ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

#### ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΓΕΛΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΤΣΑΛΑΜΑΔΟΥΡΟΥ ΧΑΡΑ (Α.Μ. 7793)

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

ПАТРА 2022

### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

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

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

Τσαλαμαδούρου Χαρά

Μάϊος 2022

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

> Ο Φοιτητής (Ονοματεπώνυμο)

......(Υπογραφή)

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

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

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

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

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

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

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

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

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	. 2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	. 4
1 Εισαγωγή και Βασικές Έννοιες	. 7
1.1 Εισαγωγή	. 7
1.1.1 Σκοπός Εργασίας	. 8
1.2 Βασικές Έννοιες	. 8
1.2.1 Ομογενοποίηση Ιδιοτήτων Υλικών	. 8
1.2.2 Τεχνικές Αριθμητικής Μελέτης Ομογενοποίησης	10
1.2.3 Αντιπροσωπευτικού Στοιχείο Όγκου RVE	12
1.3 Προηγμένη Θερμομονωτική Τσιμεντοκονία	13
1.3.1 Aerogel Silica	14
2 Πρόγραμμα Digimat	17
2.1 Πρόγραμμα Επίλυσης Μοντέλων Προσομοίωσης Με Τη Χρήση Πεπερασμένω	V
Στοιχείων	17
2.1.1 Digimat	17
2.1.2 Digimat-FE	17
2.2 Μεθοδολογία Επίλυσης	18
3 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων Με Τη Χρήση ΠΣ	37
3.1 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων ΠΣ Για Την Εκτίμηση Μηχανικών Ιδιοτήτων	27
1 ιροι γμενής Θερμομονωτικής Τοιμεντοκονίας	)/ /0
3.2 Mówdolko Eyknelo $\mu$ d.	+U 50
3.3 Μεγιστη και σγκοτιεριεκτικοτητά εγκλεισμάτων	)2 cc
3.4 Τυχαία Διασπορα Εγκλεισματών	20
4 Εκπμησεις Ζυντελεστή Ζυγκεντρωσής Τάσεων Α	50
4.1 Εκτιμηση 20ντελεστη 20γκεντρωσης τασεών Λόγω Υπαρζης Εγκλεισματών Αερογέλης	80
4.2 Εκτίμηση λ Για Μοναδικό Έγκλεισμα	80
4.3 Εκτίμηση λ Για Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα Εγκλεισμάτων	81
4.4 Εκτίμηση λ Για Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων	32
5 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις	34
5.1 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων Προσεγγίσεων	34
Βιβλιογραφία	37

Παράρτημα Α	89
Παράρτημα Β	91
Παράρτημα Γ	93

# 1 Εισαγωγή και Βασικές Έννοιες

#### 1.1 Εισαγωγή

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

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

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

### 1.1.1 Σκοπός Εργασίας

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

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

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

#### 1.2 Βασικές Έννοιες

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

#### 1.2.1 Ομογενοποίηση Ιδιοτήτων Υλικών

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

Στην ουσία ως ομογενοποίηση ορίζεται ο υπολογισμός των ιδιοτήτων ενός ισοδύναμου ομογενούς υλικού, το οποίο παρουσιάζει τις ίδιες μακροσκοπικές ιδιότητες με το σύνθετο (ετερογενές) υλικό. Στην περίπτωση των μηχανικών ιδιοτήτων η ιδιότητα που ενδιαφέρει είναι η μακροσκοπική ακαμψία του σύνθετου και του ισοδύναμου υλικού κάτω από τις ίδιες συνοριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, έστω ένα κομμάτι τσιμεντοκονιάματος το οποίο σποτελείται από τσιμέντο και αδρανή υλικά τα οποία έχουν διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (Ε) μεταξύ τους. Το ισοδύναμο ομογενές υλικό που θα υπολογιστεί θα πρέπει να έχει το ίδιο μακροσκοπικό μέτρο ελαστικότητας με το μίγμα τσιμέντου και αδρανών υλικών.

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

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

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

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



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

#### 1.2.2 Τεχνικές Αριθμητικής Μελέτης Ομογενοποίησης

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

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

#### 1.2.2.1 Μέθοδος Ακτινικής Παρεμβολής Σημείου (RPIM)

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



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

#### 1.2.2.2 Επιπλέον Μέθοδοι Meshless

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

#### 1.2.2.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FE)

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

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

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

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



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

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

#### 1.2.3 Αντιπροσωπευτικού Στοιχείο Όγκου RVE

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

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

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



(a) Finite element RVE

(b) Homogenization by finite element

Εικόνα 4: α) Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων RVE. β) Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για ομογενοποίηση σταθερών θερμικής αγωγιμότητας ανισότροπων RVEs.(<u>https://www.researchgate.net/figure/a-Finite-element-modeling-of-</u> representative-volume-RVE-of-graphene-epoxy\_fig7\_256677943)

#### 1.3 Προηγμένη Θερμομονωτική Τσιμεντοκονία

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

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

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

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

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

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

#### 1.3.1 Aerogel Silica

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

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



content/uploads/2009/03/sol-gel-alkoxide-fit.gif).

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

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

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



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

# 2 Πρόγραμμα Digimat

#### 2.1 Πρόγραμμα Επίλυσης Μοντέλων Προσομοίωσης Με Τη Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων

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

#### 2.1.1 Digimat

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

#### 2.1.2 Digimat-FE

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

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

#### 2.2 Μεθοδολογία Επίλυσης

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

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



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

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



Εικόνα 8: Menu Digimat-FE (Digimat)



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

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

0°, Digimat-FE		-	σ	×
Analysis Material Phase Iools Help	₽₽   ₩ H			0
Bin Diginat Bin Diginat Bin Marciss Bin M	Image: Series       0.00,			
Al fame de tale			_	

Εικόνα 10: Αλλαγή ονόματος ανάλυσης. (Digimat)

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

Y. Ogimet HE	12 (	0	×
Analysis Material Bases Tools Relp An An A			-
Image: Second parameter         Image: Second parameter			
IQD Stiffness DEC Global results UV Plot 1 Cointation distribution: Orthotropic			

Εικόνα 11: Επιλογή επεξεργαστή solver. (Digimat)

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

Digimar/F	9	n	×
Andrew Contraction Contract			
Diginal Digina			
Rendy.		15	

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

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

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

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

-	σ×
	19
3	Values

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

రిది⊁ి క్రీ	a a wh	9
Binal Autoritis     Constructions     Constructions     Constructions     Constructions     Constructions     Constructions     Constructions     Construction     Constructin     Construction     Construction     Construction     Construc	Several presenter:           Dendy:           Dendy:           Z4.50           Batic preventer:           Vourgit module:           Posterit unit:           02           Opendent parameter:           " Use dependent parameter:	<section-header></section-header>
Constant of	W Help	V Ennie

Εικόνα 14: Εισαγωγή παραμέτρων τσιμέντου (Digimat)

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

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

trf. Digimat #		- n x
Analiss Material Base Tool		0
B Digimat D	Type Microtructure name: Microtructure1 Phase name Phase Phase Phase Phase Phase Refer Controls Controls Phase Refer Controls Phase Refer Controls Material CONCRETE	
and the other distances.		V Coute
- M Martin		

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

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

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



Εικόνα 15: Προσθήκη φάσης. (Digimat)

G Digimun-FE		- 0 >
pralysis Material Sharse Tools Ar Ar Br Ar Ar Ar	Bile ISI I was 1	
F@FV <sup>F</sup> @F   <del>15</del> @F		
Digmat     Digmat     Digmat     Marchais     CONCRETE     S     Microstructures     Microstructures     Microstructure1     Microstrue1	Type     Microstructure:       Microstructure enterne     Microstructure:       Phase manue:     Phase       Phase type     Phase       Materia     Inclusion       Visid     Continuous filter       Continuous filter     Standard       Standard behavior:     Function       Interface behavior:     Function       Interface behavior:     Function       Interface behavior:     Function       Interface property:     Interface property       Interface property:     Interface property	
Carrieratel	20 Help	🖌 vassare
All States and the second s		

Εικόνα 16: Επιλογή τύπου Void. (Digimat)

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

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

Περιεκτικότητα	Διάμετρος
50 (%)	1 (mm)

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



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



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

NC Diginal H	- <b>D</b> X
Analysis Material Bhase Tools Help Group for the for the State	
時間をす (19)年 (10)上	8
Digimat     Type     Parameters       B/M ANALYSIS_FE     B/M Aterialis       B/M Aterialis     B/M Crostructures	4
Cutom polition     Cutom po	usion orientation
Cutom position/intertation usage: <sup>19</sup> Sequential <sup>1</sup> Random <sup>2</sup> Help	J Control
Ready-	0%

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

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

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

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

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

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



Εικόνα 20: Εξαγωγή γεωμετρίας. (Digimat)



KC Digimat-FE		- a	×
Analysis Material Phase Tools Help			
출출·제품 🕹 👘 🖉 🖉 🖞 (X) 🖓	- 		0
Image: Second	YE Geometry Visualization     RVE global data       3 seconds       05/04/2022 + 22:02:10       2017/2 (svm+17131)         Number     vefference       of inclusions     volume fraction       66     0.272269       0.5		
Copyright 2016 MSC Seffware Biologum SA			
All Holder Reserved		100	%

Εικόνα 21: Απεικόνιση μοντέλου γεωμετρίας RVE. (Digimat)



୰୶୲୲ୡ୶											
ligimat ANAI YSIS FF	Geometry setup RVE	Geometry Visualization	RVE global data	R	/E phase data	]					
Materials	Phase: VOIDS	•									
	Data: Position	•									
Microstructures					Posit	on					
	Summary data						Complete	data			
	1	×	y Z	1				Inclusion id	x I	Y I	7
	Mean	2.54	2.58	2.56			32	19.1	3.88505	0.747291	4.76305
- RVE	Standard deviation	1.73	1.66	1.64			33	19.2	3.88505	0.747291	-0.236954
- V Geometry	Minimum	-0.309	-0.318	-0.251			34	20.1	4.87511	2.69716	1.71567
└-₩ Mesh	Maximum	5.33	5.36	5.22			35	20.2	-0.12489	2.69716	1.71567
Failure							36	21.1	3.40899	4.0145	2.10517
Loadings	Plot						37	22.1	1.30848	3.99056	-0.0363561
Mechanical	Project positions on plane	V. V					38	22.2	1.30848	3.99056	4.96364
Colution	Project positions on plane.	N-1 -					39	23.1	2.46804	4.87011	3.95726
Solution			X - Y nlane				40	23.2	2.46804	-0.129889	3.95726
Results			A i piano				41	24.1	0.750769	1.95249	0.703323
- 💜 Plot 1	5.5						42	25.1	4.94008	3.76509	5.2228
V FE results	5.0						43	25.2	-0.0599171	3.76509	5.2228
(IE) Stiffness	4.5						44	25.3	4.94008	3.76509	0.222799
labal secults	10 E -						45	25.4	-0.0599171	3.76509	0.222799
	4.0						46	26.1	4.37113	1.64627	1.41046
Plot 1	3.5 -						47	27.1	3.51278	4.21094	0.813149
	3.0 -						48	28.1	-0.0261008	1.28808	5.20153
	> 25 -						49	28.2	4.9739	1.28808	5.20153
	2.5						50	28.3	-0.0261008	1.28808	0.201529
	2.0			-			51	28.4	4.9739	1.28808	0.201529
	1.5 -						52	29.1	1.5057	5.26317	4.22383
							53	29.2	1.5057	0.26317	4.22383
	1.0 -					*	54	30.1	4.22483	3.44922	3.95958
State of the second	0.5			-			55	31.1	1,17251	2.2176	2.47632

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



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

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



Είκονα 25: Διακριτοποίηση RVE. (Digimat)



Εικόνα 26: Πληροφορίες διακριτοποίησης RVE. (Digimat)

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

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



Εικόνα 27: Επιλογή άξονα καταπόνησης. (Digimat)

0C Digimat-FE	- 0	ć.
Analysis Material Ebase Iools Help		
李母子子 李母 图图 W H		0
Digimat Digimat Marcstructures To Marcstructures Marcstr		
committee a Help	a control of the cont	
Million Contractor Data		
Ready	1005	

Εικόνα 28: Τιμή παραμόρφωσης. (Digimat)

16. Digimat-H		- 0	×
Analysis Material Phase Iools	日中中 「日本日 二番 <sup>1</sup> 二番 <sup>1</sup> 」「(x) 」「		0
	Ft solution     Advanced parameters       Time stepping     Image: Status       Time stepping     Image: Status       Time increment     Image: Status       Maximum number of increments     Image: Status       Pin solver working directory     Class Time       If Abburgest Status     # CPUs       Maximum Status     Status       Image: Status     # CPUs       Maximum Status     Status		
an change and a second	- FEA status File		1
Ready.		10	256

Εικόνα 29: Επίλυση. (Digimat)

8C Digimat-FE	 ٥	×
Analysis Material Phase Iools Help		
●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●		?
Biginat         Biginat <td< td=""><td></td><td></td></td<>		
Load analysis (Ctrl+O)	100%	

Εικόνα 30: Εκτίμιση τάσης von Mises για εφελικιστική καταπόνηση (άξοναςx), απεικόνιση με χρωματοκλίμακα. (Digimat)



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



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

C. Digimat-FE		- σ x
₫₫ <i>₹</i> ₹₹	「 過過 fix) 上	(C)
Biglimat     But ANALYSIS_FE     Bi Marenials     CONCRETE     S → Microstructures     Bi → Microstructure1     ■ MATROX     ↓ YO(DS     BiS RVE     V Geometry     V Mesh     T Failure     Bix Loadings     E Micchanicat     X Solution	Mechanical loading Boundary conditions type (Periodic ) Leading source C Digmat Macto FE model Land ham Digmat Cooling type (27/2014, 30 ) Hiddary C Boontonis	
Oliz Results ↓ Plot 1 ↓ FE results ↓ Oli Stiffness Oliz Global results ↓ Plot 1 Second Star Second St	Components to be evaluated Components to be evaluated	⇒ Vaidate

Εικόνα 33: Επιλογή υπολογισμού μηχανικών ιδιοτήτων. (Digimat)

9C. Digimat FE	٥	×
Analysis Material Ense Tools Heb 香香香水 (小 ) 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一		0
Biginat       FF solution       Advanced parameters         Image: ANALYSIS_FE       Image: Analysis_FE         <		1
EAD     Job name     Solver     Optimative Status       1     ANALYSIS, FE     Digimat FE solver     Completed     1SC.Software.Digimatiworking/FE, ANALYSIS, FE     04/05/2022 22:10:13     04/05/2022 22:12:18       3     ANALYSIS, FE, 22     Digimat FE solver     Completed     1SC.Software.Digimatiworking/FE, ANALYSIS, FE     04/05/2022 22:10:13     04/05/2022 22:20:21:18       4     ANALYSIS, FE, 22     Digimat FE solver     Completed     1SC.Software.Digimatiworking/FE, ANALYSIS, FE     04/05/2022 22:20:20:20:20:20:20:20:20:20:20:20:20:2		

Εικόνα 34: Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)
# 3 Ανάπτυξη και Επίλυση Μοντέλων Με Τη Χρήση ΠΣ

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

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

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

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

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά τσιμέντου

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

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

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αερογέλης (ISOMAT)

Εύρος μεγέθους σωματιδίων	0,1-0,5 mm
Διάμετρος πόρων	~20 nm
Porosity	>90%
Πυκνότητα σωματιδίων	120-180 kg/m <sup>3</sup>
Υδροφοβική επιφάνεια	600-800 m²/g
Απορρόφηση λαδιού	540-650 g DBP/100 g σωματιδίων

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

### Πίνακας 3: Δεδομένα μετρήσεων

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

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

### Μοντέλο μοναδικού εγκλείσματος



<u>Μοντέλο τυχαίας διασποράς εγκλεισμάτων</u>



## Μοντέλο μέγιστης κατ'όγκο περιεκτικότητας



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

## 3.2 Μοναδικό Έγκλεισμα

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

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

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

Πίνακας 3: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το μοναδικό έγκλεισμα.

Διάμετρος εγκλισμάτων	1 mm
Συντεταγμένες RVE	5×5×5 mm
Συντεταγμένες Void	2.5×2.5×2.5 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm

90 Digimat FE		- 0	×
Analysis Material Phase Tools Help	ا ((x) الم		0
Image: Construction of the second construct	<pre>ide</pre>		
All Rights Reserved.		100	296

Εικόνα 35: Δημιουργία ανάλυσης για μοναδικό έγκλεισμα (Digimat)



Εικόνα 36: Ορισμός παραμέτρων τσιμέντου (Digimat)



Εικόνα 37: Ορισμός μήτρας (Digimat)

5C, Diginat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Iools Help			
香蜂全体   繁繁   雪暫   100 左			0
B Digimat			
Textual and the Proceeding Proceeding		l.	-
Copyright 550 Marc Schwid Bibgens San Al Al Bigens Santrad	1	Create	1
Load analysis (Ctri-O)		100%	

Εικόνα 38: Ορισμός εγκλεισμάτων (Digimat)



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

SC. Digimat-FE	-	σ	×
Analysis Material Phase Iools Help			0
■ Digimat         Image: State Part of the S		✓ Cres	
Analysis menu	-	100%	

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



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

SC, Digimat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Tools Help Ge Ge Ge Ge I v V I 1931 1531 v 1 1			0
Image:			
Ready.		0%	

Εικόνα 42: Απεικόνιση περιεκτικότητας που επιτεύχθηκε. (Digimat)



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



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



Εικόνα 45: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)

6C Diginat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Iools Help			
登録を作   予報   過國   100 戸			0
■ Digimat         ● Harandes:         ● Concerse         ● Microstructures         ● Micro			
Cognight 2016 MCC Schwarz Bitgures SA.	3	🗸 Crea	te
Ready.		1009	6

Εικόνα 46: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)

9C Digimat-FE	- 0	×
Analysis Material Phase Iools Help 普爾伊尼德		0
Image: Digimat       FE solution       Advanced parameters         Image: Analysis1       Image: Second Sec		-
B/2: Global results     L/ Plot 1       Job name     Solver       Status     # CPUs       Working directory     Start time       End time		1

Εικόνα 47: Δημιουργία επίλυσης. (Digimat)



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



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



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



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



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



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



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



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



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

# 3.3 Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα εγκλεισμάτων

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

RVE	5×5×5 (mm)
Διάμετρος σφαιριδίων-εγκλεισμάτων	1 (mm)
Διάμετρος σφαιριδίων για υπολογισμοό συντεταγμένων	1.05 (mm)

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

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

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

Διάμετρος σφαιριδίων	1 mm
Αριθμός σφαιριδίων	180
Διαστάσεις RVE	5.25×5.45596×5.14393 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm



Εικόνα 57: Ορισμός εγκλεισμάτων. (Digimat)

fC Diginat-FE -	٥	×
Analysis Material Phase Iools Help		
御殿を祭   祭 響   f(x) 江		?
Image: Construct of the state of the st		<b>ک</b>
-UU Stiffness © 25 Global results       RVE size: 5230e+001*5.144e+000         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientations)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientations)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientations)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientations)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientations)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume/mast fraction (i.e. use DNLY specified positions/orientation)       Image: Plot 1         I gross phase volume volume volume and intersection)       Image: Plot 1         I gross phase volume volume	✓ Crea	■ ite

Εικόνα 58: Ορισμός συντεταγμένων 180 εγκλεισμάτων. (Digimat)

€C Digimat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Iools Help			
香香水水   各番   WL Li			?
Image: Second to the second			)
Mit Salar Selam Sh. All byte Seared		- Cita	
Ready.		0%	

Εικόνα 59: Διαστάσεις RVE. (Digimat)

t/, Diginat-FE -	۵	×
Analysis Material Phase Iools Help		
登録を作   登録   lix テュ		2
B Diginat B Diginat Concrete C Materials ↓ C concrete C Materials ↓ C concrete ↓ C co	geometry	
Ready.	0%	

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



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



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



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



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

Digimat	- <u>-</u>			-							
PERIODIC	Geometry setup RVE C	eometry Visualization	RVE global d	ata	RVE phase data					1	
🕍 Materials	Phase: voids	•									
└/C concrete	Data: Decition	-									
Microstructures	Martena I		6.76						0		6 1 4 2 0 2
B - Microstructure1	Maximum	3.23	5.70	3.14			4	1.4	5.25	5 45506	5.14395
- matrix	Plot							1.5	5.25	0,43390	5 14202
- voide							7	1.7	5.25	5.45506	5 14393
	Project positions on plane: ()	- Y 💌					-	1.9	5.25	5.45506	5 1/302
RVE			V V nlana				9	21	1.05	0	0
- V Geometry	60		x - r plane				10	22	1.05	5,45596	0
LV Mesh	0,0 <u>-</u> -						11	2.3	1.05	0	5,14393
Failure	5,5 -						12	2.4	1.05	5,45596	5,14393
Loadings	5,0						13	3.1	2.1	0	0
Machanical		· · ·		•	· .	1	14	3.2	2.1	5.45596	0
	4,8 E		-				15	3.3	2.1	0	5.14393
Solution	4,0 -		•				16	3.4	2.1	5.45596	5.14393
Results	3.5	• •		•	•		17	4.1	3.15	0	0
- 💜 Plot 1	> 20 E						18	4.2	3.15	5.45596	0
V FE results	- 3,0 <u>-</u> .		•	• •	· .		19	4.3	3.15	0	5.14393
-(18) Stiffness	2,5 -						20	4.4	3.15	5.45596	5.14393
Global results	2,0 -		•	•		β	21	5.1	4.2	0	0
	L E	•	C	•	•	1 I I	22	5.2	4.2	5.45596	0
Plot 1	1,8 -						23	5.3	4.2	0	5.14393
	1,0						24	5.4	4.2	5.45596	5.14393
	0.5						25	6.1	0.525	0.909327	0
		· ·					26	6.2	0.525	0.909327	5.14393
	0			-			27	7.1	1.575	0.909327	0
	ů	1 2	y J		•	5	28	7.2	1.575	0.909327	5.14393
			•			diaimat	29	8.1	2.625	0.909327	0
						ulyinat	30	8.2	2.625	0.909327	5.14393 -1

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



Εικόνα 66: Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE. (Digimat)



Εικόνα 67: Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης. (Digimat)



Εικόνα 68: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)

fC Diginal-FE	۵		×
Analysis Material Phase Iools Help			
● ff F F F F F F F F F F F F F F F F F F			?
■ Digimat         ■ PERIODIC         ■ Concrete         ■ This concrete         ■ This wate         ■ This wate			
Copyright 2010 NRSC Striktur Erspans, All Stephis Antered	<u>√</u> (	Create	
Ready.		100%	

Εικόνα 69: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



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



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



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



Εικόνα 73: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



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



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



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



Εικόνα 77: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)



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



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



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

€∕C Digimat-FE	-	٥	×
<u>Analysis</u> <u>Material</u> <u>Phase</u> <u>T</u> ools	Help		
๕๙๙๙ํ฿			?
Digimat     Digimat	Mechanical loading Boundary conditions type Periodic C Diginat C Macro FE model C Automatic propertie evaluation Loading type UNAXXAL3		
0/22 Results       0/22 Results       ✓ Plot 1       ✓ E results       0/22 Global results       ↓ ✓ Plot 1	<ul> <li>C Cyclic</li> <li>C User-defined</li> <li>Components to be evaluated</li> <li>AI</li> <li>✓ E1, nu12, nu13 ✓ E2, nu21, nu23 ✓ E3, nu31, nu32</li> <li>☐ G12 ☐ G23 ☐ G13</li> <li>✓ Help</li> </ul>	➡ Validat	
Ready.		100%	

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

8C Digimat-FE	- 0	5	ĸ
Analysis Material Phase Tools Help			
፼፼፟፟፟፝፝፝፼፟ዾ <sup>፼</sup> ፟፟፟፼፼፟ <sup>™</sup> <sup>™</sup> ™ <sup>™</sup>			0
■ Diglimat       FF solution       Advanced parameters         ● I= PERIODIC       Imate stepping         ● I= Microstructures       Imate stepping         ● T Microstructures       Imate stepping         ● T Microstructures       Imate stepping         ● T Microstructures       Imate increment:         ● T Microstructures			
Dots     Dots     Dots       Image: Solver     Image: Solver     Image: Solver     Image: Solver       Image: Solver     Image: Solver     Image: Solver     Image: Solver		1	4
Ready.		00%	

Εικόνα 82: Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)

# 3.4 Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων

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

Η ανάλυση και η επίλυση υλοποιήθηκε 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 τέσσερις περιεκτικότητες. Από τις απεικονίσεις που επισυνάπτονται παρακάτω παραλείπονται τα αρχικά στάδια της μεθοδολογίας λόγω του ότι έχουν ήδη απεικονησθεί και παραμένουν ίδια για όλες τις περιπτώσεις.

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

Διάμετρος σφαιριδίων d	1 mm
Μέγεθος RVE	5x5x5 mm

0C Digimat-FE	- 0	3	×
Analysis Material Phase Iools Help AF DF FF AF I Jo IV ISH LET 1 400 10			0
Addresial Brase Tools Help     Image: Provide the providet the providet the			
Cognight 3016 MSC Schware Relations 3A	1	Create	
Analysis menu		100%	

Εικόνα 83: Ορισμός περιεκτικότητας σφαιριδίων. (Digimat)

6C Diginat-FE -	۵	×
Analysis Material Phase Icols Help		-
登録がまた   登録   400.F:		0
Image: Provide the second s		1
Copyright 2016	✓ Creat	4
All lights (televes)	0%	

Εικόνα 84: Διαστάσεις RVE. (Digimat)

8C Diginat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Icols Help			()
B Digimat Commetry strup Commetry strup Constructures Constructives Constru			
Copyright 2016 WKC Software Englism 56, All Eight Reserved	Generate ge	tometry	]
Ready.		100%	

Εικόνα 85: Εξαγωγή γεωμετρίας RVE. (Digimat)



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



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



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

ØC Digimat-FE	-	٥	×
Analysis Material Plase Tools Help are no no for   V   V   ER ER			0
● 豊く 「 「 「 「 「 「 「 「 」 「 」 」 」 」 」 」 」 」 」			0
Bulginat     Geometry setup     RVE Geometry Vaualization     RVE global data     RVE global data       Bit RANDOM     Bit Materials     Concerter     Geometry setup     RVE Geometry Vaualization     RVE global data       Bit RANDOM     Bit Materials     Concerter     Geometry setup     RVE Geometry Vaualization     RVE global data       Bit RANDOM     Bit Materials     Concerter     Geometry Setup     RVE global data     RVE global data       Bit RANDOM     Bit Materials     Concerter     Difference     Difference       Bit RANDOM     Matrixi     Plase information     Difference       Bit Random     Visionat Geometry Vaualization     Effective     Reference       Bit Random     Visionat Geometry Vaualization     Volume fraction     Volume fraction       Visionation     Visionation     Volume fraction     Volume fraction       Visionation     Visionation     Visionation     Difference       Visionation     Visionation     Visionation     Difference       Visionation     Visionation     Difference     Difference       Visionation     Visionation     Difference     Difference       Visionation     Visionation     Difference     Difference       Visionation     Visionation     Difference     Difference       <			
Ready.		1009	

Εικόνα 89: Απεικόνιση περιεκτικότητας. (Digimat)



Εικόνα 90: Απεικόνιση δεδομένων της γεωμετρίας. (Digimat)



Εικόνα 91: Απεικόνιση διακριτοποίησης του RVE. (Digimat)



Εικόνα 92: Απεικόνιση δεδομένων διακριτοποίησης. (Digimat)

SC Digimat-FE	-	٥	×
Analysis Material Phase Jools Help Ge Ge Ge Ge Le V L 1978 1731			0
		_	0
■ Diginat         ■ EX Materials         ■ Materials         ■ Materials         ■ EX Materials         ■			
Copyright 2015 MCC Software Reference 52		Validat	×
An ingle standard			
Ready.		100%	

Εικόνα 93: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)

6C Diginat-FE	-	٥	×
Analysis <u>M</u> aterial <u>Phase</u> <u>Tools</u> <u>Help</u>			
香醋香香   香香   Gal   KN 片			?
■ Digimat         ● Matrials         ● Microstructures         ● Microstructures         ● Matrix         ● Matrix			
Copyright 2016 MCC Software Bolgware SA. All high A Reneval	<u>×</u>	Create	
Ready.		100%	

Εικόνα 94: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)

0C Digimat-FE	-	s ×
Analysis Material Phase Iools Help		
df df √f df   df df   f(x) ↓		?
B M Digimat Distinat Concrete S Microstructures S Solution S Chadings S Results S Solution S Controlo S Results S Solution S Results S Free S S Solution S Results S Solution S Results S Solution S Results S Solution S Results S Solution S Results S Results S Robal results S R	Image: Piele: Equivalent von Mises Stress     Deformation scale Factor: Image: Imag	
Ready.		100%

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


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



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



Εικόνα 98: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)

0C Digimat-FE	-	۵	×
Analysis Material Phase Iools Help			
			0
■ Digimat     ■ RANDOM     ■ KANDOM     ■ KANDOM     ■ KANDOM     ■ KANDOM     ■ KANDOM     ■ Marcatuctures     ■ Marcatuctures     ■ Marcatuctures     ■ MARIX     - VOIDS     ■ Marcatuctures     ■ Conditions     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Conditions     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatuctures     ■ Marcatucatucatucatucutures     ■ Marcatucatucatucatucutures     ■ Marcatucatucatucutures     ■ Marcatucatucatucatucutures     ■ Marcatucatucatucatucutures     ■ Marcatucatucatucatucatucatucatucatucatucatu			
Laggraphic CHU Met Celliner Regions Sh. All Tippins Relieved		V Creat	1
Ready.		100%	

Εικόνα 99: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)







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



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



Εικόνα 103: Ορισμός άξονα καταπόνησης. (Digimat)

🕫 Digimat-FE		-	٥	×
Analysis Material Phase Iools H	Jeep 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1			?
■ Digimat ■ AANDOM ■ Materials ↓ CONCRETE ■ 7 Microstructures ■ 7	Machanical loading   Parameters     Strain component   initial value   Peak value     E33   0   0.03     Loading stel   •   •     • Use quasi-static loading   •   •     • O Edine loading strain rate:   1   •			
Capylight 2016 MSC Software Belgium SA All Rights Recorded	<u> </u>	V	Create	
Ready.			100%	

Εικόνα 104: Ορισμός παραμόρφωσης. (Digimat)



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



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



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

C Digimat-FE		-	٥	×
Analysis Material Phase Tools	Leop			0
Digimat Digimat Digimat Digimat Digimat L_CONCRETE F. Microstructures T. Microstructures F. Microstructures F. Microstructures F. VOIDS F. VOIDS F. VOIDS F. VOIDS F. Vel V Geometry V Geometry V Meth F. Failure C. Solution E. Results V Plot 1 V FE results UV Plot 1 V Plot 1	Mechanical loading     Boundary conditions type     Boundary conditions type     Leading source     C Diginat     Macro FE model     Automatic properties evaluation     Leading type:     Usading type:     Usad			
Copyright 2016 MSC Software Relgion SA All Rights Reserved	<u>v</u> Help	E	Validat	-
Load analysis (Ctrl+O)			100%	
Εικόνα 108: Ορ	ισμός για εύρεση μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)			

σ

$\mathcal{K}$ Digimat-FE Analysis Material Phase Icols Help $\frac{\partial}{\partial \mathcal{K}} = \frac{\partial}{\partial \mathcal{K} = \frac{\partial}{\partial \mathcal{K}} = \frac{\partial}{\partial \mathcal{K}} = \frac{\partial}{\partial \mathcal{K} = \frac{\partial}{\partial \mathcal{K}} $		-
■ Digimat   Ft solution   Advanced param.     ♦ EXAMPLE   Time stepping     ♥ Z CONCRETE   ♥ Use default time stepping     ♥ Z Microstructures   ♥ Microstructures     ♥ Z Nicrostructures   ♥ Microstructures     ♥ Z Nicrostructures   ■ Microstructures     ♥ Z Nicrostructures   ■ Microstructures     ♥ Nicrostructures   Minimum time increment:     ♥ Wesh   Number of increments     ♥ Y Geometry   ♥ Mesh     ♥ Z Faiture   Number of CPUs:     ♥ Mosh   Solver type:     ♥ Piot 1   ♥ Piot 1     ♥ X Eresults   Feaseworking directory:     ♥ Stiffness   Create new job	1     1       0.1     0.1       1     1       2     1       1     2009       1     1       1     2009       1     1       1 <td< td=""><td>onds</td></td<>	onds
Example of the second seco	Deck       Int FE solver     Completed     IV:MSC.Software/Digimat/working/FE_RANDOM       Art FE solver     Completed     IV:MSC.Software/Digimat/working/FE_RANDOM       nat FE solver     Completed     IV:MSC.Software/Digimat/working/FE_RANDOM       nat FE solver     Completed     IV:MSC.Software/Digimat/working/FE_RANDOM       nat FE solver     Completed     IV:MSC.Software/Digimat/working/FE_RANDOM	Gime     End time       04/13/2022/153:00     04/13/2022/153:43       04/13/2022/155:02     04/13/2022/155:42       04/13/2022/155:02     04/13/2022/155:09       04/13/2022/155:02     04/13/2022/155:09       04/13/2022/155:02     04/13/2022/155:09
Save current analysis (Ctrl+S)		

Εικόνα 109: Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας. (Digimat)

## 4 Εκτιμήσεις Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων λ

#### 4.1 Εκτίμηση Συντελεστή Συγκέντρωσης Τάσεων Λόγω Ύπαρξης Εγκλεισμάτων Αερογέλης

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

Ο συντελεστής συντέντρωσης τάσεων λ υπολογίστηκε με βάση τον τύπο λ=  $\frac{\sigma max}{\sigma}$ , όπου σ<sub>max</sub> η μέγιστη τάση κάθε καταπόνησης (εφελκιστική, θλιπτική, καμπτική) και όπου σ=Ε·ε αντίστοιχα.

### 4.2 Εκτίμηση λ Για Μοναδικό Έγκλεισμα

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

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

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



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

### 4.3 Εκτίμηση λ Για Μέγιστη Κατ' όγκο Περιεκτικότητα Εγκλεισμάτων

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

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



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

#### 4.4 Εκτίμηση λ Για Τυχαία Διασπορά Εγκλεισμάτων

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

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



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

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



# 5 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις

### 5.1 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων Προσεγγίσεων

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

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



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

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



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



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

## Βιβλιογραφία

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

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

# Παράρτημα Α

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

Διαστάσεις RVE	2.5×2.5×2.5 mm
Διάμετρος σφαιριδίου	1 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm

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

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

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

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

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

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

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

	Ισοδύναμη τάση von Mises (MPa)	ουναμη Μεγιστη Ελά ση von κύρια κι Λises τάση το MPa) (MPa) (Ν		Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Τάση (MPa)	Συντελεστής Συγκέντρωσης τάσεων
Φόρτιση 1	2355	2395	-590	39489	1185	2.02
Φόρτιση 2	2358	2401	-584	39490	1185	2.03
Φόρτιση 3	2356	2396	-582	39503	1185	2.02

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

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

## Παράρτημα Β

Στο παρόν παράρτημα επισυνάπτονται όλοι οι πίνακες με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τάσεων, του συντελεστή συγκέντρωσης τάσης λ καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας σε κάθε περίπτωση, για τις δοκιμές με μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα αερογέλης στη μικροδομή του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου. Σε κάθε προσέγγιση διαφοροποιήθηκε η τιμή του μεγέθους του στοιχείου για πέντε περιπτώσεις.

Η μέγιστη κατ' όγκο περιεκτικότητας αερογέλης για την παρούσα πτυχιακη εργασία πραγματοποιήθηκε με 180 στοιχεία- εγκλείσματα τα οποία υπολογίσθηκαν με μαθηματικές μεθόδους ως προς τις συντεταγμένες τους, με στόχο την πλήρη κατανομή τους στη μικροδομή.

Διάμετρος σφαιριδίων	1 mm
Αριθμός σφαιριδίων	180
Διαστάσεις RVE	5.25×5.45596×5.14393 mm
Παραμόρφωση	0.03 mm

Πίνακας 1: Συντεταγμένες των στοιχείων-εγκλεισμάτων για την μέγιστη κατ'όγκο περιεκτικότητα αερογέλης.

Element	×	У	z																				
1	0	0	0	3:	0.525	0.303109	0.857321	61	0	0	1.714643	91	0.525	0.606218	2.571964	121	0	0	3.429286	151	0.525	0.303109	4.286607
2	1.05	0	0	32	1.575	0.303109	0.857321	62	1.05	0	1.714643	92	1.575	0.303109	2.571964	122	1.05	0	3.429286	152	1.575	0.303109	4.286607
3	2.1	0	0	3	2.625	0.303109	0.857321	63	2.1	0	1.714643	93	2.625	0.303109	2.571964	123	2.1	0	3.429286	153	2.625	0.303109	4.286607
4	3.15	0	0	34	3.675	0.303109	0.857321	64	3.15	0	1.714643	94	3.675	0.303109	2.571964	124	3.15	0	3.429286	154	3.675	0.303109	4.286607
5	4.2	0	0	35	4.725	0.303109	0.857321	65	4.2	0	1.714643	95	4.725	0.303109	2.571964	125	4.2	0	3.429286	155	4.725	0.303109	4.286607
6	0.525	0.909327	0	30	0	1.198002	0.857321	66	0.525	0.909327	1.714643	96	0	1.198002	2.571964	126	0.525	0.909327	3.429286	156	0	1.198002	4.286607
7	1.575	0.909327	0	37	1.05	1.198002	0.857321	67	1575	0.909327	1.714643	97	1.05	1.198002	2.571964	127	1575	0.909327	3.429286	157	1.05	1.198002	4.286607
8	2.625	0.909327	0	38	2.1	1.198002	0.857321	68	2625	0.909327	1.714643	98	2.1	1.198002	2.571964	128	2625	0.909327	3.429286	158	2.1	1.198002	4.286607
9	3.675	0.909327	0	39	3.15	1.198002	0.857321	69	3675	0.909327	1.714643	99	3.15	1.198002	2.571964	129	3675	0.909327	3.429286	159	3.15	1.198002	4.286607
10	4.725	0.909327	0	40	4.2	1.198002	0.857321	70	4725	0.909327	1.714643	100	4.2	1.198002	2.571964	130	4725	0.909327	3.429286	160	4.2	1.198002	4.286607
11	0	1.818653	0	4:	0.525	2.107328	0.857321	71	0	1.818653	1.714643	101	0.525	2.107328	2.571964	131	0	1.818653	3.429286	161	0.525	2.107328	4.286607
12	1.05	1.818653	0	4.	1575	2.107328	0.857321	72	1.05	1.818653	1.714643	102	1575	2.107328	2.571964	132	1.05	1.818653	3.429286	162	1575	2.107328	4.286607
13	2.1	1.818653	0	4	2625	2.107328	0.857321	73	2.1	1.818653	1.714643	103	2625	2.107328	2.571964	133	2.1	1.818653	3.429286	163	2625	2.107328	4.286607
14	3.15	1.818653	0	44	3675	2.107328	0.857321	74	3.15	1.818653	1.714643	104	3675	2.107328	2.571964	134	3.15	1.818653	3.429286	164	3675	2.107328	4.286607
15	4.2	1.818653	0	4	4725	2.107328	0.857321	75	4.2	1.818653	1.714643	105	4725	2.107328	2.571964	135	4.2	1.818653	3.429286	165	4725	2.107328	4.286607
16	0.525	2.72798	0	40	0	3.016655	0.857321	76	0.525	2.72798	1.714643	106	0	3.016655	2.571964	136	0.525	2.72798	3.429286	166	0	3.016655	4.286607
17	1.575	2.72798	0	4	1.05	3.016655	0.857321	77	1575	2.72798	1.714643	107	1.05	3.016655	2.571964	137	1575	2.72798	3.429286	167	1.05	3.016655	4.286607
18	2.625	2.72798	0	48	2.1	3.016655	0.857321	78	2625	2.72798	1.714643	108	2.1	3.016655	2.571964	138	2625	2.72798	3.429286	168	2.1	3.016655	4.286607
19	3.675	2.72798	0	49	3.15	3.016655	0.857321	79	3675	2.72798	1.714643	109	3.15	3.016655	2.571964	139	3675	2.72798	3.429286	169	3.15	3.016655	4.286607
20	4.725	2.72798	0	50	4.2	3.016655	0.857321	80	4725	2.72798	1.714643	110	4.2	3.016655	2.571964	140	4725	2.72798	3.429286	170	4.2	3.016655	4.286607
21	0	3.637307	0	5:	0.525	3.925982	0.857321	81	0	3.637307	1.714643	111	0.525	3.925982	2.571964	141	0	3.637307	3.429286	171	0.525	3.925982	4.286607
22	1.05	3.637307	0	52	1575	3.925982	0.857321	82	1.05	3.637307	1.714643	112	1575	3.925982	2.571964	142	1.05	3.637307	3.429286	172	1575	3.925982	4.286607
23	2.1	3.637307	0	53	2625	3.925982	0.857321	83	2.1	3.637307	1.714643	113	2625	3.925982	2.571964	143	2.1	3.637307	3.429286	173	2625	3.925982	4.286607
24	3.15	3.637307	0	54	3675	3.925982	0.857321	84	3.15	3.637307	1.714643	114	3675	3.925982	2.571964	144	3.15	3.637307	3.429286	174	3675	3.925982	4.286607
25	4.2	3.637307	0	55	4725	3.925982	0.857321	85	4.2	3.637307	1.714643	115	4725	3.925982	2.571964	145	4.2	3.637307	3.429286	175	4725	3.925982	4.286607
26	0.525	4.546633	0	50	0	4.835309	0.857321	86	0.525	4.546633	1.714643	116	0	4.835309	2.571964	146	0.525	4.546633	3.429286	176	0	4.835309	4.286607
27	1.575	4.546633	0	5	1.05	4.835309	0.857321	87	1575	4.546633	1.714643	117	1.05	4.835309	2.571964	147	1575	4.546633	3.429286	177	1.05	4.835309	4.286607
28	2.625	4.546633	0	58	2.1	4.835309	0.857321	88	2625	4.546633	1.714643	118	2.1	4.835309	2.571964	148	2625	4.546633	3.429286	178	2.1	4.835309	4.286607
29	3.675	4.546633	0	59	3.15	4.835309	0.857321	89	3675	4.546633	1.714643	119	3.15	4.835309	2.571964	149	3675	4.546633	3.429286	179	3.15	4.835309	4.286607
30	4,725	4,546633	0	60	4.2	4,835309	0.857321	90	4725	4.546633	1.714643	120	4.2	4.835309	2.571964	150	4725	4,546633	3,429286	180	4.2	4.835309	4,286607

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

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

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

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

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

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

# Παράρτημα Γ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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