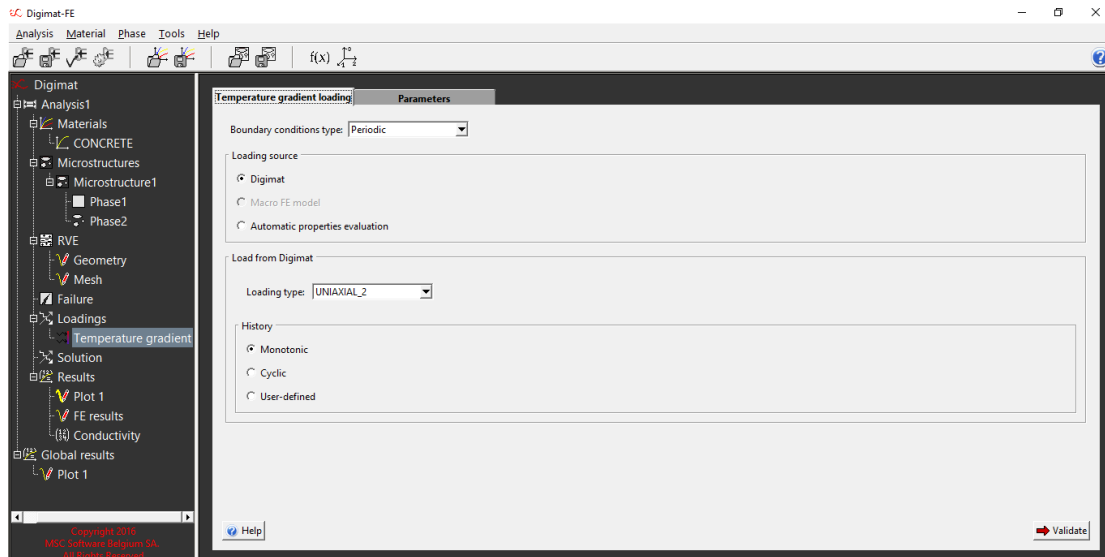
Εικόνα 119 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



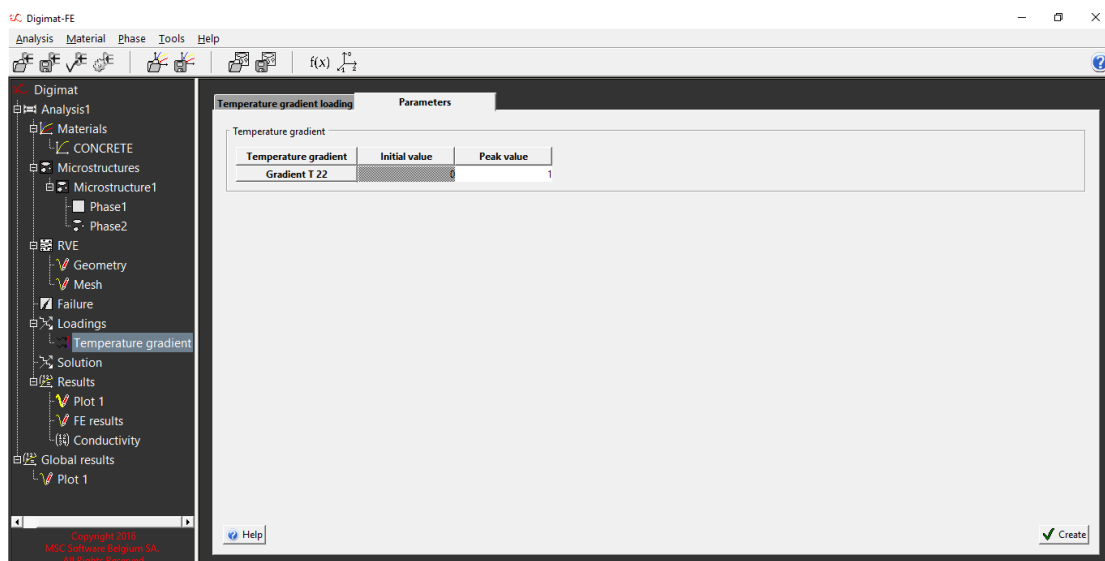
Εικόνα 120: Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



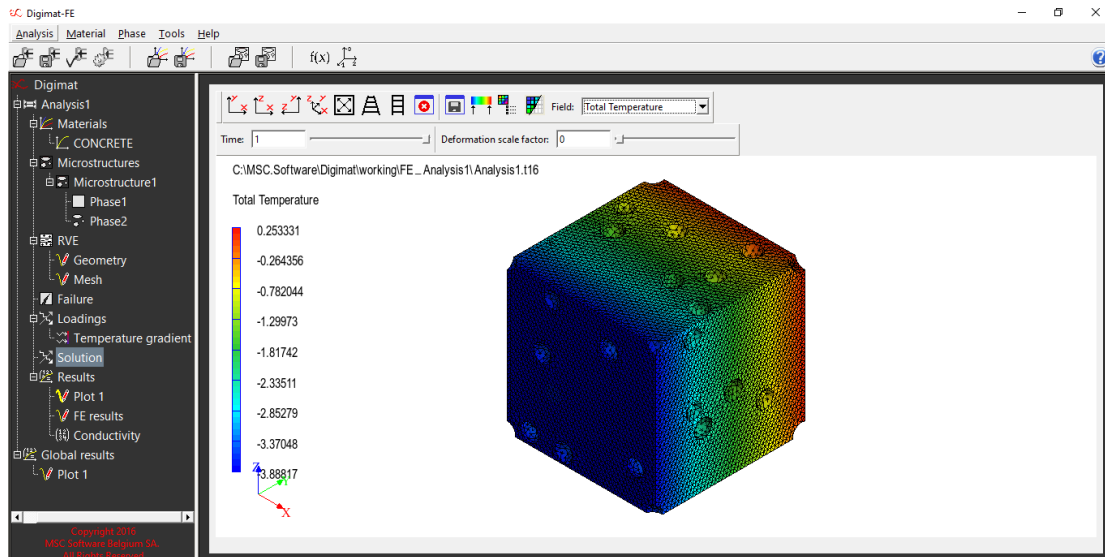
Εικόνα 121 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



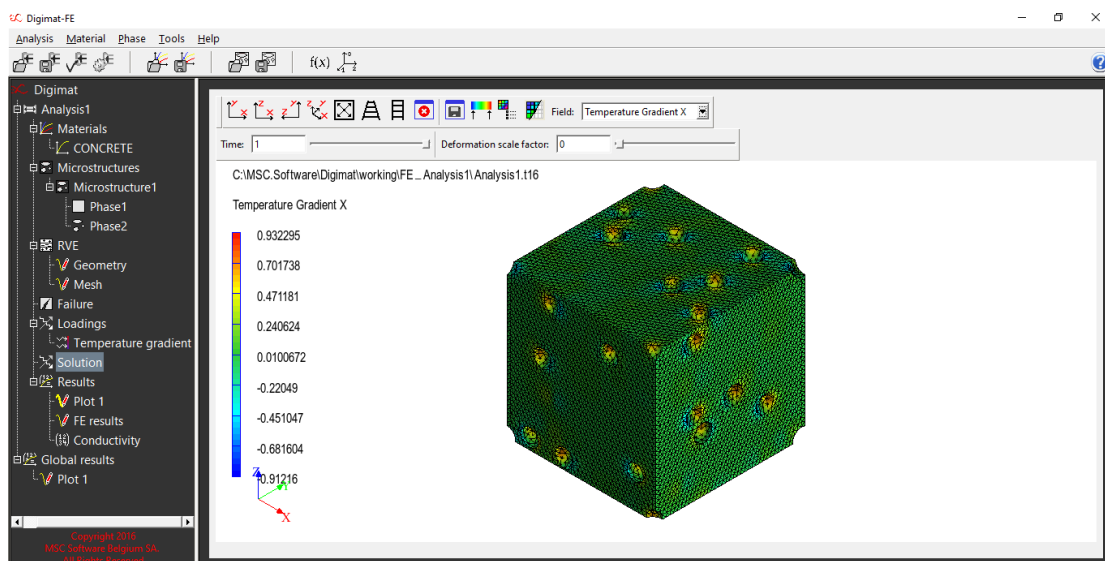
Εικόνα 122 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (διαξονικά)



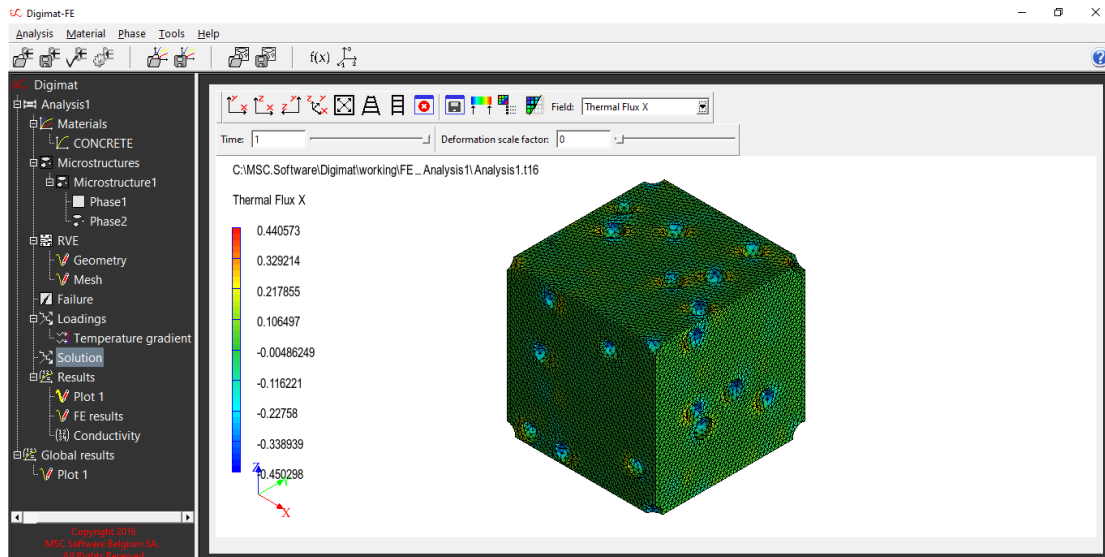
Εικόνα 123 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



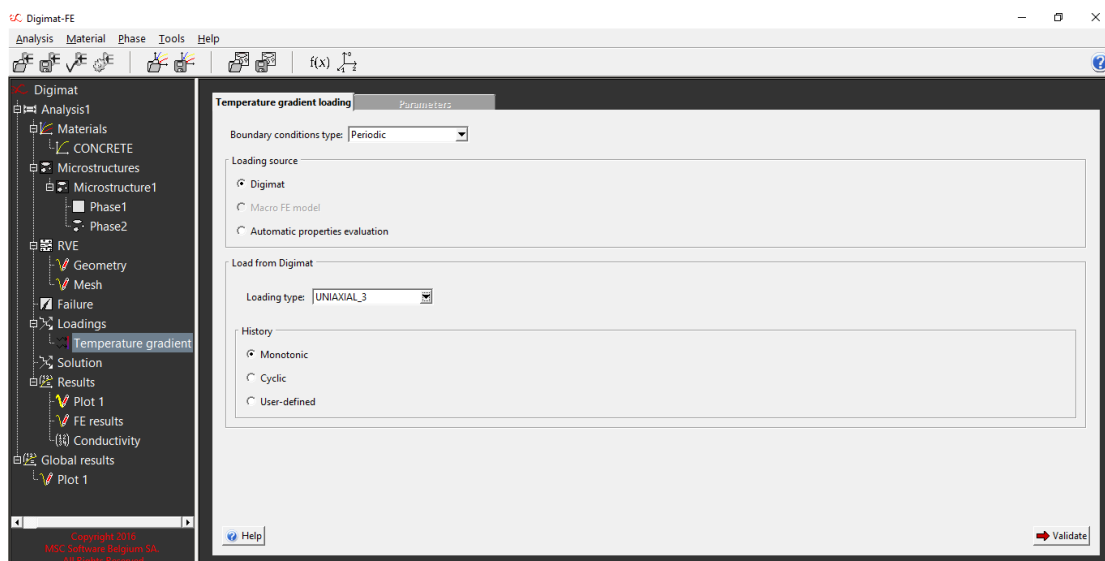
Εικόνα 124 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



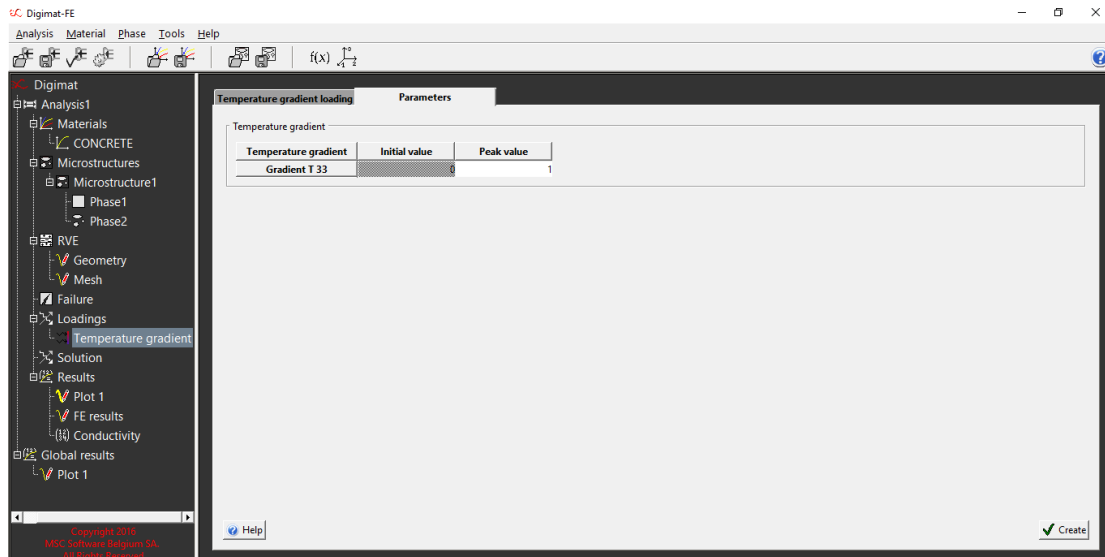
Εικόνα 125 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



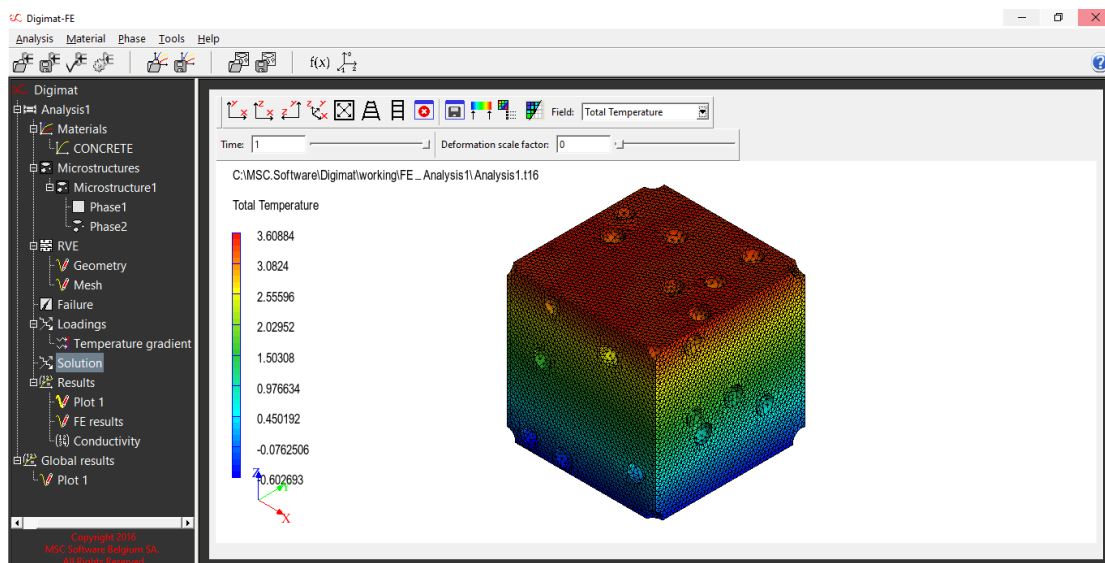
Εικόνα 126 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



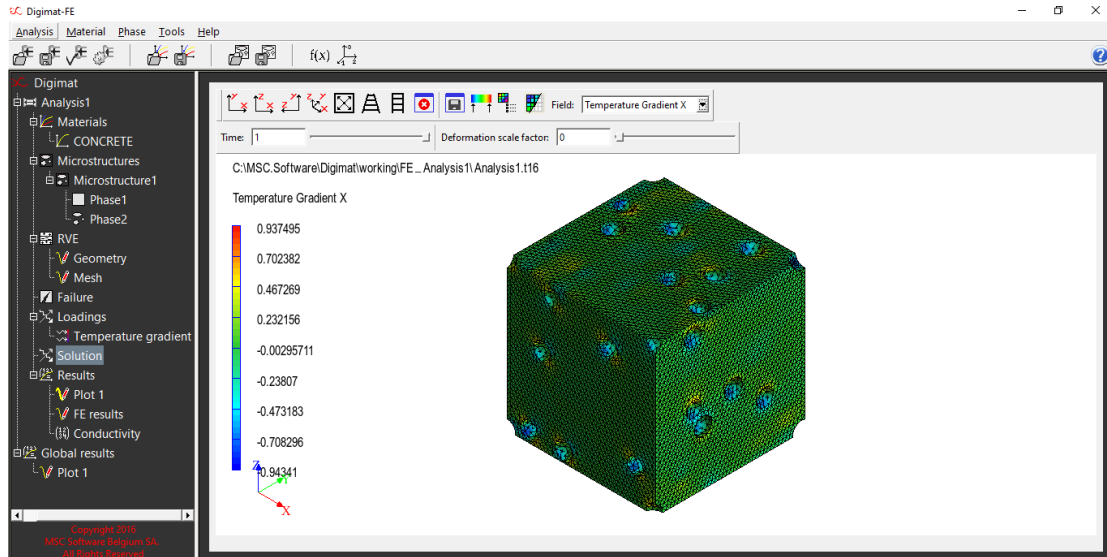
Εικόνα 127 : Ορισμός άξονα καταπόνησης (τριαξινικά)



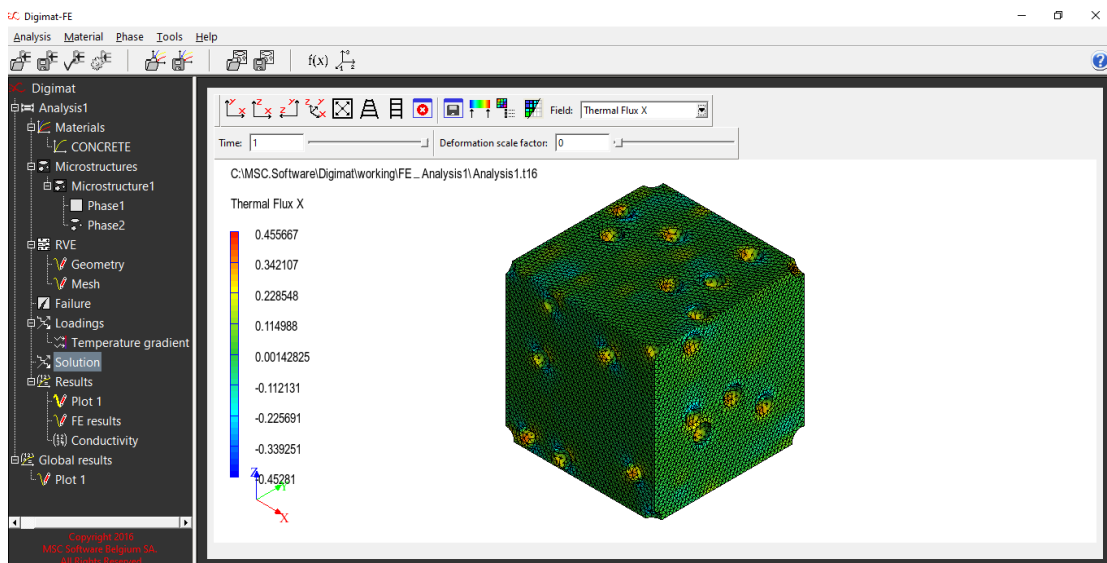
Εικόνα 128 : Ορισμός διαβάθμισης θερμοκρασίας



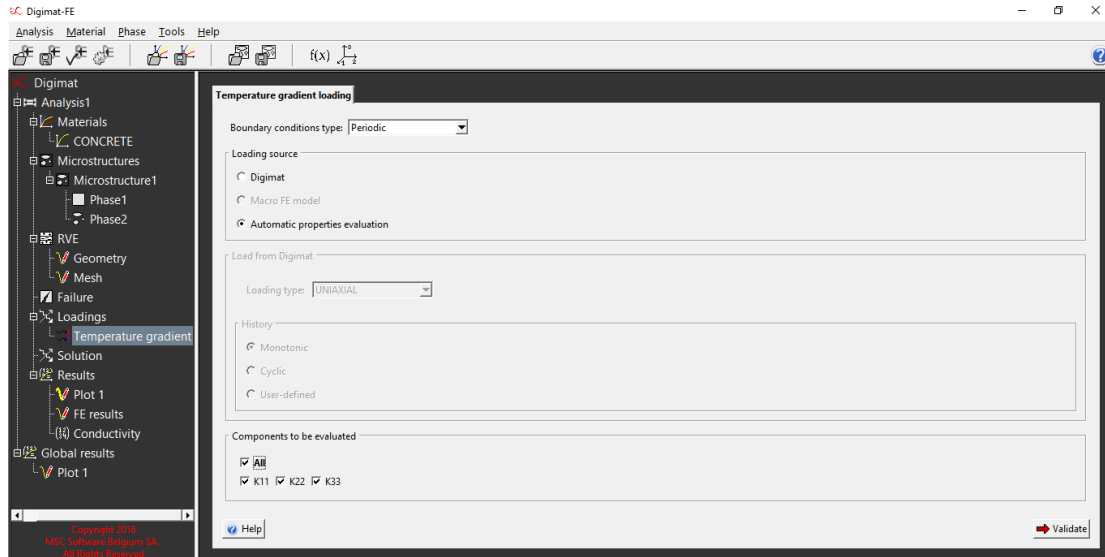
Εικόνα 129 : Εκτίμηση συνολικής θερμοκρασίας με απεικόνιση με χρωματοκλίμακας



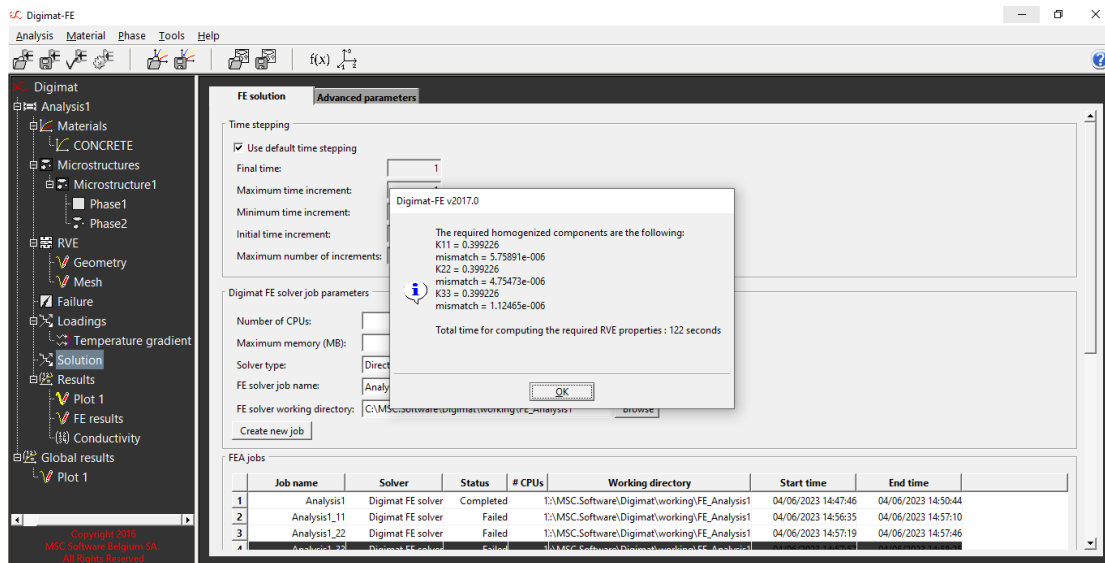
Εικόνα 130 : Διαβάθμιση θερμοκρασίας σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



Εικόνα 131 : Θερμική ροή σε απεικόνιση χρωματοκλίμακας



Εικόνα 132 : Ορισμός εύρεσης θερμικής αγωγιμότητας



Εικόνα 133 : Αποτελέσματα συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

4. Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k

4.1 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λόγω εγκλεισμάτων αερογέλης

Είναι φανερό από τα προηγούμενα κεφάλαια πως τα εγκλείσματα αερογέλης επηρεάζουν κατά πολύ τις θερμικές ιδιότητες ενός υλικού. Ειδικά για το υλικό που μελετάται στη παρούσα πτυχιακή εργασία, τη προηγμένη θερμική τσιμεντοκονία με εγκλείσματα αερογέλης, τα εγκλείσματα αυτά επηρεάζουν αρκετά τις θερμικές ιδιότητες και του συγκεκριμένου υλικού. Στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζονται για τα μοντέλα: διαφοροποίηση στο μέγεθος στοιχείων, τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων και διαφοροποίηση στη διάμετρο σφαιριδίων αερογέλης, με σκοπό την εκτίμηση των θερμικών τάσεων λόγω των εγκλεισμάτων αερογέλης στη μικροδομή του τσιμέντου. Οι εκτιμήσεις που υπολογίστηκαν είναι για τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που σύμφωνα με τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί στην θερμοδυναμική, πως όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού τόσο πιο κακός αγωγός της θερμότητας είναι το συγκεκριμένο υλικό, θεωρείται δηλαδή πως αυτό το υλικό έχει καλές θερμικές ιδιότητες.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k υπολογίζεται από τον τύπο : $k = \frac{H \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T}$, όπου H ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, A το εμβαδό της διατομής δια μέσω της οποίας έχουμε αγωγή και $\Delta x / \Delta T$ η μεταβολή της θερμοκρασίας σε απόσταση κατά τη φορά αγωγής.

4.2 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν αρχικά ήταν για το μοντέλο με τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE), Παρακάτω, σύμφωνα με την μεθοδολογία του Κεφαλαίου 2 και τις απεικονίσεις του κεφαλαίου 3 έγινε η εκτίμηση των συντελεστών που αφορά τις οκτώ περιεκτικότητες: 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% και 35%. Για κάθε περιεκτικότητα που αναφέρθηκε επαναλήφθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων καθώς και για τη διάκριση τυχόν αποκλίσεων.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καταγράφηκαν σε πίνακες παρακάτω, καθώς και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, οι παρακάτω τιμές που αναγράφονται στο διάγραμμα είναι ο μέσος όρος των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψαν από τις επαναλήψεις αυτές.

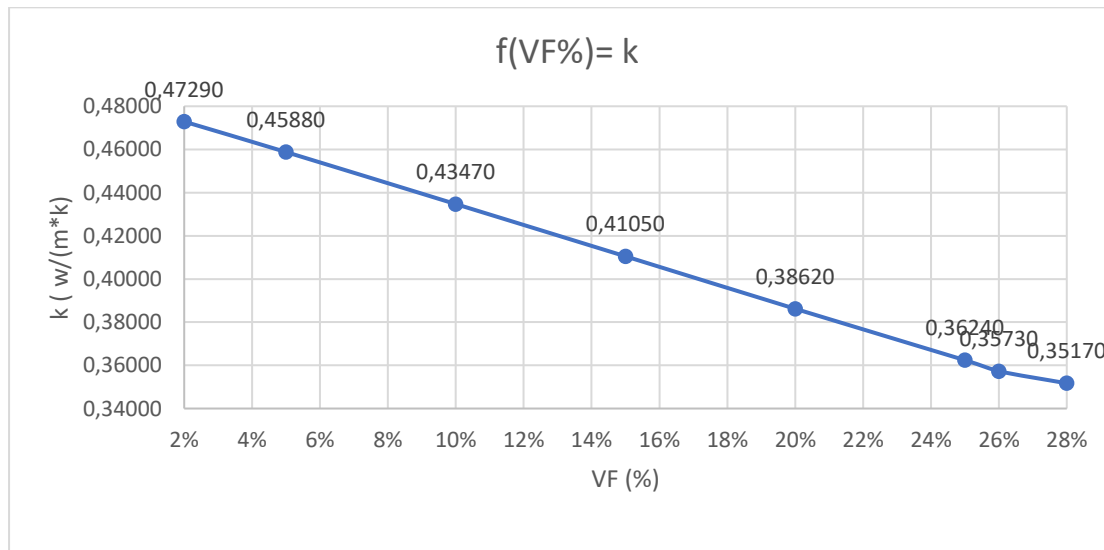
Πίνακας 11 : Περιεκτικότητα σε εγκλείσματα αερογέλη και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων τους θερμικής αγωγιμότητας

2%	5%	10%	15%	20%	25%
0,4729	0,4588	0,4347	0,4105	0,3862	0,3624

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, παρατηρήθηκε πως η μέγιστη περιεκτικότητα που επιτεύχθηκε με τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων ήταν γύρω στο 28%, καθώς εξαιτίας των περιορισμών του προγράμματος δεν επιτυγχάνονται μεγαλύτερες περιεκτικότητες εγκλεισμάτων, όπως αναγράφονται οι τιμές που επιτεύχθηκαν παρακάτω.

30%	ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΕ	0,234576	0,268087	0,27228	0,25133
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	0,370303	0,352246	0,352217	0,35225
35%	ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΕ	0,25971	0,280654	0,276464	0,26390
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	0,35822	0,348056	0,350208	0,35031

Διάγραμμα 1: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , συναρτήσει της περιεκτικότητας σε εγκλείσματα αερογέλης %.



4.3 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για διαφορετικές διαμέτρους εγκλεισμάτων αερογέλης

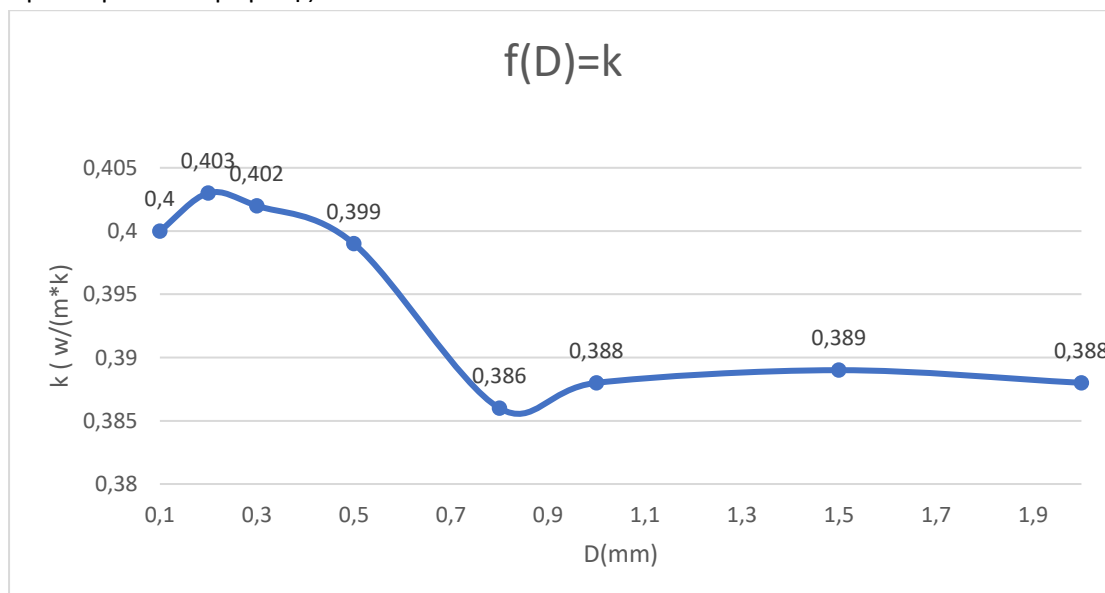
Οι μετρήσεις που έγιναν σε αυτή τη περίπτωση ήταν για διαφορετικές διαμέτρους εγκλεισμάτων αερογέλης με σταθερή περιεκτικότητα στα 20% και μοντέλο με τυχαία κατανομή εγκλεισμάτων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE), διαστάσεων $\chi_{1,2,3}=4\text{mm}$. Παρακάτω, σύμφωνα με την μεθοδολογία του Κεφαλαίου 2 μέσω του προγράμματος Digimat και τις απεικονίσεις παραπάνω έγινε η εκτίμηση των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας που αφορά τις οκτώ διαφορετικές διαμέτρους σφαιριδίων: 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 0.8mm, 1.0mm, 1.5mm και για 2.0mm. Για κάθε διάμετρο που αναφέρθηκε επαναλήφθηκαν τρεις δοκιμές για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων καθώς και για τη διάκριση τυχόν σφαλμάτων.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καταγράφηκαν σε πίνακες παρακάτω, καθώς και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, οι παρακάτω τιμές που αναγράφονται στο διάγραμμα είναι ο μέσος όρος των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψαν από τις επαναλήψεις αυτές.

Πίνακας 12 : Διάμετρος εγκλεισμάτων αερογέλης και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων τους θερμικής αγωγιμότητας

D(mm)	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5	2.0
k(W/(m*k))	0.400	0.403	0.402	0.399	0.386	0.388	0.388	0.388

Διάγραμμα 2: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , συναρτήσει της διαμέτρου εγκλεισμάτων αερογέλης.



4.4 Εκτίμηση συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k για διαφορετικές διαμέτρους μεγέθους στοιχείων

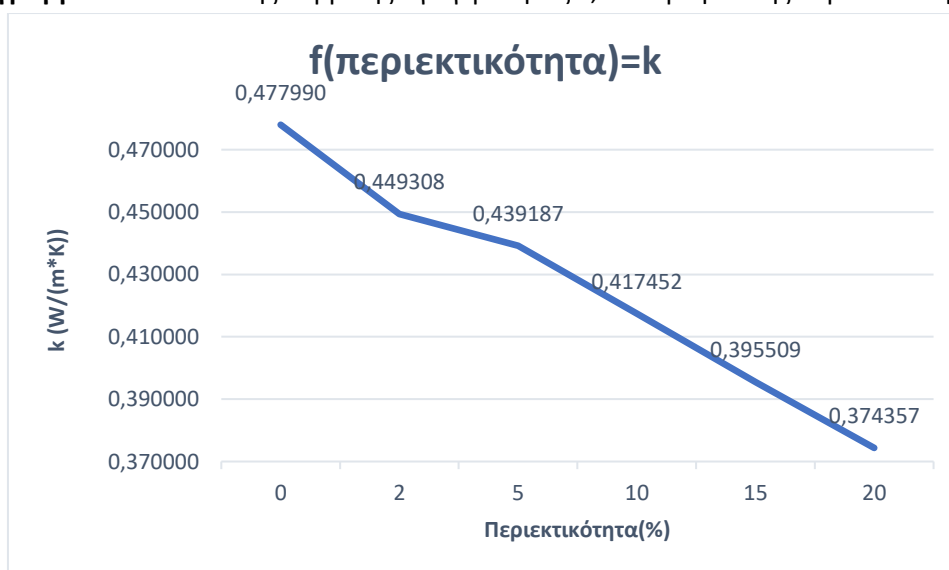
Οι τελευταίες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν για το μοντέλο με διαφορετικές διαμέτρους των μεγεθών στοιχείων στην μικροδομή του αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου. Παρακάτω, σύμφωνα με την αντίστοιχη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 2 απεικονίσεις του κεφαλαίου 3 έγινε η εκτίμηση των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας που αφορά τις έξι περιεκτικότητες: 2%, 5%, 10%, 15%, 20% και 25% και για τα πέντε διαφορετικά μεγέθη στοιχείων 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 και 0.30mm. Για κάθε μέγεθος στοιχείου και περιεκτικότητας που αναφέρθηκε επαναλήφθηκαν τρεις δοκιμές για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων καθώς και για τη διαπίστωση τυχόν σφαλμάτων.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καταγράφηκαν σε πίνακες παρακάτω, καθώς και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, οι παρακάτω τιμές που αναγράφονται στο διάγραμμα είναι ο μέσος όρος των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψαν από τις επαναλήψεις αυτές.

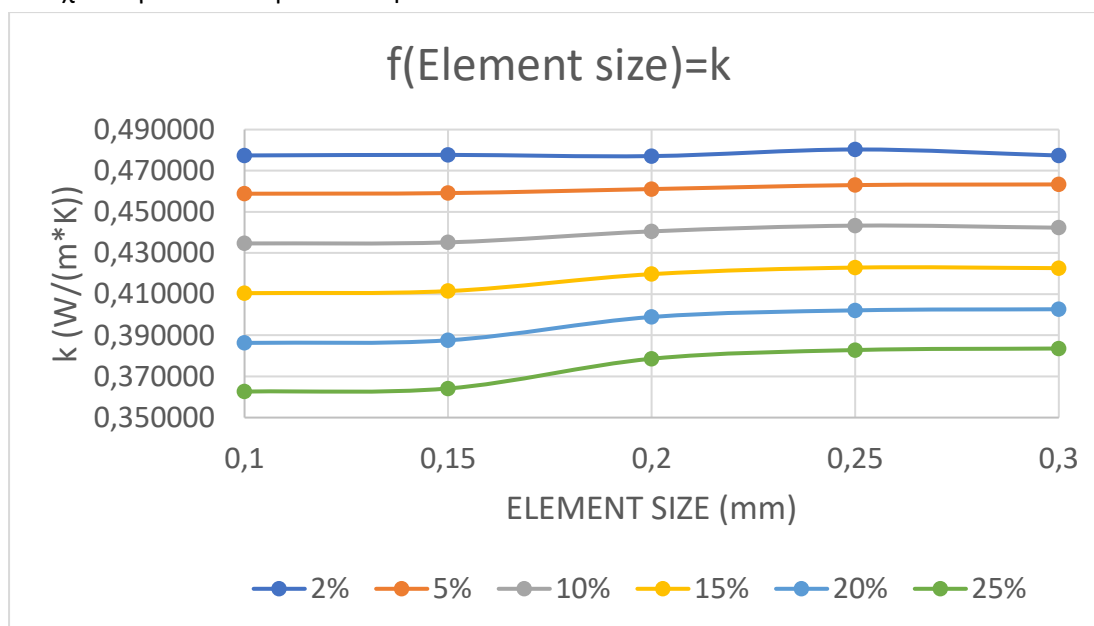
Πίνακας 13 : Μέγεθος στοιχείων, περιεκτικότητα και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων τους θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψαν.

Μέγεθος στοιχείων	2%	5%	10%	15%	20%	25%
0,100000	0,477424	0,399226	0,434657	0,410487	0,386310	0,362639
0,150000	0,477696	0,459117	0,435166	0,411479	0,387565	0,364151
0,200000	0,477109	0,461085	0,440515	0,419731	0,398901	0,378602
0,250000	0,480325	0,463008	0,443298	0,422916	0,402110	0,382816
0,300000	0,477394	0,463338	0,442301	0,422647	0,402659	0,383577

Διάγραμμα 3: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , συναρτήσει της περιεκτικότητας .



Διάγραμμα 4: Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k , συναρτήσει του μεγέθους των στοιχείων για κάθε περιεκτικότητα .



5. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

5.1 Συμπεράσματα και αποτελέσματα προσεγγίσεων

Με την βοήθεια της αριθμητικής μεθόδου ομογενοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιήθηκαν οι εκτιμήσεις της επίδρασης των εγκλεισμάτων αερογέλης στις θερμικές ιδιότητες του υλικού που μελετάται, δηλαδή της προηγμένης θερμικής τσιμεντοκονίας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, αφορούν τις εκτιμήσεις των θερμικών ιδιοτήτων που πραγματοποιήθηκαν για τις τρεις μορφές μοντέλων. Αρχικά, παρατηρήθηκε βάση του διαγράμματος πως το μέγεθος των στοιχείων, δεν επηρεάζει κατά πολύ την θερμική αγωγιμότητα του υλικού, πάρα μόνο όταν η περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων αυξάνεται, αλλά και στη περίπτωση αυτή, η μεταβολή είναι αμελητέα. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι, η μέγιστη περιεκτικότητα που επιτεύχθηκε, με τυχαία διασπορά εγκλεισμάτων ήταν γύρω στο 28%, εξαιτίας περιορισμών του προγράμματος. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι μεγάλο ρόλο παίζει, η περιεκτικότητα σε εγκλείσματα αερογέλης στον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου. Διαπιστώθηκε πως όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα σε εγκλείσματα τόσο μειωνόταν ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, επομένως έτσι επιτυγχάνονται καλύτερες θερμικές ιδιότητες.

Βιβλιογραφία

1. Digimat manual
2. <https://labinstruments.ru/stati/gomogenizatsiya>
3. <http://www.aerogel.org/?p=16>
4. <https://hmong.ru/wiki/Aerogels>
5. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/88427>
6. <file:///C:/Users/User/Downloads/2019%20Effect%20of%20various%20curing%20methods%20and%20addition%20of%20silica%20aerogel%20on%20mortar%20properties.pdf>
7. <file:///C:/Users/User/Downloads/2016%20Thermal%20and%20strength%20properties%20of%20lightweight%20concretes%20with%20the%20addition%20of%20aerogel%20particles.pdf>
8. <file:///C:/Users/User/Downloads/2018%20Thermal%20and%20strength%20properties%20of%20lightweight%20concretes%20with%20variable%20porosity%20structures.pdf>
9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309398001252>
10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114001786>
11. <https://downloads.hindawi.com/archive/2014/127049.pdf>
12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S03787788210034X>
13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821005754>
14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946516302761>
15. <https://www.e-xstream.com/applications/material-engineering/thermal>
16. <https://www.elsevier.es/es-revista-science-technology-materials-395-articulo-material-homogenization-technique-for-composites-S2603636318300034>
17. http://s3.amazonaws.com/c2c-website/resources/certification/guidance/GUI_HomogeneousMaterialsGuidance_v1.0_030316.pdf
18. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128132487000110>
19. https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27710-2_11
20. <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9780898717525.ch3>
21. <https://spatial.engr.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/715/2014/02/Homogenization-of-material-properties-in-additively-manufactured-structures.pdf>
22. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-astronomy/homogenizing>
23. <https://insulation.org/io/articles/k-value-u-value-r-value-c-value/>
24. <https://www.e-xstream.com/product/digimat-tools>
25. <https://thermtest.com/application/aerogel-thermal-conductivity-hfm>
26. <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel>
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity
28. <https://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel/particles>
29. <file:///C:/Users/User/Downloads/Datasheet-Aerogel-P150.pdf>
30. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/homogenisation-method>
31. [https://en.wikipedia.org/wiki/Homogenization_\(chemistry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Homogenization_(chemistry))

32. https://www.researchgate.net/figure/High-shear-homogenization-method_fig2_349265165
33. file:///C:/Users/User/Downloads/Stoupas%20(2).pdf