



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-**  
**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-**  
**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ**  
**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Μ. ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΥ**

**Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων- Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ**

**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, Απρίλιος 2013**





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-

ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ- ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Μ. ΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων- Μεταλλουργού Ε.Μ.Π.

### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

### ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ

1. Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)
2. Δ. ΠΑΝΙΑΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Η. ΧΑΛΙΚΙΑ, Καθ. Ε.Μ.Π.

### ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

### ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ

1. Ι. ΠΑΣΠΑΛΙΑΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)
2. Δ. ΠΑΝΙΑΣ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Η. ΧΑΛΙΚΙΑ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Α. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Μ. ΤΑΞΙΑΡΧΟΥ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.
6. Μ. ΠΕΡΡΑΚΗ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.
7. Ν. ΠΑΠΑΣΙΩΠΗ, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Απρίλιος 2013**

*«η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»*

Αφιερώνεται στους γονείς μου, στα αγαπημένα μου πρόσωπα και τον  
θείο μου Στέλιο που έφυγε...



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Φτάνοντας στο τέλος μιας μακρόχρονης προσπάθειας, πολλοί είναι οι άνθρωποι των οποίων η συμβολή ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της, και τους ανθρώπους αυτούς έχω την χαρά να μνημονεύσω.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευχαριστία μου στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κο. Ιωάννη Πασπαλιάρη, Καθηγητή ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου το θέμα της διδακτορικής διατριβής, για τις άριστες συνθήκες διεξαγωγής της έρευνας τις οποίες εξασφάλισε αλλά και για την ουσιαστική συμβολή του ως δάσκαλος σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της και ιδίως στο κομμάτι της μαθηματικής μοντελοποίησης της διεργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου:

- στην Κα. Ηλιάνας Χαλικιά, Καθηγήτριας ΕΜΠ και μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου για την βοήθεια της στο κομμάτι της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του μαθηματικού μοντέλου, η κριτική της οποίας υπήρξε ουσιαστική και δημιουργική στην κατεύθυνση βελτίωσης της διατριβής.
- στον Κο. Δημήτριο Πάνια, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής μου επιτροπής για την σημαντική του βοήθεια και την εμπιστοσύνη που έχει δείξει στο πρόσωπο μου στο παρελθόν.
- στην Κα. Μαρία Ταξιάρχου, λέκτορα ΕΜΠ για την πολύχρονη συνεργασία μας, την σημαντική συμβολή της στο πειραματικό μέρος της διδακτορικής διατριβής και τις ουσιαστικές υποδείξεις της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης αλλά και συγγραφής της εργασίας μου.
- στην Κα. Μαρία Περράκη, λέκτορα ΕΜΠ για τη βοήθεια της στο χαρακτηρισμό των πρώτων υλών και τις σημαντικές παρατηρήσεις και υποδείξεις της με σκοπό την πληρότητα της έρευνας.
- στην Κα. Νυμφοδώρα Παपाσιώπη, αναπληρώτρια Καθηγήτρια, για την βοήθεια της σε θέματα που σχετίζονται με την μεταφορά θερμότητας.

- στον Κο. Ανδρέα Μπουντουβή, Καθηγητή στη σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ καθώς επίσης και τον Δρ. Χειμαριό Νικόλαο, Χημικό Μηχανικό, για την βοήθεια που μου προσέφεραν σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων όγκων στην περίπτωση της ηλεκτρικής καμίνου.
- στην εταιρία S & B Industrial Minerals S.A. για την παραχώρηση του εξοπλισμού της για την πραγματοποίηση πειραμάτων διόγκωσης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Δρ. Κο. Αθανάσιο Καραλή, Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό Μηχανικό, για την προθυμία του για βοήθεια και τις σημαντικές γνώσεις που αποκόμισα από τις συναντήσεις μας σχετικά με το φαινόμενο της διόγκωσης και την διεξαγωγή των διογκώσεων στις συμβατικές καμίνους. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κο. Αχιλλέα Αμανατίδη, Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό Μηχανικό, ο οποίος επέβλεπε τα πειράματα διόγκωσης που πραγματοποιούσα πριν από 6 περίπου χρόνια στις εγκαταστάσεις της εταιρίας S&B, όταν ήρθα για πρώτη φορά σε επαφή με τον περλίτη στα πλαίσια διεξαγωγής της διπλωματικής μου εργασίας. Με την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου με ενθάρρυνε για την περαιτέρω ενασχόληση μου με το αντικείμενο. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Κο. Δούκα Ευσταθιάδη, Χημικό Μηχανικό για την άριστη συνεργασία μας στο εργοστάσιο διόγκωση περλίτη της εταιρίας στην Ριτσώνα Βοιωτίας.
- τον Κο. Δημήτριο Ι. Γερογιώργη Δρ. Χημικό Μηχανικό, για την σημαντική βοήθεια του στο μοντέλο διόγκωσης του περλίτη. Οι αμέτρητες ώρες συζητήσεων σχετικά με την μαθηματική μοντελοποίηση της διεργασίας αποτέλεσαν συνεχή διοχέτευση γνώσης και εμπειρίας ανεκτίμητης αξίας.
- την Κα. Χριστίνας Καπράλου, Μηχανικό Μεταλλείων – Μεταλλουργό Μηχανικό, για την μακρόχρονη συνεργασία και την βοήθεια της ιδιαίτερα σε θέματα χαρακτηρισμού περλιτών καθώς επίσης και την Κα. Κατερίνα Μαλιαχώβα, Μηχανικό Μεταλλείων- Μεταλλουργό.
- στον φίλο μου Μιχάλη Σαμούχο, Χημικό Μηχανικό και σύντομα διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του ΕΜΠ για την ηθική του υποστήριξη σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής καθώς βιώσαμε παράλληλα όλα τα στάδια εκπόνησης της. Η υποστήριξη του έκανε πολλές δύσκολες μέρες να είναι πιο ανάλαφρες. Ακόμη, θα ήθελα να μνημονεύσω τον Δρ. Απόστολο Κούρτη και τον Δρ. Χαράλαμπο Ζωγραφίδη, Μηχανικούς Μεταλλείων- Μεταλλουργούς, με τους οποίους μοιραζόμουν το ίδιο γραφείο για την ευχάριστη διάθεση τους και την θετική τους σκέψη.



- σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας, με πολλούς από τους οποίους είχα την χαρά να συνεργαστώ αυτά τα χρόνια που υπήρξα μέλος του και εγώ.

Ιδιαίτερη υπήρξε η συμβολή των δικών μου ανθρώπων στη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου Μιχάλη και Κατερίνα για την υποστήριξη σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορική μου διατριβής και για την πίστη και εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπό μου, χωρίς την οποία δεν θα τα είχα καταφέρει. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου Παρασκευή, Κωνσταντίνο και Μάριο για την υπομονή που επέδειξαν και φυσικά τα πιο πρόσφατα μέλη της οικογενείας, Γιώργο και Κωνσταντίνα. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στη Μαρία, η οποία ήταν δίπλα μου στο δυσκολότερο και πιο πειστικό μέρος της διατριβής για την αφοσίωση της, την εμπύχωση και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου αλλά και για την υπομονή που έκανε αυτό το χρονικό διάστημα.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής ήμουν υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών, το οποίο και ευχαριστώ θερμά για την υλική υποστήριξη που μου παρείχε.

Παναγιώτης Αγγελόπουλος

Απρίλιος 2013

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο περλίτης είναι ηφαιστειακό πέτρωμα ρυολιθικής σύστασης με χαρακτηριστική υαλώδη δομή η οποία προέκυψε από την ταχύτατη ψύξη του μάγματος κατά τη διαδικασία γένεσης του πετρώματος. Ο περλίτης είναι πέτρωμα πλούσιο σε πυρίτιο, ενώ στην μάζα του περιλαμβάνει χημικά δεσμευμένο νερό σε περιεκτικότητα 2-6%. Όταν θερμαίνεται ακαριαία σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο μαλάκυνσής του (900 °C περίπου, ανάλογα με την ακριβή χημική του σύσταση) το δεσμευμένο νερό ατμοποιείται και απελευθερώνεται ενώ η έκλυση του προκαλεί διόγκωση στον κόκκο λόγω της δημιουργίας εκτενούς δικτύου πόρων στη μαλακή δομή του. Κατά τη διόγκωση ο αρχικά αδιόγκωτος συμπαγής κόκκος συνήθως χρώματος γκρι μετατρέπεται σε ένα ελαφροβαρές λευκό τεμαχίδιο με πλήθος πόρων και φυσαλίδων στο εσωτερικό του και στην επιφάνεια του και όγκο αυξημένο σε σύγκριση με τον αρχικό από 4 έως 20 φορές, ενώ η φαινόμενη πυκνότητα του στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν ξεπερνά τα  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Η μορφολογία του κόκκου και το εκτενές δίκτυο πόρων προσδίδουν στο διογκωμένο περλίτη θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες, αφού το δίκτυο ασυνεχειών στο εσωτερικό του και η επαλληλία του περλιτικού τοιχώματος και των φυσαλίδων αέρα δρα ως φράγμα στη μετάδοση της θερμότητας και του ήχου.

Ο βαθμός διόγκωσης του περλίτη και οι ιδιότητες του προϊόντος επηρεάζονται από τη θερμοκρασία που αποκτά ο κόκκος κατά την κατεργασία του και από το χρόνο θέρμανσης του. Σε βιομηχανική κλίμακα, η διόγκωση του περλίτη λαμβάνει χώρα σε κάθετες (σπανιότερα οριζόντιες) έμφλογες καμίνους διόγκωσης. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεθόδων διόγκωσης που επικρατούν σήμερα, αποτελεί το γεγονός ότι η πρόσδοση της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση και τελικά τη διόγκωση του περλίτη, πραγματοποιείται από καυστήρα πετρελαίου, φυσικού αερίου ή προπανίου. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις το διογκωμένο προϊόν παρασύρεται από τα θερμά καπναέρια και το ρεύμα στερεών-αερίων κινείται ομόρροπα, ενώ ο διαχωρισμός στερεών-αερίων γίνεται μέσω κυκλώνα. Οι συμβατικές κάμινοι διόγκωσης παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται τόσο με τις ιδιότητες του προϊόντος όσο και με την οικονομικότητα και αποδοτικότητα της μεθόδου διόγκωσης. Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα αυτά είναι τα εξής: α) περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης των συνθηκών διόγκωσης (χρόνος παραμονής, ρυθμός θέρμανσης και μέγιστη θερμοκρασία των τεμαχιδίων περλίτη), β) περιορισμός στο εύρος της κοκκομετρίας της πρώτης ύλης που μπορεί να διογκωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό και αδυναμία διόγκωσης των πολύ λεπτομερών κλασμάτων, γ) σημαντικές θερμικές απώλειες.

Σκοπός του παρόντος διδακτορικού είναι η ανάπτυξη μιας εξολοκλήρου νέας τεχνολογίας για την παραγωγή τεμαχιδίων διογκωμένου περλίτη υψηλής ποιότητας. Από την άποψη των ποιοτικών χαρακτηριστικών, επιδιώκεται η παραγωγή μικροσφαιριδίων περλίτη με φαινόμενη πυκνότητα που να μην ξεπερνά τα  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , με ικανοποιητική αντοχή και περιορισμένη απορροφητική ικανότητα. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι σημαντικό στις περιπτώσεις που ο περλίτης χρησιμοποιείται ως πληρωτικό χώρου (filler) σε μείγματα με ρευστά (χρώματα, σκυρόδεμα κ.α.). Μορφολογικά, τα ανωτέρω χαρακτηριστικά φαίνεται να πληρούνται όταν ο διογκωμένος περλίτης έχει σφαιρικό σχήμα και περιορισμένο εξωτερικό ανοιχτό πορώδες. Για να επιτευχθεί η παραγωγή διογκωμένων περλιτών με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, θεωρείται απαραίτητος ο ακριβής έλεγχος της διεργασίας της διόγκωσης. Στη νέα μέθοδο διόγκωσης περλίτη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εφαρμόστηκε η Τεχνολογία Έμμεσης Θέρμανσης (Indirect Heating Technology) για την κατασκευή μίας νέου τύπου καμίνου για τη διόγκωση του περλίτη. Στις σημαντικότερες διαφορές της σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο διόγκωσης εντάσσονται η απουσία του καυστήρα και η θέρμανση του κυλινδρικού θαλάμου διόγκωσης από 6 ζεύγη αντιστάσεων τοποθετημένων έξω και κατά μήκος του θαλάμου, η καθοδική κίνηση των τεμαχιδίων περλίτη σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας και η απουσία συστήματος αναρρόφησης. Ο σχεδιασμός της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση των συνθηκών που επικρατούν εντός του θαλάμου διόγκωσης και μέσω αυτού, του χρόνου παραμονής και της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων.

Οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν τις συνθήκες εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι η θερμοκρασία των ζωνών και ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα. Σκοπεύοντας στη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου στο πεδίο ροής εντός του θαλάμου διόγκωσης, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση της λειτουργίας της καμίνου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα FLUENT<sup>®</sup> με στόχο τη μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας της καμίνου. Το μαθηματικό μοντέλο προσέφερε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής εντός του θαλάμου, ενώ η προσομοίωση επεκτάθηκε και σε μια περίπτωση κατά την οποία ο τροφοδοτούμενος αέρας εισάγεται προθερμασμένος σε θερμοκρασία  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , για να μελετηθεί η επίδραση που θα είχε η προσθήκη προθερμαντήρα αέρα στην εγκατάσταση. Η ροή εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι στρωτή για το εύρος ρυθμού τροφοδοσίας αέρα μεταξύ  $50\text{-}200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Η τροφοδοσία αέρα με ρυθμό μεγαλύτερο των  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  οδηγεί σε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του θαλάμου διόγκωσης και σε τιμές απαγορευτικές για την πραγματοποίηση της διόγκωσης, ενώ σε όλο το μήκος του, επικρατεί η

καθοδική κίνηση του αέρα, εξασφαλίζοντας έτσι την επίσης καθοδική κίνηση των τεμαχιδίων περλίτη.

Πραγματοποιήθηκε σημαντικός αριθμός πειραμάτων διόγκωσης στη νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο και σε συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης με σκοπό την ανάλυση της διεργασίας στις δύο μεθόδους και τη σύγκριση των ιδιοτήτων των προϊόντων που προέκυψαν. Στα πειράματα διόγκωσης χρησιμοποιήθηκε περλίτης από τα κοιτάσματα του Τσιγκράδου και του Τράχηλα που βρίσκονται στη νήσο Μήλο και διαχειρίζεται η εταιρία S&B. Από τα αρχικά δείγματα κοκκομετρικού εύρους +75 – 300  $\mu\text{m}$  δημιουργήθηκαν άλλα τρία κλάσματα μικρότερου κοκκομετρικού εύρους τα οποία επίσης χρησιμοποιήθηκαν σαν πρώτη ύλη για τη διόγκωση. Για το χαρακτηρισμό των διογκωμένων δειγμάτων μετρήθηκαν οι εξής ιδιότητες: φαινόμενη πυκνότητα, ύδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα, αντοχή σε συμπίεση, βαθμός διογκωσιμότητας, απώλεια πύρωσης, κοκκομετρική κατανομή και πραγματική πυκνότητα. Παράλληλα, μελετήθηκαν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των κόκκων. Τα διογκωμένα προϊόντα που παρήχθησαν με τη νέα κάμινο είναι πολύ υψηλής ποιότητας, σε πολλές περιπτώσεις καλύτερα από τα αντίστοιχα συμβατικά, με ιδιότητες που τα καθιστούν ανταγωνιστικά για διάφορες νέες εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη αντοχή σε συμπίεση σε όλες τις περιπτώσεις που μπορεί να ξεπεράσει το 500 %, σε σύγκριση με τα συμβατικά, ενώ η ύδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα τους είναι η ίδια ή σε πολλές περιπτώσεις μέχρι και 20% μειωμένη. Ακόμη, τα προϊόντα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου παρουσιάζουν στενότερη κοκκομετρική κατανομή και μικρότερο ποσοστό παραμένου νερού, όπως φάνηκε από τις μετρήσεις απώλειας πύρωσης (Loss On Ignition, L.O.I.), γεγονός που θα μπορούσε έμμεσα να συσχετισθεί με τον χρόνο θέρμανσης τους όταν διογκώνονται με την νέα μέθοδο διόγκωσης. Η αποδοτικότητα της διόγκωσης με τη νέα κάμινο, εκφρασμένη ως κατά βάρος περιεκτικότητα των δειγμάτων σε επαρκώς διογκωμένους κόκκους, είναι υψηλότερη σε σύγκριση με αυτή των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων. Μορφολογικά, τα δείγματα που προέκυψαν από την κατεργασία στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης εμφανίζουν περισσότερους σφαιρικούς κόκκους και μειωμένο ανοιχτό επιφανειακό πορώδες.

Όσον αφορά στην επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων, σε άμεση συμφωνία με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη μέθοδο CFD, φάνηκε ότι η θερμοκρασία του θαλάμου πρέπει να ξεπεράσει τους 1000 °C για την παραγωγή επαρκώς διογκωμένων δειγμάτων περλίτη. Επιπλέον, ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , ενώ μέχρι και τα 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  δεν φαίνεται να επιδρά αρνητικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διογκωμένου περλίτη. Τα όρια αυτά όμως επηρεάζονται τόσο από το ρυθμό τροφοδοσίας

όσο και από τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης (χημική σύσταση, κοκκομετρική κατανομή) και μπορεί να μεταβάλλονται σε κάποιο βαθμό.

Σκοπεύοντας στην εις βάθος κατανόηση της διεργασίας στη νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης, αναπτύχθηκε ένα νέο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την διόγκωση ενός κόκκου περλίτη εντός της καμίνου διόγκωσης. Το μαθηματικό μοντέλο μελετά σε συζευγμένη μορφή τα τρία βασικά φαινόμενα που βιώνει ο κόκκος εντός του θαλάμου, δηλαδή την κίνηση, τη θέρμανση και τη διόγκωση, ενώ παράλληλα υπολογίζεται η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα στο σημείο που βρίσκεται ο κόκκος. Όσον αφορά στην κίνηση του κόκκου λαμβάνεται υπόψη εκτός από τη βαρύτητα, η επίδραση της οπισθέλκουσας δύναμης και της άνωσης. Η θέρμανση του τεμαχιδίου πραγματοποιείται μέσω συναγωγής από τον αέρα αλλά και θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα θερμά τοιχώματα της καμίνου. Για την προσομοίωση της διόγκωσης του κόκκου αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο διόγκωσης, στο οποίο έγινε η εξής θεώρηση: στο κέντρο του κόκκου υπάρχει φυσαλίδα εντός της οποίας περιέχεται το επιδρών στην διόγκωση νερό, το ποσοστό του οποίου είναι το 60% της συνολικής περιεκτικότητας του αδιόγκωτου περλίτη σε νερό. Όπως συμβαίνει στην πράξη, έτσι και στο μαθηματικό μοντέλο, η διόγκωση του κόκκου πραγματοποιείται λόγω της ατμοποίησης του περιεχόμενου νερού και των πιέσεων που ασκούνται από αυτό εφόσον το ιξώδες του περλίτη έχει μειωθεί και η θερμοκρασία του έχει ξεπεράσει το σημείο μαλάκυνσης του. Το μαθηματικό μοντέλο προσφέρει την δυνατότητα διαμόρφωσης σεναρίων μεταβάλλοντας τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης αλλά και τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου διόγκωσης με τελικό σκοπό τη προσομοίωση της διεργασίας για διάφορες συνθήκες διόγκωσης και περλίτη διαφορετικής χημικής σύστασης. Το μαθηματικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του περλιτικού κελύφους λαμβάνονται υπόψη ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της περιεκτικότητας του τεμαχιδίου σε νερό, ενώ όσον αφορά στο ιξώδες, λαμβάνεται υπόψη η συνολική χημική του σύσταση.

Το μοντέλο προβλέπει την κατανομή της θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα και του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και προσδιορίζει τη χρονική μεταβολή και την τελική τιμή της διαμέτρου του τεμαχιδίου. Με την εφαρμογή του μοντέλου αυτού μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου αλλά και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της πρώτης ύλης στην εξέλιξη της διεργασίας και τον τελικό βαθμό διόγκωσης και προέκυψαν πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα σχηματισμού επικολλήσεων στην εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης ή την επίσης ακραία περίπτωση εξόδου μη-επαρκώς τεμαχιδίων από την κάμινο. Τέλος, διερευνήθηκε η δυνατότητα κατεργασίας πρώτων υλών ευρείας κοκκομετρικής κατανομής με σκοπό την παραγωγή περλίτη υψηλών ποιοτικών χαρακτηριστικών και φάνηκε ότι

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου το παραπάνω, είναι εφικτό ενώ παράλληλα αναφέρονται ακριβείς οδηγίες για την επίτευξη του.

**EXTENDED ABSTRACT**

Perlite is a naturally occurring siliceous volcanic rock of rhyolitic composition. When perlite is heated at suitable rate in temperature that exceeds its softening point (approx. 900 °C depending on its chemical composition) it expands up to twenty times its original volume. The characteristic expansion is attributed to combined water, which may vary by weight between 2 to 6%. When perlite is heated fast, the combined water tends to escape as steam, and as soon as the grain temperature exceeds its softening point, the trapped water pushes its way out, resulting in the expansion of the grain. Raw perlite is compact, typically grey colored and sandy, while after expansion process acquires white color and becomes a frothy and lightweight material with extended network of micropores and air bubbles on its structures. Expanded perlite radius increases up to 4 times while its loose bulk density value is in the range between 30-150 kg·m<sup>-3</sup>. Due to the grain morphology and the extended network of internal pores, expanded perlite is characterized by outstanding sound and thermal insulating properties. The main parameters affecting the expansion process as well as the expanded perlite properties are the temperature of the particle during the expansion and the heating time.

In the industry, perlite is expanded in vertical (rarely in horizontal) furnaces. Common constructive features of expansion furnaces are the cylindrical shape of heating chamber, the gas or oil burner as system heating source and the existence of aspiration system and cyclone for removal of exhaust gas and expanded perlite, and for solid-gas phases separation after expansion, respectively. Conventional expansion technique drawbacks are the following: a) lack of detailed control of the expansion (particles residence time, heating rate and maximum temperature). b) restrictions on the particle size distribution range and inefficient expansion of fine perlite, and c) high thermal losses.

The scope of the doctoral study has been the development of a new expansion method for the production of high quality expanded perlite microspheres. The main specifications of the new products are low loose bulk density (l.b.d value < 150 kg·m<sup>-3</sup>), increased durability, as well as low water and oil absorption. Expanded perlite absorption is of high importance when it is intended for use as filler in mixes with other fluids (lightweight mortars, special paints e.tc.). As far as the grain morphology is concerned, spherical particle with closed structure (low amount of surface open pores) and low specific surface area is required. In order to produce expanded perlite microspheres with the aforementioned characteristics, the precise control of the expansion process is necessary.

In the framework of this study, a new expansion method has been developed aiming to overcome the drawbacks of the conventional expansion method. The Indirect Heating Technology has been applied and a new pilot-scale vertical electrical furnace for perlite expansion has been designed and constructed in the Laboratory of Metallurgy of the National Technical University of Athens. The new vertical electrical furnace has been designed in such a way for maximizing experimental flexibility, in order to facilitate the variation and adjustment of the operating conditions, depending on the raw material characteristics, as well as the required specifications of the new expanded perlite products. Furthermore, detailed knowledge and control of the conditions under which expansion takes place and the operational parameters of the system allow the configuration of various conditions for perlite processing. The new perlite expansion method allows the milder, gradual heating of perlite grains, as well as the variation of perlite grain residence time in the heating chamber. Basic differences between the new method and the conventional one are the absence of burner, the heating of the expansion chamber by six couples of electrical resistances which are located on the outer surface and along the furnace heating chamber, the dominance of gravitational force resulting in downward particle motion and the absence of aspiration system.

The main operating parameters that affect the conditions inside the heating chamber are the furnace temperature and the injected air volumetric flow rate. In order to study the effect of furnace operating parameters on the chamber internal flow field and due to technical difficulties in the determination of each characteristic (air temperature and velocity) experimentally, a mathematic model has been developed by the implementation of finite volumes method in commercial software (FLUENT<sup>®</sup>, Ansys). The modeling results show that the air flow in the heating chamber is laminar for air feeding between 50- 200 L/min. The air temperature inside the heating chamber is significantly reduced when the air feeding rate exceeds 100 L/min, while a downwards air stream is developed along the entire heating chamber length ensuring the unimpeded downward particles movement during the expansion process for the entire range of studied operating conditions. The furnace temperature increases significantly under the injection of air pre-heated at 500 °C.

A significant number of perlite expansion experiments have been performed in both vertical electrical furnace and in a conventional expansion furnace, in order to analyze the process with both methods and to investigate the effect of expansion process in products quality. As raw material, perlite from Tsigrado and Trachilas ore mines were used which are located in Milos Island in Greece, and both operates S&B Industrial Minerals S.A. Expansion experiments have been performed in both initial raw materials with granulometry of +75- 300 $\mu$ m, as well as in 3 sample fractions of narrower particle size distribution. The extend products characterization consists of the implementation of 8 test methods for the determination of expanded product



properties which are: Loose Bulk Density, water and oil absorption, compression strength, expansion ratio, Loose on Ignition, Particle Size Distribution and skeletal density as well as grains morphology. Perlite particles that had been expanded in the new vertical electrical furnace are of high quality having significantly improved compression strength (in some cases improvement exceeds 500%) compared with conventionally expanded perlite. Additionally, the particles water and oil absorption is the same and in some cases reduced by 20%, with narrower particle size distribution and lower resident water content. Mathematical equations have been proposed for the correlation of samples Loose Bulk Density (L.B.D) with compression strength and oil and water absorptivity and refers to both raw material qualities and the two expansion processes.

As far as the furnace operating conditions are concerned, the furnace wall temperature has to exceed 1000 °C for the expansion of perlite at LBD value lower than 100 kg·m<sup>-3</sup> while further increase of furnace wall temperature at 1200 °C results in further reduction of expanded perlite LBD at a value lower than 80 kg·m<sup>-3</sup>. The air feeding rate upper limit for adequate expansion is 100 L·min<sup>-1</sup> while higher rate values decrease significantly the furnace temperature and the expansion process becomes insufficient.

Aiming at the better understanding of the perlite expansion process in the new vertical electrical furnace and due to the fact that experimental measurements of both perlite and air characteristics along the chamber cannot be performed, a mathematical model has been developed for the simulation of the process evolution in the new vertical electrical furnace. The aim of the new model is the performance of a detailed numerical investigation of the process efficiency, towards, the optimization of the expansion process in the new pilot-scale furnace. The dynamic model consists of ordinary differential equations for both air and particle heat and momentum balances, as well as nonlinear algebraic equations for both air and perlite melt thermophysical and transport properties, probing the air temperature and velocity distribution within the vertical electrical furnace as well as the particle velocity, temperature and size along its trajectory inside the heating chamber. The expansion phenomenon has been simulated by a new steam bubble growth model that has been developed. In the steam bubble growth model, perlite particle is assumed to be a two phase particle that consists of a spherical steam nucleus and a solid shell surrounding the steam bubble. Steam nucleus contains the effective water content of the perlite particle (60%) while the rest water is diluted in solid shell and affects its viscosity. During particle heating, the perlite grain temperature increase has a dual effect: firstly, steam enthalpy increases, thereby increasing the pressure exerted on the bubble-shell interface; concurrently, molten shell viscosity and cohesion decrease, thus facilitating bubble expansion and increasing steam bubble radius and perlite grain size.

The effect of raw material physical properties (initial particle size, effective water content, particle chemical composition) as well as the furnace operational parameters (air inlet temperature and flowrate, furnace wall temperature) on the evolution of the particle state variables are presented and discussed. Comparison between the simulation results and experimental data confirms the validity of the model, especially when the furnace wall setting temperature does not exceed 1000 °C. The perlite resident water has significant effect on the particle viscosity. The effect of other chemical species content is minor regarding the high impact of the water in perlite viscosity, which is recognized as the basic perlite thermophysical property that affects expansion process. Dynamic modeling results imply that the feed monodispersity is an ideal prerequisite for high-quality perlite production. However, in accordance to the expansion experiments, the mathematical model shows that the vertical electrical expansion furnace allows the simultaneous treatment of raw materials with size range from 150 μm to 250 μm or from 250 μm to 350 μm resulting in expanded perlite with acceptable loose bulk density, after proper adjustment of furnace operating conditions. Injection of preheated air in the heating chamber enables the simultaneous production of expanded perlite from raw material samples with particle size distribution ranges from 150 μm to 350 μm. Raw material with an initial particle diameter higher than 350 μm has to be treated separately.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....   | 10 |
| EXTENDED ABSTRACT .....  | 15 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....   | 19 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....   | 26 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....  | 40 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> . ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 45 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> . Ο ΠΕΡΛΙΤΗΣ .....   | 50 |
| 2.1. Ο περλίτης: πέτρωμα και βιομηχανικό ορυκτό.....                               | 50 |
| 2.2. Πετρολογικά χαρακτηριστικά του περλίτη και γένεση περλιτικών κοιτασμάτων..... | 53 |
| 2.3. Χημική σύσταση και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του περλίτη.....               | 62 |
| 2.4. Στοιχεία παραγωγής περλίτη.....   | 65 |
| 2.5. Χρήσεις και εφαρμογές του περλίτη .....                                       | 67 |
| 2.5.1. Κατασκευαστικός τομέας .....  | 68 |
| 2.5.2. Φυτοκομία.....  | 70 |
| 2.5.3. Χημική βιομηχανία και βιομηχανία τροφίμων .....                             | 73 |
| 2.5.4. Χρήση περλίτη ως μονωτικό υλικό σε τεχνολογίες ακραίων θερμοκρασιών .....   | 75 |
| 2.5.5. Μεταλλουργία χάλυβα και χυτήρια .....                                       | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.5.6. Λοιπές εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών.....  | 78  |
| 2.6. Μελλοντικές τάσεις στη βιομηχανία περλίτη .....  | 78  |
| 2.6.1. Νέες εφαρμογές του περλίτη .....   | 79  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> . Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ<br>ΤΟΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ..... | 80  |
| 3.1. Παράγοντες που επιδρούν στην διόγκωση.....   | 81  |
| 3.1.1. Το νερό .....  | 81  |
| 3.1.2. Η θερμοκρασία θέρμανσης .....  | 88  |
| 3.1.3. Επίδραση της διάρκειας της διόγκωσης.....  | 92  |
| 3.2. Βιομηχανικές κάμινοι διόγκωσης.....  | 93  |
| 3.2.1. Οριζόντια κάμινοι διόγκωσης .....  | 94  |
| 3.2.2. Κάθετη κάμινοι χωρίς προθερμαντήρα .....   | 95  |
| 3.2.3. Κάθετη κάμινοι διόγκωσης με ξεχωριστό προθερμαντήρα .....                                      | 96  |
| 3.2.4. Κάθετη κάμινοι διόγκωσης με ενσωματωμένο προθερμαντήρα.....                                    | 97  |
| 3.2.5. Χαρακτηριστικά λειτουργίας συμβατικών τεχνικών διόγκωσης περλίτη .....                         | 99  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> . Η ΝΕΑ ΚΑΘΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ.....                       | 105 |
| 4.1. Πειραματική διάταξη.....   | 106 |
| 4.1.1. Σύστημα τροφοδοσίας αέρα.....  | 107 |
| 4.1.2. Κάθετη ηλεκτρική κάμινοι διόγκωσης.....  | 109 |
| 4.1.3. Σύστημα τροφοδοσίας πρώτης ύλης.....   | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1.4. Σύστημα μέτρησης και ρύθμισης θερμοκρασίας, τροφοδοσίας και δόνησης .....                            | 117 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> . ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ .....             | 119 |
| 5.1. Εξισώσεις πεδίου ροής και μοντελοποίηση τυρβώδους ροής.....  | 120 |
| 5.2. Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου .....  | 130 |
| 5.2.1. Εισαγωγή.....  | 130 |
| 5.2.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου, ορισμός οριακών συνθηκών και διακριτοποίηση γεωμετρίας ..... | 131 |
| 5.2.3. Ιδιότητες υλικών .....   | 139 |
| 5.2.4. Καθορισμός οριακών συνθηκών.....   | 141 |
| 5.2.5. Επίλυση του μαθηματικού μοντέλου και έλεγχος σύγκλισης λύσης.....                                    | 142 |
| 5.3. Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης .....  | 145 |
| 5.4 Πειραματικές μετρήσεις και σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.....                            | 152 |
| 5.4.1. Πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στο πεδίο ροής .....                                   | 153 |
| 5.4.2. Το σφάλμα των θερμοστοιχείων στην μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα.....                             | 153 |
| 5.4.3. Πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τον θάλαμο διόγκωσης .....   | 159 |
| 5.5. Συμπεράσματα.....  | 162 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> . ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ .....   | 164 |
| 6.1. Χαρακτηρισμός πρώτων υλών .....  | 164 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.1.1. Χημική ανάλυση των δειγμάτων περλίτη .....                           | 165 |
| 6.1.2. Φυσικές ιδιότητες.....   | 167 |
| 6.1.3. Ορυκτολογική ανάλυση .....   | 170 |
| 6.2. Πειράματα διόγκωσης .....  | 183 |
| 6.2.1. Συνθήκες διεξαγωγής περαμάτων διόγκωσης .....                        | 183 |
| 6.2.2. Μέθοδοι χαρακτηρισμού διογκωμένων δειγμάτων .....                    | 187 |
| 6.3. Διογκωμένα δείγματα περλίτη Τσιγκράδου .....                           | 189 |
| 6.3.1. Βασικές ιδιότητες.....   | 189 |
| 6.3.2. Διογκωμένα- σκασμένα/θρυμματισμένα- αδιόγκωτα σωματίδια .....        | 197 |
| 6.3.3. Απώλεια λόγω πύρωσης (Loss On Ignition, L.O.I). .....                | 200 |
| 6.3.4. Κοκκομετρική κατανομή .....  | 201 |
| 6.3.5. Πραγματική πυκνότητα (skeletal density) .....                        | 203 |
| 6.3.6. Ιδιότητες του επαρκώς διογκωμένου κλάσματος (floaters).....          | 204 |
| 6.3.7. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης βασικών ιδιοτήτων δείγματος CH..... | 206 |
| 6.3.8. Συμπεράσματα για διογκωμένους περλίτες Τσιγκράδου (CH). .....        | 207 |
| 6.4. Διογκωμένοι περλίτες από το δείγμα Τσιγκράδου CHI.....                 | 208 |
| 6.4.1. Βασικές ιδιότητες.....   | 208 |
| 6.4.2. Διογκωμένα- σκασμένα/θρυμματισμένα- αδιόγκωτα σωματίδια .....        | 215 |
| 6.4.3. Απώλεια πύρωσης.....   | 218 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.4.4. Κοκκομετρική κατανομή .....  | 218 |
| 6.4.5. Πραγματική πυκνότητα (skeletal density). .....   | 219 |
| 6.4.6. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης βασικών ιδιοτήτων δειγμάτων TR.....   | 221 |
| 6.4.7. Συμπεράσματα για διογκωμένους περλίτες Τράχηλα.....  | 222 |
| 6.5. Σύγκριση διογκωμένων δειγμάτων Τσιγκράδου και Τράχηλα .....  | 223 |
| 6.6. Μελέτη επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου στην<br>διόγκωση περλιτών. ....         | 226 |
| 6.6.1. Θερμοκρασία καμίνου .....  | 227 |
| 6.6.2. Ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα.....   | 235 |
| 6.6.3. Ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης .....   | 236 |
| 6.6.4. Κοκκομετρική κατανομής της τροφοδοσίας.....  | 237 |
| 6.7. Συμπεράσματα κεφαλαίου .....   | 240 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> . ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΔΙΩΝ ΠΕΡΛΙΤΗ ΣΕ<br>ΚΑΘΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ..... | 244 |
| 7.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....   | 245 |
| 7.2. Θερμοφυσικές ιδιότητες.....  | 248 |
| 7.2.1. Θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα .....  | 248 |
| 7.2.2. Θερμοφυσικές ιδιότητες του περλίτη .....   | 252 |
| 7.3. Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου διόγκωσης .....  | 262 |
| 7.3.1. Οι εξισώσεις κίνησης του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης .....                                       | 265 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.3.2. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου της ηλεκτρικής καμίνου.....                                      | 267 |
| 7.3.3. Θερμοκρασία του τεμαχιδίου κατά την κίνηση του κατά μήκος του θαλάμου της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης .....               | 270 |
| 7.3.4. Το μοντέλο σχηματισμού και διόγκωσης της φυσαλίδας ατμού εντός του τεμαχιδίου περλίτη .....                                | 273 |
| 7.4. Συνολικό μαθηματικό μοντέλο διόγκωσης τεμαχιδίου περλίτη κατά την κίνησή του κατά μήκος της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου ..... | 278 |
| 7.5. Αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου .....  | 282 |
| 7.5.1. Ρυθμός θέρμανσης και χαρακτηριστικά ροής του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης .....  | 282 |
| 7.5.2. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου στη διόγκωση τεμαχιδίων περλίτη.....                           | 303 |
| 7.5.3. Προσομοίωση διόγκωσης τεμαχιδίων διαφορετικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. ....   | 325 |
| 7.5.4. Συσχετισμός του εύρους κοκκομετρίας της τροοδοσίας με τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου. ....                           | 332 |
| 7.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων μαθηματικού μοντέλου και πειραματικών δεδομένων.....  | 339 |
| 7.7. Συμπεράσματα κεφαλαίου .....   | 341 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 <sup>ο</sup> . ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ   | 345 |
| 8.1. Γενικά συμπεράσματα.....   | 345 |



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |     |
|--|-----|
| 8.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα ..... | 351 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                         | 354 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....                          | 364 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....                          | 368 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....                         | 373 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV.....                          | 384 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V.....                           | 391 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 2.1. Φωτογραφίες οψιδιανού (Α), πισσόλιθου (Β) και κίσσηρη (Γ). .....  | 54 |
| Σχήμα 2.2. Συνύπαρξη περλίτη και οψιδιανού σε δύο κλίμακες. Α) Τομή στην οποία παρουσιάζεται η μετατροπή οψιδιανού σε περλίτη (περλιτοποίηση) και οι χαρακτηριστικές ομόκεντρες ρωγματώσεις της περλιτικής δομής σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, Buyuk Yayla, Turkey, Β) Εγκλείσματα όζων οψιδιανού σε περλιτική μήτρα, Utah, USA. Η κοινή ονομασία των όζων οψιδιανού είναι «Δάκρυ των Απάτσι» (Heide and Heide, 2011). .....  | 57 |
| Σχήμα 2.3. Γραφική απεικόνιση μικρού θόλου (Α), ροής λάβας (Β) και μεγάλου θόλου (C) που αποτελούν σημεία μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης περλιτικών κοιτασμάτων (Chamberlin and Barker, 1996). Η αλληλουχία των στρωμάτων στην περίπτωση του μεγάλου θόλου (Γ) δυσχεραίνει την εξόρυξη του περλίτη σε σύγκριση με τα συμπαγή και ομοιόμορφα στρώματα των μικρών θόλων και των ροών λάβας (Α και Β).....   | 58 |
| Σχήμα 2.4. Τομή πετρωμάτων περλίτη με σαφή διαφορά στην δομή λόγω διαφορετικών συνθηκών κατά την στερεοποίηση τους: Α) στερεοποίηση σε θόλο με έντονη ανάπτυξη ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά την απότομη ψύξη του πετρώματος και την αύξηση του όγκου του κατά την προσρόφηση νερού (Erickson et al., 2011). Β) στερεοποίηση σε ροή λάβας με εμφανή στρωμάτωση και παρουσία εγκλεισμάτων (Erickson et al., 2011). Γ) Δίκτυο περλιτικών ομόκεντρων και τοξοτών ρωγμών, όπως απεικονίζονται σε πολωτικό μικροσκόπιο. Πραγματικό μήκος 1.8 χιλ. (Rotella and Simandl, 2001). ..... | 59 |
| Σχήμα 2.5. Εξιδανικευμένη τομή ρυολιθικού θόλου (Whitson, 1982). .....   | 61 |
| Σχήμα 2.6. Η στρωματογραφία που συναντάται στους ρυολιθικούς θόλους της περιοχής No Agua, New Mexico, USA κατά τον Whitson (τομή σε λεπτομέρεια Εικ.5). Η περίπτωση αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα περλιτικών κοιτασμάτων σε ηφαιστειακούς θόλους (Whitson, 1982). .....   | 61 |
| Σχήμα 2.7. Σχηματική αναπαράσταση της δομής περλίτη. ....  | 62 |
| Σχήμα 2.8. Περλίτης: Α) Πέτρωμα περλίτη, Β) Κλάσματα λειοτριβημένου αδιόγκωτου περλίτη, Γ) Κόκκοι διογκωμένου περλίτη, Δ) η δομή διογκωμένου κόκκου όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). .....   | 64 |
| Σχήμα 2.9. Οι 15 χώρες όπου παράγεται περλίτης και η ετήσια εγχώρια παραγωγή για το χρονικό διάστημα 1991-2001 (Bolen, 2011). .....  | 66 |
| Σχήμα 2.10. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή περλίτη για το χρονικό διάστημα 1991-2011 (Bollen, 2011). .....  | 66 |
| Σχήμα 2.11. Χρήσεις του περλίτη στον κατασκευαστικό τομέα. Α) Πλάκες οροφής, Β) Γυψοσανίδες, Γ) Χύδην για πλήρωση μεσοτοιχιών. ....  | 70 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 2.12. Χρήση του περλίτη στη φυτοκομία: Α) Εξωτερική υδροπονική καλλιέργεια φράουλας, Β) Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού σε θερμοκήπιο, Γ) Ο περλίτης ως συστατικό του υποστρώματος καλλιεργειών. ....  | 72  |
| Σχήμα 2.13. Ο περλίτης στα φίλτρα: Α) Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας, Β) Περλίτης της εταιρίας Nordisk Perlite για χρήση σε φίλτρα όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(Hill, 1979). ....  | 73  |
| Σχήμα 2.14. Ο περλίτης ως μονωτικό ακραίων θερμοκρασιών: Α) Δοχεία με ενδιάμεση μόνωση περλίτη υπό συνθήκες κενού για τη μεταφορά και αποθήκευση υγροποιημένων αερίων, Β) Μόνωση στα τοιχώματα των δεξαμενών πλοίου για τη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου, Γ) Έτοιμα προϊόντα διαφόρων σχημάτων για μόνωση σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (φούρνους, βιομηχανικούς κλιβάνου κ.λπ.).....  | 76  |
| Σχήμα 3.1. Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε μοριακό νερό (H-O-H, άσπρα σχήματα) και σε ομάδες υδροξυλίου (X-OH όπου X=Si, Al, μαύρα σχήματα) συναρτήσει της συνολικής περιεκτικότητας των δειγμάτων σε νερό κατά E. Stolper (Stolper, 1982). Συμβολισμός: κύκλοι = ρυολιθικές ύαλοι, τρίγωνα = βασαλτικές ύαλοι, τετράγωνα = αρβιτικές ύαλοι. ....   | 83  |
| Σχήμα 3.2. Μοντέλο περιγραφής της διόγκωσης του περλίτη κατά Shackley (σημείωση του ερευνητή: οι διάφορες θερμοκρασίες και περιεκτικότητες έχουν επεξηγηματικό στόχο) (Shackley, 1988). ....  | 90  |
| Σχήμα 3.3. Κόκκοι αδιόγκωτου (Α, Β) και διογκωμένου περλίτη σε διάφορες φάσεις (Γ-ΣΤ) όπως φαίνονται σε οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM):Α) Αδιόγκωτοι κόκκοι, Β) η επιφάνεια του αδιόγκωτου κόκκου, Γ) Οι πόροι διαφυγής ατμού κατά τη διάρκεια της διόγκωσης, Δ)Διογκωμένος κόκκος παρουσία διόδων διαφυγής νερού και σπασμένων επιφανειακών πόρων, Ε) Ομοιόμορφη διόγκωση κόκκου με τελικά κλειστό πορώδες, ΣΤ) Η εσωτερική δομή του διογκωμένου κόκκου όπως φαίνεται στο οπτικό μικροσκόπιο. .... | 91  |
| Σχήμα 3.4. Οριζόντια κάμιнос διόγκωσης περλίτη (Shackley, 1988; Allen, 1992). ....  | 94  |
| Σχήμα 3.5. Κάθετη κάμιнос διόγκωσης περλίτη χωρίς προθερμαντήρα (Αγγελόπουλος, 2007). ....  | 95  |
| Σχήμα 3.6. Κάθετη κάμιнос διόγκωσης περλίτη με ξεχωριστό προθερμαντήρα για την πρώτη ύλη. ....  | 97  |
| Σχήμα 3.7. Κάθετη κάμιнос διόγκωσης περλίτη με ενσωματωμένο σύστημα προθέρμανσης του αέρα και την πρώτης ύλης (Allen, 1992). ....   | 98  |
| Σχήμα 3.8. Αλληλεπίδραση των συνθηκών λειτουργίας της συμβατικής καμίνου και των συνθηκών διόγκωσης και η επίδραση αυτών στον περλίτη (Barker and Harris, 1990). ....   | 101 |
| Σχήμα 4.1. Διάγραμμα ροής εγκατάστασης διόγκωσης περλίτη με τη χρήση της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου. ....   | 106 |
| Σχήμα 4.2. Ο αεροσυμπιεστής μεγάλης δυναμικότητας (αριστερά) και το σύστημα ροόμετρων-μανομέτρων για τη ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής του αέρα στο θάλαμο διόγκωσης. ....  | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 4.3. Η κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης περλίτη και οι κύριες περιφερειακές συσκευές.   | 110 |
| Σχήμα 4.4. Κάθετη τομή της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης στην οποία απεικονίζονται οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας.   | 112 |
| Σχήμα 4.5. Οι οπές τροφοδοσίας αέρα και περλίτη στον θάλαμο θέρμανσης.  | 113 |
| Σχήμα 4.6. Τα θερμοστοιχεία της καμίνου και το προστατευτικό κέλυφος από mullite (υλικό επένδυσης).   | 114 |
| Σχήμα 4.7. Αποψη του εσωτερικού της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης.   | 115 |
| Σχήμα 4.8. Το σύστημα δόνησης του θαλάμου θέρμανσης.  | 115 |
| Σχήμα 4.9. Η κεφαλή της καμίνου και ο τροφοδότης της πρώτης ύλης.   | 116 |
| Σχήμα 4.10. Πίνακας ελέγχου θερμοκρασίας καμίνου και συστήματος δόνησης (αριστερά) και πίνακας ελέγχου λειτουργίας προθερμαντήρα αέρα, τροφοδότη και αναδευτήρα σιλό τροφοδοσίας (δεξιά).   | 118 |
| Σχήμα 5.1. Υπολογισμός του αριθμού Re εντός του θαλάμου θέρμανσης για διάφορες συνθήκες ρυθμού τροφοδοσίας και θερμοκρασίας αέρα.   | 124 |
| Σχήμα 5.2. Ο όγκος ελέγχου για την διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς της ποσότητας $\varphi$ .  | 128 |
| Σχήμα 5.3. Σχηματική παράσταση που απεικονίζονται (όχι σε κλίμακα): (α) Η τομή της καμίνου διόγκωσης και κάτοψη της κεφαλής του θαλάμου θέρμανσης, (β) Απλοποιημένη γεωμετρία του θαλάμου θέρμανσης και οι επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν τα όρια του συστήματος, (γ) η γεωμετρία εντός της οποίας αναπτύσσεται το υπολογιστικό πλέγμα όπως κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα Design Modeler της πλατφόρμας ANSYS. | 133 |
| Σχήμα 5.4. Η διακριτοποίηση στην εξωτερική επιφάνεια του όγκου ελέγχου. Με διαφορετικό χρώμα αναπαρίστανται οι διαφορετικές οριακές περιοχές.   | 135 |
| Σχήμα 5.5. Το υπολογιστικό πλέγμα στην κεφαλή του θαλάμου.  | 136 |
| Σχήμα 5.6. Το υπολογιστικό πλέγμα στην τομή του όγκου ελέγχου με εστίαση στις περιοχές πύκνωσης του.  | 137 |
| Σχήμα 5.7. Η κατανομή ασυμμετρίας των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος.   | 138 |
| Σχήμα 5.8. Η κατανομή του συντελεστή Cell squish των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος.  | 139 |
| Σχήμα 5.9. Η μεταβολή των βασικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικό κατασκευής του θαλάμου θέρμανσης στο θερμοκρασιακό εύρος ενδιαφέροντος (Kanthal, 2013).  | 141 |
| Σχήμα 5.10. Η διαμόρφωση των υπολοίπων κατά την διάρκεια των υπολογισμών του σεναρίου ISO-100.  | 144 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 5.11. Ισοσταθμικές καμπύλες θερμοκρασίας του αέρα για τα 7 σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν, όπως υπολογίσθηκαν από την προσομοίωση λειτουργίας της καμίνου στο πρόγραμμα Fluent. ....   | 146 |
| Σχήμα 5.12. Ισοσταθμικές καμπύλες ακτινικής θερμοκρασιακής κατανομής του αέρα εντός του θαλάμου σε διαφορετικές αποστάσεις από την κεφαλή της καμίνου. ....   | 148 |
| Σχήμα 5.13. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R = 0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R = 0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τα σενάρια λειτουργίας ISO-50 (A), GRAD-50 (B) και ISO-50-PR (Γ). ....  | 149 |
| Σχήμα 5.14. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R=0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R=0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τα σενάρια ISO-100 (A) και GRAD-100 (B). ....   | 150 |
| Σχήμα 5.15. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R=0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R=0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τις περιπτώσεις ISO-200 (A) και GRAD-200 (B). ....  | 151 |
| Σχήμα 5.16. Το μέτρο και η φορά των διανυσμάτων της ταχύτητας στην κεφαλή του θαλάμου θέρμανσης όπως υπολογίσθηκαν από το Fluent για το σενάριο ISO-200. ....   | 152 |
| Σχήμα 5.17. Ανταλλαγή θερμότητας στο σύστημα αισθητήρας-αέρας-τοίχωμα. ....   | 155 |
| Σχήμα 5.18. Επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο σφάλμα της μέτρησης θερμοκρασίας του αέρα από θερμοστοιχείο εκτεθειμένου αισθητήρα διαμέτρου $D_{tc} = 1.5\text{mm}$ , εκπεμπτικότητας $\varepsilon_{tc} = 0.8$ και για ταχύτητα αέρα $U_{air} = 0.5 \text{ m/s}$ και θερμοκρασία $T_{air} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ , $127 \text{ }^\circ\text{C}$ , $377 \text{ }^\circ\text{C}$ , $627 \text{ }^\circ\text{C}$ , $877 \text{ }^\circ\text{C}$ και $1127 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος συμπίπτει με αυτή υποθετικού, ισοθερμοκρασιακού έγκλειστου χώρου ο οποίος ανταλλάσει ακτινοβολία με το θερμοστοιχείο με ρυθμό ίσο με τον ρυθμό εκπομπής του (Blevins and Pitts, 1999). .... | 157 |
| Σχήμα 5.19. Θερμοστοιχείο με διάτρητη ασπίδα ακτινοβολίας για την εξασφάλιση της ικανοποιητικής επαφής του αέρα με τον αισθητήρα. Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας $-73 \text{ }^\circ\text{C} < T < 315 \text{ }^\circ\text{C}$ , κατασκευάστρια εταιρία: ALLQA Products. ....  | 159 |
| Σχήμα 5.20. Η διάταξη για την πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του από τον θάλαμο διόγκωσης.....  | 160 |
| Σχήμα 5.21. Σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τον θάλαμο διόγκωσης για τα 7 σενάρια λειτουργίας της καμίνου που εξετάστηκαν.....  | 161 |
| Σχήμα 6.1. Κοκκομετρική ανάλυση των αρχικών δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH) και του Τράχηλα (TR). ....   | 168 |
| Σχήμα 6.2: Η κοκκομετρική κατανομή των παραγομένων κλασμάτων που προέκυψαν από κοσκίνιση του αρχικού δείγματος περλίτη Τσιγκράδου (CHI). ....   | 169 |
| Σχήμα 6.3: Η κοκκομετρική κατανομή των παραγομένων κλασμάτων που προέκυψαν από κοσκίνιση του αρχικού δείγματος περλίτη Τράχηλα (TRI). ....  | 169 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 6.4: Ακτινοδιαγράμματα αρχικού δείγματος (CHI) και των παραγόμενων κλασμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδο (CH-F, CH-M, CH-C).....   | 171 |
| Σχήμα 6.5: Ακτινοδιαγράμματα αρχικού δείγματος (TRI) και των παραγόμενων κλασμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F, TR-M, TR-C).....   | 171 |
| Σχήμα 6.6: Διάγραμμα θερμοβαρυτομετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου .....   | 172 |
| Σχήμα 6.7: Διάγραμμα θερμοβαρυτομετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα .....  | 173 |
| Σχήμα 6.8: FT-IR φασματοσκοπίας περλίτη Τσιγκράδου.....   | 174 |
| Σχήμα 6.9: FT-IR φασματοσκοπίας περλίτη Τράχηλα.....  | 174 |
| Σχήμα 6.10: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τσιγκράδου όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή (parallel Nicols)..               | 176 |
| Σχήμα 6.11: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τσιγκράδου όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή και αναλυτή (Crossed Nicols)..... | 176 |
| Σχήμα 6.12: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τράχηλα όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή (parallel Nicols)..                  | 177 |
| Σχήμα 6.13: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τράχηλα όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή και αναλυτή (Crossed Nicols).....    | 177 |
| Σχήμα 6.14: Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) αρχικών δειγμάτων περλίτη: Α δείγμα CH-I, Β δείγμα TR-I.....   | 178 |
| Σχήμα 6.15: Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) των κλασμάτων CH-F (Α), CH-M (Β), CH-C (Γ) .....   | 179 |
| Σχήμα 6.16: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) υαλώδους πυριτικής φάσης σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. ....                                   | 180 |
| Σχήμα 6.17: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) χαλαζία σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. ....  | 180 |
| Σχήμα 6.18: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) βιοτίτη σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. ....  | 180 |
| Σχήμα 6.19: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) πλαγιοκλάστου με έγκλεισμα ιμηνίτη σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. ....                         | 181 |
| Σχήμα 6.20: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) εγκλείσματος ιμηνίτη σε πλαγιόκλαστο σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. ....                       | 181 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 6.21: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) υαλώδους πυριτικής φάσης (ηφαιστειακό γυαλί) σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα. ....   | 182 |
| Σχήμα 6.22: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) χαλαζία σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα. ....  | 182 |
| Σχήμα 6.23: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) βιοτίτης σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα. ....   | 182 |
| Σχήμα 6.24: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) μαγνητίτης σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα. ....   | 183 |
| Σχήμα 6.25. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε νερό συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα Τσιγκράδου που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....                                  | 189 |
| Σχήμα 6.26. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε έλαιο συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα Τσιγκράδου που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....                                 | 190 |
| Σχήμα 6.27. Συσχετισμός απορροφητικής ικανότητας σε νερό και έλαιο των περλιτών του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF). ....   | 191 |
| Σχήμα 6.28. Φαινόμενη πυκνότητα, υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα και αντοχή σε συμπίεση των διογκωμένων δειγμάτων CH που διογκώθηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την έμφλογη συμβατική. ....   | 193 |
| Σχήμα 6.29. Η κατανομή μεγέθους των πόρων τριών διογκωμένων δειγμάτων όπως μετρήθηκε με Ποροσιμετρία Υδραργύρου. ....  | 195 |
| Σχήμα 6.30. Συσχετισμός αντοχής σε συμπίεση και φαινόμενης πυκνότητας περλιτών του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF). ....  | 196 |
| Σχήμα 6.31. Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) αιωρούμενων (shattered) και καταβυθιζόμενων (sinks) σωματιδίων του δείγματος CHM6. ....  | 197 |
| Σχήμα 6.32. Κατά όγκο περιεκτικότητα των διογκωμένων προϊόντων CH σε μη-επαρκώς διογκωμένους κόκκους μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική ( _ VEF) και στην έμφλογη συμβατική κάμινο διόγκωσης ( _ CONV) συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας. .... | 198 |
| Σχήμα 6.33. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου σε σκασμένους/θριμματισμένους κόκκους. ....   | 198 |
| Σχήμα 6.34. Κατά βάρος (επάνω) και κατά όγκο (κάτω) περιεκτικότητα των δειγμάτων CH σε διογκωμένους κόκκους. ....  | 199 |
| Σχήμα 6.35. Η απώλεια σε πύρωση δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν με την συμβατική μέθοδο και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. ....   | 200 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 6.36. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή). .....   | 201 |
| Σχήμα 6.37. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή). Με πράσινη γραμμή παρουσιάζονται τα δείγματα όπου η πρώτη ύλη ήταν το στενό κοκκομετρικό κλάσμα CHM και με κόκκινη το ως έχει αρχικό δείγμα CHI. .... | 202 |
| Σχήμα 6.38. Εικόνα μικροσκοπίου του συμβατικά διογκωμένου δείγματος (CONV-CHM-B) και του δείγματος που διογκώθηκε στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (CHM-13). ....  | 203 |
| Σχήμα 6.39. Μεταβολή της πυκνότητας skeletal των διογκωμένων περλιτών Τσιγκράδου μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και στην συμβατική κάμινο διόγκωσης. ....  | 204 |
| Σχήμα 6.40. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε νερό συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική και τη συμβατική κάμινο. ....  | 209 |
| Σχήμα 6.41. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε έλαιο συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική και τη συμβατική κάμινο. ....   | 209 |
| Σχήμα 6.40. Συσχετισμός απορροφητικής ικανότητας σε νερό και έλαιο των περλιτών του Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....  | 210 |
| Σχήμα 6.41. Φαινόμενη πυκνότητα, υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα και αντοχή σε συμπίεση των διογκωμένων δειγμάτων TR που διογκώθηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την έμφλογη συμβατική. ....   | 213 |
| Σχήμα 6.44. Συσχετισμός αντοχής σε συμπίεση και φαινόμενης πυκνότητας περλιτών του Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF). ....   | 214 |
| Σχήμα 6.45. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα σε μη-επαρκώς διογκωμένους κόκκους μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική (_VEF) και στην έμφλογη συμβατική κάμινο διόγκωσης (_CONV) συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας. ....                               | 215 |
| Σχήμα 6.46. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα σε σκασμένους/θριματισμένους κόκκους. ....   | 216 |
| Σχήμα 6.47. Κατά βάρος (επάνω) και κατά όγκο (κάτω) περιεκτικότητα των δειγμάτων TR σε διογκωμένους κόκκους. ....  | 217 |
| Σχήμα 6.48. Η απώλεια σε πύρωση δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα που διογκώθηκαν με την συμβατική μέθοδο και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. ....  | 218 |
| Σχήμα 6.49. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή). ....   | 219 |
| Σχήμα 6.50. Μεταβολή της πυκνότητας skeletal των διογκωμένων περλιτών Τράχηλα μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και στην συμβατική κάμινο διόγκωσης. ....   | 220 |



- Σχήμα 6.51. Η φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων που παράχθηκαν στηνκάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης ταξινομημένη βάσει της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε. Εντός των ορθογωνίων περιλαμβάνονται το 66% των δειγμάτων με την χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα για τις δύο πρώτες ύλες.....224
- Σχήμα 6.52. Η ύδρο-απορροφητικότητα συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....225
- Σχήμα 6.53. Η αντοχή σε συμπίεση συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....225
- Σχήμα 6.54. Η πυκνότητα skeletal συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....226
- Σχήμα 6.55. Η επίδραση της θερμοκρασιακής κατανομής του θαλάμου διόγκωσης στην τελική φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων CHM. ....228
- Σχήμα 6.56. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου. Παράμετροι: Α ύλη TR-I, Τροφοδοσία 3,  $Q_{air,in} = 0L \cdot min^{-1}$ . ....229
- Σχήμα 6.57.Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων του δείγματος περλίτη CHM στην αρχική του μορφή και μετά από κατεργασία σε διάφορες θερμοκρασίες στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....231
- Σχήμα 6.58. Μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος CHM συναρτήσει του αριθμού των εν λειτουργία θερμικών αντιστάσεων (ζωνών).....232
- Σχήμα 6.59. Η κατανάλωση ενέργειας για την διόγκωση 1 kg περλίτη συναρτήσει των εν λειτουργία θερμικών ζωνών.....233
- Σχήμα 6.60. Συσχετισμός της ισχύς του συστήματος και της φαινόμενης πυκνότητας του διογκωμένου προϊόντος.....234
- Σχήμα 6.61. Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων του δείγματος Τσιγκράδου CHM κατεργασμένου ενώ ήταν σε λειτουργία 2, 4 και 6 ζώνες θέρμανσης της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης σε θερμοκρασία 1100 °C. ....235
- Σχήμα 6.67. Η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα στην φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος. Παράμετροι: Α' ύλη CH-I και CH-T, Τροφοδοσία 3,  $T_w = 700-1200^{\circ}C$ , βήμα  $100^{\circ}C$ .....236
- Σχήμα 6.63. Η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στην φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος. Παράμετροι: Α' ύλη CH-I,  $T_w = 700/1200^{\circ}C$ ,  $Q_{air,in} = 50 L \cdot min^{-1}$ . ....237
- Σχήμα 6.64. Μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας , ύδρο-απορροφητικότητας και αντοχής σε συμπίεση συναρτήσει της κοκκομετρικής κατανομής της πρώτης ύλης. ....238

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 6.70. Εικόνες δευτερευόντων ηλεκτρονίων διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τσιγκράδου που προέκυψαν από κατεργασία πρώτης ύλης διαφορετικής κοκκομετρίας.....  | 239 |
| Σχήμα 7.1. Η μεταβολή της πυκνότητας ( $\rho_{air}$ ) και του δυναμικού ιξώδους ( $\mu_{air}$ ) του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....   | 250 |
| Σχήμα 7.2. Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{air}$ ) και της θερμοχωρητικότητας ( $Cp_{air}$ ) του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....  | 251 |
| Σχήμα 7.3. Μεταβολή του αριθμού Prandtl του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....   | 252 |
| Σχήμα 7.4. Το ιξώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας για περλίτες δύο διαφορετικών χημικών συστάσεων και τεσσάρων διαφορετικών περιεκτικότητων σε νερό όπως υπολογίστηκε με εφαρμογή του μοντέλου των Giordano et al.....                             | 258 |
| Σχήμα 7.5. Μεταβολή της επιφανειακής τάσης οξειδίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (0.5 %) στο θερμοκρασιακό εύρος 1000-1400°C (Murase and McBirney, 1973; Zahringer et al., 2001).<br>.....  | 259 |
| Σχήμα 7.6. Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας άνυδρου περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως υπολογίζεται από την εξίσωση των King et al. ....  | 261 |
| Σχήμα 7.7. Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας (Barnes 1932, Gordon 1934) και η προσαρμοσμένη γραμμική εξίσωση.....  | 261 |
| Σχήμα 7.8. Η θερμοχωρητικότητα του κόκκου συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες περιεκτικότητές του σε νερό, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 7.16. ....  | 262 |
| Σχήμα 7.9. Σχηματική παράσταση των σημαντικότερων μακροσκοπικών φαινομένων που συμβαίνουν στο θάλαμο διόγκωσης και σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος της καμίνου. ....                    | 264 |
| Σχήμα 7.10. Το διαφορικό ισοζύγιο ενέργειας ρεύματος αέρα που κινείται εντός του θαλάμου θέρμανσης της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης. ....   | 267 |
| Σχήμα 7.11. Ο αριθμός <i>Biot</i> για κόκκους διαφόρων διαμέτρων οι οποίοι εισάγονται σε ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 700°για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις σχετικής ταχύτητας $ U_p=U_{air} $ . ....   | 271 |
| Σχήμα 7.12. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου διόγκωσης φυσαλίδας το οποίο περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των πιέσεων, της επιφανειακής τάσης, των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του κελύφους και την μεταβολή του μεγέθους φυσαλίδας και κόκκου. .... | 275 |
| Σχήμα 7.13. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1000 °C και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L ·min <sup>-1</sup> . ....  | 283 |
| Σχήμα 7.14. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1000 °C και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L ·min <sup>-1</sup> . ....   | 284 |
| Σχήμα 7.15. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής θερμότητας από το τοίχωμα στον αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L ·min <sup>-1</sup> .....                         | 284 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 7.16. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....   | 285 |
| Σχήμα 7.17. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....  | 286 |
| Σχήμα 7.18. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....   | 287 |
| Σχήμα 7.19. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....  | 288 |
| Σχήμα 7.20. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....   | 288 |
| Σχήμα 7.21. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος (γκρι διακεκομμένη γραμμή) και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....            | 290 |
| Σχήμα 7.22. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (NTU) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                  | 291 |
| Σχήμα 7.23. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                                | 292 |
| Σχήμα 7.24. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                            | 292 |
| Σχήμα 7.25. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                           | 293 |
| Σχήμα 7.26. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                                  | 293 |
| Σχήμα 7.27. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                                 | 294 |
| Σχήμα 7.28. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min <sup>-1</sup> .....                          | 295 |
| Σχήμα 7.29. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L·min <sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. .... | 296 |

- Σχήμα 7.30. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (NTU) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....297
- Σχήμα 7.31. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....297
- Σχήμα 7.32. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....298
- Σχήμα 7.33. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....299
- Σχήμα 7.34. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....300
- Σχήμα 7.35. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....300
- Σχήμα 7.36. Μεταβολή του δυναμικού ξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C. ....301
- Σχήμα 7.40. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ....304
- Σχήμα 7.41. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ....305
- Σχήμα 7.42. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ....307
- Σχήμα 7.43. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ min}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ....307
- Σχήμα 7.44. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος

- καμίνου,  $T_w=1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . .....309
- Σχήμα 7.45. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..309
- Σχήμα 7.46. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 310
- Σχήμα 7.47. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..311
- Σχήμα 7.48. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . .....313
- Σχήμα 7.49. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . .....313
- Σχήμα 7.50. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . .....314
- Σχήμα 7.51. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ ..... 315
- Σχήμα 7.52. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 316
- Σχήμα 7.53. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .....317

- Σχήμα 7.54. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 318
- Σχήμα 7.55. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 319
- Σχήμα 7.56. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου  $1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $250^\circ\text{C}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 320
- Σχήμα 7.57. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου  $1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $250^\circ\text{C}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 321
- Σχήμα 7.58. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου  $1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $500^\circ\text{C}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 322
- Σχήμα 7.59. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου  $1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $500^\circ\text{C}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . ..... 323
- Σχήμα 7.60. Χρονική μεταβολή των κύριων χαρακτηριστικών τεμαχιδίου Τράχηλα αρχικής διαμέτρου  $350 \mu\text{m}$ , κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $25^\circ\text{C}$  (αριστερή στήλη) και  $400^\circ\text{C}$  (δεξιά στήλη). ..... 327
- Σχήμα 7.61. Χρονική μεταβολή των κύριων χαρακτηριστικών τεμαχιδίου Τσιγκράδου αρχικής διαμέτρου  $350 \mu\text{m}$ , κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $25^\circ\text{C}$  (αριστερή στήλη) και  $400^\circ\text{C}$  (δεξιά στήλη). ..... 328
- Σχήμα 7.62. Ο τελικός βαθμός διόγκωσης τεμαχιδίων περλίτη αρχικής διαμέτρου  $150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$  και περιεκτικότητας σε επιδρών νερό  $1.50, 1.75, 2.00$  και  $2.25\%$  όπως υπολογίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία αέρα κατά την είσοδό του στον θάλαμο  $25^\circ\text{C}$  και  $400^\circ\text{C}$ . ..... 331

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 7.63. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου και του ρυθμού τροφοδοσίας αέρα για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150 $\mu\text{m}$ (Α), 250 $\mu\text{m}$ (Β), 350 $\mu\text{m}$ (Γ) και 450 $\mu\text{m}$ (Δ). .....                   | 333 |
| Σχήμα 7.64. Συνθήκες θερμοκρασίας καμίνου και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη με βαθμός διόγκωσης μεταξύ $E=2$ και $E=4$ από τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450 $\mu\text{m}$ . .....  | 335 |
| Σχήμα 7.65. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου και της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου αέρα για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150 $\mu\text{m}$ (Α), 250 $\mu\text{m}$ (Β), 350 $\mu\text{m}$ (Γ) και 450 $\mu\text{m}$ (Δ). .....     | 336 |
| Σχήμα 7.66. Συνθήκες θερμοκρασίας καμίνου και θερμοκρασίας τροφοδοτούμενου αέρα με ρυθμό παροχής 50 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη με βαθμός διόγκωσης μεταξύ $E=2$ και $E=4$ από τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450 $\mu\text{m}$ . ..... | 338 |
| Σχήμα 7.67. Συσχετισμός του βαθμού διόγκωσης ( $E$ ) με την φαινόμενη πυκνότητα (LBD). .....   | 340 |
| Σχήμα 7.68. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων διόγκωσης περλίτη με τις τελικές τιμές βαθμού διόγκωσης όπως υπολογίσθηκαν από το μαθηματικό μοντέλο για τα αντίστοιχα σενάρια. ....   | 340 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 2.1. Τυπική χημική σύσταση περλιτών διαφορετικής προέλευσης (οξείδια % κατά βάρος).<br>.....   | 63  |
| Πίνακας 2.2. Χημική σύσταση τυπικού δείγματος περλίτη ανά στοιχείο (Perlite Institute, Inc.,<br>2011) και οξείδιο (Chatterjee, 2008).....                  | 63  |
| Πίνακας 2.3. Οι φυσικές ιδιότητες διογκωμένου περλίτη (Perlite Institute, Inc., 2011).....   | 64  |
| Πίνακας 2.4. Σύσταση κατά όγκο υποστρώματος σε καλλιέργεια υδροπονίας (Karalis and<br>Taxiarchou, 2006). .....   | 72  |
| Πίνακας 3.1. Η διάκριση του νερού στον περλίτη κατά Naert (Naert, 1974).....   | 84  |
| Πίνακας 3.2. Κατηγοριοποίηση του νερού στον περλίτη βάσει της θερμοκρασίας απομάκρυνσης<br>του κατά Lehmann και Rossler (Lehmann and Rossler, 1974). ..... | 85  |
| Πίνακας 3.3. Ομαδοποίηση των ειδών του νερού κατά Roulia et al. (Roulia et al., 2006). .....   | 85  |
| Πίνακας 3.4. Θερμοκρασιακά διαστήματα διόγκωσης περλίτη που συναντώνται στην βιβλιογραφία<br>.....   | 88  |
| Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των αεροσυμπιεστών .....   | 107 |
| Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των ροόμετρων και μανόμετρου.....  | 108 |
| Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των θερμικών αντιστάσεων του θαλάμου διόγκωσης<br>(Kanthal, 2012) .....  | 111 |
| Πίνακας 4.4. Εύρος τιμών και ευαισθησία ρύθμισης παροχής πρώτης ύλης .....   | 117 |
| Πίνακας 5.1. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου k-ε (Lauder and Spalding, 1972). .....   | 127 |
| Πίνακας 5.2. Οι οριακές συνθήκες του συστήματος και ο ορισμός των χαρακτηριστικών τους<br>μεγεθών. ....  | 134 |
| Πίνακας 5.3. Οι εξισώσεις υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα συναρτήσει της<br>θερμοκρασίας. ....   | 140 |
| Πίνακας 5.4. Οι τύποι και οι τιμές των οριακών συνθηκών για τα επτά σενάρια που<br>παρουσιάζονται. ....  | 142 |
| Πίνακας 5.5. Προτεινόμενες και τελικές τιμές υπολοίπων κατά τη λήξη των υπολογισμών για τα<br>εφτά σενάρια που παρουσιάζονται. ....                        | 144 |
| Πίνακας 5.6. Έλεγχος διασφάλισης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.....  | 145 |
| Πίνακας 5.7. Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων CFD .....   | 161 |
| Πίνακας 6.1. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα διόγκωσης .....   | 165 |



|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 6.2: Χημικές αναλύσεις περλιτών από το ορυχεία του Τσιγκράδου (CH-I) και του Τράχηλα (TR-I) και των αντιστοιχών παραγόμενων κλασμάτων τους. ....   | 166 |
| Πίνακας 6.3: Η περιεκτικότητα των αρχικών δειγμάτων σε C και S. ....   | 166 |
| Πίνακας 6.4. Οι φυσικές ιδιότητες των πρώτων υλών.....   | 167 |
| Πίνακας 6.5: Ποσοστιαία κατανομή διαμέτρου κόκκων αρχικών δειγμάτων περλίτη .....  | 168 |
| Πίνακας 6.6: Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων κατά βάρος. ....  | 170 |
| Πίνακας 6.7. Παράμετροι των πειραμάτων διόγκωσης στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....  | 184 |
| Πίνακας 6.8: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-I στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....  | 184 |
| Πίνακας 6.9: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-F στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....  | 185 |
| Πίνακας 6.10: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-M στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 185 |
| Πίνακας 6.11: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-C στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 185 |
| Πίνακας 6.12: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-I στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 186 |
| Πίνακας 6.13: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-F στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 186 |
| Πίνακας 6.14: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-M στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 186 |
| Πίνακας 6.15: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-C στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο .....   | 187 |
| Πίνακας 6.16. Αποτελέσματα μετρήσεων Ποροσιμετρίας Υδραργύρου για δείγμα συμβατικά διογκωμένου περλίτη (Conv-CHMB) και για δυο δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.....  | 195 |
| Πίνακας 6.21. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας και της απορροφητικής ικανότητας δείγματος μετά από απομάκρυνση των σπασμένων/θρυμματισμένων και αδιόγκωτων τεμαχιδίων. ....  | 205 |
| Πίνακας 6.22. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων διογκωμένων περλιτών CH.....  | 206 |
| Πίνακας 6.23. Συγκεντρωτικό διάγραμμα των κυρίων ιδιοτήτων των δειγμάτων TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο (% μεταβολή τιμής), σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα παρόμοιας φαινόμενης πυκνότητας (έντονα γράμματα)..... | 221 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 6.24. Η θερμοκρασία των ζωνών της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου κατά την διόγκωση του κλάσματος +150-212 $\mu$ m περλίτη Τσιγκράδου. ....   | 228 |
| Πίνακας 6.25: Κατανομή θερμοκρασίας της καμίνου συναρτήσει του αριθμού των αντιστάσεων θέρμανσης σε λειτουργία .....   | 232 |
| Πίνακας 7.1. Οι τιμές των σταθερών των εξισώσεων 7.3 και 7.4 υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας. ....   | 251 |
| Πίνακας 7.2. Χημική σύσταση των περλιτικών δειγμάτων του Τράχηλα και του Τσιγκράδου. ....  | 253 |
| Πίνακας 7.3. Οι τιμές των συντελεστών υπολογισμού των παραμέτρων X και Y( $J=-4.55\pm 0.21^a$ ) συναρτήσει της σύστασης του τήγματος σε οξειδία (mol%) (Giordano, 2008). ....  | 256 |
| Πίνακας 7.4. Οι τιμές των συντελεστών J, X και Y όπως υπολογίσθηκαν από τις εξισώσεις 7.7 και 7.8. για περλίτη που προέρχεται από το ορυχείο του Τράχηλα (TR) και του Τσιγκράδου (CH) για διάφορες περιεκτικότητες σε νερό. .... | 257 |
| Πίνακας 7.5. Τα αποτελέσματα ολικής κανονικής εκπεμπτικότητας ε αδιόγκωτων και διογκωμένων δειγμάτων. ....   | 259 |
| Πίνακας 7.6. Εξισώσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης για διάφορες συνθήκες ροής. ....   | 269 |
| Πίνακας 7.7. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ( $z=2.70m$ ) όπως υπολογίσθηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας του και τον προθερμαντήρα εκτός λειτουργίας. ....   | 302 |
| Πίνακας 7.8. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ( $z=2.70m$ ) όπως υπολογίσθηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διαφορετικές θερμοκρασίες εισερχόμενου αέρα. ....   | 302 |
| Πίνακας 7.9. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων. ....   | 306 |
| Πίνακας 7.10. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων. ....  | 314 |
| Πίνακας 7.12. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων. ....  | 323 |
| Πίνακας I.1: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού δείγματος περλίτη Τσιγκράδο (CH-I). ....   | 364 |
| Πίνακας I.2: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού δείγματος περλίτη Τράχηλα (TR-I). ....   | 364 |
| Πίνακας I.3: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-F .....  | 365 |
| Πίνακας I.4: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-M .....  | 365 |
| Πίνακας I.5: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-C .....  | 366 |
| Πίνακας I.6: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-F. ....  | 366 |
| Πίνακας I.7: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-M. ....  | 367 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας I.8.: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-C .....   | 367 |
| Πίνακας III.1. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-I) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....              | 373 |
| Πίνακας III.2. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-F) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....          | 374 |
| Πίνακας III.3. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος μέσης κοκκομετρίας περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....   | 374 |
| Πίνακας III.4. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-C) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....         | 375 |
| Πίνακας III.5. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-I) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....                 | 376 |
| Πίνακας III.6. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....             | 377 |
| Πίνακας III.7. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος μέσης κοκκομετρίας περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-M) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....      | 377 |
| Πίνακας III.8. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-C) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. ....            | 377 |
| Πίνακας III.9. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-I) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....             | 378 |
| Πίνακας III.10. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....        | 378 |
| Πίνακας III.11. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος περλίτη μέσης κοκκομετρίας από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. .... | 378 |
| Πίνακας III.12. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-C) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....           | 379 |

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας III.13. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-I) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....  | 379 |
| Πίνακας III.14. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....  | 379 |
| Πίνακας III.15. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία δείγματος περλίτη μέσης κοκκομετρίας από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....   | 380 |
| Πίνακας III.16. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-C) στην έμφλογη συμβατική κάμινο. ....   | 380 |
| Πίνακας III.17. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.  | 381 |
| Πίνακας III.18. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. ....  | 382 |
| Πίνακας III.19. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου στην συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης. ....  | 382 |
| Πίνακας III.20. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα στην συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης. .  | 383 |
| Πίνακας V1. Εξισώσεις συσχέτισμού φαινόμενης πυκνότητας και υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητας και αντοχής σε συμπίεση για περλίτες από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδο που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική και τη συμβατική κάμινο διόγκωσης. .... | 391 |

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο διογκωμένος περλίτης αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα φυσικά μονωτικά υλικά με μεγάλο εύρος χρήσεων και εφαρμογών. Τις θερμομονωτικές και ηχομονωτικές του ιδιότητες συμπληρώνει η σημαντικά χαμηλή του πυκνότητα που στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι μικρότερη των  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Ο συνδυασμός των βασικών αυτών ιδιοτήτων, καθιστά τον περλίτη ένα από τα πλέον εμπορικά ελαφροβαρέα υλικά. Οι ιδιότητες που παρουσιάζει το υλικό οφείλονται αποκλειστικά στο ξεχωριστό χαρακτηριστικό του περλίτη να διογκώνεται όταν θερμαίνεται σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος για δεδομένο χρόνο. Η ποιότητα του διογκωμένου προϊόντος εξαρτάται από το θερμοκρασιακό προφίλ που βιώνει ο κόκκος κατά την διάρκεια της διόγκωσης του καθώς επίσης και από τον χρόνο θέρμανσης του. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διογκωμένου περλίτη έχουν ιδιαίτερη σημασία για τις εφαρμογές στις οποίες θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια.

Στη βιομηχανία, η διόγκωση του περλίτη λαμβάνει χώρα συνήθως σε κάθετες έμφλογες καμίνους διόγκωσης και σπανιότερα σε οριζόντιες. Οι συμβατικές αυτές μέθοδοι διόγκωσης είναι ημι-εμπειρικές και αποτελούν τις κυρίαρχες τεχνικές διόγκωσης που εφαρμόζονται στην βιομηχανία τα τελευταία 60 χρόνια, από τότε δηλαδή που ξεκίνησε η συστηματική παραγωγή διογκωμένου περλίτη. Στα σημαντικά μειονεκτήματα της διόγκωσης του περλίτη με τις συμβατικές μεθόδους συγκαταλέγονται η εισαγωγή του περλίτη απευθείας σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας και το θερμικό σοκ στο οποίο υποβάλλεται το υλικό, η αδυναμία διόγκωσης λεπτόκοκκου υλικού λόγω του άμεσου συμπαρασύρσου του αμέσως μετά την εισαγωγή του στον θάλαμο διόγκωσης και οι σημαντικές απώλειες του συστήματος με την μορφή αισθητής θερμότητας στα καπναέρια. Επιπλέον, η ύπαρξη της φλόγας εισάγει αστάθεια στο πεδίο ροής εντός του θαλάμου διόγκωσης που καθιστά την πρόβλεψη του θερμοκρασιακού προφίλ που βιώνει ο κόκκος και τη ρύθμιση του χρόνου παραμονής του εντός του θαλάμου διόγκωσης, ιδιαίτερα δύσκολη.

Τα μειονεκτήματα της συμβατικής μεθόδου διόγκωσης επιδρούν και στα χαρακτηριστικά των διογκωμένων περλιτών που προκύπτουν μετά από κατεργασία με την μέθοδο αυτή. Τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα χαρακτηρίζονται από έντονα αφρώδη δομή με ανεπτυγμένο δίκτυο πόρων στο εσωτερικό τους και ανοιχτό πορώδες στην εξωτερική τους επιφάνεια. Λόγω της ιδιότητας αυτής η απορροφητική ικανότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων σε ρευστά όπως έλαιο και νερό είναι αυξημένη. Στην βιομηχανία χρωμάτων αλλά και σε άλλες εφαρμογές που ο περλίτης χρησιμοποιείται ως πληρωτικό χώρου επιθυμείται η χρήση

υλικών με ελάχιστη απορροφητική ικανότητα και φαινόμενη πυκνότητα. Επιπλέον, η ακαριαία διόγκωση που οφείλεται στην ανεξέλεγκτη θέρμανση του τεμαχιδίου, φαίνεται να επιδρά στην εσωτερική δομή των διογκωμένων τεμαχιδίων με αποτέλεσμα την μειωμένη τους μηχανική αντοχή. Είναι σαφής η ανάγκη εκσυγχρονισμού της συμβατικής μεθόδου διόγκωσης ή εξολοκλήρου αντικατάσταση της από μια άλλη μέθοδο, απαλλαγμένη από τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν ούτως ώστε να βελτιωθεί η οικονομικότητα και παραγωγικότητα της υπάρχουσας συμβατικής μεθόδου, να επεκταθεί η δυνατότητα διόγκωσης και σε πιο λεπτόκοκκες πρώτες ύλες, να βελτιωθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διογκωμένων περλιτών και να καταστεί δυνατή η παραγωγή νέων προϊόντων που θα ανοίξουν τον δρόμο στην χρήση του περλίτη σε νέες εφαρμογές. Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος για τον οποίο η ανάγκη αυτή είναι επιτακτική αποτελεί το γεγονός ότι η Ελλάδα αποτελεί τα τελευταία 10 χρόνια την χώρα με τη σταθερά μεγαλύτερη εξαγωγική δύναμη σε αδιόγκωτο περλίτη παγκοσμίως.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη μια εξολοκλήρου νέας μεθόδου διόγκωσης περλίτη με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με την συμβατική και η οποία εστίασε στην παραγωγή λεπτομερών μικροσφαιριδίων διογκωμένου περλίτη με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Για τον σκοπό αυτό η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα διόγκωσης έχει κοκκομετρία μικρότερη των 400  $\mu\text{m}$ . Η νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Πυρομεταλλουργίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου επιτρέπει την λεπτομερή διαμόρφωση των συνθηκών κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα η διόγκωση του περλίτη μέσω των παραμέτρων λειτουργίας της. Λόγω της δυσκολίας στην πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης και σκοπεύοντας τόσο στην διερεύνηση των συνθηκών υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα η διόγκωση όσο και στον προσδιορισμό της επίδρασης των επί μέρους παραμέτρων λειτουργίας της, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση της λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής κάμινος διόγκωσης με την μέθοδο CFD που έδειξε την διαμόρφωση σαφών θερμοκρασιακών ζωνών εντός του θαλάμου διόγκωσης και την έντονη επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκαν ομαλότερες συνθήκες θέρμανσης και διόγκωσης στους κόκκους του περλίτη. Η αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων που προέκυψαν από διόγκωση στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας σημαντικό αριθμό ιδιοτήτων τους με τις ιδιότητες δειγμάτων που διογκώθηκαν σε συμβατική έμφλογη κάμινο πιλοτικών επίσης διαστάσεων. Η σύγκριση έδειξε ότι τα νέα προϊόντα χαρακτηρίζονται από σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες που αφορούν στην μηχανική τους αντοχή και την απορροφητική τους ικανότητα και καθίσταται ιδανικά για την χρησιμοποίησή τους σε νέες εφαρμογές. Επιπλέον,

μελετήθηκε η επίδραση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης και των παραμέτρων λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης. Εκτός των πειραματικών μελετών, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της διόγκωσης κόκκου περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωση. Το μοντέλο αυτό προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης των σημαντικών καταστατικών χαρακτηριστικών και θερμοφυσικών ιδιοτήτων του τεμαχιδίου, χωρικά και χρονικά, λαμβάνοντας υπόψη τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης και τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου διόγκωσης.

Η διάρθρωση της διδακτορικής έχει ως εξής:

Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται το αντικείμενο, ο σκοπός και η συμβολή της διδακτορικής διατριβής στο αντικείμενο της έρευνας και δίνονται στοιχεία της βασικής δομής της.

Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Εδώ γίνεται μια γενική περιγραφή των χημικών, ορυκτολογικών και πετρολογικών ιδιοτήτων του περλίτη. Επιπλέον, περιγράφονται οι συνθήκες γένεσης των περλιτικών κοιτασμάτων και τα είδη τους. Στην συνέχεια δίνονται στοιχεία παραγωγής περλίτη εντός Ελλάδας και παγκοσμίως, και τέλος γίνεται εκτενής αναφορά των εφαρμογών και χρήσεων του αδιόγκωτου και διογκωμένου περλίτη.

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται εμβάθυνση στον μηχανισμό που διέπει το φαινόμενο της διόγκωσης του περλίτη και παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τον προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων που επιδρούν στην εξέλιξη του φαινομένου. Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά στις επικρατούσες τεχνικές διόγκωσης του περλίτη σε βιομηχανικό επίπεδο και τέλος αναλύονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και οι επιπτώσεις τους στα διογκωμένα προϊόντα..

Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Παρουσιάζεται η νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης, δίνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας και τεχνικές λεπτομέρειες των περιφερειακών συσκευών που συνθέτουν την νέα κάμινο διόγκωσης.

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αριθμητική προσομοίωση της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την μελέτη των προφίλ θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης σε επτά επιλεγμένα σενάρια ρεαλιστικών συνθήκες λειτουργίας της καμίνου.

Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το αμιγώς πειραματικό κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζονται όλα τα πειράματα διόγκωσης περλίτη τα οποία διεξήχθησαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Αρχικά πραγματοποιείται χαρακτηρισμός ιδιοτήτων των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα διόγκωσης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διογκωμένα προϊόντα, περιγράφονται οι συνθήκες διόγκωσης τους στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης και οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων τους. Αρχικά μελετάται και προσδιορίζεται ο συσχετισμός μεταξύ των βασικών ιδιοτήτων των προϊόντων με την κεντρική τους ιδιότητα που είναι η φαινόμενη πυκνότητα. Στην συνέχεια συγκρίνονται τα προϊόντα που προέκυψαν από κατεργασία με τις δύο μεθόδους διόγκωσης. Ακολουθεί η μελέτη επίδρασης της προέλευσης της πρώτης ύλης από το ορυχείο του Τσιγκράδου και του Τράχηλα της νήσου Μήλου στη διόγκωση μέσω σύγκρισης των ιδιοτήτων διογκωμένων προϊόντων. Τέλος, παρουσιάζεται εκτενής μελέτη της επίδρασης των βασικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών (χημική σύσταση, κοκκομετρία) αλλά και των παραμέτρων λειτουργίας της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου στα χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων.

Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Στο τελευταίο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε σκοπεύοντας στην προσομοίωση της διόγκωσης ενός τεμαχιδίου περλίτη εντός του θαλάμου. Αρχικά παρουσιάζεται μελέτη των χαρακτηριστικών του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης, και στη συνέχεια μελετάται η μεταβολή των βασικών καταστατικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Διενεργείται επίσης μελέτη επίδρασης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του κόκκου και των συνθηκών λειτουργίας της καμίνου διόγκωσης στον τελικό βαθμό διόγκωσης του περλίτη και τέλος διερευνάται η δυνατότητα κατεργασίας κλασμάτων ευρείας αρχικής κοκκομετρίας εντός της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης.

Τα σημαντικότερα σημεία στα οποία εντοπίζεται η συμβολή της διδακτορικής διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται μια εξολοκλήρου νέα μέθοδος διόγκωσης περλίτη, η οποία στοχεύει στον ακριβή έλεγχο και ρύθμιση των συνθηκών κάτω από τις οποίες η διόγκωση λαμβάνει χώρα με απώτερο στόχο την εξασφάλιση ηπιότερων συνθηκών διόγκωσης και την παραγωγή μικροσφαιριδίων διογκωμένου περλίτη με βελτιωμένες ιδιότητες. Ο σχεδιασμός της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης πραγματοποιήθηκε βάσει της Μεθόδου Έμμεσης θέρμανσης (Indirect Heating Technology).



- Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου CFD για την προσομοίωση των κυρίων χαρακτηριστικών του αέρα προσέφερε σημαντικές πληροφορίες που σχετίζονται με τις ιδιότητες του πεδίου ροής συναρτήσει των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος και οι οποίες πειραματικά ήταν αδύνατον να προσδιοριστούν. Η μέθοδος έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και ενδείκνυται η εφαρμογή της σε μεταλλουργικές καμίνους όπου οι συνθήκες που επικρατούν είναι ακραίες, η μέτρηση τους δύσκολη και η εξέλιξη των φαινομένων γρήγορη.
- Για πρώτη φορά παρουσιάζεται μελέτη που περιλαμβάνει χαρακτηρισμό των διογκωμένων περλιτών σε μεγάλο αριθμό ιδιοτήτων, που καθορίζουν τις εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Μελετώνται και παρουσιάζονται οι διαφορές των διογκωμένων προϊόντων που προέκυψαν από κατεργασία της ίδιας πρώτης ύλης στις δύο καμίνους διόγκωσης, οι διαφορές προϊόντων που διογκώθηκαν στην ίδια κάμινο αλλά με πρώτη ύλη διαφορετικής προέλευσης καθώς επίσης και η επίδραση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης και των συνθηκών λειτουργίας του θαλάμου διόγκωσης στις ιδιότητες του διογκωμένου προϊόντος. Επιπλέον, δίνονται μαθηματικοί συσχετισμοί των ιδιοτήτων των διογκωμένων δειγμάτων συναρτήσει της κεντρικής ιδιότητας των διογκωμένων περλιτών που είναι η φαινόμενη πυκνότητα για περλίτες που διογκώνονται συμβατικά αλλά και για δείγματα που προήλθαν από κατεργασία στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.
- Επετεύχθη η παραγωγή λεπτομερών τεμαχιδίων διογκωμένου περλίτη τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες συγκριτικά με τους συμβατικά διογκωμένους περλίτες. Ειδικά η αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση παρουσιάζεται βελτιωμένη σε ποσοστό που στην ακραία περίπτωση ξεπέρασε το 500 % ενώ παρουσιάζουν κοκκομετρική ομοιογένεια και σε αρκετές περιπτώσεις μειωμένη απορροφητική ικανότητα σε νερό και έλαιο. Στα δείγματα που κατεργάστηκαν στη κάθετη ηλεκτρική κάμινο επικρατεί το σφαιρικό σχήμα κόκκων, η κοκκομετρική ομοιογένεια και το περιορισμένο επιφανειακό πορώδες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>. Ο ΠΕΡΛΙΤΗΣ

### 2.1. Ο περλίτης: πέτρωμα και βιομηχανικό ορυκτό

Ο περλίτης, λόγω του τρόπου σχηματισμού του και των φυσικών του ιδιοτήτων, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως πέτρωμα και βιομηχανικό ορυκτό, και έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας από πολύ νωρίς. Οι πρώτες αναφορές στον περλίτη ως πέτρωμα γίνονται από φυσιοδίφες, γεωλόγους και επιστήμονες σχετικών επιστημονικών πεδίων που

μελετούσαν τον τρόπο γένεσης και τη στρωματογραφική δομή κοιτασμάτων που σχηματίστηκαν ως αποτέλεσμα ηφαιστειακής δραστηριότητας και περιέχουν υάλους. Η ανακάλυψη της ιδιότητας του περλίτη να διογκώνεται από 4 έως 20 φορές του αρχικού του αρχικό του όγκο, όταν θερμαίνεται απότομα σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, καθώς και η ανάδειξη των σημαντικών θερμομονωτικών ιδιοτήτων που αποκτά μετά από τη διόγκωση, τον κατέστησαν κατάλληλο για ένα πλήθος εφαρμογών, εντάσσοντάς τον παράλληλα στην κατηγορία των βιομηχανικών ορυκτών. Ακολούθησε η συστηματική έρευνα και εκμετάλλευση των περλιτικών κοιτασμάτων εμπορικού περλίτη, μελέτες σχετικές με το

μηχανισμό που διέπει το φαινόμενο της διόγκωσης και η ανάπτυξη τεχνικών διόγκωσης σε βιομηχανική κλίμακα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι παρότι ο εμπορικός περλίτης χαρακτηρίζεται ως βιομηχανικό ορυκτό, είναι πέτρωμα το οποίο αποτελείται από διάφορα ορυκτά. Εξάλλου, ο όρος «βιομηχανικό ορυκτό» είναι καθαρά οικονομικός και χαρακτηρίζει όλα εκείνα τα πετρώματα, ορυκτά ή οποιαδήποτε φυσικώς δημιουργούμενα υλικά τα οποία έχουν εμπορική αξία, εξαιρουμένων των μεταλλικών ορυκτών, των ορυκτών καυσίμων και των πολύτιμων λίθων (Noetstaller, 1988; Περράκη 2007).

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αποσαφηνιστεί η διάκριση μεταξύ του περλίτη ως πέτρωμα και του εμπορικού περλίτη. Τα χημικά, πετρολογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του εμπορικού περλίτη είναι ίδια με αυτά που ορίζουν τον περλίτη ως πέτρωμα. Όμως, απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να χαρακτηριστεί ένας περλίτης εμπορικός αποτελεί η ικανότητά του να διογκώνεται σε ικανοποιητικό βαθμό, ώστε να προκύψει το ελαφροβαρές υλικό με τις σημαντικές μονωτικές ιδιότητες.

Οι αναφορές στον περλίτη ως βιομηχανικό ορυκτό («εμπορικός» περλίτης) είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του να διογκώνεται όταν θερμαίνεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μερικοί από τους ορισμούς του περλίτη που συναντώνται στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται παρακάτω:

Ο Barnes αναφέρει ότι: «εμπορικά, με τον όρο περλίτη χαρακτηρίζονται οι φυσικές όξινες ύαλοι ηφαιστειακής προέλευσης που διογκώνονται όταν θερμαίνονται υπό κατάλληλες συνθήκες» (Barnes, 1962).

Ο Naert αναφέρει ότι: «ως περλίτης μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε ηφαιστειακής προέλευσης ύαλος, η οποία μετά από θέρμανση διογκώνεται τουλάχιστον 10 φορές χωρίς την ταυτόχρονη παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών ή αδιόγκωτων σωματιδίων» (Naert, 1974).

Σχετικά με την ονομασία του, ο Evans, αναφέρει ότι: «ο όρος *perlstein* (περλίτης) δόθηκε από γερμανούς γεωλόγους του 19<sup>ο</sup> αιώνα σε ρυολιθικά υαλώδη πετρώματα που περιείχαν στο εσωτερικό τους πολυάριθμες ρωγμές και τα οποία μετά από θρυμματισμό μοιάζουν με μαργαριτάρια ακανόνιστων σχημάτων» ...και συνεχίζει λέγοντας ότι « η σημαντική ιδιότητα του περλίτη έγκειται στο ότι είναι ένυδρο πέτρωμα, το οποίο περιέχει νερό σε περιεκτικότητα 2-5% και όταν θερμαίνεται απότομα σε θερμοκρασία που πλησιάζει το σημείο τήξης του, το περιεχόμενο νερό μετατρέπεται σε ατμό και το πέτρωμα φουσκώνει και γίνεται λευκό με εκτενές δίκτυο κυψελών στο εσωτερικό του. Τελικά, ο όγκος του πετρώματος αυξάνει κατά 10-20 φορές και παράγεται ένα υλικό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μεγάλη θερμική αντίσταση (heat resistance) και σημαντικές ηχομονωτικές ιδιότητες » (Evans, 1993). Ο Evans λοιπόν στον ορισμό του περλίτη συμπεριλαμβάνει το φαινόμενο της διόγκωσης, άλλα και τις σημαντικές ιδιότητες που προκύπτουν από την ιδιαίτερη δομή που αποκτά το πέτρωμα μετά τη θερμική του κατεργασία.

Η πρώτη αναφορά στον όρο «perlstein» γίνεται από τον Fichtel για να περιγράψει ένα υαλώδες ηφαιστειακό πέτρωμα με μαργαριταρένια λάμψη (Fichtel, 1791). Ο χαρακτηρισμός αυτός υιοθετήθηκε στην συνέχεια και από τον Esmark (Esmark, 1798). Ο Beudant εισήγαγε τον όρο «perlite» σαν συνώνυμο του όρου «perlstein» το έτος 1822 (Beudant, 1822). Ο Judd ήταν ο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο της διόγκωσης όλων των ηφαιστειακών υάλων όταν αυτές θερμαίνονται σε κατάλληλη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, για μικρά κομμάτια οψιδιανού αναφέρει ότι: « όταν η θερμοκρασία τους φτάσει αυτή της ερυθροπύρωσης, η μάζα του υλικού φουσκώνει ομοιάζοντας τελικά με κουνουπίδι, ενώ ο όγκος του αυξάνει 8 έως 10 φορές » (Judd, 1886).

Οι Harben και Kuzvart σε ελεύθερη μετάφραση αναφέρουν ότι: «ο περλίτης χρησιμοποιείται σε πληθώρα κρατών για προστασία από τα δριμέα καιρικά φαινόμενα, λόγω της αφρώδους δομής που αποκτά μετά από θέρμανση και βρίσκει ευρεία εφαρμογή ως αδρανές υλικό στις κατασκευές» (Harben and Kuzvart, 1996).

Ιστορικά, το χαρακτηριστικό κάποιων πετρωμάτων να διογκώνονται όταν θερμαίνονται, κέντρισε το ενδιαφέρον του ανθρώπου από πολύ παλιά. Η πρώτη γραπτή καταγραφή του φαινομένου τοποθετείται πριν από 2300 χρόνια περίπου. Σε κείμενο του 3<sup>ου</sup> αιώνα π.χ. ο Θεόφραστος αναφέρει:

«... πετρώματα προερχόμενα από τη νήσο Lipari (Λιπάρα) αποκτούν πορώδες όταν θερμαίνονται, και τελικά γίνονται σαν την ελαφρόπετρα με έντονη αλλαγή τόσο στο χρώμα όσο και στην πυκνότητά τους, χάνοντας το μαύρο χρώμα και τη μαλακή και συμπαγή μορφή που είχαν αρχικά».

Οι Caley και Richards οι οποίοι παρουσίασαν μετάφραση του αρχαίου κειμένου αλλά και ο Shackley υποστηρίζουν ότι ο Θεόφραστος αναφέρεται σε μικρά κομμάτια οξειδίου τα οποία και περιέχονται στα κοιτάσματα κίσηρης που βρίσκονται στη βορειοανατολική πλευρά της νήσου Lipari (Λιπάρα) που ανήκει στα Αιολικά νησιά (Eolean group), ένα σύμπλεγμα ηφαιστειακών νήσων που τοποθετούνται βόρεια της Σικελίας στην Ιταλία (Caley and Richards, 1956; Shackley, 1988). Ο Robertson υποστηρίζει ότι ο Θεόφραστος αναφερόταν στον πισσόλιθο, απορρίπτοντας τον οξειδιανό, αφού το νερό που περιέχεται σε αυτό δεν είναι αρκετό για να προκαλέσει έντονη διόγκωση (Robertson, 1963). Επίσης, ο Θεόφραστος αναφέρεται σε πέτρωμα με μαλακή υφή, η οποία αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του πισσόλιθου, σε αντίθεση με τον οξειδιανό που είναι σκληρός και τραχύς.

Πιο πρόσφατες αναφορές του Senergin το 1801 και του Klaproth το 1816 αναφέρουν την ικανότητα διόγκωσης του μαρεκανίτη, πέτρωμα το οποίο πήρε το όνομά του από τον ποταμό Marekanka της Σιβηρίας, όπου παρατηρήθηκε για πρώτη φορά (Senergin, 1801; Klaproth, 1812).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιοι ορισμοί που συναντώνται στη βιβλιογραφία και οι οποίοι προσεγγίζουν τον περλίτη από πετρολογική σκοπιά:

Κατά τον Johansen ο περλίτης είναι «υαλώδης ρυόλιθος που λάμπει όπως το μαργαριτάρι και παρουσιάζει στο εσωτερικό του ομόκεντρες ρωγμές όπως το κρεμμύδι» (Johannsen, 1939).

Ο Naert δίνει τον παρακάτω ορισμό για τον περλίτη: «Από πετρολογικής απόψεως, ο περλίτης ορίζεται ως η ηφαιστειακή ύαλος ρυολιθικής έως δακτιτικής σύστασης που περιέχει 2 έως 5% δεσμευμένο νερό, έχει μορφή κρεμμυδιού και λάμψη μαργαριταριού» (Naert, 1974).

Συνοψίζοντας, και βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που παρουσιάστηκε, φαίνεται ότι το πέτρωμα του περλίτη αναγνωρίζεται από την υαλώδη του δομή, έχει λάμψη μαργαριταριού, ενώ στο εσωτερικό του χαρακτηρίζεται από ομόκεντρη ή τοξοειδή ρηγμάτωση. Η ρωγμάτωση του συναντάται σε μικροσκοπικό κυρίως επίπεδο. Ο περλίτης υπάγεται στην κατηγορία των ηφαιστειακών υάλων ρυολιθικής έως δακτιτικής σύστασης με έντονη παρουσία πυριτίου, ενώ η περιεκτικότητά του σε δεσμευμένο νερό ποικίλλει από 2 έως 5, 6 ή και 8%. Επιπλέον, έχει λάμψη μαργαριταριού, ενώ η στρωμάτωση που παρατηρείται παρομοιάζεται συχνά με αυτή του κρεμμυδιού. Ο εμπορικός περλίτης παρουσιάζει τα ίδια πετρολογικά χαρακτηριστικά με αυτά του πετρώματος, αυξάνει όμως τον όγκο του πάνω από 10 φορές όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία που υπερβαίνει το σημείο μαλάκυνσης του γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για χρήση σε πληθώρα εφαρμογών.

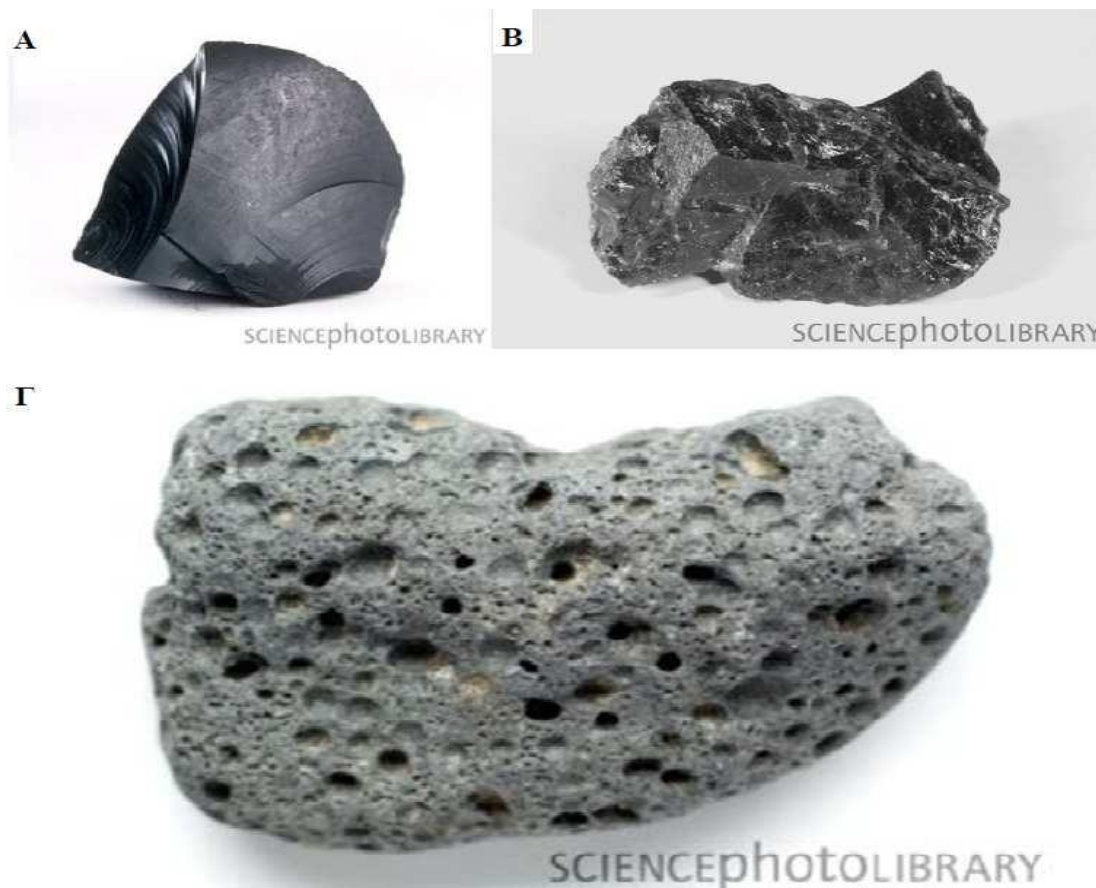
## **2.2. Πετρολογικά χαρακτηριστικά του περλίτη και γένεση περλιτικών κοιτασμάτων**

Ο περλίτης ανήκει στην κατηγορία των φυσικών ηφαιστειακών υάλων ρυολιθικής έως δακτιτικής χημικής σύστασης που περιέχουν νερό. Στην ίδια κατηγορία υπάγονται ο οψιδιανός, ο πισσόλιθος και η ενυδατωμένη ηφαιστειακή τέφρα, αλλιώς κίσηρη ή ελαφρόπετρα. Κύριο κριτήριο διάκρισης μεταξύ των τεσσάρων αυτών πετρωμάτων αποτελεί η περιεκτικότητά τους σε νερό αλλά και η δομή τους.

Η κίσηρη, γνωστή με την κοινή ονομασία «ελαφρόπετρα», έχει περιεκτικότητα σε νερό μικρότερη του 1%, δημιουργείται κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις και συγκαταλέγεται στα πυροκλαστικά υλικά αφού συχνά εκτοξεύεται από τον ηφαιστειακό κώνο ή αποτίθεται στις πυροκλαστικές ροές. Έχει κυψελοειδή μορφή, η οποία και δημιουργείται λόγω της έντονης διαφυγής ατμού και πτητικών αερίων από την τηγμένη λάβα κατά τη φάση στερεοποίησής της και το χρώμα της ποικίλλει από λευκό έως ανοιχτό γκρι. Η ταχεία ψύξη του μάγματος προσδίδει στα παραπάνω πετρώματα τη χαρακτηριστική μη κρυσταλλική τους δομή (υαλώδης)(Chang, 2002)

Όσον αφορά τον πισσόλιθο, η Διεθνής Ένωση Γεωλογικών Επιστημών δίνει τον παρακάτω ορισμό: «ο πισσόλιθος είναι ηφαιστειακή ύαλος με στιλπνότητα όμοια με της πίσσας. Συχνά στο εσωτερικό του απαντώνται φαινοκρύσταλλοι αστρίων ή αυγίτη, ενώ η περιεκτικότητά του σε νερό είναι 4-10%» (Le Maitre, 2002).

Ο οψιδιανός που αποτελεί πρόδρομο πέτρωμα του περλίτη, έχει περιεκτικότητα σε νερό που δεν ξεπερνάει το 2%. Είναι και αυτός μη κρυσταλλικό υλικό, πλούσιος σε πυρίτιο, ενώ το νερό που περιέχει είναι μαγματικό, αποτελούσε δηλαδή συστατικό του μάγματος πριν από τη στερεοποίησή του και εγκλωβίστηκε στη μάζα του πετρώματος κατά την ψύξη και στερεοποίηση του και συνδέεται με το πλέγμα πυριτίου μέσω ομάδων Si-OH, τις επονομαζόμενες σιλανόλες.



Σχήμα 2.1. Φωτογραφίες οψιδιανού (Α), πισσόλιθου (Β) και κίσηρη (Γ).

Ο περλίτης θεωρείται ότι δημιουργείται από την δευτερογενή ενυδάτωση του οψιδιανού, διεργασία η οποία ονομάζεται και «περλιτίωση» (perlitization). Συνοπτικά, η διεργασία περιγράφεται ως εξής:

Σε βάθος χρόνου, νερό που βρίσκεται στον περιβάλλοντα χώρο του κοιτάσματος προσροφάται, μέσω του μηχανισμού της διάχυσης, στον πυριτικό υαλώδη ιστό του οψιδιανού εμπλουτίζοντας τον και αυξάνοντας την περιεκτικότητά του σε νερό, η οποία όπως αναφέρθηκε και πριν, αρχικά δεν ξεπερνούσε το 1% κ.β. Το νερό αυτό μπορεί να είναι μετεωρικού ή άλλων τύπων, όπως νερό που προέρχεται από θερμές πηγές, νερό φρεάτων, κοιλοτήτων υπεδάφους κ.α. Είναι επίσης πιθανό ότι στη μάζα του υλικού ενσωματώνεται μαγματικό νερό που ήταν έγκλειστο σε γειτονικές μικροκοιλότητες και πόρους. Η διεργασία της ενυδάτωσης του οψιδιανού δεν είναι μόνο μηχανική, αλλά ευνοείται από τα αλκάλια (Na, K) που αποτελούν μέρος των συστατικών του και τα οποία έχουν την τάση να αντιδρούν με το νερό σχηματίζοντας υδροξείδια (Chamberlin and Barker, 1996). Η εξέλιξη του φαινομένου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το βαθμό διείσδυσης του νερού στο πλέγμα του οψιδιανού αλλά και με την θερμοκρασία διατήρησής του.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της δομής του περλίτη αποτελεί το δίκτυο ρωγμών που παρατηρείται σε μικροσκοπικό κυρίως επίπεδο. Η δημιουργία των χαρακτηριστικών ρωγμών σχετίζεται με την ενυδάτωση του πετρώματος, ενώ οι επικρατούσες θεωρίες για το σχηματισμό τους είναι δύο:

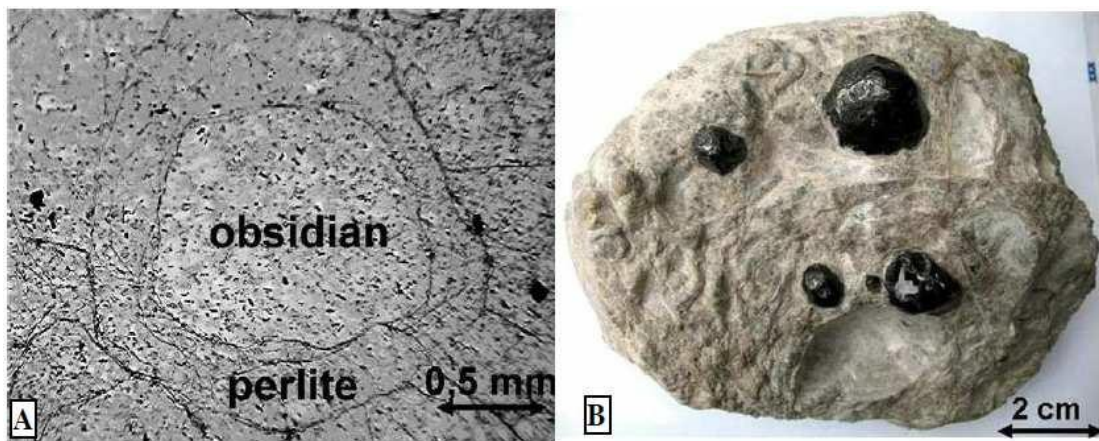
1) Σύμφωνα με τον Marshall οι ρωγμές δημιουργούνται λόγω της ταχείας ψύξης του μάγματος (Marshall, 1961). Λαμβάνοντας ως δεδομένο το γεγονός ότι η ενυδάτωση του οψιδιανού για το σχηματισμό περλίτη πραγματοποιείται μέσω της διάχυσης μορίων νερού στη μάζα της μητρικής ηφαιστειακής υάλου (οψιδιανός), ο Marshall μελέτησε λεπτές τομές από δείγματα περλίτη σε οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση X500 και μέτρησε το βάθος στο οποίο είχε διεισδύσει το νερό κατά τη δευτερογενή ενυδάτωση. Η δευτερογενώς ενυδατωμένη μάζα διακρίνεται λόγω της διαφοράς χρώματος που παρουσιάζει σε σύγκριση με τα σημεία που δεν έχει φτάσει το νερό. Γνωρίζοντας την ηλικία του πετρώματος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η δευτερογενής ενυδάτωση του οψιδιανού για το σχηματισμό περλίτη είναι πολύ μικρή. Παραστατικά αναφέρει ότι: «η διάχυση του νερού μέσα στην ύαλο είναι τόσο αργή που οι πεπερασμένες διαστάσεις των δειγμάτων είναι απέραντες σε σχέση με το μήκος εισχώρησης του νερού σε δεδομένο χρόνο». Τελικά, καταλήγει στη θεωρία κατά την οποία η περλιτική δομή με τις χαρακτηριστικές ρωγμές είναι αποτέλεσμα της ταχείας ψύξης του μάγματος κατά την στερεοποίησή του. Στη συνέχεια, το μετεωρικό νερό εισχωρεί στο δίκτυο ρωγμών και από εκεί διαχέεται στο εσωτερικό της ηφαιστειακής υάλου με μικρή ταχύτητα, εμπλουτίζοντας τελικά τη μάζα του οψιδιανού σε νερό και μετατρέποντάς τον σε περλίτη.

2) Αντίθετα, οι Friedman et al. υποστηρίζουν ότι η ένταξη νερού στο πυριτικό πλέγμα μέσω του μηχανισμού της διάχυσης (ενυδάτωση) προκαλεί αύξηση του όγκου της ενυδατωμένης στιβάδας και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο εσωτερικό προκαλούν τη δημιουργία ρωγματώσεων (Friedman et al., 1966). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές δίνουν την παρακάτω, ευρέως διαδεδομένη και κοινώς αποδεκτή εξήγηση για την ενυδάτωση του οψιδιανού και την δημιουργία του περλίτη:

Αρχικά, νερό διαχέεται στη μάζα του οψιδιανού και σε χρονικό διάστημα 40000 ετών η στιβάδα ενυδάτωσης αποκτά πάχος 20 μm. Στη στιβάδα αυτή αρχίζουν να αναπτύσσονται τάσεις λόγω της συσσώρευσης της μάζας του νερού στην ύαλο. Η συσσώρευση τάσεων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμής στο μέτωπο της ενυδάτωσης χωρίζοντας το ενυδατωμένο πέτρωμα από το μητρικό. Στη συνέχεια, νερό αρχίζει και διαχέεται μέσω της νέας ρωγμής στο εσωτερικό του μητρικού πετρώματος κ.ο.κ. Τελικά, σε χρονικό διάστημα 200000 ετών έχουν δημιουργηθεί 5 στρώσεις ενυδάτωσης πάχους 20 μm η κάθε μία. Οι ερευνητές σημειώνουν ότι σε περίπτωση που η διεργασία λάμβανε χώρα σε θερμοκρασία 100 °C, οι 5 στιβάδες θα είχαν δημιουργηθεί σε 250 χρόνια λόγω της εξάρτισης του συντελεστή διάχυσης από την θερμοκρασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρότι η θεωρία των Friedman et al. αποτελεί την επικρατούσα για την ενυδάτωση του οψιδιανού, η δημιουργία ρωγμών κατά την ταχεία ψύξη του μάγματος αποτελεί φαινόμενο το οποίο πράγματι μπορεί να συμβεί από την απότομη ψύξη του μάγματος. Οι ρωγμές όμως αυτές έχουν ακαθόριστη διεύθυνση και δεν θυμίζουν σε τίποτα την κυκλική και τοξοειδή διάταξη της περλιτικής δομής που περιγράφηκε παραπάνω, ενώ επιπλέον η ύπαρξη των ρωγμών αυτών δεν αποτελεί προϋπόθεση για να δημιουργηθεί περλίτης.





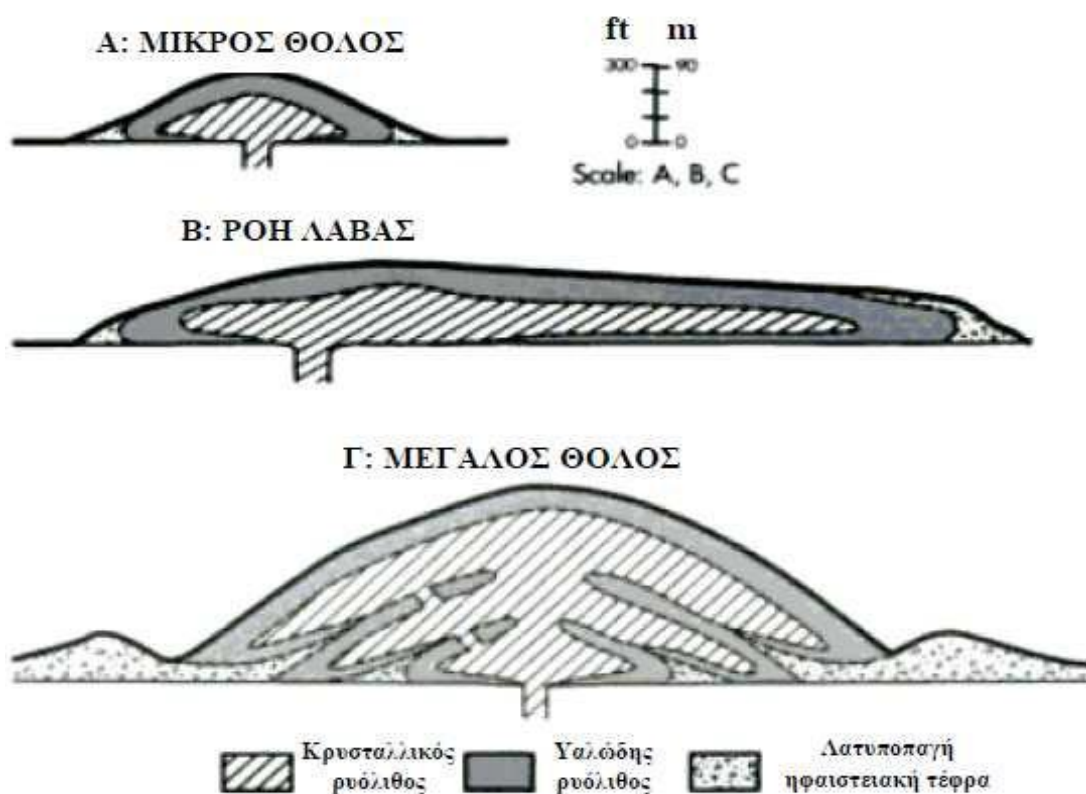
Σχήμα 2.2. Συνύπαρξη περλίτη και οψιδιανού σε δύο κλίμακες. Α) Τομή στην οποία παρουσιάζεται η μετατροπή οψιδιανού σε περλίτη (περλιτοποίηση) και οι χαρακτηριστικές ομόκεντρες ρωγματώσεις της περλιτικής δομής σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, Buyuk Yayla, Turkey, Β) Εγκλείσματα όζων οψιδιανού σε περλιτική μήτρα, Utah, USA. Η κοινή ονομασία των όζων οψιδιανού είναι «Δάκρυ των Απάτσι» (Heide and Heide, 2011).

Οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής έχουν ιδιαίτερη επίδραση στο βαθμό της δευτερογενούς ενυδάτωσης του οψιδιανού. Περιοχές με ημίξηρο κλίμα φαίνεται να είναι ιδανικές, από την άποψη ότι τα καιρικά φαινόμενα δεν είναι έντονα και η υγρασία του εδάφους διατηρείται σταθερή όλο το χρόνο, προσφέροντας συνθήκες συνεχούς ενυδάτωσης του υποστρώματος και, κατ' επέκταση, του υποκείμενου υαλώδους στρώματος. Τα τροπικά κλίματα με τα έντονα καιρικά φαινόμενα και τις κλιματολογικές εναλλαγές ευνοούν την εδαφική χημική διάβρωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη διάλυση του υαλώδους ιστού (αφυάλωση) (Lorenz and Muller, 1982).

Τα υπάρχοντα κοιτάσματα περλίτη σπάνια είναι παλαιότερα του Ολιγόκαινου (33 εκ. χρόνια), γιατί παρουσιάζουν την τάση να αφυαλώνονται με το χρόνο, δημιουργώντας μικροκρυστάλλους χαλαζία και αστρίων και είναι ευαίσθητα σε υδροθερμικές μεταβολές από όπου προκύπτουν αργιλικά ορυκτά και ζεόλιθοι, ιδιαίτερα σμεκτίτες και κλινοπτιλόλιθοι (Allen, 1992; Breese and Barker, 1994; Weber and Austin, 1982). Τα κοιτάσματα του περλίτη θεωρείται ότι δημιουργήθηκαν την Τριτογενή γεωλογική περίοδο από ηφαιστειακή αρχική ως μέσης Τεταρτογενούς γεωλογικής περιόδου (Harben and Kuzvart, 1996).

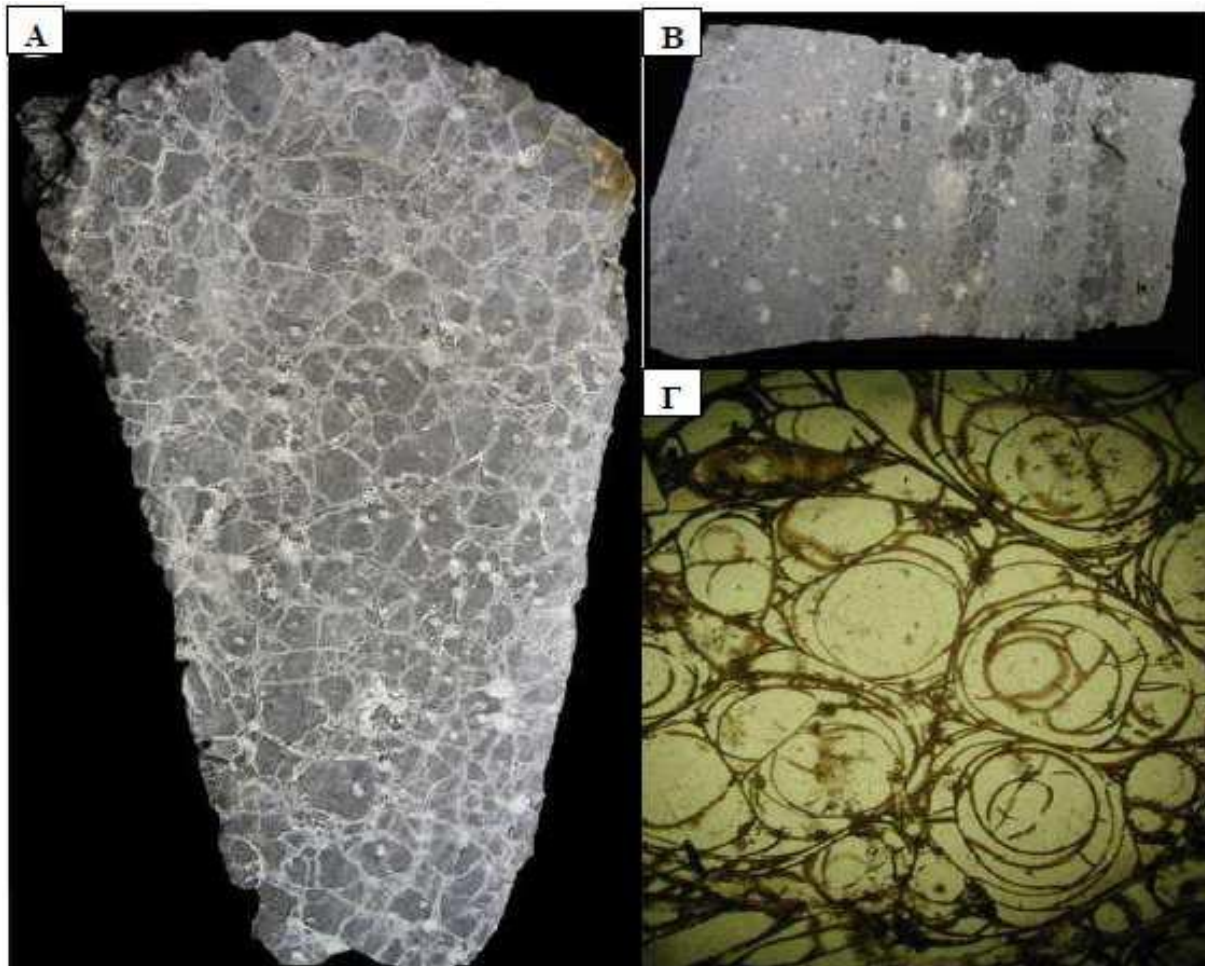
Κοιτάσματα περλίτη απαντώνται συνήθως σε ηφαιστειακούς κώνους και στις παράπλευρες περιοχές π.χ. ροές λάβας και φλέβες που τις τροφοδοτούν (Εικόνα 2.3). Ιδανική περίπτωση σχηματισμού κοιτάσματος περλίτη αποτελεί το διαπερατό (παρουσία δικτύου πόρων) άνω τμήμα κοιτασμάτων που προέκυψαν από ροές λάβας πυριτικής σύστασης (Εικόνα 2.3B). Τα κοιτάσματα των ηφαιστειακών θόλων απαντώνται πιο συχνά και συνήθως είναι πιο εκτενή σε σύγκριση με τα κοιτάσματα που σχετίζονται με τις ροές της λάβας, όμως αποφέρουν τελικά

μικρότερες ποσότητες προϊόντος, λόγω της παρουσίας έντονης εναλλαγής στρωμάτων με άλλα υλικά που «μολύνουν» το κοίτασμα. Συγκεκριμένα, οι μεγάλοι θερμοί όγκοι παρουσιάζουν ανομοιομορφία στην ψύξη τους σε σημεία του εσωτερικού τους που μπορεί να εγκλωβιστεί η θερμότητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας αλληλουχίας ρυολιθικών (κρυσταλλικών) και μη-κρυσταλλικών πετρωμάτων στο εσωτερικό τους (Εικόνα 2Γ) (Chamberlin and Barker, 1996; Austin and Barker, 1994).



Σχήμα 2.3. Γραφική απεικόνιση μικρού θόλου (Α), ροής λάβας (Β) και μεγάλου θόλου (C) που αποτελούν σημεία μεγάλης πιθανότητας εμφάνισης περλιτικών κοιτασμάτων (Chamberlin and Barker, 1996). Η αλληλουχία των στρωμάτων στην περίπτωση του μεγάλου θόλου (Γ) δυσχεραίνει την εξόρυξη του περλίτη σε σύγκριση με τα συμπαγή και ομοιόμορφα στρώματα των μικρών θόλων και των ροών λάβας (Α και Β).

Τα χαρακτηριστικά της δομής του πετρώματος σχετίζονται με τις συνθήκες γένεσης και στερεοποίησης του κοιτάσματος. Τα κοιτάσματα θόλων παρουσιάζουν ομοιομορφία στη σύστασή τους και το δίκτυο ρηγματώσεων είναι ισοκατανεμημένο στη μάζα του πετρώματος (Σχήμα 2.4.A). Οι ρωγμές αυτές προέκυψαν από την ταχεία ψύξη του μάγματος. Στην περίπτωση κοιτάσματος εντός ροής λάβας είναι εμφανείς οι ροϊκές γραμμές και η εναλλαγή στρώσεων κάθετα στη φορά της ροής (Σχήμα 2.4.B).



Σχήμα 2.4. Τομή πετρωμάτων περλίτη με σαφή διαφορά στην δομή λόγω διαφορετικών συνθηκών κατά την στερεοποίηση τους: Α) στερεοποίηση σε θόλο με έντονη ανάπτυξη ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά την απότομη ψύξη του πετρώματος και την αύξηση του όγκου του κατά την προσρόφηση νερού (Erickson et al., 2011). Β) στερεοποίηση σε ροή λάβας με εμφανή στρωμάτωση και παρουσία εγκλεισμάτων (Erickson et al., 2011). Γ) Δίκτυο περλιτικών ομόκεντρων και τοξοτών ρωγμών, όπως απεικονίζονται σε πολωτικό μικροσκόπιο. Πραγματικό μήκος 1.8 χιλ. (Rotella and Simandl, 2001).

Οι Austin και Barker προτείνουν ότι ο χαρακτηρισμός ενός πετρώματος ως περλίτης, από την άποψη υφής και μορφολογίας, πρέπει να επεκταθεί έτσι ώστε να συμπεριλάβει πετρώματα με λιγότερο πυκνή δομή – κισσηρώδη και κοκκώδη- που γενετικά σχετίζονται με τον περλίτη χωρίς όμως να παρουσιάζουν τα βασικά μακροσκοπικά του χαρακτηριστικά (ρωγμές και λάμψη).

Κατά τους Austin και Barker λοιπόν οι τρεις τύποι περλίτη είναι (Austin and Barker, 1994):

*Κλασικός περλίτης:* ανεπτυγμένη περλιτική δομή με ρωγμές και λάμψη σαν του μαργαριταριού έως και ρητίνης. Αποτελεί τον πυκνότερο από τους τρεις τύπους περλίτη που περιγράφονται στην παρούσα μελέτη, ενώ στο εσωτερικό τους διακρίνεται δίκτυο κυστών οι οποίες όμως είναι διαρρηγμένες. Συχνά στο εσωτερικό του περιέχει οζίδια ή λεπτά φύλλα (σε μορφή φλούδας) οψιδιανού.

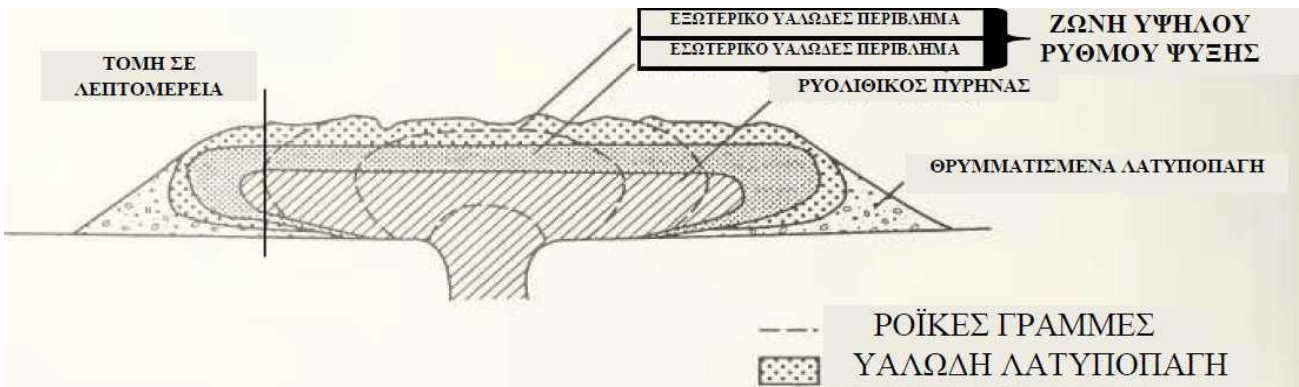
*Κισσηρώδης (shardy- θραυσμένος) περλίτης:* συναντάται συνήθως στα όρια του κοιτάσματος και χαρακτηρίζεται από αφρώδη δομή, παρουσία ανοιχτού πορώδους με μικρή αντοχή σε συμπίεση. Όταν περιέχει οψιδιανό, αυτός συναντάται ως πυρήνας περιβαλλόμενος από ένα στρώμα περλίτη στα σημεία συμβολής των τοιχωμάτων του υλικού, σε μικροσκοπική πολλές φορές κλίμακα. Η ευθραυστότητα που τον χαρακτηρίζει διευκολύνει κατά πολύ την εξόρυξή του.

*Κοκκώδης περλίτης:* εμφανισιακά θυμίζει ζάχαρη, ενώ παρουσιάζει ρευστικές δομές. Οι θραυσμένες φυσαλίδες που παρατηρούνται στο εσωτερικό του προσδίδουν στο υλικό περισσότερο μεταξένια παρά μαργαριταρένια λάμψη. Σπάνια στο εσωτερικό του υλικού συναντώνται ομόκεντρες ρωγμές και εγκλείσματα οψιδιανού. Τα μεγαλύτερα τεμαχίδια απαιτούν θραύση. Τα κοιτάσματα περλίτη της νήσου Μήλου είναι αυτού του τύπου.

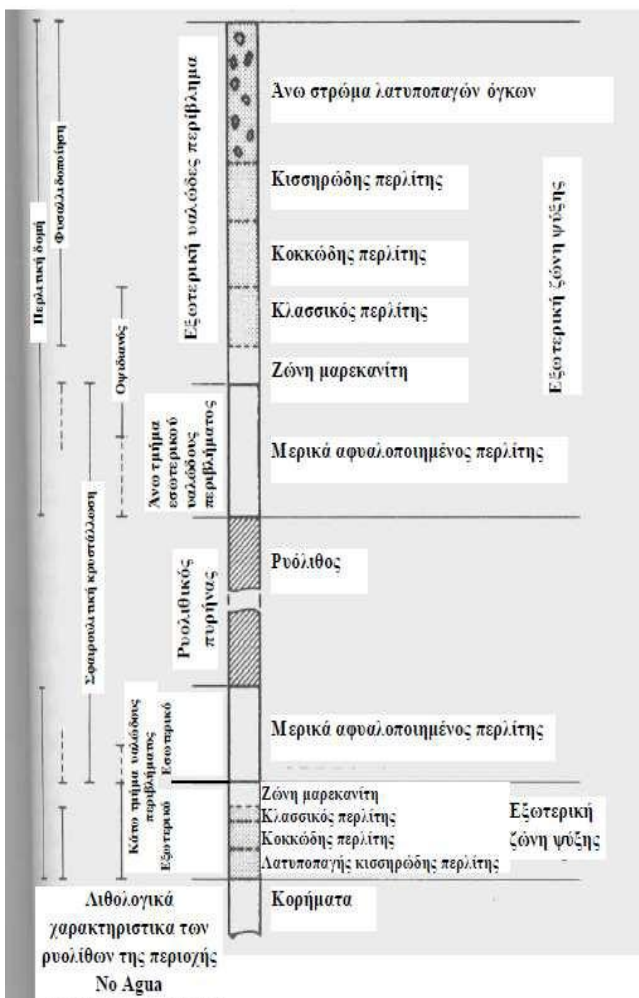
Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι τυπικές ζώνες που συναντώνται σε ηφαιστειακούς θόλους και οι παρακείμενες ροές της λάβας κατά τον Whitson (Whitson, 1982). Η ζώνωση συναντάται και στα κοιτάσματα περλίτη της τοποθεσίας No Agua της πολιτείας του Νέου Μεξικό των Η.Π.Α. και αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα περλιτικού κοιτάσματος που προέκυψε από ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Το κοιτάσμα αποτελείται από ένα εξωτερικό στρώμα υαλώδους υφής, ενώ στο εσωτερικό του συναντώνται ένα μερικώς αφυαλωμένο στρώμα και ο πυρήνα που είναι ρυολιθικής σύστασης

με σημαντικό ποσοστό κρυστάλλωσης. Αιτία δημιουργίας της προαναφερθείσας ομόκεντρης ζώνωσης φαίνεται να αποτελεί η μεγάλη ταχύτητα ψύξης των εξωτερικών στρωμάτων και η πιο αργή ψύξη της μάζας που βρίσκεται στο εσωτερικό, συνθήκη που ευνοεί την κρυστάλλωση κατά τη στερεοποίηση του μάγματος.



Σχήμα 2.5. Εξιδανικευμένη τομή ρυολιθικού θόλου (Whitson, 1982).



Σχήμα 2.6. Η στρωματογραφία που συναντάται στους ρυολιθικούς θόλους της περιοχής No Agua, New Mexico, USA κατά τον Whitson (τομή σε λεπτομέρεια Εικ.5). Η περίπτωση αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα περλιτικών κοιτασμάτων σε ηφαιστειακούς θόλους (Whitson, 1982).

Ο υαλώδης εξωτερικός μανδύας μπορεί να έχει πάχος δεκάδων μέτρων και είναι κατά κύριο λόγο κισσηρώδης, ενώ συχνά απαντώνται εγκλείσματα οψιδιανού. Προχωρώντας προς το εσωτερικό, ο εξωτερικός υαλώδης μανδύας αποδυναμώνεται και η υαλώδης φάση αντικαθίσταται από κισσηρώδεις, κοκκώδεις και κλασσικές περλιτικές μορφές (διάκριση Austin-Barker). Στη βάση του εξωτερικού περλιτικού μανδύα και κάτω από το στρώμα που συνήθως απαντάται ο εμπορικός περλίτης, η ενυδάτωση του οψιδιανού και η μετατροπή του σε περλίτη, είναι υπό εξέλιξη και εκεί τοποθετείται η ζώνη του μαρεκανίτη στην οποία εγκλείονται όζοι του προϋπάρχοντος οψιδιανού. Οι όζοι αυτοί μπορεί να είναι μεμονωμένοι και διεσπαρμένοι ή να δημιουργούν συμπλέγματα ποικίλων διαστάσεων. Η ζώνη αυτή εκτείνεται στο κάτω τμήμα της εσωτερικής υαλώδους ζώνης, ενώ στη συνέχεια συναντάται ο κρυσταλλικός ρυολιθικός πυρήνας.

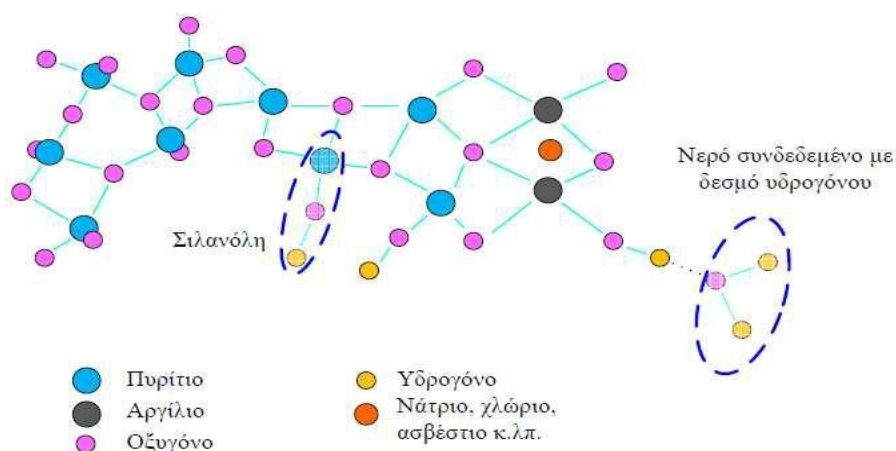
Για την δημιουργία περλιτικών κοιτασμάτων απαιτείται μια αλληλουχία γεωλογικών γεγονότων τα οποία περιλαμβάνουν:

1. έντονη τεκτονική δραστηριότητα
2. Ανύψωση πυριτικού μάγματος και δημιουργία ηφαιστείου
3. Εξώθηση στην ατμόσφαιρα ρυολιθικού μάγματος πλούσιου σε πυρίτιο
4. Έντονη ανάπτυξη φυσαλίδων και ρωγματώσεων και αφυδάτωση της λάβας
5. Ταχεία ψύξη του εξωτερικού στρώματος της λάβας και σχηματισμός υάλου.

Οι διεργασίες αυτές προσδίδουν σταδιακά στο κοίτασμα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, ενώ η διατάραξη σε μία από αυτές μπορεί να επιφέρει οριστικές μεταβολές στη δομή του κοιτάσματος.

### 2.3. Χημική σύσταση και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του περλίτη

Η δομή του πλέγματος του περλίτη μοιάζει με εκείνη του χαλαζία που αποτελείται από τετράεδρα Si συνδεδεμένα μεταξύ τους με άτομα οξυγόνου όπως αναπαριστά το Σχήμα 2.7. Όπως συμβαίνει και στα άμορφα πυριτικά γυαλιά, ο περλίτης μακροσκοπικά στερείται αυστηρής διάταξης και διατήρησης των αποστάσεων των ατόμων. Σε τοπικό όμως επίπεδο, παρατηρείται η διάταξη του χαλαζία στην οποία ένα άτομο πυριτίου περιβάλλεται από τέσσερα άτομα οξυγόνου. Είναι δυνατόν, ένα άτομο οξυγόνου να συνδέει δύο άτομα πυριτίου, μπορεί όμως να συνδέεται και με ένα άτομο υδρογόνου σχηματίζοντας έτσι μία ρίζα υδροξυλίου.



Σχήμα 2.7. Σχηματική αναπαράσταση της δομής περλίτη.

Σε ένα ποσοστό, τα άτομα πυριτίου αντικαθίστανται από άτομα αργιλίου, όμως, λόγω του ότι το πυρίτιο είναι τετρασθενές ενώ το αργίλιο είναι τρισθενές, το αρνητικό φορτίο αντισταθμίζεται από θετικά ιόντα κυρίως Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> κ.λπ.

Ο περλίτης, όντας πέτρωμα δεν έχει ακριβή χημική σύσταση, και η χημική του σύσταση διαφέρει από κοίτασμα σε κοίτασμα, εντός συγκεκριμένων ορίων. Στον Πίνακα 2.1. παρουσιάζεται η χημική σύσταση περλιτών που προέρχονται από 5 διαφορετικά κοιτάσματα, όπου φαίνεται και η διαφορά στην περιεκτικότητά τους σε διάφορα οξείδια.

Πίνακας 2.1. Τυπική χημική σύσταση περλιτών διαφορετικής προέλευσης (οξείδια % κατά βάρος).

|                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | CaO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | LOI |
|----------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------|------------------|-----|
| <b>Ελλάδα</b>  | 74.5             | 12.5                           | 0.1              | 0.8                            | 0.2 | 1.0 | 3.7               | 4.4              | 2.9 |
| <b>Τουρκία</b> | 72.4             | 13                             | 0.1              | 0.9                            | 0.1 | 0.9 | 2.6               | 5.0              | 4.7 |
| <b>Η.Π.Α</b>   | 73.9             | 12.4                           | 0.1              | 0.4                            | 0.0 | 0.5 | 5.1               | 4.5              | 3.2 |
| <b>Ιταλία</b>  | 71.1             | 13.8                           | 0.4              | 1.5                            | 0.4 | 1.0 | 3.2               | 5.6              | 2.9 |
| <b>Κίνα</b>    | 73.2             | 12.3                           | 0.1              | 0.5                            | 0.0 | 0.7 | 3.4               | 5.0              | 4.8 |

Το Ινστιτούτο περλίτη<sup>1</sup> παρουσιάζει στο διαδικτυακό του τόπο στοιχεία σχετικά με τη μέση χημική σύσταση του εμπορικού περλίτη καθώς και τις φυσικές ιδιότητες του διογκωμένου περλίτη (Πίνακας 2.2. και 2.3.) (Chatterjee, 2008).

Πίνακας 2.2. Χημική σύσταση τυπικού δείγματος περλίτη ανά στοιχείο (Perlite Institute, Inc., 2011) και οξείδιο (Chatterjee, 2008).

| Χημικό στοιχείο   | Περιεκτικότητα<br>(% w/w) | Οξείδιο                        | Περιεκτικότητα<br>(%w/w) |
|-------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Πυρίτιο (Si)      | 33.8                      | SiO <sub>2</sub>               | 70-75                    |
| Αργίλιο (Al)      | 7.2                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12-15                    |
| Κάλιο (K)         | 3.5                       | K <sub>2</sub> O               | 3-5                      |
| Νάτριο (Na)       | 3.4                       | Na <sub>2</sub> O              | 3-4                      |
| Σίδηρος (Fe)      | 0.6                       | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5-2.0                  |
| Ασβέστιο (Ca)     | 0.6                       | CaO                            | 0.5-1.5                  |
| Μαγνήσιο (Mg)     | 0.2                       | MgO                            | 0.2-0.7                  |
| Ιχνοστοιχεία      | 0.2                       | H <sub>2</sub> O               | 3-5                      |
| Οξυγόνο (O)       | 47.5                      |                                |                          |
| Νερό (δεσμευμένο) | 3                         |                                |                          |
| Σύνολο            | 100                       |                                |                          |

<sup>1</sup> Ο παλαιότερος Διεθνής Οργανισμός Εμπορίου Περλίτη με έτος ίδρυσης το 1948 και έδρα την πόλη Χάρισμπουργκ της πολιτείας Πενσυλβάνια στην Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

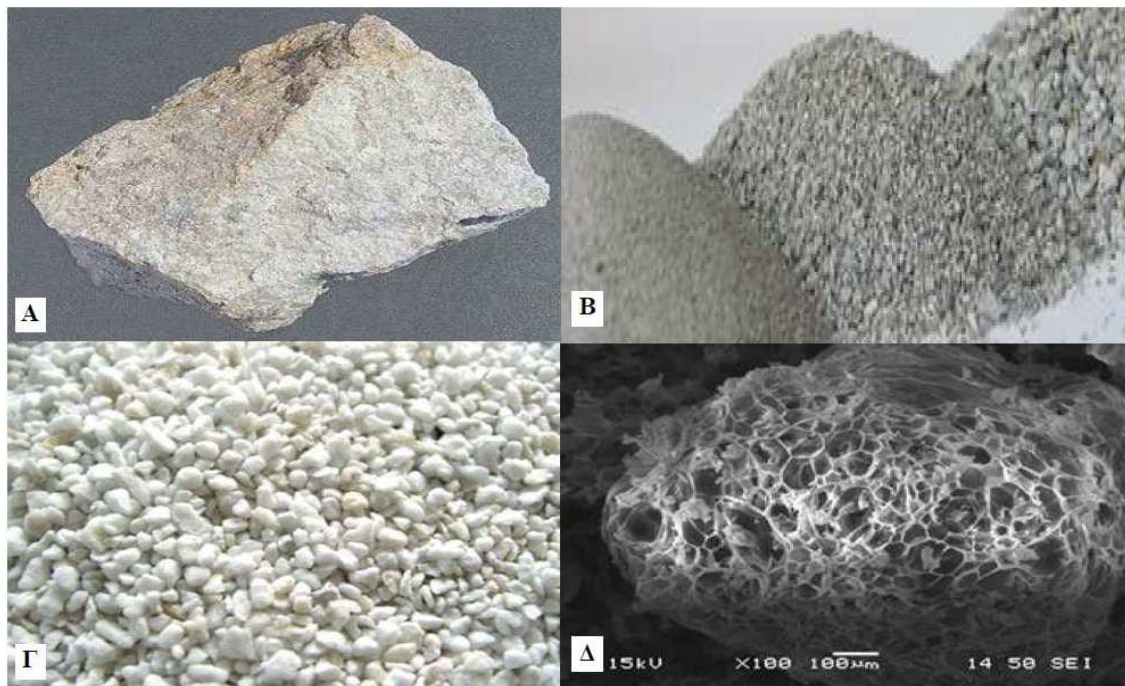
Η διόγκωση του περλίτη αποτελεί ουσιαστικά μια διαδικασία πύρωσης και αφυδάτωσης του πετρώματος, ενώ εκτός από την απώλεια σε νερό που παρατηρείται κατά την εξέλιξή της, η χημική σύσταση του πετρώματος δεν μεταβάλλεται καθόλου. Είναι λοιπόν σαφές ότι η χημική σύσταση του διογκωμένου περλίτη συμπίπτει με αυτή του αδιόγκωτου με μόνη διαφορά τη μικρότερη περιεκτικότητά του σε νερό.

Πίνακας 2.3. Οι φυσικές ιδιότητες διογκωμένου περλίτη (Perlite Institute, Inc., 2011).

| Ιδιότητα               | Μονάδα μέτρησης                                 | Τιμή                                   |
|------------------------|---|--|
| Χρώμα                  | -   | Λευκό                                  |
| Δείκτης διάθλασης      | -   | 1.5                                    |
| Ελεύθερη υγρασία (max) | % (κ.β.)  | 0.5                                    |
| pH (υδατικό μίγμα)     | -   | 6.5-8.0                                |
| Ειδικό βάρος           | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$                   | 2.2-2.4                                |
| Φαινόμενη πυκνότητα    | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$                   | (επιθυμητή) συνήθως 32-400             |
| Κοκκομετρία            | mesh  | (επιθυμητή) συνήθως 4-8 (2.38-4.76 mm) |
| Θερμοκρασία μαλάκυνσης | $^{\circ}\text{C}$                              | 871-1093                               |
| Σημείο τήξης           | $^{\circ}\text{C}$                              | 1260-1343                              |
| Θερμοχωρητικότητα      | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 837                                    |
| Θερμική αγωγιμότητα    | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  | 0.04-0.06                              |

Διαλυτότητα

Διαλυτός σε θερμό και πυκνό αλκαλικό διάλυμα και διάλυμα υδροφθορίου. Μέτρια διαλυτότητα (<10%) σε διάλυμα καυστικού νατρίου κανονικότητας 1N. Μερικώς διαλυτός (<3%) σε διαλύματα ανόργανων οξέων (κανονικότητας 1N). Ελάχιστα διαλυτός (<1%) σε νερό και ασθενή οξέα.



Σχήμα 2.8. Περλίτης: Α) Πέτρωμα περλίτη, Β) Κλάσματα λειοτριβημένου αδιόγκωτου περλίτη, Γ) Κόκκοι διογκωμένου περλίτη, Δ) η δομή διογκωμένου κόκκου όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).



Από ορυκτολογικής άποψης στον περλίτη επικρατεί η άμορφη υαλώδης πυριτική φάση σε ποσοστό μέχρι και 95%. Επιπλέον περιέχονται κρύσταλλοι χαλαζία, αστρίοι (καλιούχοι και ασβεστονατριούχοι) και μαρμαρυγίες (βιοτίτη). Σπανιότερα συναντώνται απατίτης και μαγνητίτης σε αμελητέες ποσότητες (Naert, 1974; Παπαθεοδώρου, 1991; Austin and Barker, 1994; Le Maitre, 2002). Η περιεκτικότητα του σε κρυσταλλικές φάσεις έχει να κάνει τόσο με την ταχύτητα με την οποία ψύχθηκε το μάγμα όσο και με το πόσο προχωρημένη είναι η διαδικασία αφύαλωσης του πετρώματος.

Το κρυσταλλικό περιεχόμενο της πρώτης ύλης δεν προσφέρει τίποτα στη διόγκωση ενώ ο Kadey θεωρεί ότι όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητα του περλίτη σε κρυσταλλικές φάσεις τόσο μεγαλύτερη διογκωσιμότητα παρουσιάζει και προτείνει μια μέθοδο φυσικού διαχωρισμού με βαρέα διάμεσα για την απομάκρυνση των «προσμίξεων» (Kadey, 1963). Πειραματικά, οι Roulia et al. έδειξαν ότι η διόγκωση συμβαίνει στην άμορφη χαλαζιακή φάση και μόνο. Μετά από διόγκωση δείγματος περλίτη απομόνωσαν και μελέτησαν τους κόκκους που παρέμειναν αδιόγκωτοι και με τη χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD) είδαν ότι στους κόκκους αυτούς επικρατεί η κρυσταλλική φάση (χαλαζίας, βιοτίτης, πλαγιόκλαστα). Επιπλέον, σημειώνουν ότι η παρουσία κρυσταλλικής φάσης στον αδιόγκωτο περλίτη οδηγεί αρκετές φορές στη θραύση του κόκκου κατά τη διόγκωση και τη δημιουργία δύο ή και περισσότερων διογκωμένων κόκκων από έναν αδιόγκωτο (Roulia et al., 2006).

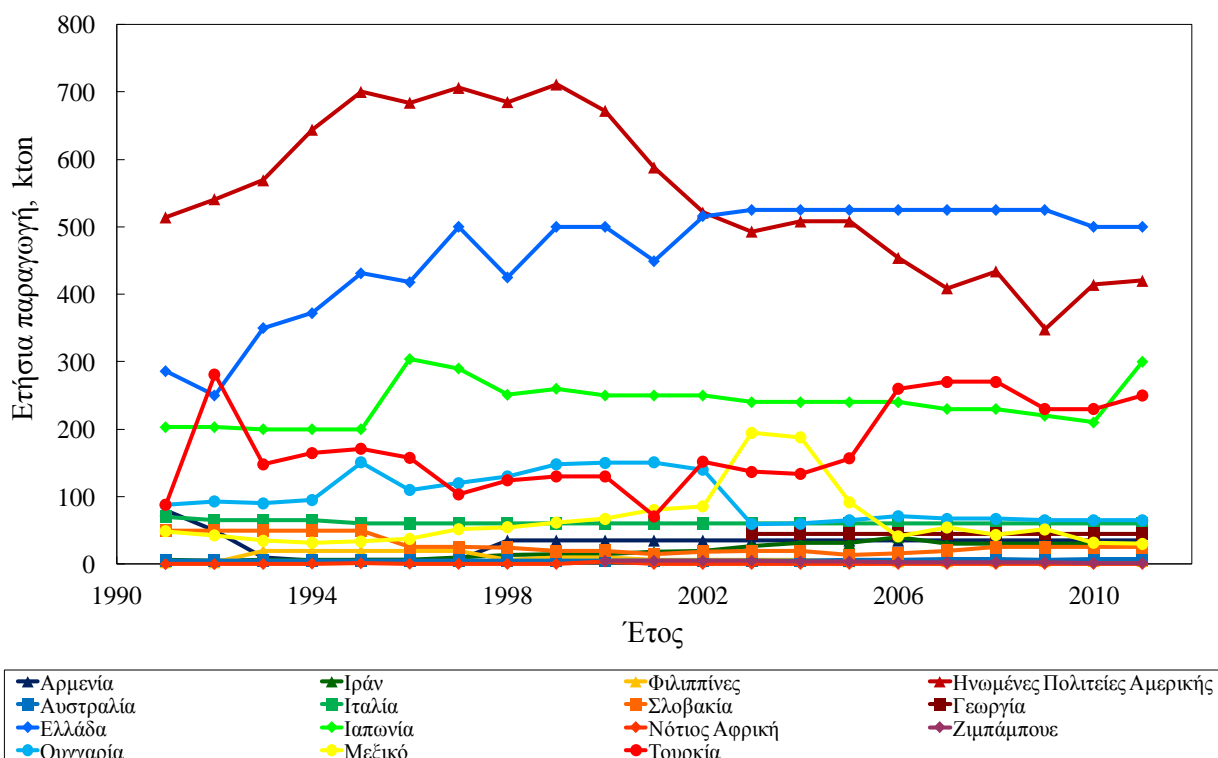
#### **2.4. Στοιχεία παραγωγής περλίτη**

Κοιτάσματα περλίτη απαντώνται διάσπαρτα σε όλο τον κόσμο και ποικίλουν τόσο σε ποιότητα όσο και σε έκταση. Κοιτάσματα περλίτη εντοπίζονται στις παρακάτω χώρες (Harben and Kuzvart, 1996; Bolen, 2011): Αμερική, Ελλάδα, Τουρκία, Ιταλία, Ρωσία, Αρμενία, Αζερμπαϊτζάν, Γεωργία, Ουγγαρία, Σλοβακία, Κίνα, Μεξικό, FYROM, Αυστραλία, Ζιμπάμπουε, Ιράν, Νέα Ζηλανδία, Ιαπωνία, Βόρειος Αφρική και Ισλανδία.

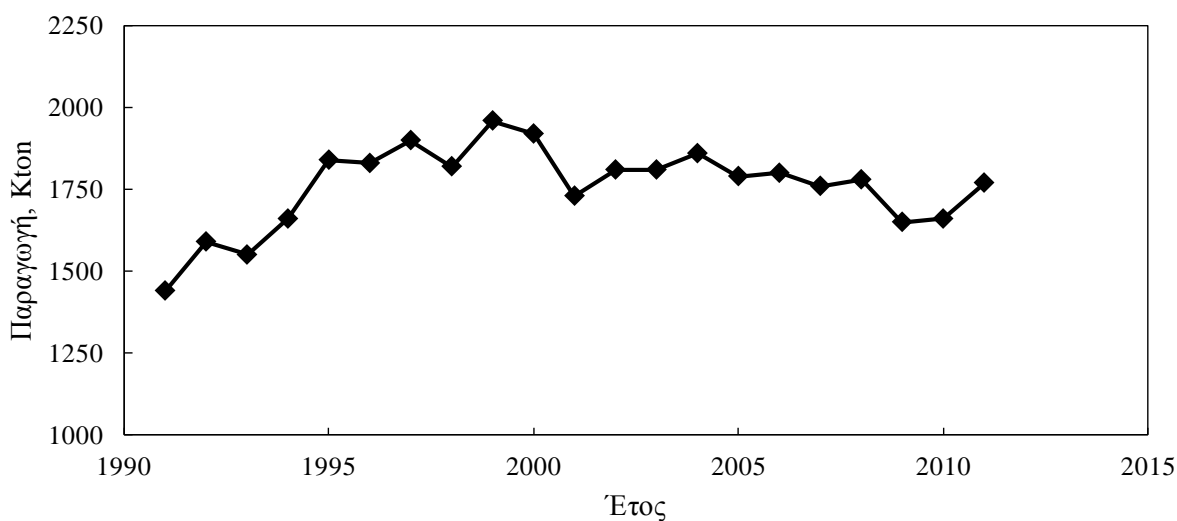
Ο ακριβής υπολογισμός των αποθεμάτων περλίτη παγκοσμίως είναι πρακτικά αδύνατος λόγω έλλειψης στοιχείων. Παρόλα αυτά, το τμήμα Γεωλογικών Ερευνών του Υπουργείου Εσωτερικών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής στην ετήσια έκθεση του 2011 για την παραγωγή και επεξεργασία περλίτη αναφέρει ότι τα βέβαια κοιτάσματα της Αμερικής, όπως επίσης και της Ελλάδας, ανέρχονται σε περίπου 50.000 Mton για την κάθε μία, ενώ οι υπόλοιπες χώρες διαθέτουν συνολικά βέβαια κοιτάσματα 600.000 Mton (Bolen, 2012). Περλίτης εξορύσσεται σε περισσότερες από 20 χώρες στον κόσμο, όμως επίσημα στοιχεία όσον αφορά την ετήσια παραγωγή υπάρχουν μόνο για τις 15 από αυτές. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.9, παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή στις χώρες αυτές για τα τελευταία 20 χρόνια (1991-2011), ενώ στο διάγραμμα

του Σχήματος 2.10 παρουσιάζεται η συνολική ετήσια παγκόσμια παραγωγή αδιόγκωτου περλίτη για το ίδιο διάστημα.

Στην Ελλάδα η εξόρυξη περλίτη ξεπερνά ετήσια τις 500.000 τόνους. Τα δέκα τελευταία χρόνια η Ελλάδα βρίσκεται στην πρώτη θέση παγκοσμίως στην παραγωγή περλίτη. Στη δεύτερη θέση βρίσκονται οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με παραγωγή που δεν υπερβαίνει τα τελευταία τέσσερα χρόνια τις 450.000 τόνους, ενώ ακολουθούν δυο ακόμα σημαντικοί παραγωγοί, η Ιαπωνία και η Τουρκία.



Σχήμα 2.9. Οι 15 χώρες όπου παράγεται περλίτης και η ετήσια εγχώρια παραγωγή για το χρονικό διάστημα 1991-2001 (Bolen, 2011).



Σχήμα 2.10. Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή περλίτη για το χρονικό διάστημα 1991-2011 (Bollen, 2011).

Οι χώρες οι οποίες παράγουν περλίτη και για τις οποίες δεν υπάρχουν στοιχεία παραγωγής είναι: το Τσιμπουτί όπου η παραγωγή περλίτη ξεκίνησε το 2009, η Αλγερία, η Βουλγαρία, η Κίνα, η Ισλανδία, η Μοζαμβίκη και η Ρωσία.

Η διακίνηση του περλίτη σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται κυρίως στη μορφή του αδιόγκωτου περλίτη, λόγω της πολύ μικρής πυκνότητας και επομένως του μεγάλου όγκου του διογκωμένου υλικού που καθιστά τη μεταφορά του αντικοινωνική. Έτσι, οποιαδήποτε επεξεργασία του υλικού πέραν της θραύσης, λειοτρίβησης και κοσκίνισης, γίνεται κοντά στα σημεία πώλησης του, με αποτέλεσμα οι εξαγωγές να αναφέρονται στη συντριπτική τους πλειοψηφία σε ακατέργαστο περλίτη. Η Αμερική εξάγει μικρές ποσότητες ακατέργαστου περλίτη, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής της διακινείται εγχώρια όπου και επεξεργάζεται από εταιρείες που εντάσσονται στον δευτερογενή τομέα της βιομηχανίας για την παραγωγή τελικών προϊόντων διαφόρων χρήσεων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το έτος 2011 που η ετήσια παραγωγή στις ΗΠΑ ανήλθε περίπου στις 400.000 τόνους, η εξαγωγή αδιόγκωτου περλίτη δεν ξεπέρασε τις 40.000 τόνους και το 90% της εγχώριας παραγωγής πωλήθηκε για μετεπεξεργασία σε αμερικάνικες εταιρίες εντός των συνόρων της. Αντιθέτως, η Ελλάδα εξάγει το μεγαλύτερο μέρος της εγχώριας παραγωγής της σε πελάτες σε όλο τον κόσμο. Το 2011, η Αμερική εισήγαγε 193.000 τόνους περλίτη προερχόμενο από την Ελλάδα ποσοστό μεγαλύτερο του 35% της εγχώριας ελληνικής παραγωγής πουλήθηκε σε εταιρίες με έδρα τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

## 2.5. Χρήσεις και εφαρμογές του περλίτη

Ο περλίτης, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του βρίσκει πλήθος εφαρμογών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας, όπως ο κατασκευαστικός τομέας, η χημική βιομηχανία και η βιομηχανία τροφίμων, όπου χρησιμοποιείται ως μονωτικό και προσροφητικό υλικό αλλά και σε τεχνολογίες υψηλών θερμοκρασιών. Στις υπόλοιπες, μικρότερης σημασίας, εφαρμογές που βρίσκει ο περλίτης συγκαταλέγονται η χρήση του ως πληρωτικό μέσο στη βιομηχανία πλαστικών, στις γεωτρήσεις γεωθερμίας και ύδατος, ως αποξεστικό, καθαριστικό και γυαλιστικό μέσο κ.λπ. Αυτές οι λοιπές εφαρμογές δεν απορροφούν περισσότερο από το 5% την παγκόσμια παραγωγή διογκωμένου περλίτη κατά όγκο και αξία. Στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές ο περλίτης χρησιμοποιείται στη διογκωμένη του μορφή και ο λόγος είναι, οι σημαντικές φυσικές και χημικές ιδιότητες που αποκτά το υλικό μετά τη θερμική του κατεργασία. Ο διογκωμένος περλίτης είναι ελαφροβαρής, εμφανίζει ανεπτυγμένο δίκτυο πόρων στην επιφάνεια αλλά και στο εσωτερικό του, παρουσιάζει σημαντικές θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες.

Σε άλλες εφαρμογές, ο αδιόγκωτος περλίτης χρησιμοποιείται ως πηγή πυριτίου λόγω της μεγάλης ενεργότητας που παρουσιάζει. Ακόμη, η χημική του αδράνεια, το ουδέτερο pH (6.5- 8.0)

και η ήπια αποξεστική του δράση τον καθιστούν κατάλληλο για χρήση στη βιομηχανία καλλυντικών και υγιεινής (κρέμες καθαρισμού επιδερμίδας, οδοντόκρεμες). Οι χρήσεις του περλίτη ανά τομέα παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

### **2.5.1. Κατασκευαστικός τομέας**

Στον κατασκευαστικό τομέα ο διογκωμένος περλίτης χρησιμοποιείται ως (Kendall, 2000; Karalis and Taxiarchou, 2006; King, 2006):

1. Κύριο συστατικό σε πλάκες οροφής προσφέροντας θερμομόνωση και ηχομόνωση,
2. Ελαφροβαρές, θερμομονωτικό συστατικό σε γυψοσανίδες και κονιάματα με βάση το τσιμέντο,
3. Ελαφροβαρές αδρανές υλικό στο σκυρόδεμα για τη μείωση του στατικού φορτίου των οικοδομών και αύξηση της αντοχής τους σε συνθήκες πυρκαγιάς
4. Μονωτικό υλικό πλήρωσης ενδιάμεσων κενών στην τοιχοποιία.

Άλλες, μικρότερης σημασίας εφαρμογές του διογκωμένου περλίτη στον τομέα αυτό περιλαμβάνουν τη χρήση του για επιδαπέδια μόνωση, μόνωση καμινάδων, επίσης ως βελτιωτικό υλικό της υφής των χρωμάτων, σε μονωτικές πλάκες στεγών αλλά και στην παραγωγή συνθετικών διακοσμητικών λίθων. Ο κατασκευαστικός τομέας απορροφά περίπου το 70% της παγκόσμιας παραγωγής περλίτη (Karalis and Taxiarchou, 2006).

Η επιθυμητή κοκκομετρία ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο περλίτης. Σε γενικές γραμμές και όσον αφορά τη χρήση του ως συστατικό στο τσιμέντο, τα κονιάματα και τα επιχρίσματα αλλά και την εφαρμογή του χύδην στην πλήρωση των μεσοτοιχιών, η κοκκομετρία κυμαίνεται μεταξύ 0.6-2.5 mm, ενώ στη βιομηχανία κατασκευής γυψοσανίδων και πλακών οροφής, επιλέγεται λεπτότερο κλάσμα (0.3-1.4 mm).

*2.5.1.1. Γυψοσανίδες και πλάκες οροφής με αυξημένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες.*

Τα υλικά κατασκευής των πλακών οροφής είναι (Karalis and Taxiarchou, 2006; Armstrong Company's website, 2012):

- Ορυκτές ίνες (κατασκευασμένες από σκωρία ή πετροβάμβακα)
- Ίνες κυτταρίνης (κατασκευασμένες από ανακυκλωμένο χαρτί εφημερίδων)
- Άμυλο καλαμποκιού ή πατάτας (χρήση ως συνδετικό μέσο)

- Αργίλος
- Υαλοβάμβακας
- Διογκωμένος περλίτης (έχει αντικαταστήσει μέρος των χρησιμοποιούμενων ορυκτών ινών)

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται κροκιδωτικά και άλλα πρόσθετα στο στάδιο παραγωγής των προϊόντων.

Τα τελευταία 30 χρόνια η μεγάλη τάση που υπάρχει σε χρήση πλακών οροφής τόσο σε μοντέρνα γραφεία όσο και σε σπίτια, έχει τονώσει σημαντικά τη βιομηχανία παραγωγής διογκωμένου περλίτη, που αποτελεί πλέον βασικό συστατικό στην κατασκευή τους. Ο περλίτης στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται για να μειώσει το βάρος της πλάκας, να βελτιώσει τις θερμομονωτικές ιδιότητες και να αυξήσει την αντοχή τους σε συνθήκες πυρκαγιάς, ενώ η χρήση του για τη διαμόρφωση της ορατής επιφάνειας των πλακών βελτιώνει αισθητικά το τελικό προϊόν. Επιπλέον, μειώνει την ανάκλαση του ήχου περιορίζοντας τη μετάδοση του εντός του ίδιου χώρου αλλά και σε υπερκείμενους και υποκείμενους χώρους, ενώ επίσης απομονώνει το θόρυβο που προκαλείται από τις συσκευές αερισμού, κλιματισμού και θέρμανσης οι οποίες συχνά τοποθετούνται στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ της οροφής και των πλακών. Η περιεκτικότητα των πλακών σε διογκωμένο περλίτη ποικίλει από 5 έως και 75% κατά βάρος, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες και την προοριζόμενη χρήση του τελικού προϊόντος. Στην περίπτωση των γυψοσανίδων, η περιεκτικότητά τους σε περλίτη κυμαίνεται μεταξύ 10-15% (Kendall, 2000).

#### *2.5.1.2. Ελαφροβαρές σκυρόδεμα, κονιάματα και επιχρίσματα*

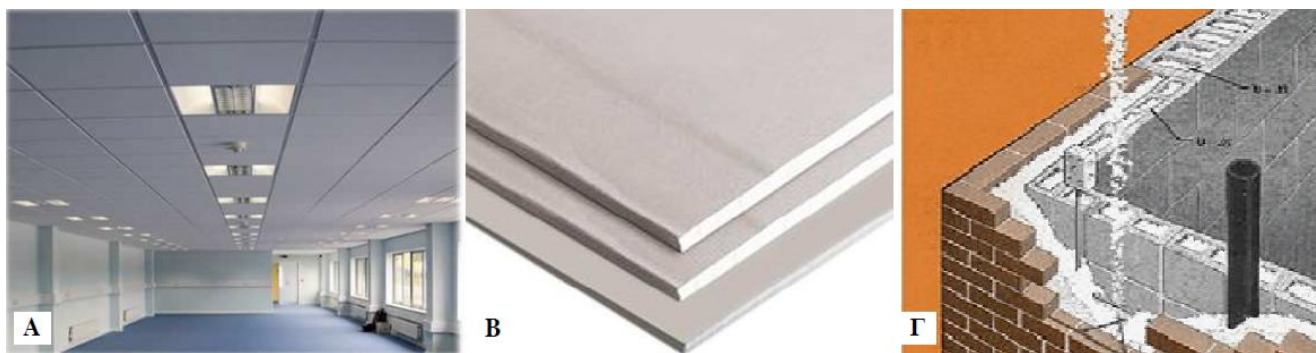
Ο διογκωμένος περλίτης όταν χρησιμοποιείται ως συστατικό σε μείγματα σκυροδέματος ή κονιαμάτων βελτιώνει αρκετές από τις φυσικές τους ιδιότητες με σημαντικότερες τη μείωση της πυκνότητάς τους και την αύξηση των θερμομονωτικών τους χαρακτηριστικών. Το ελαφροβαρές σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στην κατασκευή: α) στεγών σπιτιών, όπου λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του μειώνει το βάρος της κατασκευής (γεγονός που επιφέρει μείωση του στατικού φορτίου της κατασκευής και, παράλληλα, και του κόστους της) και βελτιώνει τη θερμομόνωση και ηχομόνωση των κατασκευών, β) αυτοεπιπεδούμενων δαπέδων, γιατί βελτιώνει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του μείγματος και το κάνει πιο ευκατέργαστο. Ακόμη, ελαφροβαρές σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κενών σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης, ατμού αλλά και για την κατασκευή βάσεων φούρνων, βιομηχανικών κλιβάνων και δοχείων ψύξης.

Η χρήση του περλίτη σε κονιάματα και επιχρίσματα (σε περιεκτικότητα 15-25%) είναι επίσης πολύ διαδεδομένη, κυρίως λόγω της μειωμένης πυκνότητάς του (Karalis and Taxiarchou, 2006). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε συνθήκες πυρκαγιάς μείγμα τσιμέντου τύπου Portland και περλίτη προσφέρει 4 ώρες προστασία στον οπλισμό της κατασκευής και μειώνει κατά 75% τη

μεταδιδόμενη θερμότητα σε σύγκριση με τα κοινά κονιάματα που περιέχουν άμμο. Τα κονιάματα που περιέχουν περλίτη χρησιμοποιούνται στην τοποθέτηση έτοιμων δομικών στοιχείων (blocks, panels), για να προσδώσουν θερμομονωτικά χαρακτηριστικά κατά μήκος των ενώσεών τους, αλλά και να μειώσουν το φορτίο της συνολικής κατασκευής.

### 2.5.1.3. Μονωτικό υλικό (σε χύδην μορφή) για πλήρωση κενών μεταξύ τοίχων

Ο διογκωμένος περλίτης χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κενών μεταξύ τοίχων και σε πυράντοχες πόρτες βελτιώνοντας τη θερμομόνωση αλλά και την αντοχή της κατασκευής στις συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας που επικρατούν σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ανταγωνιστικά υλικά σε αυτό τον τομέα είναι: ο υαλοβάμβακας, διογκωμένη πολυστερίνη (σε μορφή κόκκων ή φλοιών και διαμορφωμένος σε πάνελ) και ο βερμικουλίτης. Η βασική διαφορά του περλίτη από τα προϊόντα αυτά είναι ότι λόγω της μορφής του (είναι στερεός, ελαφρύς και κοκκώδης) έχει πολύ καλές ρεολογικές ιδιότητες.



Σχήμα 2.11. Χρήσεις του περλίτη στον κατασκευαστικό τομέα. Α) Πλάκες οροφής, Β) Γυψοσανίδες, Γ) Χύδην για πλήρωση μεσοτοιχιών.

### 2.5.2. Φυτοκομία

Η χρήση διογκωμένου περλίτη στη φυτοκομία αυξάνει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και βελτιώνει την ποιότητα των αγροτικών προϊόντων (Schundler, 2012). Χρησιμοποιείται με επιτυχία σε θερμοκήπια, σε μονάδες αναπαραγωγής φυτών (καλλιέργειες χωρίς χώμα) καθώς επίσης και στην αρχιτεκτονική κήπων. Τυπικές λοιπόν εφαρμογές του περλίτη στη φυτοκομία είναι (Karalis and Taxiarchou, 2006):

1) στην υδροπονία, σε καλλιέργειες δηλαδή φυτών απουσία χώματος με χρήση περλίτη, νερού και θρεπτικών.

2) ως υπόστρωμα στις καλλιέργειες (σε μίγματα με τύρφη και άμμο).

Οι κόκκοι περλίτη προσφέρουν καλύτερο αερισμό στις ρίζες των φυτών, ρύθμιση του ρυθμού αποστράγγισης των υδάτων καθώς και της υγρασίας στο χώμα, ενώ το σχετικά σταθερό pH (σχεδόν ουδέτερο) και το γεγονός ότι ο περλίτης είναι αποστειρωμένος (λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά τη διόγκωσή του) αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα για την επιλογή του από τους καλλιεργητές. Ακόμη, το χαμηλό του ειδικό βάρος τον καθιστά κατάλληλο για χρήση σε καλλιέργειες, σε ράφια και παλέτες. Ακόμη, ο περλίτης χρησιμοποιείται : α) στο στάδιο βλάστησης των σπόρων και αναπαραγωγής δενδρυλλίων, β) στην εγκατάσταση χλοοτάπητα και γ) ως φορέας λιπασμάτων, ζιζανιοκτόνων και φυτοφαρμάκων.

### 2.5.2.1. Υδροπονία

Η εφαρμογή της υδροπονίας στην καλλιέργεια φρούτων, λαχανικών και λουλουδιών παρουσιάζει αυξανόμενες τάσεις και έτσι η ζήτηση για περλίτη τέτοιων εφαρμογών παρουσιάζει άνοδο (Kendall, 2000; Karalis and Taxiarchou, 2006). Με τον όρο «υδροπονία» εννοείται η καλλιέργεια φυτών χωρίς τη χρήση χώματος. Με χρήση άλλων υποστρωμάτων αντί του εδάφους επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερος έλεγχος της υγρασίας του υποστρώματος, στο οποίο αναπτύσσεται το φυτό αλλά και των θρεπτικών στοιχείων που αυτό απορροφά, εξασφαλίζοντας έτσι τις βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξής του. Οι υδροπονικές καλλιέργειες πραγματοποιούνται σε θερμοκήπια ή σε καλλιέργειες εξωτερικού τύπου, όπου το υπόστρωμα βρίσκεται σε μεγάλους σάκους ή δοχεία. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η υδροπονική καλλιέργεια είναι τα παρακάτω:

- αυξημένη παραγωγικότητα για δεδομένο αριθμό φυτών και επιφάνεια καλλιέργειας
- καλλιέργεια φυτών σε περιοχές που λόγω κλιματολογικών συνθηκών η ανάπτυξή τους θα ήταν αδύνατη
- ανάπτυξη καλλιεργειών ακόμα και σε μέρη που δεν υπάρχουν αγροτικές εκτάσεις
- βέλτιστη χρήση του νερού σε περιοχές που αυτό είναι σε έλλειψη
- περιορισμός των παρασίτων που αναπτύσσονται στα καλλιεργήσιμα εδάφη

Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος είχε ως αποτέλεσμα την τόνωση του κλάδου της υδροπονίας είναι η απόφαση της διεθνούς κοινότητας (Συνθήκη του Μόντρεαλ, 1977) για την οριστική κατάργηση της χρήσης μεθυλικού βρωμίου μέχρι το 2005. Το μεθυλικό βρώμιο υπάγεται στην Κλάση 1 σχετικά με τη δραστηρότητά του με το όζον και με την καταστροφή που προκαλεί στη στιβάδα του όζοντος. Το μεθυλικό βρώμιο χρησιμοποιείτο κατά κύριο λόγο σαν ζιζανιοκτόνο και φυτοφάρμακο στο έδαφος, αφού το αποστειρώνει και εξολοθρεύει την πλειοψηφία των ζιζανίων και βλαβερών μικροοργανισμών (Kendall, 2000). Η απαγόρευση του δημιούργησε κενό στην

αγορά και οι καλλιεργητές κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα αυτά χρησιμοποιώντας περισσότερα του ενός προϊόντα αυξάνοντας τελικά το κόστος της καλλιέργειας. Αυτό οδήγησε πολλούς αγρότες στην αντικατάσταση του χώματος ως υπόστρωμα των καλλιεργειών στην παραγωγή οπωροκηπευτικών και φρούτων.

#### 2.5.2.2. Ο διογκωμένος περλίτης ως συστατικό του υποστρώματος

Το μείγμα διογκωμένου περλίτη με άμμο, τύρφη (σφάγνα βρύα) ή άλλα κομποστοποιημένα υλικά (composted materials) προσφέρει ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης για τα φυτά γιατί περιορίζει τον κίνδυνο προσβολής της καλλιέργειας από ασθένειες, καθώς και την ανάπτυξη εντόμων και ζιζανίων. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται η τυπική αναλογία συστατικών που χρησιμοποιείται στα εδαφικά μείγματα. Εκτός των παρακάτω, χρησιμοποιούνται συνήθως δολομιτικός ασβεστόλιθος, υπέρ-φωσφορικό άλας 0-20-0 και ιχνοστοιχεία.

Πίνακας 2.4. Σύσταση κατά όγκο υποστρώματος σε καλλιέργεια υδροπονίας (Karalis and Taxiarchou, 2006).

| Συστατικά                     | Περιεκτικότητα κατά όγκο (% v/v) |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Τύρφη                         | 50-60                            |
| Διογκωμένος περλίτης          | 20-40                            |
| Διογκωμένη άργιλος (Turface®) | 10-20                            |

Ένα μείγμα με τη σύσταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4 έχει pH 5.9-6.7, υγρασία 11-45%, φαινόμενη πυκνότητα 96-130 kg·m<sup>-3</sup> και κοκκομετρία μικρότερη από 9.5 mm.



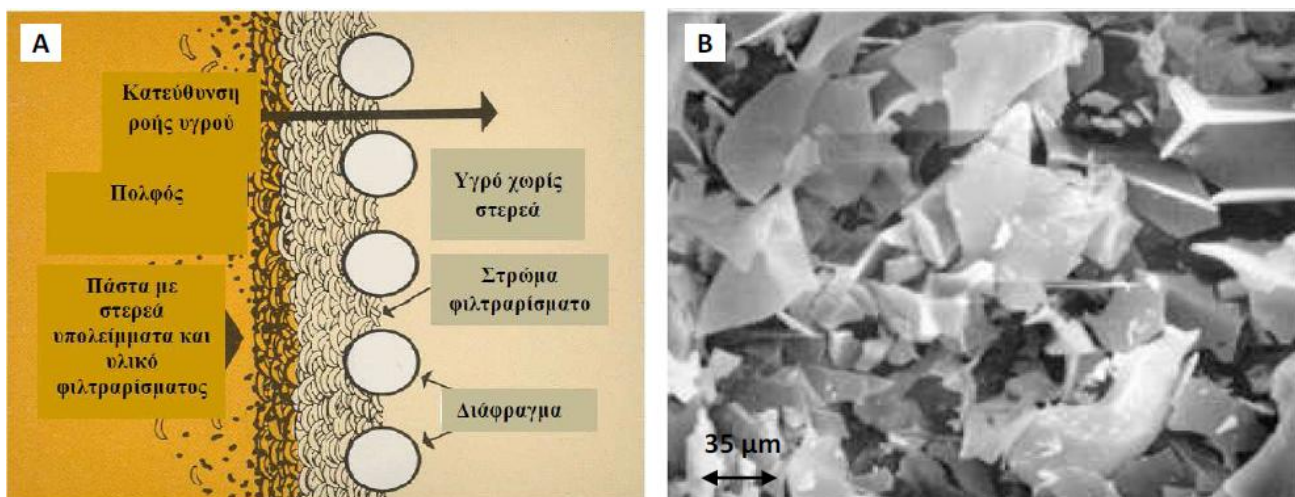
Σχήμα 2.12. Χρήση του περλίτη στη φυτοκομία: Α) Εξωτερική υδροπονική καλλιέργεια φράουλας, Β) Υδροπονική καλλιέργεια μαρουλιού σε θερμοκήπιο, Γ) Ο περλίτης ως συστατικό του υποστρώματος καλλιεργειών.



### 2.5.3. Χημική βιομηχανία και βιομηχανία τροφίμων

#### 2.5.3.1. Ως μέσο διήθησης

Η χρήση περλίτη σε φίλτρα που λειτουργούν υπό συνθήκες πίεσης ή κενού είναι ευρέως διαδεδομένη. Η διαδικασία παραγωγής περλίτη για τέτοιου είδους εφαρμογές περιλαμβάνει προσεκτική συλλογή της πρώτης ύλης, θραύση και κοσκίνιση, διόγκωση, λειοτρίβηση έτσι ώστε να σπάσουν οι κλειστοί πόροι των κόκκων και περαιτέρω κοσκίνιση και ταξινόμηση των κλασμάτων. Αποτέλεσμα της παραπάνω σειράς διεργασιών αποτελεί η δημιουργία λεπτόκοκκου προϊόντος στενής κοκκομετρίας. Στις περισσότερες εφαρμογές ο περλίτης συγκρατεί σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης του 1 μm που βρίσκονται σε υγρά μείγματα ή αιωρήματα. Με ρύθμιση της κοκκομετρίας και της πυκνότητας των σωματιδίων του περλίτη μπορεί το υλικό να γίνει κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές.



Σχήμα 2.13. Ο περλίτης στα φίλτρα: Α) Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας, Β) Περλίτης της εταιρίας Nordisk Perlite για χρήση σε φίλτρα όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(Hill, 1979).

Στον κλάδο αυτό ο περλίτης ανταγωνίζεται υλικά όπως οι διατομίτες και η κυτταρίνη, λόγω όμως των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει αποτελεί το κύριο μέσο διήθησης για πλήθος εφαρμογών. Στα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει έναντι των υπολοίπων ανταγωνιστικών υλικών συγκαταλέγονται τα εξής (Kendall, 2000):

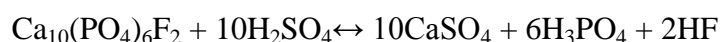
- Μεγάλη ταχύτητα διήθησης παχύρευστων υγρών
- Η ρύθμιση της κοκκομετρικής του κατανομής λειτουργεί ως ρυθμιστής του ρυθμού διήθησης
- Τα τεμαχίδια περλίτη προσφέρουν μεγάλη ειδική επιφάνεια

- Είναι αδρανής στα περισσότερα οξέα
- Παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα σε σύγκριση με άλλα υλικά φιλτραρίσματος
- Είναι σχετικά φθηνότερος

Ο περλίτης χρησιμοποιείται ευρέως για τη διήθηση παχύρευστων υγρών, όπως βρώσιμα έλαια, που αποτελούν ένα από τους κυριότερους τομείς εφαρμογής του. Επίσης, ο περλίτης χρησιμοποιείται για τη διήθηση στερεών υπολειμμάτων κατά την παραγωγή οίνου. Άλλες εφαρμογές, που απορροφούν μικρότερες ποσότητες περλίτη αλλά έχουν σημαντική οικονομική αξία, περιλαμβάνουν τη χρήση του ως μέσο διήθησης στη χημική βιομηχανία, για αφαίρεση στερεών από υγρά απόβλητα, στη βιομηχανία τροφίμων για τον καθαρισμό διαλυμάτων ζάχαρης, αλλά και στη βιομηχανία φαρμάκων. Όσον αφορά στις παραπάνω εφαρμογές, η ζήτηση σε διογκωμένο περλίτη είναι σταθερή τα τελευταία χρόνια. Τέλος, η χρήση του περλίτη στον καθαρισμό των πισινών, αντί των διατομικών γαιών, αποτελεί μία ακόμα σημαντική εφαρμογή, καθώς ο περλίτης έχει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα σε σύγκριση με άλλα ανταγωνιστικά υλικά για τον ίδιο όγκο υλικού.

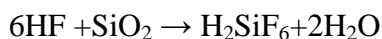
#### 2.5.3.2. Παραγωγή φωσφορικού οξέως ( $H_3PO_4$ )

Ο αδιόγκωτος περλίτης χρησιμοποιείται ευρέως κατά την παραγωγή φωσφορικού οξέος με την «Υγρή Μέθοδο» (Wet process Phosphoric Acid) (Hill, 1979; Karalis and Taxiarchou, 2006). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, πετρώματα πλούσια σε φωσφορικά άλατα προσβάλλονται από θειικό οξύ και λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



Τα πετρώματα αυτά αποτελούν πηγή διαφόρων ανεπιθύμητων προσμίξεων στο διάλυμα που παράγεται ( $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $S^{2-}$ , διάφορα οργανικά συστατικά αλλά και οξειδωτικές ενώσεις). Ο περλίτης χρησιμοποιείται ως ρυθμιστικό του διαλύματος, είτε δημιουργώντας μείγμα με το πέτρωμα πριν να έρθει σε επαφή με το οξύ, είτε εισάγεται στον αντιδραστήρα μαζί με τις υπόλοιπες πρώτες ύλες. Η περιεκτικότητα του περλίτη στο μείγμα είναι 1-3% κατά βάρος. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης περλίτη στη διεργασία που περιγράφηκε είναι τα εξής:

1. Μείωση της διάβρωσης που προκαλείται από το υδροφθόριο που παράγεται καθώς, κατά την διάρκεια της αντίδρασης το υδροφθόριο που απελευθερώνεται δεσμεύεται από το ενεργό πυρίτιο του περλίτη σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



και τελικά καταβυθίζεται ως  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ,  $\text{KSiF}_6$  ή  $\text{NaKSiF}_6$ . Η δραστηρότητά του περλίτη στην περίπτωση αυτή ξεπερνά το 90%.

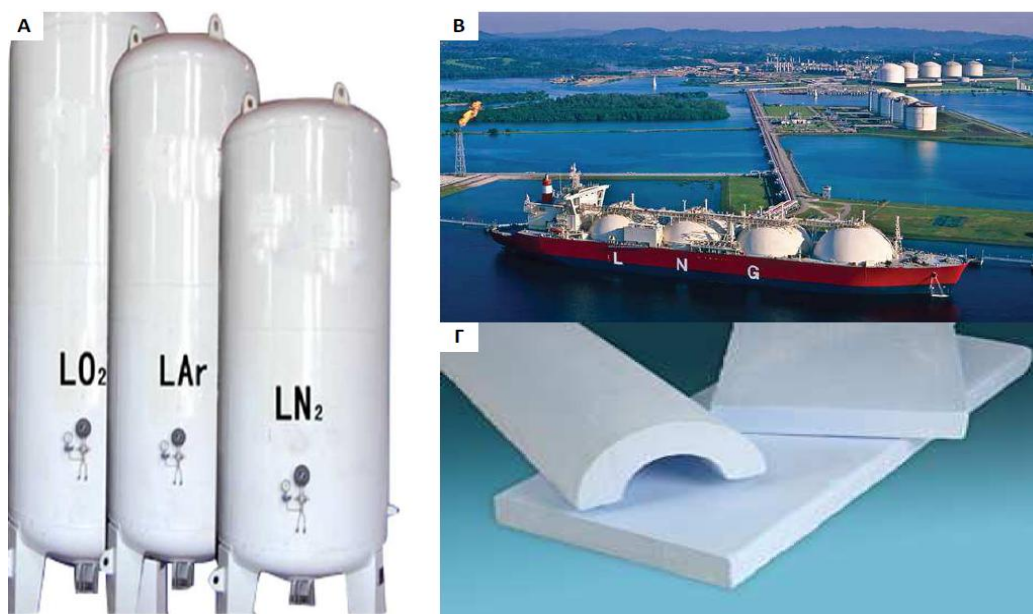
2. Μείωση της ποσότητας του υδροφθορίου που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.
3. Αύξηση της απόδοσης κατά το στάδιο της διήθησης και έκπλυσης της. Λόγω του μεγέθους, του σχήματος και της κρυσταλλικότητας των τεμαχιδίων γύψου που παράγονται, ο ρυθμός διήθησης του πολφού  $\text{CaSO}_4$  και  $\text{H}_3\text{PO}_4$  είναι μικρός. Η προσθήκη περλίτη βελτιώνει τόσο το σχήμα όσο και την κοκκομετρική κατανομή των τεμαχιδίων γύψου. Αναλυτικότερα, βοηθά στην ανάπτυξη μεγαλύτερων τεμαχιδίων γύψου, αφού ενισχύει την ανάπτυξη των κρυστάλλων προς όλες τις κατευθύνσεις και τελικά τα τεμαχίδια που προκύπτουν είναι σφαιρικά και ομογενή εξασφαλίζοντας βελτιωμένους ρυθμούς διήθησης και καθίζησης.
4. Μείωση του υπολειπόμενου  $\text{P}_2\text{O}_5$  στην πάστα της διήθησης, λόγω της έκπλυσης των κρυστάλλων γύψου.

#### **2.5.4. Χρήση περλίτη ως μονωτικό υλικό σε τεχνολογίες ακραίων θερμοκρασιών**

Λόγω των μονωτικών του ιδιοτήτων και την αντίστασή του στην μεταφορά της θερμότητας, αλλά, και της ανθεκτικότητας της δομής του σε συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών, αποτελεί ιδανικό μονωτικό σε εφαρμογές ακραίων θερμοκρασιακών συνθηκών.

##### *2.5.4.1. Κρυογενικές εφαρμογές και εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών.*

Ο περλίτης θεωρείται ιδανικό υλικό για τη μόνωση σε κρυογενικά δοχεία και δοχεία χαμηλών θερμοκρασιών. Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για τη μόνωση των δοχείων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και αποθήκευση υγρών σε χαμηλή θερμοκρασία. Εφαρμογές κατά τις οποίες η θερμοκρασία που επικρατεί εντός του μονωμένου χώρου είναι -4 έως και -100 °C αναφέρονται σαν «Εφαρμογές Χαμηλής Θερμοκρασίας», ενώ όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από -100 °C χαρακτηρίζονται ως «Κρυογενικές Εφαρμογές», όπως π.χ. η αποθήκευση και μεταφορά υγρού υδρογόνου, ήλιου και άλλων αερίων.



Σχήμα 2.14. Ο περλίτης ως μονωτικό ακραίων θερμοκρασιών: Α) Δοχεία με ενδιάμεση μόνωση περλίτη υπό συνθήκες κενού για τη μεταφορά και αποθήκευση υγροποιημένων αερίων, Β) Μόνωση στα τοιχώματα των δεξαμενών πλοίου για τη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου, Γ) Έτοιμα προϊόντα διαφόρων σχημάτων για μόνωση σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (φούρνους, βιομηχανικούς κλιβάνους κ.λπ.)

Τα δοχεία φύλαξης υγροποιημένων αερίων είναι συνήθως κυλινδρικά, ενώ τα δοχεία μεταφοράς είναι συνήθως σφαιρικά. Έχουν διπλό τοίχωμα και στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τοιχώματος ο χώρος γεμίζεται με λεπτόκοκκο διογκωμένο περλίτη και σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως σε κρυογενικές εφαρμογές, εφαρμόζονται στη συνέχεια συνθήκες κενού. Άλλες εφαρμογές του περλίτη στον κλάδο αυτό, αποτελούν τα βιομηχανικά δοχεία και τα εμπορευματοκιβώτια πλοίων. Εκτός της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που έχει ο περλίτης, άλλες ιδιότητες που τον καθιστούν ιδανικό για τις παραπάνω εφαρμογές αποτελούν τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά, η αντοχή του σε συμπίεση καθώς και το γεγονός ότι μακροπρόθεσμα δεν επηρεάζονται τα μορφολογικά του χαρακτηριστικά και η εσωτερική του δομή.

#### 2.5.4.2. Μορφοποιημένα μονωτικά προϊόντα περλίτη-πυριτίου

Κόκκοι διογκωμένου περλίτη μπορούν να συγκολληθούν κατάλληλα για να δημιουργήσουν μορφοποιημένα μονωτικά προϊόντα διαφόρων σχημάτων για διάφορες εφαρμογές. Τα προϊόντα αυτά παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή στο νερό, δεν διαβρώνουν τα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή, έχουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι ιδιότητές τους παραμένουν σταθερές για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Προσφέρονται συχνά σε ημι-κυλινδρικό σχήμα για μόνωση σωληνώσεων, σε πλάκες για την δημιουργία μονωτικού στρώματος σε φούρνους ή και σε μορφή σωλήνων μεγάλων διαμέτρων.

Το καλύτερο συνδετικό υλικό για τις εφαρμογές αυτές είναι το υγρό πυριτικό νάτριο (υδρύαλος). Το πυριτικό νάτριο χρησιμοποιείται συχνά σαν συνδετικό υλικό σε εφαρμογές υψηλών

θερμοκρασιών, λόγω του χαμηλού του κόστους, της ανόργανης χημικής του σύστασης, της μηχανικής του αντοχής και της χημικής του σταθερότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιλέγεται το πυριτικό κάλιο ως συνδετικό, λόγω του υψηλότερου σημείου τήξης του συγκριτικά με το πυριτικό νάτριο.

#### 2.5.4.3. Μορφοποιημένα προϊόντα πυριτικού ασβεστίου

Τα προϊόντα πυριτικού ασβεστίου αποτελούν μία πρόσθετη κατηγορία μορφοποιημένων μονωτικών υλικών. Στο παρελθόν για την κατασκευή των προϊόντων αυτών δεν χρησιμοποιείτο περλίτης. Οι συνήθεις πρώτες ύλες ήταν διατομικές γαίες ως πηγή πυριτίου, υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ως πηγή ασβεστίου και ίνες ως ενισχυτικό δομής. Ωστόσο, κάποιοι παραγωγοί δοκίμασαν την προσθήκη λεπτόκοκκου διογκωμένου ή και αδιόγκωτου περλίτη ως πηγή πυριτίου προς αντικατάσταση των διατομικών γαίων, μαζί με πυριτικό νάτριο που χρησιμοποιείται ως καταλύτης ή ενεργοποιητής.

#### 2.5.5. Μεταλλουργία χάλυβα και χυτήρια

Αδιόγκωτος και διογκωμένος περλίτης χρησιμοποιείται στους κάδους τηγμένου μετάλλου. Οι αδιόγκωτοι κόκκοι όταν προστίθενται στο τήγμα διογκώνονται και όταν έλθουν σε επαφή με τη σκουριά δεσμεύουν τις προσμίξεις και δημιουργούν πυκνούς σχηματισμούς που αφαιρούνται εύκολα από το λουτρό. Επίσης, το στρώμα περλίτη που καλύπτει την επιφάνεια του τήγματος λειτουργεί ως μονωτικό υλικό και μειώνει τη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον, διατηρώντας το λουτρό σε υψηλή θερμοκρασία. Ο περλίτης μπορεί να προστεθεί και κατά τη διαδικασία απόχυσης του τήγματος, όπου εφόσον αναμιγνύεται με όλη την μάζα του τήγματος δρα ως καθαριστικό των προσμίξεων σε όλο τον όγκο του λουτρού. Στα πλεονεκτήματα του περλίτη στον τομέα αυτό συγκαταλέγεται και το ότι δεν δημιουργεί καπνό ή επιβλαβή αέρια τα οποία θα μπορούσαν να επιβαρύνουν τις συνθήκες εργασίας στο χώρο χύτευσης.

Στη διαδικασία χύτευσης, ο περλίτης αναμιγνύεται με πρόσθετα υλικά που προκαλούν ισχυρές εξώθερμες αντιδράσεις και μέσω του μηχανισμού αυτού συμβάλλει στην άνοδο ή τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Επίσης, προλαμβάνει την ανάπτυξη ρωγμών στο στερεοποιημένο μέταλλο που προκύπτουν λόγω της συστολής της τηγμένης φάσης κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης. Ο περλίτης αποτελεί το μόνο ελαφροβαρές υλικό που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές αυτές, λόγω του χαμηλού του κόστους και των ιδιοτήτων του. Τέλος, η προσθήκη περλίτη στην άμμο των καλουπιών χύτευσης εξασφαλίζει καλύτερο αερισμό, λόγω αύξησης του πορώδους, περιορίζοντας τις ατέλειες που συνδέονται με το φτωχό αερισμό.

### **2.5.6. Λοιπές εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών**

Πληθώρα μονωτικών και πυρίμαχων προϊόντων έχουν ως συστατικό τον περλίτη. Ο διογκωμένος περλίτης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τους 1000 °C, ενώ σε περιπτώσεις υψηλότερων θερμοκρασιών τα πυρίμαχα που περιέχουν περλίτη χρησιμοποιούνται στις πίσω στιβάδες της μόνωσης και όχι στα σημεία που προσβάλλονται άμεσα από τη θερμική ακτινοβολία, όπου η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή. Ο περλίτης προσφέρει πορώδες στα προϊόντα αυτά και ανταγωνίζεται άλλα υλικά, όπως ο βερμικουλίτης και οι διατομικές γαίες, ενώ η επιλογή του πιο κατάλληλου κατά περίπτωση υλικού γίνεται βάσει της θερμικής αγωγιμότητας, του συντελεστή θερμικής διαστολής, της μέγιστης θερμοκρασίας που αντέχει το κάθε υλικό αλλά και του κόστους. Η χρήση του περλίτη σε μονωτικές πλίνθους και πυρίμαχα τούβλα για φούρνους, βιομηχανικές καμίνους, καυστήρες κ.α. είναι εκτενής.

### **2.6. Μελλοντικές τάσεις στη βιομηχανία περλίτη**

Όσον αφορά τις υπάρχουσες εφαρμογές του περλίτη, γίνονται προσπάθειες να αυξηθεί το ποσοστό χρησιμοποίησης του στα διάφορα μείγματα, όπως σκυρόδεμα, σοβάδες, κονιάματα, μονωτικά, αλλά και στην υδροπονία. Για να επιτευχθεί όμως αυτό απαιτείται η βελτίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του διογκωμένου περλίτη. Προς αυτή την κατεύθυνση εργάζονται τα τμήματα Έρευνας και Ανάπτυξης των εταιρειών διόγκωσης και επεξεργασίας περλίτη.

Ειδικότερα, η έρευνα εντοπίζεται (Karalis and Taxiarchou, 2006):

1. Στην τροποποίηση τόσο της μορφολογίας όσο και της εξωτερικής επιφάνειας των λεπτομερών διογκωμένων τεμαχιδίων περλίτη, με σκοπό την αύξηση της σκληρότητάς του και τη μείωση του εξωτερικού τους πορώδους μέσω χημικών μεθόδων, μεθόδων υψηλών θερμοκρασιών καθώς και εναλλακτικών μεθόδων διόγκωσης.
2. Στην περαιτέρω μελέτη και βελτιστοποίηση της κλασσικής μεθόδου διόγκωσης, αλλά και στην πληρέστερη κατανόηση του μηχανισμού της διόγκωσης του περλίτη.

### 2.6.1. Νέες εφαρμογές του περλίτη

#### 2.6.1.1. Υλικό αντικατάστασης της ποζολάνης

Ο αδιόγκωτος λεπτομερής περλίτης χαρακτηρίζεται από ποζολανικές ιδιότητες, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του σε άμορφο πυρίτιο (περισσότερο από 70%), και μπορεί να αντικαταστήσει διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα ποζολάνης κατά την παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος (Singh and Garg, 1991).

#### 2.6.1.2. Αντικατάσταση των πυριτικών ορυκτών σε διάφορους τομείς της χημικής βιομηχανίας.

Σε αρκετούς τομείς της χημικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται χαλαζίας, άστριοι και άλλα πυριτικά ορυκτά κατά την παραγωγή διαφόρων ανόργανων προϊόντων, όπως πυριτικό νάτριο, πυριτικό ασβέστιο και διάφοροι τύποι υάλου στην υαλουργία. Ο περλίτης αποτελεί υλικό αντικατάστασης των παραπάνω πρώτων υλών, κυρίως λόγω της μεγάλης δραστικότητας του πυριτίου που περιέχει αλλά και του γεγονότος ότι αποτελεί σημαντικό δότη αλκαλίων ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) και αλούμινας ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) σε ποσοστά 9 και 13 %, αντίστοιχα.

#### 2.6.1.3. Μορφοποιημένα δομικά υλικά με περλίτη και ανόργανα συστατικά

Στο δυτικό κόσμο παρατηρείται μια τάση μεταστροφής σχετικά με τα δομικά υλικά. Προτιμούνται μορφοποιημένα ελαφροβαρύ υλικά με καλές θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες και αντοχή σε συνθήκες πυρκαγιάς. Επιπλέον, οι νέες ευρωπαϊκές και αμερικανικές οδηγίες στον κατασκευαστικό τομέα συγκλίνουν προς την κατεύθυνση των ενεργειακά αποδοτικών, οικολογικών και ασφαλών κτηρίων. Πολλά από τα υλικά που παρουσιάζουν τις παραπάνω ιδιότητες, και κατά κύριο λόγο τα ελαφροβαρύ, είναι συνθετικά, και προέρχονται από οργανικές πρώτες ύλες, ενώ τα ανόργανα βιομηχανικά ορυκτά και μέταλλα που αποτελούν πιθανά ανταγωνιστικά υλικά, κατέχουν μικρό μερίδιο στη συγκεκριμένη αγορά. Υπάρχει λοιπόν ένα σημαντικό κενό στην αγορά που ο περλίτης, μόνος ή σαν συστατικό σε μείγματα μαζί με άλλα βιομηχανικά ορυκτά, μπορεί να καλύψει προσφέροντας τελικά προϊόντα προηγμένων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών που θα εκτοπίσουν τα συνθετικά οργανικά προϊόντα στις συγκεκριμένες αγορές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>. Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΟΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ

Η διόγκωση του περλίτη αποτελεί την πλέον σημαντική τεχνητή διεργασία στην οποία υπόκειται το πέτρωμα από την άποψη των αλλαγών που επιφέρει στα μορφολογικά χαρακτηριστικά του. Επιδρά κυρίως στα φυσικά χαρακτηριστικά του κόκκου, ενώ το διογκωμένο προϊόν οπτικά τουλάχιστον δεν θυμίζει σε τίποτα τη μορφή που είχε πρωτογενώς: οι αδιόγκωτοι κόκκοι περλίτη έχουν συνήθως χρώμα ανοιχτό έως σκούρο γκρι (σπανιότερα καφέ ή πράσινο) και είναι συμπαγείς και στιβαροί, ενώ μετά την διόγκωση αποκτούν λευκό χρώμα, αρκετά χαμηλό ειδικό βάρος και έντονα κυψελοειδή δομή με πλήθος φυσαλίδων αέρα που με προσεκτική παρατήρηση διακρίνονται και με το μάτι.

Η διόγκωση του περλίτη απαιτεί τη συνέργεια δυο φαινομένων τα οποία και εκτυλίσσονται ταυτόχρονα κατά τη θέρμανση του κόκκου:

1. Η θέρμανση του κόκκου προκαλεί αύξηση της ενθαλπίας του νερού το οποίο με τη σειρά του ασκεί πίεση στα τοιχώματα του κόκκου. Το νερό στην επιφάνεια του κόκκου εξατμίζεται και απελευθερώνεται στο περιβάλλον, ενώ το νερό στο εσωτερικό του ασκεί πιέσεις στη μάζα του κόκκου.
2. Η αύξηση της θερμοκρασίας του κόκκου επιδρά στη μείωση του ιξώδους και την μαλάκυνση του τεμαχιδίου.

Αρχικά λοιπόν η θερμοκρασία του κόκκου αυξάνει και όταν ξεπεράσει τη θερμοκρασία μαλάκυνσης της υαλώδους φάσης, το νερό που απελευθερώνεται δημιουργεί φυσαλίδες, οι οποίες δίνουν τη γνωστή αφρώδη δομή που χαρακτηρίζει τους διογκωμένους περλίτες.

Παρά το γεγονός ότι η διόγκωση του περλίτη ως διεργασία εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα από το 1950 περίπου, ο μηχανισμός της δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως. Για την ακρίβεια, περιορισμένη είναι η γνώση σχετικά με τα είδη των νερών που συναντώνται στον περλίτη (ποιοτικά και ποσοτικά), με τους δεσμούς που σχηματίζουν με το αργιλοπυριτικό πλέγμα άλλα και με τη συμβολή του κάθε είδους στην διόγκωση. Οι λόγοι είναι κυρίως τεχνικοί. Ο πολύ γρήγορος ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου της διόγκωσης αλλά και η σχετικά μεγάλη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα, δυσχεραίνουν τη διερεύνησή του. Η μελέτη της απαιτεί χρονικό συντονισμό μεταξύ των επιμέρους φαινομένων, ενώ η μελέτη του φαινομένου σε μικρότερους ρυθμούς θέρμανσης, όπου η μέτρηση διαφόρων παραμέτρων είναι ευκολότερη (θερμοκρασία, βάρος και



ιξώδες κόκκου), είναι αδύνατη, διότι ο υψηλός ρυθμός θέρμανσης αποτελεί προϋπόθεση για τη διόγκωση του περλίτη.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο μηχανισμός της διόγκωσης του περλίτη και οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη του φαινομένου. Το φαινόμενο της διόγκωσης δεν είναι χαρακτηριστικό μόνο του περλίτη, αλλά και των υπολοίπων ηφαιστειακών υάλων. Το φαινόμενο πραγματοποιείται υπό συγκεκριμένες συνθήκες για κάθε μία από αυτές, ενώ από την άποψη της βιομηχανικής εφαρμογής, ευνοϊκότερες συνθήκες ως προς το χρόνο και τη θερμοκρασία διόγκωσης απαιτεί ο περλίτης.

Απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε να διογκώνεται μία ηφαιστειακή ύαλος αποτελούν (Παπαθεοδώρου, 1991):

1. Η ύπαρξη νερού χημικά δεσμευμένου στο πλέγμα της υάλου.
2. Το σημείο μαλάκυνσης της υάλου να είναι σχετικά χαμηλό.
3. Μέρος του περιεχομένου νερού να μένει συνδεδεμένο με το πλέγμα της υάλου μέχρι να φτάσει τη θερμοκρασία μαλάκυνσής της (πυροκλαστικό στάδιο) και η μάζα του κόκκου να πλαστικοποιηθεί

Εφόσον ο κόκκος είναι στο πυροκλαστικό στάδιο, η έκλυση αερίων (ατμού) από αυτόν οδηγεί σε παραμόρφωση της μαλακής μάζας και σε σχηματισμό φυσαλίδων και δίοδων αερίου.

### **3.1. Παράγοντες που επιδρούν στην διόγκωση**

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διόγκωση του περλίτη είναι το ποσοστό του νερού που περιέχει στη μάζα του και η ποιότητα αυτού, η θερμοκρασία και η διάρκεια θέρμανσης του. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος που οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν το φαινόμενο της διόγκωσης.

#### **3.1.1. Το νερό**

Το νερό που περιέχεται στον περλίτη διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο στη διόγκωση του. Η περιεκτικότητα του περλίτη σε νερό κυμαίνεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων από 2 μέχρι 5 % κ.β, ενώ η διάκριση του νερού αυτού σε κατηγορίες έχει αποτελέσει αντικείμενο αρκετών δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών. Βάσει λοιπόν των κατηγοριοποιήσεων που συναντώνται στη βιβλιογραφία, οι διαφορετικές ομάδες που το αποτελούν διαφέρουν ως προς:

- τη χημική τους μορφή και τον τρόπο σύνδεσής τους στο αργιλοπυριτικό πλέγμα

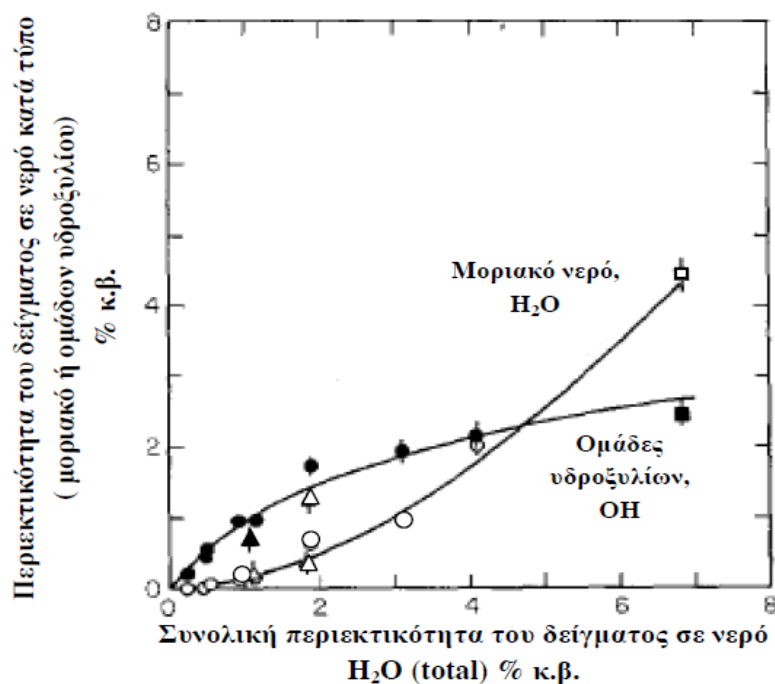
- τη θερμοκρασία απελευθέρωσης τους
- την επίδραση τους στη διόγκωση

Από χημικής άποψης η Ρούλια διαχωρίζει το νερό του περλίτη σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Ρούλια, 1996):

- Νερό παγιδευμένο σε πόρους ποικίλων διαστάσεων, οι οποίοι είναι δυνατόν να καταλήγουν στην εξωτερική επιφάνεια του κόκκου μέσω καναλιών και διασυνδέσεων.
- Νερό που μετατράπηκε σε υδροξείδιο, επειδή κάποιο κατιόν του πλέγματος αντικαταστάθηκε από άλλο κατιόν μικρότερου φορτίου (π.χ.  $Si^{4+}$  από  $Al^{3+}$ ) και η ελάττωση του θετικού φορτίου πρέπει, σύμφωνα με την αρχή της ηλεκτρουδετερότητας, να αντισταθμισθεί από αντίστοιχη ελάττωση και του αρνητικού φορτίου που στην προκειμένη περίπτωση γίνεται με τη μετατροπή των  $O^{2-}$  σε  $OH^-$ .
- Νερό συντάξεως αντισταθμιστικών κατιόντων π.χ. Fe (II) ή Fe (III).
- Νερό συνδεδεμένο με δεσμούς υδρογόνου επιφανειακά με το αργιλοπυριτικό πλέγμα.

Φαίνεται λοιπόν ότι το νερό δεν εμφανίζεται στον περλίτη μονό στην κλασική του μορφή αλλά και σε ομάδες υδροξυλίων που συνθέτουν διαφόρων τύπων δεσμούς με το πυριτικό πλέγμα (Ihinger et al., 1999; Dalakishvili, 2005; Roulia et al., 2006; Denton et al., 2009). Λόγω του γεγονότος ότι η θερμοκρασία στην οποία απελευθερώνεται το κάθε είδος νερού διαφέρει ανάλογα με τη μορφή του και το είδος του δεσμού με τον οποίο συνδέεται με το πυριτικό πλέγμα, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της αναλογίας μεταξύ του μοριακού νερού και των ομάδων υδροξυλίων που συναντώνται στις ηφαιστειακές υάλους.

Ο Stolper, μέσω της υπέρυθρης φασματοσκοπίας, μελέτησε ποσοτικά την εμφάνιση μοριακού νερού και ομάδων υδροξυλίου σε 19 ηφαιστειακές και τεχνητές πυριτικές υάλους των οποίων η συνολική περιεκτικότητα σε νερό κυμαινόταν από 0.06 έως 6.9% κατά βάρος (Stolper, 1982). Τα δείγματα που μελέτησε αποτελούνταν από φυσικές υάλους βασαλτικού και ρυολιθικού τύπου, από συνθετικές υάλους αλβιτικού τύπου καθώς επίσης και από τεχνητά ενυδατωμένους οψιδιανούς. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η περιεκτικότητα των πετρωμάτων σε μοριακό νερό αλλά και σε ομάδες υδροξυλίων συναρτήσει της συνολικής ποσότητας των δειγμάτων σε νερό.



Σχήμα 3.1. Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε μοριακό νερό (H-O-H, άσπρα σχήματα) και σε ομάδες υδροξυλίου (X-OH όπου X=Si, Al, μαύρα σχήματα) συναρτήσει της συνολικής περιεκτικότητας των δειγμάτων σε νερό κατά E. Stolper (Stolper, 1982). Συμβολισμός: κύκλοι = ρουλιθικές ύαλοι, τρίγωνα = βασαλτικές ύαλοι, τετράγωνα = αρβιτικές ύαλοι.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 3.1 όταν η συνολική περιεκτικότητα της υάλου σε νερό είναι μικρή, αυτό συναντάται κατά κύριο λόγο σε μορφή ομάδων υδροξυλίου. Όσο η περιεκτικότητα της υάλου σε συνολικό νερό αυξάνει, τόσο αυξάνει και η περιεκτικότητα του πετρώματος σε μοριακό νερό έναντι των ομάδων υδροξυλίου. Σε όλο το φάσμα περιεκτικότητας που εξετάζεται, ο λόγος μεταξύ της μάζας του μοριακού νερού προς τη μάζα των ομάδων υδροξυλίων αυξάνει, ενώ σε χαμηλές περιεκτικότητες των δειγμάτων σε συνολικό νερό (< 1 %), πρακτικά το μοριακό νερό τείνει στο μηδέν, αφού οι ομάδες υδροξυλίου επικρατούν ποσοτικά. Επιπροσθέτως, ο ερευνητής σημειώνει ότι σε δείγματα με συνολική περιεκτικότητα σε νερό μικρότερη του 0.5% δεν εντοπίστηκε καθόλου νερό σε μοριακή μορφή. Επίσης, παρατηρεί ότι πρακτικά το νερό που συναντάται σε ομάδες υδροξυλίων έχει ασύμπτωτη τιμή το 3%, και εφόσον η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε ομάδες υδροξυλίου προσεγγίσει την τιμή αυτή, οποιαδήποτε επιπλέον ποσότητα νερού συναντάται μόνο σε μοριακή μορφή. Η παρατήρηση αυτή συμπίπτει με τα αποτελέσματα των Acocella et al., οι οποίοι μελέτησαν ποσοτικά τις μορφές που συναντάται το νερό και την επίδρασή τους στις ιδιότητες των τεχνητών υάλων πυριτικού νατρίου με μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό 18% κ.β. (Acocella et al., 1984). Στο εύρος περιεκτικότητας νερού 2-5% κατά βάρος, όπου κατατάσσεται ο περλίτης, η επικρατούσα μορφή του νερού είναι το υδροξύλιο. Επιπλέον, όπως είχαν δείξει οι Nasedkin και οι Nasedkin και Panesh, στην περίπτωση του

οφιδιανού απαντώνται μόνο ομάδες υδροξυλίων ενώ στους περλίτες απαντώνται ομάδες υδροξυλίων, και μοριακού νερού (Nasedkin, 1963; Nasedkin and Panesh, 1967)

Ένας σχετικά απλός και πρακτικά εύκολος τρόπος ποσοτικής μελέτης του νερού στον περλίτη αποτελεί η σταδιακή θέρμανσή του και η μέτρηση της μεταβολής της μάζας του σε κάθε θερμοκρασιακή περιοχή, ενώ η μέθοδος προσφέρει τη δυνατότητα κατηγοριοποίησης των διαφόρων τύπων νερού βάσει της θερμοκρασίας απομάκρυνσης τους. Το 1974 παρουσιάστηκαν δύο ανεξάρτητες ερευνητικές εργασίες οι οποίες μελέτησαν την ομαδοποίηση του νερού του περλίτη βάσει της θερμοκρασίας απομάκρυνσης του.

Ο Naert στη διδακτορική του διατριβή ασχολήθηκε με τη γεωλογική ανάλυση και τα χαρακτηριστικά γένεσης περλιτών από το κοίτασμα No Agua στο Νέο Μεξικό των Η.Π.Α (Naert, 1974). Ο ερευνητής μετρήσε την απώλεια βάρους σε 46 δείγματα περλίτη, τα οποία παρέμειναν σε διάφορες θερμοκρασίες (από 115 έως 1000 °C) για χρόνο από 3 έως 25 ώρες. Παρατήρησε, ότι το 89% του συνολικού νερού απομακρύνθηκε με θέρμανση των δειγμάτων σε θερμοκρασία 400 °C για 24 ώρες, το 98.5% σε θερμοκρασία 700 °C ενώ σε θερμοκρασία 950 °C πρακτικά όλο το νερό είχε απομακρυνθεί. Επίσης, με θέρμανση στους 115 °C για 3 και 24 ώρες παρατήρησε απώλεια σε νερό της τάξης του 0.067 % και 0.17 %. Βάσει των παραπάνω, ο Naert συμπέρανε ότι υπάρχουν τρία κομβικά σημεία (σημεία ισορροπίας) που σχετίζονται με την απομάκρυνση των πτητικών στον περλίτη, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και μπορούν να αποτελέσουν χαρακτηριστικά διάκρισης του σε ομάδες.

Πίνακας 3.1. Η διάκριση του νερού στον περλίτη κατά Naert (Naert, 1974).

| Επίπεδο                | Θερμοκρασία | Περιγραφή   |
|------------------------|-------------|---|
| Επίπεδο 1 <sup>ο</sup> | 115°C       | Απομακρύνεται το νερό της επιφανείας  |
| Επίπεδο 2 <sup>ο</sup> | 450°C       | Επέρχεται ισορροπία στην απομάκρυνση του νερού  |
| Επίπεδο 3 <sup>ο</sup> | 950°C       | Επέρχεται ισορροπία μετά από την απομάκρυνση της συνολικής ποσότητας πτητικών από το δείγμα ενώ το δείγμα αρχίζει να τήκεται. |

Στη δεύτερη δημοσιευμένη έρευνα, οι Lehmann και Rossler μελέτησαν το νερό σε δείγματα περλίτη εφαρμόζοντας θερμοσταθμική ανάλυση (Thermogravimetry, TG) και παραγοντική θερμοσταθμική ανάλυση (Differential Thermogravimetry, DTG) (Lehmann and Rossler, 1974). Οι ερευνητές βάσει της απώλειας βάρους των δειγμάτων συναρτήσε του χρόνου διέκριναν 5 τύπους νερού (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2. Κατηγοριοποίηση του νερού στον περλίτη βάσει της θερμοκρασίας απομάκρυνσης του κατά Lehmann και Rossler (Lehmann and Rossler, 1974).

| Τύπος | Θερμοκρασιακό εύρος απομάκρυνσης | Χαρακτηρισμός νερού   | Προέλευση |
|-------|----------------------------------|---|-----------|
| 1     | 80 °C                            | Νερό επιφανείας   | Μετεωρικό |
| 2     | 180 °C - 210 °C                  | Νερό πόρων  | Μετεωρικό |
| 3     | 280 °C - 400 °C                  | Χημικά δεσμευμένο νερό  | Μετεωρικό |
| 4     | 400 °C - 550 °C                  | Χημικά δεσμευμένο νερό (ισχυρότερος δεσμός από το νερό του τύπου 3) | Μετεωρικό |
| 5     | + 650 °C                         | Πολύ ισχυρά χημικά δεσμευμένο νερό                                  | Μαγματικό |

Επιπροσθέτως, οι ερευνητές πραγματοποίησαν διόγκωση δειγμάτων στα οποία προηγουμένως είχε απομακρυνθεί το νερό των τύπων 1 και 2 και παρατήρησαν ότι τα δείγματα διογκώνονταν περισσότερο σε σχέση με τα δείγματα που περιείχαν όλους τους τύπους νερού, συμπεραίνοντας έτσι ότι οι τύποι νερού 1 και 2 δεν συμμετέχουν στη διόγκωση, ενώ παράλληλα απορροφούν και καταναλώνουν (μέσω της αύξησης της ενθαλπίας του νερού και σαν λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του) μέρος της ενέργειας που προσφέρεται για τη διόγκωση, με αποτέλεσμα το ποσοστό της διόγκωσης στα δείγματα που περιείχαν αυτούς τους τύπους νερό να είναι τελικά μειωμένο.

Σε πιο πρόσφατη εργασία, οι Roulia et al. μελέτησαν το νερό που απομακρύνεται από δείγματα περλίτη που θερμαίνονται σε διάφορες θερμοκρασίες ( 150 °C, 250 °C, 400 °C, 550 °C, 740 °C, 950 °C) για χρόνο παραμονής 3 και 15 ωρών. Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης αυτής κατέταξαν το νερό σε τρεις κατηγορίες (τύπος Α, τύπος Β, τύπος C) (Roulia et al., 2006).

Πίνακας 3.3. Ομαδοποίηση των ειδών του νερού κατά Roulia et al. (Roulia et al., 2006).

| Χρόνος θέρμανσης (ώρες) | Ποσοστό του νερού (% w/w) |                       |                       |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                         | Τύπος Α<br>0-250 °C       | Τύπος Β<br>250-550 °C | Τύπος C<br>550-950 °C |
| 3.5                     | 20-45                     | 45-65                 | 5-20                  |
| 15                      | 40-70                     | 20-50                 | 5-20                  |

Κατά τη θέρμανση των δειγμάτων σε θερμοκρασία 950 °C η απώλεια βάρους τόσο για χρόνο παραμονής 3.5 όσο και για 15 ωρών ήταν η ίδια και θεωρήθηκε ότι αυτή η απώλεια εκφράζει το 100 % του νερού του περλίτη. Οι ερευνητές κατηγοριοποιούν τους τύπους του νερού στον περλίτη βάσει της θερμοκρασίας απελευθέρωσής τους και προτείνουν ότι το νερό τύπου Α είναι το μοριακό

νερό, το οποίο είναι χαλαρά προσροφημένο στην επιφάνεια ή στους πόρους του κόκκου, το νερό τύπου *B* είναι ομάδες υδροξυλίου ( $-OH$ ) ή και μοριακό νερό παγιδευμένο στους εσωτερικούς πόρους του υλικού, ενώ το νερό τύπου *C* είναι ομάδες υδροξυλίου ( $-OH$ ), οι οποίες όμως συνδέονται με άτομα οξυγόνου μέσω ισχυρών δεσμών οξυγόνου π.χ. υδροξύλια συνδεδεμένα με ελεύθερα οξυγόνα. Επιπλέον, φαίνεται ότι 20-30% του νερού του περλίτη μπορεί να απελευθερωθεί σε διάφορες θερμοκρασίες ανάλογα με το χρόνο παραμονής του στην κάθε θερμοκρασιακή στάθμη. Αυτό επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία διόγκωσης αλλά και το ρυθμό θέρμανσης του κόκκου. Για τις χαμηλότερες θερμοκρασίες, ο χρόνος θέρμανσης είναι άμεσα συνδεδεμένος με το ποσοστό του νερού που απομακρύνεται και αυτό φαίνεται καθαρά από τις διαφορές στις απώλειες βάρους που παρουσιάζουν δείγματα που θερμάνθηκαν στην ίδια θερμοκρασία για διαφορετικό χρόνο.

Η άμεση συσχέτιση του νερού με το φαινόμενο της διόγκωσης, έχει οδηγήσει αρκετούς επιστήμονες στην κατηγοριοποίηση των τύπων του νερού βάσει της επίδρασής που έχει ο κάθε τύπος στην εξέλιξη του φαινομένου. Όσον αφορά λοιπόν τη διόγκωση, μία ποιοτική διάκριση του νερού του περλίτη, που συχνά συναντάται στην βιβλιογραφία, είναι αυτή που ως κριτήριο χρησιμοποιείται η επίδραση τους στο φαινόμενο της διόγκωσης. Βάσει αυτού του κριτηρίου το νερό του περλίτη διακρίνεται σε τρεις ομάδες:

- Ασθενώς συγκρατούμενο νερό (*wasted water*): Είναι η επιφανειακή υγρασία και η υγρασία των πόρων η οποία και απομακρύνεται από τον κόκκο σε χαμηλή σχετικά θερμοκρασία ( $T < 250^{\circ}C$ ) και δεν επιδρά στη διόγκωση. Αντιθέτως, το νερό αυτής της κατηγορίας καταναλώνει ενέργεια για την εξάτμισή του επιβαρύνοντας την αποδοτικότητα της διεργασίας (Lehmann and Rossler, 1974). Σύμφωνα με τους King et al. Το ποσοστό του ασθενώς συγκρατούμενου νερού μπορεί να φτάσει στο 1.2% κ.β. (King et al., 1948).
- Επιδρών νερό (*effective water*): Είναι το νερό των ομάδων υδροξυλίου και το εγκλωβισμένο στο πλέγμα νερό και απομακρύνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, σε σύγκριση με το ασθενώς συγκρατούμενο νερό. Το νερό αυτού του είδους είναι αυτό που κατά την απελευθέρωση του οδηγεί στη διόγκωση του κόκκου. Θεωρείται ότι σε ένα περλίτη καλής ποιότητας η περιεκτικότητα σε επιδρών νερό είναι 1-2% κ.β. (Παπαθεοδώρου, 1991; Ρούλια, 1996).
- Παραμένον νερό (*residual water*): Το νερό αυτό είναι δεσμευμένο στο πλέγμα με πολύ ισχυρούς δεσμούς, οι οποίοι και δεν «σπάζουν» ακόμα και στη θερμοκρασία διόγκωσης. Το νερό αυτό δεν επιδρά στη διόγκωση, αλλά σε όλη την διάρκεια της θέρμανσης επηρεάζει το ιξώδες του κόκκου και θεωρείται ότι η περιεκτικότητα που έχει ο περλίτης σε αυτού του

είδους το νερό, είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει η διόγκωση.

Ο D. Shackley στη διδακτορική του έρευνα ασχολήθηκε με το χαρακτηρισμό και τη διόγκωση του περλίτη (Shackley, 1988). Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, υπολόγισε το ποσοστό του παραμένου νερού στα διογκωμένα δείγματα σε σχέση με το νερό που περιείχε η πρώτη ύλη. Τα δείγματα που εξέτασε ο ερευνητής διέφεραν ως προς τη χημική σύσταση (8 διαφορετικές πρώτες ύλες) και την κοκκομετρία της πρώτης ύλης, αλλά και ως προς την τελική φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου δείγματος και τις συνθήκες διόγκωσης και έτσι ο ερευνητής δικαιολογεί την απόκλιση που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα. Όσον αφορά τα δείγματα που διογκώθηκαν σε εργαστηριακό φούρνο, η περιεκτικότητά τους σε παραμένον νερό κυμαίνεται από 43 έως 83.2%, με μία μέση τιμή 62.48%. Σχετικά με τα δείγματα που διογκώθηκαν σε βιομηχανική κάμινο, η περιεκτικότητά τους σε παραμένον νερό κυμαίνεται από 20.1 έως 50.2%, με μέση τιμή 34% κ.β. Οι Roulia et al. σημειώνουν ότι τα δείγματα με αρχική περιεκτικότητα σε νερό 2.0-5.0%, μετά την διόγκωση παρουσίαζαν περιεκτικότητα σε νερό από 1.6 έως 1.9% (Roulia et al., 2006).

### **Άλλα πτητικά στον περλίτη**

Η μελέτη της ύπαρξης πτητικών, εκτός του νερού, στον περλίτη είναι σημαντική διότι καθορίζει αν η απώλεια βάρους που παρατηρείται κατά τη θέρμανσή του οφείλεται μερικά ή ολικά στην απώλεια νερού. Όπως φάνηκε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, ο εντοπισμός των ειδών του νερού βασίζεται στην απελευθέρωσή τους κατά τη θέρμανση του περλίτη, ενώ κριτήριο για την κατηγοριοποίησή τους αποτελεί η θερμοκρασία στην οποία απομακρύνεται η κάθε ομάδα. Είναι λοιπόν προφανές, ότι εάν εκτός του νερού απελευθερώνονταν και άλλες πτητικές ουσίες, θα απαιτείτο ταυτοποίηση για την αναγνώριση της ουσίας που απομακρύνεται από το δείγμα στην εκάστοτε θερμοκρασία.

Οι Ross και Smith μελέτησαν την περιεκτικότητα δειγμάτων οψιδιανού, περλίτη και πισσόλιθου σε νερό και άλλα πτητικά συγκρίνοντας την απώλεια σε βάρος που παρουσίαζαν τα δείγματα με θέρμανση στους 1050 °C, με την περιεκτικότητά τους σε νερό (Ross and Smith, 1955). Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι, ενώ η απώλεια βάρους των δειγμάτων μετά τη θέρμανση έφτανε μέχρι και 4.5%, η διαφορά της μάζας αυτής από το περιεχόμενο στα δείγματα νερό διέφερε κατά ποσοστό μικρότερο του 0.005%. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το νερό αποτελεί και το μόνο πτητικό, το οποίο περιέχεται στον περλίτη και απελευθερώνεται μέχρι τους 1050 °C. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι όσο ο βαθμός ενυδάτωσης του πετρώματος αυξάνει, τόσο μειώνεται η περιεκτικότητά του σε πτητικά διαφορετικά από το νερό και πρότειναν ότι η διαδικασία ενυδάτωσης των ηφαιστειακών υάλων λειτουργεί παράλληλα σαν διαδικασία έκπλυσης

των υπολοίπων πτητικών, όπως CO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>. Οι Denton et al. και ο Shackley συγκλίνουν στην άποψη των Ross και Smith και επιπλέον παρατηρούν ότι ακόμα και αν μερικοί περλίτες περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες πτητικών εκτός του νερού, η διόγκωσή τους δεν επηρεάζεται αφού η απελευθέρωσή τους πραγματοποιείται σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή που συμβαίνει η διόγκωση (Denton et al., 2009; Shackley, 1988).

### 3.1.2. Η θερμοκρασία θέρμανσης

Ένας από τους παράγοντες που πρέπει να ρυθμιστούν κατά τη διόγκωση του περλίτη είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία διόγκωσης ποικίλλει ανάλογα με τη χημική σύσταση του περλίτη και για τον λόγο αυτό στη βιβλιογραφία συναντώνται διαφορετικά θερμοκρασιακά διαστήματα εντός των οποίων αναφέρεται ότι λαμβάνει χώρα η διόγκωση του περλίτη (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4. Θερμοκρασιακά διαστήματα διόγκωσης περλίτη που συναντώνται στην βιβλιογραφία

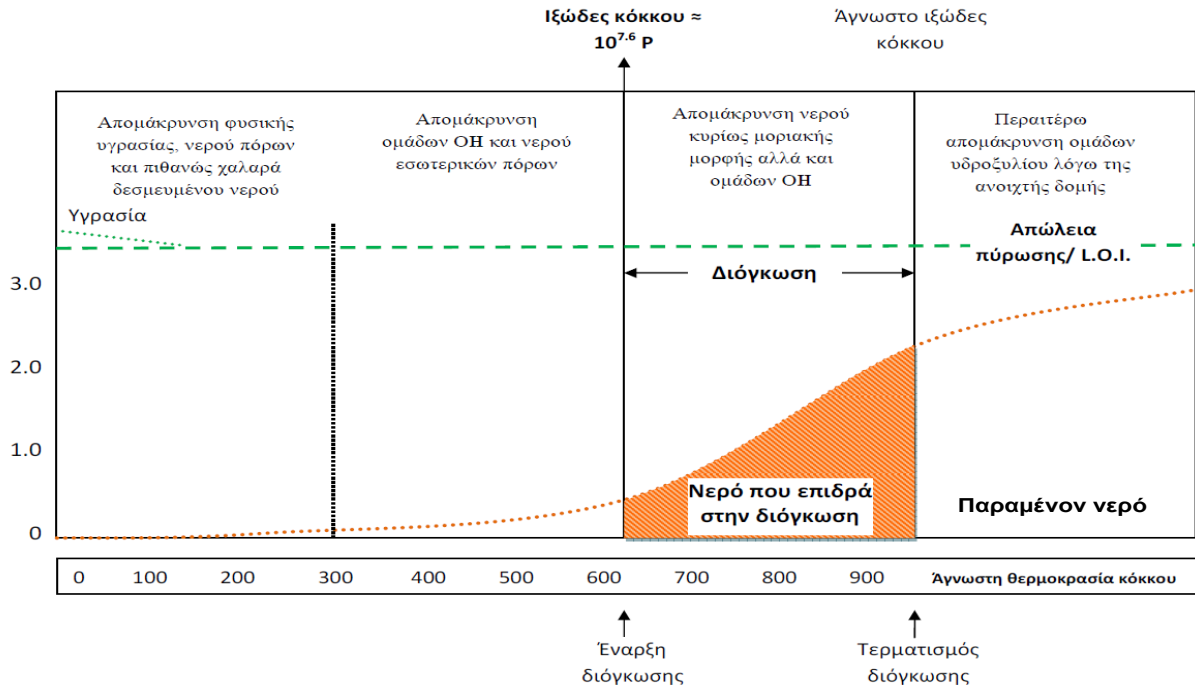
| Θερμοκρασιακό εύρος διόγκωσης, °C | Βιβλιογραφική αναφορά |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 700 – 1260                        | Chatterjee, 2008      |
| 700 – 1000                        | Roulia et al.2006     |
| 800 – 1100                        | Zahringer et al.2001  |
| 800 - 1400                        | Peppas et al. 2006    |
| 870 - 1150                        | Barnes, 1962          |
| > 900                             | Perlite Institute     |

Δύο φαίνονται να είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους παρουσιάζεται η διαφορά αυτή στο θερμοκρασιακό εύρος. Κοιτάσματα διαφορετικής προελεύσεως, και άρα χημικής σύστασης και περιεκτικότητας σε νερό, παρουσιάζουν διαφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες με κυριότερη το ιξώδες, που επιδρά σημαντικά, αφού μέσω αυτού καθορίζεται η θερμοκρασία μαλάκυνσης του περλίτη. Ακόμη, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι δυνατόν να οφείλονται στον ορισμό της έννοιας της διόγκωσης, που δεν προσδιορίζει τον βαθμό προόδου της διεργασίας.

Όσον αφορά στη χημική σύσταση του περλίτη θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του σε αλκάλια (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), τόσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία διόγκωσης του (Φιλιππίδης, 1986). Προς την ίδια κατεύθυνση δρα και το νερό. Η επίδραση των οξειδίων αυτών και του νερού πηγάζει από την επίδραση τους στο ιξώδες του περλίτη. Το νερό άλλα και τα αλκαλικά οξείδια επιδρούν στη μείωση του ιξώδους των πυριτικών τηγμάτων (Zahringer, 1998; Zahringer et al., 2001; Angelopoulos et al., 2012).

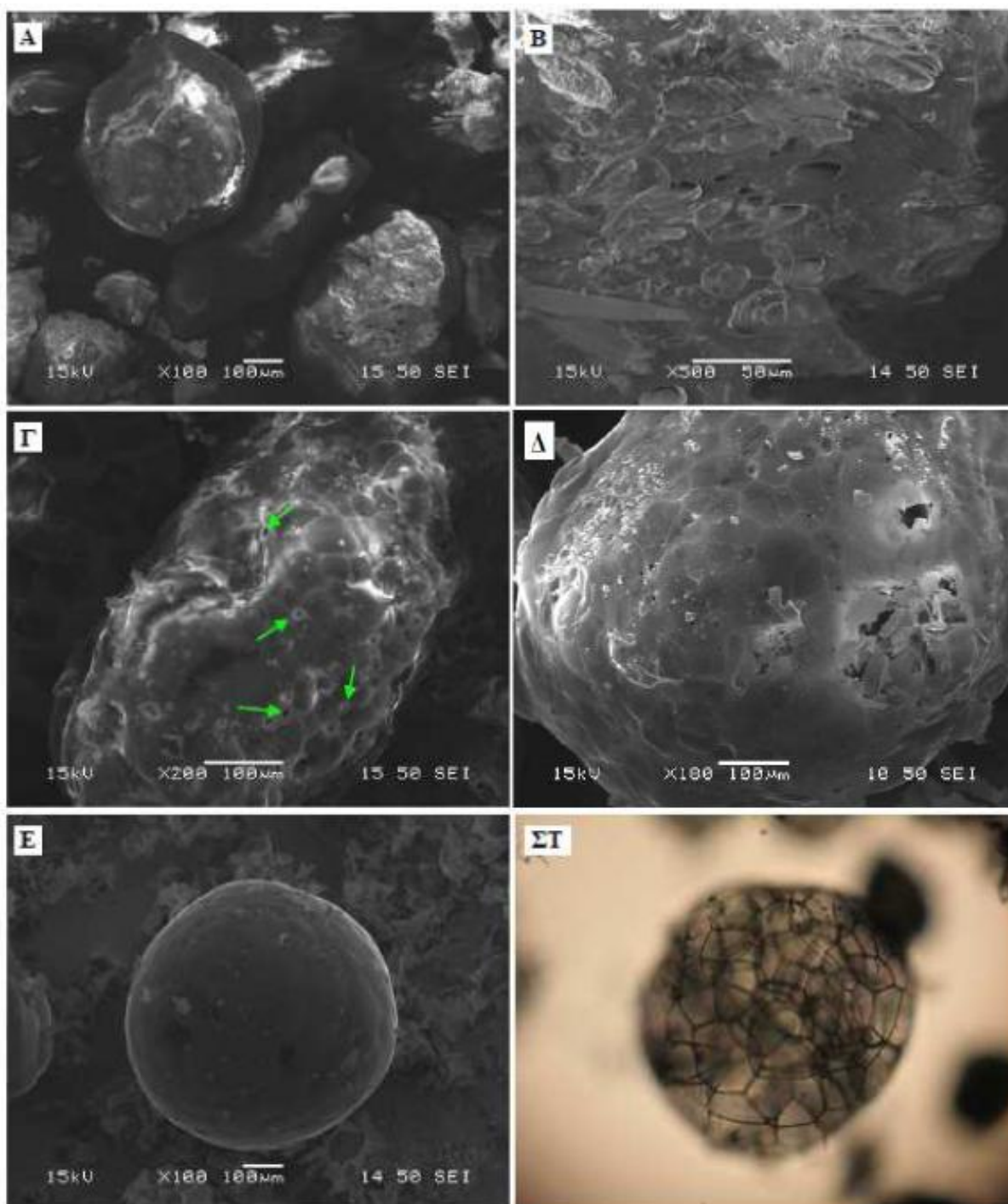


Η θερμοκρασία διόγκωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το πυροκλαστικό σημείο του περλίτη, ο κόκκος δηλαδή πρέπει να μαλακώσει αρκετά, έτσι ώστε το νερό κατά τη διαφυγή του να τον παραμορφώσει, δημιουργώντας πόρους και φυσαλίδες στο εσωτερικό και την επιφάνεια του. Όταν η θερμοκρασία του κόκκου είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μαλάκυνσης, το νερό θα διαφεύγει από την μάζα του χωρίς να δημιουργούνται πόροι στο εσωτερικό του κόκκου. Σε άλλη περίπτωση, όταν η θερμοκρασία του κόκκου είναι αρκετά υψηλότερη από τη θερμοκρασία μαλάκυνσής του, προκαλείται τήξη με ταυτόχρονη καταστροφή της αφρώδους δομής, που ίσως εμφανίστηκε, και τελικά συρρίκνωση του κόκκου. Στην βιομηχανία επεξεργασίας υάλου θεωρείται ότι το σημείο μαλάκυνσης επέρχεται όταν η τιμή του ιξώδους μειωθεί πέραν του  $\mu = 10^{7.6}$  P, έτσι ώστε να μπορεί η ύαλος να υποστεί κατεργασία (εμφύσηση και διαμόρφωση). Ο Shackley βρίσκοντας ομοιότητες μεταξύ της διαδικασίας της εμφύσησης υάλων, και της διόγκωσης περλίτη θεωρεί ότι και το ιξώδες του περλίτη πρέπει να μειωθεί κάτω από την ίδια τιμή ώστε να αρχίσει να διογκώνεται (Shackley, 1988). Κατά τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του κόκκου παρατηρείται συνεχής μείωση του βάρους του λόγω απώλειας νερού. Στο Σχήμα 3.2. παρουσιάζεται η μείωση που επέρχεται στην περιεκτικότητα του κόκκου σε νερό κατά τη αύξηση της θερμοκρασίας του και την διόγκωση. Το διάγραμμα είναι ποιοτικό, και στοχεύει στην κατανόηση της συμπεριφοράς του νερού κατά τη φάση ανόδου της θερμοκρασίας του περλίτη και κατά τη διάρκεια της διόγκωσης και όχι στην παρουσίαση ποσοτικών στοιχείων σχετικά με τις περιεκτικότητες του κόκκου στους διάφορους τύπους νερού και τη θερμοκρασία στην οποία αυτά απελευθερώνονται.



Σχήμα 3.2. Μοντέλο περιγραφής της διόγκωσης του περλίτη κατά Shackley (σημείωση του ερευνητή: οι διάφορες θερμοκρασίες και περιεκτικότητες έχουν επεξηγηματικό στόχο) (Shackley, 1988).

Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η παρακολούθηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών του περλίτη στα διάφορα στάδια διόγκωσής τους, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής θέρμανσης που έχει υποστεί στην κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 3.3 παρατίθενται φωτογραφίες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) στις οποίες απεικονίζονται τεμαχίδια περλίτη στα διάφορα στάδια διόγκωσής τους.



Σχήμα 3.3. Κόκκοι αδιόγκωτου (Α, Β) και διογκωμένου περλίτη σε διάφορες φάσεις (Γ-ΣΤ) όπως φαίνονται σε οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM): Α) Αδιόγκωτοι κόκκοι, Β) η επιφάνεια του αδιόγκωτου κόκκου, Γ) Οι πόροι διαφυγής ατμού κατά τη διάρκεια της διόγκωσης, Δ) Διογκωμένος κόκκος παρουσία διόδων διαφυγής νερού και σπασμένων επιφανειακών πόρων, Ε) Ομοιόμορφη διόγκωση κόκκου με τελικά κλειστά πορώδες, ΣΤ) Η εσωτερική δομή του διογκωμένου κόκκου όπως φαίνεται στο οπτικό μικροσκόπιο.

Αρχικά, η θερμοκρασία του κόκκου αυξάνει και η εξωτερική επιφάνεια του κόκκου, η οποία έχει και τη μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σύγκριση με το κέντρο του, αποβάλλει επιφανειακή υγρασία, το νερό των επιφανειακών πόρων ή των διόδων που επικοινωνούν με την επιφάνειά του, ενώ στην συνέχεια αποβάλλεται το χαλαρά συνδεδεμένο νερό. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το

στάδιο αυτό της απομάκρυνσης επιφανειακού και του χαλαρά συνδεδεμένου νερού δεν είναι διακριτό κατά τη διάρκεια της διόγκωσης, καθώς επικαλύπτεται από το στάδιο της διόγκωσης, το οποίο επέρχεται μετά από 1 sec περίπου, ανάλογα βέβαια με τις συνθήκες διόγκωσης και τα χαρακτηριστικά του κόκκου (μέγεθος, χημική σύσταση), και δεδομένου επίσης ότι η συνολική διάρκεια της διόγκωσης είναι της τάξης των 3 sec. Στη συνέχεια, ενώ η θερμοκρασία του κόκκου αυξάνει νερό αρχίζει να απομακρύνεται από το εσωτερικό του κόκκου μέσω των υπαρχόντων στην επιφάνεια πόρων ή μέσω νέων πόρων και διόδων που δημιουργούνται. Ο ρυθμός απομάκρυνσης του νερού από τον κόκκο αυξάνει με μεγάλη ταχύτητα, διότι η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια έτσι ώστε να σπάσουν ακόμα και ιδιαίτερα ισχυροί δεσμοί, μέσω των οποίων οι ομάδες νερού συγκρατούνται στο πυριτικό πλέγμα. Ορισμένοι επιστήμονες πιστεύουν, ότι στο σημείο αυτό ο κόκκος τήκεται επιφανειακά και σχηματίζεται ένα λεπτό φιλμ το οποίο και φράζει τους επιφανειακούς πόρους διαφυγής του νερού με αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του τεμαχιδίου και ότι σε αυτό ακριβώς το γεγονός οφείλεται η διόγκωση (Lienhardt, 1950; Παπαθεοδώρου, 1991; Roulia et al., 2006). Στην συνέχεια, και ενώ η θερμοκρασία όλου του κόκκου αυξάνει γρήγορα, ο κόκκος «εκρήγνυται» ως αποτέλεσμα της αύξησης της πίεσης στο εσωτερικό του αλλά και λόγω της εισόδου του στην πλαστική περιοχή ο όγκος του αυξάνει αισθητά, ενώ παράλληλα εμφανίζονται στην επιφάνεια του φυσαλίδες οι οποίες γεμίζουν με υδρατμό. Η ύπαρξη διόδων διαφυγής του νερού (ανοικτοί πόροι) κατά τη διάρκεια της διόγκωσης αλλά και η γρήγορη και βίαιη εξέλιξη της διόγκωσης λόγω του υψηλού ρυθμού θέρμανσης οδηγούν σε ανάπτυξη ανοικτού πορώδους στην επιφάνεια του κόκκου. Το ανοικτό πορώδες αυξάνει την ειδική επιφάνεια του κόκκου και επομένως και την απορροφητική του ικανότητα, ιδιότητα η οποία δεν είναι πάντοτε επιθυμητή. Στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια της διόγκωσης δεν υπάρχουν δίοδοι απομάκρυνσης του νερού από τον κόκκο, αυτός διογκώνεται πιο ομοιόμορφα και τελικά αποκτά σχετικά πιο σφαιρικό σχήμα με κλειστό επιφανειακό πορώδες.

### **3.1.3. Επίδραση της διάρκειας της διόγκωσης**

Η διόγκωση είναι μία διεργασία που πρέπει να ολοκληρώνεται εντός στενών χρονικών πλαισίων. Ο Παπαναστασίου υπολογίζει ότι ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 1 έως και 3 sec (Papanastasiou, 1979). Όπως φαίνεται, ο χρόνος αυτός δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο μέγιστο καθώς μετά το πέρας του χρόνου αυτού θεωρείται ότι όλη η ποσότητα του επιδρώντος νερού έχει απελευθερωθεί, ενώ περαιτέρω παραμονή του διογκωμένου κόκκου σε υψηλή θερμοκρασία θα προκαλέσει τήξη, συρρίκνωση και καταστροφή της αφρώδους δομής του. Γενικά, η διάρκεια διόγκωσης εξαρτάται τόσο από τη φύση και την κοκκομετρία του περλίτη, όσο και από την μέθοδο διόγκωσης η οποία ακολουθείται. Οι King et al. αναφέρουν ότι υπάρχουν περλίτες, τους οποίους

χαρακτηρίζουν ως ενεργούς ή ζώντες, και οι οποίοι διογκώνονται γρηγορότερα σε σχέση με άλλους (King et al., 1948; Rouliá et al., 2006). Οι περλίτες της Μήλου ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, διότι η διόγκωσή τους πραγματοποιείται γρήγορα και σε ικανοποιητικό ποσοστό. Η κοκκομετρία ασφαλώς παίζει σημαντικό ρόλο και είναι προφανές ότι λεπτόκοκκα κλάσματα διογκώνονται γρηγορότερα σε σχέση με τα πιο αδρομερή, λόγω του ότι για την ομοιόμορφη διόγκωση του κόκκου απαιτείται η θερμοκρασία σε όλα τα σημεία του να ξεπεράσει την χαρακτηριστική θερμοκρασία μαλάκυνσης. Η σημαντική επίδραση που έχει ο χρόνος θέρμανσης στην εξέλιξη της διόγκωσης φαίνεται χαρακτηριστικά και από μελέτες που έγιναν σε σχέση με την απομάκρυνση του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας σε δείγματα περλίτη, οι οποίες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση του χρόνου παραμονής του περλίτη σε δεδομένη θερμοκρασία αποτελεί μία εξίσου σημαντική παράμετρο που δρα κατά τρόπο ανάλογο με τη θερμοκρασία θέρμανσης του δείγματος.

### 3.2. Βιομηχανικές κάμινοι διόγκωσης

Οι δεκαετίες του 1940 και 1950 χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση διαφορετικών τύπων καμίνων διόγκωσης, οι οποίες αποτελούσαν ουσιαστικά ιδιοκατασκευές των εταιρειών διόγκωσης. Με δεδομένο το γεγονός ότι ο μηχανισμός της διόγκωσης δεν ήταν πλήρως αποσαφηνισμένος, η κάθε εταιρεία ανέπτυξε τη δική της μέθοδο διόγκωσης, ώστε να μπορεί να κατεργάζεται περλίτη δεδομένης χημικής σύστασης με απώτερο σκοπό την παραγωγή διογκωμένου προϊόντος, το οποίο να χαρακτηρίζεται από τις επιθυμητές κάθε φορά ιδιότητες. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των καμίνων αυτών αποτελούσε η θέρμανσή τους με καυστήρες πετρελαίου και η εφαρμογή εσωτερικής επένδυσης στην εσωτερική τους επιφάνεια, σκοπεύοντας κυρίως στο να μειωθούν οι θερμικές απώλειες. Οι κύριες τύποι καμίνων διόγκωσης που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνταν στην πρώιμη περίοδο της παραγωγής περλίτη σε βιομηχανικό επίπεδο είναι (Barnes, 1962):

- Οριζόντια σταθερή κάμινοι με ή χωρίς προθερμαντήρα αέρα
- Κάθετη σταθερή κάμινοι
- Περιστροφική κάμινοι διαφόρων διαστάσεων με ομοροπή αέρα και υλικού
- Περιστροφική κάμινοι με αντιρροή αέρα και υλικού
- Κάμινοι πολλαπλών εστιών

Οι παραπάνω κάμινοι συνοδεύονταν συχνά από προθερμαντήρα της πρώτης ύλης του οποίου η θερμοκρασία δεν ξεπερνούσε τους 400 °C.

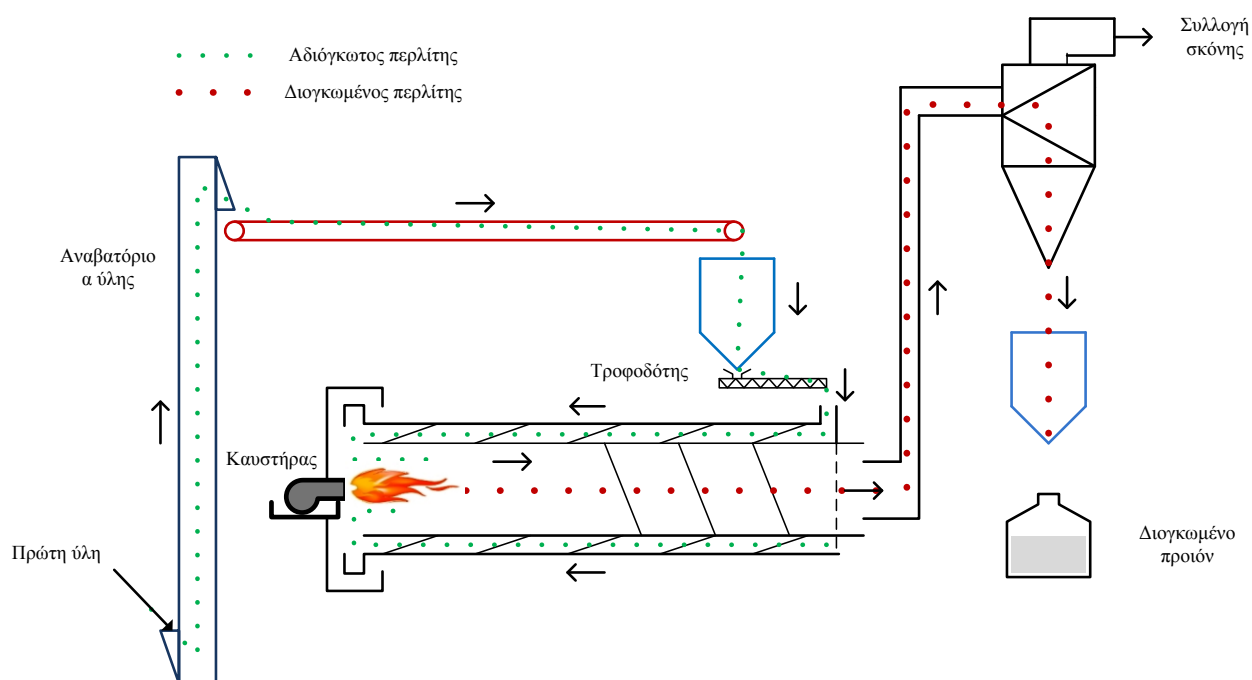
Σήμερα, στη βιομηχανία διόγκωσης περλίτη, χρησιμοποιούνται δυο μεγάλες κατηγορίες καμίνων διόγκωσης, οι κάθετες και οι οριζόντιες. Στην περίπτωση των καθέτων καμίνων, βασική διαφορά μεταξύ των διαφόρων τύπων καμίνων που χρησιμοποιούνται έγκειται στον προθερμαντήρα της πρώτης ύλης: υπάρχουν οι εξής παραλλαγές (Shackley, 1988; Allen, 1992; Αγγελόπουλος, 2007):

- Κάθετη κάμιнос χωρίς προθερμαντήρα πρώτης ύλης.
- Κάθετη κάμιнос με ξεχωριστό προθερμαντήρα πρώτης ύλης.
- Κάθετη με ενσωματωμένο προθερμαντήρα πρώτης ύλης.

Οι αρχές λειτουργίας των κυριότερων τεσσάρων τύπων καμίνων που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία περλίτη παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

### 3.2.1. Οριζόντια κάμιнос διόγκωσης

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της οριζόντιας καμίνου διόγκωσης περλίτη.



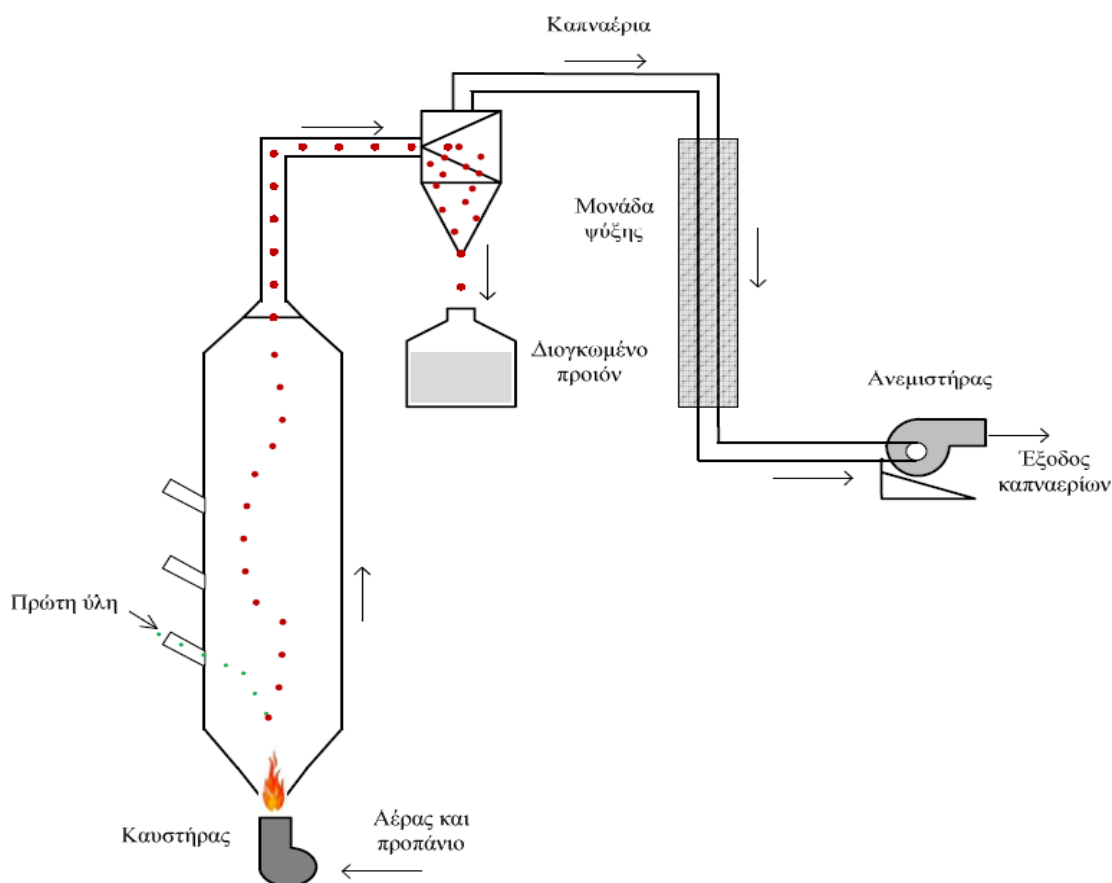
Σχήμα 3.4. Οριζόντια κάμιнос διόγκωσης περλίτη (Shackley, 1988; Allen, 1992).

Η κάμιнос είναι τοποθετημένη σε οριζόντια θέση και μπορεί να περιστρέφεται. Στο ένα άκρο της είναι τοποθετημένος καυστήρας πετρελαίου ή φυσικού αερίου, ενώ η εξαγωγή του διογκωμένου προϊόντος γίνεται από το άλλο άκρο. Η κάμιнос αποτελείται από τρεις ομόκεντρους σωλήνες εκ των οποίων ο εσωτερικός είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν, ενώ οι δύο υπόλοιποι από κοινό χάλυβα. Οι τρεις ομόκεντροι

σωλήνες δημιουργούν δύο χώρους, όπου κινείται το προς διόγκωση υλικό μέσω σπειρών. Οι χώροι αυτοί θερμαίνονται έμμεσα από τον καυστήρα και χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του αδιόγκωτου περλίτη. Ο προθερμασμένος αδιόγκωτος περλίτης εισάγεται στη φλόγα (κύριος θάλαμος) όπου η κίνησή του πραγματοποιείται πνευματικά. Η ύπαρξη σπειρών στην πλευρά εξόδου του κύριου θαλάμου αποσκοπεί στην απομάκρυνση των τεμαχιδίων που δεν μπόρεσαν να απομακρυνθούν πνευματικά. Η τροφοδοσία του κυκλώματος πραγματοποιείται με κοχλιοφόρο ή δονούμενο τροφοδότη, ενώ η συλλογή του διογκωμένου προϊόντος με κυκλώνα. Τα λεπτόκοκκα κλάσματα συγκρατούνται σε σακκόφιλτρα. Η ταξινόμηση του διογκωμένου περλίτη ανάλογα με την κοκκομετρία του πραγματοποιείται, εφόσον είναι απαραίτητη, με κόσκινα ή αέρια ταξινόμηση.

### 3.2.2. Κάθετη κάμινος χωρίς προθερμαντήρα

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η διάταξη της κάθετης καμίνου διόγκωσης περλίτη, απουσία συστήματος προθέρμανσης της πρώτης ύλης.



Σχήμα 3.5. Κάθετη κάμινος διόγκωσης περλίτη χωρίς προθερμαντήρα (Αγγελόπουλος, 2007).

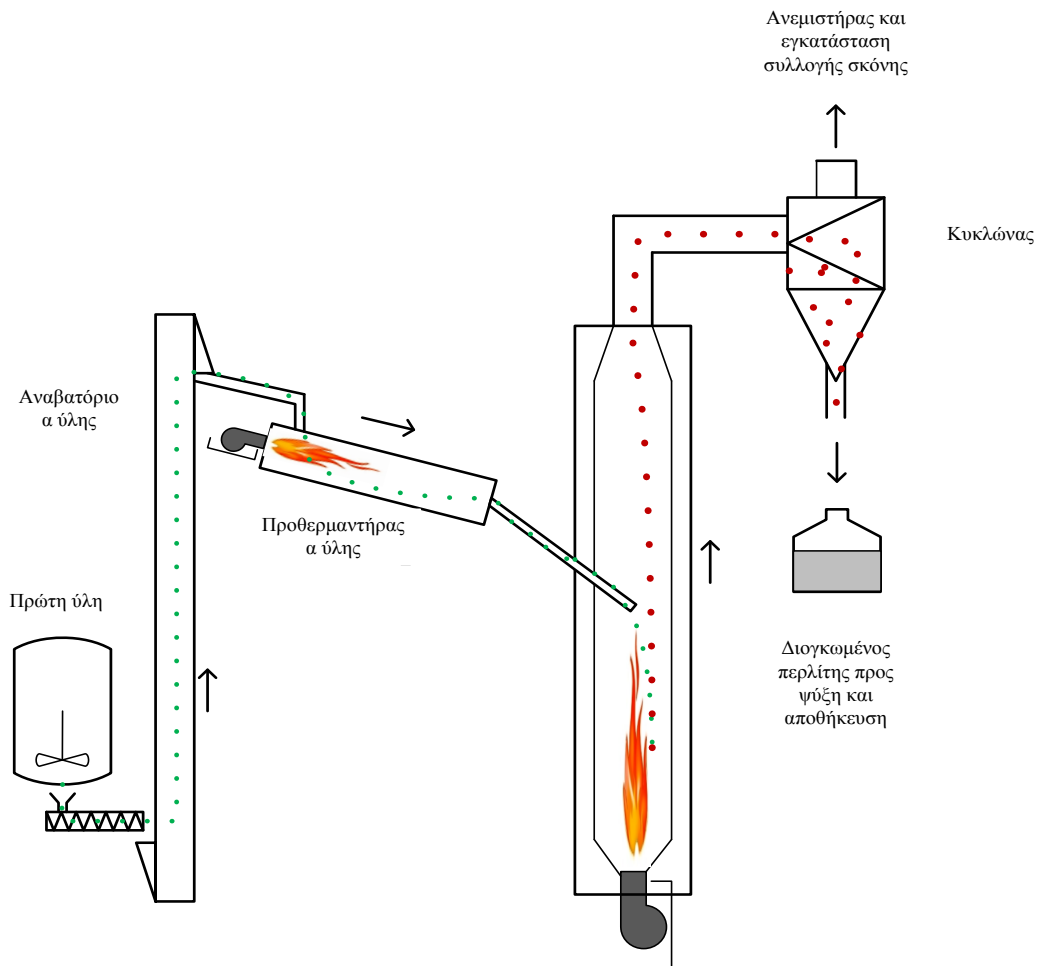
Πειραματικές δοκιμές διόγκωσης σε βιομηχανικές καμίνους έδειξαν ότι το στάδιο προθέρμανσης της πρώτης ύλης μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να παραληφθεί καθώς δεν βελτίωσε την ποιότητα του προϊόντος και την παραγωγικότητα του συστήματος. Η χημική σύσταση

και η κοκκομετρία της πρώτης ύλης αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες, βάσει των οποίων επιλέγεται αν θα γίνει προθέρμανση της πρώτης ύλης ή όχι. Στην απλοποιημένη τους μορφή, οι κάθετες κάμινοι χωρίς προθερμαντήρα αποτελούνται από έναν κάθετο σωλήνα κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, στη βάση του οποίου υπάρχει καυστήρας πετρελαίου ή προπανίου. Η πρώτη ύλη εισέρχεται από πλευρικές σχισμές στο θάλαμο διόγκωσης. Η κατάλληλη απόσταση εισόδου σε σχέση με τη φλόγα επιλέγεται από το χειριστή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αδιόγκωτου περλίτη και το επιθυμητό ποσοστό διόγκωσης. Αρχικά, οι αδιόγκωτοι κόκκοι κινούνται καθοδικά λόγω της βαρύτητας, ενώ η πορεία τους αυτή ανακόπτεται όταν διογκωθούν. Στο σημείο που η άνωση υπερνικά τη βαρύτητα η κατεύθυνση κίνησης του κόκκου αλλάζει και τελικά κόκκοι και καπναέρια κινούνται προς το επάνω τμήμα της καμίνου. Ο έλεγχος της τροφοδοσίας, της ταχύτητας του ανοδικού ρεύματος αλλά και του σημείου εισόδου του υλικού, αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες της διεργασίας σε αυτό τον τύπο καμίνου, λόγω της άμεσης επίδρασης των παραμέτρων αυτών τόσο στη θερμοκρασία εντός του θαλάμου διόγκωσης, αλλά και στο χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων εντός αυτού.

### **3.2.3. Κάθετη κάμιнос διόγκωσης με ξεχωριστό προθερμαντήρα**

Η κάμιнос αυτή (Σχήμα 3.6) διαθέτει ξεχωριστό σύστημα προθέρμανσης της πρώτης ύλης σκοπεύοντας στην απομάκρυνση της επιφανειακής υγρασίας και του ασθενώς συνδεδεμένου νερού, πριν την είσοδο του περλίτη στην κάμινο διόγκωσης. Ο προθερμαντήρας φέρει καυστήρα που λειτουργεί ανεξάρτητα της καμίνου διόγκωσης, ενώ σε μερικές περιπτώσεις η θερμική ενέργεια για την προθέρμανση της πρώτης ύλης εξασφαλίζεται από τη ροή των θερμών απαερίων της κύριας καμίνου στον προθερμαντήρα, με στόχο τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας επομένως και της οικονομικότητας της διεργασίας.



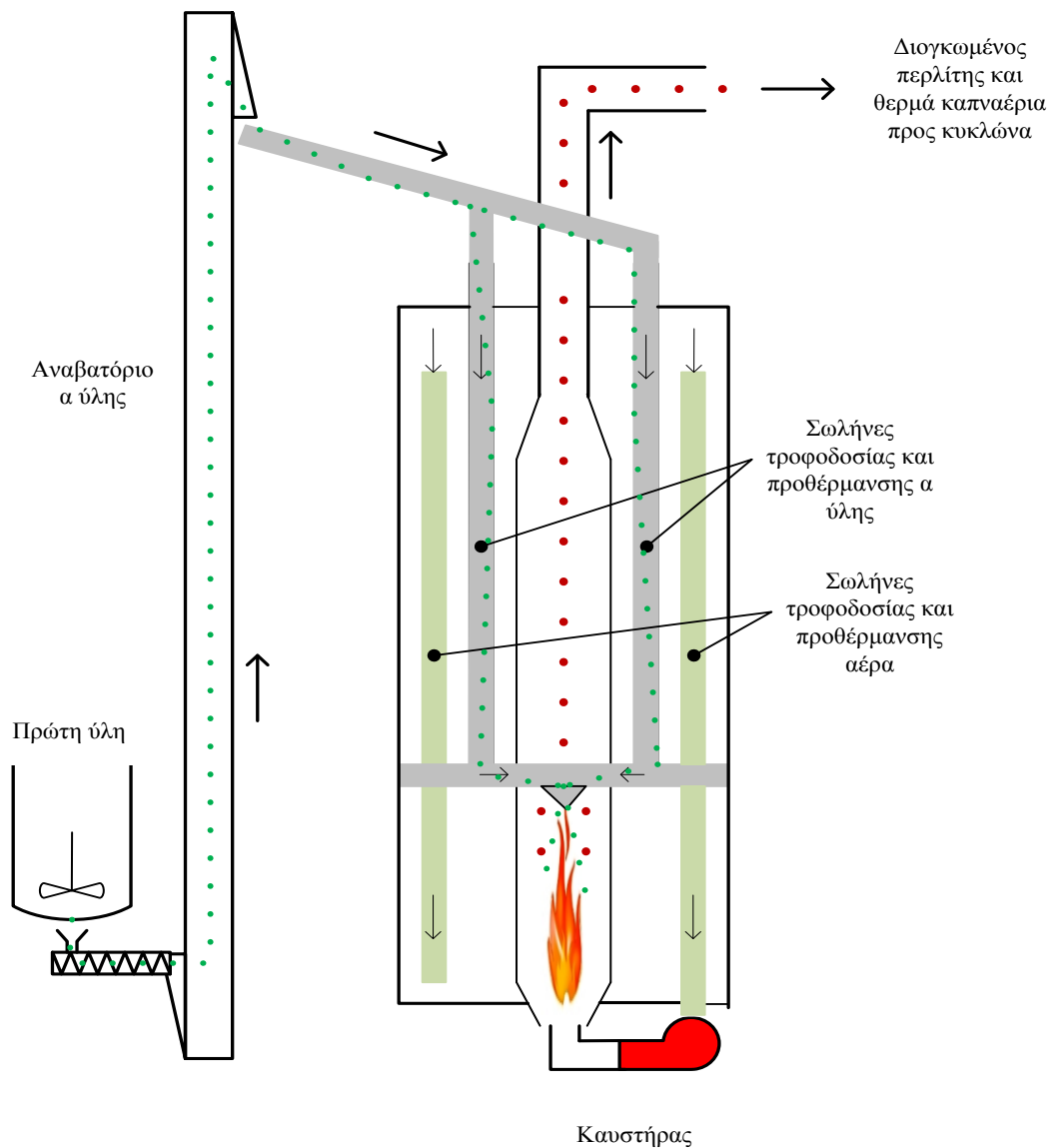


Σχήμα 3.6. Κάθετη κάμινος διόγκωσης περλίτη με ξεχωριστό προθερμαντήρα για την πρώτη ύλη.

Στην περίπτωση αυτή ο προθερμαντήρας λειτουργεί ως μεταλλάκτης θερμότητας και αποτελείται από δυο ομόκεντρους σωλήνες. Στον εξωτερικό κινείται το θερμό ρεύμα των απαερίων ενώ στον εσωτερικό περνάει η πρώτη ύλη.

### 3.2.4. Κάθετη κάμινος διόγκωσης με ενσωματωμένο προθερμαντήρα

Η διάταξη της καμίνου αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7. Κάθετη κάμινος διόγκωσης περλίτη με ενσωματωμένο σύστημα προθέρμανσης του αέρα και την πρώτης ύλης (Allen, 1992).

Η κάμινος αυτή είναι το αποτέλεσμα της προσπάθειας συνδυασμού της προθέρμανσης και της διόγκωσης του περλίτη σε μία συσκευή. Η κάμινος αποτελείται από τρεις ομόκεντρους σωλήνες, ενώ στη βάση της υπάρχει καυστήρας πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Ο εξωτερικός σωλήνας λειτουργεί μονωτικά και συγκρατεί τη θερμότητα εντός της συσκευής, ενώ η διόγκωση πραγματοποιείται στον εσωτερικό θάλαμο. Το αναβατήριο που συνδέει το σιλό της πρώτης ύλης και την κάμινος, επιτρέπει τη ρύθμιση της τροφοδοσίας. Η πρώτη ύλη περνά από τέσσερις σωλήνες τροφοδοσίας που βρίσκονται μεταξύ του εσωτερικού και του μεσαίου σωλήνα του κύριου σώματος, και ενώνονται τελικά σε δύο ή έναν. Η τροφοδότηση της προθερμασμένης πρώτης ύλης πραγματοποιείται με κοχλιοφόρο τροφοδότη. Κατά τη διάρκεια της διόγκωσης, ο σωλήνας τροφοδοσίας μπορεί να είναι γεμάτος με πρώτη ύλη· στην περίπτωση αυτή η τροφοδοσία της ρυθμίζεται από τον κοχλιοφόρο τροφοδότη, υπάρχει όμως και η δυνατότητα ο σωλήνας

τροφοδοσίας να μην είναι γεμάτος με πρώτη ύλη έτσι ώστε να ελέγχεται μέσω των δύο τροφοδοτών ο χρόνος παραμονής της πρώτης ύλης στον προθερμαντήρα. Η δεύτερη αυτή περίπτωση επιλέγεται όταν η υγρασία της πρώτης ύλης είναι μεγάλη (> 2.5%). Ο χρόνος παραμονής του περλίτη στο θάλαμο διόγκωσης εξαρτάται από την ταχύτητα των ανοδικών ρευμάτων, ενώ τα μη διογκώσιμα τεμαχίδια πέφτουν και απομακρύνονται από ειδική σχισμή στην κωνική βάση της καμίνου. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα προθέρμανσης του αέρα ο οποίος τροφοδοτείται στον καυστήρα.

### **3.2.5. Χαρακτηριστικά λειτουργίας συμβατικών τεχνικών διόγκωσης περλίτη**

Τα συστήματα διόγκωσης περλίτη που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι αυτά που συναντώνται συχνότερα σε βιομηχανική κλίμακα. Σαφέστατα υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτών όσον αφορά στις διαστάσεις και την δυναμικότητα των επιμέρους συσκευών (κυκλώνες, ανεμιστήρες, καυστήρες και θάλαμοι καύσης) αλλά και τη σειρά διάταξής τους. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεθόδων διόγκωσης που επικρατούν σήμερα, αποτελεί το γεγονός ότι η πρόσδοση της απαιτούμενης ενέργειας για τη θέρμανση και τελικά την διόγκωση του περλίτη, πραγματοποιείται από καυστήρα πετρελαίου, φυσικού αερίου ή προπανίου. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις το διογκωμένο προϊόν παρασύρεται από τα θερμά καπναέρια και το ρεύμα στερεών-αερίων κινείται ομόρροπα, ενώ ο διαχωρισμός στερεών-αερίων γίνεται μέσω κυκλώνα.

Σχετικά με τη διόγκωση των τεμαχιδίων, η πρώτη ύλη τροφοδοτείται στο θάλαμο διόγκωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εκτός των περιπτώσεων που χρησιμοποιείται προθερμαντήρας. Η εισαγωγή της πρώτης ύλης στον θάλαμο διόγκωσης γίνεται από κατάλληλη θυρίδα, ενώ η απόσταση της θυρίδας από την φλόγα του θαλάμου διόγκωσης επιλέγεται από τον χειριστή. Τα τεμαχίδια που εισέρχονται στον θάλαμο διόγκωσης κινούνται αρχικά καθοδικά λόγω της επικράτησης της δύναμης της βαρύτητας, ενώ η θερμοκρασία τους αυξάνει ταχύτατα. Η καθοδική κίνηση των τεμαχιδίων επηρεάζεται από τα ανοδικά καπναέρια, που παράγονται από την φλόγα του καυστήρα. Λόγω της ταχύτητας των καπναερίων είναι δυνατόν, σε περίπτωση που η κοκκομετρία του τροφοδοτούμενου περλίτη είναι πολύ μικρή, οι κόκκοι να κινηθούν απευθείας ανοδικά χωρίς να εξασφαλιστεί ο απαραίτητος χρόνος θέρμανσης που θα οδηγήσει στη διόγκωσή τους. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη ρύθμιση των συνθηκών λειτουργίας της καμίνου, κυρίως του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα και του ρυθμού λειτουργίας του ανεμιστήρα. Σε άλλη ακραία περίπτωση μπορεί η ταχύτητα των αερίων να είναι τόσο μικρή, με αποτέλεσμα τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια να συνεχίσουν την καθοδική τους πορεία και τελικά να εξέλθουν αδιόγκωτα ή κατεστραμμένα από το κατώτερο άνοιγμα του θαλάμου διόγκωσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η δημοσιευμένη εργασία του Παπαναστασίου η οποία παρουσιάστηκε το 1979 και ανέφερε την πρώτη μαθηματική μελέτη της κίνησης και θέρμανσης του

αέρα και του περλίτη στον θάλαμο διόγκωσης της κάθετης έμφλογης καμίνου (Papanastasiou, 1979). Στη μελέτη αυτή γίνεται συσχετισμός της οριακής ταχύτητας των τεμαχιδίων για τρεις συνθήκες ροής (στρωτή, μεταβατική και τυρβώδη) με την ελάχιστη ταχύτητα ρευστοαιώρησης τους, όπως υπολογίστηκε για μικρά ( $Re < 20$ ) και μεγάλα τεμαχίδια ( $Re > 1000$ ). Συγκεκριμένα, έγινε η παραδοχή ότι λόγω του εύρους κοκκομετρίας της τροφοδοσίας θα πρέπει η μέγιστη ταχύτητα των καπναερίων του θαλάμου διόγκωσης να μην ξεπερνά την οριακή ταχύτητα των λεπτόκοκκων τεμαχιδίων που την απαρτίζουν. Σε άλλη περίπτωση, τα τεμαχίδια θα συμπαρασύρονταν από τα καπναέρια αμέσως μετά την είσοδό τους στο θάλαμο και θα εξέρχονταν αδιόγκωτα. Επιπλέον, ορίζει και την ελάχιστη ταχύτητα των ανερχόμενων αερίων η οποία θα πρέπει να είναι τόση ώστε τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια να μην εξέρχονται από το κάτω ανοιχτό τμήμα του θαλάμου διόγκωσης αλλά να έχουν τον απαιτούμενο χρόνο παραμονής που θα εξασφαλίσει τη θέρμανση και διόγκωση τους. Βέβαια, η γεωμετρία του θαλάμου διόγκωσης των κάθετων συμβατικών καμίνων βοηθάει σημαντικά σε αυτό το ζήτημα. Το κατώτερο τμήμα του θαλάμου διόγκωσης έχει σχήμα ανεστραμμένου κώνου. Η αρχή διατήρησης της μάζας επιτάσσει ότι η ταχύτητα ανόδου των αερίων εξαρτάται από την διατομή του θαλάμου: ο λόγος μέσων ταχυτήτων του αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογος της επιφάνειας των διατομών τους. Με τη σχεδίαση αυτή λοιπόν, το κατερχόμενο τεμαχίδιο συναντά αέρα συνεχώς αυξανόμενης ταχύτητας και αντίθετης φοράς που είναι ικανός να οδηγήσει σε ρευστοαιώρηση τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια χωρίς να οδηγήσει σε άμεση απομάκρυνση των λεπτόκοκκων, τα οποία καταλήγουν σε ανώτερο σημείο του θαλάμου λόγω της μικρότερης ταχύτητας ρευστοαιώρησης που απαιτούν.

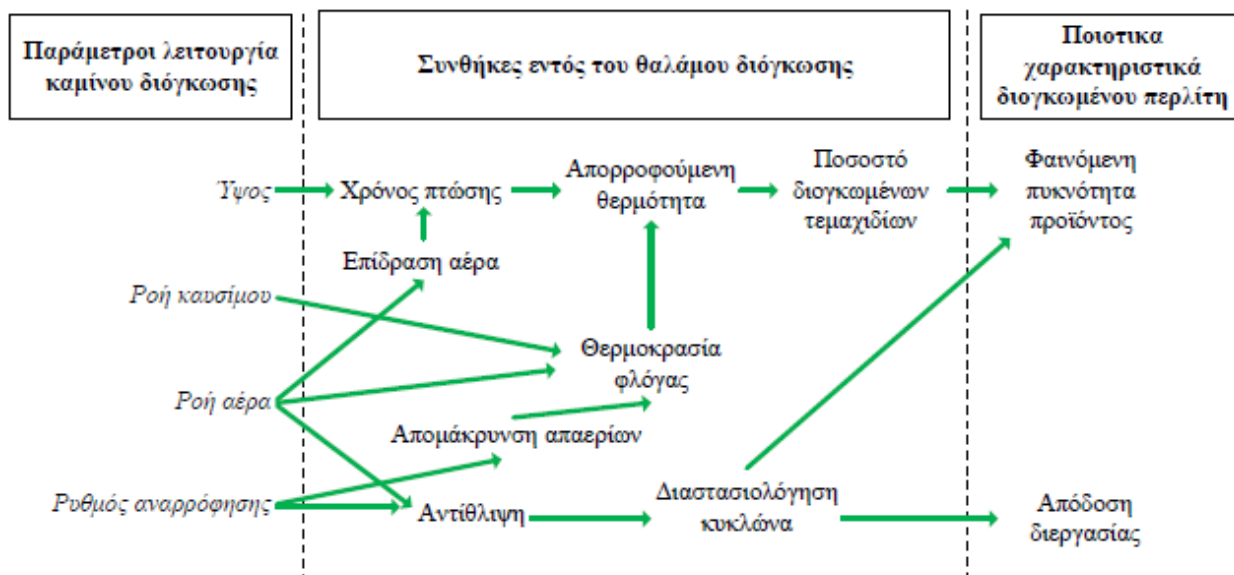
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περίπτωση που το τεμαχίδιο δεν έχει τον απαιτούμενο χρόνο ώστε να θερμανθεί ικανοποιητικά και να αρχίσει η διόγκωση του τότε θα εξέλθει αδιόγκωτο από το κάτω άνοιγμα του θαλάμου διόγκωσης. Το χαρακτηριστικό αυτό των κάθετων συμβατικών καμίνων διόγκωσης αποτελεί και τον σημαντικότερο τρόπο φυσικού διαχωρισμού των αδιόγκωτων τεμαχιδίων από το διογκωμένο προϊόν, των οποίων ο ατελής βαθμός διόγκωσης μπορεί να οφείλεται είτε στις ακατάλληλες συνθήκες λειτουργίας της καμίνου είτε στα ακατάλληλα φυσικά (διάμετρος) ή χημικά χαρακτηριστικά (κρυσταλλικό φορτίο, προσμίξεις) του κόκκου. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο βαθμός ανάκτησης της μεθόδου σε διογκωμένο προϊόν, επιτυγχάνεται όμως ταυτόχρονα ο διαχωρισμός του προϊόντος από τους αδιόγκωτους κόκκους και τις προσμίξεις.

Η ταχύτητα με την οποία ανέρχονται τα απαέρια εξαρτάται εκτός από τον ρυθμό τροφοδοσίας καυσίμου και αέρα στη βάση της καμίνου και από το ρυθμό αναρρόφησης του ανεμιστήρα, ο οποίος δημιουργώντας συνθήκες υποπίεσης στο θάλαμο υποβοηθά την απομάκρυνση των αερίων και στερεών σωματιδίων. Μεγάλος ρυθμός αναρρόφησης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας ανόδου και απομάκρυνσης των αερίων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνει και ο ρυθμός

απωλειών θερμικής ενέργειας από το θάλαμο διόγκωσης, με τη μορφή αισθητής ενέργειας καπναερίων, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας εντός της καμίνου.

Η θέρμανση του κόκκου γίνεται μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής. Η φλόγα, τα θερμά καπναέρια καθώς και η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία της επιφανείας του κόκκου. Στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφανείας του κόκκου συμβάλλει και η επαφή του με τις θερμές αέριες μάζες (συναγωγή). Η διάχυση της απορροφούμενης στην επιφάνεια θερμότητας προς το εσωτερικό του κόκκου πραγματοποιείται μέσω του μηχανισμού της αγωγής. Εργασίες με θέμα τη μαθηματική μοντελοποίηση της διόγκωσης περλίτη σε έμφλογη κάμινο έχουν δείξει ότι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του κόκκου στο κέντρο και την επιφάνειά του είναι μικρή σε όλη την διάρκεια της διεργασίας (Zahringer et al., 2001). Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από τον υπολογισμό του αριθμού Biot για κόκκο περλίτη ο οποίος βρίσκεται σε διάφορα στάδια διόγκωσης (Angelopoulos et al, 2012).

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι βασικές παράμετροι λειτουργίας της συμβατικής κάθετης καμίνου διόγκωσης αλληλεπιδρούν με τις συνθήκες που διαμορφώνονται εντός του θαλάμου διόγκωσης και πώς αυτές επιδρούν στη διόγκωση των κόκκων περλίτη.



Σχήμα 3.8. Αλληλεπίδραση των συνθηκών λειτουργίας της συμβατικής καμίνου και των συνθηκών διόγκωσης και η επίδραση αυτών στον περλίτη (Barker and Harris, 1990).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8 οι παράμετροι λειτουργίας των συμβατικών καμίνων διόγκωσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τρόπο πολύπλοκο και πολυδιάστατο. Η απόσταση μεταξύ της θυρίδας εισόδου της πρώτης ύλης και της φλόγας καθορίζει το χρόνο καθοδικής κίνησης του τεμαχιδίου και την ποσότητα θερμότητας που απορροφάται από αυτό. Οι μικρότερες κοκκομετρίες

τροφοδοτούνται από χαμηλότερα σημεία σε σύγκριση με μεγαλύτερες κοκκομετρίες εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερο χρόνο παραμονής για τα χονδρόκοκκα κλάσματα. Η αύξηση της ροής καυσίμου και αέρα στο θάλαμο διόγκωσης αυξάνει την έκταση της φλόγας και τη θερμότητα που εισάγεται στο σύστημα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του περλίτη, και της έντασης του ανοδικού ρεύματος και της ταχύτητας κίνησης του τεμαχιδίου. Επίσης, ο ρυθμός τροφοδοσίας του περλίτη έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς επηρεάζει την ενέργεια που απορροφάται από τον περλίτη ανα μονάδα μάζας και κατά επέκταση και τη θερμοκρασία του. Τέλος, η ταχύτητα αναρρόφησης του ανεμιστήρα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η απομάκρυνση των καπναερίων από το θάλαμο διόγκωσης, χωρίς όμως να μειώνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του και επομένως και η θερμότητα που απορροφάται από τα τεμαχίδια. Επιπλέον, η ρύθμισή της επηρεάζει το χρόνο παραμονής του περλίτη στο θάλαμο διόγκωσης.

Όσον αφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας είναι φανερό ότι στην περίπτωση των έμφλογων κάθετων καμίνων διόγκωσης (συμβατικές κάμινοι διόγκωσης), οι οποίες αποτελούν τις πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες καμίνους σε βιομηχανική κλίμακα, το εύρος της κοκκομετρίας της τροφοδοσίας δεν μπορεί να είναι μεγάλο. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της κοκκομετρίας, τόσο μικρότερη θα είναι και η απόδοση της διεργασίας από την άποψη της ποσότητας των αδιόγκωτων τεμαχιδίων που παράγονται κατά την διόγκωση, αλλά και της ποιότητας των διογκωμένων. Το κάθε κλάσμα ανάλογα με την κοκκομετρία του απαιτεί διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας της καμίνου, όσον αφορά την ένταση του ανοδικού ρεύματος, αλλά και την θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης, γιατί επιδρούν άμεσα τόσο στο χρόνο παραμονής των κόκκων στο θάλαμο διόγκωσης όσο και στη θερμοκρασία τους. Επίσης, ο χρόνος παραμονής των κόκκων στην κάμινο διόγκωσης καθώς επίσης και η μεταβολή της θερμοκρασίας τους συναρτήσκει του χρόνου, είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους οι οποίες επιδρούν στην εξέλιξη της διόγκωσης και τα χαρακτηριστικά των διογκωμένων προϊόντων.

Φαίνεται λοιπόν ότι στις συμβατικές μεθόδους διόγκωσης, οι παράμετροι οι οποίες θα μπορούσαν να ρυθμίσουν την εξέλιξη της διόγκωσης και την ποιότητα των διογκωμένων προϊόντων (συνθήκες λειτουργίας ανεμιστήρα και καυστήρα) συναντούν σημαντικούς περιορισμούς οι οποίοι σχετίζονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, κυρίως με το εύρος κοκκομετρίας της.

Ένα ακόμα μειονέκτημα το οποίο παρουσιάζουν οι συμβατικές μέθοδοι διόγκωσης προέρχεται από την πηγή της θερμικής ενέργειας του συστήματος, τον καυστήρα. Ο καυστήρας και η φλόγα που δημιουργείται προσδίδουν στο πεδίο ροής εντός του θαλάμου διόγκωσης χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής. Η τυρβώδης ροή, χαρακτηρίζεται από έντονες τοπικές και χρονικές μεταβολές στη διεύθυνση κίνησης και την ταχύτητα του ρευστού, ενώ ευθύνεται και για τη δημιουργία

στροβιλισμών εντός του θαλάμου διόγκωσης (Τσαγγάρης, 1995). Έτσι, η ακριβής γνώση της ταχύτητας και θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος της καμίνου είναι πρακτικά αδύνατη, εντούτοις όμως η μέση κατάσταση μπορεί να προβλεφθεί με την εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων ανάλυσης τυρβωδών ροών (π.χ. k-e turbulence model). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της ροής επηρεάζουν σημαντικά εκτός από την αέρια φάση, και την κίνηση των κόκκων του περλίτη μέσα στην κάμινο, άλλα και την θέρμανσή τους και καθιστούν τη λεπτομερή γνώση της θέσης, ταχύτητας και θερμοκρασίας τους ιδιαίτερα δύσκολη.

Η απώλεια θερμότητας μέσω των καπναερίων, τα οποία εξέρχονται από την κάμινο διόγκωσης έχοντας θερμοκρασία που ξεπερνά τους 1000 °C (Barnes, 1962; Zahringer, 1998; Klipfel et al., 1997) αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου όσον αφορά την οικονομικότητα της. Ακόμα και αν η αισθητή θερμότητα των καπναερίων χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση της πρώτης ύλης και του εισερχόμενου αέρα, η θερμικές απώλειες του συστήματος λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καπναερίων είναι μεγάλες και το γεγονός αυτό επιβαρύνει το κόστος της διεργασίας.

Η όλη διεργασία της διόγκωσης του περλίτη σε συμβατική κάμινο αποτελεί μέθοδο εμπειρική από την άποψη ότι η βελτιστοποίηση των συνθηκών διόγκωσης για την παραγωγή προϊόντων που να χαρακτηρίζονται από τις εκάστοτε επιθυμητές ιδιότητες, πραγματοποιείται με τη μέθοδο των αλληπάλληλων πειραματικών δοκιμών και τη μέτρηση των χαρακτηριστικών του προϊόντος (Angelopoulos et al., 2011). Η ποιότητα και τα φυσικά χαρακτηριστικά του περλίτη καθορίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο θάλαμος διόγκωσης ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της διόγκωσης αλλά και η ποιότητα του διογκωμένου προϊόντος. Αποτέλεσμα αυτού αποτελεί το γεγονός ότι, στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις υπάρχουν κάμινοι με διαφορετικές διαστάσεις όπου η κάθε μία χρησιμοποιείται για την κατεργασία συγκεκριμένων τύπων πρώτων υλών. Συνοψίζοντας, τα βασικά μειονεκτήματα των συμβατικών μεθόδων διόγκωσης του περλίτη τα οποία σχετίζονται τόσο με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος όσο και με την όλη οικονομικότητα και αποδοτικότητα της μεθόδου είναι τα παρακάτω:

- Η δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης των συνθηκών κάτω από τις οποίες γίνεται η διόγκωση, όπως παραδείγματος χάριν, του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων του περλίτη στο θάλαμο διόγκωσης, της μέγιστης θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί στα τεμαχίδια, του ρυθμού αύξησης θερμοκρασίας των τεμαχιδίων κ.λπ., είναι περιορισμένη.
- Υπάρχει περιορισμός στο εύρος κοκκομετρίας της πρώτης ύλης που μπορεί να διογκωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό και αδυναμία διόγκωσης των πολύ λεπτομερών κλασμάτων

- Μεγάλες θερμικές απώλειες, που οφείλονται στην κυκλοφορία μεγάλων ποσοτήτων αέρα και δημιουργίας αντίστοιχα μεγάλων ποσοτήτων απαερίων, τα οποία απάγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας, με αποτέλεσμα να επιβαρύνουν την οικονομικότητα της μεθόδου.
- Η τροφοδοσία της πρώτης ύλης απευθείας στις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας του θαλάμου διόγκωσης, οδηγεί στην ακαριαία και βίαιη διόγκωση του τεμαχιδίων του περλίτη, γεγονός που καθιστά πρακτικά αδύνατο τον έλεγχο του ρυθμού θέρμανσης του περλίτη, καθώς και της μορφολογίας του διογκωμένου προϊόντος.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°. Η ΝΕΑ ΚΑΘΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ****ΠΕΡΛΙΤΗ**

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτυχθηκε μια νέα τεχνολογία διόγκωσης περλίτη, η οποία διασφαλίζει καλύτερο έλεγχο των συνθηκών διόγκωσης (χρόνος παραμονής στο θάλαμο διόγκωσης και θερμοκρασία διόγκωσης) αλλά και ηπιότερες συνθήκες διόγκωσης με σκοπό την παραγωγή διογκωμένου περλίτη με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, κλειστό εξωτερικό πορώδες και σχεδόν σφαιρικό σχήμα κόκκων.

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην έμμεση θέρμανση του περλίτη μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Οι σημαντικότερες διαφορές της νέας τεχνολογίας σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διόγκωσης είναι:

- Η θέρμανση της καμίνου γίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις που περιβάλουν το τοίχωμα του κυλινδρικού θαλάμου διόγκωσης και όχι με φλόγα, οπότε εξασφαλίζεται καλύτερος έλεγχος της θερμοκρασίας στο θάλαμο διόγκωσης αλλά και ηπιότερες συνθήκες θέρμανσης της τροφοδοσίας.
- Ο περλίτης τροφοδοτείται από το άνω μέρος της καμίνου, κινείται καθοδικά καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας, ενώ απουσιάζουν θερμά ανοδικά ρεύματα και καπναέρια
- Ο χρόνος παραμονής του περλίτη εντός του θαλάμου διόγκωσης ελέγχεται με την διοχέτευση στην κάμινο αέρα, ο οποίος κινείται στη ίδια κατεύθυνση με τον περλίτη.
- Ο τροφοδοτούμενος περλίτης θερμαίνεται και διογκώνεται σταδιακά, με τη θερμότητα που εκπέμπεται από το θερμό τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης αλλά και με τη θερμική ενέργεια που λαμβάνει από τον αέρα και όχι με τροφοδοσία του απ'ευθείας στη φλόγα του καυστήρα.

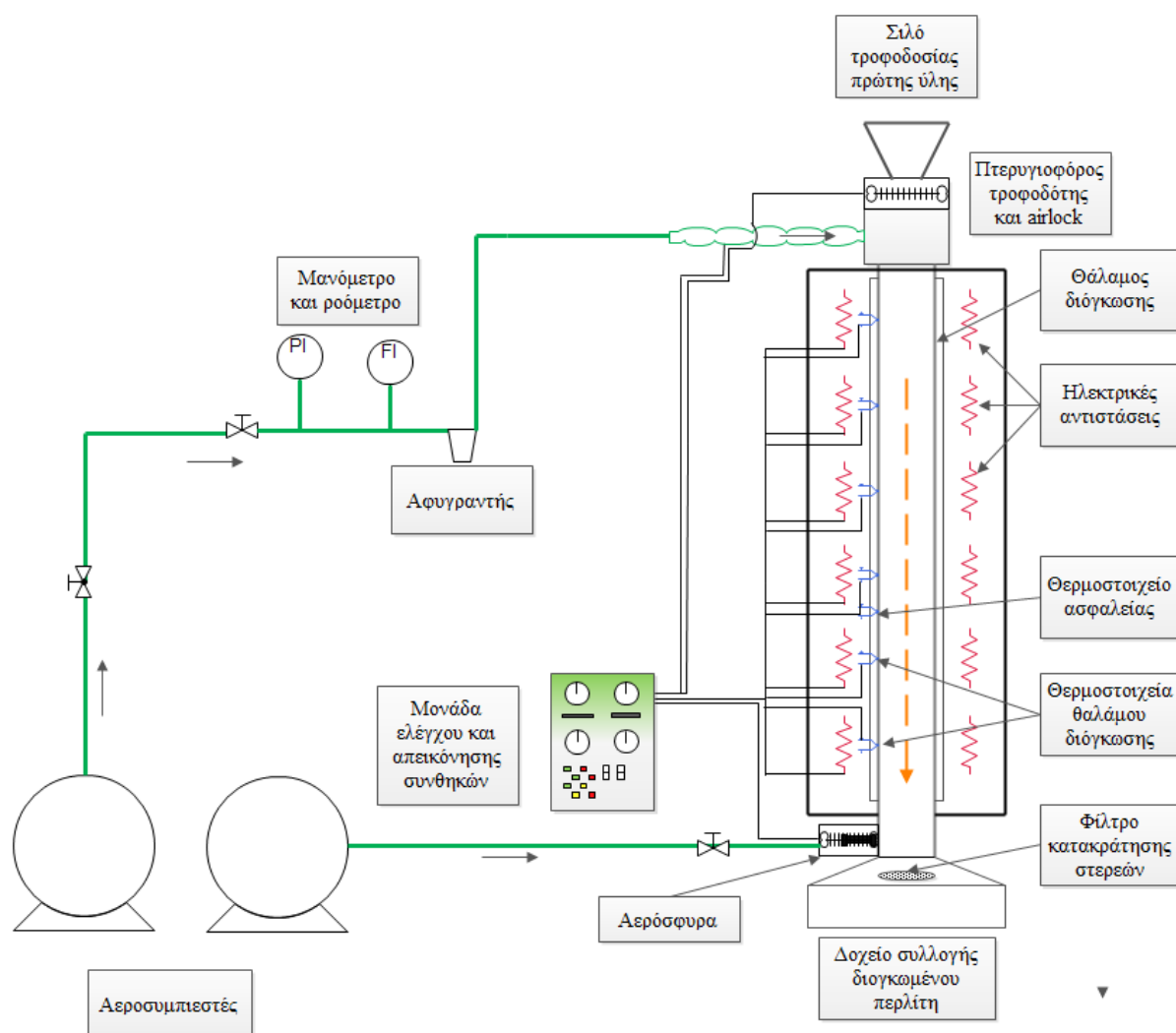
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και βασίζεται στην τεχνολογία της έμμεσης θέρμανσης των τεμαχιδίων του περλίτη μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της όλης μεθόδου καθώς επίσης και η αρχή λειτουργίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου και των περιφερειακών συσκευών που συνθέτουν την εγκατάσταση.

#### 4.1. Πειραματική διάταξη

Το σύστημα διόγκωσης περλίτη που κατασκευάστηκε και μελετήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. σύστημα τροφοδοσίας αέρα,
2. κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης,
3. σύστημα τροφοδοσίας πρώτης ύλης,
4. σύστημα μέτρησης και ρύθμισης θερμοκρασίας, τροφοδοσίας και δόνησης

Στο Σχήμα 4.1. παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας καθώς και οι επιμέρους συσκευές που απαρτίζουν τη συνολική εγκατάσταση.



Σχήμα 4.1. Διάγραμμα ροής εγκατάστασης διόγκωσης περλίτη με τη χρήση της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου.

Στην συνέχεια, περιγράφεται η αρχή λειτουργίας του κάθε συστήματος και παρατίθενται οι σχετικές τεχνικές λεπτομέρειες.

#### 4.1.1. Σύστημα τροφοδοσίας αέρα

Το σύστημα τροφοδοσίας αέρα αποτελείται από δύο αεροσυμπιεστές και το σύστημα μέτρησης της ροής του αέρα. Ο πρώτος αεροσυμπιεστής τροφοδοτεί με αέρα την ηλεκτρική κάμινο, ενώ ο δεύτερος, ο οποίος είναι και μικρότερης δυναμικότητας, τροφοδοτεί με αέρα μια αερόσφουρα που βρίσκεται στη βάση του θαλάμου, η οποία, μέσω της δημιουργίας δονήσεων, χρησιμοποιείται για την αποφυγή επικολήσεων και συσσωματωμάτων στην εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης.

Πίνακας 4.1. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των αεροσυμπιεστών

| Τύπος              | Ισχύς (HP) | Χωρητικότητα αεροθαλάμου (L) | Χρήση                                 |
|--------------------|------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Airmak AMM 150/280 | 2          | 100                          | Τροφοδοσία αέρα στην αερόσφουρα       |
| Toros 300/4        | 4          | 300                          | Τροφοδοσία αέρα στον θάλαμο διόγκωσης |

Το εύρος της παροχής αέρα στο θάλαμο διόγκωσης κυμάνθηκε από 0-200 L/min, με χρήση δύο ροομέτρων (Πίνακας 4.2) ώστε να είναι ακριβέστερη η μέτρηση της παροχής στους αντίστοιχες επιθυμητές κλίμακες λειτουργίας: για παροχές μέχρι 50 L/min χρησιμοποιήθηκε το ροόμετρο A και για παροχές από 50 έως 200 L/min το B. Με βάση τις ενδείξεις του ροομέτρου και μανομέτρου, η πραγματική παροχή αέρα εντός του θαλάμου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Kytola, 2013):

$$Q_{air} = Q_{air,m} \sqrt{\frac{\rho_{air,s} T_{air,s} P_{air,m}}{\rho_{air,m} T_{air,m} P_{air,s}}} \quad (4.1)$$

Όπου,

$P$ : ένδειξη πίεσης του μανομέτρου, bar

$Q$ : ένδειξη παροχής του ροομέτρου, L·min<sup>-1</sup>

$T$ : θερμοκρασία αέρα, °C

$\rho$ : πυκνότητα αέρα, kg·m<sup>-3</sup>

Ο δείκτης  $m$  υποδηλώνει τις τιμές των αντιστοιχών μεγεθών κατά την διάρκεια μέτρησης, ενώ ο δείκτης  $s$  δηλώνει τις αντίστοιχες τιμές σε κανονικές συνθήκες ( $P = 1.013 \text{ bar}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1.23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Εάν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε κανονικές συνθήκες τότε :

$$T_{air,s} = T_{air,m} \quad (4.2)$$

$$\rho_{air,s} = \rho_{air,m} \quad (4.3)$$

και η εξίσωση (4.1) απλοποιείται ως εξής:

$$Q_{air} = Q_{air,m} \sqrt{\frac{P_{air,m}}{1.013}} \quad (4.4)$$

Η συχνότητα και η ισχύς της κρούσης της αερόσφυρας ελέγχεται μέσω κατάλληλων μηχανισμών.

Πίνακας 4.2. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των ροόμετρων και μανόμετρου.

| Τύπος    | Εύρος<br>ρύθμισης/μέτρησης  | Κλίμακα<br>ρύθμισης/μέτρησης | Περιγραφή                    |
|----------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Kytola-A | 0-50 Lit·min <sup>-1</sup>  | 2 L·min <sup>-1</sup>        | Ροόμετρο μικρών<br>παροχών   |
| Kytola-B | 0-200 Lit·min <sup>-1</sup> | 25 L·min <sup>-1</sup>       | Ροόμετρο<br>μεγάλων παροχών  |
| Bulle    | 0-150 Psi                   | 5                            | Μανόμετρο<br>μέτρησης πίεσης |



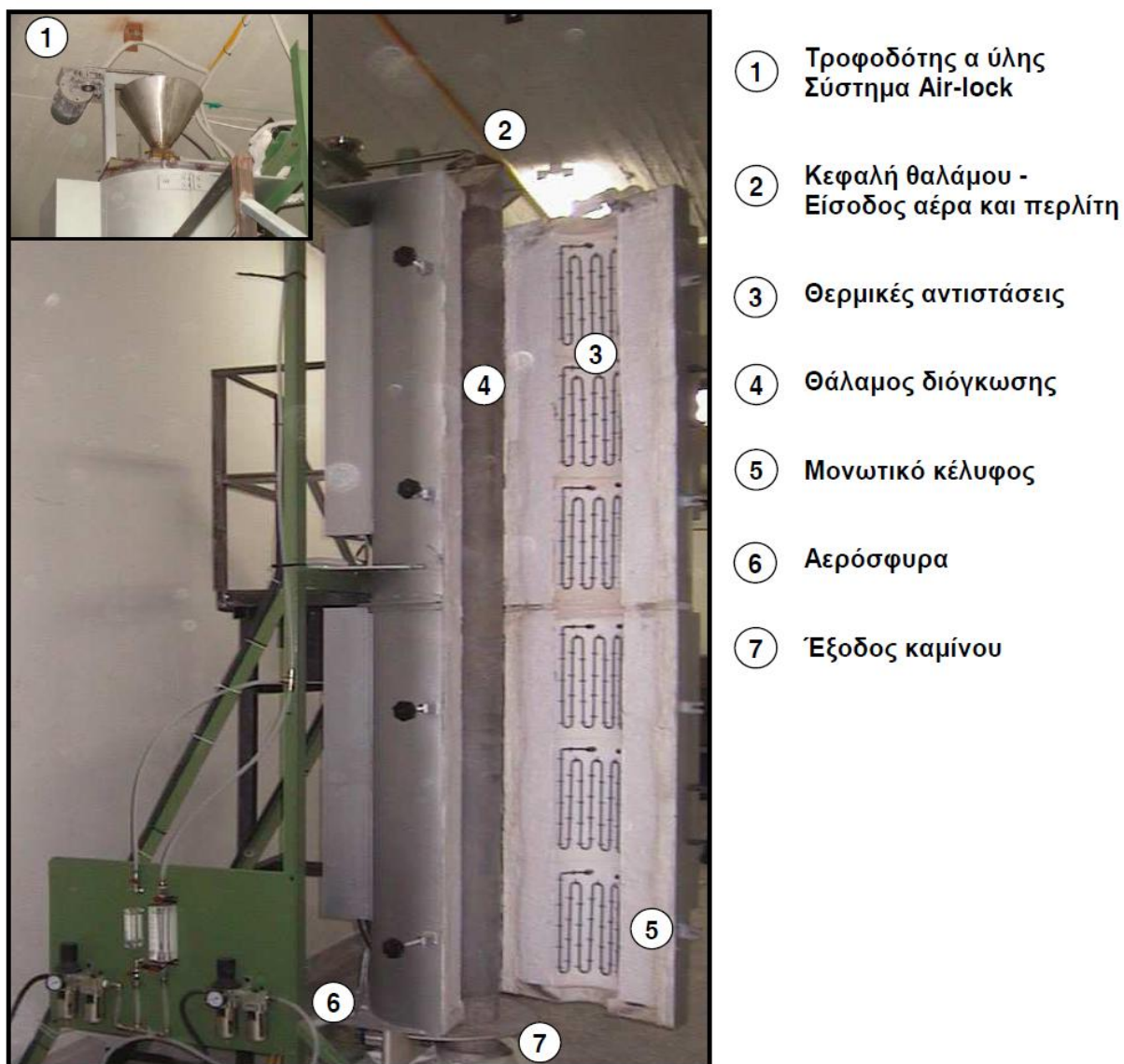
Σχήμα 4.2. Ο αεροσυμπιεστής μεγάλης δυναμικότητας (αριστερά) και το σύστημα ροόμετρων-μανομέτρων για τη ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής του αέρα στο θάλαμο διόγκωσης.

Η ογκομετρική παροχή του αέρα, ο οποίος τροφοδοτείται από την κεφαλή του θαλάμου διόγκωσης και κινείται καθοδικά και ομόρροπα με τα τεμαχίδια του περλίτη, έχει σημαντική επίδραση, τόσο στην κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου, όσο και στον χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία των τεμαχιδίων του περλίτη. Αύξηση της ογκομετρικής παροχής συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου, πράγμα που σημαίνει σημαντικές μεταβολές και στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή από τον αέρα προς τα τεμαχίδια και αντιστρόφως. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στη μεταβολή των αριθμών Reynolds, Prandtl και Nusselt του αέρα, που τελικά έχουν σαν συνέπεια τη μεταβολή των αντίστοιχων συντελεστών συναγωγής της θερμότητας κατά μήκος της καμίνου.

#### **4.1.2. Κάθετη ηλεκτρική κάμιнос διόγκωσης**

Η κάθετη ηλεκτρική κάμιнос διόγκωσης είναι η κύρια συσκευή της εγκατάστασης εντός της οποίας πραγματοποιείται η διεργασία της διόγκωσης. Τα μέρη που την απαρτίζουν είναι τα εξής:

- Θάλαμος θέρμανσης – διόγκωσης
- Σύστημα θερμικών αντιστάσεων
- Κεφαλή καμίνου
- Θερμοστοιχεία ελέγχου θερμοκρασίας θαλάμου διόγκωσης
- Μόνωση θαλάμου διόγκωσης
- Σύστημα δόνησης θαλάμου



Σχήμα 4.3. Η κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης περλίτη και οι κύριες περιφερειακές συσκευές.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών όλων των επιμέρους συσκευών που απαρτίζουν την νέα κάμινο διόγκωσης περλίτη.

- Θάλαμος θέρμανσης - διόγκωσης

Ο θάλαμος θέρμανσης είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας κατασκευασμένος από κράμα Kanthal (Kanthal Fe-Cr-Al alloy, Type APM<sup>®</sup>), έτσι ώστε να είναι ανθεκτικός σε παρατεταμένη λειτουργία σε θερμοκρασίες μέχρι και 1250°C, ενώ το σημείο τήξης του ανέρχεται στους 1425 °C (Kanthal, 2013). Το μήκος του είναι 3 m και η εσωτερική του διάμετρος 134 mm και κατά μήκος του περιβάλλεται από έξι ζεύγη θερμικών αντιστάσεων οι οποίες προσφέρουν την απαραίτητη ενέργεια για τη θέρμανση του θαλάμου. Ο αέρας και ο αδιόγκωτος περλίτητροφοδοτούνται από το άνω μέρος (κεφαλή) του θαλάμου και κινούνται καθοδικά στο σωλήνα, μέχρι την έξοδο τους από το κάτω μέρος αυτού.

- Σύστημα θερμικών αντιστάσεων

Η θέρμανση του θαλάμου πραγματοποιείται από έξι ζεύγη θερμικών αντιστάσεων ημικυλινδρικού σχήματος, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από το ίδιο κράμα από το οποίο είναι κατασκευασμένος και ο θάλαμος θέρμανσης (Kanthal Fe-Cr-Al alloy, Type APM<sup>®</sup>). Η ισχύς της κάθε θερμικής αντίστασης είναι 2 kW, ενώ η συνολική ισχύς των θερμαντικών αντιστάσεων ανέρχεται στα 24 kW. Τα ζεύγη είναι τοποθετημένα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, ενώ κάθε ζεύγος καλύπτει περιφερειακά όλη την εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η θέρμανση όλης της επιφάνειας του τοιχώματος του θαλάμου με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Ο τρόπος με τον οποίο έχουν διαταχθεί οι αντιστάσεις επιτρέπει τη δημιουργία έξι διαφορετικών θερμοκρασιακών ζωνών κατά μήκος του θαλάμου, σε κάθε μία από τις οποίες η θερμοκρασία μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα, μέσω ξεχωριστού συστήματος ρύθμισης της θερμοκρασίας, που βρίσκεται στον κεντρικό ηλεκτρικό πίνακα ελέγχου της καμίνου. Οι αντιστάσεις τροφοδοτούνται με τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ ηλεκτρικού ρεύματος μέχρι η θερμοκρασία τους να φτάσει στην επιθυμητή τιμή (setting point) και στην συνέχεια, όταν επιτευχθεί αυτό, η τροφοδοτούμενη ισχύς αυξομειώνεται έτσι ώστε η θερμοκρασία της ζώνης, όπως αυτή μετράται από το αντίστοιχο θερμοστοιχείο, να διατηρείται σταθερή. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών αντιστάσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά λειτουργίας των θερμικών αντιστάσεων του θαλάμου διόγκωσης (Kanthal, 2012)

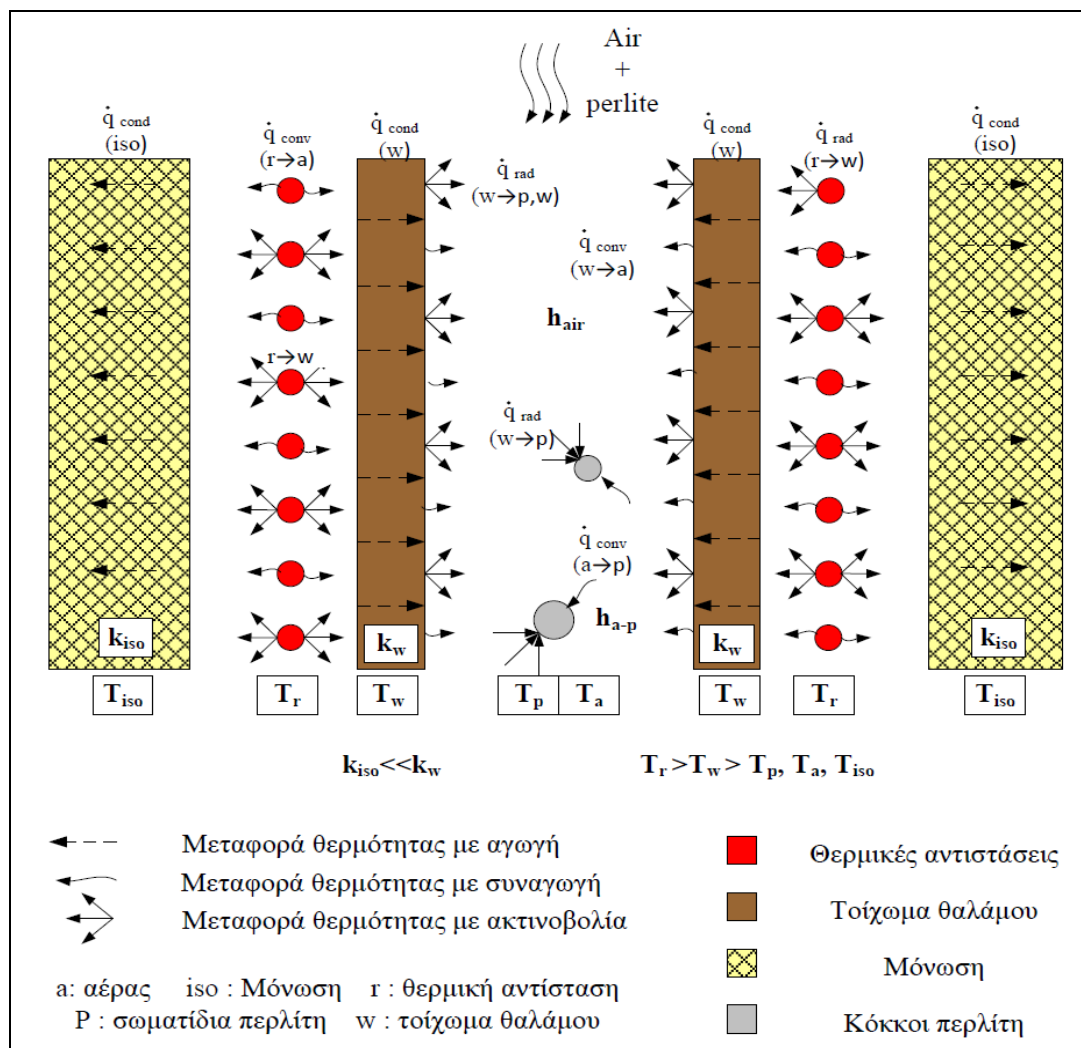
| Υλικό κατασκευής         | Ισχύς  | Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας | Ειδική αντίσταση στους 20°C             |
|--------------------------|--------|---------------------------------|---|
| Kanthal APM <sup>®</sup> | 2000 W | 1250 °C                         | 1.45 Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> |

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο θάλαμος διόγκωσης θερμαίνεται από έξι διαφορετικά ζεύγη αντιστάσεων σε κάθε ένα από τα οποία υπάρχει δυνατότητα αυτόνομης ρύθμισης της θερμοκρασίας. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη δημιουργία έξι διαφορετικών θερμοκρασιακών ζωνών εντός του θαλάμου διόγκωσης και έτσι την εξασφάλιση της επιθυμητής θερμοκρασιακής κατανομής εντός αυτού. Επομένως, η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου σε κάθε ισοθερμοκρασιακή ζώνη, καθορίζεται από την θερμοκρασία στην οποία ρυθμίζονται να λειτουργούν τα έξι ζεύγη αντιστάσεων.

Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης και η θερμοκρασιακή κατανομή του, είναι από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν το όλο φαινόμενο και την ποιότητα του παραγόμενου υλικού, γιατί μέσω της μεταφοράς θερμότητας από το τοίχωμα στα τεμαχίδια του περλίτη καθορίζουν το ρυθμό θέρμανσης και τη

μέγιστη θερμοκρασία που θα αποκτήσουν τα τεμαχίδια του περλίτη, κατά τη διαδρομή τους στο θάλαμο διόγκωσης.

Η μεταφορά θερμότητας από το τοίχωμα του θαλάμου προς το εσωτερικό του, όπου κινούνται καθοδικά ο αέρας και τα τεμαχίδια του περλίτη, πραγματοποιείται με δύο τρόπους: με συναγωγή και με ακτινοβολία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4:



Σχήμα 4.4. Κάθετη τομή της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης στην οποία απεικονίζονται οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας.

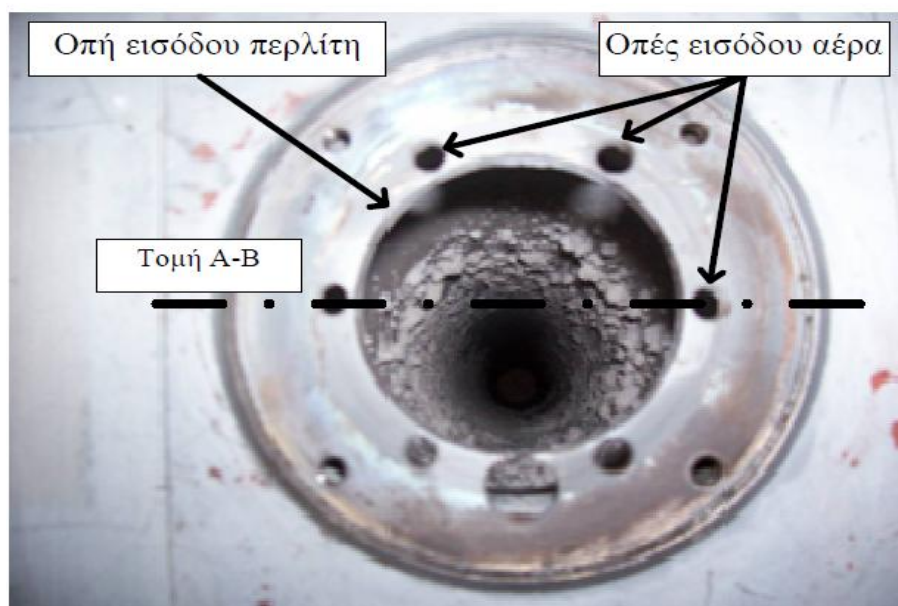
Η ακτινοβολία που εκπέμπει η θερμή εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης, απορροφάται από τα τεμαχίδια του περλίτη, καθώς και από εκείνο το τμήμα της εσωτερικής επιφάνειας του θαλάμου το οποίο ενδέχεται να βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασιακή ζώνη. Ο τροφοδοτούμενος στον θάλαμο αέρας, δεν θερμαίνεται με ακτινοβολία, γιατί τα άτομα του  $N_2$  και του  $O_2$  κυρίως λόγω της συμμετρίας που τα χαρακτηρίζει δεν απορροφούν θερμότητα μέσω του μηχανισμού της ακτινοβολίας σε αντίθεση με τα μόρια  $H_2O$ ,  $CO_2$  που είναι συνήθως προϊόντα καύσης και τα οποία επειδή είναι μη-συμμετρικά, εκπέμπουν και



απορροφούν θερμική ακτινοβολία (Lienhard and Lienhard, 2003). Στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι λόγω της πολύ μικρής περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία και CO<sub>2</sub>, ο αέρας θερμαίνεται μόνο μέσω του μηχανισμού της συναγωγής, δηλαδή της ροής θερμότητας από το τοίχωμα του θαλάμου προς τα μόρια του αέρα με τα οποία αυτός έρχεται σε επαφή. Επιπλέον, θερμότητα μεταφέρεται με συναγωγή από τα τεμαχίδια του περλίτη προς τον αέρα και αντιστρόφως, ανάλογα με το ποιο από τα δύο υλικά είναι θερμότερο.

- Κεφαλή καμίνου

Η κεφαλή της καμίνου διόγκωσης είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να επιτρέπει την είσοδο του αέρα και του περλίτη. Η κεφαλή του θαλάμου αποτελείται από 7 οπές συνολικά. Μέσω της κεντρικής οπής διαμέτρου 79 mm πραγματοποιείται η τροφοδοσία του περλίτη ενώ περιφερειακά της κεντρικής αυτής οπής βρίσκονται έξι μικρότερες οπές, διαμέτρου 9mm, μέσω των οποίων γίνεται η τροφοδοσία του αέρα στην κάμινο διόγκωσης.



Σχήμα 4.5. Οι οπές τροφοδοσίας αέρα και περλίτη στον θάλαμο θέρμανσης

- Θερμοστοιχεία ελέγχου θερμοκρασίας στο θάλαμο διόγκωσης

Η μέτρηση της θερμοκρασίας στα τοιχώματα του θαλάμου πραγματοποιείται από επτά κατάλληλα επενδεδυμένα θερμοστοιχεία τύπου N (nickel-chromium-silicon/nickel-silicon)

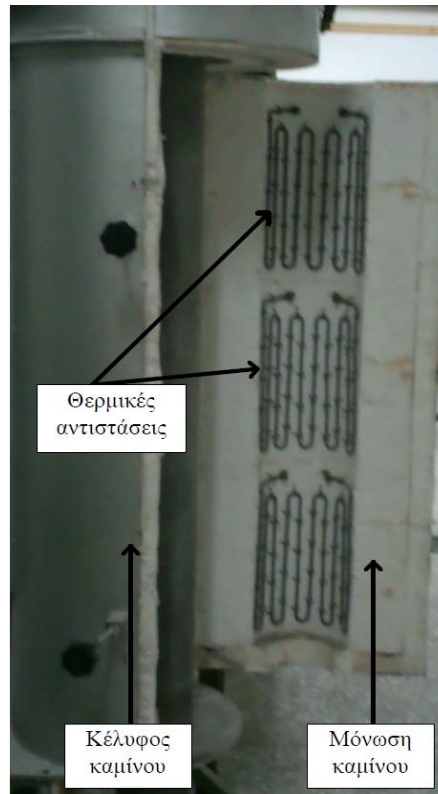


Σχήμα 4.6. Τα θερμοστοιχεία της καμίνου και το προστατευτικό κέλυφος από mullite (υλικό επένδυσης).

Τα έξι από αυτά είναι τοποθετημένα σε κάθε μία από τις ζώνες θέρμανσης, ενώ ένα ακόμα είναι τοποθετημένο μεταξύ της 3<sup>ης</sup> και της 4<sup>ης</sup> ζώνης και χρησιμεύει ως θερμοστοιχείο ασφαλείας. Η ένδειξη του κάθε θερμοστοιχείου απεικονίζεται στον πίνακα ελέγχου και έτσι είναι δυνατή η ανάγνωση κάθε στιγμή της θερμοκρασίας στις έξι θερμικές ζώνες. Επίσης, οι μετρήσεις των θερμοστοιχείων συνδέονται και με τους ρευματοδότες των θερμικών αντιστάσεων και ανάλογα με την επιθυμητή θερμοκρασία (setting point) που έχει θέσει ο χειριστής σε κάθε ζώνη η παροχή του ρεύματος στο κάθε ζεύγος να αυξομειώνεται κατάλληλα ώστε η θερμοκρασία της ζώνης να διατηρείται σταθερή. Η ένδειξη του θερμοστοιχείου ασφαλείας δεν απεικονίζεται στον πίνακα, αλλά η τιμή της θερμοκρασίας που μετράει, παρακολουθείται από κατάλληλο σύστημα ελέγχου το οποίο διακόπτει την παροχή ρεύματος στην εγκατάσταση σε περίπτωση που η θερμοκρασία ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, η οποία έχει ρυθμιστεί στους 1300 °C.

- Μόνωση θαλάμου

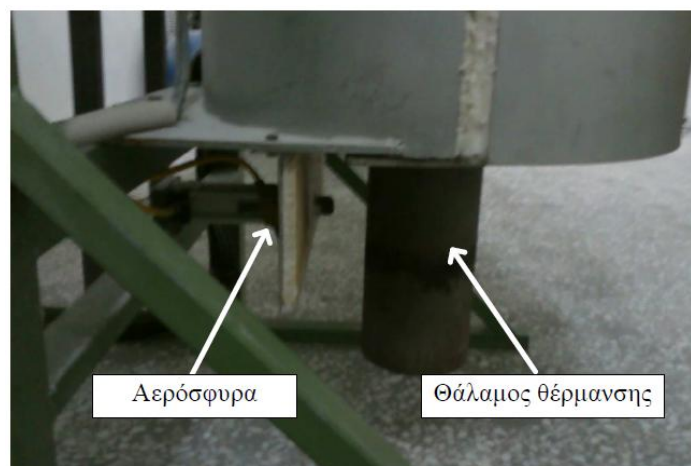
Το σύστημα του θαλάμου διόγκωσης και των θερμικών αντιστάσεων είναι μονωμένο με ένα στρώμα ινών αλούμινας και πυριτίου, το πάχος του οποίου είναι 165 mm και περιβάλλει ολόκληρη την εξωτερική επιφάνεια του συστήματος. Το μονωτικό στρώμα είναι τοποθετημένο σε απόσταση 58 mm από την εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης. Στην εσωτερική επιφάνεια της μόνωσης είναι αναρτημένες οι θερμικές αντιστάσεις, ενώ το εξωτερικό τμήμα της καλύπτεται από φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2 mm.



Σχήμα 4.7. Αποψη του εσωτερικού της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης.

- Σύστημα δόνησης της καμίνου

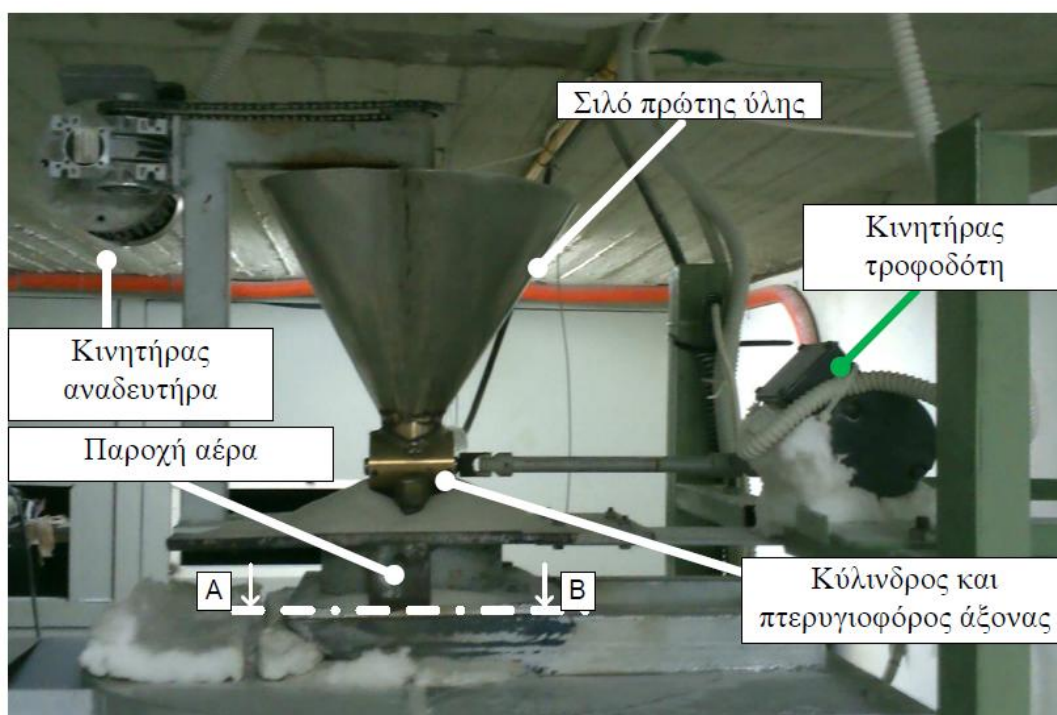
Στο κάτω τμήμα του θαλάμου διόγκωσης, το οποίο δεν καλύπτεται από μόνωση υπάρχει αερόσφουρα η οποία χτυπά το θάλαμο με κατάλληλα ρυθμιζόμενη συχνότητα ώστε, μέσω των δονήσεων που δημιουργούνται στο σώμα του σωλήνα, να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματώσεων και επικολήσεων περλίτη στην εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου.



Σχήμα 4.8. Το σύστημα δόνησης του θαλάμου θέρμανσης

#### 4.1.3. Σύστημα τροφοδοσίας πρώτης ύλης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τροφοδοσία του αέρα και του αδιόγκωτου περλίτη πραγματοποιείται από το άνω μέρος της ηλεκτρικής καμίνου μέσω τροφοδότη, η βάση του οποίου εδρεύει στην κεφαλή του θαλάμου. Το σύστημα τροφοδοσίας του περλίτη στον θάλαμο θέρμανσης αποτελείται από ένα κωνικό σιλό χωρητικότητας 3 Lt, αναδευτήρα και από έναν πτερυγιοφόρο τροφοδότη.



Σχήμα 4.9. Η κεφαλή της καμίνου και ο τροφοδότης της πρώτης ύλης

Η αδιόγκωτη πρώτη ύλη τοποθετείται αρχικά στο κωνικό σιλό, στο κέντρο του οποίου υπάρχει αναδευτήρας, έτσι ώστε να αποτρέπεται η συσσωμάτωση της πρώτης ύλης και παράλληλα να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη ροή της στον τροφοδότη. Η τροφοδοσία του περλίτη εντός του θαλάμου θέρμανσης πραγματοποιείται μέσω πτερυγιοφόρου τροφοδότη. Ο τροφοδότης αποτελείται από έναν κινητήρα στην άκρη του οποίου υπάρχει άξονας με 4 πτερύγια ο οποίος περιστρέφεται με κατάλληλα ρυθμιζόμενη συχνότητα, ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός ρυθμός τροφοδοσίας. Το σύστημα των πτερυγίων είναι τοποθετημένο εντός κυλίνδρου με τρόπο ώστε οι άκρες του να εφάπτονται με τα εσωτερικά τοιχώματα του κυλίνδρου δημιουργώντας τέσσερα διαμερίσματα. Ο κύλινδρος έχει μία σχισμή στο επάνω τμήμα του ώστε να επικοινωνεί με το σιλό και να επιτρέπει την εισροή πρώτης ύλης λόγω της βαρύτητας σε κάθε διαμέρισμα. Την ίδια στιγμή, μέσω μιας άλλης σχισμής η οποία βρίσκεται αντιδιαμετρικά της πρώτης και η οποία επικοινωνεί με το θάλαμο θέρμανσης, η ποσότητα του περλίτη που

βρίσκεται στο συγκεκριμένο διαμέρισμα πέφτει στο θάλαμο. Ο συγκεκριμένος τρόπος σχεδίασης του συστήματος τροφοδοσίας απομονώνει το θάλαμο διόγκωσης από την ατμόσφαιρα, μη επιτρέποντας την έξοδο του θερμού αέρα ή και αιωρούμενων σωματιδίων περλίτη από αυτόν, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την απρόσκοπτη τροφοδοσία της πρώτης ύλης στο θάλαμο διόγκωσης. Η επιλογή του συγκεκριμένου συστήματος έγινε μετά από δοκιμή διαφόρων συστημάτων τροφοδοσίας. Στους υπόλοιπους τροφοδότες, επιτρεπόταν η επικοινωνία του θαλάμου θέρμανσης με το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ανοδικό ρεύμα θερμού αέρα μεγάλης έντασης το οποίο κατέληγε έξω από την κάμινο. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου ήταν η δημιουργία ανεξέλεγκτων συνθηκών εντός του θαλάμου που επηρέαζαν το πεδίο ροής και την κίνηση των κόκκων (δύνες και επανακυκλοφορία του αέρα και του περλίτη), καθώς επίσης και απομάκρυνση μέρους της πρώτης ύλης σε διογκωμένη ή αδιόγκωτη μορφή από την κεφαλή του θαλάμου προς το περιβάλλον.

Το εύρος τιμών της μαζικής παροχής της πρώτης ύλης, καθώς και η ευαισθησία ρύθμισης της μεταβολής της, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Εύρος τιμών και ευαισθησία ρύθμισης παροχής πρώτης ύλης

| Συμβολισμός | Εύρος λειτουργίας       | Ευαισθησία ρύθμισης        |
|-------------|-------------------------|----------------------------|
| $\dot{m}_p$ | 0-35 kg·h <sup>-1</sup> | Ανα 0.1 kg·h <sup>-1</sup> |

#### 4.1.4. Σύστημα μέτρησης και ρύθμισης θερμοκρασίας, τροφοδοσίας και δόνησης

Στον κεντρικό ηλεκτρονικό πίνακα του συστήματος συλλέγονται και απεικονίζονται οι μετρήσεις των θερμοστοιχείων της εγκατάστασης και μέσω κατάλληλων ελεγκτών γίνεται η ρύθμιση της θερμοκρασίας λειτουργίας των θερμοκρασιακών ζωνών της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης και της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδό του από τον προθερμαντήρα. Επιπλέον, μέσω του ηλεκτρονικού πίνακα πραγματοποιείται ρύθμιση της συνεχούς ή περιοδικής λειτουργίας της αερόσφυρας, της συχνότητας περιστροφής του αναδευτήρα που βρίσκεται στο σιλό της πρώτης ύλης και της συχνότητας περιστροφής του κινητήρα του τροφοδότη μέσω της οποίας ρυθμίζεται και η παροχή της πρώτης ύλης στο θάλαμο θέρμανσης.



Σχήμα 4.10. Πίνακας ελέγχου θερμοκρασίας καμίνου και συστήματος δόνησης (αριστερά) και πίνακας ελέγχου λειτουργίας προθερμαντήρα αέρα, τροφοδότη και αναδευτήρα σιλό τροφοδοσίας (δεξιά).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται προσομοίωση της λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου με την μέθοδο CFD με σκοπό την σε βάθος διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν εντός του θαλάμου διόγκωσης σε ρεαλιστικά σενάρια λειτουργίας και την μελέτη επίδρασης των κύριων παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου (θερμοκρασία ζωνών, ρυθμός τροφοδοσίας αέρα) στο προφίλ ταχύτητας και θερμοκρασίας του αέρα. Επιπλέον των παραμέτρων αυτών, μελετάται και η επίδραση που θα είχε στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής η εμφύσηση προθερμασμένου αέρα, μέσω της επίλυσης ενός σεναρίου κατά το οποίο ο τροφοδοτούμενος αέρας έχει θερμοκρασία 500 °C. Η μελέτη της επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας της νέας καμίνου διόγκωσης στη διαμόρφωση των συνθηκών υπό τις οποίες πραγματοποιείται η διόγκωση παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, ειδικά εφόσον πρόκειται για μία εξολοκλήρου νέου τύπου κάμινο. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα από τα πλέον διαδεδομένα προγράμματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, το FLUENT<sup>®</sup> με σκοπό τη μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης και της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος στην κατανομή αυτή.

Το πρόγραμμα FLUENT το οποίο εντάσσεται πλέον στην πλατφόρμα ANSYS προσφέρει με τη δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλου εύρους φυσικών φαινομένων και διεργασιών όπως τυρβώδεις και φυσικές ροές, μεταφορά θερμότητας και καύση κ.α. που συναντώνται στην βιομηχανική πρακτική μέσω της επίλυσης πεπλεγμένων μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων όπως είναι οι βασικές εξισώσεις μεταφοράς μάζας, ορμής και ενέργειας. Στο FLUENT η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, ενώ τα αποτελέσματα μπορούν να αναφέρονται σε στατικές ή χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος. Παρέχει πλήθος επιλογών σε γραφικό περιβάλλον (GUI- Graphic User Interface) σκοπεύοντας στην αυτόματη προσαρμογή των βασικών εξισώσεων ρευστοδυναμικής για τη μοντελοποίηση διαφόρων φυσικών και τεχνητών διεργασιών. Το πρόγραμμα Fluent χρησιμοποιείται σαν εργαλείο σε πλήθος εφαρμογών με σκοπό την προσομοίωση της λειτουργίας και των συνθηκών που επικρατούν εντός καμίνων, μεταλλουργικών ή χημικών αντιδραστήρων, μεταλλακτών θερμότητας και άλλων συσκευών στις οποίες λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και ενέργειας.

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, οι οποίες και επιλύονται στο πρόγραμμα FLUENT με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, και το μοντέλο υπολογισμού της τυρβώδους ροής που εφαρμόστηκε. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γεωμετρία του θαλάμου θέρμανσης, και γίνεται ο ορισμός των οριακών συνθηκών του συστήματος και η διακριτοποίηση του όγκου ελέγχου με σκοπό τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Ακολουθούν η παρουσίαση των εξισώσεων μεταβολής των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του υλικού κατασκευής του θαλάμου συναρτήσει της θερμοκρασίας και ο ορισμός των οριακών συνθηκών για τις περιπτώσεις που θα μελετηθούν. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης για τις αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις που μελετήθηκαν αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με πειραματικές μετρήσεις με σκοπό την επαλήθευση της ορθότητας των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

### 5.1. Εξισώσεις πεδίου ροής και μοντελοποίηση τυρβώδους ροής

- Εξίσωση διατήρησης μάζας ή συνέχειας (continuity equation)

Η εξίσωση διατήρησης μάζας στη γενικευμένη διανυσματική της μορφή έχει ως εξής (Fluent Inc., 2003):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5.1)$$

όπου  $\vec{u}$  το διάνυσμα ταχύτητας και  $\rho$  η πυκνότητα.

Η εξίσωση 5.1 με χρήση γενικευμένης παραγώγου μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \rho \vec{u} = 0 \quad (5.2)$$

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες η παραπάνω εξίσωση έχει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \partial(\rho u_i) = 0 \quad (5.3)$$

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης 5.3 αποτελεί συνοπτικό τρόπο γραφής του αθροίσματος:

$\sum_{i=1,2,3} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i)$ . Οι τρεις αυτοί όροι υποδηλώνουν τις συντεταγμένες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .



▪ Εξίσωση διατήρησης ορμής

Για το γενικό τανυστή τάσεων σε πραγματικό ρευστό ισχύει (Fluent Inc., 2003):

$$\underline{\underline{T}} = -p\underline{\underline{I}} + \underline{\underline{\tau}} \quad (5.4)$$

όπου  $\underline{\underline{T}}$  ο συνολικός τανυστής τάσεων,  $p$  η στατική πίεση,  $\underline{\underline{I}}$  ο μοναδιαίος τανυστής και  $\underline{\underline{\tau}}$  ο τανυστής τάσεων λόγω ιξώδους.

Η γενική διανυσματική μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ορμής είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}}) + \rho \bar{g} \quad (5.5)$$

όπου  $\rho \bar{g}$  το διάνυσμα της δύναμης της βαρύτητας και  $\bar{u} \bar{u}$  τανυστής δευτέρας τάξης

Με εφαρμογή της γενικευμένης παραγώγου η εξίσωση 5.5 παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}}) + \rho \bar{g} \quad (5.6)$$

Για ισότροπα υλικά, ο τανυστής τάσεων λόγω ιξώδους γίνεται:

$$\underline{\underline{\tau}} = \mu [(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} \underline{\underline{I}}] \quad (5.7)$$

όπου  $(\nabla \bar{u})^T$  ο αντίστροφος τανυστής  $\nabla \bar{u}$ . Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης 5.7 αντιπροσωπεύει τη διαστολή του όγκου.

Για ανισότροπα υλικά, ο τανυστής τάσης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\underline{\underline{\tau}} = \mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) + (\lambda - \frac{2}{3} \mu) (\nabla \cdot \bar{u}) \underline{\underline{I}} \quad (5.8)$$

όπου  $\lambda$  ο δεύτερος συντελεστής ιξώδους, που ισούται με μηδέν για ισότροπα υλικά.

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, η εξίσωση διατήρησης της ορμής για ισότροπα υλικά γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5.9)$$

όπου  $\delta_{ij}$  η συνάρτηση δέλτα του Kronecker.

▪ Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η εξίσωση της ενέργειας στη γενική της μορφή μπορεί να γραφεί ως εξής (Fluent Inc., 2003):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_j + (\underline{\tau}_{eff} \cdot \bar{u})) + S_h \quad (5.10)$$

Οι τρεις όροι εντός παρενθέσεως στο δεξί σκέλος της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύουν την μεταφορά ενέργειας λόγω αγωγής θερμότητας, μεταφορά μάζας λόγω διάχυσης συστατικών μείγματος και λόγω ιξώδους απώλειας ενέργειας, αντίστοιχα. Με  $E$  συμβολίζεται η συνολική ενέργεια, η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = e + \frac{u^2}{2} = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (5.11)$$

Στις εξισώσεις 5.10 και 5.11 οι συμβολισμοί έχουν ως εξής:

$e$ : εσωτερική ενέργεια

$h$ : ενθαλπία

$k_{eff}$ : ενεργός ή ολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{eff}=k+k_i$ )

$k$ : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

$k_i$ : τυρβώδης θερμική αγωγιμότητα. Η έκφρασή της αλλάζει ανάλογα με το εκάστοτε μοντέλο τυρβώδους ροής που εφαρμόζεται

$\underline{\tau}_{eff}$ : ενεργός ή ολικός τανυστής τάσεων, ο υπολογισμός του οποίου πραγματοποιείται από την εξίσωση 5.7 με αντικατάσταση του  $\mu$  από το  $\mu_{eff}$

$\mu_{eff}$ : ενεργό ή ολικό δυναμικό ιξώδες ( $\mu_{eff}=\mu+\mu_i$ )

$\mu_i$ : δυναμικό ιξώδες δίνης. Η έκφρασή του αλλάζει ανάλογα με το εκάστοτε μοντέλο τυρβώδους ροής που εφαρμόζεται

$\bar{J}_j$ : ρυθμός ροής διάχυσης του συστατικού  $j$  του μείγματος

$S_h$ : πηγή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα όγκου π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, χημική αντίδραση

Στην περίπτωση ιδανικού αερίου η ενθαλπία  $h$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (5.12)$$

ενώ στην περίπτωση ασυμπιέστων ροών η ενθαλπία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (5.13)$$

όπου  $Y_j$  το κλάσμα μάζας του συστατικού  $j$  προς τη συνολική μάζα του μείγματος. Η ενθαλπία του κάθε συστατικού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{\rho,j} dT \quad (5.14)$$

Στην περίπτωση ενός συστατικού με σταθερό συντελεστή θερμοχωρητικότητας  $C_p$ , η εξίσωση υπολογισμού της ενθαλπίας σε ασυμπίεστη ροή διαμορφώνεται ως εξής:

$$h = C_p T + \frac{p}{\rho} \quad (5.15)$$

Σε περίπτωση ασυμπίεστης ροής, το έργο της πίεσης και της κινητικής ενέργειας είναι αμελητέο και έτσι η ολική ενέργεια ( $E$ ) συμπίπτει με την ενθαλπία. Τελικά, για ασυμπίεστες ροές και ένα μόνο συστατικό η εξίσωση της ενέργειας παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\bar{u} \rho h) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \int_{T_{ref}}^T C_{\rho,j} dT + (\underline{\tau}_{eff} \cdot \bar{u})) + S_h \quad (5.16)$$

Η εξίσωση 5.16 σε καρτεσιανή μορφή γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E) + p] = -\frac{\partial}{\partial x_j} [k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i(\tau_{ij})_{eff}] + S_h \quad (5.17)$$

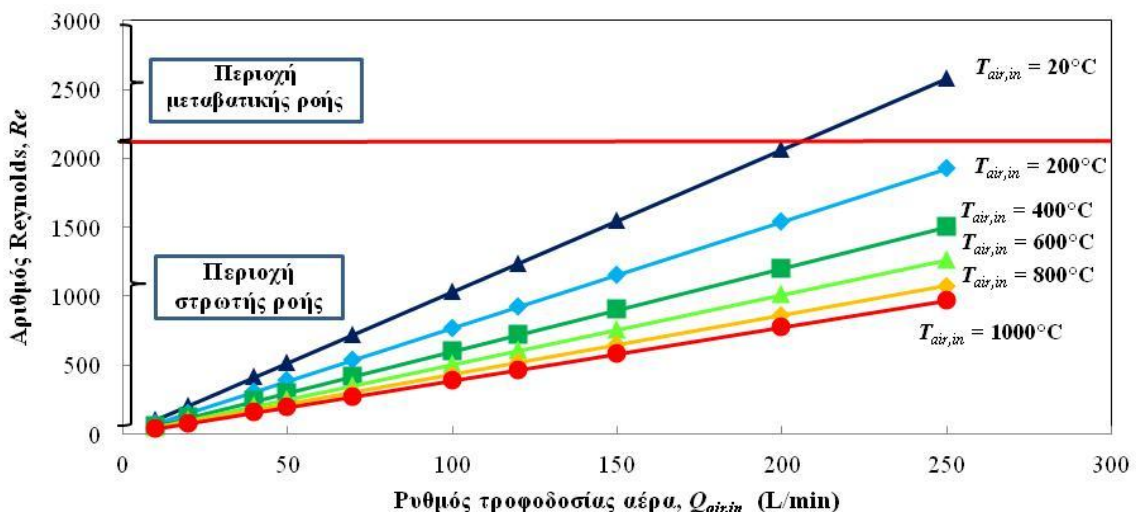
▪ Τυρβώδης ροή

Η ροή ενός ρευστού χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης όταν βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς διαταραχής, με συνεχείς ακανόνιστες διακυμάνσεις της στιγμιαίας ταχύτητας και πίεσης ως προς το χρόνο. Οι σημαντικότερες ιδιότητες της τυρβώδους ροής είναι (Τσαγγάρης, 1995):

- Η *αταξία* της ροής που κάνει αδύνατο τον ακριβή καθορισμό των χαρακτηριστικών της
- Η *διάχυση* της ροής που προκαλεί *ανάμιξη* της ροής και μεταφορά μάζας και ενέργειας μέσα στο σώμα του ρευστού
- Οι *μεγάλοι αριθμοί Reynolds* που είναι και το κρίσιμο μέγεθος διάκρισης της ροής μεταξύ στρωτής και τυρβώδους.
- Οι *μεγάλες διακυμάνσεις* της στροβιλώδους κίνησης και προς τις τρεις διαστάσεις.
- Η *αύξηση της εσωτερικής ενέργειας* του ρευστού που εκφράζεται ως *απώλεια* (dissipation) της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

- Η *συνέχεια* (continuum) του φαινομένου που εκφράζεται από τις εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών
- Τα περισσότερα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής είναι *κοινά* για όλα τα ρευστά, είτε είναι υγρά είτε αέρια.
- Δεν υπάρχει *αναλυτική λύση* των εξισώσεων που περιγράφουν την τυρβώδη ροή, όπως δεν υπάρχει αναλυτική λύση για τις εξισώσεις Navier-Stokes

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα κριτήρια βάσει των οποίων θα προβλεφθεί ο τύπος της ροής του αέρα που επικρατεί μέσα στο θάλαμο διόγκωσης. Στη βιβλιογραφία το κύριο κριτήριο για τον καθορισμό του είδους της ροής στις περιπτώσεις που ρευστό διατρέχει αγωγό αποτελεί ο αριθμός Reynolds η τιμή του οποίου εάν είναι άνω των 2100 μονάδων σηματοδοτεί τη μετάβαση από στρωτή ροή σε μεταβατική. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.1 παρουσιάζεται ο αριθμός Reynolds εντός του θαλάμου θέρμανσης όπως υπολογίστηκε για παροχή αέρα από 10 μέχρι 250 L/min που είναι το εύρος παροχών που μελετήθηκαν, και για διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο υπολογισμός έγινε για διαφορετικές θερμοκρασίες, λόγω της επίδρασης που έχει η θερμοκρασία τόσο στην πυκνότητα του αέρα όσο και στην πραγματική ογκομετρική του παροχή όπως διαμορφώνεται μετά τη θέρμανση του, μεγέθη τα οποία επηρεάζουν σημαντικά και την τιμή του αριθμού Reynolds.



Σχήμα 5.1. Υπολογισμός του αριθμού Re εντός του θαλάμου θέρμανσης για διάφορες συνθήκες ρυθμού τροφοδοσίας και θερμοκρασίας αέρα.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.1, στο εύρος παροχών που μελετήθηκαν, η ροή εντός του θαλάμου αναμένεται να είναι στρωτή αν χρησιμοποιηθεί ο αριθμός Re ως το μοναδικό κριτήριο για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της. Στην πραγματικότητα, η κατάσταση είναι διαφορετική λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της διάταξης των οπών εισόδου του

αέρα αλλά και λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας την οποία αποκτά ο αέρας και της εξάρτησης της πυκνότητάς του από τη θερμοκρασία του. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του αριθμού Reynolds στις οπές εισόδου του αέρα έδειξε ότι η ροή στα σημεία αυτά είναι στη μεταβατική περιοχή ( $2100 < Re < 4000$ ), ενώ στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ξεπερνά τα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης ( $Re > 4000$ ). Επιπλέον, η είσοδος του αέρα, ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, στο εσωτερικό του θαλάμου όπου επικρατούν θερμοκρασίες υψηλότερες των  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  αναμένεται να οδηγήσει σε διόγκωσή του λόγω της απότομης θέρμανσης του, με αποτέλεσμα την ακαριαία αύξηση του όγκου του και τη μείωση της πυκνότητάς του, φαινόμενα τα οποία συντελούν στη δημιουργία ροών με έντονα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά. Προς αυτή την κατεύθυνση δρα επίσης η συνεχής μεταβολή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία σε κάθε ζώνη είναι διαφορετική. Τέλος, όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της λειτουργίας της καμίνου, η μεταφορά θερμότητας εντός του θαλάμου μέσω φυσικής και εξαναγκασμένης συναγωγής περιπλέκουν επιπλέον τη ροή και είναι δυνατόν να μεταβάλλουν τη ροή από στρωτή σε τυρβώδη σε χαμηλότερους αριθμούς Reynolds από αυτούς που προτείνονται για τις περιπτώσεις όπου λαμβάνει χώρα μεταφορά θερμότητας μέσω ενός μόνο μηχανισμού (φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή) (Jackson et al., 1989).

Στη προσομοίωση της τυρβώδους ροής, η περιγραφή της γίνεται με στατιστικό τρόπο αφού τα χαρακτηριστικά της μεταβάλλονται τυχαία γύρω από μία τιμή η οποία όμως συνήθως δεν αποκλίνει περισσότερο από 10% της μέσης τιμής της ταχύτητας (Τσαγγάρης, 1995). Η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes σε όλο το μήκος ενδιαφέροντος της ροής και για διαφορετικούς χρόνους αποτελεί εργασία εξαιρετικά χρονοβόρα και γιαυτό το λόγο η προσέγγιση του προβλήματος πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού των μέσων τιμών των βασικών μεγεθών της ροής (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS). Με τον τρόπο αυτό οι στιγμιαίες τιμές των ταχυτήτων και της πίεσης εκφράζονται ως άθροισμα μίας μέσης τιμής και μίας διακύμανσης σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (5.18)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (5.19)$$

όπου  $\bar{u}$ ,  $\bar{p}$  οι μέσες τιμές της ταχύτητας και της πίεσης και της ενέργειας και  $u'_i$ ,  $p'$  οι αντίστοιχες διακυμάνσεις. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις της ταχύτητας και της πίεσης στις εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ορμής προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (5.21)$$

Στην περίπτωση χρήσης των μέσων τιμών των ταχυτήτων του ρευστού, η εξίσωση διατήρησης μάζας ισχύει αναλλοίωτη. Η εξίσωση διατήρησης της ορμής για τις μέσες τιμές διαφέρει από τη μορφή της εξίσωσης της ορμής για τις στιγμιαίες τιμές, καθώς εμφανίζονται νέοι όροι ενώ στην εξίσωση διατήρησης της ορμής εμφανίζονται νέοι όροι που αντιπροσωπεύουν το φαινόμενο της τυρβώδους ροής. Οι τάσεις Reynolds  $-\rho \overline{u_i' u_j'}$  απαιτεί τη δημιουργία μοντέλου τυρβώδους ροής για τη δημιουργία κλειστού συστήματος εξισώσεων.

- Το μοντέλο k-ε

Το μοντέλο k-ε αποτελεί ημιεμπειρικό μοντέλο και έχει τύχει ευρείας αποδοχής αφού θεωρείται από τα πλέον αξιόπιστα και οικονομικά (από την άποψη του υπολογιστικού χρόνου), επειδή έχει τη δυνατότητα επίλυσης με ικανοποιητική ακρίβεια ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων τυρβώδους ροής. Αναπτύχθηκε από τους Launder και Spalding το 1972 και έχει δείξει ικανοποιητική συμπεριφορά κατά την προσομοίωση ροής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές (Launder and Spalding, 1972). Οι δύο προς επίλυση εξισώσεις που αποτελούν το μοντέλο είναι η εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ( $k$ ) και η εξίσωση του ρυθμού απώλειας ενέργειας ( $\varepsilon$ ), του ρυθμού δηλαδή μετατροπής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε θερμότητα.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια ( $k$ ) και ο ρυθμός απώλειάς της ( $\varepsilon$ ) δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις (Launder and Spalding, 1972):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.23)$$

όπου:

$G_k$ : ο ρυθμός παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που οφείλεται στην απόκλιση από τη μέση ταχύτητα

$G_b$ : ο ρυθμός παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που οφείλεται στη δύναμη της άνωσης

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$ : σταθερές

$\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ : οι αριθμοί Prandtl για το  $k$  και το  $\varepsilon$  αντίστοιχα.

Ο συντελεστής τυρβώδους ιξώδους  $\mu_t$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.24)$$

Η τιμή του συντελεστή  $G_k$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_k = -\rho u_i' u_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5.25)$$

Η τιμή του συντελεστή  $G_b$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_b = \beta_{gi} \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.26)$$

Οι ακριβείς τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 καθορίστηκαν μετά από εκτεταμένη έρευνα και πειράματα με ρευστά όπως ο αέρας και το νερό σε μεγάλο εύρος συνθηκών ροής.

Πίνακας 5.1. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου k-ε (Launder and Spalding, 1972).

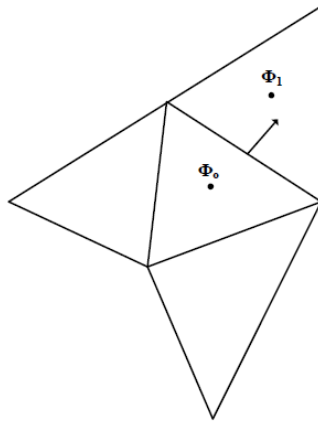
| Σταθερά μοντέλου k-ε | Τιμή |
|----------------------|------|
| $C_{1\varepsilon}$   | 1.44 |
| $C_{2\varepsilon}$   | 1.92 |
| $C_\mu$              | 0.09 |
| $\sigma_k$           | 1.0  |
| $\sigma_\varepsilon$ | 1.3  |

▪ Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Οι εξισώσεις διατήρησης ορμής και μάζας που παρουσιάστηκαν συνθέτουν ένα σύστημα πεπλεγμένων μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, των οποίων η αναλυτική επίλυση είναι αδύνατη. Παρόλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα προσεγγιστικής επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων που περιγράφηκαν με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, αντικείμενο με το οποίο ασχολείται ο τομέας υπολογιστικής ρευστομηχανικής (*Computational Fluid Dynamics- CFD*).

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων αποτελεί μία από τις μεθόδους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση διαφορικής ή συστήματος διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες εκφράζουν τη διατήρηση κάποιου μεγέθους, όπως είναι η μάζα, η ορμή και η ενέργεια. Ο χώρος που ορίζεται από

τις εξισώσεις διαίρεται σε πεπερασμένο πλήθος όγκων ελέγχου. Σε κάθε όγκο ελέγχου η διατήρηση του κάθε φυσικού μεγέθους εκφράζεται ολοκληρώνοντας την εκάστοτε διαφορική εξίσωση, ενώ το ολοκλήρωμα που προκύπτει εκφράζεται προσεγγιστικά από μία αλγεβρική παράσταση. Οι αλγεβρικές αυτές παραστάσεις θα πρέπει να τείνουν να ταυτιστούν με τα αρχικά ολοκληρώματα στο όριο που το μέγεθος των όγκων ελέγχου τείνει στο μηδέν. Η όλη διαδικασία καταλήγει στη δημιουργία ενός αλγεβρικού συστήματος, το οποίο περιέχει από μία εξίσωση για κάθε άγνωστη φυσική ποσότητα σε κάθε όγκο ελέγχου η λύση της οποίας δίνει την προσεγγιστική τιμή της στον όγκο ελέγχου.



Σχήμα 5.2. Ο όγκος ελέγχου για την διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς της ποσότητας  $\phi$ .

Η μαθηματική έκφραση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα θεωρώντας την παρακάτω εξίσωση μεταφοράς της φυσικής ποσότητας ‘ $\phi$ ’ σε σταθερές συνθήκες. Η εξίσωση διατήρησης της φυσικής ποσότητας  $\phi$  σε μορφή ολοκληρώματος για ένα στοιχειώδη όγκο ‘ $V$ ’ έχει ως εξής:

$$\oint \rho \phi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla_{\phi} \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (5.27)$$

όπου :

$\mathbf{u}$ : το διάνυσμα της ταχύτητας ( $\mathbf{u} = u_i + u_j$  για τις δύο διαστάσεις)

$\Gamma_{\phi}$ : ο συντελεστής διάχυσης της ποσότητας  $\phi$

$\nabla_{\phi}$ : η κλίση του  $\phi$  για δύο διαστάσεις ( $= (\partial\phi/\partial x)\mathbf{i} + (\partial\phi/\partial y)\mathbf{j}$ )

$S_{\phi}$ : η πηγή του  $\phi$  ανά μονάδα όγκου

Η εξίσωση 5.27 εφαρμόζεται σε κάθε όγκο ελέγχου στο υπολογιστικό πεδίο. Αν θεωρήσουμε ένα τριγωνικό στοιχείο σε διδιάστατο χώρο (Σχήμα 5.2) η διακριτοποίηση της εξίσωσης 5.27 έχει ως εξής:



$$\sum_j^N u_f \Phi_f \phi_f A_f = \sum_j^N \Gamma_f (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (5.28)$$

όπου:

$N$ : ο αριθμός των επιφανειών που περικλείουν τον όγκο ελέγχου

$\phi_f$ : η τιμή της ποσότητας ‘ $\phi$ ’ που μεταφέρεται διαμέσου της επιφάνειας  $f$

$u_f$ : η ροή μάζας διαμέσου της επιφάνειας  $f$

$A_f$ : το εμβαδόν της επιφάνειας  $f$  ( $|A| = |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$ )

$(\nabla \phi)_n$ : η μεταβολή της ποσότητας ‘ $\nabla \phi$ ’ σε διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του στοιχείου

$V$ : ο όγκος του στοιχείου

Κατά τη διαδικασία επίλυσης αποθηκεύονται οι τιμές της ποσότητας ‘ $\phi$ ’ στο κέντρο κάθε στοιχείου. Ο προσδιορισμός της τιμή  $\phi_f$  στην επιφάνεια  $f$  πραγματοποιείται με την διαδικασία παρεμβολής.

Οι δύο μέθοδοι παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής (Fluent Inc., 2003):

- First Order Upwind

Η τιμή της ποσότητας  $\phi$  είναι ίδια στο κέντρο αλλά και στις πλευρές του εκάστοτε κελιού και ίση με την τιμή της ποσότητας  $\phi$  στο γειτονικό κελί που τοποθετείται ανάντη της ροής.

- Second Order Upwind

Η τιμή της ποσότητας  $\phi$  στις πλευρές του όγκου ελέγχου προσδιορίζεται μέσω σειράς Taylor της παρακάτω μορφής:

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla \phi \cdot \vec{r} \quad (5.29)$$

όπου  $\phi$  και  $\nabla \phi$  είναι η τιμή στο κέντρο του κελιού και η διαφορά τιμών του  $\phi$  στο γειτονικό κελί που βρίσκεται ανάντη της ροής και στο τρέχον κελί ενώ  $\vec{r}$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης από το κέντρο του γειτονικού κελιού ανάντη της ροής μέχρι το κέντρο της πλευράς.

Εξαιτίας της μη γραμμικότητας της εξίσωσης που επιλύεται στον όγκο ελέγχου, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η μεταβολή της ποσότητας ‘ $\phi$ ’ κατά τη διαδικασία επίλυσης. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με τη χρήση παραγόντων υπερχαλάρωσης (Under-Relaxation factors), που έχει

ως αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας 'φ' που υπολογίζεται με κάθε επανάληψη. Η σχέση που περιγράφει την τιμή της ποσότητας 'φ' και του παράγοντα υπερχαλάρωσης είναι η εξής:

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (5.30)$$

όπου:

$\phi_{old}$ : η τιμή  $\phi$  που υπολογίστηκε από την αμέσως προηγούμενη επαναληπτική διαδικασία

$\Delta\phi$ : η διαφορά της ποσότητας  $\phi$  όπως υπολογίστηκε από την επαναληπτική διαδικασία

$\alpha$ : ο παράγοντας υπερχαλάρωσης που είναι μικρότερος της μονάδας.

Μεγάλοι συντελεστές  $\alpha$  οδηγούν σε γρήγορες αλλά ασταθείς λύσεις, ενώ η αντίθετη προσέγγιση σημαίνει σταθερές λύσεις οι οποίες όμως επιτυγχάνονται σε αυξημένο υπολογιστικό χρόνο. Η μεταβολή των παραγόντων υπερχαλάρωσης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των υπολογισμών συστήνεται για την επίτευξη λύσης στα προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

## 5.2. Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου

### 5.2.1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την περιγραφή μιας φυσικής ή τεχνητής κατάστασης με τη μέθοδο CFD απαιτεί τη σταδιακή προσέγγιση της υπό διερεύνηση περίπτωσης. Τα λογικά βήματα που οφείλουν να ακολουθούνται αναφέρονται συνοπτικά σε σειρά εκτέλεσης:

1. Καθορισμός στόχου προσομοίωσης και ορίων του συστήματος εντός των οποίων θα διενεργηθεί αυτή.
2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας ενδιαφέροντος και διακριτοποίηση του χώρου σε πεπερασμένο αριθμό όγκων, οι οποίοι αποτελούν το υπολογιστικό πλέγμα
3. Αναγνώριση της φύσης του προβλήματος και επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων προς επίλυση (χαρακτηριστικά ροής, μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας, αριθμός φάσεων).
4. Καθορισμός των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν τη γεωμετρία.
5. Καθορισμός των συνοριακών συνθηκών.
6. Ορισμός των παραμέτρων επίλυσης (μέθοδο επίλυσης, ζητούμενη ακρίβεια, κριτήρια σύγκλισης λύσης).

7. Ορισμός των αρχικών τιμών.
8. Υπολογισμός λύσης.
9. Έλεγχος αποτελεσμάτων με βάση τα δεδομένα του προγράμματος (βαθμός σύγκλισης, συνολικό ισοζύγιο μάζας και ενέργειας).
10. Βελτίωση του υπολογιστικού πλέγματος αν κριθεί απαραίτητο και περαιτέρω επίλυση.
11. Εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων.

### **5.2.2. Σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου, ορισμός οριακών συνθηκών και διακριτοποίηση γεωμετρίας**

Ένα από τα σημαντικότερα στάδια στην προσομοίωση της λειτουργίας του θαλάμου θέρμανσης αποτελεί ο σχεδιασμός της γεωμετρίας εντός της οποίας θα επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων διατήρησης των φυσικών ποσοτήτων, καθώς επίσης και η διακριτοποίηση της περιοχής που περικλείει η γεωμετρία αυτή ώστε να σχηματισθεί το υπολογιστικό πλέγμα, εντός του οποίου θα εφαρμοστούν οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης που περιγράφηκαν. Η ποιότητα του πλέγματος επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της λύσης και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας και η διακριτοποίηση της καταναλώνουν μέχρι και 80% του συνολικού χρόνου που διατίθεται για την πραγματοποίηση της αριθμητικής μελέτης.

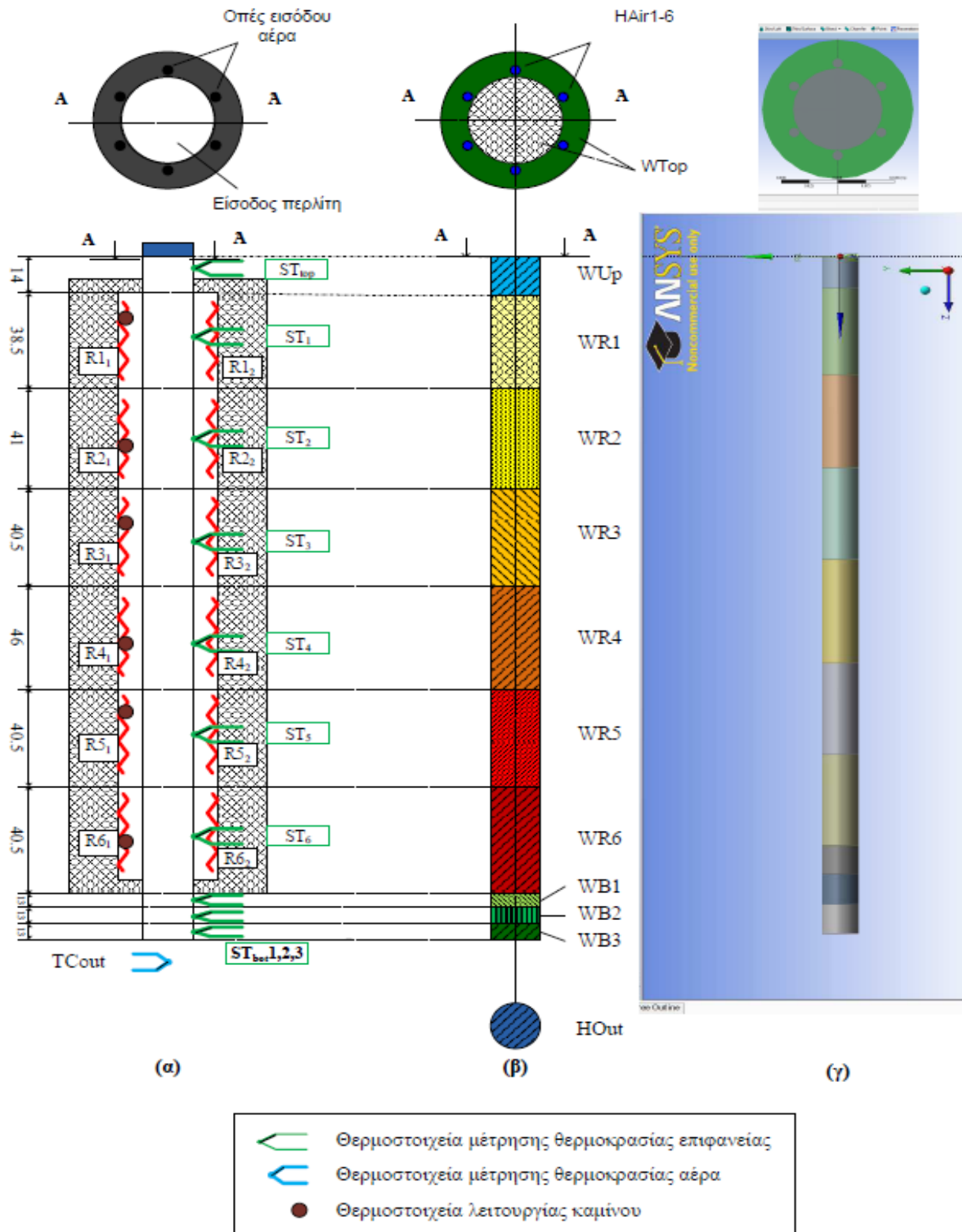
#### Σχεδιασμός της γεωμετρίας και καθορισμός των οριακών συνθηκών

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του θαλάμου θέρμανσης πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Design Modeler<sup>®</sup>, ενώ η διακριτοποίηση της γεωμετρίας στο γεωμετρικό επεξεργαστή ICEM CFD<sup>®</sup> Meshing Generation Software, ο οποίος εμπεριέχεται στην πλατφόρμα ANSYS<sup>®</sup>. Το σχεδιαστικό πρόγραμμα Design Modeler επιτρέπει το σχεδιασμό οποιασδήποτε γεωμετρίας σε όλα τα συστήματα συντεταγμένων, ενώ ο επεξεργαστής ICEM CFD επιτρέπει την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος (meshing) και παράλληλα τον ορισμό του τύπου των οριακών συνθηκών των επιφανειών (είσοδο μάζας, είσοδο ταχύτητας, ροή θερμότητας, σταθερή θερμοκρασία επιφάνειας κ.λπ.) και των όγκων (ρευστό, στερεό) του συστήματος.

Σχεδιάστηκε κύλινδρος διαμέτρου 134 mm και μήκους 3 m, ο οποίος αντιστοιχεί στον όγκο που περικλείει η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου. Το επάνω τμήμα (κεφαλή) του θαλάμου διόγκωσης περιλαμβάνει συνολικά 7 οπές. 6 οπές διαμέτρου 9mm, από τις οποίες πραγματοποιείται η είσοδος του αέρα και οι οποίες είναι

τοποθετημένες περιφερειακά ενώ το κέντρο τους απέχει 44.5 mm από τον άξονα του αγωγού και μια μεγαλύτερη κεντρική οπή διαμέτρου 79mm μέσω της οποίας πραγματοποιείται η είσοδο του περλίτη στην κάμινο. Λόγω της προσομοίωσης της λειτουργίας της καμίνου σε συνθήκες ροής μίας φάσης, η οπή εισόδου του περλίτη θεωρήθηκε ως τοίχωμα με θερμοκρασία ίδια με αυτή των γειτονικών του τοιχωμάτων. Η λειτουργία του εκάστοτε ζεύγους θερμικών αντιστάσεων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας θερμικής ζώνης εντός της οποίας η θερμοκρασία σε κάθε σημείο της επιφάνειας είναι ίδια (WR1-6).

Τα τοιχώματα του θαλάμου που βρίσκονται πάνω (WUp, WTop) και κάτω (WB1-3) από τις θερμικές ζώνες δέχονται επίσης θερμότητα λόγω αγωγής αλλά και λόγω ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται έμμεσα πλέον θερμικές ζώνες στις περιοχές αυτές. Η θερμοκρασία των ζωνών αυτών ορίζεται βάσει πειραματικών μετρήσεων της θερμοκρασίας του θαλάμου στην εξωτερική του επιφάνεια. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή η οποία βρίσκεται κάτω από το 6<sup>ο</sup> ζεύγος αντιστάσεων (WB) χωρίστηκε σε τρεις ισοθερμοκρασιακές περιοχές λόγω της μεγάλης απόκλισης που έδειξαν οι πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας κατά μήκος της.



Σχήμα 5.3. Σχηματική παράσταση που απεικονίζονται (όχι σε κλίμακα): (α) Η τομή της καμίνου διόγκωσης και κάτωψη της κεφαλής του θαλάμου θέρμανσης, (β) Απλοποιημένη γεωμετρία του θαλάμου θέρμανσης και οι επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν τα όρια του συστήματος, (γ) η γεωμετρία εντός της οποίας αναπτύσσεται το υπολογιστικό πλέγμα όπως κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα Design Modeler της πλατφόρμας ANSYS.

Πίνακας 5.2. Οι οριακές συνθήκες του συστήματος και ο ορισμού των χαρακτηριστικών τους μεγεθών.

| <b>Συμβολισμός</b>      | <b>Περιγραφή</b>  | <b>Συνοριακή συνθήκη</b>             | <b>Ορισμός</b>                  |
|-------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| <b><i>HAIR(1-6)</i></b> | Οπές εισόδου αέρα | Είσοδος αέρα με ορισμένη ταχύτητας   | Βάσει ογκομετρικής παροχής αέρα |
| <b><i>WTop</i></b>      | Τοίχωμα κεφαλής   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WUp</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR1</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR2</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR3</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR4</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR5</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WR6</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WB1</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WB2</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>WB3</i></b>       | Τοίχωμα θαλάμου   | Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος       | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |
| <b><i>HOut</i></b>      | Έξοδος θαλάμου    | Έξοδος καμίνου σε ατμοσφαιρική πίεση | Μέτρηση θερμοκρασίας επιφανείας |

### Παραδοχές

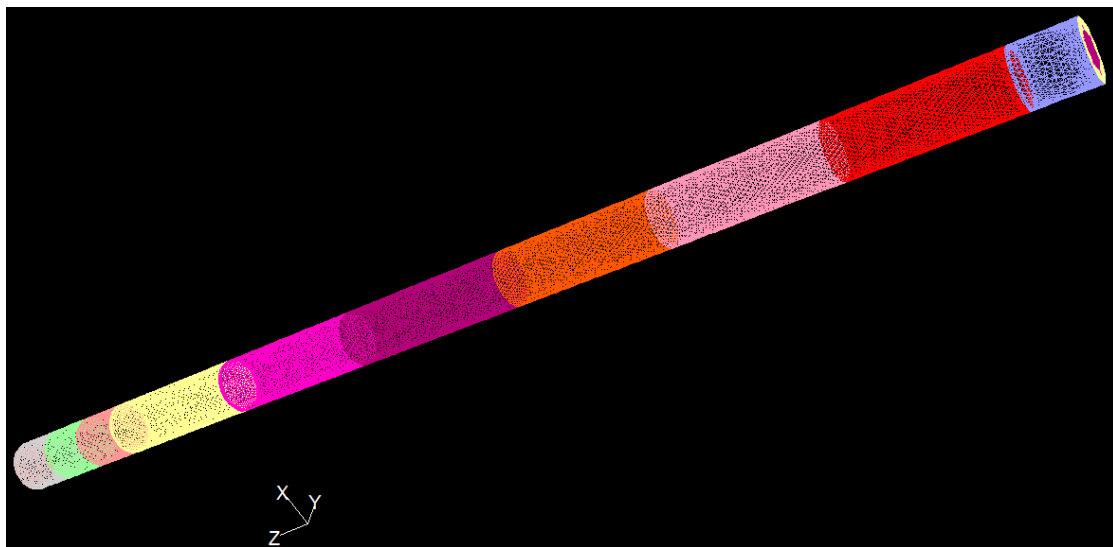
Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου για την προσομοίωση της λειτουργίας του θαλάμου διόγκωσης συνοδεύεται από τις παρακάτω παραδοχές:

- Η θερμοκρασία σε κάθε σημείο της επιφανείας που ορίζει η κάθε οριακή περιοχή είναι ίδια και δεν μεταβάλλεται χρονικά.
- Το κατώτερο μη-μονωμένο τμήμα του θαλάμου χωρίστηκε σε τρεις ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας. Η τιμή της θερμοκρασίας της κάθε μίας ζώνης ορίστηκε βάσει πειραματικών μετρήσεων της θερμοκρασίας της επιφάνειας του θαλάμου στα κέντρα των 3 αυτών ζωνών (WB1-WB3).

- Το ανώτερο τμήμα του αγωγού το οποίο και δεν θερμαίνεται άμεσα από τις θερμικές αντιστάσεις ελήφθη υπόψη ως ξεχωριστή οριακή επιφάνεια, ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας του καθορίστηκε βάσει πειραματικής μέτρησης (WUp).
- Η τροφοδοσία του αέρα ισοκατανέμεται στις έξι οπές της κεφαλής με αποτέλεσμα η παροχή μάζας αέρα να είναι ίδια σε όλες. Ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο διόγκωσης από τις έξι οπές εισόδου, κινούμενος καθοδικά ενώ η ταχύτητά του δεν παρουσιάζει ακτινική διαβάθμιση στην κάθε οπή.
- Ο αγωγός θεωρείται λείος .
- Η οπή μέσω της οποίας πραγματοποιείται η τροφοδοσία του περλίτη θεωρήθηκε ως επίπεδο τοίχωμα θερμοκρασίας ίσης με τη θερμοκρασία της κεφαλής του θαλάμου, η τιμή της οποίας καθορίστηκε μετά από πειραματική μέτρηση.

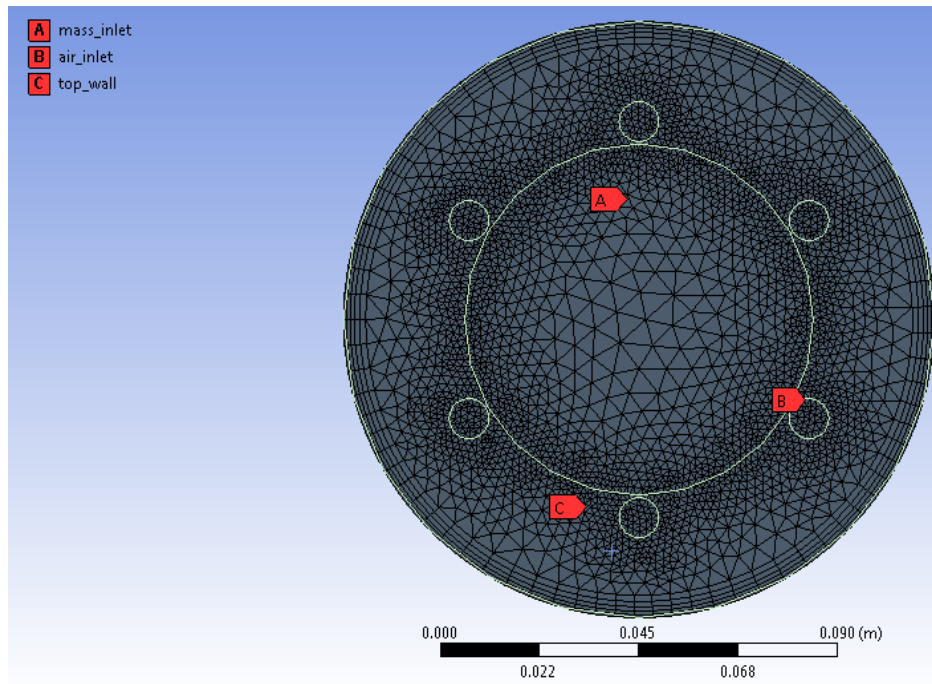
#### Διακριτοποίηση της γεωμετρίας

Κατά τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας που περιγράφηκε, ο όγκος ελέγχου διαιρέθηκε σε 559469 τετραεδρικά κελιά.



Σχήμα 5.4. Η διακριτοποίηση στην εξωτερική επιφάνεια του όγκου ελέγχου. Με διαφορετικό χρώμα αναπαρίστανται οι διαφορετικές οριακές περιοχές.

Κοντά στις περιοχές που αποτελούν τα όρια του συστήματος (boundaries) η κατασκευή του πλέγματος απαιτεί ειδικό χειρισμό. Στις περιοχές αυτές οι μεταβολές των σημαντικών μεγεθών, όπως της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα, είναι σημαντικές και για τον αποτελεσματικό υπολογισμό τους απαιτείται η πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος ώστε να μειωθεί η διαφορά των υπολογιστικών μεγεθών αυτών μεταξύ των γειτονικών κελιών.



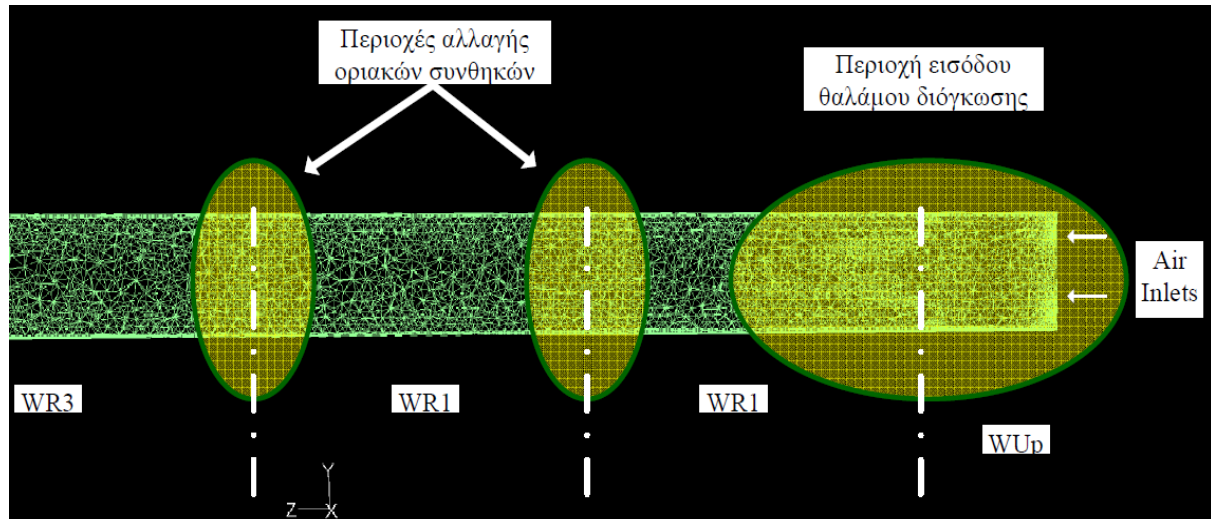
Σχήμα 5.5. Το υπολογιστικό πλέγμα στην κεφαλή του θαλάμου

Η πύκνωση του υπολογιστικού πλέγματος πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή Mesh Inflation Tool που δημιουργεί μια συστάδα από πρισματικού σχήματος κελιά στα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου το πάχος της οποίας επελέγη να είναι 6 κελιά. Ειδικό χειρισμό απαιτεί και η διακριτοποίηση της γεωμετρίας κοντά στις περιοχές εισόδου του αέρα λόγω της αναμενόμενης έντονης διαβάθμισης της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του. Ο αέρας εισέρχεται στο σύστημα από τις 6 οπές εισόδου με μεγάλη σχετικά ταχύτητα, ενώ μετά την είσοδό του ο όγκος του «απλώνεται» σε όλο το μήκος και πλάτος του αγωγού με αποτέλεσμα να μειώνεται αισθητά η ταχύτητά του κατά τον άξονα που ορίζουν οι οπές εισόδου ( $z$ ), ενώ παράλληλα εμφανίζονται διανύσματα ταχύτητας και στους υπόλοιπους δύο άξονες ( $x, y$ ) λόγω της ροής σε τρεις διαστάσεις. Επιπλέον, η θερμοκρασία του αέρα κατά την είσοδο του είναι συχνά ίδια με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ενώ μετά την είσοδό του στον θάλαμο θέρμανσης πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με μεγάλο ρυθμό με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του. Ακόμη, στα σημεία σημαντικής μεταβολής των ιδιοτήτων του αέρα εντάσσονται και οι περιοχές επαφής των θερμικών ζωνών, στις οποίες παρατηρείται σημαντική διαβάθμιση στην θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου και άρα και του αέρα.

Η επεξεργασία του υπολογιστικού πλέγματος εντάσσεται στη διαδικασία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων μετά από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου και τη βελτιστοποίηση του μοντέλου με σκοπό τη μείωση του σφάλματος και την διευκόλυνση της σύγκλισης της λύσης. Η εκλέπτυνση του υπολογιστικού πλέγματος πραγματοποιείται με κριτήριο τη διαφορά που παρουσιάζει η τιμή κάποιας βασικής υπολογιζόμενης ιδιότητας μεταξύ γειτονικών υπολογιστικών



κόμβων σε κάποιο βασικό μέγεθος που επιλέγεται. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής καμίνου τα βασικά μεγέθη βάσει των οποίων έγινε η εκλέπτυνση του υπολογιστικού πλέγματος είναι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του αέρα, ενώ το όριο εκλέπτυνσης ορίστηκε να είναι το 10% της μέγιστης διαβάθμισης που παρουσιάζουν οι τιμές μετά την αρχική επίλυση του μοντέλου.

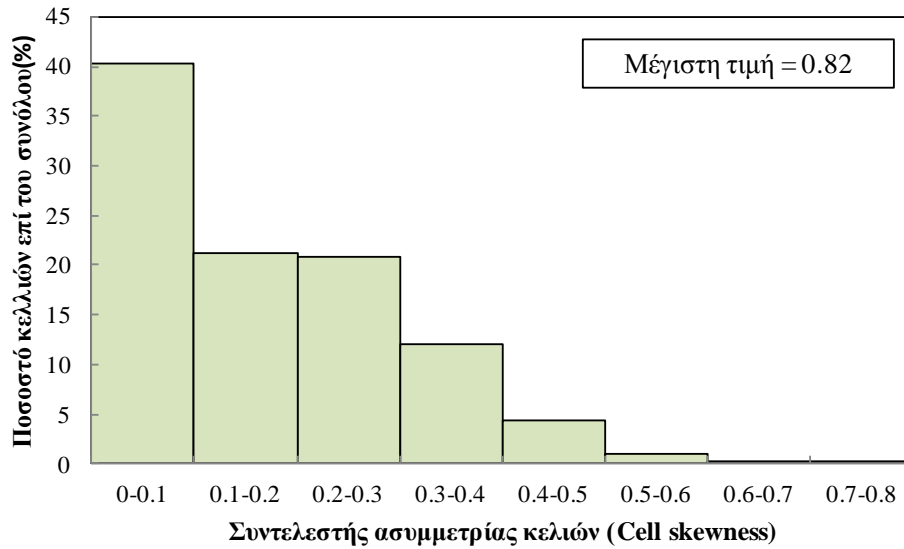


Σχήμα 5.6. Το υπολογιστικό πλέγμα στην τομή του όγκου ελέγχου με εστίαση στις περιοχές πύκνωσης του.

#### Ποιοτικά κριτήρια υπολογιστικού πλέγματος

Η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος έχει καθοριστική σημασία για την επίτευξη ακρίβειας και σταθερότητας στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Στα σημαντικά ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος συγκαταλέγονται η κατανομή των υπολογιστικών κόμβων και η γεωμετρία των υπολογιστικών κελιών ως προς τη συμμετρία που παρουσιάζουν και την αναλογία των διαστάσεων τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά ποιοτικά κριτήρια του υπολογιστικού πλέγματος που προτείνει η εταιρία ANSYS, το εύρος τιμών που πρέπει να λαμβάνουν, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες τιμές τους στην περίπτωση του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφεται.

- *Ασυμμετρία κελιών (Cell skewness)*: εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ του όγκου έκαστου κελιού και ενός ισόπλευρου κελιού ίδιου όγκου. Κελιά που παρουσιάζουν μεγάλη ασυμμετρία επηρεάζουν αρνητικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και δυσχεραίνουν τη σύγκλιση της λύσης. Σε γενικές γραμμές ο δείκτης ασυμμετρίας τριγωνικών ή τετράεδρων κελιών δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 0.95, ενώ η μέση τιμή του δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.35. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή στο υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάστηκε είναι 0.82, ενώ η τιμή του για το 50% των κελιών δεν ξεπερνά το 0.144.

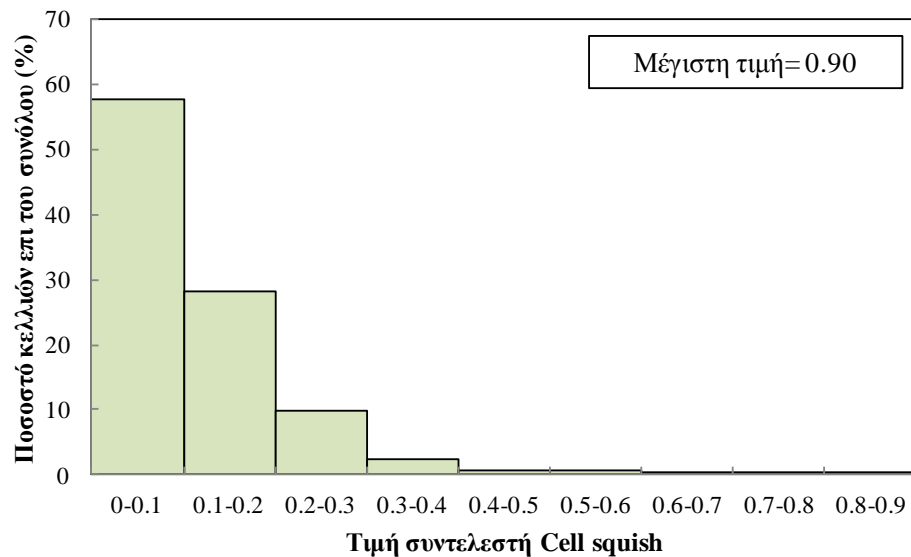


Σχήμα 5.7. Η κατανομή ασυμμετρίας των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος.

- *Αναλογία διαστάσεων* (Cells aspect ratio): ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του μήκους της μεγαλύτερης απόστασης από το κέντρο του κελιού προς τη μικρότερη. Η τιμή του καλό είναι να μην υπερβαίνει το 35. Στο υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε η αναλογία διαστάσεων παρουσιάζει μέγιστη τιμή 33.
- *Cell squish* : υπολογίζεται μέσω της απόστασης από το κέντρο του κελιού προς όλες τις πλευρές του και του διανύσματος της εκάστοτε πλευράς του κελιού. Η τιμή του υπολογίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$CSk_{index} = \max \left[ 1 - \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{r}_{c0/xfi}}{\left| \vec{A}_i \right| \left| \vec{r}_{c0/xfi} \right|} \right] \quad (5.31)$$

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές από 0 (άριστο κελί) έως 1 (χειρίστο κελί). Η μέγιστη τιμή του συντελεστή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.95, ενώ η τιμή του συντελεστή στο 50% των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος που κατασκευάστηκε δεν ξεπερνά το 0.1.



Σχήμα 5.8. Η κατανομή του συντελεστή Cell squish των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, το υπολογιστικό πλέγμα που κατασκευάστηκε χαρακτηρίζεται ως αρκετά ποιοτικό και δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα που θα δυσκολέψουν τη σύγκλιση των λύσεων και θα μειώσουν της ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

### 5.2.3. Ιδιότητες υλικών

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες τόσο του αέρα όσο και του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο θάλαμος θέρμανσης επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη των φαινομένων μεταφοράς μάζας και ενέργειας στο θάλαμο διόγκωσης και για το λόγο αυτό οφείλουν να ληφθούν υπόψη. Μάλιστα η επίδραση των μεταβολών αυτών αυξάνει λόγω του μεγάλου εύρους θερμοκρασιών που απαντώνται στο θάλαμο διόγκωσης. Το FLUENT επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής των βασικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν το μοντέλο συναρτήσει της θερμοκρασίας είτε από θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής είτε με αυτόματη κατασκευή εξισώσεων μέσω εισαγωγής σημειακών δεδομένων από τον χρήστη, είτε τέλος μέσω απευθείας εισαγωγής των εξισώσεων υπολογισμού της ιδιότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις υπολογισμού των βασικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως εισήχθησαν και επιλύθηκαν στο μαθηματικό μοντέλο.

#### Θερμοφυσικές ιδιότητες αέρα

Η μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι σημαντική, αφού ενώ μπορεί να εισάγεται στον θάλαμο διόγκωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος,

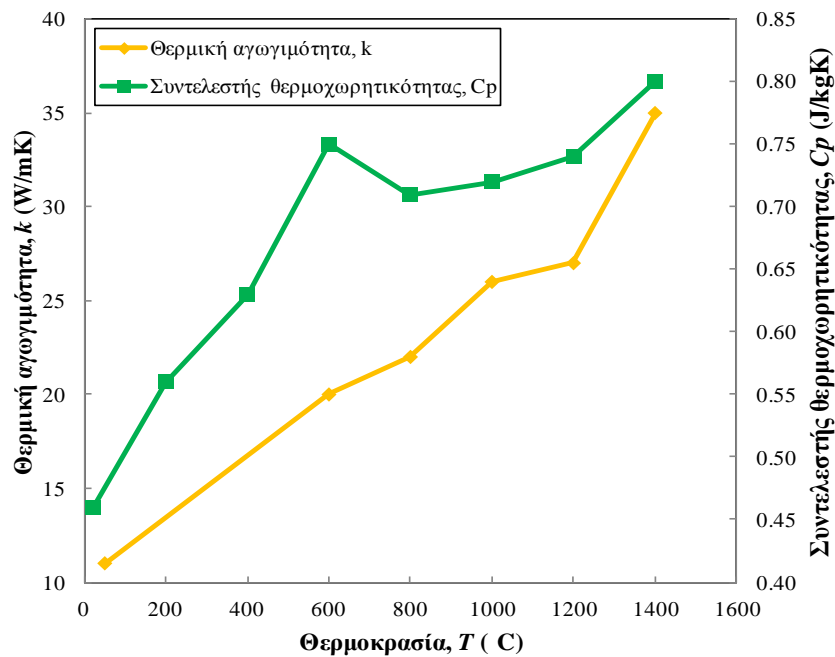
σε ορισμένες περιπτώσεις η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το θάλαμο διόγκωσης προσεγγίζει τους 1200 °C. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τιμής τους συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Πίνακας 5.3. Οι εξισώσεις υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

| Ιδιότητα                       | Εξίσωση υπολογισμού- Τιμές σταθερών  | Αναφορά  |
|--------------------------------|--|--|
| Πυκνότητα                      | $\rho = \frac{p}{\frac{R_g}{M_w} T}$ $R_g = 8.314 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}, M_w = 28.97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$   |  |
| Θερμική αγωγιμότητα            | $k_{air} = \alpha_{k,1} T_{air}^3 + \alpha_{k,2} T_{air}^2 + \alpha_{k,3} T_{air} + \alpha_{k,4}$ $a_{k,1} = 1.5207 \cdot 10^{-11}, a_{k,2} = -4.8574 \cdot 10^{-8},$ $a_{k,3} = 1.0184 \cdot 10^{-4}, a_{k,4} = -3.9333 \cdot 10^{-11}$                   | Προσαρμογή πολυωνύμου 3 <sup>ου</sup> βαθμού από δεδομένα των Pitts and Sissom, 1977 |
| Συντελεστής θερμοχωρητικότητας | $C_{p,air} = \alpha_{C_p,1} T_{air}^3 + \alpha_{C_p,2} T_{air}^2 + \alpha_{C_p,3} T_{air} + \alpha_{C_p,4}$ $a_{C_p,1} = -8.01440 \cdot 10^{-11}, a_{C_p,2} = 2.10788 \cdot 10^{-4},$ $a_{C_p,3} = 2.06329 \cdot 10^{-2}, a_{C_p,4} = -9.83672 \cdot 10^2$ | Προσαρμογή πολυωνύμου 3 <sup>ου</sup> βαθμού από δεδομένα των Pitts and Sissom, 1977 |
| Δυναμικό ιξώδες                | $\mu = \mu_{ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^n$ $T_{ref} = 273 \text{ K}, \mu_{ref} = 1.7168 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, n = 2/3$   | Sutherland, 1983   |

Θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής του θαλάμου διόγκωσης

Όπως και για τον αέρα, έτσι και για το θάλαμο οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού κατασκευής του μεταβάλλονται σημαντικά με τη θερμοκρασία. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή οι τιμές που λαμβάνει η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας στο θερμοκρασιακό εύρος που μελετήθηκε παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9:



Σχήμα 5.9. Η μεταβολή των βασικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικό κατασκευής του θαλάμου θέρμανσης στο θερμοκρασιακό εύρος ενδιαφέροντος (Kanthal, 2013).

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων του κατασκευαστή για τις τιμές των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής του αγωγού σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες (σημεία στο σχήμα 5.9) πραγματοποιήθηκε αυτόματη κατασκευή γραμμικών εξισώσεων για την περιγραφή της μεταβολής τους στο εύρος των θερμοκρασιών που μελετήθηκαν.

#### 5.2.4. Καθορισμός οριακών συνθηκών

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε ένα πλήθος σεναρίων λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης αλλά κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν 7 πιο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη θερμοκρασία των ζωνών θέρμανσης, το ρυθμό τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου αέρα. Στον Πίνακα 5.4 περιλαμβάνονται οι τιμές των βασικών μεγεθών της κάθε οριακής συνθήκης για τα 7 σενάρια που θα παρουσιαστούν. Στο υποθετικό σενάριο τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα, οι τιμές των οριακών συνθηκών ταυτίζεται με αυτές του σεναρίου ISO-50. Εξαίρεση αποτελεί η θερμοκρασία και η ταχύτητα εισόδου του αέρα.

Πίνακας 5.4. Οι τύποι και οι τιμές των οριακών συνθηκών για τα επτά σενάρια που παρουσιάζονται.

| Σενάριο  | ISO-50   | ISO-100       | ISO-200 | ISO-50-Pr | GRAD-50  | GRAD-100 | GRAD-200 |       |
|--|--|---------------|---------|-----------|--|----------|----------|-------|
| Περιγραφή  | Ισοθερμοκρασιακή λειτουργία καμίνου<br>1000/1000/1000/1000/1000/1000 |               |         |           | Βαθμωτή λειτουργία καμίνου<br>700/800/900/1000/1100/1200 |          |          |       |
| Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα, $T_{air,in}$ (°C)             | 25   |               |         | 500       | 25   |          |          |       |
| Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα, $Q_{air,in}$ (L·min <sup>-1</sup> ) | 50   | 100           | 200     | 50        | 50   | 100      | 200      |       |
| <b><u>Οριακές συνθήκες</u></b>                               |  |               |         |           |  |          |          |       |
| Ονομασία   | Τύπος-Μέγεθος  | Τιμή μεγέθους |         |           |  |          |          |       |
| $H_{AIR}$ (1-6)  | Είσοδος, Ταχύτητα αέρα (m/s)   | 2.2038        | 4.4075  | 8.815     | 5.850  | 2.2038   | 4.4075   | 8.815 |
| $W_{Top}$  | Τοίχωμα-Θερμοκρασία (°C)   | 850           | 850     | 850       | 850  | 600      | 600      | 600   |
| $W_{Up}$   | »  | 850           | 850     | 850       | 850  | 600      | 600      | 600   |
| $WR_1$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 700      | 700      | 700   |
| $WR_2$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 800      | 800      | 800   |
| $WR_3$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 900      | 900      | 900   |
| $WR_4$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 1000     | 1000     | 1000  |
| $WR_5$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 1100     | 1100     | 1100  |
| $WR_6$   | »  | 1000          | 1000    | 1000      | 1000   | 1200     | 1200     | 1200  |
| $WB_1$   | »  | 320           | 350     | 350       | 350  | 320      | 350      | 350   |
| $WB_2$   | »  | 220           | 250     | 250       | 220  | 220      | 250      | 250   |
| $WB_3$   | »  | 150           | 170     | 170       | 150  | 150      | 170      | 170   |
| $H_{Out}$  | Έξοδος - Θερμοκρασία επανεισόδου αέρα (°C)                           | 27            | 27      | 27        | 27   | 27       | 27       | 27    |

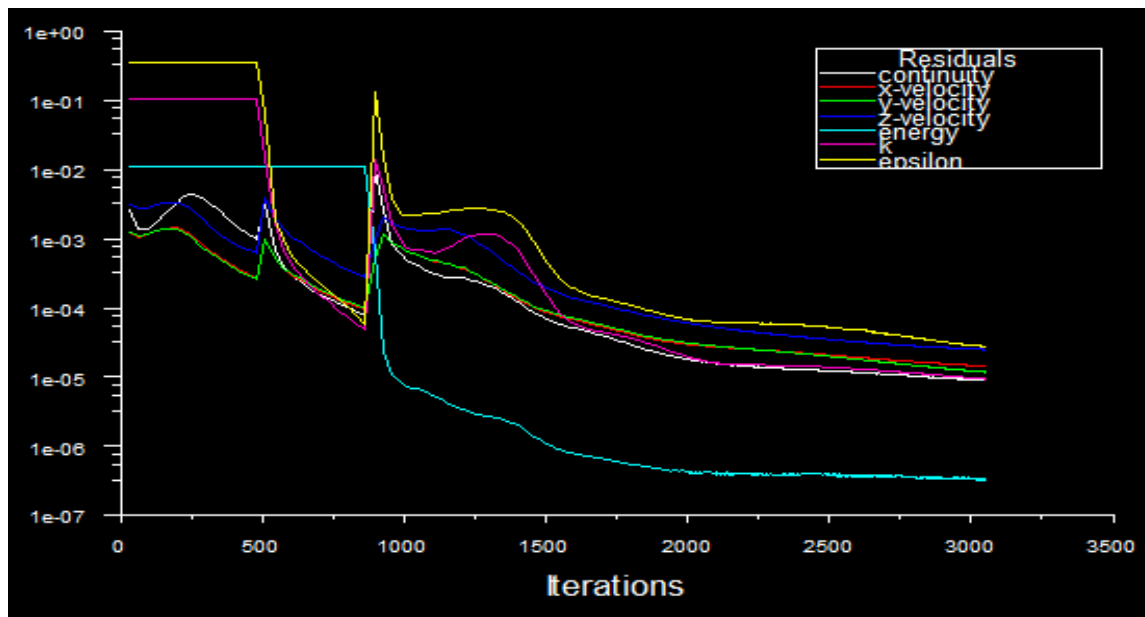
### 5.2.5. Επίλυση του μαθηματικού μοντέλου και έλεγχος σύγκλισης λύσης

Για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων επελέγη ο αλγόριθμος επίλυσης πίεσης (Pressure-based solver), ο οποίος και προτείνεται σε περιπτώσεις ασυμπίεστης ροής χαμηλών σχετικά ταχυτήτων. Στη μέθοδο αυτή η διατήρηση της μάζας στο πεδίο εξασφαλίζεται μέσω της επίλυσης μίας εξίσωσης πίεσης. Η εξίσωση πίεσης προκύπτει και προσαρμόζεται από τις εξισώσεις

διατήρησης μάζας και ορμής κατά τέτοιο τρόπο ώστε το πεδίο ταχυτήτων μέσω της εξίσωσης πίεσης να ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της μάζας (Chorin, 1968). Η σύζευξη πίεσης –ταχύτητας μέσω της εξίσωσης της συνέχειας πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο SIMPLE, ο οποίος αναπτύχθηκε από τους Patankar και Spalding (Patanekar and Spalding, 1972).

Με σκοπό την αποτελεσματική σύγκλιση της λύσης επελέγη η σταδιακή επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν αρχικά τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής (εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής), το φαινόμενο της τυρβώδους ροής (εξισώσεις k-ε μοντέλου) και τέλος τη μεταφορά ενέργειας (εξίσωση διατήρησης ενέργειας). Ο έλεγχος της σύγκλισης της λύσης πραγματοποιείται με 2 τρόπους κατά την εκτέλεση των υπολογισμών και με ένα τρόπο μετά την ολοκλήρωσή τους.

- Έλεγχος μεταβολής *βασικών μεγεθών* κατά τη διάρκεια της επίλυσης: κατά τη διάρκεια της διενέργειας των υπολογισμών πραγματοποιήθηκε απεικόνιση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου σε συγκεκριμένα σημεία και επιφάνειες με σκοπό τη δυνατότητα παρακολούθησης της μεταβολής τους. Η σταθεροποίηση των μεγεθών αυτών σε συγκεκριμένες τιμές αποτελεί ένα από τα στοιχεία που επιβεβαιώνουν τη σύγκλιση της λύσης.
- Έλεγχος μεταβολής των *υπολοίπων* κάθε υπολογιζόμενης ποσότητας (residuals): αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια σύγκλισης και ορίζει τη μεταβολή που παρουσιάζουν τα βασικά μεγέθη που υπολογίζονται μεταξύ των επαναλήψεων. Σε ιδανική περίπτωση θεωρείται ότι έχει επέλθει σύγκλιση όταν η τιμή των υπολοίπων θα είναι 0. Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο είναι αδύνατο και θεωρείται ότι η σύγκλιση της λύσης έχει επιτευχθεί όταν τα υπόλοιπα των βασικών μεγεθών αποκτήσουν αρκετά χαμηλές τιμές, γεγονός που σημαίνει ότι οι διαφορές των μεγεθών που υπολογίζονται με κάθε επανάληψη είναι τόσο μικρές που θεωρείται ότι η συνέχιση της επίλυσης των εξισώσεων δεν πρόκειται να επιφέρει ουσιαστικές αλλαγές στα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η διαμόρφωση των τιμών των υπολοίπων κατά τη διάρκεια της επίλυσης του σεναρίου ISO-100.



Σχήμα 5.10. Η διαμόρφωση των υπολοίπων κατά την διάρκεια των υπολογισμών του σεναρίου ISO-100.

Οι προτεινόμενες τιμές των υπολοίπων βάσει της βιβλιογραφίας, ώστε να έχει επιτευχθεί σύγκληση της λύσης, μαζί με τις τελικές τιμές των υπολοίπων για τα 7 σεναρία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5:

Πίνακας 5.5. Προτεινόμενες και τελικές τιμές υπολοίπων κατά τη λήξη των υπολογισμών για τα επτά σεναρία που παρουσιάζονται.

| Μέγεθος   | Προτεινόμενες τιμές υπολοίπων (Residual) (Fluent, 2013) | Τιμές υπολοίπων κατά τη λήξη των υπολογισμών |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|---|---|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|   |   | ISO-50                                       | ISO-100             | ISO-200             | ISO-50Pr            | GRAD-50             | GRAD-100            | GRAD-200            |
| Μάζα  | $10^{-3}$   | $3.1 \cdot 10^{-4}$                          | $8.9 \cdot 10^{-6}$ | $8.6 \cdot 10^{-7}$ | $2.0 \cdot 10^{-7}$ | $2.1 \cdot 10^{-4}$ | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | $5.4 \cdot 10^{-7}$ |
| Διάνυσμα ταχύτητας (x)                            | $10^{-3}$   | $6.1 \cdot 10^{-5}$                          | $1.4 \cdot 10^{-5}$ | $8.3 \cdot 10^{-5}$ | $3.5 \cdot 10^{-6}$ | $5.1 \cdot 10^{-5}$ | $7.4 \cdot 10^{-5}$ | $5.4 \cdot 10^{-5}$ |
| Διάνυσμα ταχύτητας (y)                            | $10^{-3}$   | $4.3 \cdot 10^{-5}$                          | $1.2 \cdot 10^{-5}$ | $7.5 \cdot 10^{-5}$ | $4.0 \cdot 10^{-6}$ | $3.1 \cdot 10^{-5}$ | $6.6 \cdot 10^{-5}$ | $5.8 \cdot 10^{-5}$ |
| Διάνυσμα ταχύτητας (z)                            | $10^{-3}$   | $9.7 \cdot 10^{-5}$                          | $2.5 \cdot 10^{-5}$ | $1.3 \cdot 10^{-4}$ | $9.4 \cdot 10^{-6}$ | $8.8 \cdot 10^{-5}$ | $4.8 \cdot 10^{-4}$ | $8.2 \cdot 10^{-5}$ |
| Τυρβώδης κινητική ενέργεια (k)                    | $10^{-3}$   | $1.6 \cdot 10^{-5}$                          | $9.4 \cdot 10^{-6}$ | $9.3 \cdot 10^{-6}$ | $5.8 \cdot 10^{-7}$ | $2.8 \cdot 10^{-5}$ | $2.4 \cdot 10^{-5}$ | $7.3 \cdot 10^{-6}$ |
| Ρυθμός απώλειας τυρβώδους κινητικής ενέργειας (ε) | $10^{-3}$   | $5.4 \cdot 10^{-5}$                          | $2.7 \cdot 10^{-5}$ | $1.3 \cdot 10^{-5}$ | $1.1 \cdot 10^{-6}$ | $8.2 \cdot 10^{-5}$ | $8.1 \cdot 10^{-5}$ | $6.9 \cdot 10^{-6}$ |
| Ενέργεια  | $10^{-6}$   | $1.4 \cdot 10^{-6}$                          | $3.3 \cdot 10^{-7}$ | $3.3 \cdot 10^{-7}$ | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | $5.9 \cdot 10^{-6}$ | $1.2 \cdot 10^{-6}$ | $9.5 \cdot 10^{-6}$ |

- Έλεγχος του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας: διενεργείται μετά τη λήξη των υπολογισμών από το χρήστη και ελέγχει τις διαφορές μεταξύ του ρυθμού εισόδου και εξόδου της μάζας και της μεταφοράς ενέργειας στον όγκο ελέγχου. Όσον αφορά στο ισοζύγιο ενέργειας, συγκρίνεται η ενέργεια που προστίθεται στον όγκο ελέγχου που καταλαμβάνεται από τον



αέρα με αυτήν που αφαιρείται από αυτόν. Ροή ενέργειας προς τον όγκο ελέγχου παρουσιάζεται στην είσοδο του αέρα και στην επιφάνεια του αγωγού, εφόσον τοπικά η θερμοκρασία του στο σημείο αυτό ξεπερνά τη θερμοκρασία του αέρα, ενώ απώλεια ενέργειας παρατηρείται κυρίως από την έξοδο του θαλάμου διόγκωσης αλλά και από το κατώτερο μη μονωμένο τμήμα του, αφού η θερμοκρασία του αγωγού στο σημείο αυτό είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του αέρα.

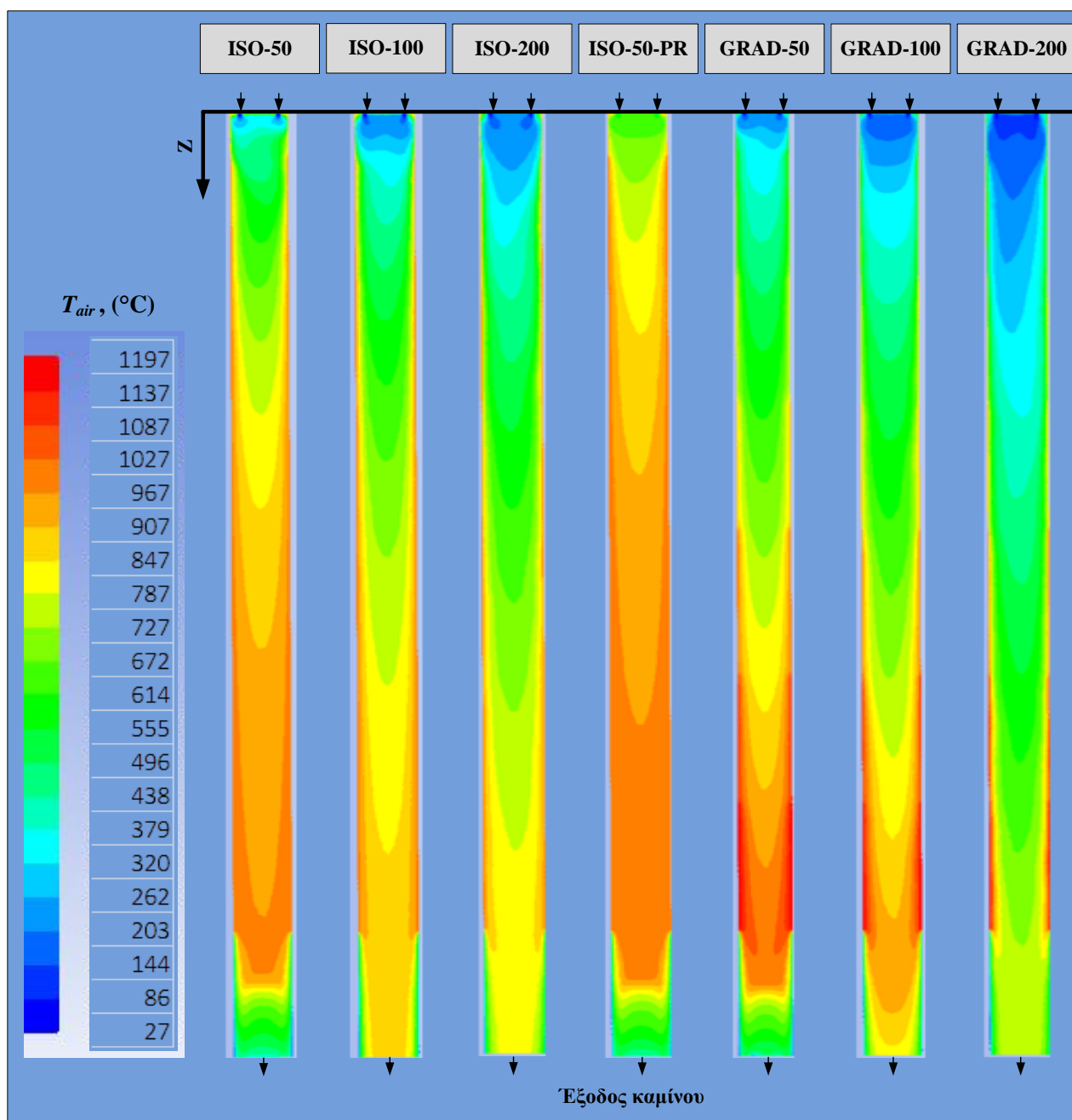
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.6 φαίνεται ότι το ενεργειακό έλλειμμα ή πλεόνασμα που οφείλεται στο υπολογιστικό σφάλμα είναι σε αρκετά χαμηλά επίπεδα δεδομένου ότι θερμική ενέργεια διαφεύγει από την έξοδο του θαλάμου διόγκωσης με ρυθμό 400 W στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι 50 L·min<sup>-1</sup> και αυξάνει στα 2500 W όταν ο αέρας τροφοδοτείται με ρυθμό 200 L·min<sup>-1</sup>.

Πίνακας 5.6. Έλεγχος διασφάλισης ισοζυγίων μάζας και ενέργειας

| Μέγεθος                    | Τιμές υπολοίπων κατά την λήξη των υπολογισμών |                      |                       |                       |                      |                       |                      |
|----------------------------|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                            | <i>ISO-50</i>                                 | <i>ISO-100</i>       | <i>ISO-200</i>        | <i>ISO-50Pr</i>       | <i>GRAD-50</i>       | <i>GRAD-100</i>       | <i>GRAD-200</i>      |
| $m_{in}-m_{out}$<br>(kg/s) | 4.5·10 <sup>-8</sup>                          | 4.8·10 <sup>-8</sup> | -7.3·10 <sup>-9</sup> | -1.1·10 <sup>-7</sup> | 1.7·10 <sup>-7</sup> | -3.3·10 <sup>-7</sup> | 1.1·10 <sup>-8</sup> |
| $E_{in}-E_{out}$ (W)       | 4.2   | 1.4                  | -0.6                  | -3.6                  | -4.8                 | -1.8                  | -0.23                |

### 5.3. Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Κύρια μεγέθη που επηρεάζουν την εξέλιξη της διόγκωσης των κόκκων περλίτη εντός του θαλάμου θέρμανσης της ηλεκτρικής καμίνου είναι η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητά του. Η κατανομή τους εντός του θαλάμου διόγκωσης καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το ρυθμό θέρμανσης και τον χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων περλίτη εντός του θαλάμου διόγκωσης πράγμα που έχει άμεση συνέπεια στις ιδιότητες και την ποιότητα του παραγόμενου διογκωμένου υλικού. Υπενθυμίζεται ότι στόχος της νέας μεθόδου διόγκωσης που αναπτύχθηκε είναι η εξασφάλιση ήπιων και ελεγχόμενων συνθηκών κίνησης και θέρμανσης των τεμαχιδίων περλίτη. Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται σε τομή οι ισοσταθμικές καμπύλες θερμοκρασίας του αέρα για τις 7 περιπτώσεις λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου που επιλέχθηκαν.



Σχήμα 5.11. Ισοσταθμικές καμπύλες θερμοκρασίας του αέρα για τα 7 σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν, όπως υπολογίστηκαν από την προσομοίωση λειτουργίας της καμίνου στο πρόγραμμα Fluent.

Από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.11 γίνεται σαφές ότι γενικά η θερμοκρασία του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης αυξάνει κατά μήκος του θαλάμου από πάνω προς τα κάτω. Εξάιρεση αποτελεί η κατώτερη περιοχή του θαλάμου στις περιπτώσεις που η ταχύτητα του τροφοδοτούμενου αέρα είναι χαμηλή (50 L/min). Στις περιπτώσεις αυτές (ISO-50, ISO-50-Pr, GRAD-50) η θερμοκρασία του αέρα στην κατώτερη περιοχή είναι αισθητά μειωμένη. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτό το τμήμα του θαλάμου βρίσκεται εκτός της θερμαινόμενης περιοχής, και ο αέρας λόγω της χαμηλής του ταχύτητας δεν καταφέρνει να εξέρθει από το θάλαμο με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή με τον ψυχρό αέρα του περιβάλλοντος και να ψύχεται. Ο αέρας ψύχεται στο σημείο αυτό και λόγω της επαφής του με το κατώτερο τμήμα του τοιχώματος του θαλάμου το

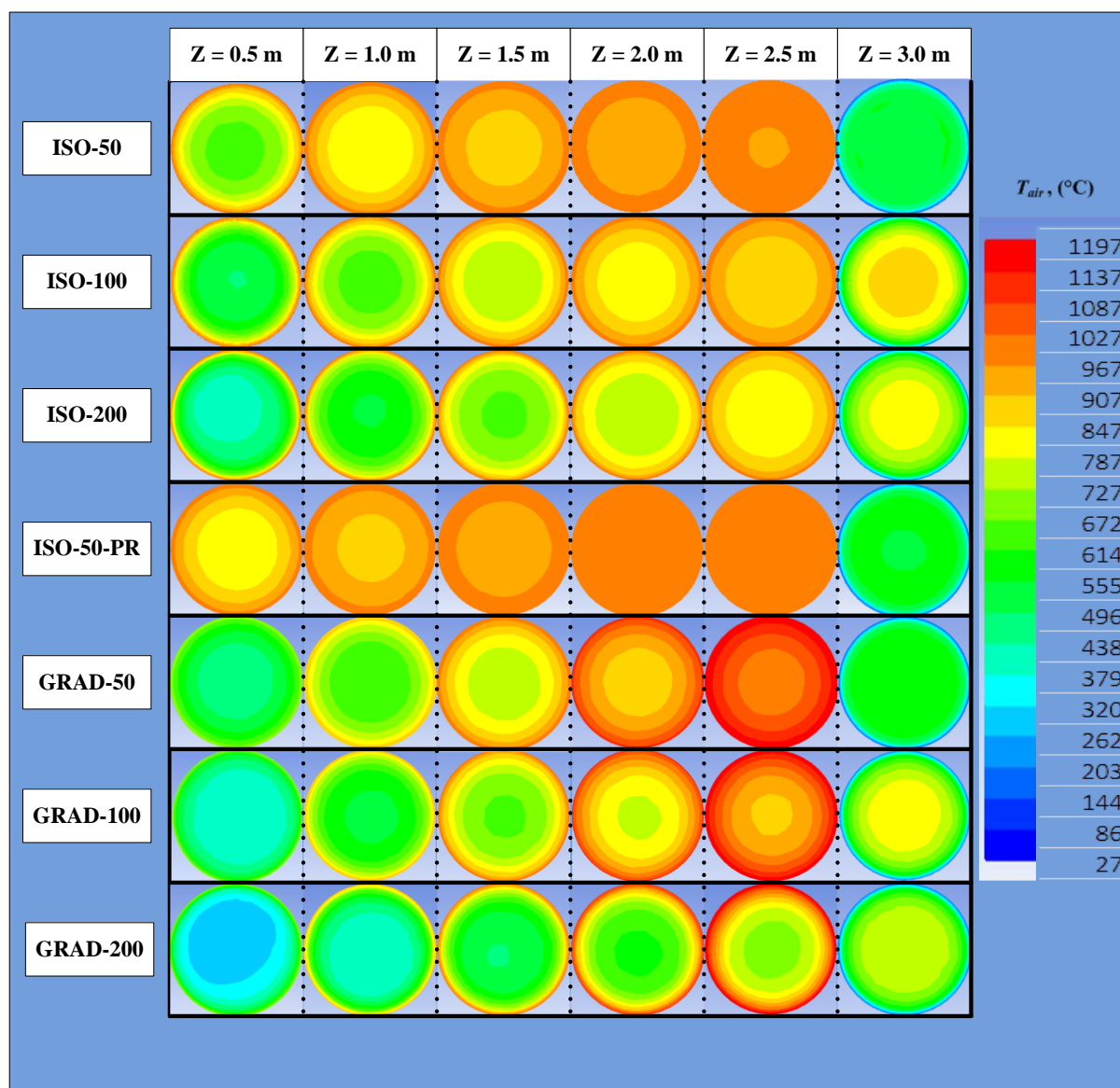
οποίο έχει χαμηλή θερμοκρασία αφού βρίσκεται εκτός της μόνωσης της καμίνου ενώ δεν θερμαίνεται από τις αντιστάσεις. Κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης οι ισοθερμοκρασιακές περιοχές αναπτύσσονται παραβολικά με τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες να παρατηρούνται κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης όπως είναι λογικό.

Στις περιπτώσεις ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας του θαλάμου (σενάρια ISO), η θερμοκρασία του αέρα προσεγγίζει τη θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου μόνο όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και όταν ο τροφοδοτούμενος αέρας είναι προθερμασμένος (σενάριο ISO-50-PR). Πράγματι, η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα στο κέντρο του θαλάμου παρατηρείται στο σενάριο ISO-50 σε απόσταση 2.5 m από την είσοδο της καμίνου και είναι περίπου  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  και στο σενάριο ISO-50-Pr που είναι επίσης  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  σε απόσταση αυτή την φορά 1.60 m από την είσοδο του. Η έκταση της περιοχής στην οποία η θερμοκρασία του αέρα εξισώνεται με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του θαλάμου είναι πιο εκτεταμένη στην περίπτωση τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα και έχει μήκος 0.80 m, περίπου.

Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας του θαλάμου παρουσιάζει διαβάθμιση κατά μήκος του (σενάρια GRAD) και παρά το γεγονός ότι η θερμοκρασία των ζωνών  $T_4$ ,  $T_5$  και  $T_6$  είναι 1000, 1100 και  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα, η θερμοκρασία του αέρα στο κέντρο του θαλάμου διόγκωσης δεν ξεπερνά τους  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , ενώ όταν ο αέρας τροφοδοτείται με ρυθμό 100 και  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  η μέγιστη θερμοκρασία στο κέντρο του θαλάμου προσεγγίζει τους 940 και  $760 \text{ }^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα.

Γενικά, η αύξηση της παροχής του αέρα εντός του θαλάμου οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας του αέρα σε όλες τις περιπτώσεις. Ειδικά στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι μέγιστος ( $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) το ψυχρό τμήμα της καμίνου, στο οποίο η θερμοκρασία του αέρα δεν ξεπερνά τους  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , καταλαμβάνει 1.20m στην περίπτωση αύξουσας θερμοκρασίας τοιχώματος και 0.30 m στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος. Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στο θάλαμο θέρμανσης δρα ευεργετικά αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα σε όλο το μήκος του θαλάμου (σενάριο ISO-50-PR) συγκριτικά με τη περίπτωση κατά την οποία ο εισερχόμενος αέρας έχει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (σενάριο ISO-50).

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται οι ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας του αέρα σε διατομές του θαλάμου διόγκωσης που απέχουν από την περιοχή εισόδου του αέρα απόσταση 0.5, 1.0, 1.5, 2.00, 2.50 και 3.00 m.



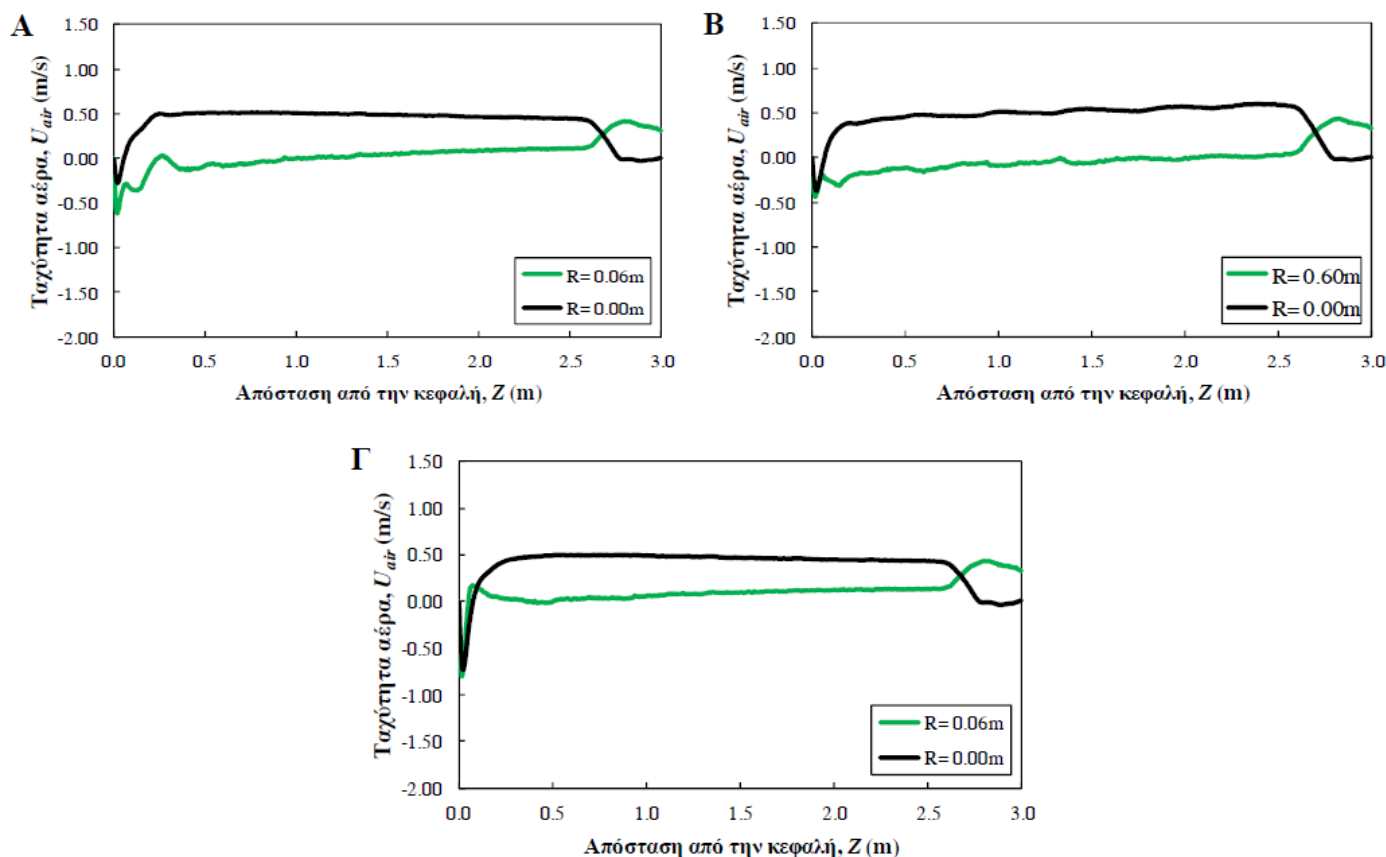
Σχήμα 5.12. Ισοσταθμικές καμπύλες ακτινικής θερμοκρασιακής κατανομής του αέρα εντός του θαλάμου σε διαφορετικές αποστάσεις από την κεφαλή της καμίνου.

Οι ισοσταθμικές καμπύλες της θερμοκρασίας που παρουσιάζονται δείχνουν ότι η διαβάθμιση της θερμοκρασίας του αέρα εντός της καμίνου είναι ακτινική στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Η θερμοκρασία του αέρα στο κέντρο του θαλάμου είναι μικρότερη σε σχέση με την περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων. Εξάιρεση αποτελεί και εδώ το κατώτερο τμήμα του θαλάμου ( $z = 3\text{m}$ ), όπου στο κέντρο του θαλάμου η θερμοκρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις περιοχές κοντά στα τοιχώματα. Στις περιπτώσεις που η τροφοδοσία του αέρα είναι υψηλότερη (100-200 L/min) παρατηρείται μεγαλύτερη διαβάθμιση της θερμοκρασίας (περισσότερες ακτινικές περιοχές διαφορετικής θερμοκρασίας όσο αυξάνει η παροχή του αέρα).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα στα οποία απεικονίζεται η κατανομή της ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης για τα 7 σενάρια λειτουργίας της καμίνου που μελετώνται.

Στο κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές του διανύσματος της ταχύτητας κατά τον άξονα z (z-velocity) στο κέντρο ( $R = 0.00\text{m}$ ) αλλά και πολύ κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου θέρμανσης ( $R = 0.06\text{m}$ , απόσταση από το τοίχωμα  $0.007\text{ m}$ ) και σε όλο του το μήκος ( $0 < z < 3\text{ m}$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένα βάσει του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα.

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης για τα 3 σενάρια κατά τα οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ήταν  $Q_{air,in} = 50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  (ISO-50, GRAD-50, ISO-50-PR).

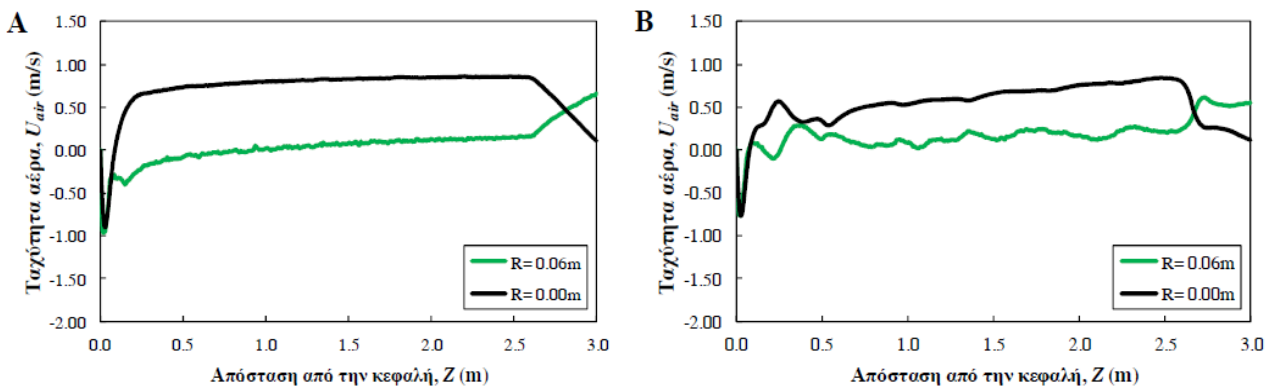


Σχήμα 5.13. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R = 0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R = 0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τα σενάρια λειτουργίας ISO-50 (Α), GRAD-50 (Β) και ISO-50-PR (Γ).

Παρατηρείται ότι η ταχύτητα του αέρα δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης σε όλες τις περιπτώσεις. Η αύξηση της ταχύτητας που παρουσιάζεται σε όλα τα διαγράμματα κοντά στην κεφαλή του θαλάμου οφείλεται στην διαφορά διατομής των οπών εισόδου του αέρα στο θάλαμο με τη διατομή του θαλάμου. Η μειωμένη πίεση πλευρικά των οπών εισόδου του αέρα αλλά και του ρεύματος του αέρα που εισέρχεται στον θάλαμο διόγκωσης με αυξημένη ταχύτητα οδηγεί σε επανακυκλοφορία του αέρα. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στο ανώτερο τμήμα του θαλάμου, ενώ εξασθενεί σε μικρό μήκος και η ροή φαίνεται στην συνέχεια να σταθεροποιείται. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το αρνητικό πρόσημο της ταχύτητας του αέρα

κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου το οποίο οφείλεται στην επικράτηση συνθηκών φυσικής κυκλοφορίας του θερμού αέρα σε τοπικό επίπεδο, η οποία ευνοείται από το χαμηλό ρυθμό τροφοδοσίας του. Γενικά πάντως σε όλες τις περιπτώσεις επικρατεί η καθοδική κίνηση του αέρα στο κύριο μήκος και πλάτος του θαλάμου. Για το λόγο αυτό ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας που φαίνεται να επικρατεί εντός του αγωγού είναι η εξαναγκασμένη συναγωγή, ενώ κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου, λόγω της μείωσης της πυκνότητας του θερμού αέρα, εμφανίζονται συνθήκες φυσικής κυκλοφορίας. Τέλος οφείλει να σχολιαστεί το φαινόμενο της έντονης μεταβολής της ταχύτητας του αέρα στο κατώτερο μη-μονωμένο τμήμα του θαλάμου. Η διαταραχή οφείλεται στην απότομη ψύξη του αέρα, κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου, που οδηγεί σε συρρίκνωση της μάζας του αέρα περιφερειακά και στη δημιουργία χώρου, ο οποίος καλύπτεται από μάζες αέρα που προέρχονται από κεντρικότερες περιοχές, με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας στο κέντρο του θαλάμου και της αύξησης της κοντά στα τοιχώματα.

Στα διαγράμματα Α και Β που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.14 φαίνεται η κατανομή ταχυτήτων του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στο κέντρο και αρκετά κοντά στο τοίχωμα του για τα σενάρια στα οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ήταν  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  (σενάρια ISO-100 και GRAD-100). Η κατανομή της ταχύτητας του αέρα είναι ανάλογη με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω για τις περιπτώσεις που η παροχή του αέρα ήταν 50 L/min.

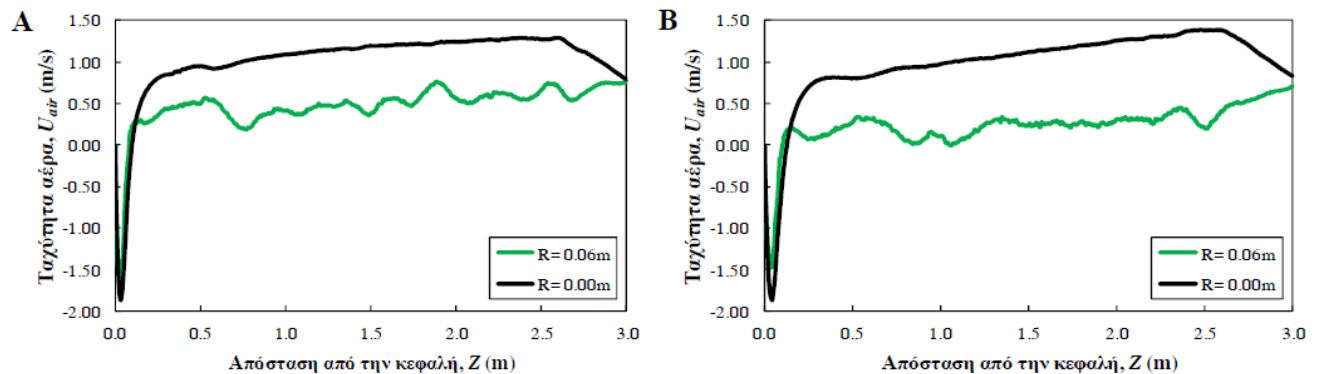


Σχήμα 5.14. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R=0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R=0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τα σενάρια ISO-100 (Α) και GRAD-100 (Β).

Στις περιπτώσεις που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  η ταχύτητα του αέρα στο κέντρο του θαλάμου είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα σημεία κοντά στα τοιχώματα του. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι έντονες στην περίπτωση που η θερμοκρασιακή κατανομή στο θάλαμο παρουσιάζει διαβάθμιση (διάγραμμα Β, σενάριο GRAD-100) και αυτό φαίνεται να οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του τοιχώματος μεταβάλλεται συνεχώς κατά μήκος του θαλάμου με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά της ροής να είναι υπό ανάπτυξη. Η έντονη διαβάθμιση της θερμοκρασίας του αέρα κατά το μήκος αλλά και κατά το πλάτος του θαλάμου στις περιπτώσεις βαθμωτής θερμοκρασιακής κατανομής του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης (σενάρια GRAD)

(Σχήματα 5.11 και 5.12) επιδρά άμεσα στη συρρίκνωση ή διόγκωση του αέρα με αποτέλεσμα τη διατάραξη της κατανομής της ταχύτητας του σε όλο το μήκος και πλάτος του θαλάμου. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως η μέγιστη τιμή της ταχύτητας του αέρα είναι  $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής της ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι ο μέγιστος,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και η θερμοκρασία κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης είναι σταθερή (ISO-200) ή παρουσιάζει διαβάθμιση (GRAD-200).

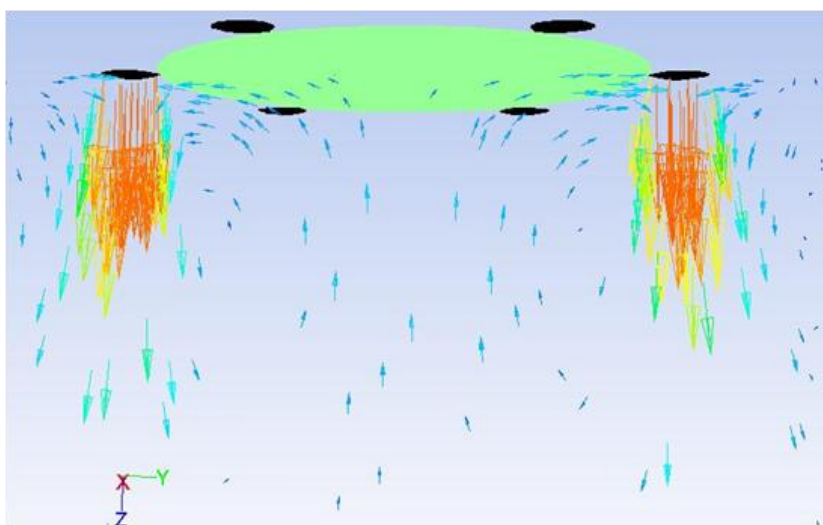


Σχήμα 5.15. Η ταχύτητα του αέρα κατά τον άξονα Z στο κέντρο ( $R=0.00\text{m}$ ) και κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου ( $R=0.06\text{m}$ ) σε όλο το μήκος της καμίνου για τις περιπτώσεις ISO-200 (A) και GRAD-200 (B).

Η ταχύτητα του αέρα στις περιπτώσεις αυτές είναι η μέγιστη από το σύνολο των περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν, αφού και στις δύο περιπτώσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.15 η τιμή της προσεγγίζει το  $1.3 \text{ m}$  στο δεύτερο μισό του θαλάμου θέρμανσης. Η αύξηση της ταχύτητας κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου στο κατώτερο μη μονωμένο τμήμα του είναι μικρότερη στις περιπτώσεις αυτές λόγω ακριβώς της μεγάλης παροχής αέρα που έχει ως αποτέλεσμα την επικράτηση του μηχανισμού της εξαναγκασμένης συναγωγής και της καθοδικής κίνησης του αέρα σε όλο το μήκος και το πλάτος του θαλάμου. Εξάλλου, ο μεγαλύτερος ρυθμός τροφοδοσίας αέρα στον θάλαμο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού Reynolds και έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι αύξηση του αριθμού Re οδηγεί σε επικράτηση του μηχανισμού της εξαναγκασμένης συναγωγής όταν πρόκειται για θέρμανση ρευστών που κινούνται εντός αγωγών με θερμαινόμενα τοιχώματα (Ghajar and Tam, 1994). Η μείωση της ταχύτητας του αέρα στο κέντρο του θαλάμου στο αντίστοιχο τμήμα είναι ομαλότερη, λόγω της αυξημένης ροής μάζας αλλά και της γενικά χαμηλότερης θερμοκρασίας του αέρα σε σχέση με τις περιπτώσεις με χαμηλότερη παροχή αέρα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της πυκνότητας του αέρα, λόγω ψύξης, να μην είναι τόσο έντονη όσο ήταν στα παραπάνω σενάρια.

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι ο μέγιστος, η διαταραχή της ταχύτητας του αέρα στα ανώτερα τμήματα του θαλάμου είναι μεγαλύτερη σε ένταση και

έκταση, λόγω της αυξημένης ταχύτητας με την οποία εισέρχεται ο αέρας στο θάλαμο διόγκωσης. Οι μεγάλες ταχύτητες εισόδου του αέρα προκαλούν έντονα φαινόμενα επανακυκλοφορίας του αέρα στις περιοχές κοντά στην κεφαλή του θαλάμου ενώ είναι αρκετά πιθανό τα ρεύματα αυτά να συμπαρασύρουν και τεμαχίδια περλίτη με αποτέλεσμα την παράταση του χρόνου παραμονής τους. Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα διανύσματα της ταχύτητας του αέρα κοντά στην κεφαλή του θαλάμου θέρμανσης για την περίπτωση ISO-200. Το μέγεθος αλλά και το χρώμα των βελών είναι ανάλογα του μεγέθους της ταχύτητας. Ο πράσινος δίσκος απεικονίζει την περιοχή εισόδου της πρώτης ύλης στην επιφάνεια της οποίας χτυπά ο ανερχόμενος αέρας.



Σχήμα 5.16. Το μέτρο και η φορά των διανυσμάτων της ταχύτητας στην κεφαλή του θαλάμου θέρμανσης όπως υπολογίστηκαν από το Fluent για το σενάριο ISO-200.

Παρατηρείται ανοδική κίνηση του αέρα τόσο στο κέντρο όσο και στα τοιχώματα του θαλάμου με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαταραχών στην ταχύτητα του. Η χαρακτηριστική περιδίνηση του αέρα στην κεφαλή του θαλάμου τονίζει τον ιδιαίτερο σχεδιασμό που οφείλει να έχει ο τροφοδότης της πρώτης ύλης, ο οποίος πρέπει να απομονώνει τον εσωτερικό χώρο του θαλάμου από το εξωτερικό περιβάλλον με κατάλληλο σύστημα air-lock. Διαφορετικά, ο ανερχόμενος αέρας θα παρεμπόδιζε την εισροή της πρώτης ύλης στο σύστημα, ενώ μέρος του αέρα και του περλίτη θα διέφευγε εκτός της καμίνου δημιουργώντας συνθήκες ανεξέλεγκτες εντός του θαλάμου και δυσάρεστες στο περιβάλλον εργασίας.

#### **5.4 Πειραματικές μετρήσεις και σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης**

Ο έλεγχος της εγκυρότητας των αριθμητικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης τους με πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στα σημεία όπου αυτή ήταν δυνατή. Η διενέργεια πειραματικών μετρήσεων ικανοποιητικής



ακρίβειας και αξιοπιστίας της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα εντός του πεδίου ροής δεν είναι δυνατή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της αεροστεγούς κατασκευής του θαλάμου.

#### **5.4.1. Πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στο πεδίο ροής**

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στον θάλαμο διόγκωσης απεδείχθη ιδιαίτερα δύσκολη λόγω διαφόρων προβλημάτων που ανέκυψαν. Αρχικά υπήρξε το πρόβλημα της έλλειψης πρόσβασης στο πεδίο ροής λόγω της κατασκευής (εξαιρούνται οι οπές εισόδου και η έξοδος) του θαλάμου διόγκωσης που είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση ομαλών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής. Το πρόβλημα ξεπεράστηκε με την κατασκευή ενός θαλάμου διόγκωσης από ανοξείδωτο χάλυβα όμοιας γεωμετρίας με τον πρωτότυπο θάλαμο, ο οποίος όμως έφερε έξι οπές κατά μήκος του – μία στο κέντρο της κάθε θερμοκρασιακής ζώνης. Μέσω των οπών αυτών εξασφαλίστηκε προσβασιμότητα των αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης. Μετά από την αντικατάσταση του θαλάμου διόγκωσης από τον δοκιμαστικό θάλαμο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα σε έξι σημεία κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Επίσης, σε κάθε ένα από αυτά τα σημεία έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις από το τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης με σκοπό την πειραματική διερεύνηση της ακτινικής θερμοκρασιακής κατανομής του αέρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν ήταν τα αναμενόμενα καθώς σε όλες τις περιπτώσεις οι μετρήσεις προσέγγιζαν τη θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης που περιέβαλλε τον αισθητήρα ανεξάρτητα του σημείου στο οποίο πραγματοποιείτο η μέτρηση, ενώ η μεταβολή των τιμών λόγω αλλαγής του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα στο θάλαμο διόγκωσης ήταν ασήμαντη. Οι μετρήσεις παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση τόσο από τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της λειτουργίας του θαλάμου διόγκωσης με την μέθοδο CFD, όσο και από το μαθηματικό μοντέλο διόγκωσης που θα παρουσιαστεί στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής.

#### **5.4.2. Το σφάλμα των θερμοστοιχείων στην μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα**

Μετά από σειρά πειραματικών δοκιμών και βιβλιογραφική έρευνα αναγνωρίστηκε ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος με χρήση θερμοστοιχείων τύπου K (χρωμιοκελίου/αλουμέλ - 90% Ni + 10%Cr / 95% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si), παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι κυριότερες πηγές του σφάλματος είναι οι παρακάτω (Scadron and Warshawsky, 1952):

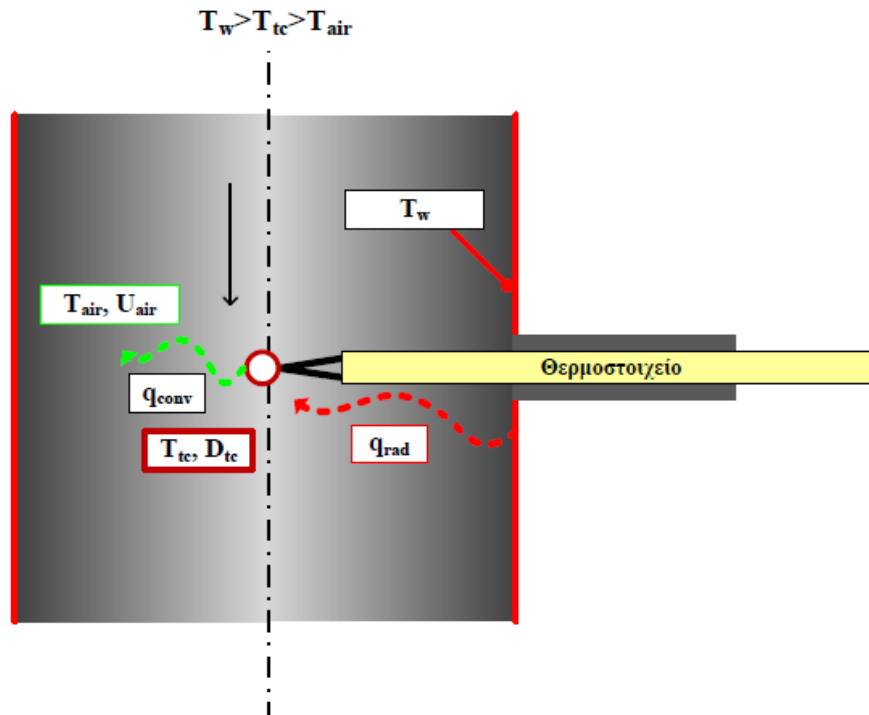
1. Η ανταλλαγή θερμότητας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από/προς τον αισθητήρα του θερμοστοιχείου προς/από τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου και το ίδιο το αέριο.

2. Η μεταφορά θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής από τον αισθητήρα στον κύριο όγκο του θερμοστοιχείου και σε γειτονικές περιοχές, με τις οποίες το όργανο έρχεται σε επαφή.
3. Η ταχύτητα του αερίου, όταν είναι μεγάλη μπορεί να επηρεάσει τη μέτρηση δείχνοντας τελικά διαφορετική θερμοκρασία σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του ρευστού σε στατική κατάσταση.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής καμίνου που το προς μέτρηση αέριο είναι ατμοσφαιρικός αέρας με χαμηλά επίπεδα υγρασίας, μπορεί με ασφάλεια να γίνει η παραδοχή ότι το ρευστό δε συμμετέχει στην εκπομπή ή απορρόφηση ακτινοβολίας όπως έχει αναφερθεί ήδη (Lienhard and Lienhard, 2003). Επιπλέον, η ταχύτητα που αναπτύσσει ο αέρας εντός του θαλάμου διόγκωσης δεν είναι μεγάλη λόγω της σχετικά μικρής τροφοδοσίας του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση που τροφοδοτείται αέρας στον θάλαμο με ρυθμό  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και του οποίου η θερμοκρασία φτάνει τους  $1000^\circ\text{C}$ , η μέση ταχύτητα του υπολογίζεται σε  $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ακόμα, λόγω της μικρής μάζας του θερμοστοιχείου και λόγω του γεγονότος ότι ο κύριος όγκος του βρίσκεται σε επαφή με τον προστατευτικό σωλήνα, ο οποίος με την σειρά του περικλείεται ασφικτικά από την μόνωση της καμίνου, η απώλεια θερμότητας μέσω αγωγής και διάχυσης στις περιοχές γύρω από τα θερμοστοιχεία δεν αναμένεται να είναι σημαντική. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι κύρια πηγή σφάλματος μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα αποτελεί η ανταλλαγή θερμότητας του αισθητήρα με τη θερμή εσωτερική επιφάνεια της καμίνου. Εξάλλου, στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος αναφορών στις οποίες σημειώνεται ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας αερίων σε θερμά περιβάλλοντα (π.χ. πυρκαγιές, έμφλογοι καυστήρες) με τη χρήση γυμνών θερμοστοιχείων (bare-bead thermocouples) πάσχει κυρίως από το σφάλμα που προκύπτει από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος (Carvalho and Dos Santos, 1990; Blevins and Pitts; 1999; Shannon and Butler, 2003; Brohez et al., 2004). Η ορθή λειτουργία του θερμοστοιχείου για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός σώματος στηρίζεται στη θερμική ισορροπία μεταξύ του συστήματος αισθητήρα-ρευστού άγνωστης θερμοκρασίας, η οποία επέρχεται όταν η θερμοκρασία του αισθητήρα εξισώνεται με τη θερμοκρασία του ρευστού. Η συνθήκη αυτή όμως δεν ικανοποιείται στην περίπτωση μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται σε θερμή κοιλότητα με χρήση γυμνού θερμοστοιχείου (bare-bead thermocouple).

Για την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω φαινομένου ακολουθεί σχηματική περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας στον αισθητήρα του θερμοστοιχείου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αέρα που πραγματοποιεί εξαναγκασμένη κίνηση εντός αγωγού του οποίου τα τοιχώματα θερμαίνονται. Επιπλέον, παρουσιάζεται το ισοζύγιο θερμότητας του συστήματος ρευστού-αισθητήρα-τοιχώματος.

Έστω λοιπόν αγωγός του οποίου τα τοιχώματα βρίσκονται σε θερμοκρασία,  $T_w$ . Στο εσωτερικό του αγωγού κινείται αέρας με ταχύτητα  $U_{air}$  και θερμοκρασία  $T_{air}$ . Θερμοστοιχείο γυμνού αισθητήρα τοποθετείται στο κέντρο του αγωγού με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στο σημείο αυτό. Η ένδειξη του θερμοστοιχείου θα είναι η θερμοκρασία την οποία έχει ο σφαιρικός αισθητήρας ( $T_{tc}$ ). Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας του συστήματος αέρα-αισθητήρα θερμοστοιχείου- επιφάνειας θαλάμου διόγκωσης. Θερμότητα μεταφέρεται από και προς τον αισθητήρα μέσω συναγωγής από/προς τον αέρα ( $q_{conv}$ ) αλλά και μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ( $q_{rad}$ ) από/προς τα θερμά τοιχώματα της καμίνου.



Σχήμα 5.17. Ανταλλαγή θερμότητας στο σύστημα αισθητήρας-αέρας-τοιχώμα.

▪ **Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής**

Η θερμότητα που μεταφέρεται από ρεύμα αέρα θερμοκρασίας  $T_{air}$  και ταχύτητας  $U_{air}$  στον αισθητήρα του θερμοστοιχείου δίνεται από τον Νόμο Ψύξης του Νεύτωνα (Newton's Law of Cooling) (Incropera et al., 2006):

$$q_{conv} = hA(T_{air} - T_{tc}) \quad (5.32)$$

όπου  $h$  ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας του συστήματος αέρα-σφαιρικού αισθητήρα, η τιμή του οποίου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h = \frac{Nuk_{air}}{L_{ch}} \quad (5.33)$$

όπου  $Nu$  ο συντελεστής Nusselt,  $k_{air}$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα στη θερμοκρασία  $T_{air}$  και  $L_{ch}$  το χαρακτηριστικό μήκος του αισθητήρα, που η τιμή του για σφαίρα είναι (Cengel, 2006):

$$L_{ch} = \frac{1}{6} D_{tc} \quad (5.34)$$

▪ **Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας**

Θεωρώντας δύο στερεά σώματα σε διάταξη τέτοια κατά την οποία το ένα περιβάλλεται ολοκληρωτικά από το άλλο, η θερμική ακτινοβολία που ανταλλάσσουν οι επιφάνειες τους,  $j$  και  $k$ , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Cengel, 2006):

$$q_{radj \rightarrow k} = \frac{(\sigma T_j^4 - \sigma T_k^4)}{\frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j A_j} + \frac{1}{F_{jk} A_j} + \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k A_k}} \quad (5.35)$$

όπου  $\varepsilon$  η εκπεμπτικότητα του κάθε σώματος και  $F$  ο συντελεστής οπτικής επαφής των δύο σωμάτων. Ο συντελεστής  $F_{jk}$  καθορίζει το ποσοστό της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια  $j$  ακτινοβολίας το οποίο προσπίπτει στην επιφάνεια  $k$ . Η παραπάνω εξίσωση ισχύει στην περίπτωση που η επιφάνεια  $j$  περικλείει ολοκληρωτικά την επιφάνεια  $k$ . Επιπλέον, όταν η επιφάνεια  $j$  είναι σφαιρική ( $F_{jk}$ ) και η επιφάνειά της είναι κατά πολύ μικρότερη συγκριτικά με την επιφάνεια  $k$  ( $A_j/A_k \ll 1$ ), η εξίσωση 5.35 λαμβάνει την εξής μορφή:

$$q_{radj \rightarrow k} = \varepsilon_j A_j (\sigma T_j^4 - \sigma T_k^4) \quad (5.36)$$

Στην περίπτωση που το θερμοστοιχείο είναι τοποθετημένο εντός του θαλάμου δοκιμών, η θερμοκρασία του τοιχώματος θα είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή του αέρα. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου προσβάλλει μόνο τον σφαιρικό αισθητήρα, η θερμοκρασία του αισθητήρα θα είναι υψηλότερη αυτής του αέρα. Γενικά λοιπόν θα ισχύει ότι:

$$T_w > T_{tc} > T_{air} \quad (5.37)$$

Βάσει του ισοζυγίου ενέργειας στον σφαιρικό αισθητήρα, η ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα θα ισούται με την ενέργεια που εξέρχεται από αυτό, εφόσον η θερμοκρασία του αισθητήρα θα έχει σταθεροποιηθεί.

$$E_{in} = E_{out} \quad (5.38)$$

Δηλαδή, η θερμότητα που εισρέει στον αισθητήρα μέσω ακτινοβολίας θα ισούται με την ενέργεια που εκρέει από αυτόν μέσω συναγωγής στο ρευστό.

$$q_{conv} = q_{rad} \quad (5.39)$$

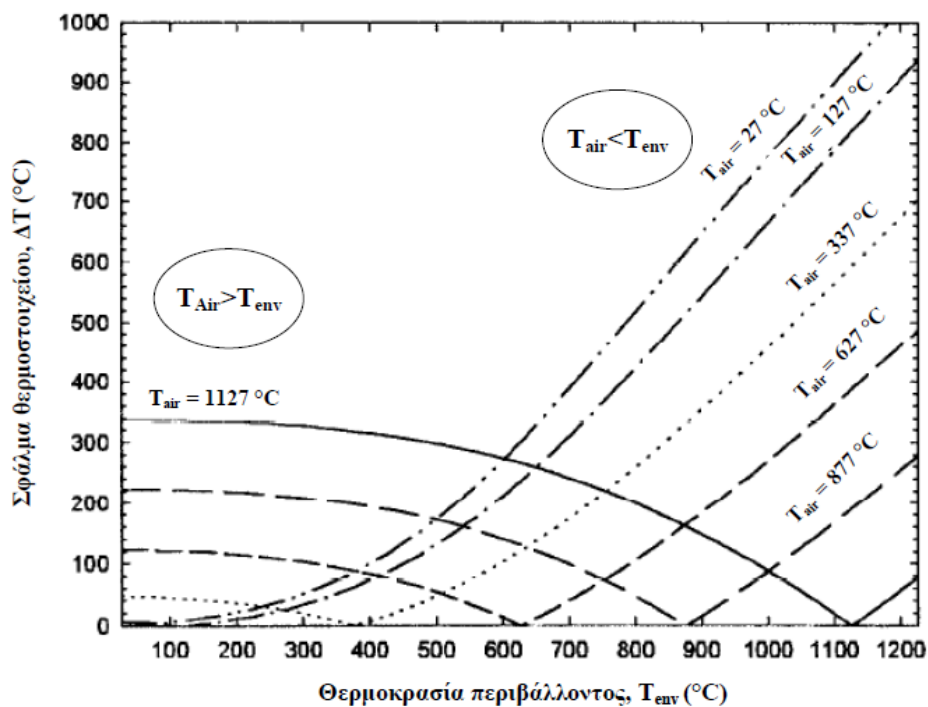
Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 5.32 και 5.36 στην εξίσωση 5.39, το ισοζύγιο διαμορφώνεται ως εξής:

$$hA(T_{air} - T_{tc}) = \varepsilon_{tc} A(\sigma T_{tc}^4 - \sigma T_w^4) \quad (5.40)$$

Λύνοντας ως προς τη θερμοκρασία του αέρα,  $T_{air}$ , η εξίσωση 5.40 λαμβάνει την παρακάτω μορφή (Blevins and Pitts, 1999; Angelopoulos et al., 2011):

$$T_{air} = \frac{hT_{tc} + \varepsilon_{tc}\sigma(T_{tc}^4 - T_w^4)}{h} \quad (5.41)$$

Το σφάλμα που συνοδεύει τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα όταν αυτές πραγματοποιούνται με θερμοστοιχείο και κάτω από τις συνθήκες που αναφέρθηκαν μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι Blevins και Pitt μελέτησαν θεωρητικά την τιμή του σφάλματος αυτού συναρτήσει της πραγματικής θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και οι τιμές του σφάλματος φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.18 για διάφορες περιπτώσεις (Blevins and Pitts, 1999).



Σχήμα 5.18. Επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο σφάλμα της μέτρησης θερμοκρασίας του αέρα από θερμοστοιχείο εκτεθειμένου αισθητήρα διαμέτρου  $D_{tc} = 1.5\text{mm}$ , εκπεμπτικότητας  $\varepsilon_{tc} = 0.8$  και για ταχύτητα αέρα  $U_{air} = 0.5\text{ m/s}$  και θερμοκρασία  $T_{air} = 27\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $127\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $337\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $627\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $877\text{ }^\circ\text{C}$  και  $1127\text{ }^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος συμπίπτει με αυτή υποθετικού, ισοθερμοκρασιακού έγκλειστου χώρου ο οποίος ανταλλάσει ακτινοβολία με το θερμοστοιχείο με ρυθμό ίσο με τον ρυθμό εκπομπής του (Blevins and Pitts, 1999).

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται σαφές ότι η τιμή του σφάλματος είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς του αέρα και του περιβάλλοντος. Είναι χαρακτηριστικό ότι στην περίπτωση που ο αέρας έχει θερμοκρασία 127 °C και το περιβάλλον θερμοκρασία 1000 °C η ένδειξη του θερμοστοιχείου θα ξεπερνά τους 800 °C περίπου ενώ το σφάλμα ένδειξης τους 700 °C. Η παρατήρηση αυτή έχει σημαντικό ενδιαφέρον στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης καθώς ο τροφοδοτούμενος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρας εισέρχεται απευθείας στην πρώτη θερμοκρασιακή ζώνη, όπου η θερμοκρασία ξεπερνά συνήθως τους 800 °C. Στην ίδια εργασία οι Blevins και Pitts μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας του αέρα στην τιμή του σφάλματος και βρήκαν ότι το σφάλμα τείνει ασύμπτωτα στο μηδέν όσο η σχετική ταχύτητα αέρα-θερμοστοιχείου αυξάνει συνεχίζοντας όμως να υφίσταται ακόμα και αν η ταχύτητα αυτή ξεπεράσει τα 100 m·s<sup>-1</sup>. Στην συγκεκριμένη περίπτωση της μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα το σφάλμα λόγω ακτινοβολίας που οφείλεται στη διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα και του θαλάμου διόγκωσης διευρύνεται λόγω της χαμηλής ταχύτητας με την οποία προσκρούει ο αέρας στον αισθητήρα του θερμοστοιχείου. Το θέμα της ακριβούς μέτρησης της θερμοκρασίας των αερίων στις συνθήκες που περιγράφηκαν έχει αποτελέσει αντικείμενο τόσο πειραματικής έρευνας όσο και μαθηματικής μοντελοποίησης σε αρκετές δημοσιευμένες εργασίες. Για την αντιμετώπισή του στην βιβλιογραφία προτείνονται κυρίως δύο μέθοδοι:

- Χρησιμοποίηση δύο θερμοστοιχείων τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς το μέγεθος του αισθητήρα (De, 1981; Tagawa and Ohta, 1997; Pavie and Lambelin, 1999; Pitts et al., 1999; Brohez et al., 2004). Εφόσον η διάμετρος των αισθητήρων είναι διαφορετική, η ένδειξή τους θα διαφέρει λόγω του γεγονότος ότι η επίδραση της ακτινοβολίας αυξάνει με αύξηση της επιφάνειας του θερμοστοιχείου και μαζί με αυτήν και το σφάλμα της μέτρησης. Με τη μέθοδο αυτή απαιτείται η γνώση μόνο των ενδείξεων των θερμοστοιχείων και των διαμέτρων των αισθητήρων τους, ενώ με τη μέθοδο της παρεμβολής είναι δυνατόν να προβλεφτεί το αποτέλεσμα της μέτρησης όταν το μέγεθος του αισθητήρα, και άρα και το σφάλμα ακτινοβολίας, ελαχιστοποιούνται.
- Χρήση «ασπίδας ακτινοβολίας» (Blevins and Pitts, 1999). Η ασπίδα ακτινοβολίας αποτελείται από έναν κοντό σωλήνα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή εκπεμπτικότητα. Ο αισθητήρας τοποθετείται μέσα στο σωλήνα, ενώ ο σωλήνας τοποθετείται κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι οπές του να βρίσκονται κάθετα στη ροή του αέρα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη ροή στο εσωτερικό του. Με αυτό τον τρόπο ελαττώνεται σημαντικά η οπτική επαφή του αισθητήρα με το περιβάλλον αλλά και η θερμική ενέργεια, η οποία μέσω της ακτινοβολίας προσπίπτει σε αυτό, και ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αερίου και του αισθητήρα.



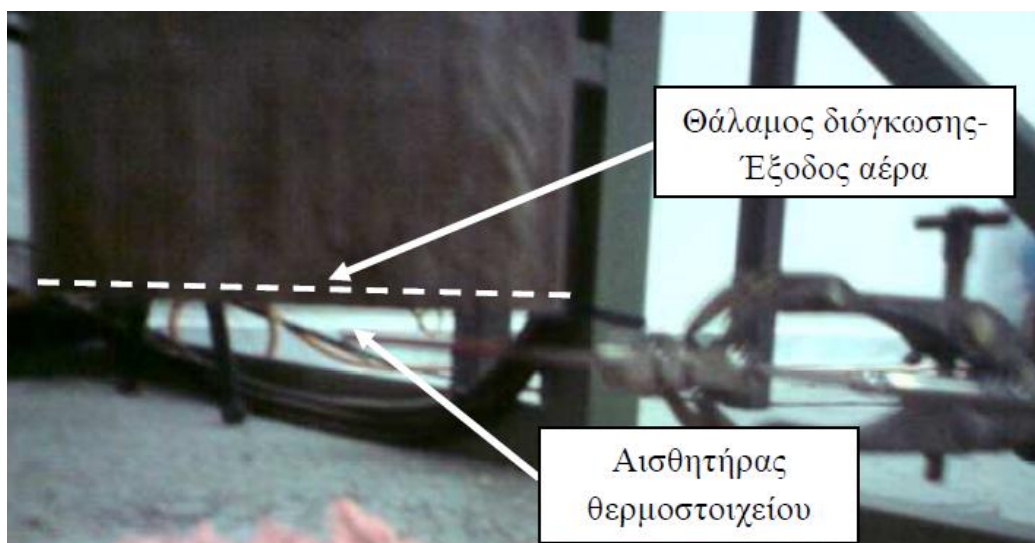
Σχήμα 5.19. Θερμοστοιχείο με διάτρητη ασπίδα ακτινοβολίας για την εξασφάλιση της ικανοποιητικής επαφής του αέρα με τον αισθητήρα. Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας  $-73\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 315\text{ }^{\circ}\text{C}$ , κατασκευάστρια εταιρία: ALLQA Products.

Βέβαια, ο θερμός εξωτερικός σωλήνας (ασπίδα) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά η ένταση αυτή είναι μικρή ακριβώς λόγω της χαμηλής εκπεμπτικότητας από την οποία χαρακτηρίζεται το υλικό κατασκευής της και έτσι η επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον αισθητήρα μειώνεται σημαντικά. Χαμηλή εκπεμπτικότητα έχουν συνήθως τα μέταλλα τα οποία γυαλίζουν, ενώ η τιμή της επηρεάζεται σημαντικά από τη διάβρωση την οποία μπορούν να υποστούν σε υψηλές θερμοκρασίες (Siegel and Howell, 1992). Μέταλλα όπως ο σίδηρος και το νικέλιο, των οποίων η οξειδωση ευνοείται στις υψηλές θερμοκρασίες αποκτούν τελικά μετά από παρατεταμένη θέρμανση υψηλή εκπεμπτικότητα. Για το λόγο αυτό, οι ασπίδες ακτινοβολίας κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο, ορείχαλκο ή και πλατίνα. Για τη μείωση του σφάλματος λόγω ακτινοβολίας στις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα χρησιμοποιήθηκαν ασπίδες ακτινοβολίας από ορείχαλκο. Οι μετρήσεις που προέκυψαν δε διέφεραν αισθητά από τις μετρήσεις στις οποίες δε χρησιμοποιήθηκε ασπίδα και έτσι τα αποτελέσματα δεν παρατίθενται. Ο λόγος της αποτυχίας της πειραματικής διάταξης φαίνεται να είναι η χαμηλή ταχύτητα του αέρα στο θάλαμο, η οποία και δυσχεραίνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής.

#### **5.4.3. Πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τον θάλαμο διόγκωσης**

Για όλα τα σενάρια λειτουργίας της καμίνου που εξετάστηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του θαλάμου θέρμανσης με τη χρήση θερμοστοιχείου τύπου K. Η πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του θαλάμου διόγκωσης προσφέρει το πλεονέκτημα ελαχιστοποίησης του σφάλματος λόγω

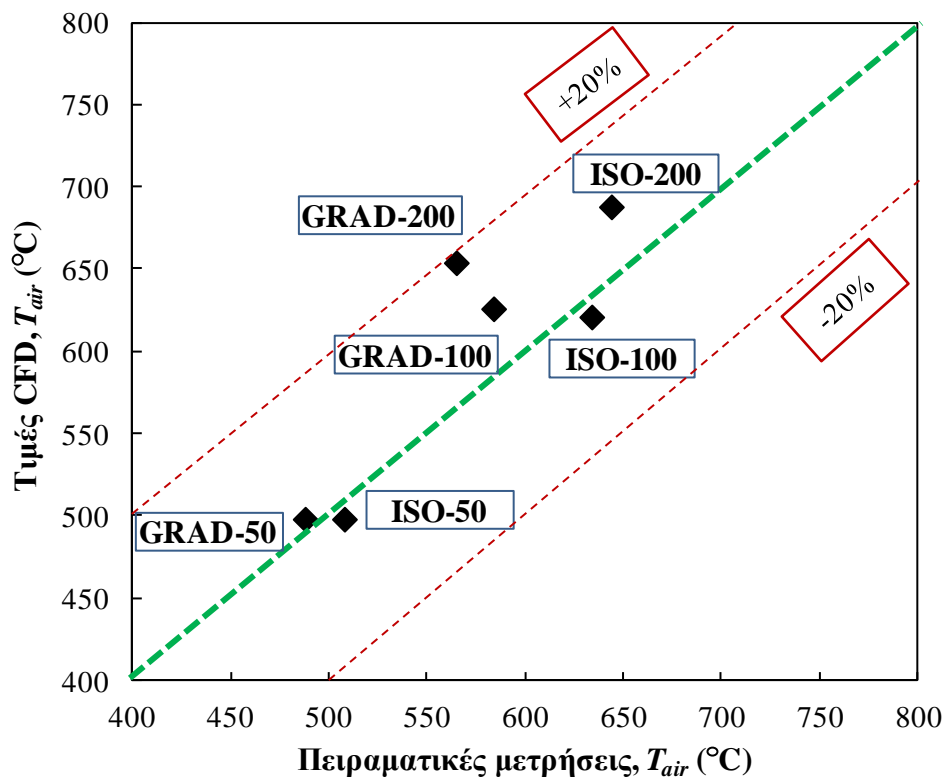
ακτινοβολίας, αφού η οπτική επαφή του αισθητήρα με τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου διόγκωσης είναι περιορισμένη.



Σχήμα 5.20. Η διάταξη για την πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδό του από τον θάλαμο διόγκωσης

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων συγκρίνονται με την αντίστοιχη θερμοκρασία του αέρα κατά την έξοδο του από το θάλαμο διόγκωσης, όπως υπολογίστηκε στο FLUENT. Αναλυτικότερα, ως αποτέλεσμα των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε η μέση θερμοκρασία σε όλη την επιφάνεια εξόδου με συντελεστή βαρύτητας το ρυθμό ροής μάζας σε κάθε υπολογιστικό κελί (Mass-weighted average temperature). Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τοποθετημένο το άκρο του θερμοστοιχείου (αισθητήρας) ακριβώς έξω από το θάλαμο και στο κέντρο αυτού, έτσι ώστε να περιοριστεί η επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας. Έχει παρατηρηθεί ότι ο αέρας αμέσως μετά την έξοδο του από τον θάλαμο παρουσιάζει ανοδική κίνηση και αναμιγνύεται με τον αέρα που βρίσκεται εντός του θαλάμου, με αποτέλεσμα το ρεύμα αυτό να υπόκειται σε ανάμιξη που τελικά οδηγεί σε θερμοκρασιακή ομοιομορφία. Μάλιστα, για την επιβεβαίωση αυτού πραγματοποιήθηκε πειραματική μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του από τον θάλαμο θέρμανσης και σε διάφορες ακτινικές θέσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων διέφεραν ελάχιστα ( $dT_{air} < 20^{\circ}\text{C}$ ) γεγονός που ενίσχυσε την υπόθεση ανάμιξης της ροής στην έξοδο της από τον θάλαμο θέρμανσης. Για το λόγο αυτό λοιπόν, επελέγη τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων να συγκριθούν με τη μέση θερμοκρασία του αέρα στη διατομή εξόδου του θαλάμου όπως υπολογίστηκε από το Fluent. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.21 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του θαλάμου θέρμανσης και της μέσης θερμοκρασίας του αέρα με συντελεστή βαρύτητας τη ροή μάζας, όπως υπολογίστηκε από το FLUENT για τα 7 σενάρια λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης που παρουσιάστηκαν.





Σχήμα 5.21. Σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από τον θάλαμο διόγκωσης για τα 7 σενάρια λειτουργίας της καμίνου που εξετάστηκαν.

Φαίνεται ότι η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων είναι σε αποδεκτά επίπεδα και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά το 20%. Παρακάτω παρουσιάζεται η εξίσωση υπολογισμού του σφάλματος της προσομοίωσης και στην συνέχεια στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η τιμή του στα 6 σενάρια που παρουσιάστηκαν.

$$\bar{E}_{CFD} = \left( \frac{|T_{air}|_{CFD} - |T_{air}|_{exp}}{|T_{air}|_{exp}} \right) \quad (5.42)$$

Πίνακας 5.7. Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων CFD

| Σενάριο  | Πειραματική μέτρηση<br>$T_{air,exp}$ (°C) | Αποτέλεσμα CFD,<br>$T_{air,CFD}$ (°C) | Σφάλμα CFD,<br>$\bar{E}_{CFD}$ (%) |
|----------|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| ISO-50   | 508                                       | 498                                   | 1.9                                |
| ISO-100  | 634                                       | 621                                   | 2.1                                |
| ISO-200  | 644                                       | 688                                   | 6.8                                |
| GRAD-50  | 488                                       | 498                                   | 2.0                                |
| GRAD-100 | 584                                       | 626                                   | 7.2                                |
| GRAD-200 | 565                                       | 654                                   | 15.8                               |

Οι τιμές που παρουσιάζει το σφάλμα των αποτελεσμάτων CFD βρίσκονται κάτω του 10% ενώ εξαίρεση αποτελεί το σενάριο GRAD-200 που παρουσιάζει σφάλμα 15.8%. Θα πρέπει εδώ να επισημανθεί ότι μέρος του σφάλματος μπορεί να οφείλεται στη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τη μέση θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου λόγω της ανάμιξης που παρατηρήθηκε στο σημείο αυτό. Είναι λογικό η ανάμιξη αυτή να έχει μεγαλύτερη ένταση στις μικρότερες παροχές αέρα και να μειώνεται αυξάνοντας την παροχή λόγω της μεγαλύτερης δυναμικής ορμής του ρεύματος του αέρα. Παρόλα αυτά ποσοτικοποίηση του φαινομένου με τον υπάρχοντα εξοπλισμό δεν ήταν δυνατή και για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκε η παραπάνω θεώρηση.

### 5.5. Συμπεράσματα

Η προσομοίωση της λειτουργίας της καμίνου με την μέθοδο CFD οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων του συστήματος στην κατανομή της ταχύτητας και θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης:

- Αύξηση της παροχής του τροφοδοτούμενου αέρα έχει ως συνέπεια τη μείωση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, όπως επίσης και ανάλογη αύξηση της έκτασης της ζώνης των χαμηλών θερμοκρασιών ( $T_{air} < 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Στην περίπτωση που η μέγιστη θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης είναι  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  όπως στις περιπτώσεις ISO-50, ISO-100, ISO-200 η θερμοκρασία του αέρα στο κέντρο του θαλάμου δεν μπορεί να ξεπεράσει τους  $1000^\circ$ ,  $875^\circ$  και  $820 \text{ }^\circ\text{C}$ , αντίστοιχα, παρά μόνο σε πολύ μικρή περιοχή πλησίον του θαλάμου διόγκωσης. Αντίστοιχα, οι μέγιστες θερμοκρασίες στο κέντρο του θαλάμου για τις περιπτώσεις GRAD-50, GRAD-100 και GRAD-200 είναι  $1050^\circ$ ,  $940^\circ$  και  $760 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Η προθέρμανση του αέρα έχει σαν αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης και την ανάπτυξη περιοχής στην οποία η θερμοκρασία του τοιχώματος και του αέρα εξισώνονται. Ενδεικνύται λοιπόν η προσθήκη προθερμαντήρα αέρα στο σύστημα.
- Η επιθυμητή κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα με τη ρύθμιση της ογκομετρικής παροχής του εντός του θαλάμου και την κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου.
- Η τροφοδοσία του αέρα στο θάλαμο διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την επικράτηση ενός θερμού καθοδικού ρεύματος του οποίου η ταχύτητα εξαρτάται από το ρυθμό τροφοδοσίας

του αέρα στο θάλαμο. Η κατανομή της ταχύτητας του αέρα είναι ομαλή κατά μήκος του άξονα του θαλάμου διόγκωσης, ενώ παρατηρείται η ανάπτυξη ασθενούς ανοδικού ρεύματος κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Η θέρμανση του αέρα μέσα στο θάλαμο και η μείωση της πυκνότητας του έχουν ως αποτέλεσμα την διόγκωσή του και την αύξηση της ταχύτητας του κατά το μήκος του θαλάμου. Η επικρατούσα καθοδική κίνηση του αέρα αναμένεται να οδηγήσει σε συμπαρασυρμό τα τεμαχίδια του περλίτη λειτουργώντας ως ρυθμιστής του χρόνου παραμονής τους.

- Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επιτρέπει τον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα σε διαφορετικές συνθήκες παροχής και θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα και θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου.
- Όσον αφορά στις πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα στο θάλαμο διόγκωσης είναι σαφές ότι η χρήση θερμοστοιχείων με ακάλυπτο αισθητήρα (bare bead thermocouples) δεν ενδείκνυται λόγω της άμεσης οπτικής του επαφής με τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου διόγκωσης διότι το σφάλμα της μέτρησης είναι αρκετά μεγάλο. Η χαμηλή ταχύτητα με την οποία κινείται ο αέρας εντός του θαλάμου αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα που αυξάνει το σφάλμα μέτρησης. Αυτός ο παράγοντας θεωρείται ότι επηρέασε την λειτουργία της ασπίδας ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, με αποτέλεσμα την αδυναμία περιορισμού του σφάλματος μέτρησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το αμιγώς πειραματικό μέρος της διδακτορικής διατριβής και περιλαμβάνει τα εξής:

- Προπαρασκευή και πλήρης χαρακτηρισμός των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στα πειράματα διόγκωσης.
- Μελέτη της επίδρασης των συνθηκών της διόγκωσης αλλά και των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης στις ιδιότητες των διογκωμένων προϊόντων και καθορισμός των βέλτιστων συνθηκών διόγκωσης για διαφορετικές ποιότητες προϊόντων.
- Πλήρης χαρακτηρισμός των διογκωμένων προϊόντων και σύγκριση των ιδιοτήτων τους με αντίστοιχα δείγματα συμβατικά διογκωμένου περλίτη.
- Παραγωγή διογκωμένων δειγμάτων περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και σε συμβατική κάμινο πιλοτικής κλίμακας υπό διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες διόγκωσης.

Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού των διογκωμένων δειγμάτων επελέγησαν έτσι ώστε να προσφέρουν τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του διογκωμένου περλίτη που καθορίζουν τις εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Κατά τον χαρακτηρισμό των διογκωμένων περλιτών μετράται η πυκνότητα, η απορροφητική ικανότητα και μελετώνται τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Επίσης μετράται η απώλεια πύρωσης των διογκωμένων δειγμάτων, η αντοχή τους σε συμπίεση και η κοκκομετρική τους κατανομή.

### 6.1. Χαρακτηρισμός πρώτων υλών

Στην παρούσα διδακτορική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι περλίτη που προέρχονται από δύο κοιτάσματα της νήσου της Μήλου, στην περιοχή του Τράχηλα και του Τσιγκράδου. Η προμήθεια των πρώτων υλών εξασφαλίστηκε από την εταιρία S&B η οποία είναι υπεύθυνη για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων αυτών. Τα προερχόμενα από το ορυχείο Τσιγκράδο δείγματα θα χαρακτηρίζονται με τη συντομογραφία CH, ενώ τα προερχόμενα από το ορυχείο του Τράχηλα με τη συντομογραφία TR. Ο χαρακτηρισμός των πρώτων υλών συμπεριλαμβάνει χημική, κοκκομετρική και ορυκτολογική ανάλυση, μέτρηση του ειδικού βάρους και της απώλειας πύρωσης και θερμοβαρυτομετρική ανάλυση.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον φυσικοχημικό και ορυκτολογικό χαρακτηρισμό των πρώτων υλών προέκυψαν από κατάλληλη δειγματοληψία μέσω εργαστηριακών δειγματοληπτών τύπου Jones. Αναλυτικότερα, για κάθε μία από τις δύο πρώτες ύλες που αναλύθηκαν πραγματοποιήθηκε τυχαία επιλογή από 20 διαφορετικά σημεία των αρχικών δειγμάτων όγκου 1 m<sup>3</sup> (big bag), με σκοπό την συγκέντρωση δύο αντιπροσωπευτικών δειγμάτων βάρους 20 kg περίπου από το κάθε ένα. Στη συνέχεια, ακολούθησε δειγματοληψία με εργαστηριακούς δειγματολήπτες χωρητικότητας 5, 0.5 και 0.2 l έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη για κάθε μέτρηση ποσότητα δείγματος. Τα αρχικά δείγματα, κοκκομετρίας +75-300 μm, χωρίστηκαν σε 3 στενότερα κοκκομετρικά κλάσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα διόγκωσης

| Όνομασία | Ορυχείο προέλευσης | Κοκκομετρικό εύρος (μm) |
|----------|--------------------|-------------------------|
| TR-I     | Τράχηλα            | +75-300                 |
| TR-F     | Τράχηλα            | +75-150                 |
| TR-M     | Τράχηλα            | +150-212                |
| TR-C     | Τράχηλα            | +212-300                |
| CH-I     | Τσιγκράδο          | +75-300                 |
| CH-F     | Τσιγκράδο          | +75-150                 |
| CH-M     | Τσιγκράδο          | +150-212                |
| CH-C     | Τσιγκράδο          | +212-300                |

### 6.1.1. Χημική ανάλυση των δειγμάτων περλίτη

Η προετοιμασία του δείγματος για τη χημική ανάλυση περιλαμβάνει την λειοτρίβηση του, με σκοπό το μέγιστο μέγεθος κόκκου να μην υπερβαίνει τα 5 μm, και την ξήρανση του, έτσι ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία. Η λειοτρίβηση του περλίτη πραγματοποιήθηκε σε αχάτινο γουδί, ενώ η ξήρανση στους 105°C για 12 ώρες. Η χημική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με φασματοσκοπία ακτινών-X φθορισμού (EDXRF) με χρήση της συσκευής Xeros (SPECTRO A.I. GmbH Company), ενώ η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της ατομικής απορρόφησης (Atomic absorption spectroscopy-AAS) Perkin Elmer 2100<sup>®</sup>. Τέλος, ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε S και C πραγματοποιήθηκε σε συσκευή LECO CS-200. Για τη μέτρηση της απώλειας πύρωσης του υλικού (Loss On Ignition, L.O.I.), τα ξηρά δείγματα θερμαίνονται στους 1050 °C για μία ώρα. Η απώλεια σε βάρος που παρουσιάζουν μετά τη θέρμανση τους εκφράζεται ως επί τις εκατό απώλεια πύρωσης κατά βάρος (Loss On Ignition, L.O.I. %).

Πίνακας 6.2: Χημικές αναλύσεις περλιτών από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-I) και του Τράχηλα (TR-I) και των αντιστοίχων παραγόμενων κλασμάτων τους.

| Συστατικό                      | CH-I (%) | CH-F (%) | CH-M (%) | CH-C (%) | TR-I (%) | TR-F (%) | TR-M (%) | TR-C (%) |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 72.57    | 71.08    | 71.49    | 73.80    | 73.03    | 74.98    | 75.24    | 75.38    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.73    | 14.42    | 14.61    | 13.10    | 12.70    | 10.48    | 10.45    | 10.34    |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.99     | 4.16     | 3.98     | 3.95     | 3.43     | 3.93     | 3.80     | 3.68     |
| K <sub>2</sub> O               | 3.62     | 3.91     | 3.93     | 3.68     | 5.39     | 5.71     | 5.78     | 5.96     |
| CaO                            | 1.39     | 1.60     | 1.48     | 1.54     | 0.84     | 1.02     | 0.84     | 0.82     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.25     | 1.31     | 1.22     | 1.21     | 0.91     | 0.97     | 0.88     | 0.85     |
| MgO                            | 0.37     | 0.24     | 0.30     | 0.37     | 0.30     | 0.16     | 0.11     | 0.15     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.15     | 0.15     | 0.14     | 0.15     | 0.08     | 0.09     | 0.08     | 0.09     |
| L.O.I.                         | 2.92     | 3.13     | 2.85     | 2.21     | 3.32     | 2.65     | 2.82     | 2.72     |

Πίνακας 6.3: Η περιεκτικότητα των αρχικών δειγμάτων σε C και S.

| Συστατικό | CH-I (%) | TR-I (%) |
|-----------|----------|----------|
| C         | 0.07     | 0.08     |
| S         | 0.09     | 0.08     |

Τα δύο αρχικά δείγματα περλίτη έχουν την τυπική σύσταση του περλίτη (Perlite Institute, 1948). Αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) η περιεκτικότητα του οποίου ανηγμένη σε οξείδιο κυμαίνεται μεταξύ 70-75% κ.β. και από μικρότερη ποσότητα οξειδίου του αργιλίου σε ποσοστό μεταξύ 10-15%. Περιέχουν επίσης οξείδια αλκαλίων (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) σε περιεκτικότητα που δεν ξεπερνά το 9% συνολικά καθώς και άλλων μετάλλων σε συνολική περιεκτικότητα μικρότερη του 3.5%. Ανάλογα με την προέλευση και την κοκκομετρία των υλικών παρουσιάζονται μικρές διαφορές στη χημική τους ανάλυση. Στις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των δειγμάτων συγκαταλέγονται οι διαφορές των περιεκτικότητων τους σε Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, και CaO και οι οποίες επηρεάζουν το σημείο τήξης τους. Ειδικά όσον αφορά στο K<sub>2</sub>O, τα δείγματα TR φαίνεται να περιέχουν περίπου 40% περισσότερο K<sub>2</sub>O σε σύγκριση με τα CH. Όσον αφορά στην απώλεια πύρωσης, η οποία οφείλεται στην απομάκρυνση νερού, λαμβάνει τιμές 2.92 και 3.32 % για το δείγμα του Τσιγκράδου και του Τράχηλα, αντίστοιχα. Τα παραγόμενα κλάσματα παρουσιάζουν μικρότερη απώλεια πύρωσης η οποία κυμαίνεται μεταξύ 2-3% με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα να έχουν τα δείγματα που προέρχονται από τον περλίτη TR. Εξαιρέση αποτελεί το κλάσμα C (+212 -300 μm) όπου η απώλεια σε πύρωση του περλίτη TR υστερεί του περλίτη CH κατά 0.5%, περίπου. Η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε S και C είναι αρκετά μικρή και πρακτικά ίδια για τα δύο δείγματα. Οι διαφορές στην χημική ανάλυση των κλασμάτων μεταξύ τους αλλά και σε σύγκριση με το αρχικό δείγμα από το οποίο προήλθαν οφείλεται στο διαφορετικό βαθμό αποδέσμευσης των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων ανάλογα με το μέγεθος του τεμαχιδίου.

### 6.1.2. Φυσικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων που μετρήθηκαν είναι η φαινόμενη πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η ειδική επιφάνεια καθώς επίσης και ο συνολικός όγκος των πόρων και το μέσο και μέγιστο μέγεθος τους. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των φυσικών ιδιοτήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 6.4 που ακολουθεί:

Πίνακας 6.4. Οι φυσικές ιδιότητες των πρώτων υλών

| Όνομασία δείγματος | Ειδικό βάρος<br>$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | Φαινόμενη πυκνότητα<br>$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | Κενός χώρος<br>% | Ειδική επιφάνεια<br>$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ | Όγκος πόρων<br>$\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ | Μέγιστο μέγεθος πόρων<br>Å | Μέσο μέγεθος πόρων<br>Å |
|--------------------|---|--|------------------|--|--|----------------------------|-------------------------|
| TR-I               | 2.38  | 1.14   | 52.10            | 0.8083   | 0.00158  | 1036                       | 78                      |
| CH-I               | 2.40  | 1.12   | 53.33            | 0.4019   | 0.00107  | 1119                       | 107                     |

Το ειδικό βάρος των δύο δειγμάτων είναι μεταξύ 2.38 και 2.40  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές εμπίπτουν εντός των ορίων που θέτει το Ινστιτούτο Περγλίτη για κοινούς εμπορικούς περγλίτες (2.20-2.40  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) (Perlite Institute, 1948). Η μέτρηση έγινε με την μέθοδο της ληκύθου.

Η μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας των δειγμάτων (Loose Bulk Density, LBD) πραγματοποιήθηκε σε ογκομετρικό κύλινδρο χωρητικότητας 1 L. Μετά από δειγματοληψία, ποσότητα δείγματος που να προσεγγίζει σε όγκο τα 950 ml περίπου εισάγεται στον ογκομετρικό κύλινδρο και στην συνέχεια ο κύλινδρος με το υλικό ανακινείται δέκα φορές έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή πάκτωση του υλικού. Το δείγμα ζυγίζεται και σημειώνεται και ο όγκος του. Ο όγκος που μετράται στην περίπτωση αυτή συμπεριλαμβάνει εκτός από τον όγκο των στερεών τεμαχιδίων περγλίτη, τον όγκο των πόρων (ανοιχτών και κλειστών) αλλά και του κενού χώρου μεταξύ των τεμαχιδίων. Η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίζεται με διαίρεση του βάρους με τον συνολικό όγκο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων να διαφέρει αισθητά από το ειδικό τους βάρος.

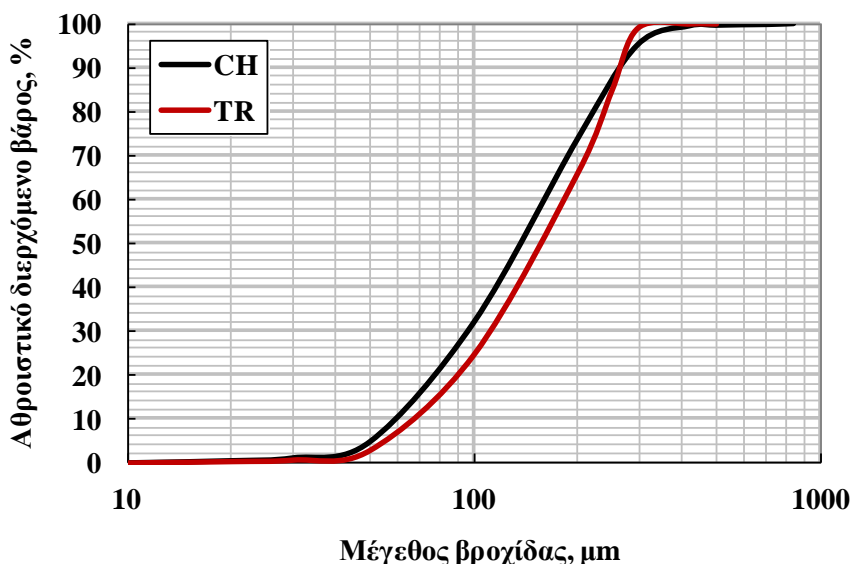
Η φαινόμενη πυκνότητα των δύο πρώτων υλών μετρήθηκε 1.14 και 1.12  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  για το δείγμα από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδου, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι περίπου οι μισές του ειδικού βάρους των δειγμάτων που μετρήθηκε με την μέθοδο της ληκύθου. Τα δείγματα του περγλίτη καταλαμβάνουν λιγότερο από τον μισό χώρο στον ογκομετρικό κύλινδρο, ενώ ο υπόλοιπος πληρείται με αέρα. Λόγω του ότι ο όγκος των πόρων των δειγμάτων είναι ασήμαντος συμπεραίνεται ότι ο όγκος των τεμαχιδίων περγλίτη ισούται περίπου με τον όγκο των κενών χώρων που αφήνουν μεταξύ τους.

Ο όγκος των πόρων και η ειδική επιφάνεια των τεμαχιδίων μετρήθηκαν με τη μέθοδο προσρόφησης αζώτου (BET) χρησιμοποιώντας τη συσκευή NOVA 1200<sup>®</sup>. Η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων παρουσιάζεται μειωμένη, μικρότερη του  $1\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ . Αν θεωρηθεί ότι το ειδικό βάρος του περλίτη είναι  $2.40\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  και δεδομένου του όγκου των πόρων, υπολογίζεται ότι οι πόροι που περιέχονται στο αδιόγκωτο τεμαχίδιο καταλαμβάνουν λιγότερο από 0.4% του συνολικού όγκου του τεμαχιδίου. Οι πόροι αυτοί παρουσιάζουν μέγιστη διάμετρο 1200 Å και μέση 100 Å.

### Κοκκομετρική ανάλυση δειγμάτων

Η κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κοσκίνων για το κοκκομετρικό κλάσμα μέχρι 300 μm ενώ για τα τεμαχίδια με διάμετρο κόκκου μικρότερη των 300μm χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος περίθλασης ακτινών laser (χρησιμοποιήθηκε αναλυτής της εταιρίας Malvern -Malvern Mastersizer Micro). Η κοκκομετρική κατανομή των αρχικών δειγμάτων και των επιμέρους κλασμάτων παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.5 και 6.6 και τα Σχήματα 6.1 έως 6.3.

Στο σχήμα 6.1 και τον πίνακα 6.5 παρουσιάζεται η κοκκομετρική ανάλυση και η ποσοστιαία κατανομή διαμέτρου των κόκκων των αρχικών δειγμάτων (CH και TR), όπως αυτά παραλήφθηκαν από την εταιρία S&B Industrial Minerals S.A.



Σχήμα 6.1. Κοκκομετρική ανάλυση των αρχικών δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH) και του Τράχηλα (TR).

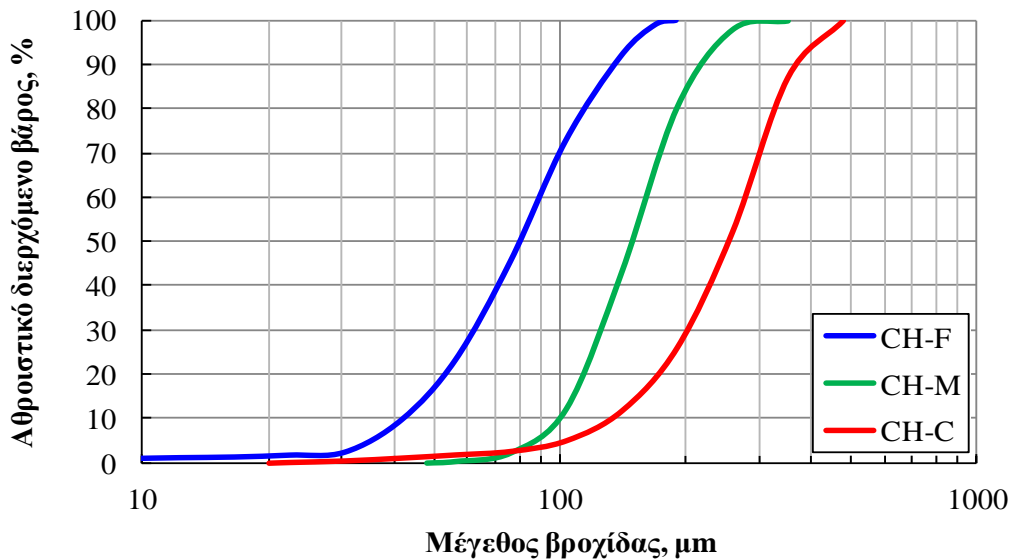
Πίνακας 6.5: Ποσοστιαία κατανομή διαμέτρου κόκκων αρχικών δειγμάτων περλίτη

| Δείγμα | D10 %<br>(μm) | D50 %<br>(μm) | D90 %<br>(μm) | D99 %<br>(μm) |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CHI    | 56            | 143           | 274           | 406           |
| TRI    | 66            | 161           | 270           | 286           |

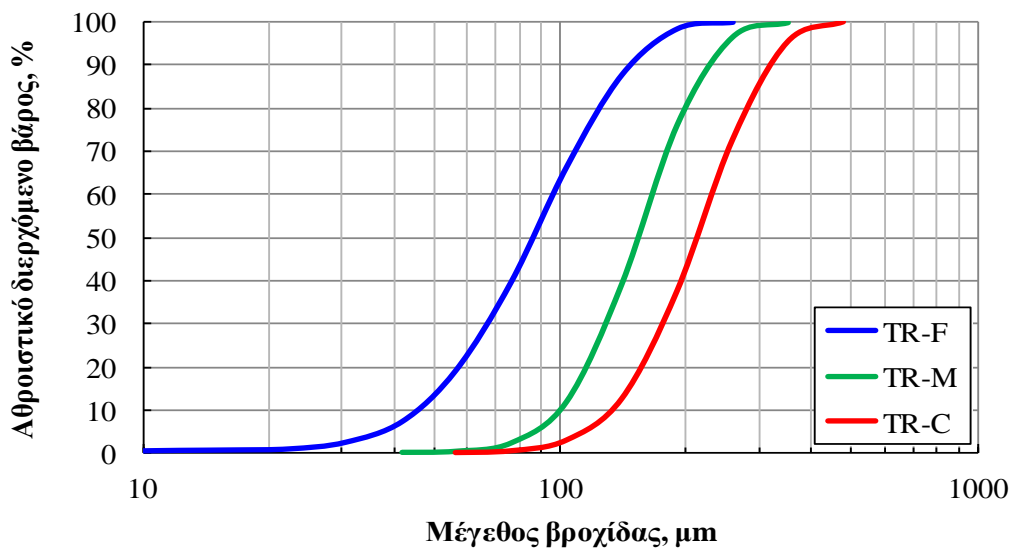


Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των δύο δειγμάτων δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές. Η μέση διάμετρος των κόκκων μετρήθηκε ίση με 143 και 161  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα. Το δείγμα TR φαίνεται να είναι ελαφρώς πιο χονδρόκοκκο σε σύγκριση με το CH.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται τα διαγράμματα κοκκομετρικών κατανομών των τριών επιμέρους κλασμάτων που διαχωρίστηκαν από τα δύο αρχικά δείγματα CHΙ και TRΙ.



Σχήμα 6.2: Η κοκκομετρική κατανομή των παραγομένων κλασμάτων που προέκυψαν από κοσκίνιση του αρχικού δείγματος περλίτη Τσιγκράδου (CHΙ).



Σχήμα 6.3: Η κοκκομετρική κατανομή των παραγομένων κλασμάτων που προέκυψαν από κοσκίνιση του αρχικού δείγματος περλίτη Τράχηλα (TRΙ).

Πίνακας 6.6: Ποσοστιαία κατανομή κλασμάτων κατά βάρος.

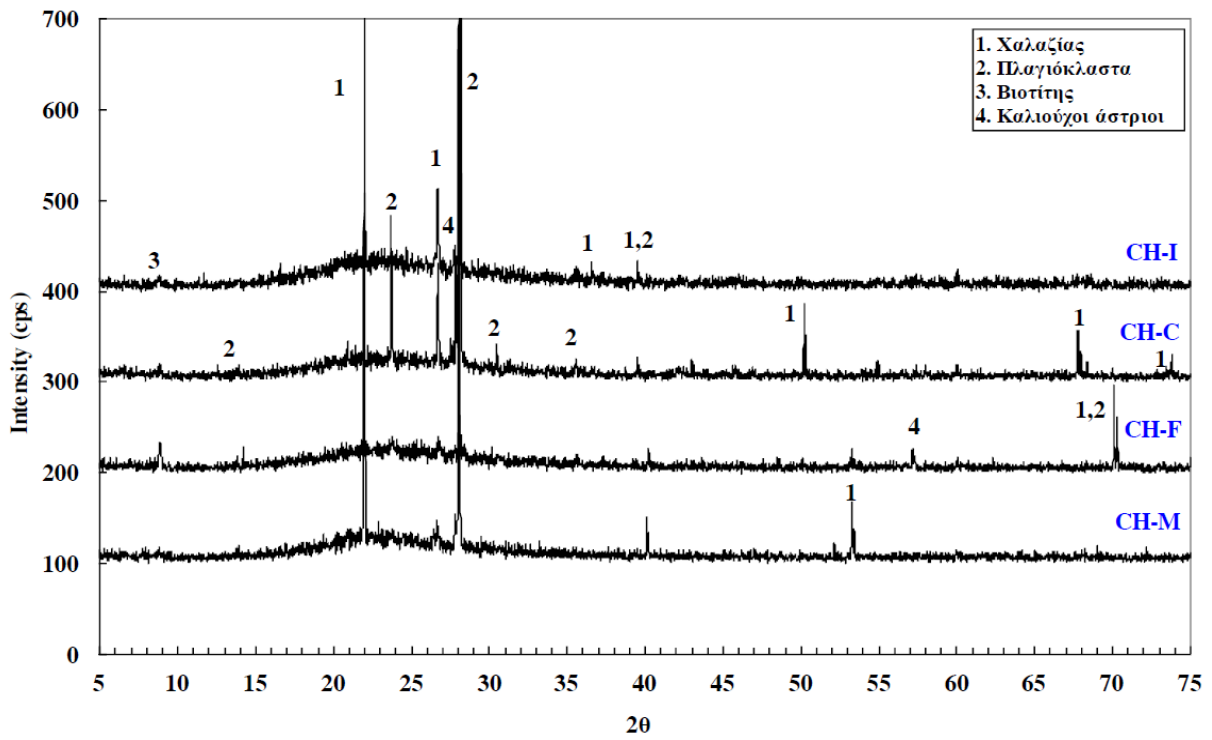
| Κλάσμα | D10 %<br>( $\mu\text{m}$ ) | D50%<br>( $\mu\text{m}$ ) | D90%<br>( $\mu\text{m}$ ) | D99%<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| CH-F   | 43                         | 79                        | 140                       | 172                       |
| CH-M   | 98                         | 160                       | 210                       | 260                       |
| CH-C   | 138                        | 255                       | 374                       | 452                       |
| TR-F   | 45                         | 86                        | 133                       | 195                       |
| TR-M   | 100                        | 152                       | 205                       | 290                       |
| TR-C   | 130                        | 210                       | 320                       | 410                       |

Από τα διαγράμματα της κοκκομετρικής κατανομής των κλασμάτων φαίνεται ότι τα λεπτόκοκκα (-F) και τα μεσαίου μεγέθους κλάσματα (-M) που προέκυψαν από τις δύο διαφορετικές πρώτες ύλες χαρακτηρίζονται από παρόμοια μέση κοκκομετρία (D 50%) ενώ το χονδρόκοκκο κλάσμα (-C) που προέκυψε από την πρώτη ύλη CH-I παρουσιάζει και εδώ αυξημένο μέγιστο μέγεθος κόκκων.

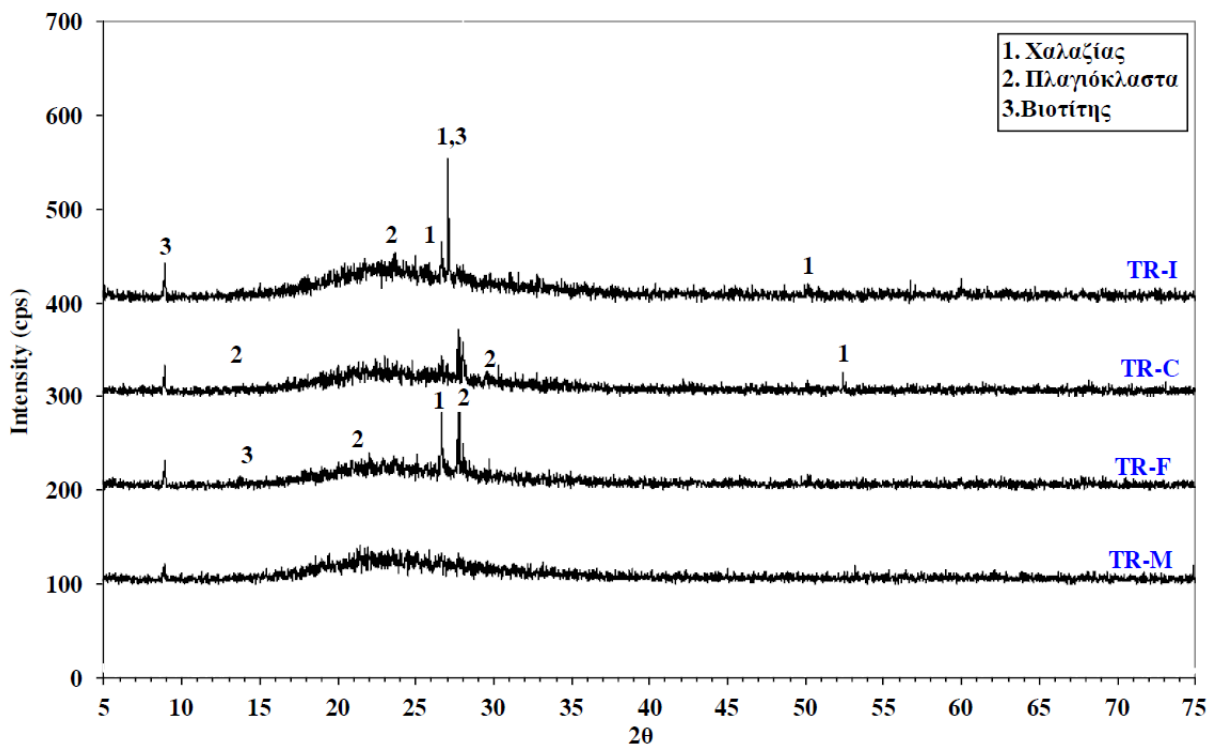
### 6.1.3. Ορυκτολογική ανάλυση

#### 6.1.3.1. Περιθλασιμετρία ακτίνων-X

Η μελέτη των ορυκτολογικών φάσεων των δειγμάτων περλίτη πραγματοποιήθηκε με τη περιθλασίμετρο ακτίνων-X ( με χρήση XRD τύπου Bruker D8 Focus). Τα χαρακτηριστικά και οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων είναι τα εξής: ακτινοβολία CuK $\alpha$ , ένταση 30 mA, τάση 40 kV, φίλτρο Ni, ταχύτητα γωνιομέτρου 0.02 $^\circ$ /sec. Η ταυτοποίηση των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων που ανιχνεύτηκαν πραγματοποιήθηκε μέσω των χαρακτηριστικών ανακλάσεών τους.



Σχήμα 6.4: Ακτινοδιαγράμματα αρχικού δείγματος (CH-I) και των παραγόμενων κλασμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδο (CH-F, CH-M, CH-C).



Σχήμα 6.5: Ακτινοδιαγράμματα αρχικού δείγματος (TR-I) και των παραγόμενων κλασμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F, TR-M, TR-C).

Τα ακτινοδιαγράμματα που προέκυψαν από την ορυκτολογική ανάλυση δείχνουν την ύπαρξη των εξής ορυκτολογικών φάσεων:

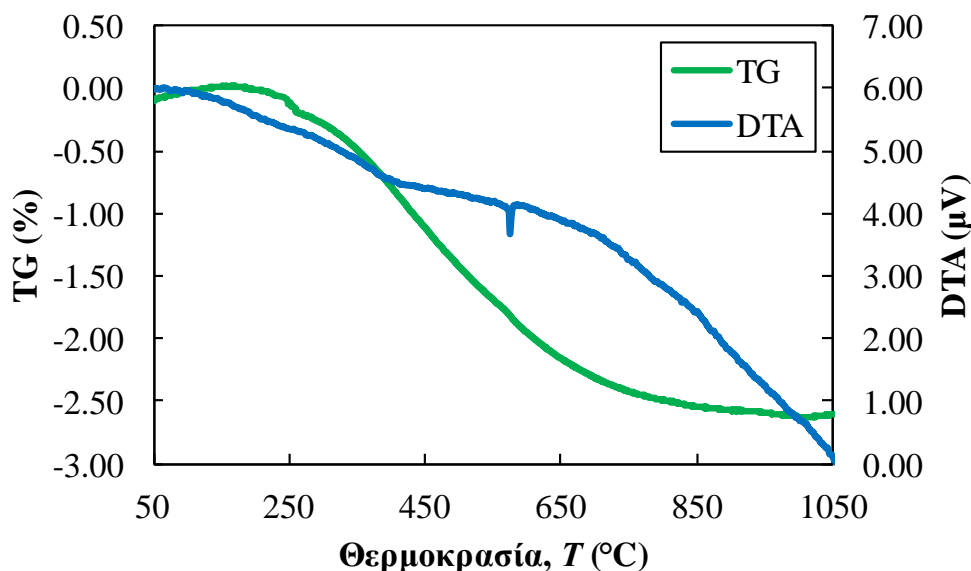
- Χαλαζίας (SiO<sub>2</sub>)

- Πλαγιόκλαστα ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ -  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) και αλκαλιούχοι άστριοι ( $\text{K, NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) που αποτελούν τεκτοφυρτικά ορυκτά
- Βιοτίτης [ $\text{K(Mg, Fe)}_3(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ], φυλλοφυρτικό ορυκτό που εντάσσεται στην ομάδα των K-ούχων μαρμαρυγιών.

Ο «θόρυβος» που παρατηρείται σε όλο το εύρος 2θ και είναι εντονότερος στο διάστημα 2θ 15-35 όπου τα διαγράμματα παρουσιάζουν χαρακτηριστικό ύβωμα, οφείλεται στην άμορφη υαλώδη φάση που επικρατεί στον περλίτη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ορυκτολογική ανάλυση με εφαρμογή της περιθλασιμετρίας ακτινών-X είναι σε συμφωνία με αναλύσεις δημοσιευμένων εργασιών στις οποίες αναφέρεται η επικράτηση της άμορφης πυριτικής φάσης και η ύπαρξη μικροκρυστάλλων χαλαζία, πλαγιοκλάστων και βιοτίτη (Rouliá et al., 2006).

#### 6.1.3.2. Βαρυτομετρική (TG) και διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) περλιτών.

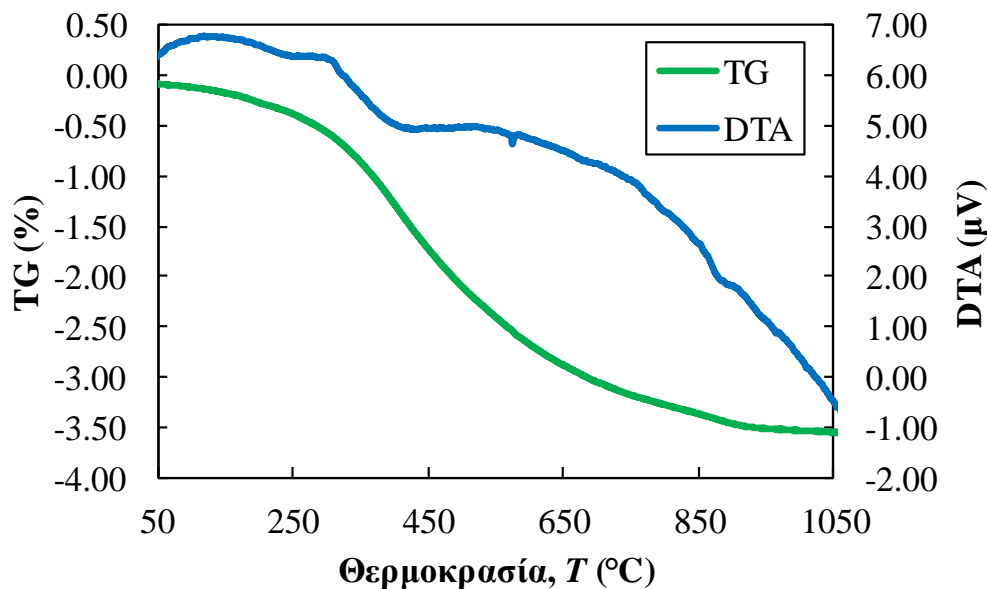
Η βαρυτομετρική και η διαφορική θερμική ανάλυση των δυο δειγμάτων περλίτη πραγματοποιήθηκε σε θερμοζυγό τύπου Labsys TG Apparatus (κατασκευάστρια εταιρία SETARAM Instrumentation). Οι συνθήκες διεξαγωγής της μέτρησης είναι οι εξής: θερμοκρασιακό εύρος 20-1050°C, ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας 20°C·min<sup>-1</sup> και αδρανής ατμόσφαιρα He.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα θερμοβαρυτομετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου

Από το διάγραμμα της θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης του δείγματος CH που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 φαίνεται συνεχής απώλεια βάρους του δείγματος με την αύξηση της θερμοκρασίας του σε όλο το εύρος θέρμανσης του. Η απώλεια βάρους δικαιολογείται από την απομάκρυνση των διαφόρων τύπων νερού από τον περλίτη. Η ενδόθερμη καμπύλη στη θερμοκρασία περίπου 570 °C

αποδίδεται στη μετατροπή του  $\alpha$  quartz  $\leftrightarrow$   $\beta$  quartz (Heaney and Veblen, 1991). Η συνολική απώλεια πύρωσης που παρουσιάζει το δείγμα προσεγγίζει το 2.65% του συνολικού του βάρους.

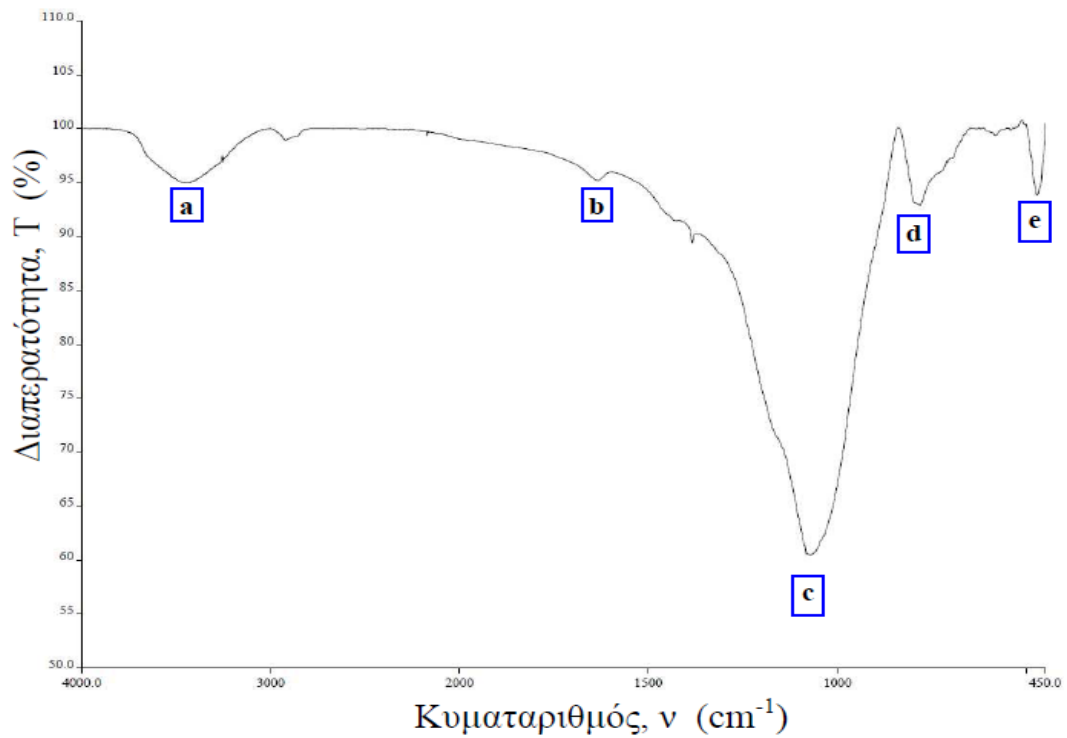


Σχήμα 6.7: Διάγραμμα θερμοβαρτομετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα

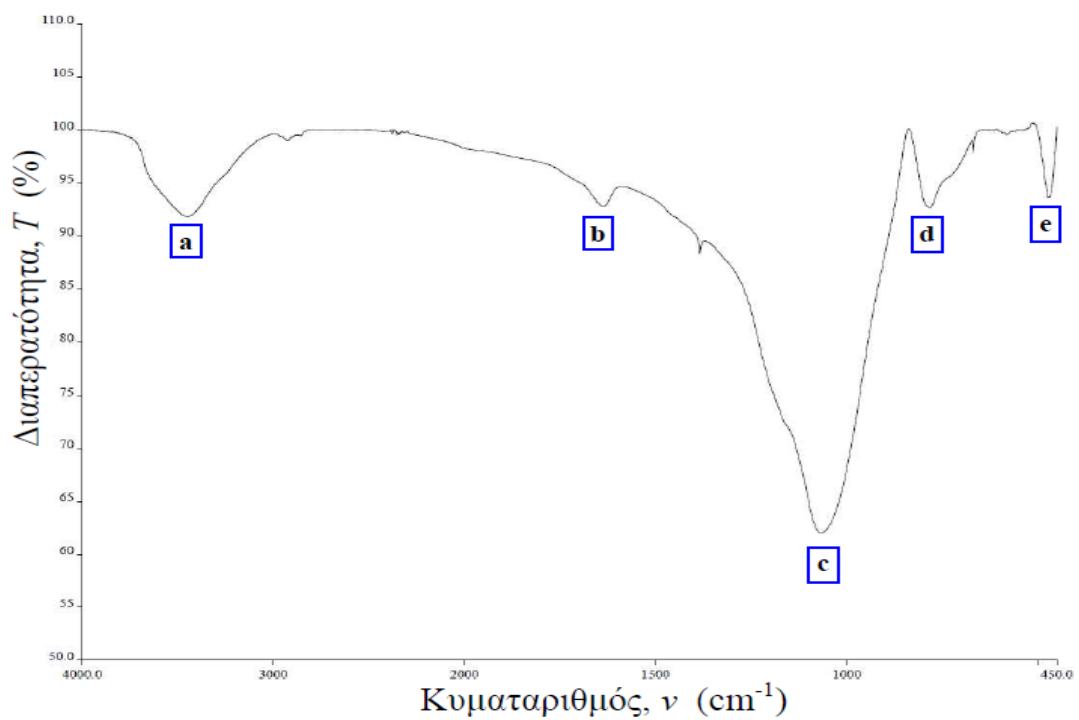
Στο Σχήμα 6.7 παρατίθεται το διάγραμμα θερμοβαρτομετρικής και διαφορικής θερμικής ανάλυσης για το δείγμα TR. Η απώλεια βάρους για το δείγμα αυτό ανέρχεται σε 3.4% περίπου κατά βάρος. Και σε αυτό το δείγμα παρατηρείται η ενδόθερμη κορυφή στη θερμοκρασιακή περιοχή των 570 °C περίπου, η οποία οφείλεται στη μετατροπή  $\alpha$  quartz  $\leftrightarrow$   $\beta$  quartz, όπως ήδη αναφέρθηκε(Heaney and Veblen, 1991).

#### 6.1.3.3. Φασματοσκοπία Υπέρυθρης Ακτινοβολίας με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR).

Για την ταυτοποίηση των δεσμών που συναντώνται στα δύο δείγματα περλίτη, πραγματοποιήθηκε ανάλυση υπέρυθρης φασματοσκοπίας με μετασχηματισμό Fourier (FT-IR) με φασματόμετρο τύπου Perkin Elmer Spectrum 100 FT-IR με την τεχνική ATR (Attenuated Total Reflectance). Οι συνθήκες λήψης φασμάτων είναι: φασματικό εύρος 450-4000  $\text{cm}^{-1}$ , κρύσταλλος ZnSe. Τα διαγράμματα απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας των δύο πρώτων υλών παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.8 και 6.9.



Σχήμα 6.8: FT-IR φασματοσκοπίας περλίτη Τσιγκράδου



Σχήμα 6.9: FT-IR φασματοσκοπίας περλίτη Τράχηλα.

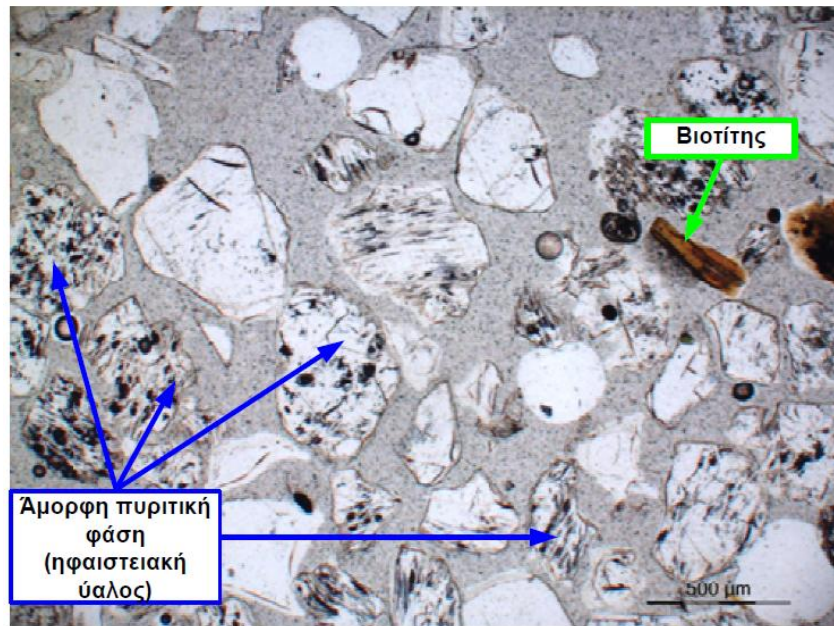
Στα διαγράμματα διακρίνονται πέντε κύριες περιοχές απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας οι οποίες ερμηνεύονται ως εξής:

- a: 3440 cm<sup>-1</sup>. Συμμετρική δόνηση τάσης OH (νερό συνδεδεμένο με γέφυρα υδρογόνου) (Abalos et al., 2003), 3280 cm<sup>-1</sup>. Ασύμμετρη δόνηση τάσης OH (Abalos et al., 2003).
- b: 1625 cm<sup>-1</sup>. Δόνηση στρέψης H-O-H (μοριακό νερό)(Abalos et al., 2003; Roulia et al., 2006).
- c: 1064 cm<sup>-1</sup>. Ασύμμετρη δόνηση τάσης Si-O-Si (Sodeyama et al., 1999; Abalos et al., 2003; Roulia et al., 2006). Το εύρος της συγκεκριμένης περιοχής απορρόφησης σχετίζεται με την περιεκτικότητα των δειγμάτων σε άμορφη πυριτική φάση.
- d: 800 cm<sup>-1</sup>. Συμμετρική δόνηση τάσης Si-O-Si (άμορφη πυριτική φάση) (Yoshino et al., 1990; Abalos et al., 2003). Άλλοι ερμηνεύουν την απορρόφηση σε δόνηση κάμψης (Roulia et al., 2006) ή σε δόνηση τάσης του στελέχους Si-O της αλυσίδας Si-O-Al (Sodeyama et al., 1999).
- e: 460 cm<sup>-1</sup>. Δόνηση κάμψης ατόμου οξυγόνου στις γέφυρες πυριτίου Si-O-Si (Abalos et al., 2003; Roulia et al., 2006).

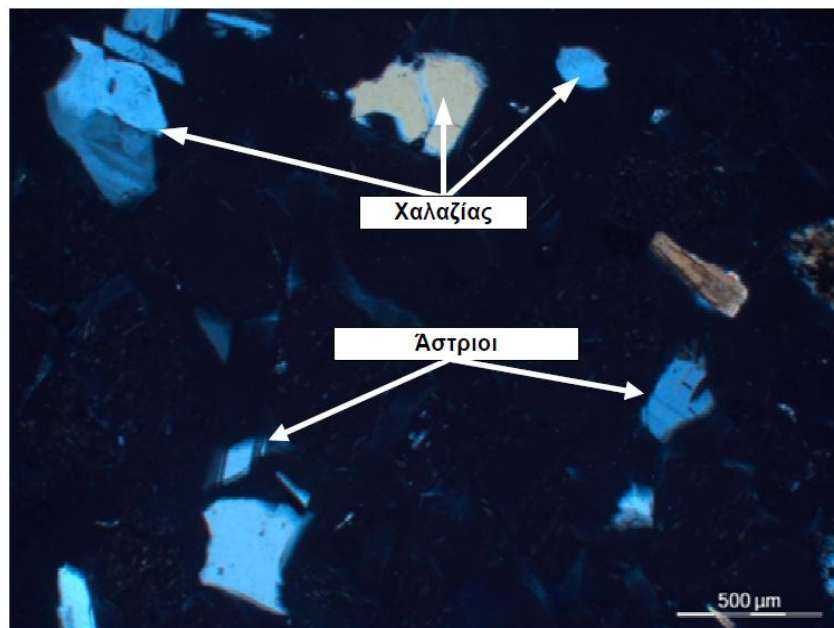
#### 6.1.3.4. Μελέτη δειγμάτων σε οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός

Λεπτές στιλπνές τομές δύο αντιπροσωπευτικών δειγμάτων περλίτη Τσιγκράδου (CHI) και Τράχηλα (TRI) μελετήθηκαν σε πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός, για την ταυτοποίηση της ορυκτολογικής σύστασης τους και των ιστολογικών χαρακτηριστικών τους. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων διόγκωσης διαφέρει από τα δείγματα που εξετάστηκαν στο πολωτικό μικροσκόπιο μόνο στην κοκκομετρική κατανομή.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα 6.10 και 6.11, ο περλίτης του Τσιγκράδου χαρακτηρίζεται από την παρουσία άμορφης υαλώδους φάσης, με ρευστική υφή λόγω της στερεοποίησης του μάγματος κατά την διεύθυνση ροής της λάβας, και χαρακτηριστική περλιτική ρωγμάτωση. Επιπλέον, εμφανίζονται κρύσταλλοι βιοτίτη, χαλαζία, πλαγιοκλάστων και αδιαφανών μεταλλικών ορυκτών (ιλμενίτης, μαγνητίτης).



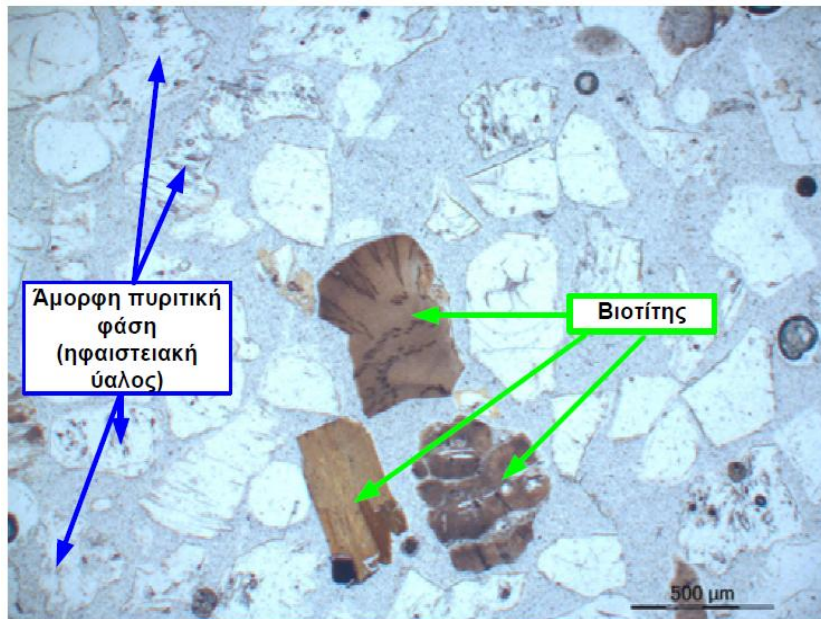
Σχήμα 6.10: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τσιγκράδου όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή (parallel Nicols).



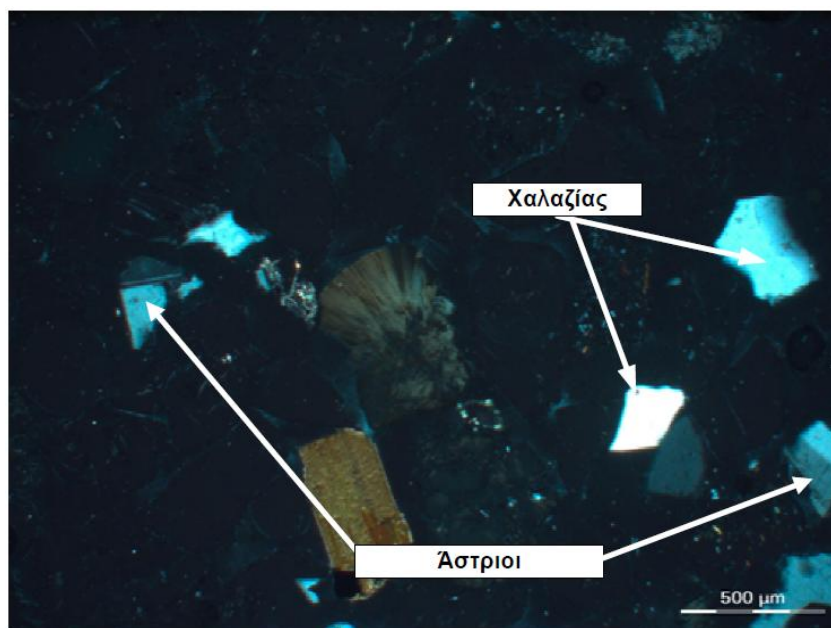
Σχήμα 6.11: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τσιγκράδου όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός με παρατήρηση με πολωτή και αναλυτή (Crossed Nicols).

Στα σχήματα 6.12 και 6.13 παρατίθενται εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου διερχόμενου φωτός του περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα.





Σχήμα 6.12: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τράχηλα όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός με παρατήρηση με πολωτή (parallel Nicols).



Σχήμα 6.13: Κόκκοι περλίτη που προέρχονται από το ορυχείο του Τράχηλα όπως φαίνονται στο οπτικό πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός με παρατήρηση με πολωτή και αναλυτή (Crossed Nicols).

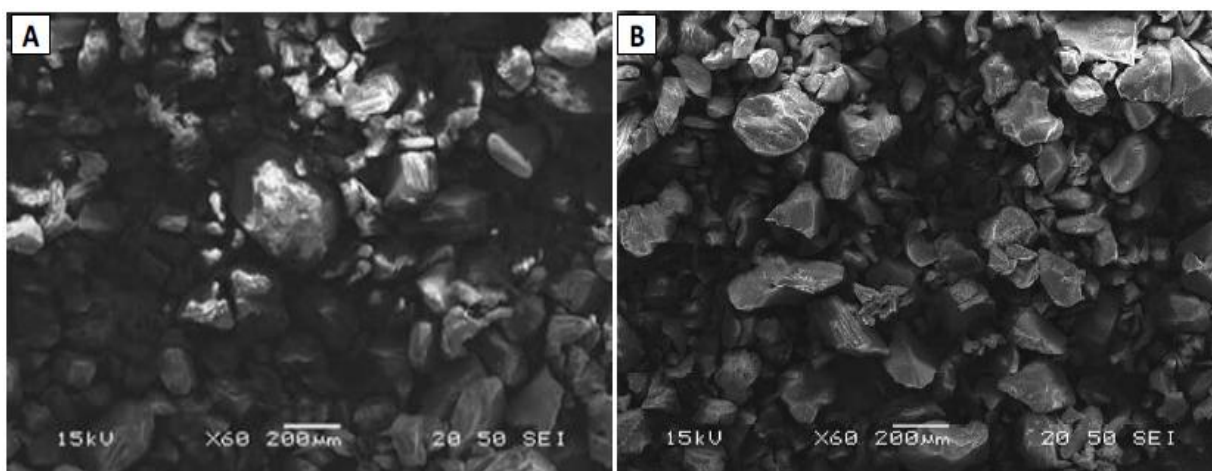
Οι παρατηρούμενες ορυκτολογικές φάσεις είναι αντίστοιχες αυτών του περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα. Παρατηρείται η επικράτηση της άμορφης υαλώδους φάσης ως αποτέλεσμα της ταχύτατης ψύξης του μάγματος, καθώς και των κρυστάλλων βιοτίτη, αστρίων και μεταλλικών ορυκτών.

6.1.3.5. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης και Μικροανάλυση EDS (Energy Dispersive Spectroscopy).

Η μορφολογική εξέταση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης τύπου JEOL 6380LV, ενώ πραγματοποιήθηκε και ταυτοποίηση των ορυκτολογικών τους φάσεων με σύστημα μικροανάλυσης OXFORD που εφαρμόστηκε σε λεπτές στιλπνές τομές.

#### Εξέταση μορφολογίας δειγμάτων

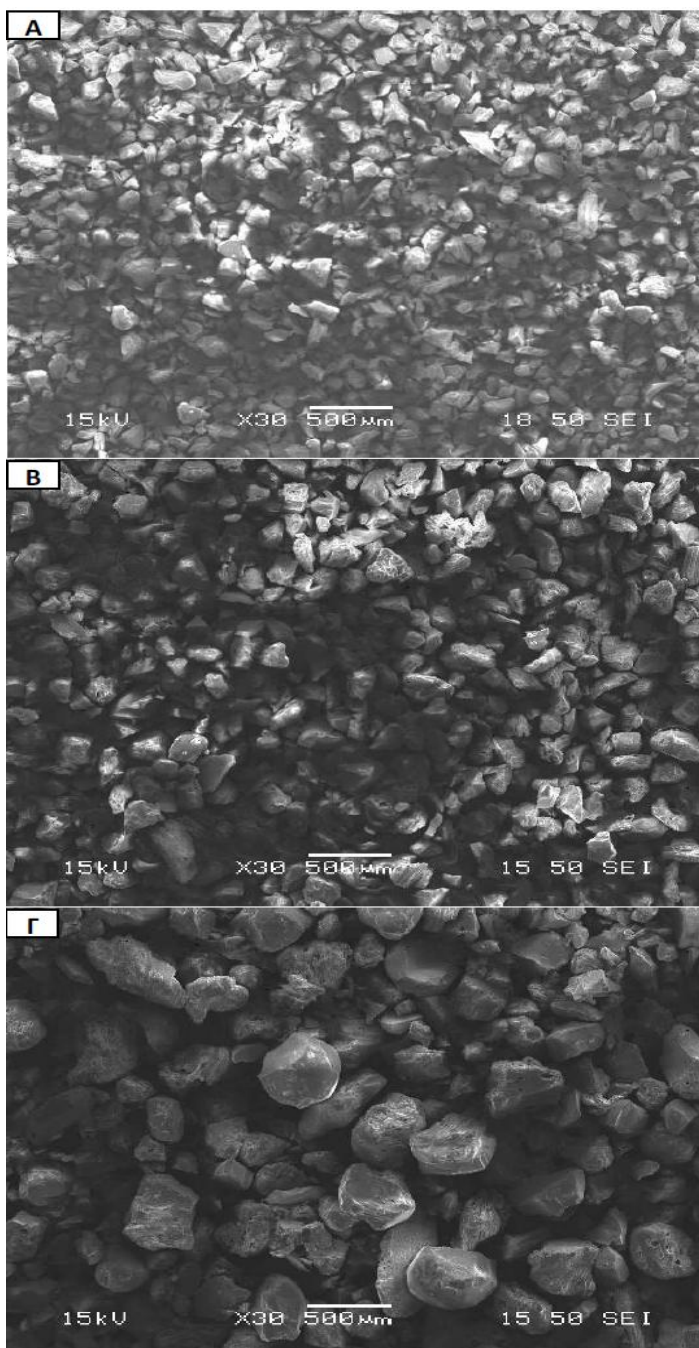
Στην συνέχεια παρατίθενται αντιπροσωπευτικές εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων των αρχικών πρώτων υλών και των κλασμάτων που προέκυψαν μετά από κοσκίνιση.



Σχήμα 6.14: Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) αρχικών δειγμάτων περλίτη: A δείγμα CH-I, B δείγμα TR-I.

Παρατηρείται ανομοιογένεια στην κατανομή μεγέθους των κόκκων που συνθέτουν τα δείγματα γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει το εύρος κοκκομετρίας τους που παρουσιάστηκε στην μελέτη των φυσικών τους ιδιοτήτων.

Οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων των μειγμάτων που προέκυψαν από το αρχικό δείγμα του περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου φαίνονται στο σχήμα 6.15 (Α-Γ). Τα δείγματα που προέκυψαν από την κοσκίνιση έχουν μεγαλύτερη κοκκομετρική ομοιογένεια σε σχέση με το αρχικό τους (Σχήμα 6.14 Α) ενώ μορφολογικά τα τεμαχίδια χαρακτηρίζονται από ακαθόριστο γωνιώδες σχήμα με ανεπτυγμένη συχνά την μία διάσταση σε σχέση με τις άλλες. Το γεγονός αυτό αναμένεται να επηρεάζει την διεργασία της κοσκίνησης κατά την οποία τα σωματίδια διέρχονται από τις βροχίδες ενός κόσκινου μέσω της διάστασης εκείνης η οποία έχει μικρότερο μέγεθος. Τελικά, εντός του λεπτόκοκκου κλάσματος (CH-F) δύναται να παρατηρούνται κόκκοι μακρόστενοι με την ανεπτυγμένη τους διάσταση να ξεπερνά τα



Σχήμα 6.15: Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) των κλασμάτων CH-F (Α), CH-M (Β), CH-C (Γ).

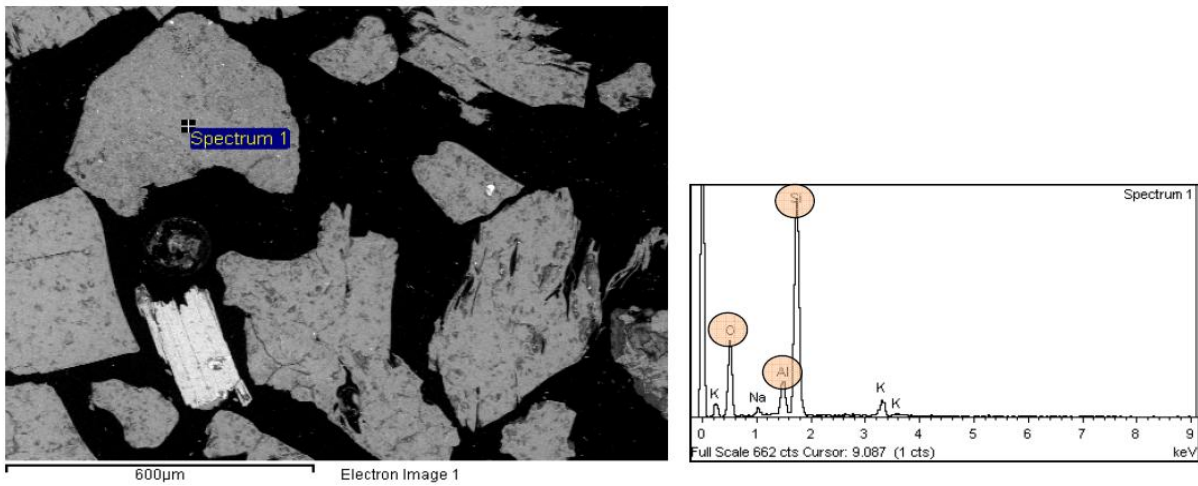
150 µm που είναι και το μέγεθος της βροχίδας κόσκινου που χρησιμοποιήθηκε.

Παρόμοιες παρατηρήσεις διακρίνονται στο κλάσμα CH-M (Σχήμα 6.15 Β). Το δείγμα αυτό όμως φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς το μέγεθος των κόκκων του. Όσον αφορά στο πλέον χονδρόκοκκο δείγμα, CH-C (Σχήμα 6.15 Γ) παρατηρείται η ύπαρξη αρκετά μεγάλων κόκκων, η διάμετρος των οποίων πλησιάζει τα 500 µm. Η ύπαρξη αδρομερούς υλικού στα χονδρόκοκκα κλάσματα (CH-C, TR-C) είχε παρατηρηθεί και στα διαγράμματα κοκκομετρικών κατανομών των δειγμάτων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα

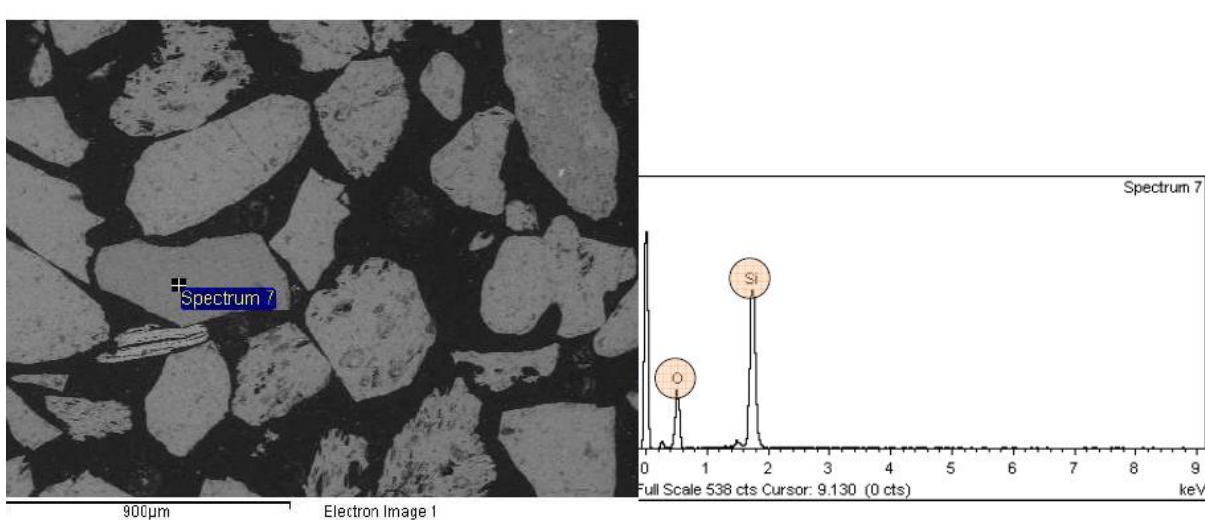
### Μελέτη λεπτών στιλπνών τομών

- Περλίτης από το ορυχείο του Τσιγκράδου

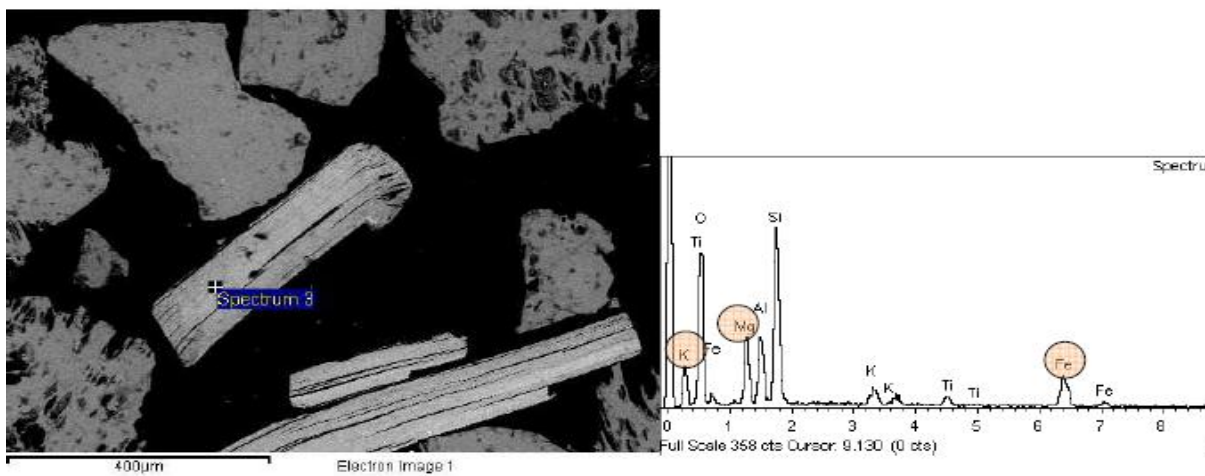
Στα σχήματα 6.16 – 6.20 παρουσιάζονται οι εικόνες πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων και τα αντίστοιχα φάσματα διασποράς ενεργειών από τις αναλυθείσες φάσεις του περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.



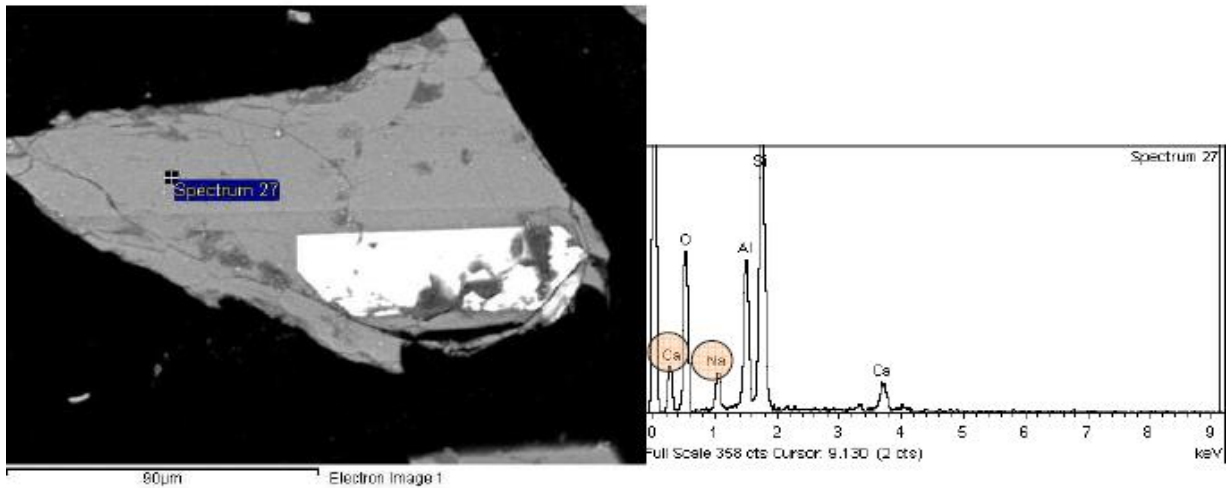
Σχήμα 6.16: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) υαλώδους πυριτικής φάσης σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.



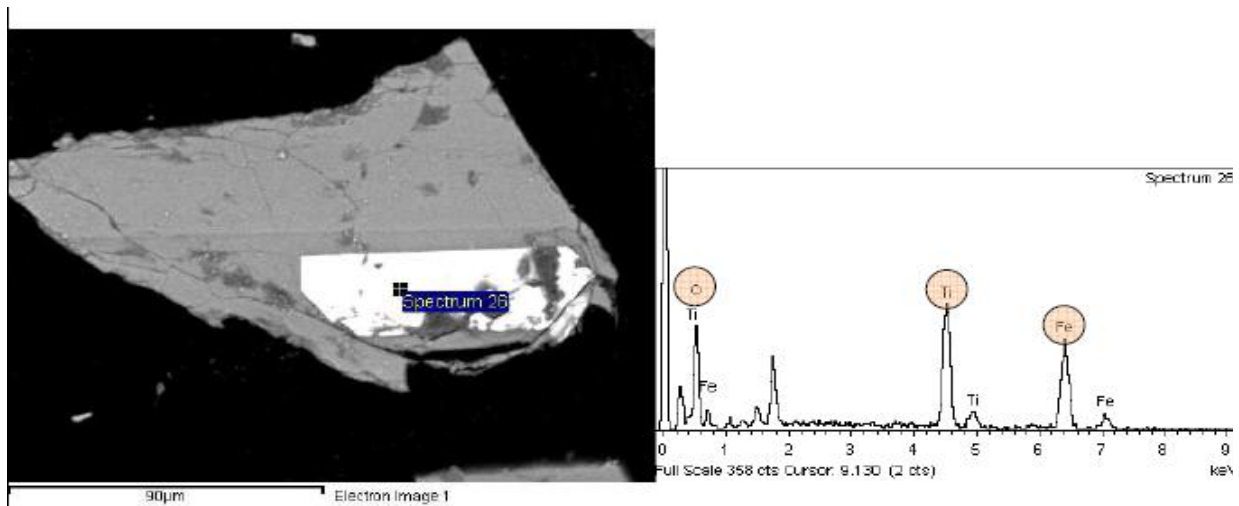
Σχήμα 6.17: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) χαλαζία σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.



Σχήμα 6.18: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) βιοτίτη σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.



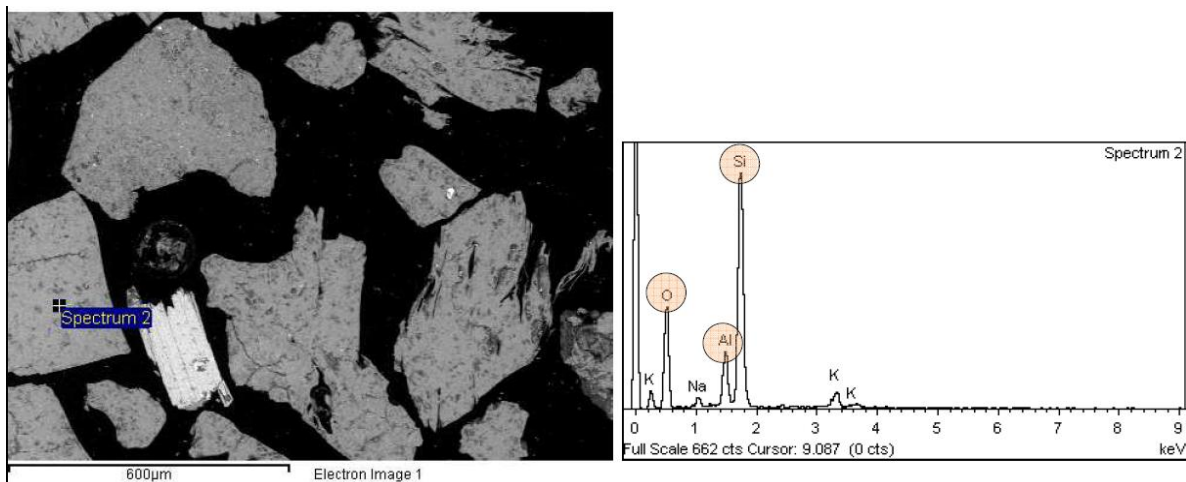
Σχήμα 6.19: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) πλαγιοκλάστου με έγκλεισμα ιλμενίτη σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.



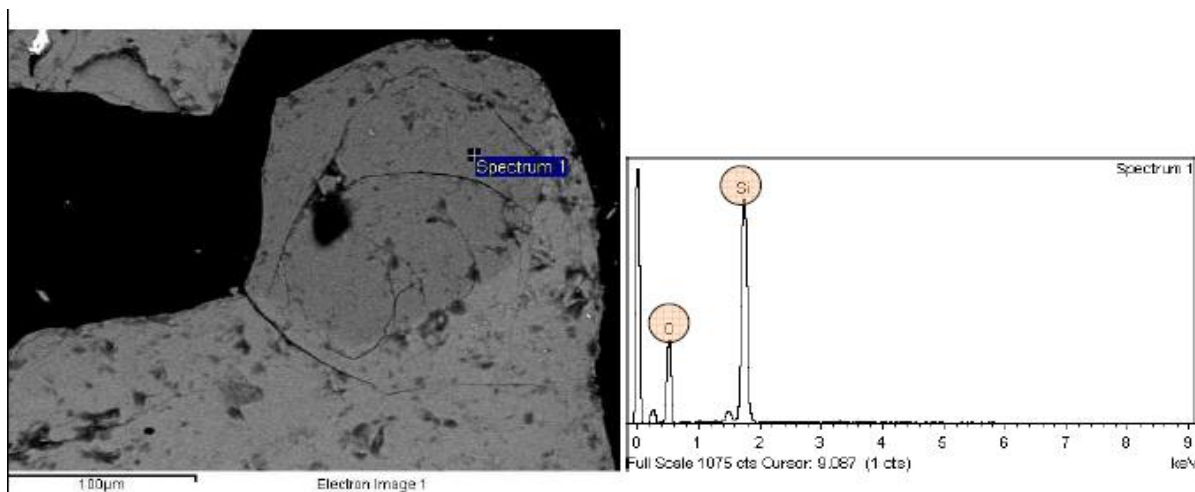
Σχήμα 6.20: Εικόνα πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) εγκλείσματος ιλμενίτη σε πλαγιόκλαστο σε περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου.

Η μελέτη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και η ηλεκτρονική μικροανάλυση του περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου, επιβεβαίωσε την παρουσία άμορφης πυριτικής φάσης και την συνύπαρξη αλκαλίων, χαλαζία, πλαγιοκλάστων, βιοτίτη και δευτερευόντως μαγνητίτη και ιλμενίτη.

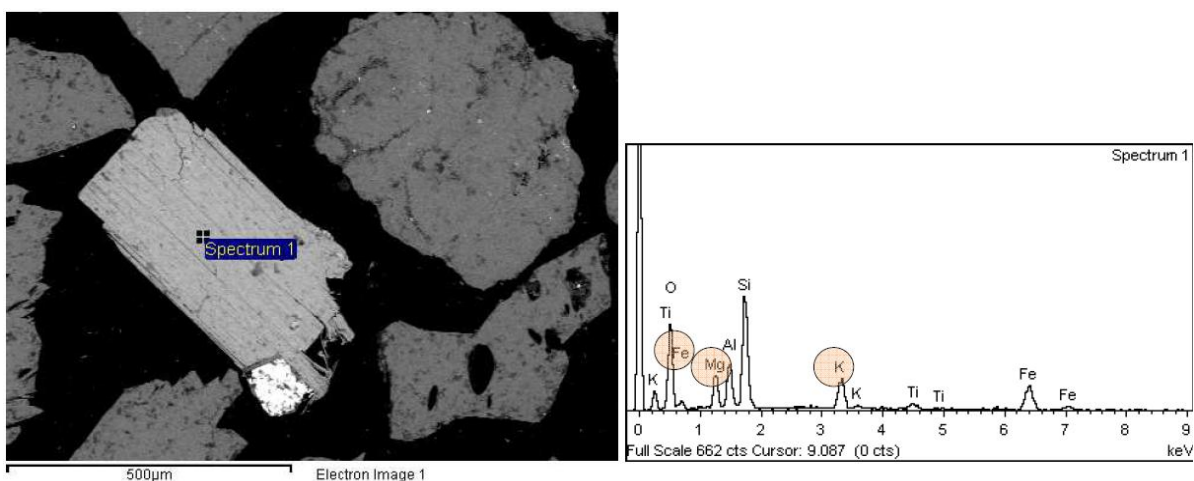
- Περλίτης από το ορυχείο του Τράχηλα



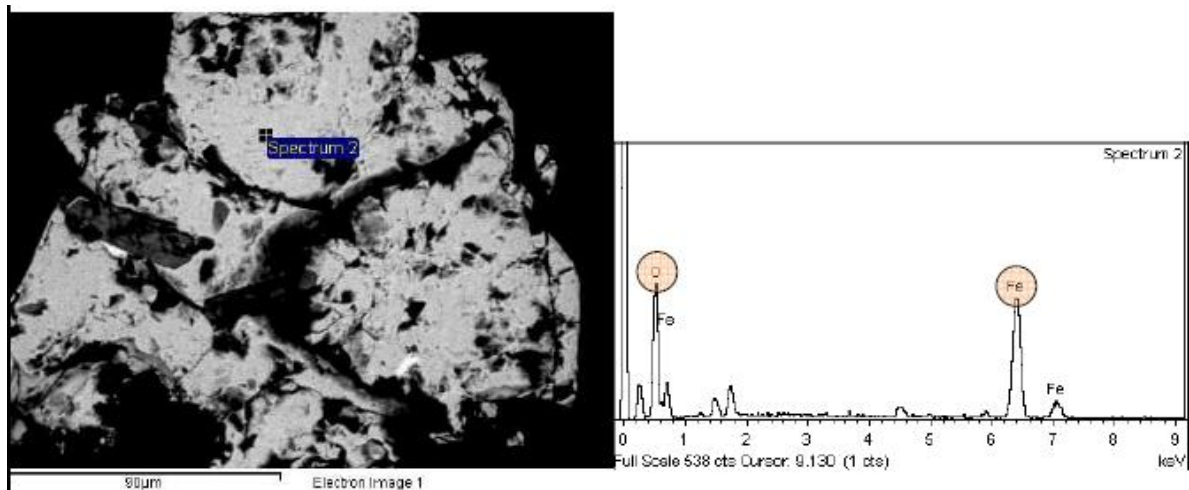
Σχήμα 6.21: Εικόνα πωσσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) υαλώδους πυριτικής φάσης (ηφαιστειακό γυαλί) σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα.



Σχήμα 6.22: Εικόνα πωσσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) χαλαζία σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα.



Σχήμα 6.23: Εικόνα πωσσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) βιοτίτης σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα.



Σχήμα 6.24: Εικόνα πίσωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (BSE) και φάσμα διασποράς ενεργειών (EDS) μαγνητίτης σε περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα.

Η μελέτη με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και η ηλεκτρονική μικροανάλυση του περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα, σε αντιστοιχία με τον περλίτη του Τσιγκράδου, επιβεβαίωσε την παρουσία άμορφης πυριτικής φάσης πλούσιας σε αλκάλια (Σχήμα 6.21), χαλαζία (Σχήμα 6.22), πλαγιοκλάστων, βιοτίτη (Σχήμα 6.23) και δευτερευόντως μαγνητίτη (Σχήμα 6.24) και ιμηνίτη.

## 6.2. Πειράματα διόγκωσης

Στην διάρκεια της διδακτορικής διατριβής διενεργήθηκε μεγάλος αριθμός πειραμάτων διόγκωσης στην καινούργια κάθετη ηλεκτρική κάμινο, με σκοπό τη διερεύνηση των παραμέτρων που επιδρούν διόγκωση και στην ποιότητα των προϊόντων. Παράγοντες που σχετίζονται με τις συνθήκες διεξαγωγής της κατεργασίας αλλά και με τις φυσικοχημικές ιδιότητες της πρώτης ύλης αναλύθηκαν εκτενώς. Ακολούθησε ο χαρακτηρισμός των διογκωμένων προϊόντων και διερευνήθηκε η καταλληλότητα χρησιμοποίησής τους σε πλήθος εφαρμογών.

### 6.2.1. Συνθήκες διεξαγωγής περαμάτων διόγκωσης

Στις κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν τη διόγκωση στη κάμινο διόγκωσης συγκαταλέγονται η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης, ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα αλλά και ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης, ενώ από την άποψη των χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης, καθοριστική είναι η χημική τους σύσταση καθώς και η κοκκομετρική τους κατανομή. Ως προς την πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τύποι περλίτη, CH και TR στην αρχική τους κοκκομετρία, αλλά και τα τρία κοκκομετρικά κλάσματα που δημιουργήθηκαν (M, F, C) για κάθε τύπο περλίτη. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκε η επίδραση των παραμέτρων αυτών

στην διόγκωση και στον πίνακα 6.7 παρουσιάζεται το εύρος τιμών τους εντός του οποίου πραγματοποιήθηκε η μελέτη.

Πίνακας 6.7. Παράμετροι των πειραμάτων διόγκωσης στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο

| Παράμετρος   | Εύρος τιμών  |
|--|--|
| Θερμοκρασία ζωνών καμίνου, $T_w$<br>°C                       | 20-1250  |
| Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα, $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | 0-200  |
| Ρυθμός τροφοδοσίας περλίτη, $Q_{perl}$<br>kg·h <sup>-1</sup> | 3-30   |
| Τύπος περλίτη  | Τράχηλα (TR), Τσιγκράδου (CH)                            |
| Κοκκομετρική κατανομή πρώτης ύλης                            | I (+75 -400μm), F (-150 μm),<br>M (+150-212μm), C (+212) |

Στους Πίνακες 6.8 – 6.15 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθήκες διόγκωσης και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πείραμα. Ο κωδικός δείγματος χρησιμοποιείται και σαν ονομασία αναφοράς των διογκωμένων δειγμάτων κατά την παρουσίαση των χαρακτηριστικών τους που θα ακολουθήσει.

Πίνακας 6.8: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-I στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$<br>kg/h | $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | $T_1$<br>°C | $T_2$<br>°C | $T_3$<br>°C | $T_4$<br>°C | $T_5$<br>°C | $T_6$<br>°C |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CHI1              | CH-I      | 2.72               | 15                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI2              | CH-I      | 4                  | 50                                  | 600         | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        |
| CHI3              | CH-I      | 3.75               | 50                                  | 650         | 750         | 850         | 950         | 1050        | 1150        |
| CHI4              | CH-I      | 4.4                | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI5              | CH-I      | 4.6                | 100                                 | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI6              | CH-I      | 15                 | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI7              | CH-I      | 30                 | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI8              | CH-I      | 4.29               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI9              | CH-I      | 3.75               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI10             | CH-I      | 3.53               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHI11             | CH-I      | 3.53               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |



Πίνακας 6.9: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-F στην κάθετη ηλεκτρική κάμνο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$<br>kg/h | $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | $T_1$<br>°C | $T_2$<br>°C | $T_3$<br>°C | $T_4$<br>°C | $T_5$<br>°C | $T_6$<br>°C |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CHF1              | CH-F      | 5                  | 15                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHF2              | CH-F      | 5.45               | 50                                  | 600         | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        |
| CHF3              | CH-F      | 5.45               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |

Πίνακας 6.10: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-M στην κάθετη ηλεκτρική κάμνο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$<br>kg/h | $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | $T_1$<br>°C | $T_2$<br>°C | $T_3$<br>°C | $T_4$<br>°C | $T_5$<br>°C | $T_6$<br>°C |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CHM1              | CH-M      | 2.61               | 0                                   | 900         | 900         | 900         | 900         | 900         | 900         |
| CHM2              | CH-M      | 2.5                | 0                                   | 950         | 950         | 950         | 950         | 950         | 950         |
| CHM3              | CH-M      | 2.61               | 0                                   | 1000        | 1000        | 1000        | 1000        | 1000        | 1000        |
| CHM4              | CH-M      | 2.86               | 0                                   | 1100        | 1100        | 1100        | 1100        | 1100        | 1100        |
| CHM5              | CH-M      | 3.33               | 0                                   | 1200        | 1200        | 1200        | 1200        | 1200        | 1200        |
| CHM6              | CH-M      | 2                  | 0                                   | 600         | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        |
| CHM7              | CH-M      | 2.14               | 0                                   | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHM8              | CH-M      | 1.88               | 0                                   | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1200        | 1200        |
| CHM9              | CH-M      | 2.86               | 0                                   | 850         | 900         | 950         | 1000        | 1050        | 1100        |
| CHM10             | CH-M      | 2.73               | 0                                   | 900         | 950         | 1000        | 1050        | 1100        | 1150        |
| CHM11             | CH-M      | 2.4                | 0                                   | 950         | 1000        | 1050        | 1100        | 1150        | 1200        |
| CHM12             | CH-M      | 3.33               | 6                                   | 1000        | 1050        | 1100        | 1150        | 1200        | 1250        |
| CHM13             | CH-M      | 2.72               | 15                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHM14             | CH-M      | 4                  | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHM15             | CH-M      | 3.53               | 0                                   | 1100        | 1100        | -           | -           | -           | -           |
| CHM16             | CH-M      | 2.61               | 0                                   | 1100        | 1100        | 1100        | 1100        | -           | -           |
| CHM17             | CH-M      | 4.29               | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHM18             | CH-M      | 5                  | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |

Πίνακας 6.11: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης CH-C στην κάθετη ηλεκτρική κάμνο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$<br>kg/h | $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | $T_1$<br>°C | $T_2$<br>°C | $T_3$<br>°C | $T_4$<br>°C | $T_5$<br>°C | $T_6$<br>°C |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CHC1              | CH-C      | 1.4                | 0                                   | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHC2              | CH-C      | 3                  | 15                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHC3              | CH-C      | 1.88               | 50                                  | 600         | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        |
| CHC4              | CH-C      | 2.5                | 50                                  | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| CHC5              | CH-C      | 2.4                | 100                                 | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |

Πίνακας 6.12: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-I στην κάθετη ηλεκτρική κάμφο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$ kg/h | $Q_{air,in}$ L·min <sup>-1</sup> | $T_1$ °C | $T_2$ °C | $T_3$ °C | $T_4$ °C | $T_5$ °C | $T_6$ °C |
|-------------------|-----------|-----------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TRI1              | TR-I      | 5               | 0                                | 900      | 900      | 900      | 900      | 900      | 900      |
| TRI2              | TR-I      | 5               | 0                                | 950      | 950      | 950      | 950      | 950      | 950      |
| TRI3              | TR-I      | 5               | 0                                | 970      | 970      | 970      | 970      | 970      | 970      |
| TRI4              | TR-I      | 5               | 0                                | 1000     | 1000     | 1000     | 1000     | 1000     | 1000     |
| TRI5              | TR-I      | 5               | 0                                | 1025     | 1025     | 1025     | 1025     | 1025     | 1025     |
| TRI6              | TR-I      | 5               | 0                                | 1050     | 1050     | 1050     | 1050     | 1050     | 1050     |
| TRI7              | TR-I      | 5               | 0                                | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     |
| TRI8              | TR-I      | 5               | 0                                | 1100     | 1100     | 1100     | 1100     | 1100     | 1100     |
| TRI9              | TR-I      | 3               | 15                               | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     |
| TRI10             | TR-I      | 4.62            | 15                               | 600      | 700      | 800      | 900      | 1000     | 1100     |
| TRI11             | TR-I      | 3.53            | 15                               | 700      | 800      | 900      | 1000     | 1100     | 1200     |
| TRI12             | TR-I      | 3.16            | 15                               | 950      | 1000     | 1050     | 1100     | 1150     | 1200     |
| TRI13             | TR-I      | 5               | 50                               | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     |
| TRI14             | TR-I      | 3.53            | 50                               | 950      | 1000     | 1050     | 1100     | 1150     | 1200     |
| TRI15             | TR-I      | 5               | 100                              | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     |
| TRI16             | TR-I      | 3               | 100                              | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     |
| TRI17             | TR-I      | 5.45            | 100                              | 700      | 800      | 900      | 1000     | 1100     | 1200     |
| TRI18             | TR-I      | 3.16            | 100                              | 950      | 1000     | 1050     | 1100     | 1150     | 1200     |
| TRI19             | TR-I      | 4               | 200                              | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     |
| TRI20             | TR-I      | 15              | 0                                | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     |
| TRI21             | TR-I      | 30              | 0                                | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     | 1075     |

Πίνακας 6.13: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-F στην κάθετη ηλεκτρική κάμφο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$ kg/h | $Q_{air,in}$ L·min <sup>-1</sup> | $T_1$ °C | $T_2$ °C | $T_3$ °C | $T_4$ °C | $T_5$ °C | $T_6$ °C |
|-------------------|-----------|-----------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TRF1              | TR-F      | 4.29            | 100                              | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     |
| TRF2              | TR-F      | 4.62            | 100                              | 700      | 800      | 900      | 1000     | 1100     | 1200     |
| TRF3              | TR-F      | 4               | 100                              | 950      | 950      | 950      | 950      | 950      | 950      |

Πίνακας 6.14: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-M στην κάθετη ηλεκτρική κάμφο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$ kg/h | $Q_{air,in}$ L·min <sup>-1</sup> | $T_1$ °C | $T_2$ °C | $T_3$ °C | $T_4$ °C | $T_5$ °C | $T_6$ °C |
|-------------------|-----------|-----------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TRM1              | TR-M      | 2.73            | 0                                | 950      | 1000     | 1050     | 1100     | 1150     | 1200     |
| TRM2              | TR-M      | 3               | 100                              | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     | 1150     |
| TRM3              | TR-M      | 3.75            | 100                              | 700      | 800      | 900      | 1000     | 1100     | 1200     |
| TRM4              | TR-M      | 4.29            | 100                              | 950      | 1000     | 1050     | 1100     | 1150     | 1200     |

Πίνακας 6.15: Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων διόγκωσης πρώτης ύλης TR-C στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο

| Κωδικός δείγματος | Πρώτη ύλη | $Q_{perl}$<br>kg/h | $Q_{air,in}$<br>L·min <sup>-1</sup> | $T_1$<br>°C | $T_2$<br>°C | $T_3$<br>°C | $T_4$<br>°C | $T_5$<br>°C | $T_6$<br>°C |
|-------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| TRC1              | TR-C      | 2.61               | 100                                 | 1150        | 1150        | 1150        | 1150        | 1150        | 1150        |
| TRC2              | TR-C      | 3.7                | 100                                 | 700         | 800         | 900         | 1000        | 1100        | 1200        |
| TRC3              | TR-C      | 3.33               | 100                                 | 950         | 1000        | 1050        | 1100        | 1150        | 1200        |

Η αξιολόγηση των διογκωμένων προϊόντων έγινε με τη σύγκριση των ιδιοτήτων τους με αντίστοιχα δείγματα συμβατικά διογκωμένου περλίτη (δείγματα που διογκώθηκαν σε συμβατική έμφλογη κάμινο), αντίστοιχης φαινόμενης πυκνότητας. Για το σκοπό αυτό, δείγματα από τις ίδιες ακριβώς πρώτες ύλες (ίδιος τύπος περλίτη και κοκκομετρία δείγματος) διογκώθηκαν σε αντίστοιχη φαινόμενη πυκνότητα σε συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης πιλοτικής κλίμακας στα εργαστήρια της εταιρίας S&B Industrial Minerals S.A. στην Αθήνα.

Με τον τρόπο αυτό απομονώνονται τα τρία βασικά χαρακτηριστικά του περλίτη (προέλευση και κοκκομετρία πρώτης ύλης, φαινόμενη πυκνότητα διογκωμένου περλίτη) που επιδρούν σημαντικά στις υπόλοιπες ιδιότητες του διογκωμένου προϊόντος, όπως θα φανεί στη συνέχεια, και γίνεται τελικά δυνατή η σύγκριση των δειγμάτων που παρήχθησαν στις δύο διαφορετικές καμίνους διόγκωσης και η αξιολόγηση της νέας μεθόδου.

### 6.2.2. Μέθοδοι χαρακτηρισμού διογκωμένων δειγμάτων

Ο χαρακτηρισμός των διογκωμένων δειγμάτων πραγματοποιείται με τη μέτρηση μιας σειράς ιδιοτήτων, είτε με την εφαρμογή προτύπων κατά ASTM μεθόδων, είτε όπου δεν υπάρχουν πρότυπες μέθοδοι, με μεθόδους που αναπτύχθηκαν από την S&B Industrial Minerals S. A. ή το Ινστιτούτο Περλίτη.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες που μετρήθηκαν για το χαρακτηρισμό των διογκωμένων δειγμάτων και η φυσική έννοια τους. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν την καταλληλότητα του υλικού για πλήθος εφαρμογών. Οι μέθοδοι μέτρησης των ιδιοτήτων αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα II.

**Φαινόμενη πυκνότητα** (*Loose Bulk Density, LBD*): μετράται η πυκνότητα του διογκωμένου περλίτη σε μορφή χύδην με χρήση ογκομετρικού κυλίνδρου. Η μάζα του δείγματος διαιρείται με τον όγκο που καταλαμβάνει το στερεό υλικό, οι ανοιχτοί και κλειστοί πόροι του αλλά και ο ενδιάμεσος χώρος μεταξύ των τεμαχιδίων. Η μέθοδος μέτρησης της φαινόμενης πυκνότητας του διογκωμένου περλίτη είναι όμοια με αυτή που εφαρμόστηκε για τη μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας των πρώτων υλών (Κεφ. 6.1.2).

**Υδρο- και έλαιο- απορροφητικότητα** (Water Absorption, Oil Absorption, WA, OA): μετράται η ικανότητα απορρόφησης και συγκράτησης νερού και ελαίου από τα διογκωμένα δείγματα. Έχει μεγάλη σημασία στα μέγεθος, όταν ο διογκωμένος περλίτης χρησιμοποιείται ως πληρωτικό μέσο (filler) αφού καθορίζει την ποσότητα ρευστού που απορροφά ο περλίτης όταν χρησιμοποιείται σε μείγματα. Έμμεσα, η μέτρηση τους προσφέρει στοιχεία σχετικά με τη μορφολογία των κόκκων, αφού επηρεάζεται από την ειδική του επιφάνεια και το ποσοστό ανοιχτών πόρων.

**Αντοχή σε συμπίεση** (Compression Strength, CS): σχετίζεται με τη μηχανική αντοχή των δειγμάτων σε θλίψη και προσδιορίζεται μέσω της μέτρησης της τάσης που απαιτείται ώστε να συμπιεστεί ο όγκος του δείγματος κατά 3 cm. Έχει μεγάλη σημασία όταν ο περλίτης χρησιμοποιείται στην παραγωγή μορφοποιημένων προϊόντων ή στην παραγωγή ελαφροβαρούς σκυροδέματος, σοβάδων και μονωτικών προϊόντων για εφαρμογή στον κατασκευαστικό τομέα, όπου η μηχανική αντοχή των υλικών είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες.

**Βαθμός διογκωσιμότητας** (Sinks-Shattered-Floaters, SSF) : η μέθοδος σκοπεύει στον ποσοστιαίο κατά όγκο προσδιορισμό των επιμέρους διογκωμένων, αδιόγκωτων και ημι-διογκωμένων και κατακερματισμών (σκασμένων) κλασμάτων που συνθέτουν το προϊόν της διόγκωσης. Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδιότητα των διογκωμένων κόκκων να επιπλέουν έναντι των υπολοίπων που αιωρούνται (κατακερματισμένοι και ημιδιογκωμένοι) ή βυθίζονται (αδιόγκωτοι). Επιπλέον, μέσω διαχωρισμού των επιπλεόντων τεμαχιδίων από τα αιωρούμενα και τα καταβυθιζόμενα, προσδιορίστηκε και η κατά βάρος περιεκτικότητα του διογκωμένου περλίτη σε επαρκώς διογκωμένους κόκκους. Η μέθοδος προσφέρει πληροφορίες σχετικές με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου διόγκωσης που εφαρμόζεται και της ποιότητας του διογκωμένου υλικού.

**Απώλεια πύρωσης** (Loss On Ignition, LOI): μετράται η απώλεια βάρους του διογκωμένου περλίτη με την παραμονή του στους 1050°C για μία ώρα. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η ποσότητα του νερού που παρέμεινε στον περλίτη μετά τη διόγκωση του και η ποσότητα που απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας του. Η μέθοδος μέτρησης της απώλειας πύρωσης του διογκωμένου περλίτη συμπίπτει με την μέθοδο που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της απώλειας πύρωσης στην πρώτη ύλη (Παράγραφος 6.1.2).

**Κοκκομετρική κατανομή** (Particle Size Distribution, PSD): μετράται η κοκκομετρική κατανομή του διογκωμένου δείγματος με χρήση κοσκίνων ή με περιθλασιμετρία ακτίνων Laser ή με συνδυασμό των δύο. Προσφέρει πληροφορίες σχετικά με το βαθμό διόγκωσης των κόκκων.

**Πραγματική πυκνότητα** (Skeletal Density, SD): η μέτρηση της πραγματοποιείται σε στερεοοπκνόμετρο ηλίου. Αποτελεί τον λόγο της μάζας του δείγματος προς τον όγκο που

καταλαμβάνει το στερεό και οι κλειστοί πόροι του. Προσφέρει στοιχεία σχετικά με την ύπαρξη ανοιχτού ή κλειστού πορώδους στην επιφάνεια του διογκωμένου δείγματος.

**Μορφολογική εξέταση** (Scanning Electronic Microscope, SEM): τα προϊόντα της διόγκωσης παρατηρούνται με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και βάσει των αντίστοιχων εικόνων, εξετάζεται η μορφολογία των διογκωμένων τεμαχιδίων, με έμφαση στο σχήμα και τη δομή τους, αλλά και η ύπαρξη ανοιχτών πόρων στην εξωτερική τους επιφάνεια.

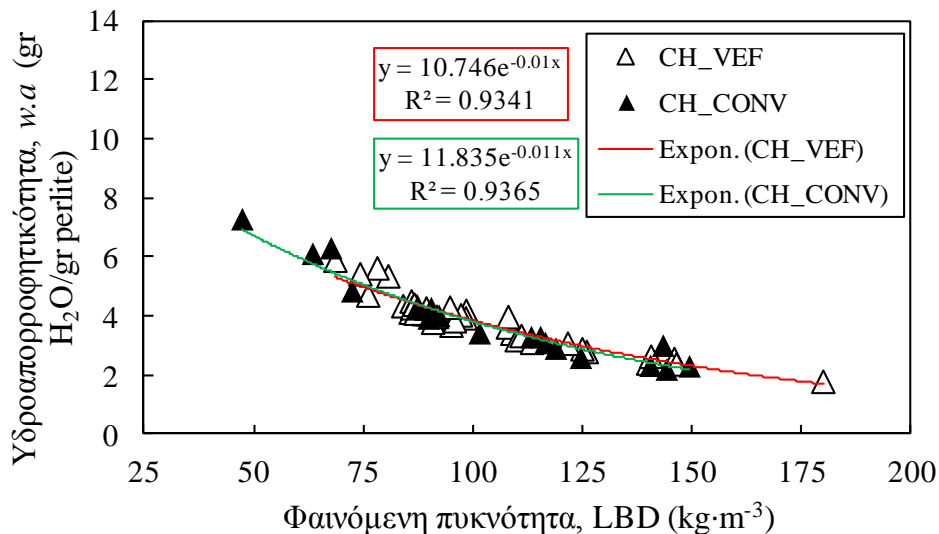
### 6.3. Διογκωμένα δείγματα περλίτη Τσιγκράδου

Ακολουθεί παρουσίαση των ιδιοτήτων των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία των διαφόρων δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου στην νέα κάμινο διόγκωσης και γίνεται σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα υλικά.

#### 6.3.1. Βασικές ιδιότητες

##### Υδρο και έλαιο- απορροφητικότητα

Στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται η μεταβολή της υδρο-απορροφητικότητας των δειγμάτων που διογκώθηκαν με τις δύο μεθόδους διόγκωσης σε σχέση με τη φαινόμενη πυκνότητα.

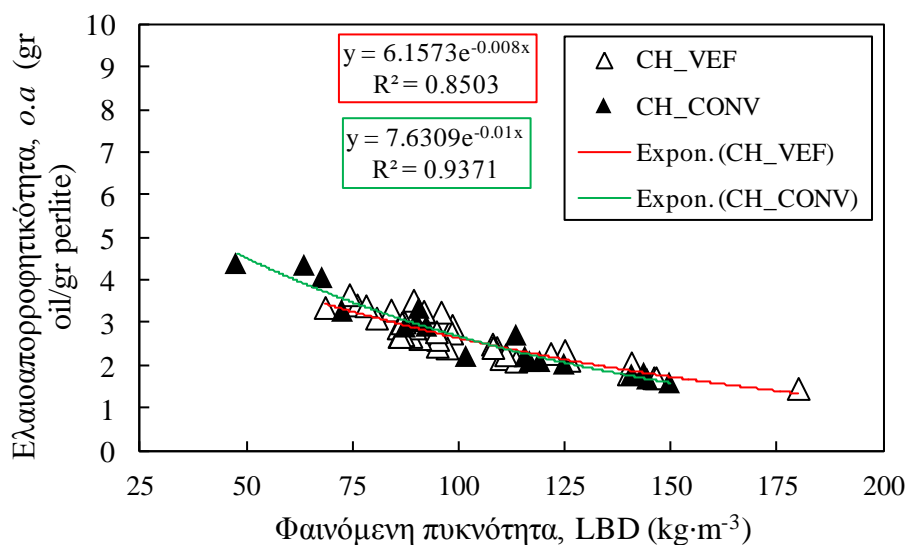


Σχήμα 6.25. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε νερό συναρτίζεται της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα Τσιγκράδου που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

Η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων συνδέεται με την υδρο-απορροφητική τους ικανότητα με μία σχέση εκθετικού τύπου. Η υδρο-απορροφητικότητα των διογκωμένων δειγμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη της φαινόμενης πυκνότητας τους. Η τάση αυτή παρατηρείται ανεξάρτητα της μεθόδου διόγκωσης που εφαρμόστηκε. Η υδρο-απορροφητικότητα όλων των δειγμάτων

κυμάνθηκε μεταξύ 2-7.5 gr. νερού ανά gr. περλίτη. Η ελάχιστη τιμή παρατηρείται σε δείγμα με αρκετά υψηλή φαινόμενη πυκνότητα ( $LBD = 180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $w.a. = 1.8 \text{ gr H}_2\text{O/ gr perl}$ ). Το πλέον ελαφροβαρές διογκωμένο δείγμα με φαινόμενη πυκνότητα  $47.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  παρουσιάζει τη μέγιστη υδροαπορροφητικότητα με τιμή μέτρησης  $7.27 \text{ gr. H}_2\text{O/ gr. perl}$ .

Στο σχήμα 6.26 παρουσιάζεται η επίδραση της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων στην έλαιο-απορροφητικότητα τους. Όπως και στην περίπτωση της ύδρο-απορροφητικότητας, η έλαιο-απορροφητικότητα μειώνεται όσο αυξάνει η φαινόμενη πυκνότητα.



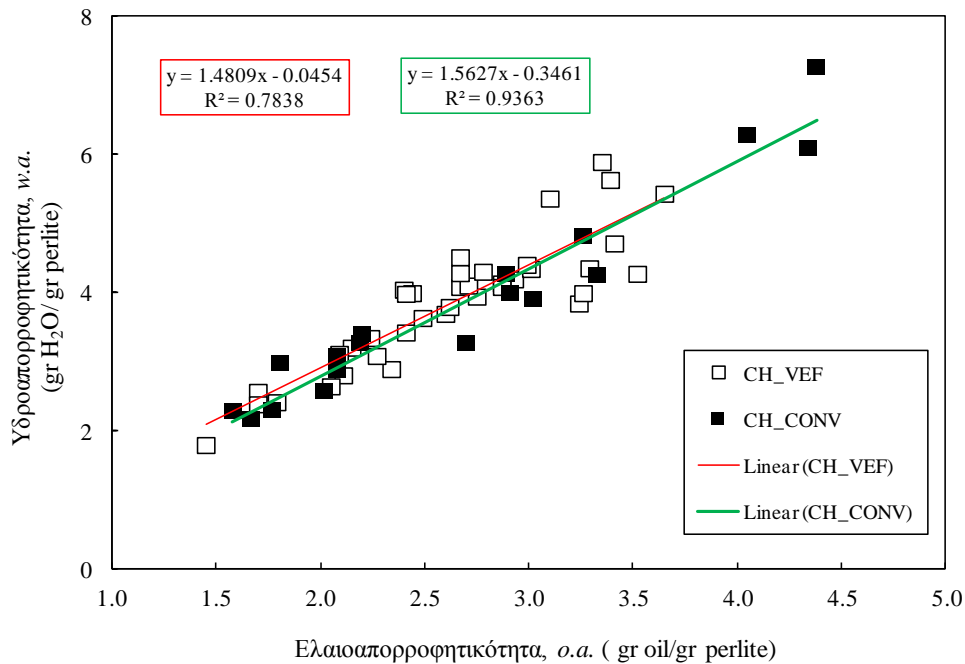
Σχήμα 6.26. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε έλαιο συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα Τσιγκράδου που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

Την ελάχιστη έλαιο-απορροφητικότητα παρουσιάζει το δείγμα με φαινόμενη πυκνότητα  $180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $1.45 \text{ gr}$  ελαίου ανά  $\text{gr}$  περλίτη). Τη μέγιστη έλαιο-απορροφητικότητα που μετρήθηκε ίση με  $4.38$  γραμμάρια ελαίου ανα γραμμάριο περλίτη παρουσιάζει το δείγμα με φαινόμενη πυκνότητα  $47.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Όμοια με το προηγούμενο διάγραμμα (υδρο-απορροφητικότητα) ο συσχετισμός των δύο ιδιοτήτων περιγράφεται ικανοποιητικά ( $R^2 > 0.85$ ) από μία εκθετική συνάρτηση που παρουσιάζεται στο σχήμα. Γίνεται σαφές ότι ανεξάρτητα από τη μέθοδο διόγκωσης που εφαρμόζεται η απορροφητική ικανότητα των δειγμάτων διογκωμένου περλίτη σε νερό και έλαιο συσχετίζεται με την φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων με μία σχέση της παρακάτω μορφής:

$$\text{απορροφητικότητα} \left[ \frac{\text{gr.liq}}{\text{gr.perl}} \right] = a \cdot e^{-b \cdot LBD} \quad (6.1)$$

Η μείωση της φαινόμενης πυκνότητάς των διογκωμένων δειγμάτων προκαλεί αύξηση της ειδικής τους επιφάνειας (Specific Surface Area, SSA,  $\text{m}^2/\text{g}$ ) με αποτέλεσμα η απορροφητική ικανότητα των δειγμάτων να αυξάνει.

Στο σχήμα 6.27 παρουσιάζεται ο συσχετισμός της ύδρο- και έλαιο-απορροφητικότητας των διογκωμένων δειγμάτων TR.



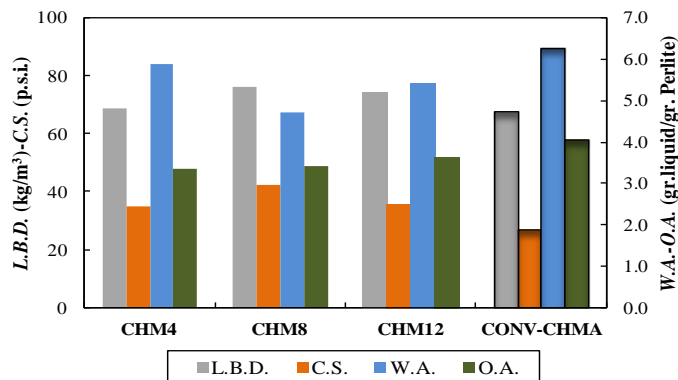
Σχήμα 6.27. Συσχετισμός απορροφητικής ικανότητας σε νερό και έλαιο των περλιτών του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF).

Όπως φαίνεται, υπάρχει σαφής γραμμική συσχέτιση της απορροφητικής ικανότητας των διογκωμένων περλιτών στα δύο ρευστά. Όλα τα δείγματα απορροφούν περισσότερη ποσότητα νερού σε σύγκριση με έλαιο. Το παραπάνω ισχύει ακόμα και στον αδιόγκωτο περλίτη. Η απορροφητική ικανότητα αδιόγκωτου περλίτη σε νερό είναι 0.4 gr.H<sub>2</sub>O / gr.perl. ενώ σε έλαιο 0.3 gr.oil/gr.perl.

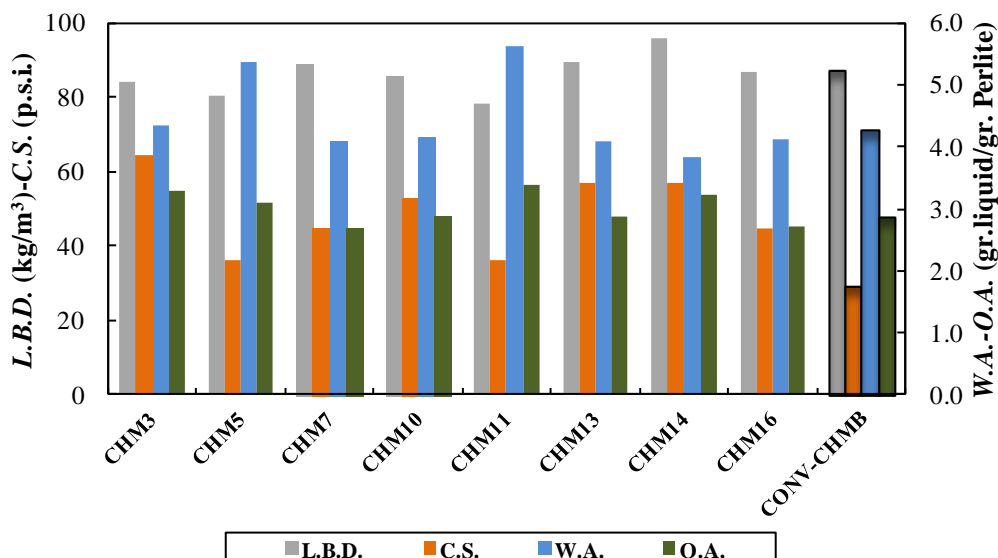
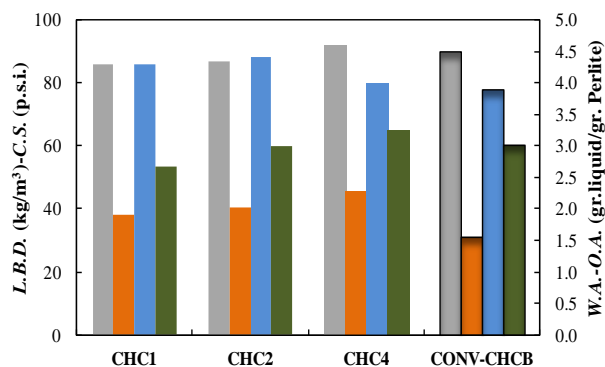
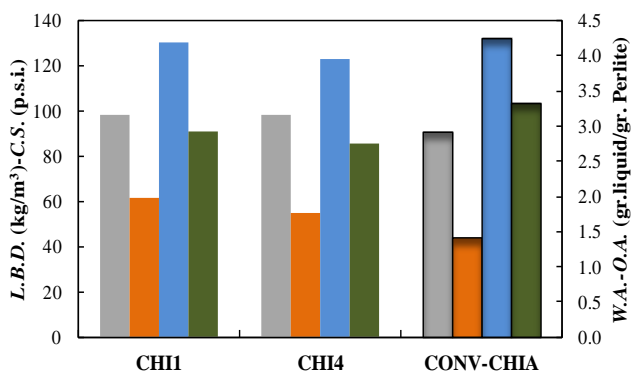
Σκοπεύοντας στην διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρίας κατανομής στις ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών, και της εξαγωγή ουσιαστικών συμπεράσματα (λόγω του μεγάλου αριθμού των πειραμάτων διόγκωσης) αποφασίστηκε η κατηγοριοποίηση των διογκωμένων προϊόντων σε 4 κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της φαινόμενης πυκνότητας τους: α) LBD =50-75 kg·m<sup>-3</sup>, β) LBD =75-100 kg·m<sup>-3</sup>, γ) LBD =100-120 kg·m<sup>-3</sup>, δ) LBD =120-150 kg·m<sup>-3</sup>. Επιπλέον, σε κάθε γκρούπ, τα προϊόντα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης συγκρίνονται με ένα δείγμα που διογκώθηκε στη συμβατική κάμινο και του οποίου η φαινόμενη πυκνότητα είναι στο εύρος που ορίζει το συγκεκριμένο γκρούπ δειγμάτων. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό είναι για να γίνει δυνατή η σύγκριση των ιδιοτήτων των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από διόγκωση με τις δύο μεθόδους που εξετάζονται (κάθετη ηλεκτρική και έμφλογη συμβατική κάμινος).

Στην συνέχεια ακολουθούν ραβδογράμματα που περιέχουν τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας, ύδρο- και έλαιο- απορροφητικότητας αλλά και αντοχής σε συμπίεση των δειγμάτων. Ο σχολιασμός της αντοχής των δειγμάτων σε συμπίεση θα ακολουθήσει στη συνέχεια.

**LBD 50-75 kg·m<sup>-3</sup>.**

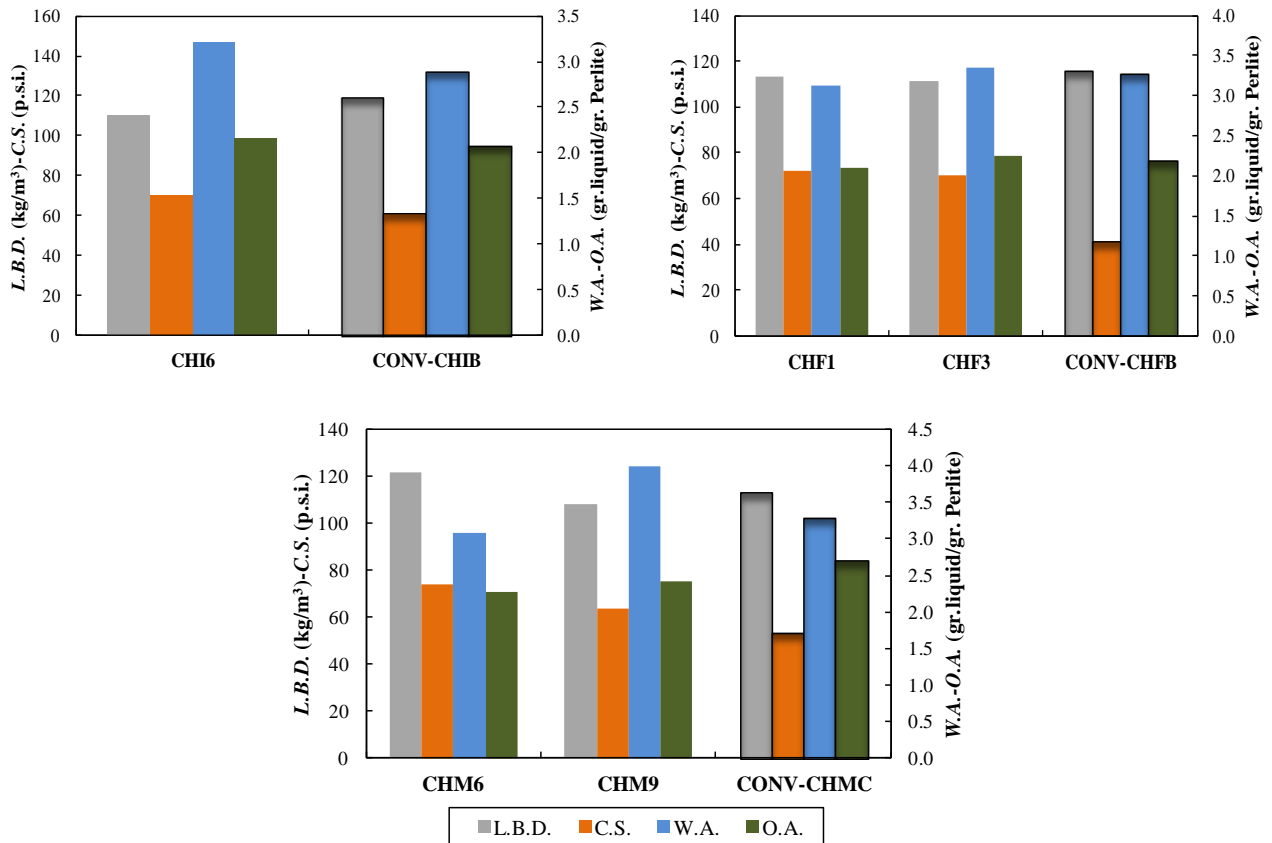


**LBD 75-100 kg·m<sup>-3</sup>.**

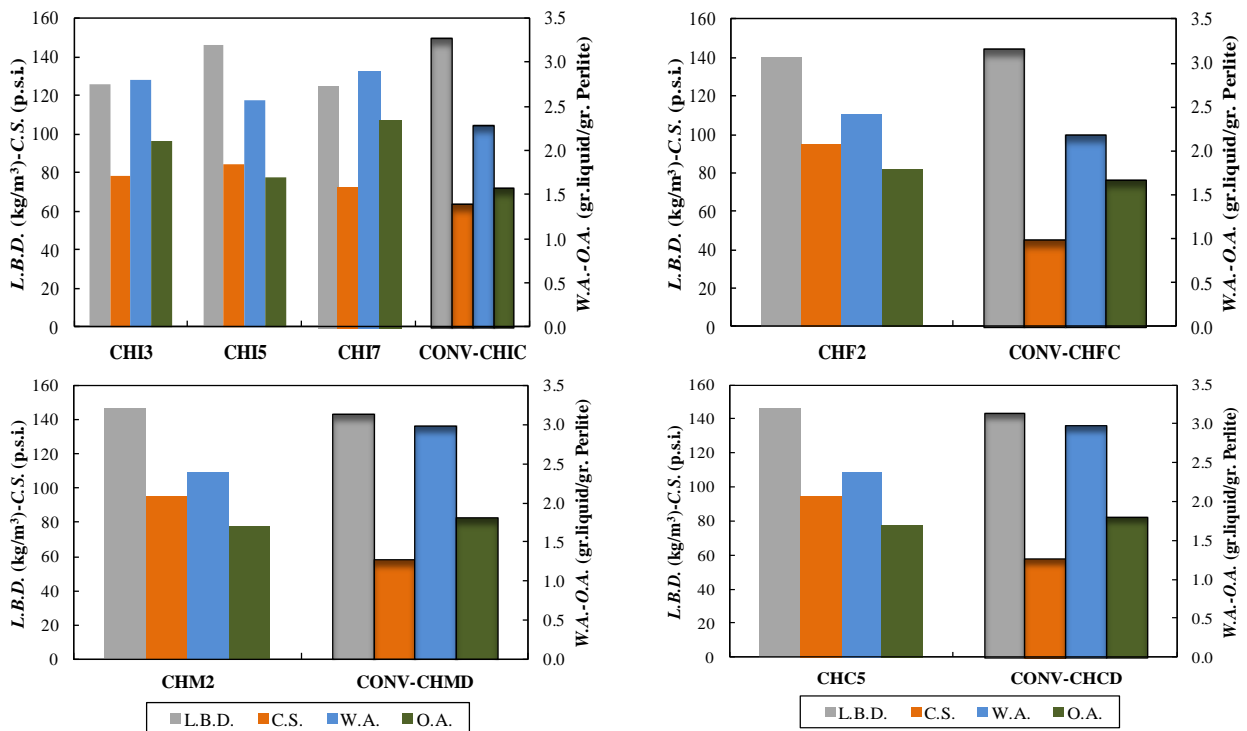




**LBD 100-120 kg·m<sup>-3</sup>**



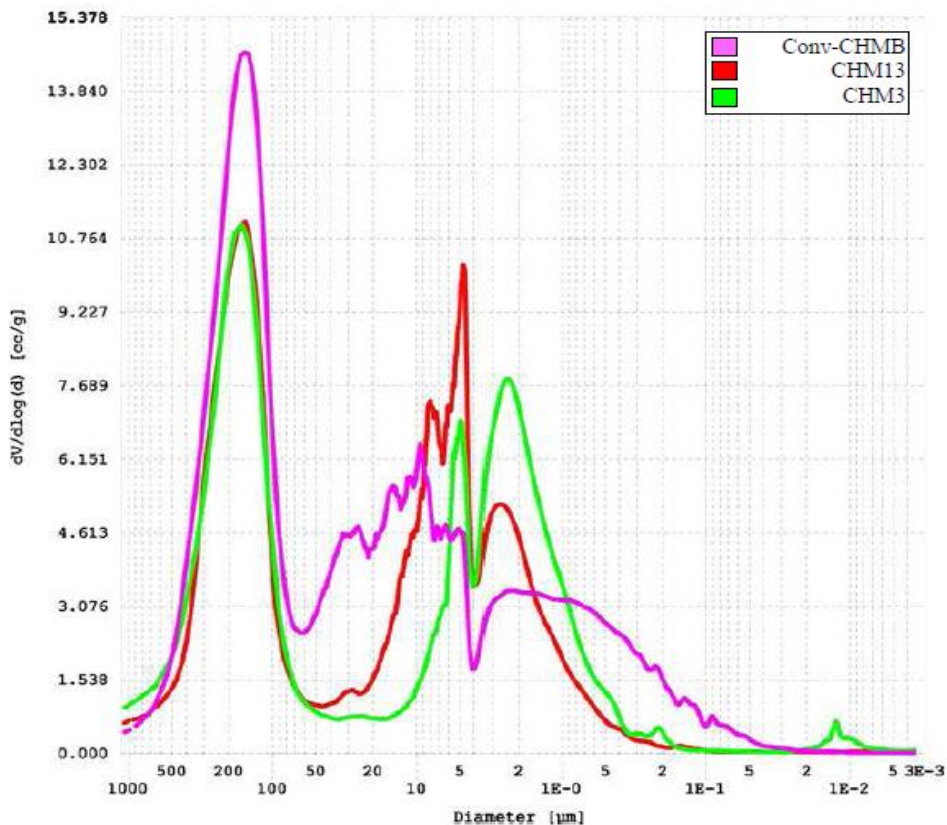
**LBD 120-150 kg·m<sup>-3</sup>**



Σχήμα 6.28. Φαινόμενη πυκνότητα, υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα και αντοχή σε συμπίεση των διογκωμένων δειγμάτων CH που διογκώθηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την έμφλογη συμβατική.

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων της τροφοδοσίας, η υδρο και έλαιο-απορροφητικότητα των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης παρουσιάζεται βελτιωμένη έως και 20% σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν συμβατικά. Όσον αφορά στην υδρο-απορροφητικότητα, η μέγιστη βελτίωση παρουσιάζεται σε δείγμα υψηλής φαινόμενης πυκνότητας ( $LBD = 146.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) όπου η τιμή της μειώνεται κατά 20% όταν το δείγμα προκείται από επεξεργασία στην νέα κάμινο. Στο ίδιο δείγμα, η βελτίωση της έλαιο-απορροφητικότητας είναι 6%. Σχετικά με την έλαιο-απορροφητικότητα των δειγμάτων, η μέγιστη βελτίωση προσεγγίζει το 17% και παρατηρείται σε δείγμα φαινόμενης πυκνότητας  $68.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Βάσει των διαπιστώσεων αυτών, συμπεραίνεται ότι το νερό απορροφάται ευκολότερα από τον περλίτη όταν αυτός χαρακτηρίζεται από χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα σε σύγκριση με το έλαιο. Το γεγονός αυτό πληροφορεί σχετικά με διαφορές στο μέγεθος πόρων που παρουσιάζουν τα δείγματα ανάλογα με την μέθοδο διόγκωσης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τους.

Σκοπένοντας στην εκτενέστερη διερεύνηση της κατανομής των πόρων στους διογκωμένους περλίτες, σε επελεγμένα διογκωμένα δείγματα μετρήθηκε το πορώδες και η κατανομή μεγέθους των πόρων με την μέθοδο Ποροσιμετρίας Υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry). Στο Σχήμα 6.29 παρατίθεται το διάγραμμα συσχετισμού του όγκου των πόρων με την διάμετρο τους. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε 3 δείγματα, δύο εκ των οποίων διογκώθηκε στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και ένα στη συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης. Η φαινόμενη πυκνότητα των τριών αυτών δειγμάτων είναι μεταξύ  $85\text{-}90 \text{ kg}/\text{m}^3$  και για την παραγωγή του χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη το δείγμα CHM.



Σχήμα 6.29. Η κατανομή μεγέθους των πόρων τριών διογκωμένων δειγμάτων όπως μετρήθηκε με Ποροσιμετρία Υδραργύρου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.29 το συμβατικά διογκωμένο δείγμα παρουσιάζει αυξημένο αριθμό πόρων διαμέτρου 10-300  $\mu\text{m}$ . Τα δείγματα που κατεργάστηκαν στη κάθετη ηλεκτρική κάμινο φαίνεται να έχουν περισσότερους πόρους με διάμετρο μικρότερη των 10  $\mu\text{m}$ , ενώ περιορίζεται ο αριθμός των πόρων με διάμετρο μεταξύ 10-100  $\mu\text{m}$ .

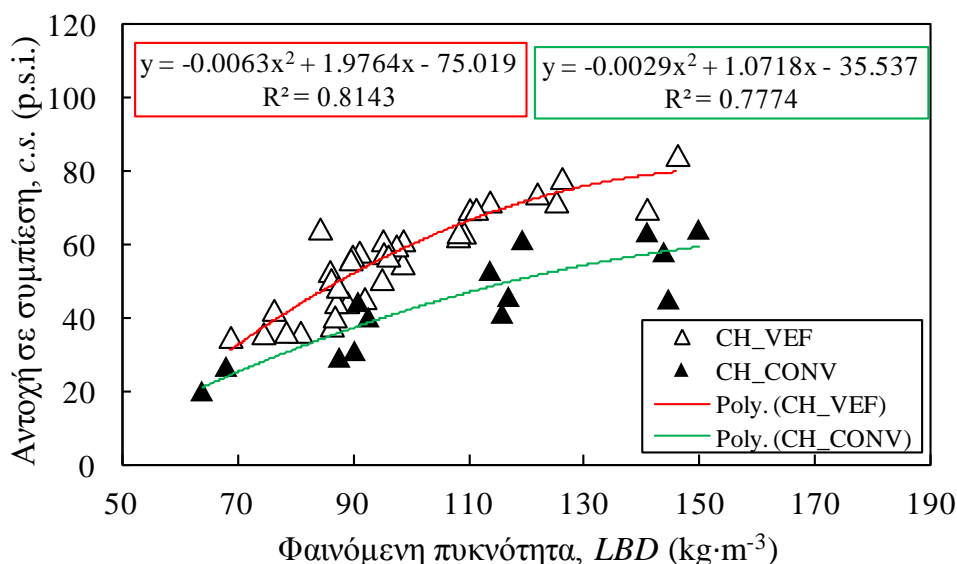
Στον πίνακα 6.16 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο συνολικός όγκος των πόρων και η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων. Η ειδική επιφάνεια δεν παρουσιάζει κάποια συσχέτιση με την μέθοδο διόγκωσης που ακολουθήθηκε. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει με το συνολικό μέγεθος των πόρων των δειγμάτων που παρουσιάζεται αυξημένο στην περίπτωση που το δείγμα κατεργάστηκε με την συμβατική μέθοδο κατά 34-39%, περίπου.

Πίνακας 6.16. Αποτελέσματα μετρήσεων Ποροσιμετρίας Υδραργύρου για δείγμα συμβατικά διογκωμένου περλίτη (Conv-CHMB) και για δυο δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

| Κωδικός δείγματος | Συνολικός όγκος πόρων<br>( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) | Εμβαδόν επιφανείας<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) |
|-------------------|--|--|
| Conv-CHMB         | 17.2611  | 47.7269  |
| CHM13             | 12.8573  | 24.6086  |
| CHM3              | 12.4043  | 67.4445  |

Αντοχή σε συμπίεση

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.30 παρουσιάζεται ο συσχετισμός της αντοχής σε συμπίεση των δειγμάτων TR με την φαινόμενη πυκνότητά τους. Η αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση εξαρτάται από τη φαινόμενη πυκνότητα τους ενώ η τάση συσχέτισης των δύο ιδιοτήτων περιγράφεται από μια πολυωνυμική συνάρτηση του τύπου  $c.s. = a \cdot (LBD)^2 + b \cdot (LBD) - c$ , η οποία όμως χαρακτηρίζεται από αυξημένη διασπορά και χαμηλό σχετικά συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και για τις δύο μεθόδους διόγκωσης που εφαρμόστηκαν. Η αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση αυξάνει όσο η φαινόμενη πυκνότητα τους αυξάνει ανεξάρτητα της μεθόδου διόγκωσης που ακολουθείται. Βασική εύρημα όμως αποτελεί το γεγονός ότι η αντοχή σε συμπίεση των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην νέα ηλεκτρική κάμινο παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένη σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.



Σχήμα 6.30. Συσχετισμός αντοχής σε συμπίεση και φαινόμενης πυκνότητας περλιτών του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF).

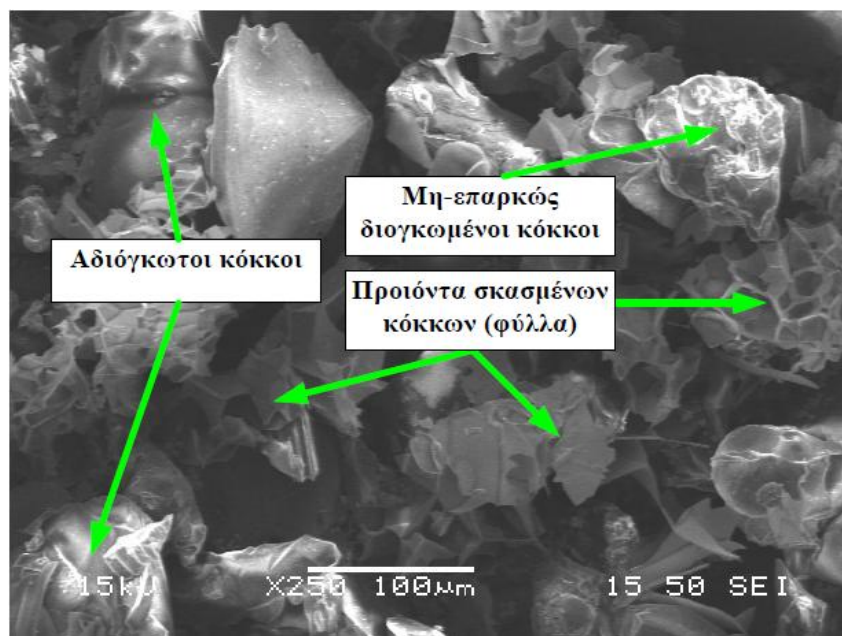
Στα ραβδογράμματα του σχήματος 6.28 παρουσιάστηκε η τιμή της αντοχής σε συμπίεση των περλιτών CH που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την συμβατική έμφλογη κάμινο διόγκωσης. Φάνηκε καθαρά ότι, η αντοχή σε συμπίεση των περλιτών που διογκώθηκαν με τη νέα μέθοδο είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα: η αντοχή σε συμπίεση των προϊόντων της ηλεκτρικής καμίνου είναι βελτιωμένη σε ποσοστό μεταξύ 68%-146%, σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Το βέλτιστο συνδυασμός χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας και υψηλής αντοχής σε συμπίεση, επιτυγχάνεται στο κλάσμα μέσης κοκκομετρίας, CHM, όπου η πλειονότητα των προϊόντων έχει φαινόμενη πυκνότητα μεταξύ  $75-100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ενώ η αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση βελτιώνεται μέχρι και 120 %. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι, η βελτίωση στην αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση είναι

μικρότερη στις περιπτώσεις που η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι το ευρύ αρχικό δείγμα (CHI). Στις περιπτώσεις αυτές η βελτίωση της ιδιότητας είναι μεταξύ 12-38 %.

### 6.3.2. Διογκωμένα- σκασμένα/θρυμματισμένα- αδιόγκωτα σωματίδια

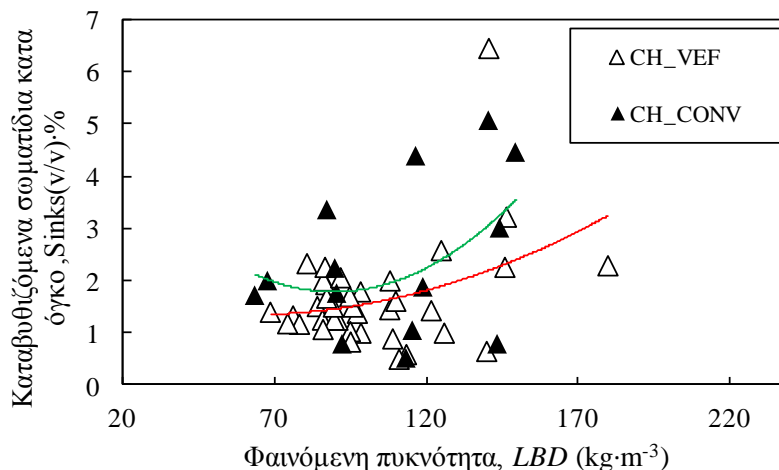
Το ποσοστό του προϊόντος που είναι επαρκώς διογκωμένο, σε σχέση με τα σκασμένα/θρυμματισμένα και τα αδιόγκωτα τεμαχίδια αποτελεί το βασικό κριτήριο της αποτελεσματικότητας της διόγκωσης.

Τα επαρκώς διογκωμένα τεμαχίδια λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας επιπλέουν στο νερό και συνθέτουν το κλάσμα floaters. Τα καταβυθιζόμενα σωματίδια (sinks) αποτελούνται από κόκκους που δεν διογκώθηκαν καθόλου ή διογκώθηκαν ημιτελώς λόγω των ορυκτολογικών τους χαρακτηριστικών (υψηλό κρυσταλλικό φορτίο) ή λόγω της ανεπαρκούς θέρμανσης στην οποία υποβλήθηκαν. Η υπερθέρμανση ή ο παρατεταμένος χρόνος θέρμανσης των δειγμάτων μπορεί να οδηγήσει σε «σκάσιμο» της εξωτερικής του επιφάνειας και σε αποσύνθεση των κόκκων με παράλληλη παραγωγή λεπτών φύλλων. Στο Σχήμα 6.31 παρουσιάζεται εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο από το μείγμα του κλάσματος σκασμένων/θρυμματισμένων-αδιόγκωτων σωματιδίων του διογκωμένου δείγματος CHM6, όπου ξεχωρίζουν καθαρά οι αδιόγκωτοι και οι σκασμένοι/θρυμματισμένοι κόκκοι.



Σχήμα 6.31. Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI) αιωρούμενων (shattered) και καταβυθιζόμενων (sinks) σωματιδίων του δείγματος CHM6.

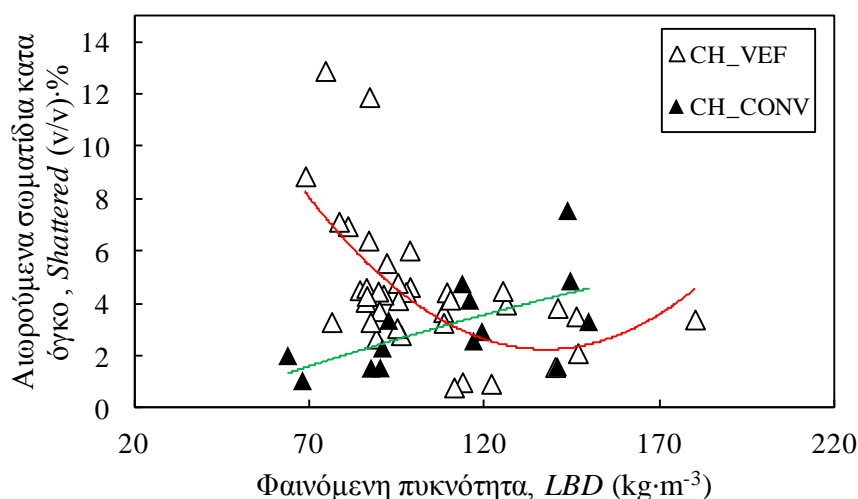
Στο σχήμα 6.32 παρουσιάζεται ο συσχετισμός της κατά όγκο περιεκτικότητας των διογκωμένων δειγμάτων CH σε αδιόγκωτους κόκκους.



Σχήμα 6.32. Κατά όγκο περιεκτικότητα των διογκωμένων προϊόντων CH σε μη-επαρκώς διογκωμένους κόκκους μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική (\_VEF) και στην έμφλογη συμβατική κάμινο διόγκωσης (\_CONV) συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας.

Διακρίνεται έντονη διασπορά των τιμών ανεξάρτητα από τη μέθοδο διόγκωσης που εφαρμόζεται. Παρόλα αυτά, σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η πλειονότητα των τιμών βρίσκονται κάτω του 4% με εξαίρεση κάποια πειράματα τα οποία διεξήχθησαν στη συμβατική έμφλογη κάμινο που τα προϊόντα περιέχουν μέχρι και 5% αδιόγκωτους κόκκους. Η περιεκτικότητα των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο σε αδιόγκωτους κόκκους δεν ξεπερνά το 3% στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ενώ δεν διαφαίνεται σαφής συσχετισμός μεταξύ της περιεκτικότητας των δειγμάτων στο κλάσμα αυτό και της φαινόμενης πυκνότητάς τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατά όγκο περιεκτικότητα των διογκωμένων δειγμάτων σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους.

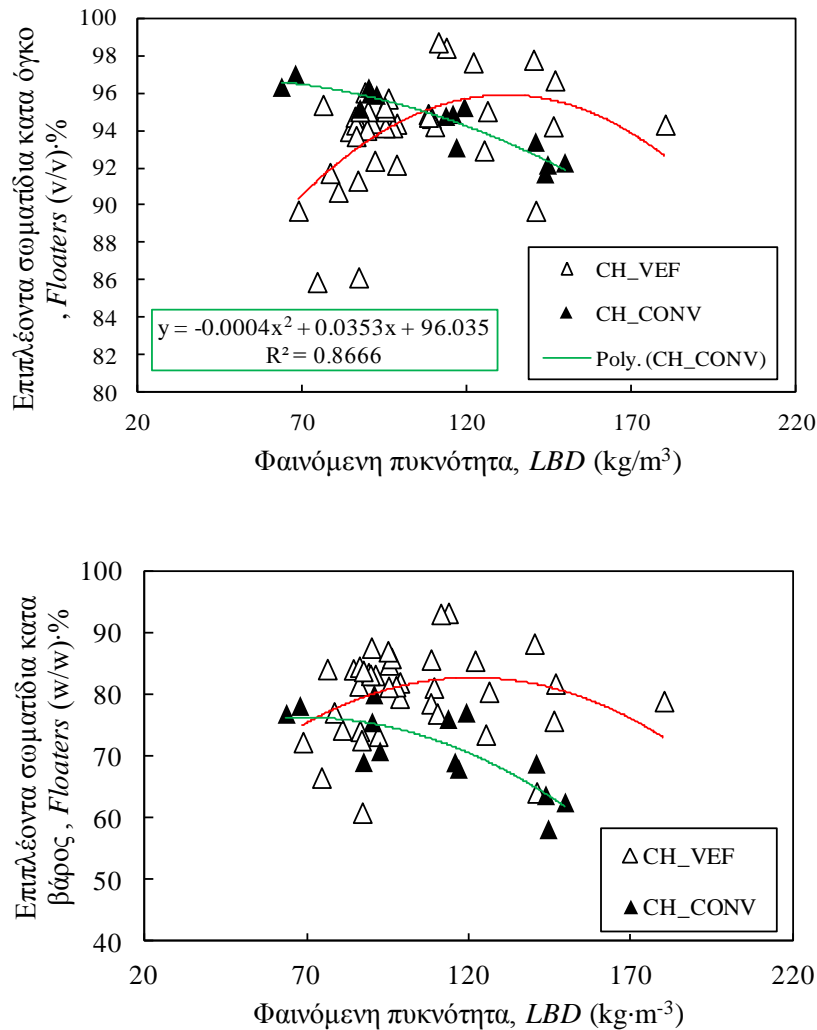


Σχήμα 6.33. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους.

Και σε αυτή την περίπτωση η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι μεγάλη αλλά φαίνεται ότι υπάρχει μια τάση αύξησης της κατά όγκο περιεκτικότητας των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων

σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους με αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος. Στην περίπτωση των διογκωμένων δειγμάτων στην ηλεκτρική κάμινο η τάση είναι ανάποδη: το ποσοστό των σκασμένων/θρυμματισμένων κόκκων αυξάνει όσο μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η μεταβολή της κατά βάρος και κατά όγκο περιεκτικότητας των δειγμάτων σε επαρκώς διογκωμένα τεμαχίδια συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας τους.



Σχήμα 6.34. Κατά βάρος (επάνω) και κατά όγκο (κάτω) περιεκτικότητα των δειγμάτων CH σε διογκωμένους κόκκους.

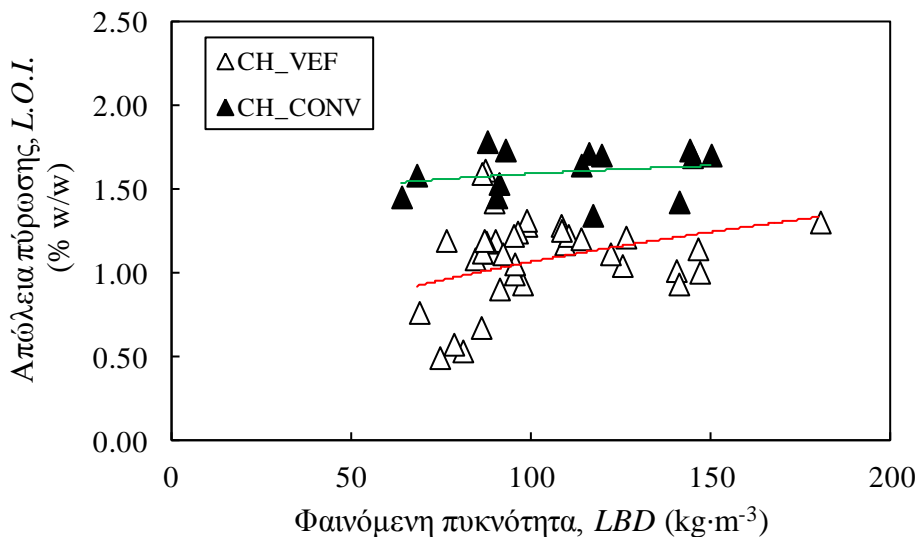
Από τα διαγράμματα του Σχήματος 6.34 φαίνεται ότι η κατά όγκο περιεκτικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι μεταξύ 90-98%. Παρόμοια κατά όγκο περιεκτικότητα σε διογκωμένους κόκκους έχουν και τα δείγματα που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο. Τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά όταν η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε διογκωμένους κόκκους εκφράζεται κατά βάρος. Πράγματι, τα δείγματα που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο περιέχουν διογκωμένους κόκκους σε κατά βάρος ποσοστό μεταξύ 70-95% στην πλειονότητα των

περιπτώσεων. Το αντίστοιχο ποσοστό των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 60-80%. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, τα δείγματα που διογκώνονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό διογκωμένων κόκκων σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.

### 6.3.3. Απώλεια λόγω πύρωσης (Loss On Ignition, L.O.I).

Όπως φάνηκε όμως στο Κεφάλαιο 3 κατά την θέρμανση του περλίτη η απελευθέρωση του νερού πραγματοποιείται σε σημαντικά μεγαλύτερο βαθμό επισκιάζοντας την απομάκρυνση άλλων πτητικών που σε κάθε περίπτωση είναι περιορισμένη και η επίδραση τους στην διόγκωση είναι ασήμαντη. Παρότι κατά την διάρκεια της κατεργασίας των κόκκων στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι δυνατόν η θερμοκρασία των κόκκων να προσεγγίσει ή ακόμα και να ξεπεράσει την θερμοκρασία στην οποία γίνεται η δοκιμή, μέρος του νερού τους δεν απομακρύνεται κατά την διόγκωση λόγω του μικρού χρόνου παραμονής των κόκκων εντός του θαλάμου θέρμανσης.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.35) τα προϊόντα διόγκωσης που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη CH περιέχουν σημαντική ποσότητα νερού το οποίο θεωρείται ως ισχυρά δεσμευμένο αφού η απομάκρυνσή του απαιτεί την παραμονή του περλίτη σε υψηλή θερμοκρασία για αρκετό χρόνο.



Σχήμα 6.35. Η απώλεια σε πύρωση δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου που διογκώθηκαν με την συμβατική μέθοδο και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

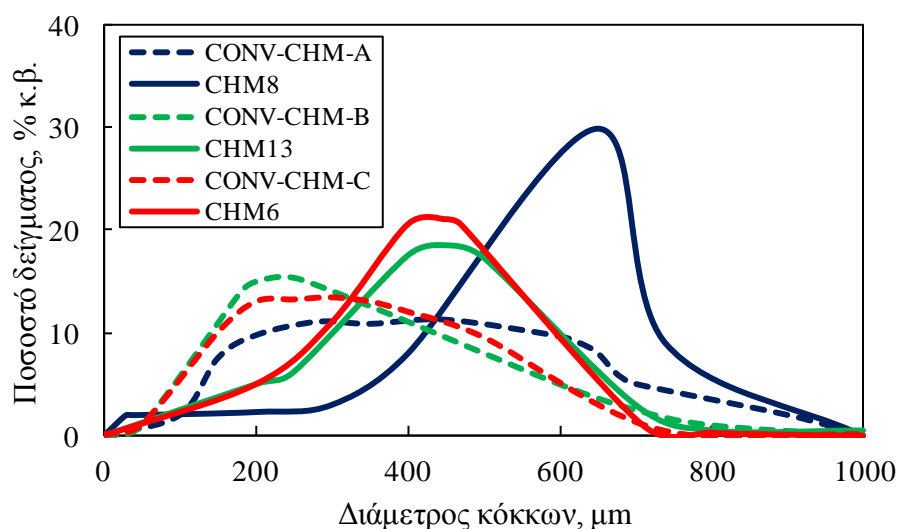
Γενικότερα, φαίνεται ότι η απώλεια πύρωσης των δειγμάτων που κατεργάστηκαν στη συμβατική κάμινο διόγκωσης λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με την περίπτωση που η διόγκωση πραγματοποιείται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Η ποσότητα του νερού που απομακρύνεται από τον κόκκο όταν αυτός διογκώνεται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι μεγαλύτερη, δεδομένο το οποίο πληροφορεί σχετικά με την πιο παρατεταμένη θέρμανση την οποία υφίσταται ο περλίτης



στην περίπτωση αυτή. Η μέση απώλεια πύρωσης των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος CH στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο ανέρχεται σε 1.1 % και αντιστοιχεί στο 37.7 % της περιεκτικότητας του δείγματος πριν υποστεί διόγκωση (L.O.I. = 2.92%).

#### 6.3.4. Κοκκομετρική κατανομή

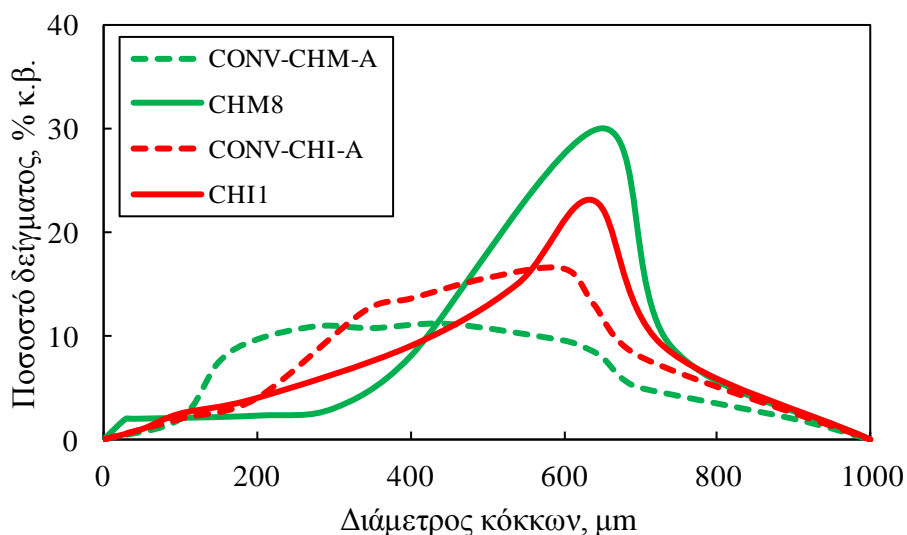
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των διογκωμένων προϊόντων αποτελεί η κοκκομετρική τους κατανομή. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή δειγμάτων περλίτη που διογκώθηκαν στη συμβατική κάμινο και την νέα ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.



Σχήμα 6.36. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή).

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.36 όλα τα δείγματα που κατεργάστηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης παρουσιάζουν ανεπτυγμένη κορυφή για μία διάμετρο κόκκου, χωρίς να σχηματίζεται το «πλατώ» που παρατηρείται στα συμβατικά διογκωμένα δείγματα και το οποίο επισημαίνει την ευρεία διασπορά της κοκκομετρίας τους. Επίσης, η μέση κοκκομετρία των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων παρουσιάζεται μειωμένη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο.

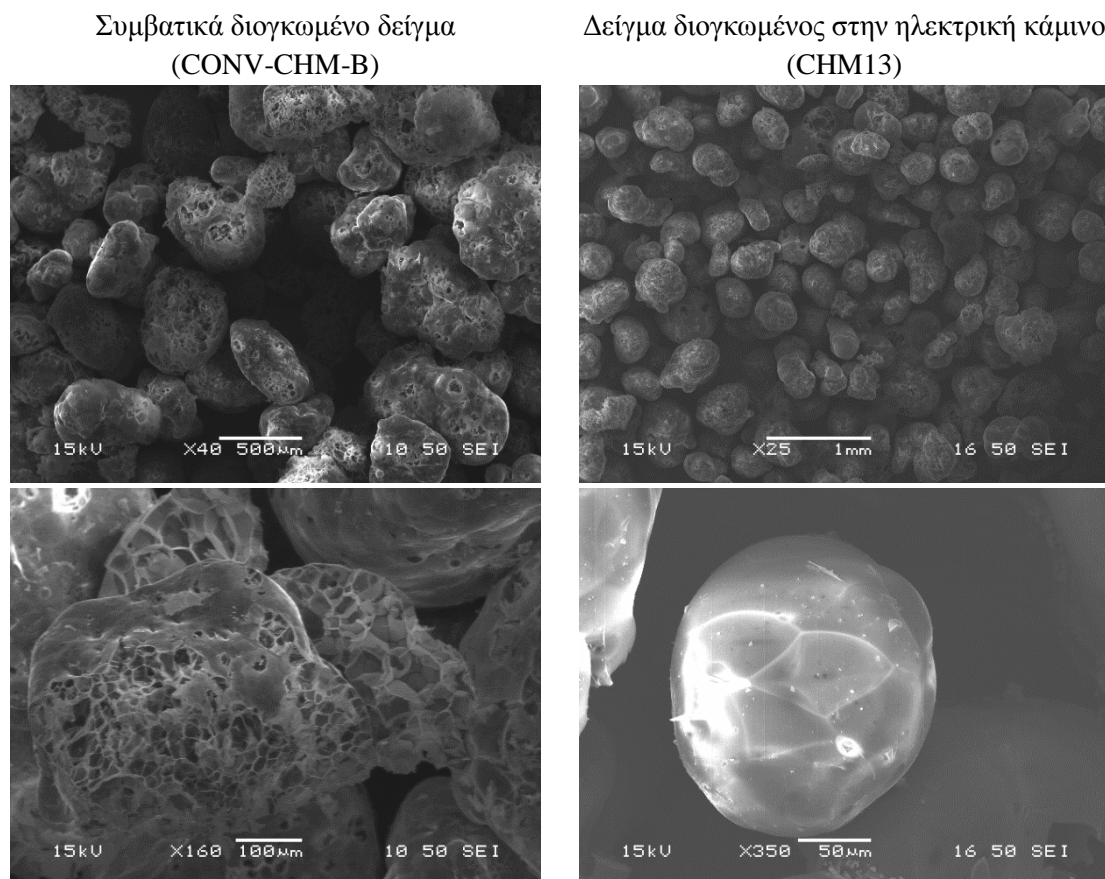
Στο Σχήμα 6.37 φαίνεται η κοκκομετρική κατανομή διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία με τις δύο μεθόδους διόγκωσης ενώ προέρχονται από διόγκωση του αρχικού ως έχει δείγματος (CHI) και του δείγματος στενής κοκκομετρίας CHM.



Σχήμα 6.37. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τσιγκράδου που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή). Με πράσινη γραμμή παρουσιάζονται τα δείγματα όπου η πρώτη ύλη ήταν το στενό κοκκομετρικό κλάσμα CHM και με κόκκινη το ως έχει αρχικό δείγμα CHI.

Και σε αυτή την περίπτωση, τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα παρουσιάζουν διευρυμένη κοκκομετρία σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο τα οποία έχουν ευδιάκριτη κορυφή. Η κορυφή που σχηματίζεται χαρακτηρίζει τόσο τα δείγματα που προέκυψαν με διόγκωση του στενού κοκκομετρικού κλάσματος CHM, όσο και τα δείγματα τα οποία προέρχονται από το αρχικό δείγμα CHI. Επιπλέον παρατηρείται και εδώ ότι η μέση κοκκομετρία των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι χαμηλότερη σε σχέση τα δείγματα που διογκώθηκαν με την νέα μέθοδο.

Από τις ενδείξεις των διαγραμμάτων κοκκομετρικής κατανομής που προηγήθηκαν, συμπεραίνεται ότι, οι περλίτες που κατεργάζονται στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης διογκώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, και αποκτούν πιο ομοιόμορφο σχήμα. Οι εικόνες του μικροσκοπίου που ακολουθούν επιβεβαιώνουν το παραπάνω συμπέρασμα.

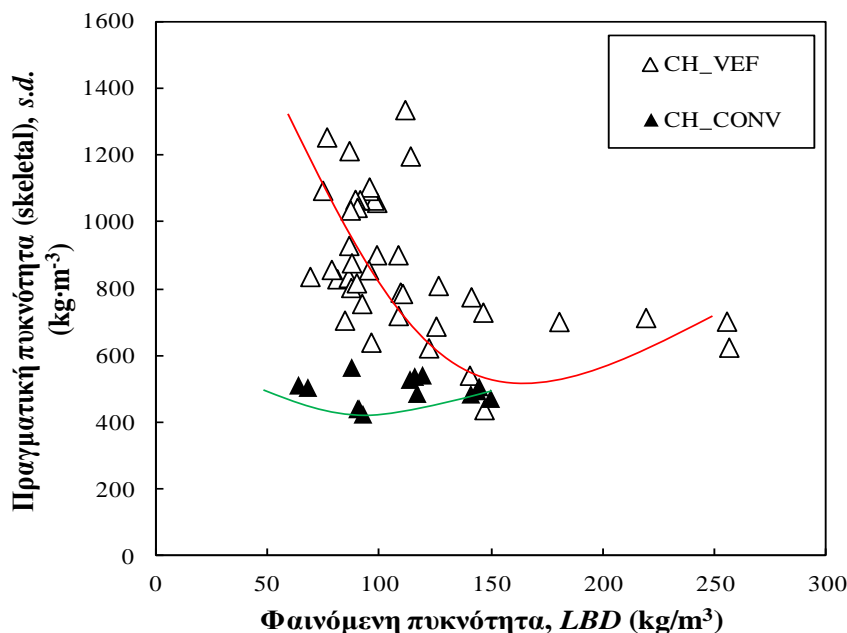


Σχήμα 6.38. Εικόνα μικροσκοπίου του συμβατικά διογκωμένου δείγματος (CONV-CHM-B) και του δείγματος που διογκώθηκε στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (CHM-13).

### 6.3.5. Πραγματική πυκνότητα (skeletal density)

Η πραγματική πυκνότητα (skeletal density) εκφράζει το πηλίκο της μάζας του δείγματος προς τον όγκο που αυτό καταλαμβάνει συμπεριλαμβανομένου και του όγκου των κλειστών πόρων στους οποίους δεν μπορεί να εισχωρήσουν τα άτομα ηλίου, αποκλείοντας όμως τον όγκο των ανοιχτών πόρων αλλά και τον χώρο που παρεμβάλλει μεταξύ των σωματιδίων. Επομένως, όσο ο όγκος των κλειστών πόρων σε ένα δείγμα περλίτη αυξάνει, τόσο η πραγματική πυκνότητα μειώνεται. Η μέτρηση της πραγματικής πυκνότητας προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης δύο ή περισσότερων δειγμάτων παρόμοιας φαινόμενης πυκνότητας σχετικά με την ύπαρξη ή όχι ανοιχτών πόρων στην επιφάνεια των κόκκων αφού όσο μεγαλύτερη είναι η πραγματική πυκνότητα του δείγματος, τόσο περισσότερους ανοικτούς πόρους θα έχει στην επιφάνεια του. Το μέγεθος αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στην βιομηχανία διόγκωσης περλίτη ενώ η τιμή του παρουσιάζει μείωση σε χαμηλές φαινόμενες πυκνότητες μέχρι να προσεγγίσει μια ελάχιστη τιμή ενώ περαιτέρω αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος επιφέρει αύξηση της πραγματικής πυκνότητας, άρα και μείωση των κλειστών πόρων. Στο σημείο που η καμπύλη παρουσιάζει ελάχιστο θεωρείται ότι επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας και υψηλού κλειστού πορώδους.

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.39 παρουσιάζεται ο συσχετισμός της φαινόμενης πυκνότητας των δειγμάτων που προήλθαν από διόγκωση περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου με την πραγματική πυκνότητα.



Σχήμα 6.39. Μεταβολή της πυκνότητας skeletal των διογκωμένων περλιτών Τσιγκράδου μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και στην συμβατική κάμινο διόγκωσης.

Φαίνεται λοιπόν από το διάγραμμα του σχήματος ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο ιδιοτήτων επιτυγχάνεται για την συμβατική μέθοδο σε προϊόν φαινόμενης πυκνότητας  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  με αντίστοιχη πραγματική πυκνότητα  $380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ενώ για την διόγκωση στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης σε προϊόν φαινόμενης πυκνότητας  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  με αντίστοιχη πραγματική πυκνότητα  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 6.3.6. Ιδιότητες του επαρκώς διογκωμένου κλάσματος (floaters)

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή σκοπεύοντας να μελετηθούν οι ιδιότητες των διογκωμένων κόκκων και η επίδραση των σκασμένων/θρυμματισμένων και αδιόγκωτων τεμαχιδίων στις βασικές ιδιότητες του συνολικού δείγματος, πραγματοποιήθηκε φυσικός διαχωρισμός των επαρκώς διογκωμένων τεμαχιδίων από τέσσερα αντιπροσωπευτικά δείγματα και μετρήθηκε η φαινόμενη πυκνότητα και η απορροφητική ικανότητα τους σε νερό. Τα δύο ζεύγη δειγμάτων που επελέγησαν να μελετηθούν χαρακτηρίζονται από παρόμοια φαινόμενη πυκνότητα και ύδρο-απορροφητική ικανότητα ενώ παρήχθησαν από την ίδια πρώτη ύλη (CHM). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται η φαινόμενη πυκνότητα και η απορροφητική ικανότητα σε νερό των διογκωμένων

δειγμάτων και των αντίστοιχων δειγμάτων που αποτελούνται μόνο από επαρκώς διογκωμένους κόκκους.

Πίνακας 6.21. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας και της απορροφητικής ικανότητας δείγματος μετά από απομάκρυνση των σπασμένων/θρυμματισμένων και αδιόγκωτων τεμαχιδίων.

| Αρχικό δείγμα     |                     |                              |                              | Δείγμα μετά από διαχωρισμό |                                 |
|-------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Κωδικός δείγματος | Φαινόμενη πυκνότητα | Ύδρο-απορροφητικότητα        | Επαρκώς διογκωμένα τεμαχίδια | Φαινόμενη πυκνότητα        | Ύδρο-απορροφητικότητα           |
|                   | kg·m <sup>-3</sup>  | gr H <sub>2</sub> O/gr. perl | % κ.β.                       | kg·m <sup>-3</sup>         | gr H <sub>2</sub> O/gr. perlite |
| CHM14             | 95.9                | 3.85                         | 85.89                        | 85.1                       | 4.01                            |
| Conv-CHM-B        | 87.5                | 4.27                         | 68.95                        | 66.5                       | 5.80                            |
| CHM6              | 121.7               | 3.09                         | 85.44                        | 108.8                      | 3.33                            |
| Conv-CHM-C        | 113.6               | 3.28                         | 75.93                        | 94.4                       | 3.85                            |

Όπως είναι λογικό, ο διαχωρισμός των επαρκώς διογκωμένων τεμαχιδίων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος σε σύγκριση με το αρχικό. Επιπλέον και στα τέσσερα δείγματα η απορροφητική ικανότητα των αρχικών δειγμάτων είναι μικρότερη σε σύγκριση με την υδροαπορροφητικότητα των επαρκώς διογκωμένων δειγμάτων τους. Η μείωση στην φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος CHM14 συμπίπτει με αυτή του δείγματος CHM6 και είναι περίπου 10%. Η αύξηση της υδροαπορροφητικότητας των δύο δειγμάτων μετά την απομάκρυνση των αδιόγκωτων και σπασμένων/θρυμματισμένων κόκκων είναι περίπου 4 και 8%, αντίστοιχα. Μεγαλύτερη είναι η μείωση στην φαινόμενη πυκνότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων. Η φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος Conv-CHM-B μειώνεται μετά τον διαχωρισμό κατά 21 % προσεγγίζοντας τα 66 kg·m<sup>-3</sup> ενώ η υδροαπορροφητικότητα του επαρκώς διογκωμένου δείγματος αυξάνει κατά 35%. Παρόμοια επίδραση έχει ο διαχωρισμός και για το δείγμα Conv-CHM-C του οποίου η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται κατά 17% περίπου και η απορροφητική του ικανότητα αυξάνει κατά 17.4%.

Συγκρίνοντας το επαρκώς διογκωμένο κλάσμα του δείγματος CHM14 με άλλους περλίτες που διογκώθηκαν στην ίδια κάμινο από την ίδια πρώτη ύλη, όπως τα δείγματα CHM3, CHM7, CHM10, CHM16 και CHM18, των οποίων η φαινόμενη πυκνότητα ποικίλλει μεταξύ 84-89 kg·m<sup>-3</sup>, διαπιστώνεται ότι η υδρο-απορροφητικότητα του διαχωρισμένου δείγματος είναι μειωμένη σε όλες τις περιπτώσεις σε ποσοστό που φτάνει μέχρι και το 8%. Συγκρίνοντας αντίστοιχα την υδρο-απορροφητικότητα του επαρκώς διογκωμένου κλάσματος του δείγματος CHM6 με αυτή του δείγματος CHM9, το διαχωρισμένο κλάσμα παρουσιάζει μειωμένη υδρο-απορροφητικότητα κατά 16% περίπου.

### 6.3.7. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης βασικών ιδιοτήτων δείγματος CH

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται συγκεντρωτικό πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων των διογκωμένων δειγμάτων CH που διογκώθηκαν με τις δύο μεθόδους διόγκωσης. Στα συμβατικά δείγματα παρουσιάζεται η ακριβής τιμή της κάθε ιδιότητας ενώ στα δείγματα που διογκώθηκαν στη κάθετη ηλεκτρική κάμινο παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της κάθε ιδιότητας σε σύγκριση με την τιμή της ιδιότητας του συμβατικού δείγματος αντίστοιχης φαινόμενης πυκνότητας.:

Πίνακας 6.22. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων διογκωμένων περλιτών CH.

| Κωδικός δείγματος | Κατηγορία LBD  | Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ) | Αντοχή σε συμπίεση (p.s.i) /Σύγκριση (%) | Ύδρο-απορροφητικότητα (gr. νερό/gr.perl) /Σύγκριση (%) | Έλαιο – απορροφητικότητα (gr. έλαιο/gr.perlite) / Σύγκριση (%) | Επιπλέοντα σωματίδια (% κ.β.) |
|-------------------|----------------|--|--|--|--|-------------------------------|
| <b>CONV-CHIA</b>  | <b>75-100</b>  | <b>90.75</b>                             | <b>44.5</b>                              | <b>4.26</b>  | <b>3.33</b>  | <b>79.9</b>                   |
| CHI1              | 75-100         | 98                                       | 38.0%                                    | -1.4%  | -12.0%   | 2.5                           |
| CHI4              | 75-100         | 98                                       | 23.8%                                    | -7.3%  | -17.4%   | -0.6                          |
| <b>CONV-CHIB</b>  | <b>100-120</b> | <b>119.2</b>                             | <b>61.4</b>                              | <b>2.89</b>  | <b>2.08</b>  | <b>77.0</b>                   |
| CHI6              | 100-120        | 110                                      | 13.8%                                    | 11.1%  | 3.4%   | -0.1                          |
| <b>CONV-CHIC</b>  | <b>120-150</b> | <b>149.7</b>                             | <b>64.27</b>                             | <b>2.29</b>  | <b>1.58</b>  | <b>62.4</b>                   |
| CHI3              | 120-150        | 126                                      | 22.0%                                    | 22.7%  | 33.5%  | 28.8                          |
| CHI5              | 120-150        | 146                                      | 31.8%                                    | 12.2%  | 7.6%   | 21.3                          |
| CHI7              | 120-150        | 125                                      | 12.0%                                    | 26.6%  | 48.1%  | 21.3                          |
| <b>CONV-CHFB</b>  | <b>100-120</b> | <b>115.7</b>                             | <b>41.3</b>                              | <b>3.28</b>  | <b>2.19</b>  | <b>68.9</b>                   |
| CHF1              | 100-120        | 109                                      | 74.3%                                    | -4.9%  | -4.6%  | 35.3%                         |
| CHF3              | 100-120        | 108                                      | 69.5%                                    | 2.1%   | 2.3%   | 35.0%                         |
| <b>CONV-CHFC</b>  | <b>120-150</b> | <b>144.5</b>                             | <b>45.20</b>                             | <b>2.18</b>  | <b>1.67</b>  | <b>58.08</b>                  |
| CHF2              | 120-150        | 140                                      | 110.2%                                   | 11.0%  | 7.2%   | 51.9%                         |
| <b>CONV-CHMA</b>  | <b>50-75</b>   | <b>67.9</b>                              | <b>26.8</b>                              | <b>6.29</b>  | <b>4.05</b>  | <b>78.05</b>                  |
| CHM4              | 50-75          | 68.6                                     | 30.6                                     | -6.2   | -17.3  | -7.4                          |
| CHM8              | 50-75          | 76.1                                     | 58.2                                     | -25.0  | -15.8  | 7.7                           |
| CHM12             | 50-75          | 74.3                                     | 34.3                                     | -13.5  | -9.9   | -14.8                         |
| <b>CONV-CHMB</b>  | <b>75-100</b>  | <b>87.5</b>                              | <b>29.3</b>                              | <b>4.27</b>  | <b>2.89</b>  | <b>68.95</b>                  |
| CHM3              | 75-100         | 84.1                                     | 120.5                                    | 23.9   | 115.6  | 21.9                          |
| CHM5              | 75-100         | 80.7                                     | 24.2                                     | 25.8   | 7.3  | 7.7                           |
| CHM7              | 75-100         | 88.8                                     | 51.9                                     | -4.2   | -7.6   | 21.0                          |
| CHM11             | 75-100         | 78.2                                     | 24.2                                     | 32.1   | 17.3   | 11.8                          |
| CHM13             | 75-100         | 89.7                                     | 95.2                                     | -4.2   | -0.7   | 27.0                          |
| CHM14             | 75-100         | 95.9                                     | 95.2                                     | -9.8   | 12.1   | 24.6                          |
| CHM16             | 75-100         | 86.9                                     | 51.9                                     | -3.7   | -6.2   | -11.8                         |
| <b>CONV-CHMC</b>  | <b>100-120</b> | <b>113.6</b>                             | <b>53</b>                                | <b>3.28</b>  | <b>2.7</b>   | <b>75.93</b>                  |
| CHM6              | 100-120        | 121.7                                    | 40.0                                     | -6.0   | -15.9  | 12.5                          |
| CHM9              | 100-120        | 108.1                                    | 20.0                                     | 21.6   | -10.7  | 12.8                          |
| <b>CONV-CHMD</b>  | <b>120-150</b> | <b>143.7</b>                             | <b>58.1</b>                              | <b>2.99</b>  | <b>1.81</b>  | <b>63.59</b>                  |
| CHM2              | 120-150        | 146.5                                    | 63.5                                     | -20.1  | -6.1   | 28.5                          |
| <b>CONV-CHCB</b>  | <b>75-100</b>  | <b>90.14</b>                             | <b>31.1</b>                              | <b>3.91</b>  | <b>3.02</b>  | <b>75.4</b>                   |
| CHC1              | 75-100         | 86.14                                    | 22.5                                     | 9.7  | -11.6  | -1.7                          |
| CHC2              | 75-100         | 86.65                                    | 30.5                                     | 12.8   | -1.0   | -3.7                          |
| CHC4              | 75-100         | 91.8                                     | 46.6                                     | 2.3  | 7.9  | -2.8                          |
| <b>CONV-CHCD</b>  | <b>120-150</b> | <b>140.8</b>                             | <b>63.56</b>                             | <b>2.31</b>  | <b>1.77</b>  | <b>68.7</b>                   |
| CHC5              | 120-150        | 140.7                                    | 10.1                                     | 14.7   | 15.8   | -6.7                          |

Ο υπολογισμός της επι τις εκατό μεταβολής της κάθε ιδιότητας πραγματοποιείται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Μεταβολή } (\%) = \frac{\text{Ιδιότητα προϊόντος(VEF)} - \text{Ιδιότητα προϊόντος(CONV)}}{\text{Ιδιότητα προϊόντος(CONV)}} * 100 \quad (6.2)$$

### 6.3.8. Συμπεράσματα για διογκωμένους περλίτες Τσιγκράδου (CH).

Από τη σύγκριση των ιδιοτήτων των δειγμάτων περλίτη CH που διογκώθηκαν με την νέα τεχνολογία έμμεσης θέρμανσης με τα αντίστοιχα συμβατικά διογκωμένα δείγματα, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης μπορεί με επιτυχία να κατεργαστεί περλίτες από το ορυχείο του Τσιγκράδου αρχικής κοκκομετρίας +75-300 μm και να παράγοντας διογκωμένο περλίτη με ελάχιστη φαινόμενη πυκνότητα 68 kg·m<sup>-3</sup>, γεγονός που την καθιστά τουλάχιστον ανταγωνιστική με την συμβατική έμφλογη κάμινο.
- Η αντοχή σε συμπίεση των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι αισθητά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν με την νέα τεχνολογία έμμεσης θέρμανσης. Η βελτίωση παρατηρείται σε όλα ανεξαιρέτως τα δείγματα και φτάνει μέχρι και το 120 %.
- Η υδρο- και έλαιο- απορροφητικότητα των δειγμάτων που διογκώθηκαν με τη νέα μέθοδο είναι ίδια ή μέχρι και 20% μικρότερη από τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Οι τιμές των δύο ιδιοτήτων αυξάνουν όσο μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα, υποδηλώνοντας ότι σε υψηλότερο βαθμό διόγκωσης (μικρή φαινόμενη πυκνότητα) δημιουργούνται περισσότεροι ανοιχτοί πόροι.
- Ο διαχωρισμός των επαρκώς διογκωμένων τεμαχιδίων από ένα δείγμα διογκωμένου περλίτη παράγει ένα νέο δείγμα μειωμένης φαινόμενης πυκνότητας σε σύγκριση με το αρχικό του και αυξημένης απορροφητικής ικανότητας σε νερό. Συγκρίνοντας όμως την υδροαπορροφητικότητα του διαχωρισμένου κλάσματος με αυτή ενός δείγματος αντίστοιχης φαινόμενης πυκνότητας, το διαχωρισμένο κλάσμα παρουσιάζει μειωμένη τιμή μέχρι και 18%.
- Η κατανομή των πόρων στους συμβατικά διογκωμένους περλίτες διαφέρει σε σύγκριση με περλίτες που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Οι συμβατικά διογκωμένοι

περλίτες έχουν περισσότερους πόρους διαμέτρου 10-300  $\mu\text{m}$  ενώ οι περλίτες που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο έχουν αρκετούς πόρους μεγέθους 1-10  $\mu\text{m}$ .

- Η κατά βάρος περιεκτικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων σε επαρκώς διογκωμένο φορτίο είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Η βελτίωση είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν διογκώνεται το λεπτόκοκκο κλάσμα CHF αφού κυμαίνεται κατά 35- 52%.
- Η απώλεια σε πύρωση των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. Παρά την μεγάλη διασπορά των τιμών, η απώλεια πύρωσης των προϊόντων της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου είναι περίπου 1.15% και αποτελεί το 40% της απώλειας πύρωσης του αρχικού δείγματος περλίτη Τσιγκράδου (CHI).
- Τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα έχουν μικρότερη πραγματική πυκνότητα (skeletal density) σε σύγκριση με αυτή των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο ιδιοτήτων (πραγματική πυκνότητα-φαινόμενη πυκνότητα) βρίσκεται σε προϊόντα χαμηλότερης φαινόμενης πυκνότητας όσων αφορά στα συμβατικά διογκωμένα δείγματα ( $\text{lbd} = 100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )σε σύγκριση με τα προϊόντα της κάθετη ηλεκτρικής καμίνου ( $\text{lbd} = 150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

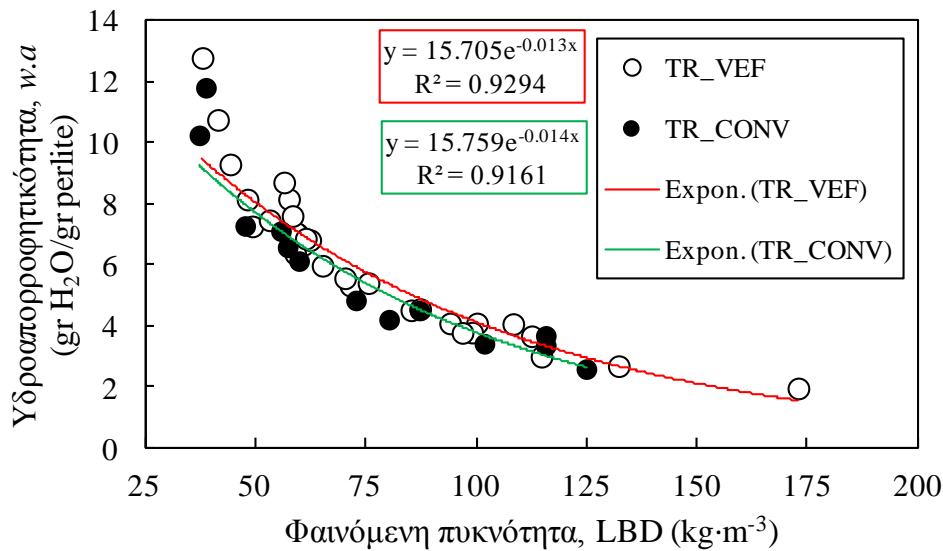
## 6.4. Διογκωμένοι περλίτες από το δείγμα Τσιγκράδου CHI

### 6.4.1. Βασικές ιδιότητες

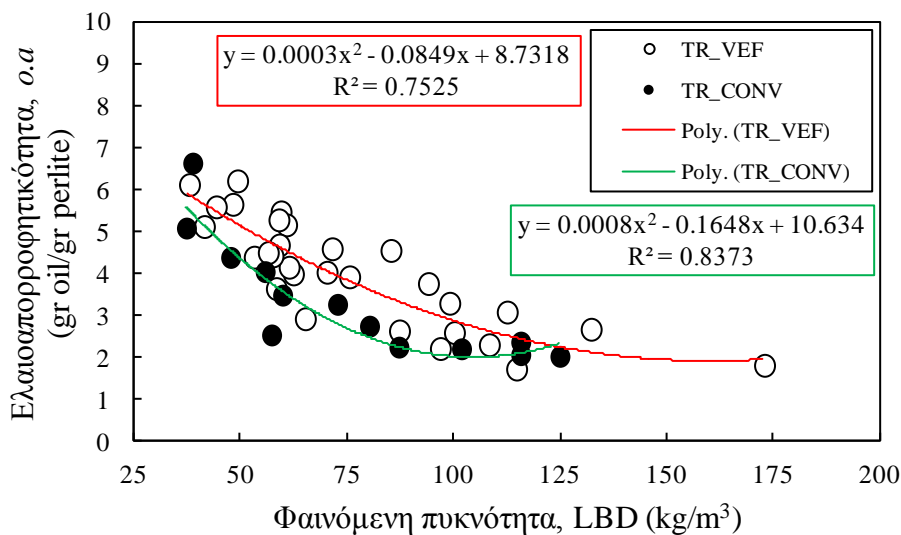
#### Υδρο- και έλαιο- απορροφητικότητα

Στα σχήματα 6.40 και 6.41 παρουσιάζεται η μεταβολή της ύδρο- και έλαιο-απορροφητικότητας δειγμάτων TR που διογκώθηκαν με τις δύο μεθόδους διόγκωσης που μελετώνται. Η απορροφητικότητα των δειγμάτων TR έχει παρόμοια συμπεριφορά με τα δείγματα CH. Η απορροφητική ικανότητα των δειγμάτων αυξάνει σημαντικά όσο αυξάνει ο βαθμός διόγκωσης τους και μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα τους. Κάτι τέτοιο οφείλεται στην αύξηση της ειδικής επιφάνειας των κόκκων όταν αυξάνει η διόγκωση, ενώ επηρεάζεται από την ύπαρξη ανοιχτών πόρων, το πλήθος των οποίων αυξάνει όσο προχωρά η διόγκωση του περλίτη.





Σχήμα 6.40. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε νερό συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική και τη συμβατική κάμινο.

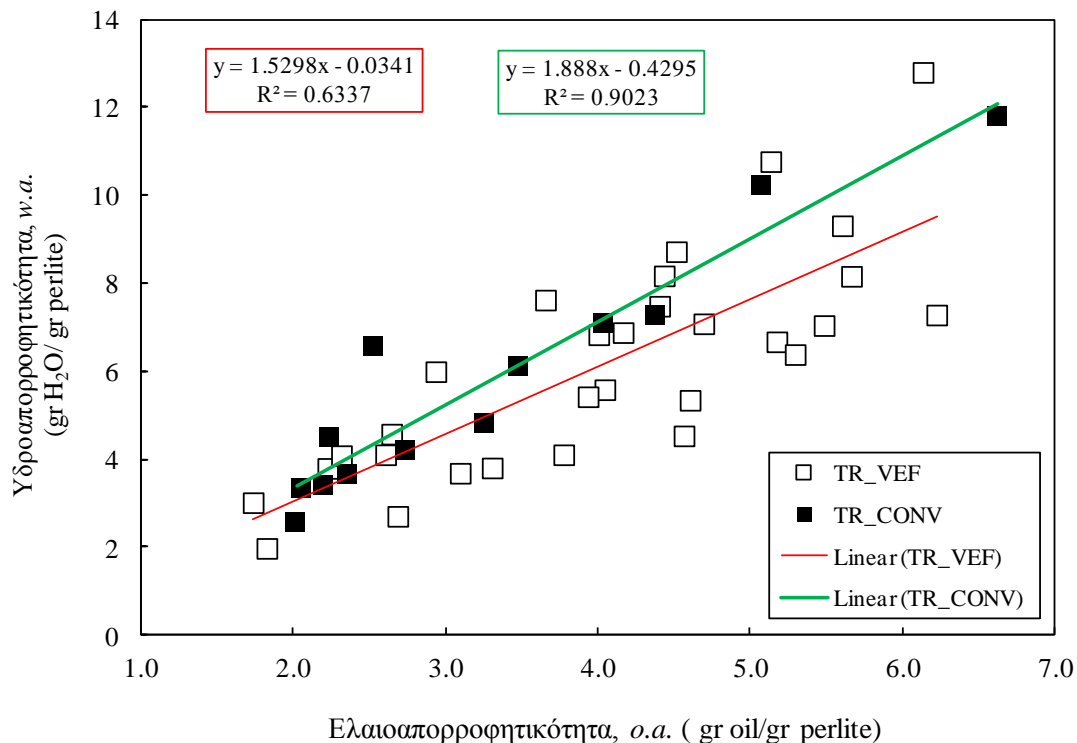


Σχήμα 6.41. Η μεταβολή της απορροφητικής ικανότητας σε έλαιο συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας για δείγματα TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική και τη συμβατική κάμινο.

Όπως συνέβη και με τα διογκωμένα δείγματα από τον περλίτη του CH, έτσι και με την περίπτωση του περλίτη του Τράχηλα η απορροφητική ικανότητα των διογκωμένων δειγμάτων συσχετίζεται με την φαινόμενη πυκνότητα τους. Όσον αφορά στην υδρο-απορροφητικότητα, η εξίσωση είναι εκθετική ενώ η έλαιο-απορροφητικότητα των δειγμάτων συνδέεται με την φαινόμενη πυκνότητα τους με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Οι ελάχιστες τιμές απορροφητικότητας παρουσιάζονται για δείγματα με φαινόμενη πυκνότητα που πλησιάζει την τιμή  $125 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  και για ένα δείγμα σημαντικά μεγάλης φαινόμενης πυκνότητας ( $\text{LBD} = 175 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) και λαμβάνει τιμή περίπου  $2.5 \text{ gr}$  νερού ανά  $\text{gr}$  περλίτη και  $2.0 \text{ gr}$  έλαιου ανά  $\text{gr}$  περλίτη. Όταν η φαινόμενη

πυκνότητα των δειγμάτων μειωθεί σε  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  η απορροφητική τους ικανότητα εκτοξεύεται και λαμβάνει τιμές περίπου  $8 \text{ gr H}_2\text{O}/\text{gr}$  περλίτη και  $4.5\text{-}5.5 \text{ gr H}_2\text{O}/\text{gr}$  περλίτη.

Στο σχήμα 6.42 παρατίθεται διάγραμμα στο οποίο εξετάζεται ο συσχετισμός της απορροφητικής ικανότητας των διογκωμένων περλιτών Τράχηλα σε νερό και έλαιο.



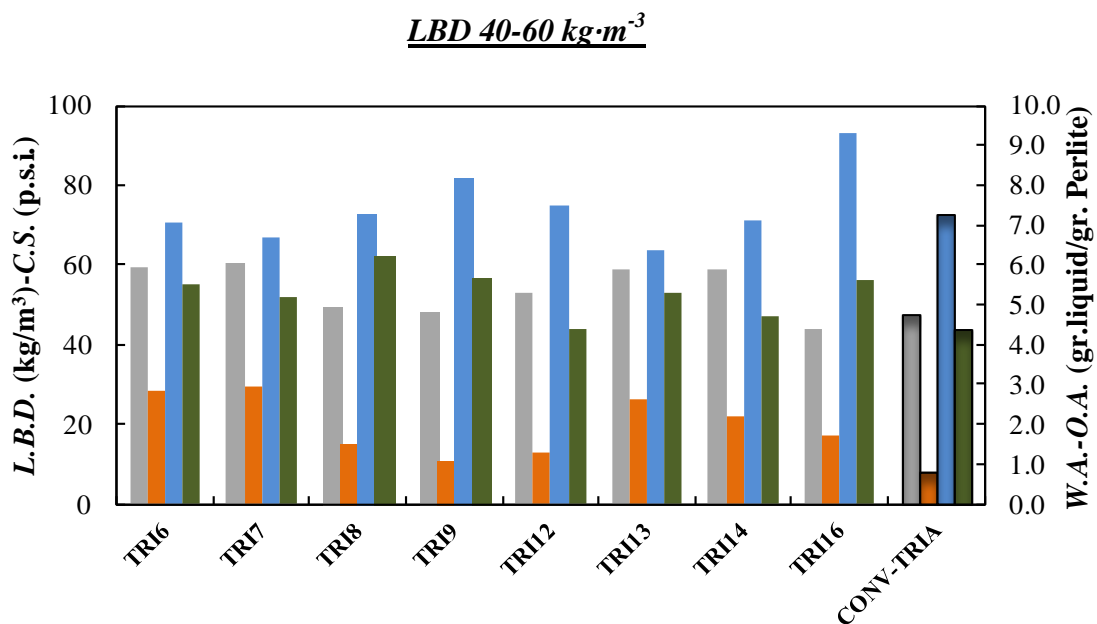
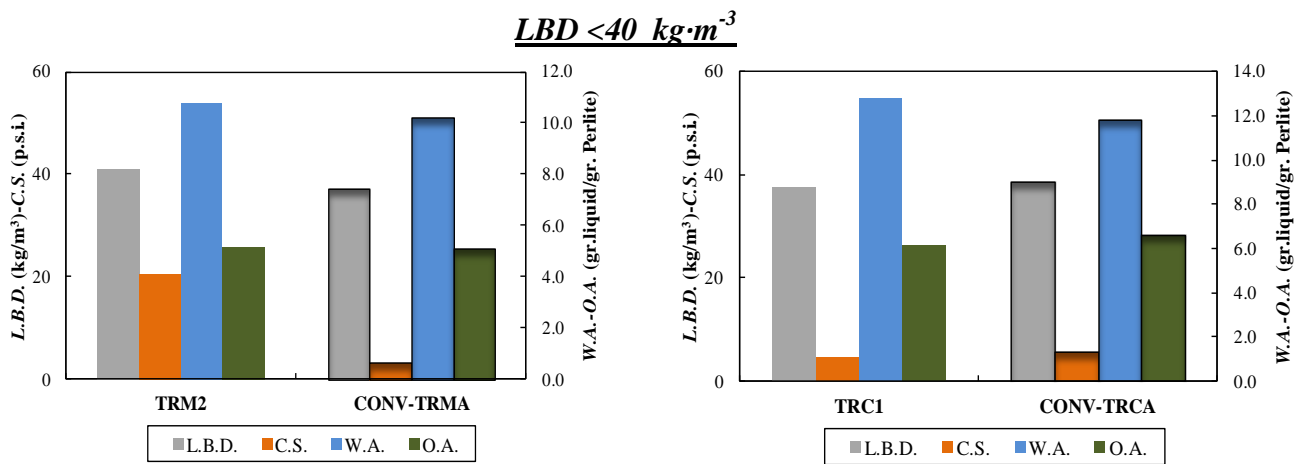
Σχήμα 6.40. Συσχετισμός απορροφητικής ικανότητας σε νερό και έλαιο των περλιτών του Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

Οι δύο ιδιότητες συσχετίζονται μεταξύ τους μέσω γραμμική εξίσωσης της μορφής  $w.a. = a * o.a. - b$ . Όλα τα δείγματα φαίνεται ότι απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού σε σύγκριση με το έλαιο όπως ακριβώς συνέβη και με τα δείγματα περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου. Σε μία τέτοια σύγκριση όμως οφείλουμε να είμαστε προσεκτικοί λόγω των σημαντικών διαφορών που χαρακτηρίζουν τις δύο μεθόδους προσδιορισμού που ακολουθήθηκαν όπως αναφέρθηκε παραπάνω αλλά και τις θερμοφυσικές ιδιότητες των δύο ρευστών. Είναι γεγονός ότι η διαφορά στο δυναμικό ιξώδες των δύο ρευστών (νερό  $\mu_{H_2O} = 0.00089 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , λινέλαιο  $\mu_{oil} = 0.033 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  σε θερμοκρασία  $T = 300 \text{ K}$ ) επηρεάζει σημαντικά την εισχώρηση τους εντός των πόρων του υλικού καθιστώντας το έλαιο περισσότερο «δυσκίνητο» και λιγότερο διεισδυτικό σε σύγκριση με το νερό με αποτέλεσμα η διαδικασία απορρόφησης του διογκωμένου περλίτη σε νερό να ευνοείται κινητικά τουλάχιστον σε σύγκριση της απορρόφησης σε έλαιο ειδικά στους πόρους μικρών διαστάσεων του υλικού. Επιπλέον, η πυκνότητα των δύο ρευστών διαφέρει αφού για το νερό είναι  $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  περίπου ενώ για το λινέλαιο είναι  $0.929 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  στους  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  γεγονός που σημαίνει ότι το φιλμ που δημιουργείται

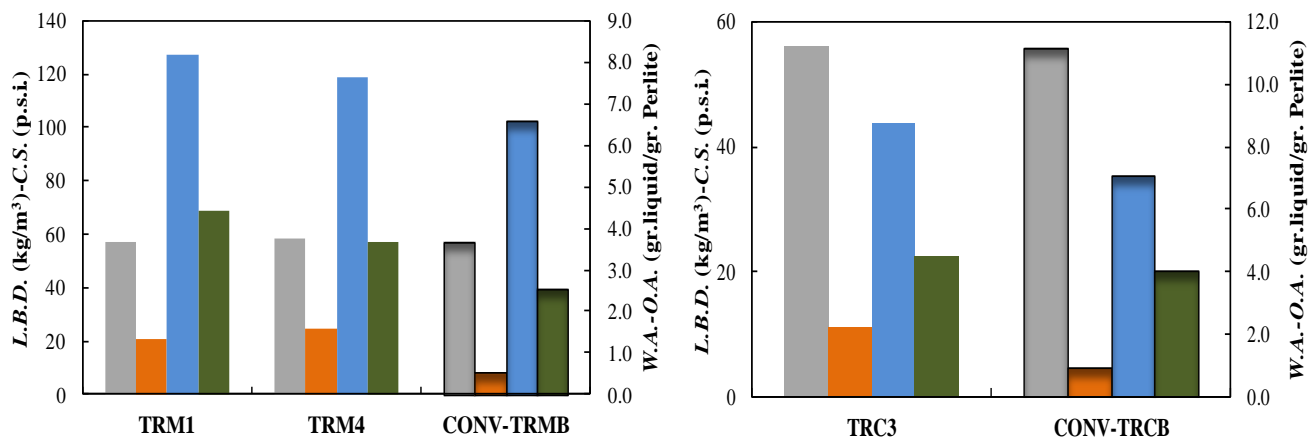
γύρω από τον κόκκο ίδιων μορφολογικών χαρακτηριστικών παρότι έχει τις ίδιες διαστάσεις, έχει διαφορετική μάζα.

Σε αναλογία με τα δείγματα CH, έτσι και στην περίπτωση των περλιτών από το ορυχείο του Τράχηλα που παρουσιάζονται εδώ πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίηση τους σε 5 αυτή τη φορά κατηγορίες ανάλογα με την τιμή της φαινόμενης πυκνότητας τους: α) LBD <40 kg·m<sup>-3</sup>, β) LBD =40-60 kg·m<sup>-3</sup>, γ) LBD =60-80 kg·m<sup>-3</sup>, δ) LBD =80-100 kg·m<sup>-3</sup>, ε) LBD =100-120 kg·m<sup>-3</sup>. Σε κάθε γκρούπ, τα προϊόντα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης συγκρίνονται με ένα δείγμα που διογκώθηκε στη συμβατική κάμινο και του οποίου η φαινόμενη πυκνότητα είναι στο εύρος που ορίζει το συγκεκριμένο γκρούπ δειγμάτων.

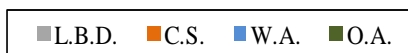
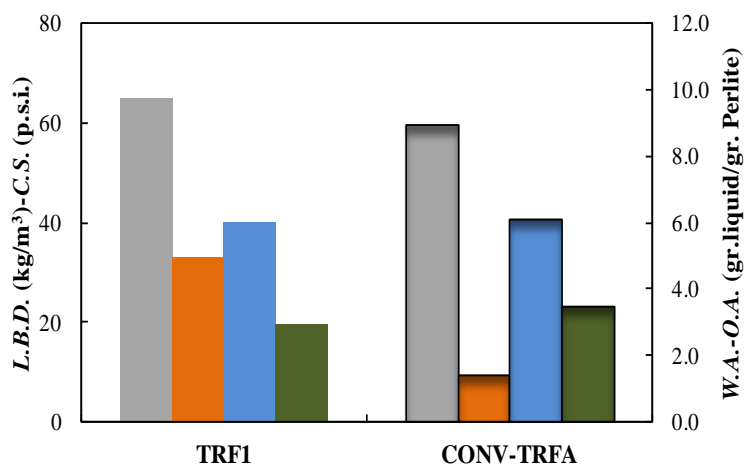
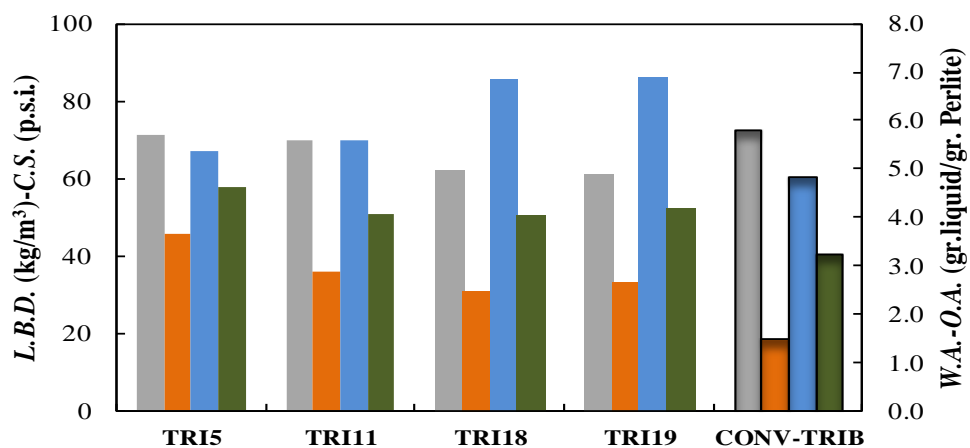
Στην συνέχεια ακολουθούν ραβδογράμματα που περιέχουν τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας, ύδρο- και έλαιο- απορροφητικότητας αλλά και αντοχής σε συμπίεση των δειγμάτων. Ο σχολιασμός της αντοχής των δειγμάτων σε συμπίεση θα ακολουθήσει στη συνέχεια.



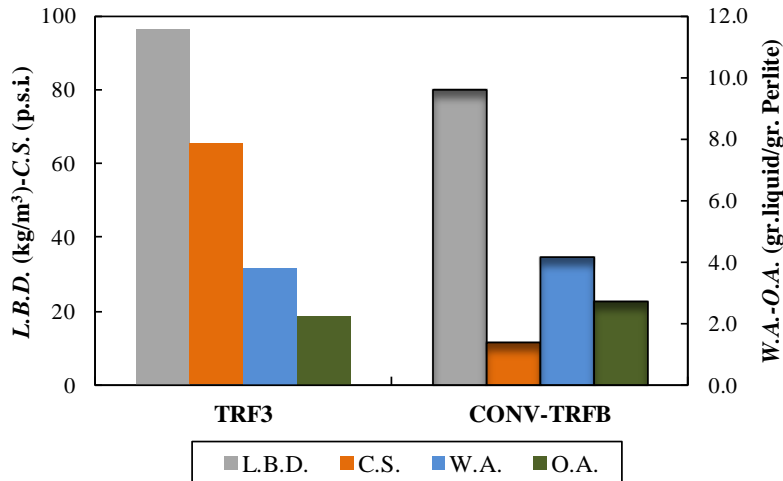
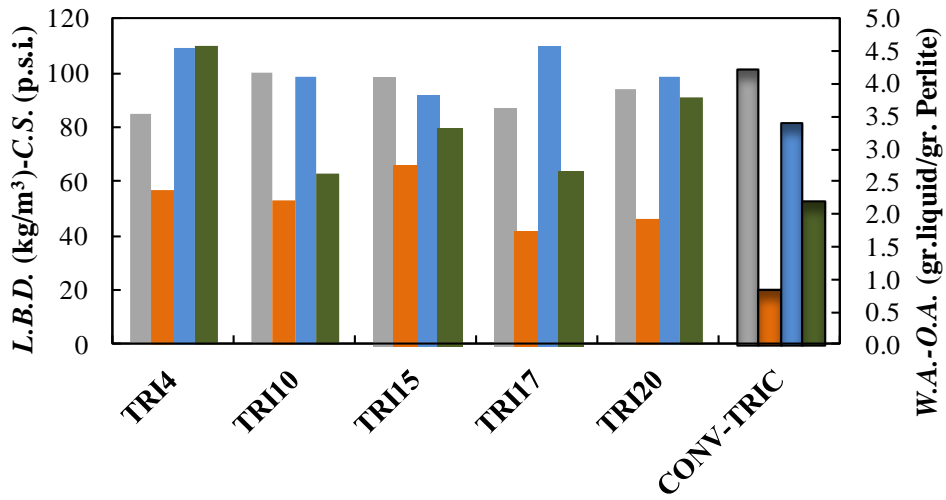
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ



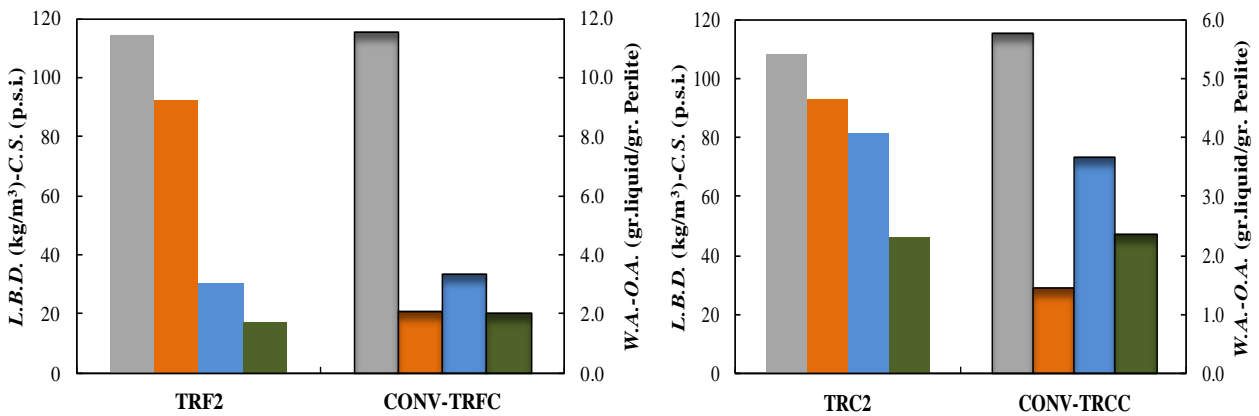
*LBD 60-80 kg·m<sup>-3</sup>*



**LBD 80-100 kg·m<sup>-3</sup>**



**LBD 100-120 kg·m<sup>-3</sup>**

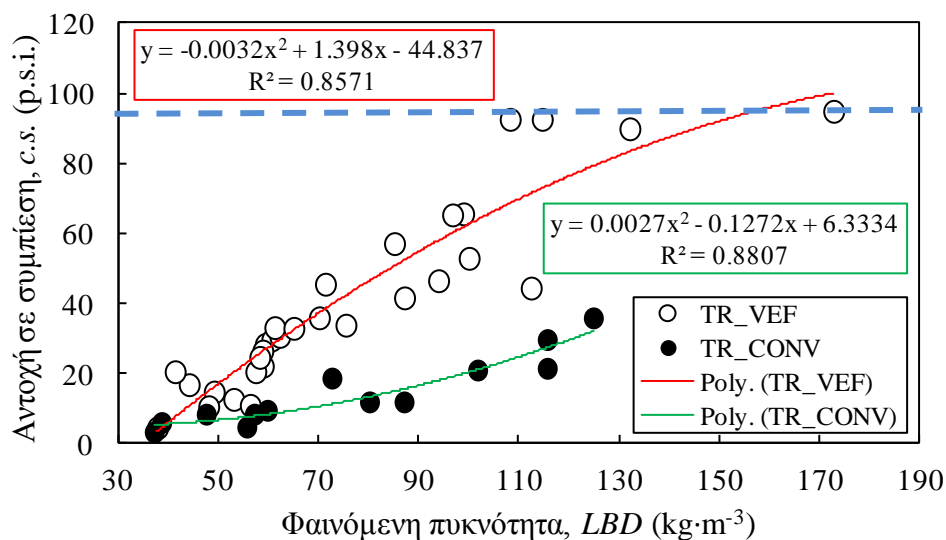


Σχήμα 6.41. Φαινόμενη πυκνότητα, υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα και αντοχή σε συμπίεση των διογκωμένων δειγμάτων TR που διογκώθηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο και την έμφλογη συμβατική.

Από τα διαγράμματα του παραπάνω σχήματος και όσον αφορά στην απορροφητικότητα των δειγμάτων, δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα που να υποδηλώνουν βελτίωση της ιδιότητας όταν τα δείγματα διογκώνονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η απορροφητική ικανότητα των δειγμάτων διαφέρει ανεπαίσθητα όταν η μέθοδος διόγκωσης αλλάζει. Κυρίως στα δείγματα με μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα εμφανίζεται βελτίωση της απορροφητικής του ικανότητας ενώ στα υπόλοιπα δείγματα η απορροφητική τους ικανότητα αυξάνει μέχρι και 44%.

#### Αντοχή σε συμπίεση

Στο σχήμα 6.44 παρουσιάζεται συσχετισμός της αντοχής των διογκωμένων περλιτών του Τράχηλα με την φαινόμενη πυκνότητα τους για τις δύο μεθόδους διόγκωσης που εφαρμόστηκαν.



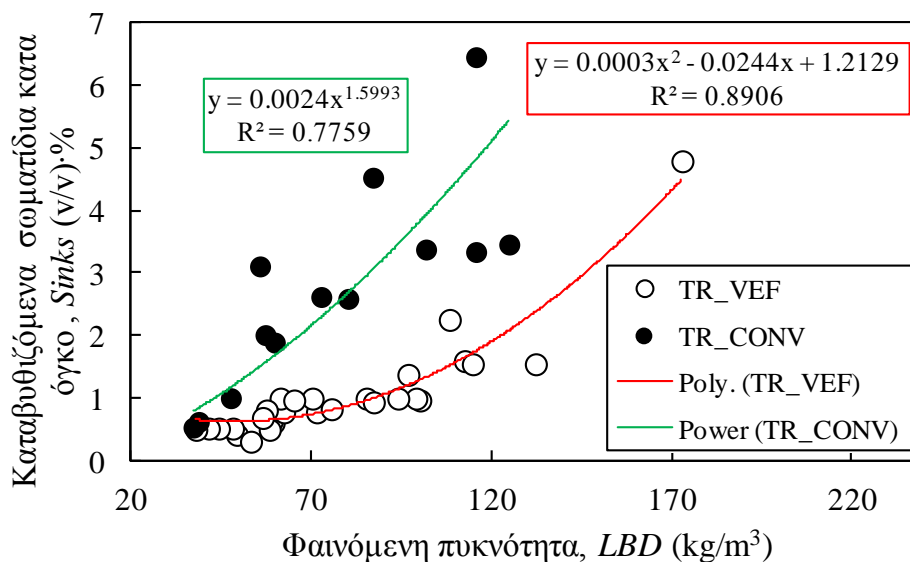
Σχήμα 6.44. Συσχετισμός αντοχής σε συμπίεση και φαινόμενης πυκνότητας περλιτών του Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά σε έμφλογη κάμινο (CONV) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF).

Η γαλάζια οριζόντια διακεκομμένη γραμμή παριστάνει το όριο μέτρησης της συσκευής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής των δειγμάτων σε συμπίεση στα 3 cm. Η αντοχή των δειγμάτων σε συμπίεση αυξάνει με αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας τους ανεξάρτητα της μεθόδου διόγκωσης που εφαρμόζεται. Ο συσχετισμός των δύο ιδιοτήτων πραγματοποιείται με πολυωνυμικές εξισώσεις αυτή την φορά. Διακρίνεται και σε αυτή την περίπτωση η υπεροχή στις μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων που κατεργάστηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Ο βέλτιστος συνδυασμός χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας και αυξημένης αντοχής σε συμπίεση παρατηρείται στα δείγματα με φαινόμενη πυκνότητα 50-60 kg·m<sup>-3</sup> στα οποία η αντοχή σε συμπίεση παρουσιάζει βελτίωση 80-220 %.

Η ανάπτυξη δικτύου πόρων στο εσωτερικό αλλά και την εξωτερική του επιφάνεια επιδρά αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες του κόκκου. Κατά την διόγκωση, οι πόροι αναπτύσσονται εις βάρος της στερεής φάσης ενώ ο αρχικά συμπαγής κόκκος μετατρέπεται σε υλικό κυψελοειδούς δομής του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από το πάχος των τοιχωμάτων που συγκροτούν τις κυψέλες και την πυκνότητα του δικτύου πόρων. Είναι λογικό, όσο πιο χαμηλή είναι η φαινόμενη πυκνότητα των κόκκων τόσο μικρότερο να είναι το πάχος των τοιχωμάτων και εκτενέστερο το δίκτυο των πόρων με άμεση επίδραση στην αντοχή του κόκκου σε συμπίεση.

#### 6.4.2. Διογκωμένα- σκασμένα/θρυμματισμένα- αδιόγκωτα σωματίδια

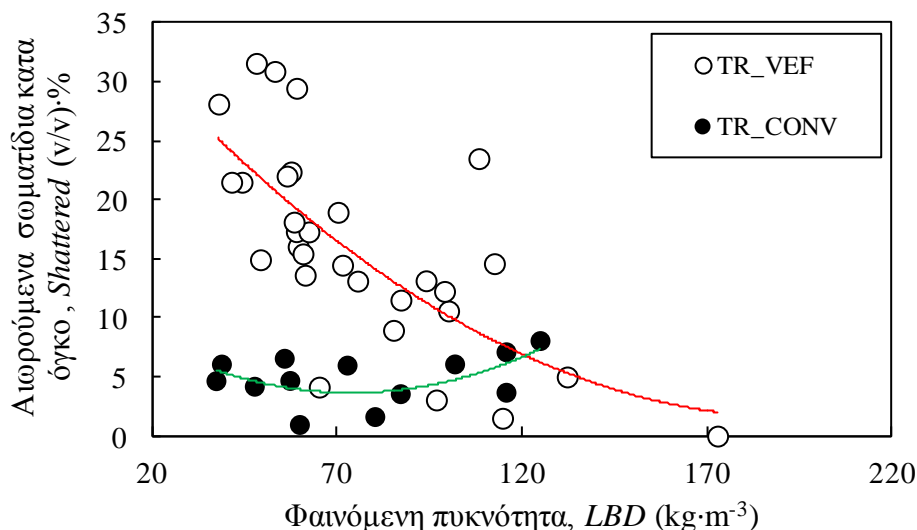
Στο σχήμα 6.45 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της % περιεκτικότητας των διογκωμένων δειγμάτων σε αδιόγκωτους κόκκους για περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα και για τις δύο μεθόδους διόγκωσης που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 6.45. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα σε μη-επαρκώς διογκωμένους κόκκους μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική (\_VEF) και στην έμφλογη συμβατική κάμινο διόγκωσης (\_CONV) συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας.

Παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των διογκωμένων δειγμάτων σε αδιόγκωτα τεμαχίδια όσο αυξάνει η φαινόμενη πυκνότητα τους. Στην περίπτωση που η κατεργασία πραγματοποιείται στην συμβατική έμφλογη κάμινο τα δύο μεγέθη συσχετίζονται με μία εξίσωση της μορφής  $sinks (w/w\%) = a \cdot LBD^b$  της οποίας η προσαρμογή είναι μέτρια ( $R^2 = 0.7759$ ). Όσον αφορά σε περλίτες που κατεργάζονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης ο συσχετισμός επαρκώς διογκωμένων κόκκων-φαινόμενης πυκνότητας πραγματοποιείται με πολυώνυμο δεύτερης τάξης ικανοποιητικής προσαρμογής στα πειραματικά αποτελέσματα. Η περιεκτικότητα των διογκωμένων δειγμάτων παρόμοιων φαινομένων πυκνοτήτων σε αδιόγκωτους

κόκκους παρουσιάζεται διπλάσια στην πλειονότητα των περιπτώσεων όταν αυτά διογκώνονται συμβατικά σε σύγκριση με τα δείγματα που κατεργάζονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε αδιόγκωτους κόκκους είναι μικρή διότι εκφράζεται σε κατά όγκο ποσοστό

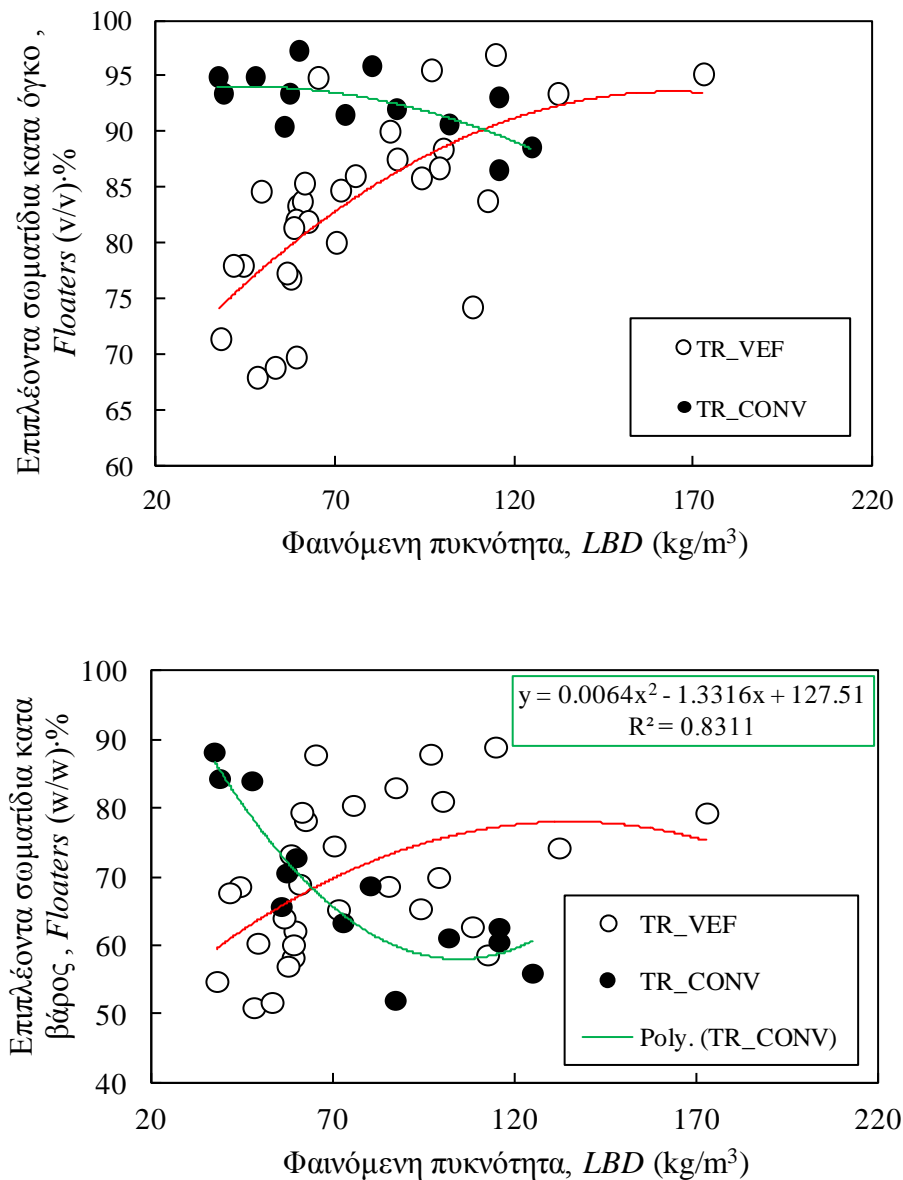


Σχήμα 6.46. Κατά όγκο περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους.

Όσον αφορά στην περιεκτικότητα των δειγμάτων σε σκασμένα/θρυμματισμένα τεμαχίδια, αξιοσημείωτη είναι η διασπορά των πειραματικών τιμών που δυσχεραίνει τον συσχετισμό των δύο ιδιοτήτων ειδικά στα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (VEF). Όσον αφορά στα συμβατικά διογκωμένα δείγματα, η περιεκτικότητά τους σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους ποικίλει μεταξύ 1-10%. Τα δείγματα που κατεργάστηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διογκωσης χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διασπορά τιμών αφού η περιεκτικότητά τους σε σκασμένους/θρυμματισμένους κόκκους κυμαίνεται μεταξύ 1-34% κατά όγκο με τάση μείωσης όσο αυξάνει η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων. Η περιεκτικότητα των προϊόντων σε σκασμένα τεμαχίδια λαμβάνει σημαντικά μεγάλες τιμές όταν η φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων δεν υπερβαίνει τα 70 kg·m<sup>-3</sup>. Η παραγωγή σπασμένων/ θρυμματισμένων τεμαχιδίων συνδέεται με υπερθέρμανση των κόκκων στις περιπτώσεις αυτές και την καταστροφή της δομής τους.

Στη συνέχεια (Σχήμα 6.47) παρουσιάζεται η κατά βάρος και κατά όγκο περιεκτικότητα των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα σε διογκωμένα τεμαχίδια συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των δειγμάτων.



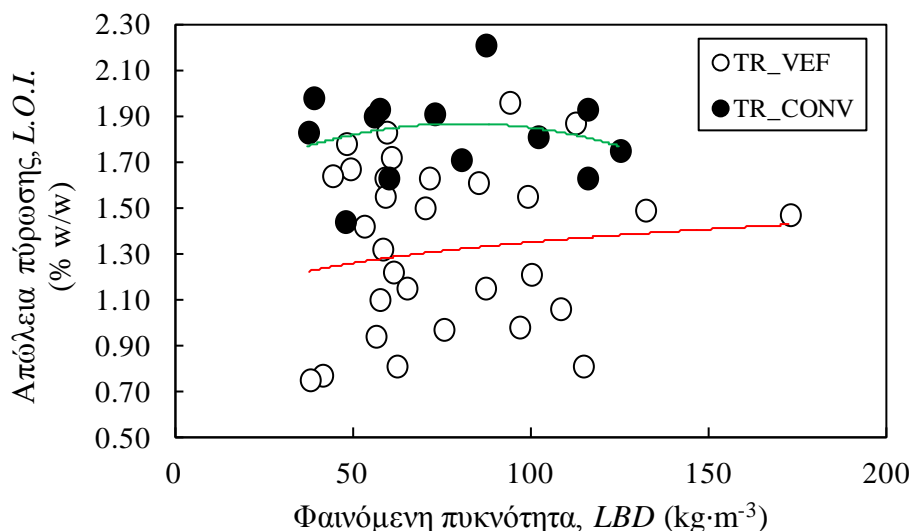


Σχήμα 6.47. Κατά βάρος (επάνω) και κατά όγκο (κάτω) περιεκτικότητα των δειγμάτων TR σε διογκωμένους κόκκους.

Η διασπορά των τιμών, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η κατεργασία πραγματοποιείται στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Όσον αφορά στα πιο ελαφροβαρύ διογκωμένα κλάσματα ( $LBD < 50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) και όταν η διεργασία λαμβάνει χώρα στην συμβατική κάμινο διόγκωσης, η περιεκτικότητά τους σε επαρκώς διογκωμένους κόκκους ξεπερνά το 80%, ενώ όταν εφαρμόζεται η νέα μέθοδο έμμεσης θέρμανσης η κατά βάρος περιεκτικότητα των δειγμάτων σε διογκωμένο φορτίο κυμαίνεται μεταξύ 50-70% κατά βάρος. Στα δείγματα όμως των οποίων η φαινόμενη πυκνότητα ξεπερνά τα  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  η κατά βάρος περιεκτικότητα σε διογκωμένους κόκκους είναι μεγαλύτερη όταν διογκώνονται στην ηλεκτρική κάμινο σε σύγκριση με τα συμβατικά (στην πλειονότητα των περιπτώσεων κατά βάρος 75-90% έναντι 50-60%).

### 6.4.3. Απώλεια πύρωσης

Στο Σχήμα 6.48 φαίνεται η απώλεια πύρωσης που παρουσιάζουν δείγματα TR που διογκώθηκαν με την συμβατική μέθοδο και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας τους.

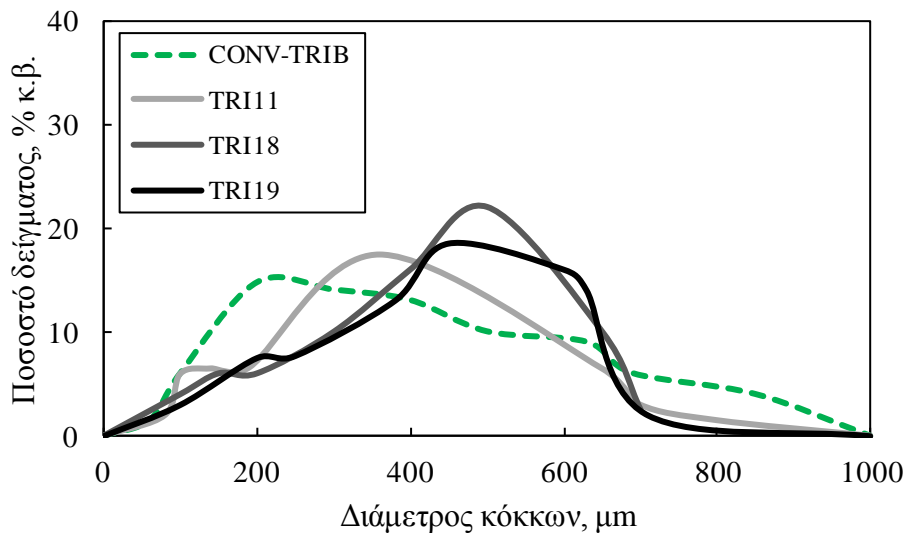


Σχήμα 6.48. Η απώλεια σε πύρωση δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα που διογκώθηκαν με την συμβατική μέθοδο και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

Η απώλεια πύρωσης που παρουσιάζουν τα διογκωμένα δείγματα χαρακτηρίζεται από έντονη διασπορά τιμών. Φαίνεται όμως ότι η απώλεια πύρωσης των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη ενώ η μέση τιμή της είναι 1.85% περίπου. Όσον αφορά στα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης η απώλεια πύρωσης των δειγμάτων δεν παρουσιάζει σαφή τάση εξάρτησης από την φαινόμενη πυκνότητα τους ενώ η μέση τιμή της είναι 1.35%. Το ποσοστό αυτό αποτελεί το 40% της απώλειας πύρωσης που παρουσιάζει το αρχικό δείγμα TRI (πρώτη ύλη). Η μέση απώλεια πύρωσης των περλιτών που προέρχονται από διόγκωση του δείγματος TRI ανέρχεται σε 1.53% και αποτελεί το 46% της αρχικής απώλειας πύρωσης του δείγματος.

### 6.4.4. Κοκκομετρική κατανομή

Στην συνέχεια συγκρίνεται η κοκκομετρική κατανομή δειγμάτων TR που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και στη συμβατική κάμινο. Τα προϊόντα προέκυψαν από διόγκωση του ως έχει δείγματος περλίτη Τράχηλα (TRI) και υπάγονται στην κατηγορία φαινόμενης πυκνότητας LBD 60-80 kg·m<sup>-3</sup>.

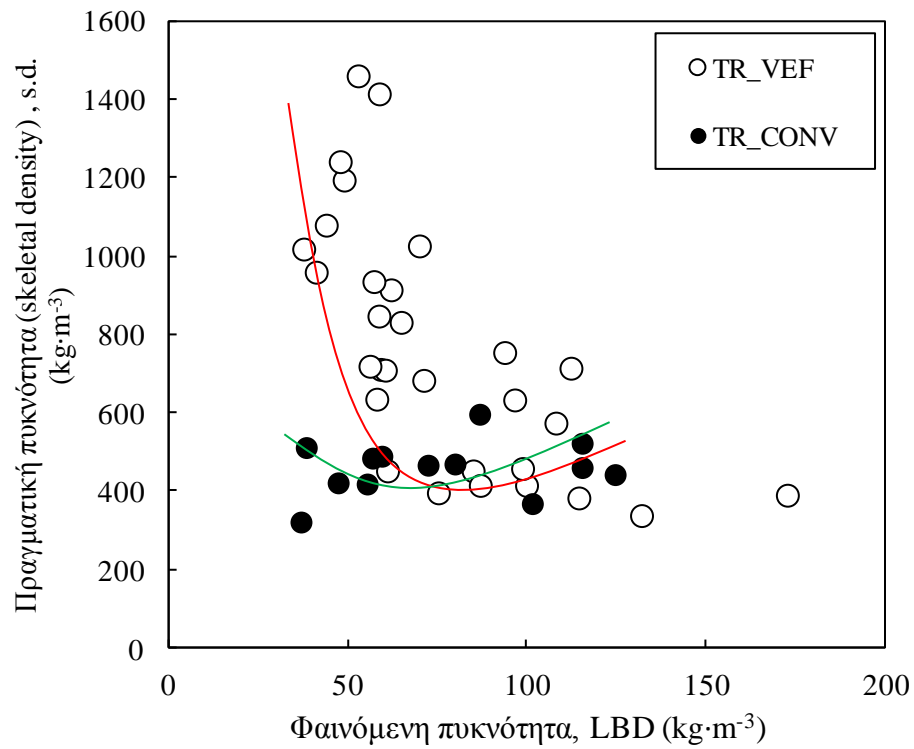


Σχήμα 6.49. Η κοκκομετρική κατανομή περλιτών Τράχηλα που διογκώθηκαν συμβατικά (διακεκομμένη γραμμή) και στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο (συνεχής γραμμή).

Όπως συνέβη και στην περίπτωση των περλιτών από το ορυχείο του Τσιγκράδου, έτσι και στην περίπτωση που η πρώτη ύλη προέρχεται από το ορυχείο του Τράχηλα το κοκκομετρικό εύρος των προϊόντων είναι διευρυμένο όταν αυτά προέρχονται από κατεργασία σε συμβατική κάμινο. Επιπλέον φαίνεται ότι, παρότι χρησιμοποιήθηκε η ίδια πρώτη ύλη για την παραγωγή των δειγμάτων, η μέση κοκκομετρία του συμβατικά διογκωμένου δείγματος είναι μειωμένη σε σύγκριση με τα άλλα τρία δείγματα τα οποία διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο.

#### 6.4.5. Πραγματική πυκνότητα (skeletal density).

Στο σχήμα 6.51 απεικονίζεται η μεταβολή της πραγματικής πυκνότητας συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας διογκωμένων δειγμάτων από το ορυχείο του Τράχηλα που κατεργάστηκαν με τις δύο μεθόδους διόγκωσης που μελετώνται στην διδακτορική διατριβή. Όσον αφορά στα συμβατικά διογκωμένα δείγματα η εξάρτηση της πυκνότητας skeletal με την φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων είναι σχεδόν γραμμική. Στην περίπτωση των προϊόντων της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης και για προϊόντα φαινόμενης πυκνότητας μικρότερης των  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  τα μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα. Στα  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  παρατηρείται ελάχιστο με την πυκνότητα skeletal να αποκτά τιμή  $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , περίπου, ενώ για περαιτέρω αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας η πυκνότητα skeletal αυξάνει.



Σχήμα 6.50. Μεταβολή της πυκνότητας skeletal των διογκωμένων περλιτών Τράχηλα μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο και στην συμβατική κάμινο διόγκωσης.

6.4.6. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης βασικών ιδιοτήτων δειγμάτων

TR

Πίνακας 6.23. Συγκεντρωτικό διάγραμμα των κυρίων ιδιοτήτων των δειγμάτων TR που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο (% μεταβολή τιμής), σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα παρόμοιας φαινόμενης πυκνότητας (έντονα γράμματα).

| Πρώτη ύλη        | Κατηγορία LBD  | Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ) | Αντοχή σε συμπίεση (p.s.i) /Σύγκριση (%) | Υδρο-απορροφητικότητα (gr. νερό/gr.perlite) /Σύγκριση (%) | Έλαιο – απορροφητικότητα (gr. έλαιο/gr.perlite) / Σύγκριση (%) | Επιπλέοντα σωματίδια (% κ.β.) |
|------------------|----------------|--|--|---|--|-------------------------------|
| <b>CONV-TRIA</b> | <b>40-60</b>   | <b>47.6</b>                              | <b>8.2</b>                               | <b>7.27</b>   | <b>4.38</b>  | <b>83.95</b>                  |
| TRI6             | 40-60          | 59.2                                     | 246.3                                    | -3.0  | 25.3   | -25.9                         |
| TRI7             | 40-60          | 60.5                                     | 262.2                                    | -8.1  | 18.3   | -17.8                         |
| TRI8             | 40-60          | 49                                       | 80.5                                     | 0.3   | 42.2   | -28.1                         |
| TRI9             | 40-60          | 47.9                                     | 29.3                                     | 12.4  | 29.5   | -39.2                         |
| TRI12            | 40-60          | 52.9                                     | 54.9                                     | 3.0   | 0.7  | -38.3                         |
| TRI13            | 40-60          | 58.7                                     | 223.2                                    | -12.1   | 21.0   | -30.6                         |
| TRI14            | 40-60          | 58.8                                     | 170.7                                    | -2.5  | 7.3  | -28.3                         |
| TRI16            | 40-60          | 44                                       | 106.1                                    | 28.2  | 28.1   | -18.2                         |
| <b>CONV-TRIB</b> | <b>60-80</b>   | <b>72.7</b>                              | <b>18.5</b>                              | <b>4.83</b>   | <b>3.26</b>  | <b>63.25</b>                  |
| TRI5             | 60-80          | 71.21                                    | 146.5                                    | 10.8  | 41.4   | 3.2                           |
| TRI11            | 60-80          | 70                                       | 94.6                                     | 15.7  | 24.2   | 17.9                          |
| TRI18            | 60-80          | 62.1                                     | 65.9                                     | 41.6  | 23.0   | 23.8                          |
| TRI19            | 60-80          | 61.1                                     | 79.5                                     | 42.7  | 27.9   | 25.7                          |
| <b>CONV-TRIC</b> | <b>80-100</b>  | <b>101.8</b>                             | <b>20.8</b>                              | <b>3.41</b>   | <b>2.2</b>   | <b>61.04</b>                  |
| TRI4             | 80-100         | 85                                       | 175.0                                    | 33.1  | 107.7  | 12.5                          |
| TRI10            | 80-100         | 99.9                                     | 154.8                                    | 20.5  | 18.6   | 32.9                          |
| TRI15            | 80-100         | 98.8                                     | 215.9                                    | 11.7  | 50.5   | 14.7                          |
| TRI17            | 80-100         | 87                                       | 100.5                                    | 34.3  | 20.5   | 36.1                          |
| TRI20            | 80-100         | 93.8                                     | 124.0                                    | 20.5  | 71.8   | 7.2                           |
| <b>CONV-TRFA</b> | <b>60-80</b>   | <b>59.8</b>                              | <b>9.3</b>                               | <b>6.12</b>   | <b>3.48</b>  | <b>72.74</b>                  |
| TRF1             | 60-80          | 64.9                                     | 254.8                                    | -2.0  | -15.5  | 20.8                          |
| <b>CONV-TRFB</b> | <b>80-100</b>  | <b>80.2</b>                              | <b>11.7</b>                              | <b>4.2</b>  | <b>2.74</b>  | <b>68.63</b>                  |
| TRF3             | 80-100         | 96.6                                     | 459.0                                    | -9.5  | -18.6  | 28.2                          |
| <b>CONV-TRFC</b> | <b>100-120</b> | <b>115.7</b>                             | <b>21.3</b>                              | <b>3.35</b>   | <b>2.06</b>  | <b>62.56</b>                  |
| TRF2             | 100-120        | 114.5                                    | 335.2                                    | -9.9  | -15.5  | 42.3                          |
| <b>CONV-TRMA</b> | <b>&lt;40</b>  | <b>37.22</b>                             | <b>3.1</b>                               | <b>10.24</b>  | <b>5.08</b>  | <b>88.15</b>                  |
| TRM2             | <40            | 41.2                                     | 564.5                                    | 5.3   | 1.2  | -23.1                         |
| <b>CONV-TRMB</b> | <b>40-60</b>   | <b>57.21</b>                             | <b>8.2</b>                               | <b>6.54</b>   | <b>2.53</b>  | <b>70.51</b>                  |
| TRM1             | 40-60          | 57.3                                     | 151.2                                    | 24.5  | 75.5   | -19.1                         |
| TRM4             | 40-60          | 58.1                                     | 201.2                                    | 16.1  | 44.7   | 4.0                           |
| <b>CONV-TRCA</b> | <b>&lt;40</b>  | <b>38.7</b>                              | <b>5.8</b>                               | <b>11.8</b>   | <b>6.63</b>  | <b>84.28</b>                  |
| TRC1             | <40            | 37.7                                     | -20.7                                    | 8.6   | -7.4   | -35.0                         |
| <b>CONV-TRCB</b> | <b>40-60</b>   | <b>55.7</b>                              | <b>4.5</b>                               | <b>7.1</b>  | <b>4.04</b>  | <b>65.61</b>                  |
| TRC3             | 40-60          | 56.2                                     | 144.4                                    | 23.0  | 11.9   | -2.3                          |
| <b>CONV-TRCC</b> | <b>100-120</b> | <b>115.7</b>                             | <b>29.5</b>                              | <b>3.67</b>   | <b>2.36</b>  | <b>60.43</b>                  |
| TRC2             | 100-120        | 108.1                                    | 214.2                                    | 11.4  | -1.7   | 3.9                           |

#### 6.4.7. Συμπεράσματα για διογκωμένους περλίτες Τράχηλα

Μετά από την παρουσίαση και σύγκριση των διογκωμένων περλιτών από το ορυχείο του Τράχηλα που κατεργάστηκαν στην συμβατική κάμινο διόγκωσης και με την νέα τεχνολογία έμμεσης θέρμανσης διατυπώνονται τα εξής συμπεράσματα:

- Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων περλίτη είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.κ
- Εξαίρεση αποτελούν τα διογκωμένα δείγματα που προέκυψαν από διόγκωση του κλάσματος TRF. Όλες οι ιδιότητες των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν είναι βελτιωμένες σε σύγκριση με τα συμβατικά δείγματα αντίστοιχων φαινόμενων πυκνοτήτων. Η κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης μπορεί να προσφέρει με μικροσφαιρίδια διογκωμένου περλίτη βελτιωμένων ιδιοτήτων σε σύγκριση με τις ιδιότητες που έχουν τα ίδια δείγματα όταν διογκώνονται στην συμβατική κάμινο διόγκωσης.
- Η αντοχή σε συμπίεση στα 3 cm των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι σημαντικά αυξημένη σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Η βελτίωση στην ιδιότητα φτάνει μέχρι και το 560% για το διογκωμένο δείγμα με κωδικό TRM2 το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο ελαφροβαρή δείγματα που παρήχθησαν. Γενικότερα, η διόγκωση περλιτών TR στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης δίνει προϊόντα με αντοχή σε συμπίεση 2-7 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντοχή που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.
- Τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά στον συνδυασμό χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας και μέγιστη αντοχής σε συμπίεση επιτεύχθηκαν με το μεσαίο κοκκομετρικό κλάσμα TRM (+150-212 $\mu$ m). Για φαινόμενη πυκνότητα 50-60 kg·m<sup>-3</sup> η βελτίωση της αντοχής σε συμπίεση είναι 150-200%.
- Τα δείγματα διογκωμένου περλίτη TRI που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο με φαινόμενη πυκνότητα μεταξύ 60-100 kg·m<sup>-3</sup> περιέχουν 80-90% κατά βάρος διογκωμένους κόκκους, ποσοστό που είναι πολύ υψηλότερο σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συμβατικά διογκωμένα δείγματα τα οποία περιέχουν διογκωμένους κόκκους σε ποσοστό 60-70%.
- Η απώλεια πύρωσης των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την απώλεια που παρουσιάζουν τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. Στην περίπτωση που η διόγκωση πραγματοποιείται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο, λαμβάνει μέση τιμή ίση με 1.32 %

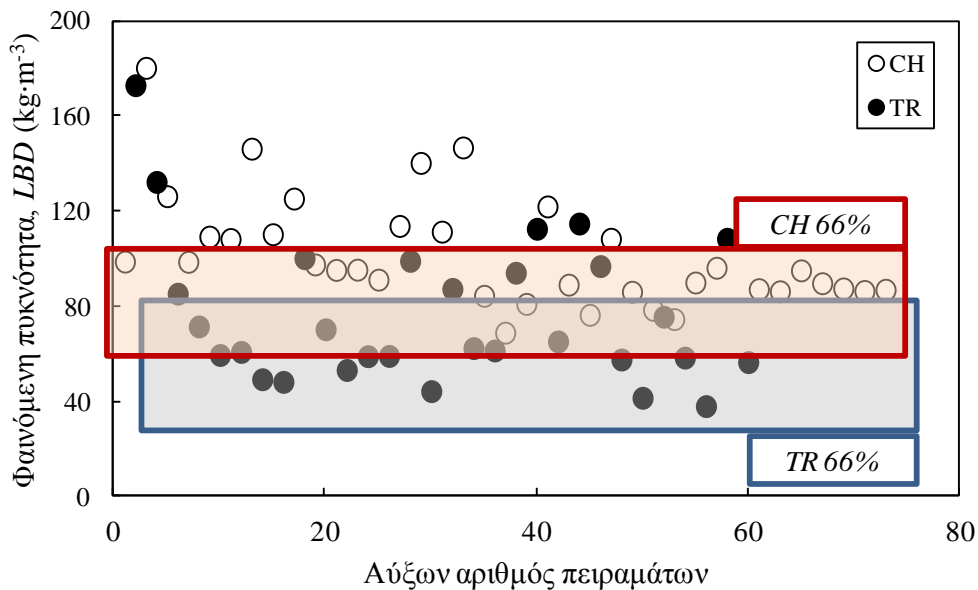
και αποτελεί το 40% της απώλειας σε πύρωση που έχει παρουσιάσει το αρχικό δείγμα Τράχηλα (TR). Γενικότερα, η απώλεια πύρωσης των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 1.5-2.2%, ενώ τα δείγματα που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο παρουσιάζουν απώλεια πύρωσης μικρότερη από 1.8%.

- Η πραγματική πυκνότητα (skeletal density) των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων και των περλιτών που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο με φαινόμενη πυκνότητα μεγαλύτερη από  $75 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  είναι πρακτικά η ίδια. Ο βέλτιστος συνδυασμός φαινόμενης και πραγματικής πυκνότητας (skeletal density) παρατηρείται για τα διογκωμένα δείγματα περλίτη όταν η φαινόμενη πυκνότητα του προϊόντος είναι  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ανεξάρτητα της μεθόδου διόγκωσης που χρησιμοποιείται.
- Η διόγκωση περλίτη TR στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο προσφέρει με διογκωμένο περλίτη μεγαλύτερης μέσης κοκκομετρικής κατανομής και μικρότερης διασποράς σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.

### 6.5. Σύγκριση διογκωμένων δειγμάτων Τσιγκράδου και Τράχηλα

Η μελέτη επίδρασης της προέλευσης της πρώτης ύλης στα χαρακτηριστικά των διογκωμένων περλιτών πραγματοποιείται με σύγκριση των βασικών ιδιοτήτων των διογκωμένων περλιτών που προέρχονται από το ορυχείο του Τσιγκράδου και του Τράχηλα.

Φαινόμενη πυκνότητα: Στο σχήμα 6.51 παρουσιάζεται η φαινόμενη πυκνότητα των διαφόρων δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο από τις δύο πρώτες ύλες που μελετήθηκαν (περλίτης CH και TR).

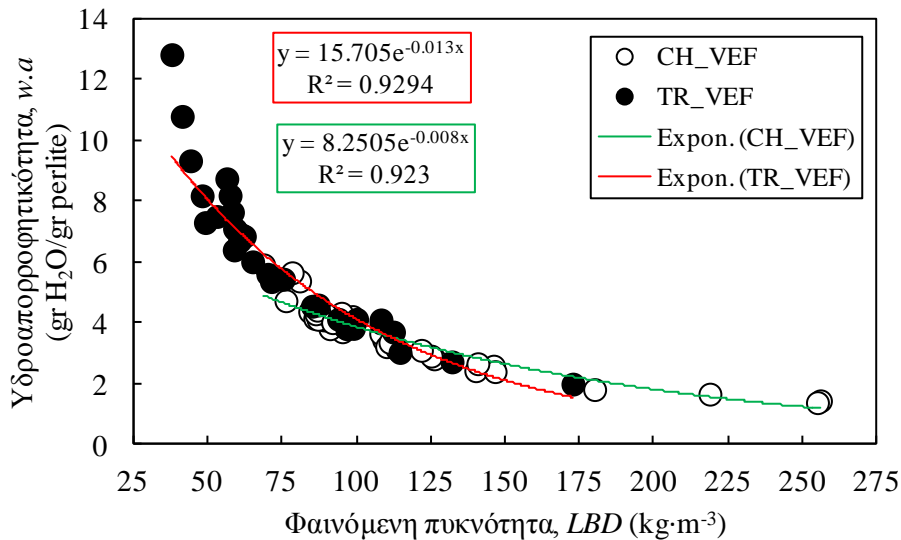


Σχήμα 6.51. Η φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων που παράχθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης ταξινομημένη βάσει της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε. Εντός των ορθογωνίων περιλαμβάνονται το 66% των δειγμάτων με την χαμηλότερη φαινόμενη πυκνότητα για τις δύο πρώτες ύλες.

Οι περλίτες TR διογκώνονται σε χαμηλότερες φαινόμενες πυκνότητες σε σχέση με τα διογκωμένα δείγματα CH. Το 66% των πειραμάτων που διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη τον περλίτη TR παρουσιάζει εύρος φαινόμενης πυκνότητας που ξεκινά από  $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  για τα ελαφρότερα προϊόντα και καταλήγει σε  $85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ενώ το αντίστοιχο εύρος για τον περλίτη του CH είναι από 60 έως και  $115 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών συμπεραίνεται ότι ο περλίτης TR παρουσιάζει σε σχέση με τον περλίτη CH μεγαλύτερη διογκωσιμότητα ως αποτέλεσμα της διαφορετικής χημικής σύστασης και της περιεκτικότητας τους σε νερό. Ο περλίτης TR έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό και αλκάλια με αποτέλεσμα την μειωμένη τιμή του ιξώδους του και της θερμοκρασίας μαλάκυνσης του.

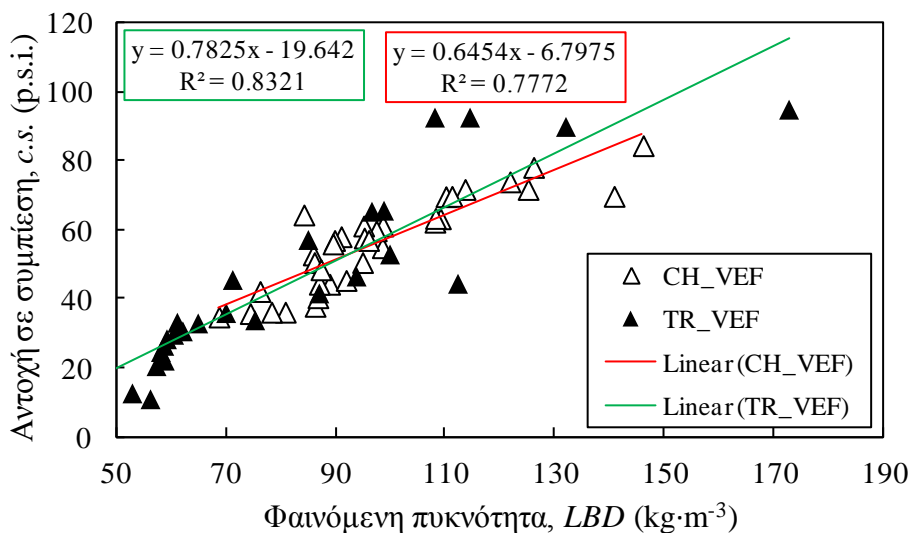
Υδρο-απορροφητικότητα: Στο Σχήμα 6.52 παρουσιάζεται η μεταβολή της υδρο-απορροφητικότητας διογκωμένων περλιτών CH και TR συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας τους και οι οποίοι προέκυψαν από κατεργασία στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. Όπως φαίνεται η προέλευση της πρώτης ύλης δεν επηρεάζει την απορροφητική ικανότητα τους σε νερό, εφόσον συγκρίνονται δείγματα παρεμφερούς φαινόμενης πυκνότητας.





Σχήμα 6.52. Η ύδρο-απορροφητικότητα συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

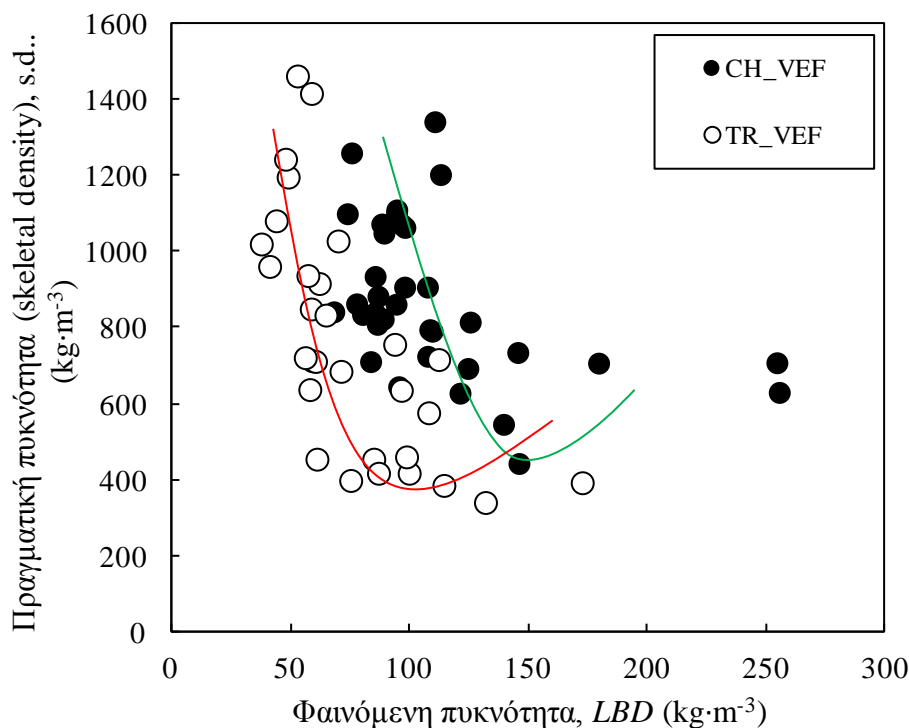
*Αντοχή σε συμπίεση:* Στο σχήμα 6.53 παρουσιάζεται η αντοχή σε συμπίεση συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των δειγμάτων περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδου που παρήχθησαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διάγκωσης. Για δείγματα όμοιας φαινόμενης πυκνότητας η αντοχή τους σε συμπίεση είναι παρόμοια και ανεξάρτητη της προέλευσης της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τους.



Σχήμα 6.53. Η αντοχή σε συμπίεση συναρτήσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

Λαμβάνοντας όμως υπόψη το γεγονός ότι, η αντοχή σε συμπίεση των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων με φαινόμενη πυκνότητα περίπου  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  είναι 40 psi και 20 psi για τα δείγματα CH και TR, αντίστοιχα, γίνεται κατανοητό ότι η βελτίωση που επέρχεται με κατεργασία του περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι μεγαλύτερη για τον περλίτη του Τράχηλα.

Πραγματική πυκνότητα (skeletal density): Η μεταβολή της πραγματικής πυκνότητας συναρτῆσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων για περλίτες TR και CH που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.54.



Σχήμα 6.54. Η πυκνότητα skeletal συναρτῆσει της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου που κατεργάστηκαν στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

Η πραγματική πυκνότητα των δειγμάτων που προήλθαν από τη διόγκωση περλίτη TR είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με την πραγματική πυκνότητα των δειγμάτων CH για τις ίδιες τιμές φαινόμενης πυκνότητας. Ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο ιδιοτήτων για τους περλίτες TR επιτυγχάνεται σε υλικά φαινόμενης πυκνότητας  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  και για περλίτες CH για φαινόμενη πυκνότητα  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , περίπου.

## 6.6. Μελέτη επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου στην διόγκωση περλιτών.

Η επίδραση των παραμέτρων του συστήματος στην διόγκωση του περλίτη μελετήθηκε και παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή. Κάθε παράμετρος εξετάζεται ξεχωριστά και παρουσιάζεται η επίδραση που έχει η μεταβολή της στα χαρακτηριστικά του διογκωμένων προϊόντων. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται και σχετίζονται με τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου είναι η κατανομή της θερμοκρασίας στο θάλαμο διόγκωσης και ο ρυθμός

τροφοδοσίας του αέρα και του περλίτη στον θάλαμο διόγκωσης. Την μελέτη συμπληρώνει μία επιπλέον παράμετρος η οποία σχετίζεται με τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης και είναι η κοκκομετρική κατανομή της τροφοδοσίας. Η ποιότητα των διογκωμένων προϊόντων αξιολογήθηκε με τη μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας της, της υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητας και της αντοχής τους σε συμπίεση. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους φάνηκε ότι υπάρχει συσχετισμός μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας των δειγμάτων και των υπόλοιπων ιδιοτήτων. Τελικά, αν καθοριστεί η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου με μια από αυτές τις ιδιότητες, μπορεί εύκολα να καθοριστεί στη συνέχεια να καθοριστεί η επίδραση τους στις υπόλοιπες ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η επίδραση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν συναρτήσει κυρίως της μεταβολής της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων

### 6.6.1. Θερμοκρασία καμίνου

Η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας της καμίνου στην φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος παρουσιάζεται στην παρούσα υποενότητα για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι ζώνες θέρμανσης λειτουργούν ρυθμισμένες στην ίδια θερμοκρασία λειτουργίας, η θερμοκρασία λειτουργίας των ζωνών είναι αύξουσα προς τα κάτω αλλά και όταν μέρος ή όλες οι θερμικές αντιστάσεις είναι σε λειτουργία.

#### Λειτουργία του συνόλου των θερμικών αντιστάσεων

Όσον αφορά στην περίπτωση κατά την οποία το σύνολο των θερμικών αντιστάσεων τίθενται σε λειτουργία, μελετώνται οι εξής περιπτώσεις θερμοκρασιακής ρύθμισης της καμίνου διόγκωσης:

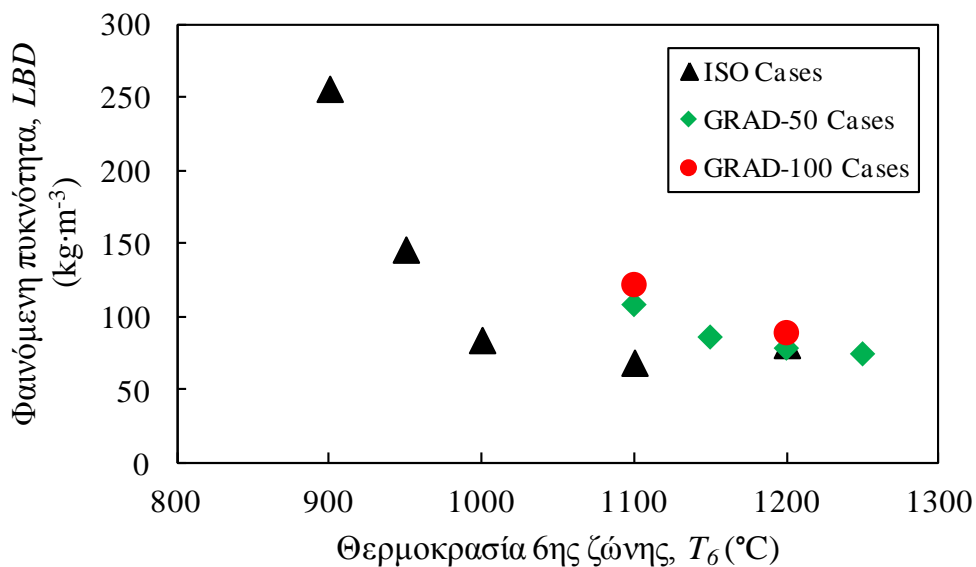
- Ισοθερμοκρασιακή ρύθμιση όπου  $T_1 = T_2 = \dots = T_6$ .
- Διαβάθμιση της θερμοκρασίας του θαλάμου διόγκωσης από πάνω προς τα κάτω με βήμα μεταβολής της θερμοκρασίας 50 °C μεταξύ των γειτονικών αντιστάσεων
- Διαβάθμιση της θερμοκρασίας του θαλάμου διόγκωσης από πάνω προς τα κάτω με βήμα μεταβολής θερμοκρασίας 100 °C.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασιακής ρύθμισης της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου στην διόγκωση του δείγματος Τσιγκράδου κοκκομετρικής κατανομής +150 $\mu$ m -212  $\mu$ m (CHM). Η θερμοκρασιακή ρύθμιση της καμίνου στις περιπτώσεις που θα παρουσιαστούν φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.24. Η θερμοκρασία των ζωνών της κάθετης ηλεκτρικής κάμινου κατά την διόγκωση του κλάσματος +150-212 $\mu\text{m}$  περλίτη Τσιγκράδου.

| Κωδικός δείγματος | Τύπος προφίλ | Θερμοκρασία ζωνών |       |       |       |       |       |
|-------------------|--------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   |              | $T_1$             | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ | $T_6$ |
| CHM1              | ISO          | 900               | 900   | 900   | 900   | 900   | 900   |
| CHM2              | ISO          | 950               | 950   | 950   | 950   | 950   | 950   |
| CHM3              | ISO          | 1000              | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| CHM4              | ISO          | 1100              | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  | 1100  |
| CHM5              | ISO          | 1200              | 1200  | 1200  | 1200  | 1200  | 1200  |
| CHM9              | GRAD-50      | 850               | 900   | 950   | 1000  | 1050  | 1100  |
| CHM10             | GRAD-50      | 900               | 950   | 1000  | 1050  | 1100  | 1150  |
| CHM11             | GRAD-50      | 950               | 1000  | 1050  | 1100  | 1150  | 1200  |
| CHM12             | GRAD-50      | 1000              | 1050  | 1100  | 1150  | 1200  | 1250  |
| CHM6              | GRAD-100     | 600               | 700   | 800   | 900   | 1000  | 1100  |
| CHM7              | GRAD-100     | 700               | 800   | 900   | 1000  | 1100  | 1200  |

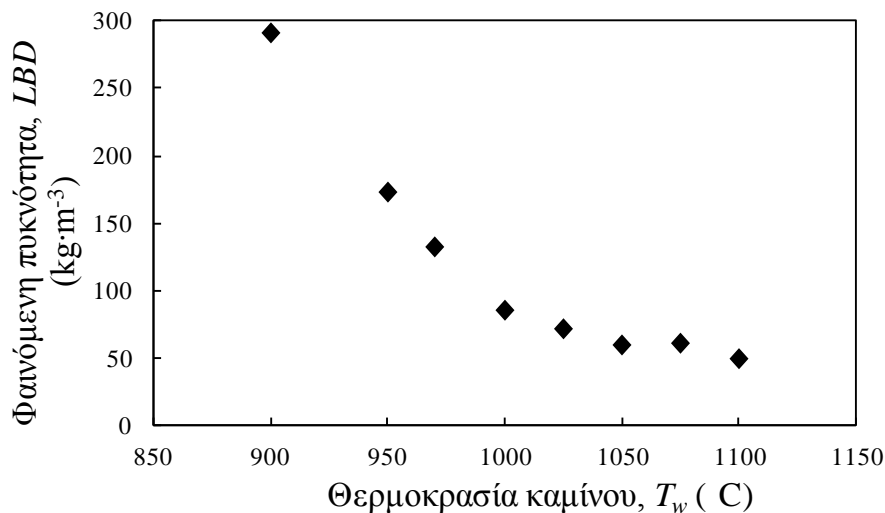
Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται δεν τροφοδοτείται αέρας εντός του θαλάμου κατά την διάρκεια κατεργασίας των δειγμάτων περλίτη. Εξαιρέση αποτελεί η διόγκωση του δείγματος CHM12 όπου ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  αλλά λόγω της πολύ χαμηλής παροχής του, αναμένεται να μην επηρεάζει σημαντικά την τελική φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων. Στο Σχήμα 6.55 που ακολουθεί παρουσιάζεται η τελική φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων CHM μετά από κατεργασία στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης για διάφορα θερμοκρασιακά προφίλ του θαλάμου. Στον οριζόντιο άξονα σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία τοιχώματος για της 6<sup>ης</sup> ζώνης σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 6.55. Η επίδραση της θερμοκρασιακής κατανομής του θαλάμου διόγκωσης στην τελική φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων δειγμάτων CHM.

Η επίδραση της θερμοκρασίας του θαλάμου διόγκωσης είναι σημαντική στην τελική φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων προϊόντων. Στις περιπτώσεις ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας του θαλάμου διόγκωσης η θερμοκρασία καμίνου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1000 °C έτσι ώστε η φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος να είναι χαμηλότερη από 100 kg·m<sup>-3</sup> ενώ για τις περιπτώσεις που η θερμοκρασία κατά μήκος του θαλάμου παρουσιάζει διαβάθμιση η θερμοκρασία της 6<sup>ης</sup> ζώνης πρέπει να ξεπεράσει τους 1100 °C. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του θαλάμου στους 1200 °C έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων κάτω των 80 kg·m<sup>-3</sup> σε όλες τις περιπτώσεις.

Στο σχήμα 6.56 παρουσιάζεται η φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου περλίτη από τον Τράχηλα όταν κατεργάζονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος (μόνο ισοθερμοκρασιακά).

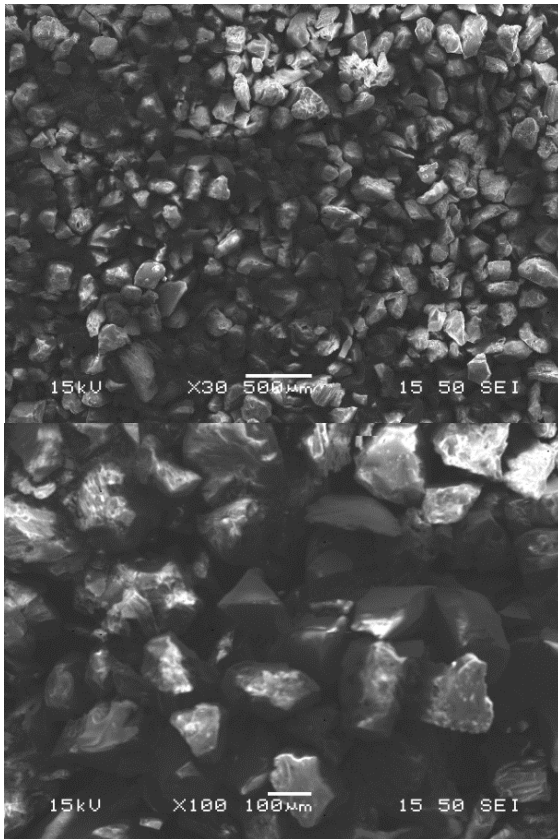


Σχήμα 6.56. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου. Παράμετροι: Α ύλη TR-I, Τροφοδοσία 3,  $Q_{air,in} = 0L \cdot min^{-1}$ .

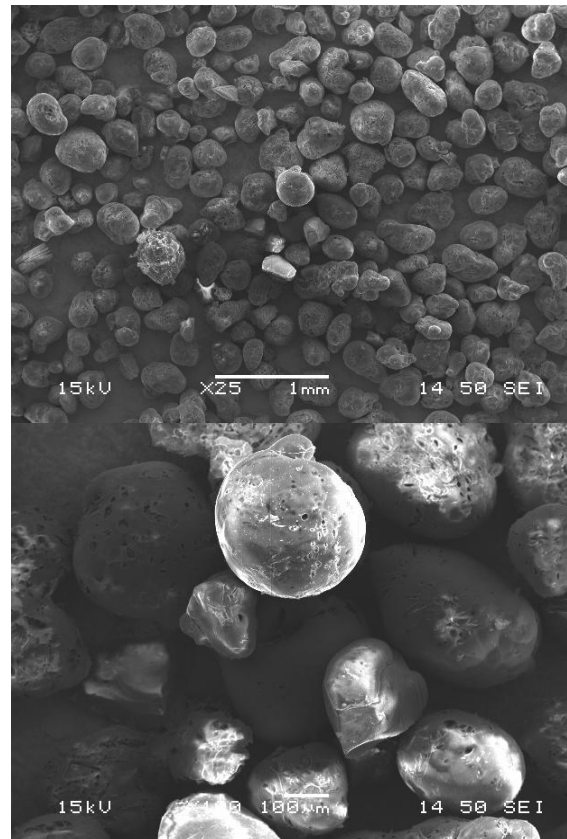
Και σε αυτή την περίπτωση που η πρώτη ύλη χαρακτηρίζεται από ευρεία κοκκομετρία η θερμοκρασία του θαλάμου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1000 °C έτσι ώστε η φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος να είναι έχει τιμή μικρότερη των 100 kg·m<sup>-3</sup>.

Στην συνέχεια παρατίθενται εικόνες δευτερευόντων ηλεκτρονίων των δειγμάτων CHM1 έως CHM6 τα οποία διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας και για διαφορετικές θερμοκρασίες τοιχώματος. Για λόγους σύγκρισης παρατίθενται και αντίστοιχες εικόνες της πρώτης ύλης.

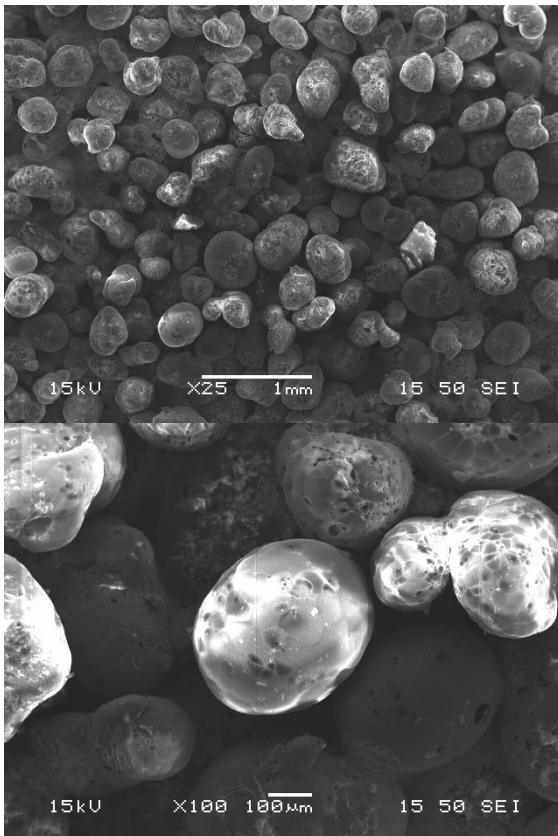
Πρώτη ύλη



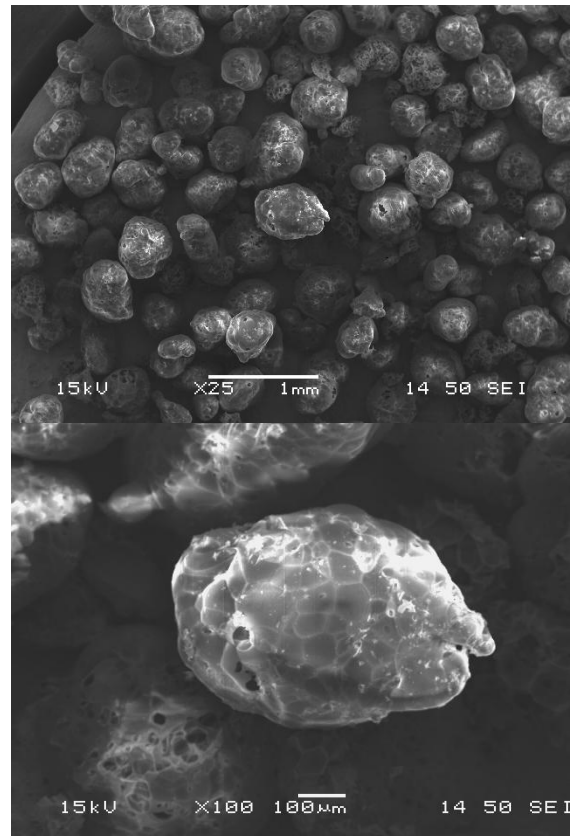
$T_w = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$



$T_w = 950 \text{ } ^\circ\text{C}$

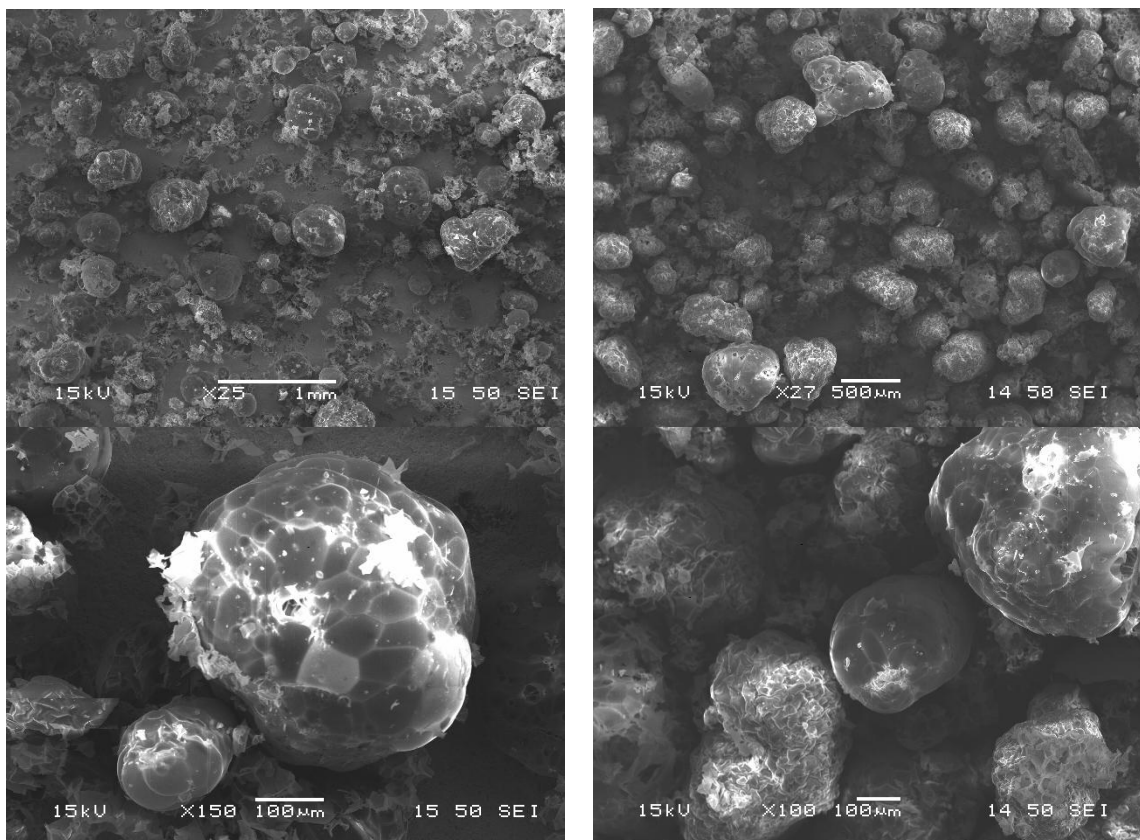


$T_w = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$



$T_w = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_w = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$

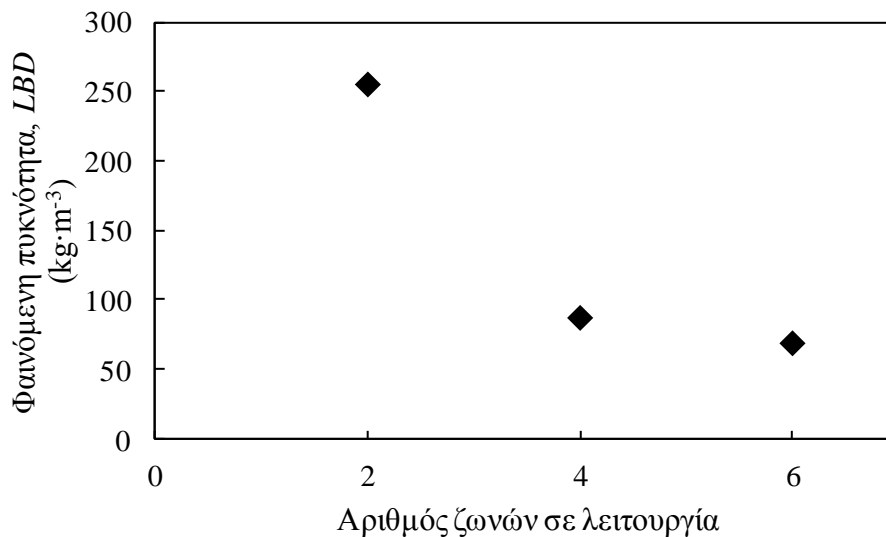


Σχήμα 6.57.Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων του δείγματος περλίτη CHM στην αρχική του μορφή και μετά από κατεργασία σε διάφορες θερμοκρασίες στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

Διακρίνεται ότι για θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$  το μεγαλύτερο μέρος του δείγματος αποτελείται από διογκωμένους κόκκους σφαιρικού σχήματος και κυψελοειδούς δομής εις βάρος των συμπαγών και γωνιωδών αδιόγκωτων τεμαχιδίων που κυριαρχούν στην πρώτη ύλη αλλά και όταν η θερμοκρασία κατεργασίας του δείγματος είναι  $900 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

#### Λειτουργία ορισμένων θερμικών αντιστάσεων

Στο διάγραμμα της εικόνας 6.58 παρουσιάζεται η φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων προϊόντων σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κατά τις οποίες ο αριθμός των εν λειτουργία ζωνών θέρμανσης διαφέρει. Μελετάται η διόγκωση του δείγματος CHM στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο με τις 2, 4 και 6 θερμικές ζώνες σε θερμοκρασία  $1100 \text{ } ^\circ\text{C}$  και χωρίς τροφοδοσία αέρα.



Σχήμα 6.58. Μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος CHM συναρτήσει του αριθμού των εν λειτουργία θερμικών αντιστάσεων (ζωνών).

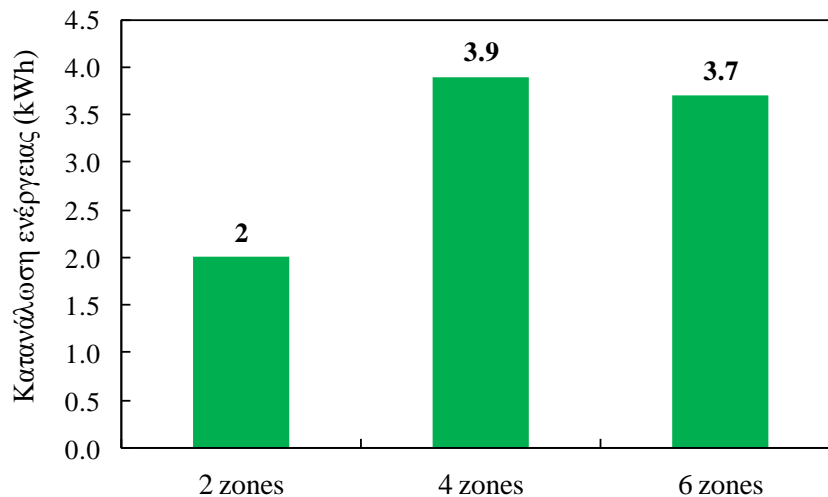
Όπως φαίνεται η λειτουργία τουλάχιστον τεσσάρων από τις έξι ζώνες φαίνεται να είναι απαραίτητη έτσι ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική θέρμανση του κόκκου που θα οδηγήσει σε διόγκωση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος της καμίνου στις περιπτώσεις λειτουργίας μέρους ή όλων των αντιστάσεων

Πίνακας 6.25: Κατανομή θερμοκρασίας της καμίνου συναρτήσει του αριθμού των αντιστάσεων θέρμανσης σε λειτουργία

| Ζώνη<br>θερμοκρασίας | Θερμοκρασία ζωνών, $T_w$ (°C) |         |         |
|----------------------|-------------------------------|---------|---------|
|                      | 2 ζώνες                       | 4 ζώνες | 6 ζώνες |
| $T_1$                | 1100                          | 1100    | 1100    |
| $T_2$                | 1100                          | 1100    | 1100    |
| $T_3$                | 883                           | 1100    | 1100    |
| $T_4$                | 352                           | 1100    | 1100    |
| $T_5$                | 99                            | 853     | 1100    |
| $T_6$                | 46                            | 327     | 1100    |

Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.21 όταν 2 ή 4 ζώνες θέρμανσης είναι σε λειτουργία, μέρος της προσφερόμενης ενέργειας μεταφέρεται στη επόμενη ζώνη η οποία παρότι δεν έχει τεθεί σε λειτουργία αποκτά θερμοκρασία που ξεπερνά τους 800° C και στις δύο περιπτώσεις. Η διάχυση θερμότητας πραγματοποιείται και στις υπόλοιπες ζώνες σε μικρότερο βέβαια βαθμό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απώλεια θερμότητας από τις ζώνες των οποίων οι θερμικές αντιστάσεις είναι σε λειτουργία να οδηγεί σε συνεχή λειτουργία αυτών με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας από την κάθε αντίσταση. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος θέρμανσης για τις περιπτώσεις που περιγράφονται στο διάγραμμα του σχήματος 6.58.

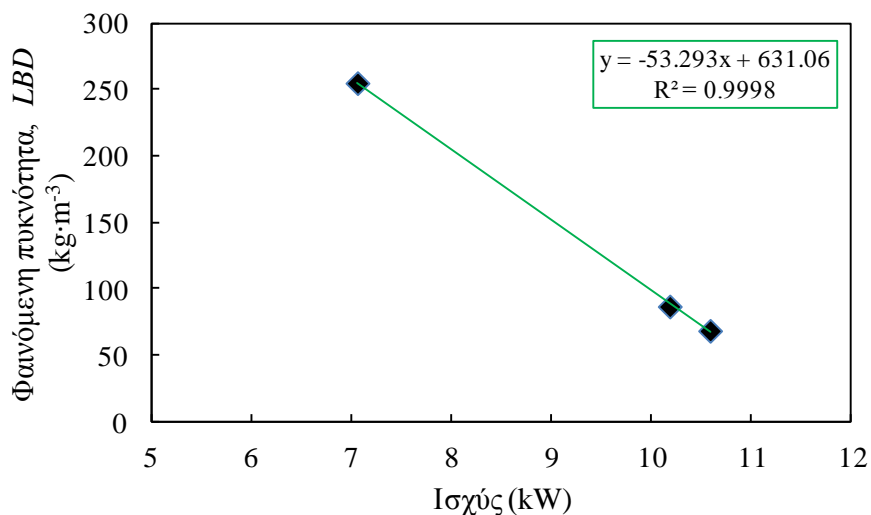




Σχήμα 6.59. Η κατανάλωση ενέργειας για την διόγκωση 1 kg περλίτη συναρτήσει των εν λειτουργία θερμικών ζωνών.

Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος στην περίπτωση που όλες οι ζώνες θέρμανσης λειτουργούν είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση κατά την οποία 4 από αυτές είναι σε λειτουργία. Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζεται μειωμένη στην περίπτωση που μόνο δύο από τις έξι θερμικές ζώνες είναι σε λειτουργία όμως στην περίπτωση αυτή η διόγκωση των κόκκων είναι μη-επαρκής όπως έδειξε το διάγραμμα της εικόνας 6.58. Ο θάλαμος θέρμανσης και το σύστημα θέρμανσης που απαρτίζουν την κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε η θέρμανσή της να επιτυγχάνεται με λειτουργία και των 6 ζευγών θερμικών αντιστάσεων, και βάσει αυτού σχεδιάστηκε η μόνωση του συστήματος. Σε διαφορετική περίπτωση, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνει και η αποδοτικότητα της μεθόδου μειώνεται.

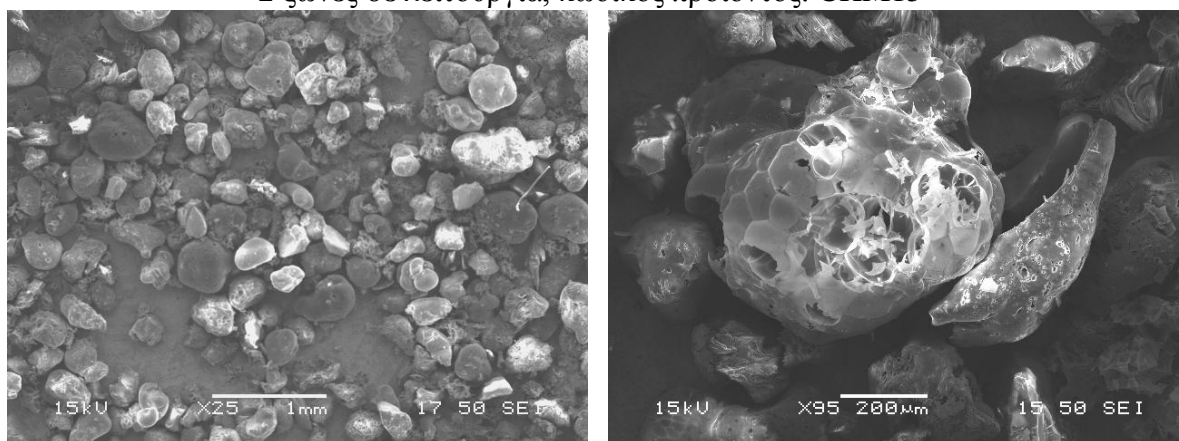
Στα πειράματα που παρουσιάστηκαν παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία μέρους των θερμικών αντιστάσεων της ηλεκτρικής κάμινου επιδρά στη λειτουργία του τροφοδότη επηρεάζοντας τον ρυθμό περιστροφής του. Σκοπεύοντας στην απομόνωση αυτής της παραμέτρου και τον προσδιορισμό του συσχετισμού μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας και της φαινόμενης πυκνότητας του προϊόντος μελετήθηκε η ισχύς του συστήματος για την διόγκωση των δειγμάτων που παρουσιάστηκαν θεωρώντας ότι η λειτουργία της κάμινο διατηρείται για 1 ώρα και η ροή μάζας στην κάμινο είναι χρονικά σταθερή.



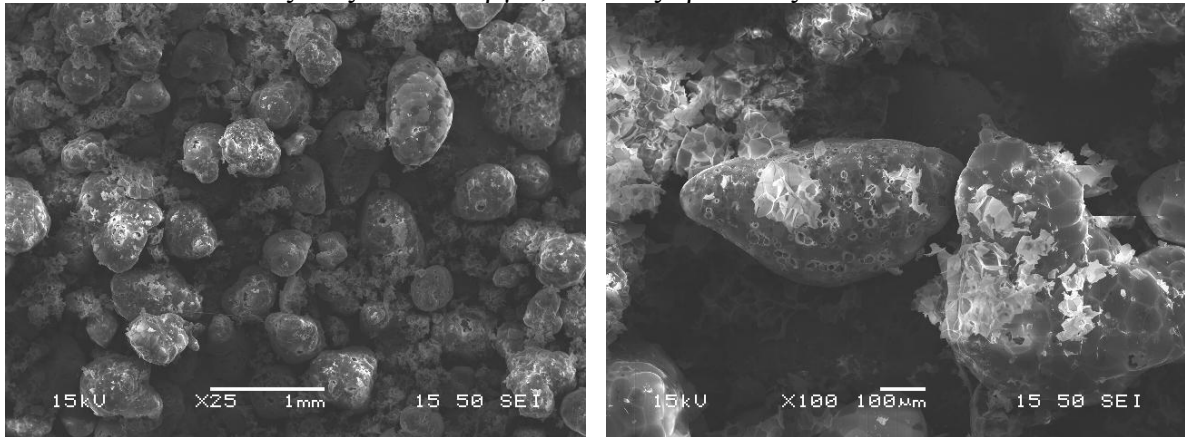
Σχήμα 6.60. Συσχετισμός της ισχύος του συστήματος και της φαινόμενης πυκνότητας του διογκωμένου προϊόντος.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.60 φαίνεται ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ισχύος και της φαινόμενης πυκνότητας των διογκωμένων δειγμάτων και αυξάνοντας τη ισχύ του συστήματος μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων προϊόντων λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας που προσδίδεται στο σύστημα. Στην συνέχεια παρατίθενται εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δείγματος CHM το οποίο κατεργάστηκε στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης ενώ ήταν σε λειτουργία 2, 4 και 6 ζώνες θέρμανσης σε θερμοκρασία 1100 °C.

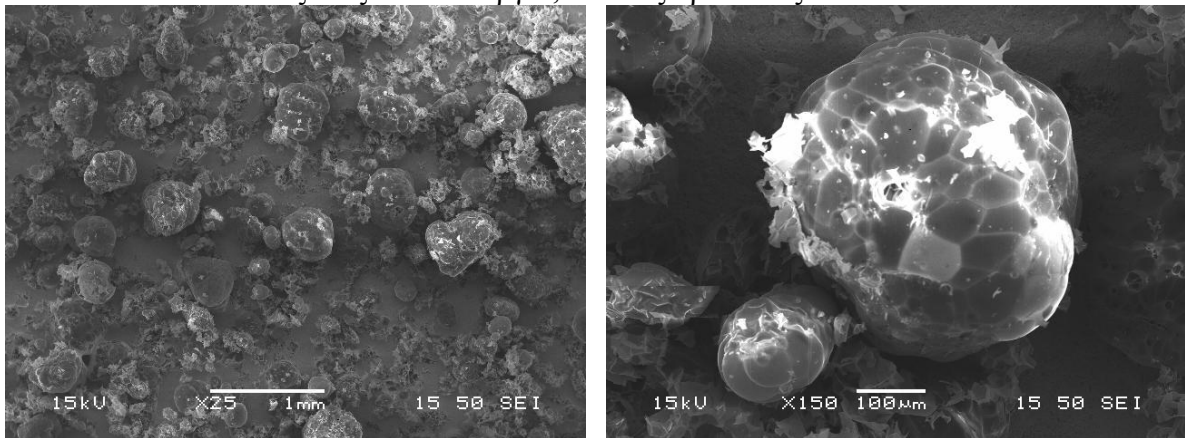
2 ζώνες σε λειτουργία, κωδικός προϊόντος: CHM15



## 4 ζώνες σε λειτουργία, κωδικός προϊόντος: CHM16



## 6 ζώνες σε λειτουργία, κωδικός προϊόντος: CHM4



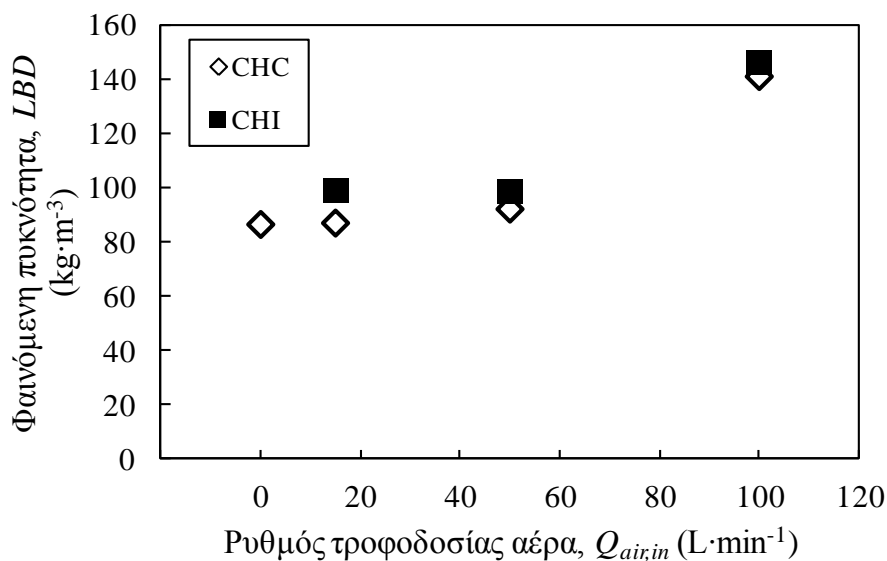
Σχήμα 6.61. Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων του δείγματος Τσιγκράδου CHM κατεργασμένου ενώ ήταν σε λειτουργία 2, 4 και 6 ζώνες θέρμανσης της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης σε θερμοκρασία 1100 °C.

Από τις εικόνες του σχήματος 6.61 διακρίνεται ότι όσο μικρότερος αριθμός ζωνών είναι σε λειτουργία τόσο λιγότεροι διογκωμένοι κόκκοι διακρίνονται στο δείγμα. Οι αδιόγκωτοι κόκκοι διακρίνονται εύκολα λόγω του γωνιώδους σχήματος τους και της συμπαγούς μορφής του. Επιπλέον, φαίνεται ότι όσο αυξάνει ο αριθμός των εν λειτουργία ζωνών, τόσο αυξάνει και το περιεχόμενο των δειγμάτων σε φυλλώδη τεμάχια (προϊόντα θραύσης τοιχωμάτων).

### 6.6.2. Ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα

Η παροχή προθερμασμένου αέρα πραγματοποιείται έτσι ώστε να ρυθμιστεί ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων του περλίτη εντός του θαλάμου διόγκωσης. Όπως όμως φάνηκε και από τα αποτελέσματα της μελέτης CFD (Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>), η τροφοδοσία του αέρα επιδρά σημαντικά και στην κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου διόγκωσης. Όσον αφορά στην διόγκωση των τεμαχιδίων φαίνεται ότι αυτή δυσχεραίνεται όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα αυξάνει. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα του σχήματος 6.62 στο οποίο παρουσιάζεται η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας δειγμάτων

περλίτη που κατεργάστηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης, με ρυθμό τροφοδοσίας αέρα που ποικίλλει μεταξύ 0-100 L·min<sup>-1</sup>.

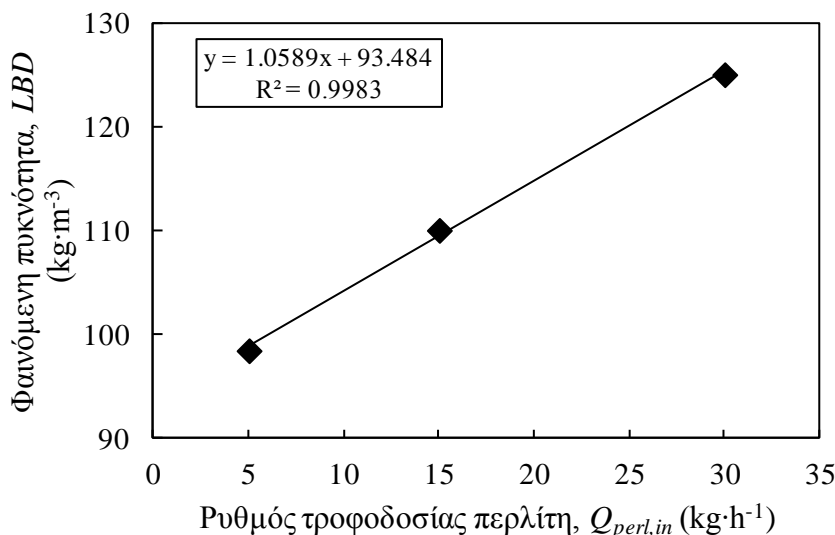


Σχήμα 6.67. Η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα στην φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος. Παράμετροι: Α' ύλη CH-I και CH-T, Τροφοδοσία 3,  $T_w = 700-1200^{\circ}\text{C}$ , βήμα  $100^{\circ}\text{C}$ .

Φαίνεται ότι για τα δείγματα αυτά η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα όταν αυτός κυμαίνεται μεταξύ 0-50 L·min<sup>-1</sup> είναι ασήμαντη. Αύξηση όμως του ρυθμού πέραν των 100 L·min<sup>-1</sup> οδηγεί σε σημαντική αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του διογκωμένου περλίτη και θα πρέπει να αποφεύγεται. Ένα ακόμα μειονέκτημα που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι μεγάλος αποτελεί και η αύξηση των θερμικών απωλειών τους συστήματος με την μορφή αισθητής θερμότητας στον εξερχόμενο αέρα.

### 6.6.3. Ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης

Ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης αποτελεί σημαντική παράμετρο διότι σχετίζεται άμεσα με την παραγωγικότητα της νέας καμίνου. Για την μελέτη επίδρασης του ρυθμού τροφοδοσίας του περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διενεργήθηκαν τρία πειράματα στα οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας του περλίτη ήταν 5, 15 και 30 kg περλίτη ανά ώρα.

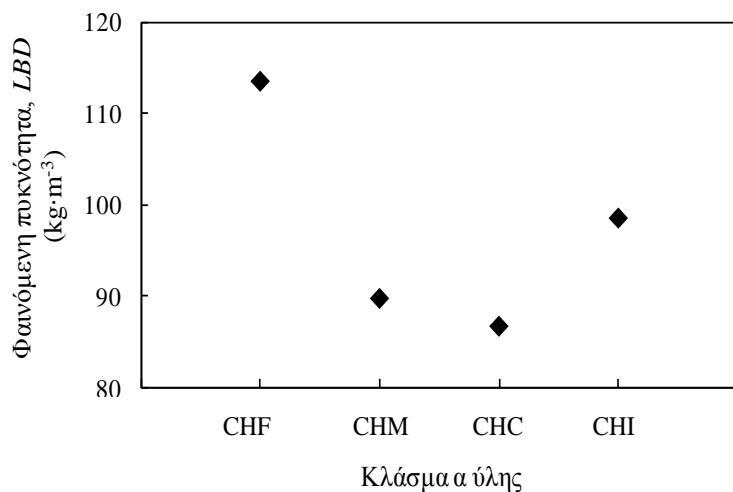


Σχήμα 6.63. Η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας της πρώτης ύλης στην φαινόμενη πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος. Παράμετροι: Α' ύλη CH-I,  $T_w = 700/1200$  °C,  $Q_{air,in} = 50$  L·min<sup>-1</sup>.

Η φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.63 συνδέεται με το ρυθμό τροφοδοσίας του περλίτη με γραμμική σχέση. Αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας από 5 σε 30 kg·h<sup>-1</sup> έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του περλίτη κατά 25% περίπου. Λόγω αυτού αλλά και λόγω του γεγονότος ότι σκοπός της παρούσας έρευνας δεν είναι η μελέτη παραγωγικότητας, ο ρυθμός τροφοδοσίας του περλίτη διατηρήθηκε στην πλειονότητα των πειραμάτων σε χαμηλά επίπεδα (3-5 kg·h<sup>-1</sup>).

#### 6.6.4. Κοκκομετρική κατανομή της τροφοδοσίας

Η κοκκομετρική κατανομή της πρώτης ύλης έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την διόγκωση του περλίτη. Όπως έχει αναφερθεί οι αρχικές πρώτες ύλες περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδου χωρίστηκαν σε τρία κοκκομετρικά κλάσματα με σκοπό τον περιορισμό του εύρους κοκκομετρίας τους. Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται οι βασικές ιδιότητες των κλασμάτων αυτών και του αρχικού δείγματος μετά από διόγκωση στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο υπό συνθήκες βάρθρωσης της θερμοκρασίας της κατά μήκος ( $T_1 = 700$  °C,  $T_6 = 1200$  °C, βήμα 100 °C) και με τροφοδοσία αέρα με ρυθμό 15 L·min<sup>-1</sup>.

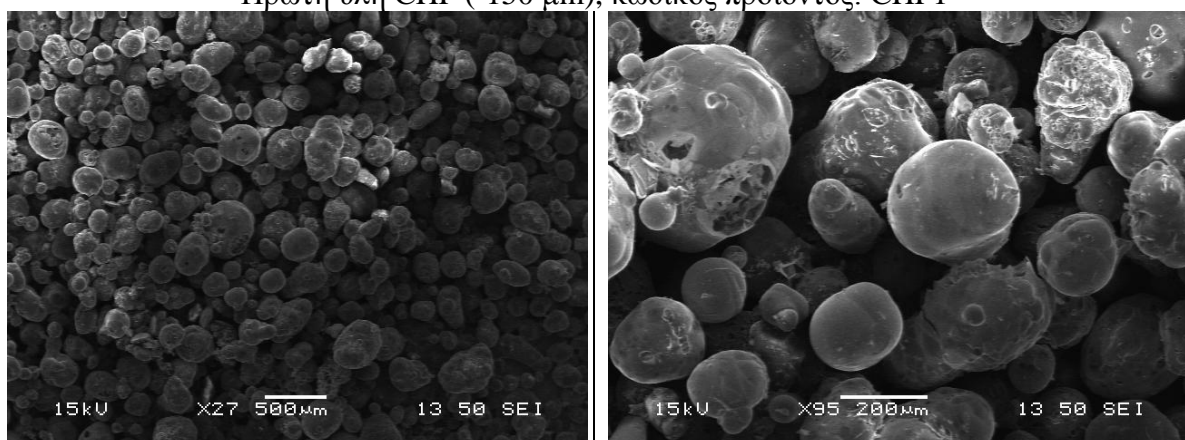


| Κωδικός δείγματος | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/<br>g perl | c.s.<br>p.s.i. |
|-------------------|---------------------------------------|----------------|
| CHF               | 3.12                                  | 72.0           |
| CHM               | 4.09                                  | 57.2           |
| CHC               | 4.41                                  | 40.6           |
| CHI               | 4.20                                  | 61.3           |

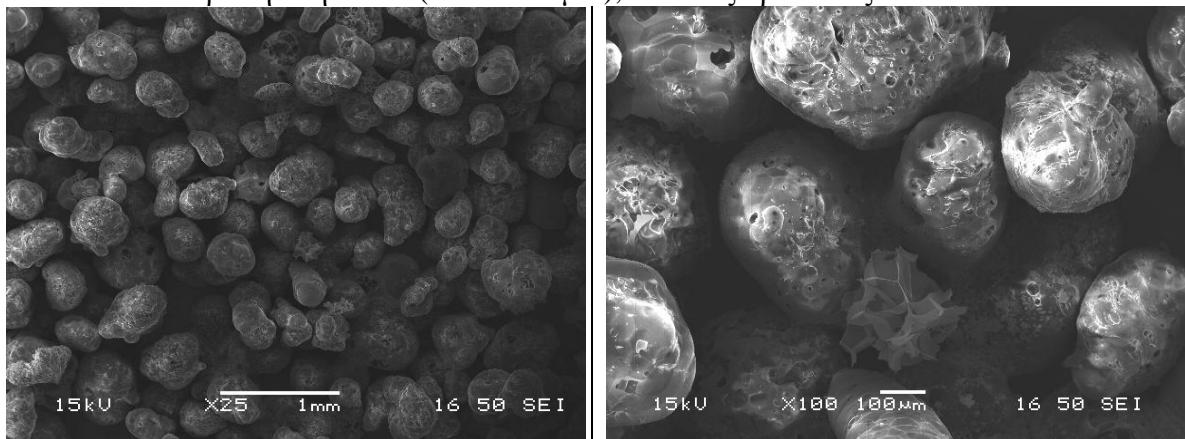
Σχήμα 6.64. Μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας, υδρο-απορροφητικότητας και αντοχής σε συμπίεση συναρτήσει της κοκκομετρικής κατανομής της πρώτης ύλης.

Η μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα αντιστοιχεί στο πλέον λεπτόκοκκο κλάσμα CHF με εύρος κοκκομετρίας -150 μm ενώ το ίδιο δείγμα παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντοχή σε συμπίεση. Το δείγμα μέσης κοκκομετρίας CHM παρουσιάζει ιδανικό συνδυασμό χαμηλής φαινόμενης πυκνότητας (89.7 kg·m<sup>-3</sup>) και υδρο-απορροφητικότητας (4.06 gr. H<sub>2</sub>O/gr. perl) και αυξημένης αντοχής σε συμπίεσης (57.2 p.s.i.). Την μικρότερη αντοχή σε συμπίεση παρουσιάζει το χονδρόκοκκο κλάσμα CHC. Οι τιμές των ιδιοτήτων του αρχικού κλάσματος CHI είναι ενδιάμεσες των ιδιοτήτων των παραγόμενων κοκκομετρικών του κλασμάτων CHF, CHM, CHC, όπως είναι λογικό. Πάντως, φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση, ακόμα και για δείγματα διαφορετικής κοκκομετρίας ότι όσο χαμηλότερη είναι η φαινόμενη πυκνότητα τους τόσο χαμηλότερη αντοχή σε συμπίεση θα παρουσιάζουν.

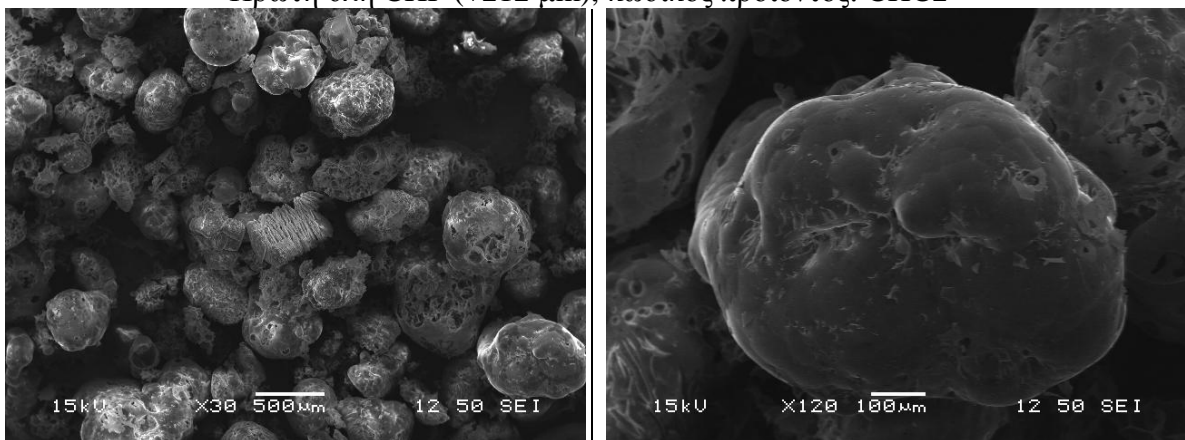
Πρώτη ύλη CHF (-150 μm), κωδικός προϊόντος: CHF1



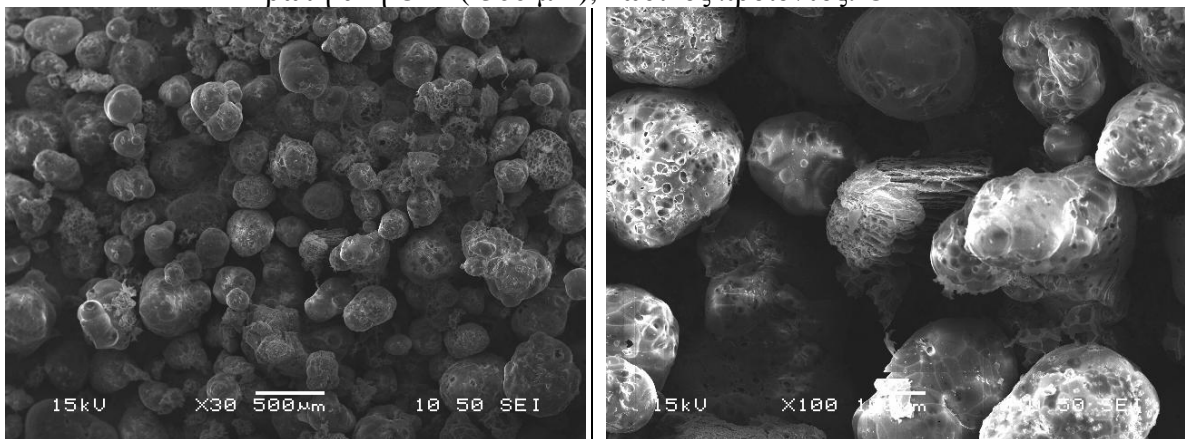
Πρώτη ύλη CHM (+150-212  $\mu\text{m}$ ), κωδικός προϊόντος: CHM13



Πρώτη ύλη CHF (+212  $\mu\text{m}$ ), κωδικός προϊόντος: CHC2



Πρώτη ύλη CHI (-300  $\mu\text{m}$ ), κωδικός προϊόντος: CHI1



Σχήμα 6.70. Εικόνες δευτερευόντων ηλεκτρονίων διογκωμένων δειγμάτων περλίτη Τσιγκράδου που προέκυψαν από κατεργασία πρώτης ύλης διαφορετικής κοκκομετρίας.

Διακρίνεται κοκκομετρική ανομοιογένεια του διογκωμένου προϊόντος όταν για την παραγωγή του χρησιμοποιείται το δείγμα CHI. Στην περίπτωση που στην κάμινο τροφοδοτήθηκε πρώτη ύλη στενότερης κοκκομετρίας οι διογκωμένοι κόκκοι παρουσιάζουν ομοιογένεια ως προς το μέγεθός τους. Όσον αφορά στα στενά κοκκομετρικά κλάσματα, φαίνεται από τις παρακάτω εικόνες ότι το δείγμα που προέκυψε από διόγκωση του κλάσματος CHC αποτελείται από

περισσότερους σκασμένους κόκκους και ανοιχτούς πόρους, γεγονός που δικαιολογεί την μεγαλύτερη υδρο-απορροφητικότητα του σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στενά κλάσματα.

### 6.7. Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το σύνολο των πειραμάτων διόγκωσης περλίτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τα ορυχεία του Τράχηλα και του Τσιγκράδου της νήσου Μήλου. Η διόγκωση διεξήχθη στα ως έχει δείγματα και σε τρία κλάσματα αυτών στενότερης κοκκομετρικής κατανομής τα οποία δημιουργήθηκαν μετά από κοσκίνηση των αρχικών. Η διόγκωση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στη νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης, πειράματα διόγκωσης διεξήχθησαν στη συμβατική κάθετη έμφλογη κάμινο που χρησιμοποιείται σήμερα στη βιομηχανία περλίτη.

Η αξιολόγηση της ποιότητας των διογκωμένων προϊόντων έγινε με τη μέτρηση των κυριότερων ιδιοτήτων τους, οι οποίες καθορίζουν και την καταλληλότητα κάθε προϊόντος για διαφορετικές εφαρμογές. Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν είναι: η φαινόμενη (loose bulk density) και η πραγματική (skeletal) πυκνότητα, η υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα, η αντοχή σε συμπίεση στα 3 cm, η απώλεια πύρωσης, η κοκκομετρική κατανομή αλλά και η περιεκτικότητα των προϊόντων διόγκωσης σε διογκωμένους, σκασμένους/θρυμματισμένους και αδιόγκωτους κόκκους. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση ιδιοτήτων των προϊόντων των δύο μεθόδων είναι τα εξής:

- Η κάθετη ηλεκτρική κάμινο μπορεί με επιτυχία να διογκώσει περλίτες αρχικής κοκκομετρίας +70-300  $\mu\text{m}$  από την Μήλο. Η τελική φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων μπορεί να είναι μικρότερη των  $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , γεγονός που καθιστά τη νέα μέθοδο διόγκωσης ιδιαίτερα αποτελεσματική και ανταγωνιστική της υπάρχουσας συμβατικής μεθόδου.
- Η υδρο-απορροφητικότητα των δειγμάτων CH που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο παρουσιάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις μειωμένη μέχρι και 20% σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην έλαιο-απορροφητικότητα η οποία παρουσιάζει μείωση σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις η οποία φθάνει το 17% σε σύγκριση με την έλαιο-απορροφητικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων. Η διόγκωση του δείγματος TR στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο δεν επιφέρει ουσιαστική βελτίωση στην απορροφητικότητα των δειγμάτων σε νερό και έλαιο εκτός κάποιων εξαιρέσεων.



- Η αντοχή σε συμπίεση των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι αρκετά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Η παρατήρηση αυτή είναι ανεξάρτητη των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης ενώ βελτίωση της αντοχής των περλιτών σε συμπίεση φτάνει μέχρι και το 600%, περίπου.
- Μορφολογικά, τα διογκωμένα δείγματα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου έχουν πιο σφαιρικό σχήμα και περιορισμένο επιφανειακό πορώδες σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.κ
- Η διόγκωση περλίτη στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο προσφέρει διογκωμένους περλίτες στενότερου κοκκομετρικού εύρους και μεγαλύτερης μέσης κοκκομετρίας σε σύγκριση με συμβατικά διογκωμένα δείγματα αντίστοιχων φαινόμενων πυκνοτήτων.
- Σε αρκετές περιπτώσεις τα δείγματα διογκωμένου περλίτη που προέρχονται από την νέα κάμινο περιέχουν μεγαλύτερο κατά βάρος ποσοστό διογκωμένων κόκκων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η περιεκτικότητα των δειγμάτων αυτών είναι μέχρι και 50% μεγαλύτερη σε διογκωμένους κόκκους σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συμβατικά διογκωμένα δείγματα.
- Ο διαχωρισμός του επαρκώς διογκωμένου κλάσματος των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο, προσφέρει προϊόν μεγαλύτερης υδρο-απορροφητικότητας σε σύγκριση με το αρχικό του, μικρότερης όμως σε σχέση με άλλα δείγματα διογκωμένου περλίτη φαινόμενης πυκνότητας αντίστοιχης με αυτής του διαχωρισμένου κλάσματος.
- Η απώλεια πύρωσης των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων είναι μεγαλύτερη από την απώλεια πύρωσης που παρουσιάζουν οι διογκωμένοι περλίτες της ηλεκτρικής καμίνου. Τα δείγματα TRI και CHI που κατεργάζονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο έχουν απώλεια πύρωσης που αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στο 40% του περιεχόμενου νερού που είχαν πριν από τη διόγκωση.
- Όσον αφορά στην πραγματική πυκνότητα (skeletal density) φαίνεται ότι στα συμβατικά διογκωμένα δείγματα η εξάρτηση της με την φαινόμενη πυκνότητα είναι περισσότερο γραμμικού τύπου ενώ ο βέλτιστος συνδυασμός των δύο μεγεθών επιτυγχάνεται σε φαινόμενη πυκνότητα  $90-100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ανεξάρτητα της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται. Τα προϊόντα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου παρουσιάζουν πιο ευδιάκριτο βέλτιστο σημείο που για τα δείγματα του Τράχηλα βρίσκεται στην φαινόμενη πυκνότητα  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ενώ για τα δείγματα Τσιγκράδου σε  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Η κεντρική ιδιότητα του περλίτη βρέθηκε να είναι η φαινόμενη πυκνότητα και βάσει αυτού διερευνήθηκε και τελικά προσδιορίστηκε μαθηματικός συσχετισμός μεταξύ της κεντρικής αυτής ιδιότητας και των υπολοίπων σημαντικών ιδιοτήτων του περλίτη. Στις υπόλοιπες σημαντικές ιδιότητες του περλίτη εντάσσεται η απορροφητική του ικανότητα σε έλαιο και νερό αλλά και η αντοχή του σε συμπίεση στα 3 cm. Οι ιδιότητες αυτές θεωρούνται περισσότερο σημαντικές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διότι αποτελούν τα βασικά κριτήρια για την χρησιμοποίηση των λεπτομερών δειγμάτων διογκωμένου περλίτη σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι μαθηματικοί συσχετισμοί διαφέρουν ανάλογα με την μέθοδο διόγκωσης που χρησιμοποιείται και μπορεί να είναι γραμμικές, εκθετικές ή πολυωνυμικές συναρτήσεις, ανάλογα με τον τύπο εξίσωσης που παρουσίαζε καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των αντίστοιχων ιδιοτήτων του διογκωμένου περλίτη σύμφωνα με την φαινόμενη πυκνότητα του, την χημική σύσταση της πρώτης ύλης (περλίτης Τράχηλα ή Τσιγκράδου) και ανάλογα με την μέθοδο διόγκωσης που εφαρμόζεται. Η ακρίβεια των υπολογισμών εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ). Οι εξισώσεις που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στο Παράρτημα V.

Όσον αφορά στις διαφορές των διογκωμένων δειγμάτων CH και TR, που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο, φάνηκε ότι:

- Τα δείγματα TR διογκώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση τα δείγματα CH όταν κατεργάζονται υπό τις ίδιες συνθήκες. Αιτία αυτού είναι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του περλίτη TR σε νερό και αλκάλια, αφού και τα δύο συστατικά επιδρούν στην μείωση του ιξώδους του κόκκου, όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο.
- Ο βέλτιστος συνδυασμός φαινόμενης πυκνότητας-πραγματικής πυκνότητας παρατηρείται σε δείγματα φαινόμενης πυκνότητας  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  στους περλίτες TR, και σε δείγματα φαινόμενης πυκνότητας  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  στους περλίτες CH.

Οι συνθήκες λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου επηρεάζουν σημαντικά την φαινόμενη πυκνότητα των διογκωμένων περλιτών. Συγκεκριμένα φάνηκε ότι:

- σε συνθήκες ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας η ελάχιστη θερμοκρασία της καμίνου έτσι ώστε να παραχθεί διογκωμένος περλίτης με φαινόμενη πυκνότητα μικρότερη από  $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  είναι  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ για να γίνει αυτό στην περίπτωση αύξουσας θερμοκρασίας καμίνου η θερμοκρασία της 6<sup>ης</sup> ζώνης πρέπει να ξεπεράσει τους  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της καμίνου στους  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  (περίπτωση ισοθερμοκρασιακής

λειτουργίας) ή της 6<sup>ης</sup> μόνο ζώνης στη θερμοκρασία αυτή επιφέρει διόγκωση του δείγματος CHI σε φαινόμενη πυκνότητα μικρότερη από  $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- η λειτουργία των 6 θερμικών ζωνών κρίνεται απαραίτητη για την εξασφάλιση ομαλής λειτουργίας του συστήματος αλλά και την επίτευξη μέγιστης παραγωγικότητας για δεδομένη κατανάλωση ενέργειας.
- η τροφοδοσία του αέρα αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα της όλης διεργασίας καθώς επιδρά στην ρύθμιση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης και του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων. Για ρυθμό τροφοδοσίας αέρα μέχρι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του περλίτη δεν επηρεάζονται σημαντικά ενώ όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του φτάσει τα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  η θέρμανση των τεμαχιδίων επιβαρύνεται λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας εντός της καμίνου αλλά και του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων και η τελική φαινόμενη πυκνότητα αυξάνει σημαντικά.
- Τέλος, όσον αφορά στον ρυθμό τροφοδοσίας του περλίτη, παρότι στη πλειονότητα των πειραμάτων ο περλίτης τροφοδοτούταν με ρυθμό μικρότερο των  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , τα πειράματα μελέτης της παραμέτρου αυτής έδειξαν ότι η διόγκωση των δειγμάτων είναι ικανοποιητική ακόμα και όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας φτάνει τα  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΔΙΩΝ

### ΠΕΡΛΙΤΗ ΣΕ ΚΑΘΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη και παρουσίαση ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών και πρόβλεψης του βαθμού διόγκωσης των τεμαχιδίων περλίτη, που τροφοδοτούνται στην κάθετη κάμινο διόγκωσης, ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του τροφοδοτούμενου υλικού και τις συνθήκες στις οποίες γίνεται η επεξεργασία τους στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής με στόχο την αναλυτική και σε βάθος μελέτη της επίδρασης που έχουν στο βαθμό διόγκωσης του περλίτη, τόσο χαρακτηριστικές ιδιότητες της πρώτης ύλης, όπως είναι η αρχική διάμετρος κόκκου, η χημική της σύσταση και η περιεκτικότητα της σε νερό, όσο και λειτουργικές παράμετροι της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης, όπως είναι η θερμοκρασία του τοιχώματος, ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα, η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα κλπ. Επιπλέον, το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε παρέχει την δυνατότητα απεικόνισης της μεταβολής βασικών φυσικών μεγεθών των τεμαχιδίων του περλίτη, όπως είναι η ταχύτητά, η θερμοκρασία και η ακτίνα τους, κατά την κίνηση τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης.

Για την εξασφάλιση της δυνατότητας εφαρμογής του μοντέλου σε μια όσο γίνεται μεγαλύτερη περιοχή τιμών των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος, έχουν ληφθεί υπόψη οι αλλαγές που συμβαίνουν στις φυσικοχημικές ιδιότητες του περλίτη κατά τη σταδιακή θέρμανση του στην κάμινο, με την εισαγωγή κατάλληλων εξισώσεων που προβλέπουν τις τιμές τους συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου αέρα και των τροφοδοτούμενων στην κάμινο τεμαχιδίων περλίτη. Έτσι εισήχθησαν κατάλληλα μοντέλα που υπολογίζουν την ειδική θερμότητα, το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, το ιξώδες, την επιφανειακή τάση κλπ συναρτήσει της θερμοκρασίας τόσο για τον αέρα όσο και για το τεμαχίδιο. Η ευρύτητα του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε επιτρέπει τη μελέτη του συστήματος σε μια εκτεταμένη περιοχή μεταβολής των λειτουργικών παραμέτρων και δίνει τη δυνατότητα βαθύτερης κατανόησης του φαινομένου της διόγκωσης καθώς και της εξέλιξης της διεργασίας, όπως αυτή συμβαίνει εντός του θαλάμου θέρμανσης της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης περλίτη. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος παρέχουν τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την βελτιστοποίηση της διεργασίας, κυρίως όσον αφορά την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος.

Ειδικότερα, με το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε γίνεται δυνατή:

- Η πρόβλεψη της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα, κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης.
- Η απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου, λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του τεμαχιδίου και του αέρα καθώς και το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία από το τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης προς το τεμαχίδιο.
- Η πρόβλεψη της μεταβολής της ακτίνας και του βαθμού διόγκωσης του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης
- Η πρόβλεψη της μεταβολής της ταχύτητας του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης
- Η πρόβλεψη της φαινόμενης πυκνότητας του προϊόντος που προκύπτει από τη διόγκωση ακατέργαστου περλίτη στη συγκεκριμένη κάμινο.

### 7.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η μαθηματική μοντελοποίηση της διόγκωσης του περλίτη έχει αναγνωριστεί από διάφορους ερευνητές ότι είναι ένα σημαντικό εργαλείο στην κατανόηση του φαινομένου της διόγκωσης, τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων που την επηρεάζουν, αλλά επίσης και στην βελτιστοποίηση της συνολικής διεργασίας παραγωγής διογκωμένου προϊόντος. Κάτω από αυτή τη σκοπιά η μαθηματική μοντελοποίηση της διόγκωσης περλίτη σε συμβατική κάμινο αποτέλεσε το αντικείμενο της μελέτης ορισμένων ερευνητών.

Πρώτος ο Παπαναστασίου (1979), παρουσίασε μια απλοποιημένη μαθηματική έκφραση των συνήθων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση και την θέρμανση τεμαχιδίου περλίτη σε συνθήκες στρωτής, μεταβατικής και τυρβώδους ροής, που είναι δυνατό να επικρατούν εντός του θαλάμου θέρμανσης των συμβατικών καμίνων διόγκωσης (Papanastasiou, 1979). Επιπλέον, ο ίδιος ερευνητής προχώρησε στον υπολογισμό της ελάχιστης ταχύτητας ρευστοαιώρισης των σωματιδίων, έτσι ώστε να μπορέσει να καθοριστεί ο συσχετισμός του ελάχιστου ρυθμού τροφοδοσίας αέρα και καυσίμου και της κοκκομετρικής κατανομής της τροφοδοτούμενης πρώτης ύλης. Οι υπολογισμοί του έγιναν με την παραδοχή ότι η πυκνότητα των τεμαχιδίων του περλίτη είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου.

Οι Klipfel et al. ανέπτυξαν έναν κώδικα CFD με σκοπό τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών του πεδίου ροής, όσον αφορά τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης συμβατικής έμφλογης καμίνου σε συντεταγμένες Euler και με βάση αυτόν μελέτησαν την επίδραση που έχουν στο πεδίο ροής οι διάφοροι τύποι καυσίμων (Klipfel et al. 1998). Επιπλέον, με εφαρμογή των συντεταγμένων Lagrange μελέτησαν την τροχιά που

ακολουθούν τα τεμαχίδια εντός του θαλάμου διόγκωσης και προσδιόρισαν την ταχύτητα και τη θερμοκρασία τους κατά μήκος της τροχιάς αυτής. Η ακτινική κατανομή της θερμοκρασίας των κόκκων υπολογίστηκε με εφαρμογή της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή εντός του κόκκου, ενώ ταυτόχρονα υπολογίστηκε και η κατανομή της τιμής του ιξώδους του κόκκου. Μία από τις βασικές παραδοχές που έγιναν για την μελέτη του φαινομένου ήταν ότι όταν η θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του κόκκου πλησιάσει το σημείο μαλάκυνσης του περλίτη, αυτόματα προκαλείται η διόγκωση του αντίστοιχου «στρώματος» που το περιβάλλει κατά 3 φορές με άμεση επίδραση στις διαστάσεις του κόκκου. Με τον τρόπο αυτό η διόγκωση του κόκκου ξεκινά από την επιφάνεια του και προχωρά στο κέντρο λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς που υπάρχει μεταξύ επιφανείας και κέντρου.

Η διόγκωση τεμαχιδίων περλίτη αποτέλεσε επίσης αντικείμενο έρευνας των Zahringer et al (Zahringer et al. 2001). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της διόγκωσης ενός κόκκου περλίτη. Αναλυτικότερα, το μαθηματικό μοντέλο στηρίζεται σ' ένα μοντέλο το οποίο είχε αναπτυχθεί προηγουμένως από τους Proussevitch και Sahagian με στόχο την προσομοίωση της ανάπτυξης φυσαλίδων στη μάζα ανερχόμενου μάγματος. Βασική υπόθεση που έκαναν οι Zahringer et al στην προσαρμογή του μοντέλου ήταν ότι η διόγκωση του περλίτη οφείλεται στην διάχυση του νερού από την κυρίως μάζα του στερεού υλικού προς μία φυσαλίδα αερίου η οποία σχηματίζεται σταδιακά και η οποία διογκώνει τον περλίτη όταν αυτός φθάσει στο σημείο μαλάκυνσης του. Στη μελέτη των Zahringer et al περιλαμβάνεται και εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του περλιτικού τήγματος συναρτήσει τόσο της θερμοκρασίας, όσο και της χημικής τους σύστασης, ενώ λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές των ιδιοτήτων αυτών κατά την εξέλιξη της διόγκωσης και προσδιορίζεται η βαρύτητα που έχει η κάθε μία από αυτές στο συνολικό φαινόμενο. Επιπλέον, οι ερευνητές εφήρμοσαν το μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της διόγκωσης κόκκου περλίτη στη συμβατική έμφλογη κάμινο. Αυτό επετεύχθη με την εισαγωγή ως δεδομένο της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας που βιώνει ο κόκκος το οποίο είχε προσδιοριστεί σε προηγούμενες εργασίες (Zahringer et al., 1997a; Zahringer et al., 1997b; Klipfel et al., 1997; Zahringer, 1998). Οι ερευνητές τελικά προσδιορίζουν ότι οι παράμετροι που έχουν την μεγαλύτερη σημασία στην διόγκωση του περλίτη είναι η περιεκτικότητα του σε νερό, η θερμοκρασία του και κατά επέκταση το ιξώδες και ο συντελεστής διάχυσης του νερού στην μάζα του τήγματος. Στα βασικά αδύναμα σημεία του μαθηματικού αυτού μοντέλου εντάσσεται η παραδοχή ότι όλη η ποσότητα του νερού συντελεί στην διόγκωση του περλίτη αν και, όπως παραδέχονται και οι ίδιοι ερευνητές, μέρος του νερού του περλίτη παραμένει στον κόκκο ακόμα και μετά την διόγκωση του ενώ υπάρχει και μία ακόμα ποσότητα νερού που εξατμίζεται και απομακρύνεται από τον κόκκο πριν συμβεί η διόγκωση.

Επιπλέον, όσων αφορά στις αρχικές διαστάσεις της φυσαλίδας και του κόκκου, οι ερευνητές μεταβάλλουν τον λόγο των όγκων της φυσαλίδας και του κελύφους αλλάζοντας έτσι την συνολική πυκνότητα του αδιόγκωτου κόκκου αλλά και την μάζα του κελύφους που σχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα του κόκκου σε νερό. Τέλος, οι ερευνητές θεωρούν ότι το μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά την διεργασία εφόσον ο υπολογισμένος βαθμός διόγκωσης έχει τιμή 3, τιμή η οποία θεωρείται λογική για την διόγκωση του περλίτη σε συμβατική κάμινο ενώ δεν παρουσιάζεται μελέτη επίδρασης των συνθηκών λειτουργίας της καμίνου έτσι ώστε να φανεί η συμπεριφορά του μαθηματικού μοντέλου για διαφορετικές συνθήκες διόγκωσης.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι οι μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα από διάφορους ερευνητές εστιάζονται στην μοντελοποίηση και προσομοίωση του φαινομένου της διόγκωσης περλίτη, όταν αυτή συμβαίνει σε έμφλογη συμβατική κάμινο διόγκωσης. Η διάταξη της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου καθώς και οι συνθήκες που πραγματοποιήθηκε η διόγκωση στην παρούσα διδακτορική διατριβή, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι τελείως διαφορετικές από αυτές της συμβατικής καμίνου, γι' αυτό και απαιτούν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης. Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ άλλων είναι:

- Η τροφοδοσία του αέρα και του περλίτη γίνεται από το άνω μέρος της καμίνου και με πολύ χαμηλότερες σε σχέση με το συμβατικό φούρνο ταχύτητες.
- Ο αέρας και τα τεμαχίδια του περλίτη κινούνται καθοδικά κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης κυρίως λόγω της επίδρασης της βαρύτητας και όχι ανοδικά όπως στη συμβατική κάμινο
- Η θέρμανση των τεμαχιδίων περλίτη πραγματοποιείται σταδιακά από την είσοδό του στον θάλαμο διόγκωσης έως ότου διανύσει όλο του το μήκος καθώς συναντά συνθήκες διαρκώς αυξανόμενης θερμοκρασίας και όχι απότομα λόγω απευθείας επαφής με τα θερμά καυσαέρια της φλόγας της συμβατικής καμίνου
- Η θέρμανση του τεμαχιδίου πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της ακτινοβολίας από τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου και μέσω συναγωγής με τον αέρα. Οι ίδιοι μηχανισμοί μεταφοράς ισχύουν και στην περίπτωση της συμβατικής μεθόδου διόγκωσης, όμως λόγω του ότι τα θερμά καυσαέρια έχουν υψηλότερη θερμοκρασία σε σύγκριση με το τοίχωμα του θαλάμου αλλά και λόγω της χημικής του σύστασης η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από τα καυσαέρια στον κόκκο συντελεί σημαντικά στην θέρμανση της πρώτης ύλης αλλά απαιτεί διαφορετική υπολογιστική προσέγγιση.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου που αναπτύχθηκε, είναι ότι αποτελείται από ένα σύνολο αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, που επιλύονται, με τον

κώδικα Madonna, εύκολα και γρήγορα και χωρίς ο χρήστης να χρειάζεται να έχει εξειδικευμένες γνώσεις σε προγραμματισμό και Η/Υ. Αυτή η προσέγγιση παρέχει την ευχέρεια εύκολης και εκτεταμένης μελέτης του φαινόμενου της διόγκωσης σε μια ευρεία περιοχή μεταβολών των συνθηκών λειτουργίας, καθώς επίσης και γρήγορης απεικόνισης των αποτελεσμάτων της κάθε επιμέρους εφαρμογής του μοντέλου.

Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου που ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους περιλαμβάνει:

- Την ανάπτυξη των εξισώσεων υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας
- Την ανάπτυξη των εξισώσεων υπολογισμού της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης
- Την ανάπτυξη των εξισώσεων υπολογισμού της ταχύτητας και της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων περλίτη κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης
- Την ανάπτυξη των εξισώσεων υπολογισμού της μεταβολής της ακτίνας του διογκούμενου τεμαχιδίου περλίτη κατά την κίνηση τους μέσα στο θάλαμο

## 7.2. Θερμοφυσικές ιδιότητες

Για τις ανάγκες του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες εξισώσεις υπολογισμού της μεταβολής των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του περλιτικού τήγματος (κέλυφος), συναρτήσει της θερμοκρασίας, οι οποίες και παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα.

### 7.2.1. Θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες του αέρα, όπως είναι η πυκνότητα, το ιξώδες, η ειδική θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και ο αριθμός Prandtl μεταβάλλονται σημαντικά με την θερμοκρασία με αποτέλεσμα να επηρεάζουν, τόσο την κίνηση του τεμαχιδίου, όσο και τον ρυθμό θέρμανσής του. Η μεταβολή των ιδιοτήτων αυτών κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης οφείλει να ληφθεί υπόψη για την εξασφάλιση της ορθότητας και ακρίβειας των υπολογισμών.

#### 7.2.1.1. Πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του αέρα

Η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα είναι ιδιαίτερα σημαντική στο εύρος θερμοκρασιών που συναντώνται εντός του θαλάμου διόγκωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδό του θαλάμου είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων ίδια με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, εκτός εάν ο αέρας έχει προθερμανθεί, ενώ η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο θαλάμου μπορεί να ξεπερνά πολλές φορές τους 1000 °C. Η σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας του



αέρα μέσα στο θάλαμο, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητάς του, την παράλληλη αύξηση της ογκομετρικής του ροής, με τελικό αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση της ταχύτητάς του, όσο ο αέρας γίνεται θερμότερος. Επιπλέον, η γνώση της μεταβολής της πυκνότητας του αέρα με τη θερμοκρασία είναι σημαντική, γιατί εμπλέκεται στον υπολογισμό των δυνάμεων της οπισθέλκουσας αλλά και της άνωσης οι οποίες επιβραδύνουν την καθοδική κίνηση του κόκκου. Η πυκνότητα του αέρα έχει επίσης επίδραση στην τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή του συστήματος αέρα-σωματιδίου. Σημαντική είναι επίσης και η γνώση της μεταβολής του δυναμικού ιξώδους του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης με την θερμοκρασία. Η γνώση της τιμής του δυναμικού ιξώδους του αέρα είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds του κόκκου και του αριθμού Reynolds αέρα, όπως επίσης και για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του αγωγού.

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκε ο νόμος των ιδανικών αερίων θεωρώντας ότι ο αέρας είναι τέλειο αέριο και ότι η πίεση εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι ίδια με αυτή του περιβάλλοντος ( $P = 1 \text{ atm}$ ). Η εξίσωση υπολογισμού της πυκνότητας του αέρα είναι η ακόλουθη:

$$\rho_{air} = \frac{P}{R_g T_{air}} \quad (7.1)$$

Η τιμή του δυναμικού ιξώδους του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας υπολογίζεται από την παρακάτω εκθετική εξίσωση που αποτελεί έκφραση του νόμου του Sutherland (Sutherland, 1893):

$$\mu_{air} = \mu_{air,ref} \left( \frac{T_{air}}{T_{air,ref}} \right)^{n_{ref}} \quad (7.2)$$

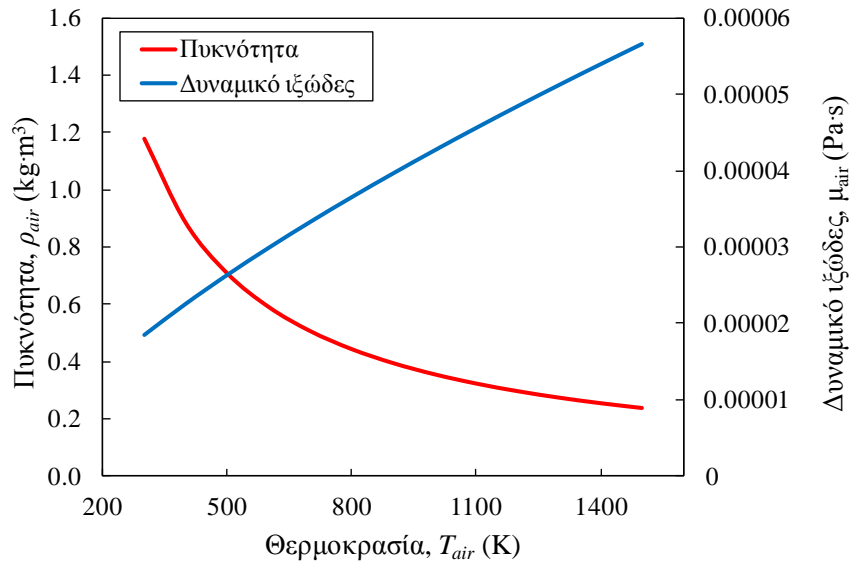
Όπου

$\mu_{air,ref}$  δυναμικό ιξώδες του αέρα σε συνθήκες αναφοράς ( $\mu_{air,ref} = 1.72 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

$T_{air,ref}$  θερμοκρασία αναφοράς με τιμή  $T_{air,ref} = 273 \text{ K}$

$n$  εκθέτης αναφοράς με τιμή  $n_{ref} = 0.7$ .

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας και του δυναμικού ιξώδους του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως υπολογίζονται από τις εξισώσεις 7.1 και 7.2.



Σχήμα 7.1. Η μεταβολή της πυκνότητας ( $\rho_{air}$ ) και του δυναμικού ιξώδους ( $\mu_{air}$ ) του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

#### 7.2.1.2. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητα του αέρα

Η γνώση της μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμοχωρητικότητας του αέρα με τη θερμοκρασία, είναι απαραίτητες για την επίλυση του ισοζυγίου ενέργειας στον αέρα και την συνακόλουθη πρόβλεψη της μεταβολής της θερμοκρασίας του κατά μήκος του θαλάμου. Για τον υπολογισμό της μεταβολής του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική εξίσωση (7.3) η οποία προέκυψε από την προσαρμογή πολυωνύμου τρίτου βαθμού σε τιμές της θερμικής αγωγιμότητας που ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία στη θερμοκρασιακή περιοχή 273-1573K (Pitts and Sissom, 1977):

$$k_{air} = \alpha_{k,1}T_{air}^3 + \alpha_{k,2}T_{air}^2 + \alpha_{k,3}T_{air} + \alpha_{k,4} \quad (7.3)$$

Επίσης για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοχωρητικότητας του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική εξίσωση (7.4), η οποία επίσης προέκυψε από την προσαρμογή πολυωνύμου τρίτου βαθμού σε τιμές της θερμοχωρητικότητας που ελήφθησαν από βιβλιογραφικά δεδομένα στη θερμοκρασιακή περιοχή 273-1573K (Pitts and Sissom, 1977):

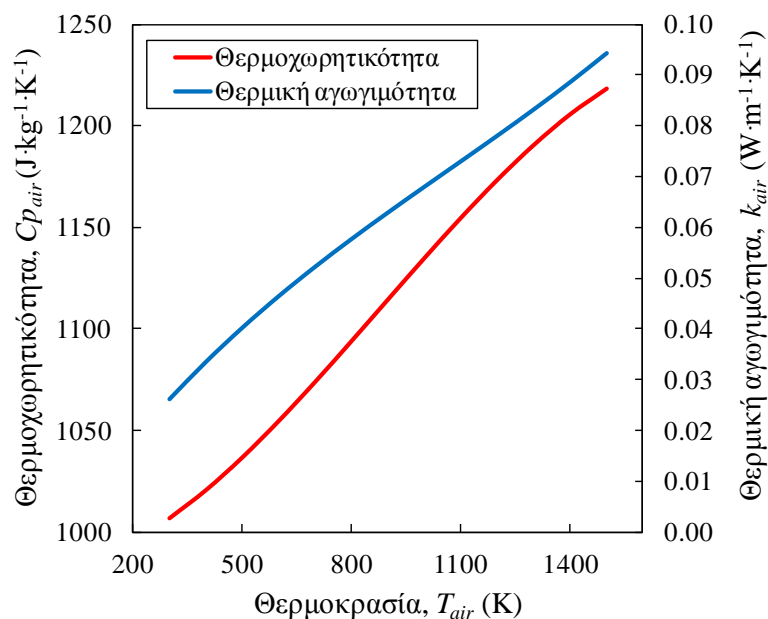
$$C_{p,air} = \alpha_{C_p,1}T_{air}^3 + \alpha_{C_p,2}T_{air}^2 + \alpha_{C_p,3}T_{air} + \alpha_{C_p,4} \quad (7.4)$$

Οι τιμές των σταθερών τόσο για τον υπολογισμό του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας όσο και του συντελεστή θερμοχωρητικότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.1. Οι τιμές των σταθερών των εξισώσεων 7.3 και 7.4 υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

| <b>i</b> | $\alpha_{Cp,i}$          | $\alpha_{k,i}$          |
|----------|--------------------------|-------------------------|
| 1        | $-8.01440 \cdot 10^{-8}$ | $1.5207 \cdot 10^{-11}$ |
| 2        | $2.10788 \cdot 10^{-4}$  | $-4.8574 \cdot 10^{-8}$ |
| 3        | $2.06329 \cdot 10^{-2}$  | $1.0184 \cdot 10^{-4}$  |
| 4        | $9.83672 \cdot 10^2$     | $-3.9333 \cdot 10^{-4}$ |

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας και του δυναμικού ιξώδους του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 7.2. Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ( $k_{air}$ ) και της θερμοχωρητικότητας ( $Cp_{air}$ ) του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

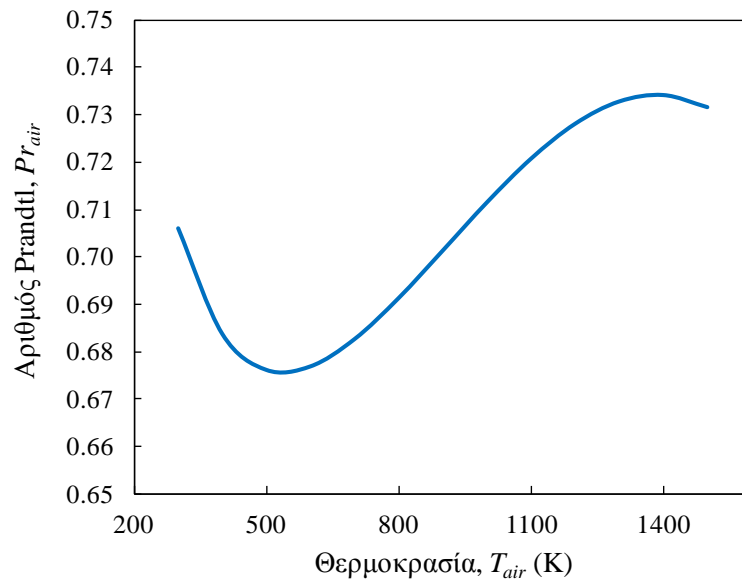
### 7.2.1.3. Ο αριθμός Prandtl

Ο αριθμός Prandtl είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που σ' ένα ρευστό εκφράζει τον λόγο διάχυσης ορμής προς θερμική διάχυση. Είναι δηλαδή ο λόγος του κινηματικού ιξώδους προς τη θερμική διαχυτότητα του αέρα και υπολογίζεται από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, θερμοχωρητικότητας και από το δυναμικό ιξώδες του αέρα, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Pr_{air} = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{air}} = \frac{C_{P,air} \mu_{air}}{k_{air}} \quad (7.5)$$

Η τιμή που λαμβάνει ο αριθμός Prandtl προσδιορίζει το σχετικό πάχος του οριακού στρώματος της ορμής σε σχέση με το πάχος του οριακού στρώματος της θερμότητας. Μικρές τιμές του αριθμού Prandtl δηλώνουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάχυσης της θερμότητας σε σχέση με τη

διάχυση της ορμής. Στο Σχήμα 7.3. παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Prandtl του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας



Σχήμα 7.3. Μεταβολή του αριθμού Prandtl του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

## 7.2.2. Θερμοφυσικές ιδιότητες του περλίτη

### 7.2.2.1. Χημική σύσταση

Η χημική σύσταση του τεμαχιδίου του περλίτη που χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος του μαθηματικού μοντέλου, επιλέχθηκε έτσι ώστε να συμπίπτει με την χημική σύσταση περλίτη που προέρχεται από τα ορυχεία του Τσιγκράδου και του Τράχηλα της Νήσου Μήλου. Η χημική σύσταση του περλίτη έχει σημαντική επίδραση στην διόγκωση, γιατί:

- Περλίτες που προέρχονται από διαφορετικές τοποθεσίες περιέχουν συχνά διαφορετική ποσότητα νερού με αποτέλεσμα ο τελικός βαθμός διόγκωσής τους να είναι διαφορετικός
- Η χημική σύσταση των τεμαχιδίων επιδρά στο ιξώδες του τήγματος που προκύπτει κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και το οποίο αποτελεί μία από τις σημαντικότερες θερμοφυσικές ιδιότητες που επηρεάζουν την διόγκωση

Για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης του μαθηματικού μοντέλου, στην παρούσα μελέτη επελέγησαν να εξετασθούν τεμαχίδια περλίτη των οποίων η χημική σύσταση είναι ίδια με την χημική σύσταση των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα διόγκωσης. Η χημική σύσταση των αρχικών πρώτων υλών υπενθυμίζεται ότι είναι:

Πίνακας 7.2. Χημική σύσταση των περλιτικών δειγμάτων του Τράχηλα και του Τσιγκράδου.

| Οξείδιο                        | Περλίτης Τράχηλα (TR) | Περλίτης Τσιγκράδου (CH) |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 73.02                 | 72.51                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.71                 | 13.73                    |
| K <sub>2</sub> O               | 5.39                  | 3.67                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.43                  | 3.98                     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.91                  | 1.28                     |
| CaO                            | 0.84                  | 1.39                     |
| MgO                            | 0.3                   | 0.37                     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.08                  | 0.15                     |
| L.O.I.                         | 3.32                  | 2.92                     |
| TOTAL                          | 100                   | 100                      |

#### 7.2.2.2. Η περιεκτικότητα του περλίτη σε νερό

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το νερό που περιέχεται στον περλίτη μπορεί να χωριστεί σε δύο είδη νερού, κάθε ένα από τα όποια επιδρά με διαφορετικό τρόπο στην διόγκωση του υλικού:

1. Το *επιδρών νερό*, είναι εκείνο το μέρος του περιεχόμενου στον περλίτη νερού, το οποίο με την θέρμανση του κόκκου ατμοποιείται και όταν ο κόκκος ξεπεράσει το σημείο μαλάκυνσης, η πίεσή του ατμού είναι ικανή να δημιουργήσει ένα εκτενές δίκτυο πόρων και φυσαλίδων στο εσωτερικό αλλά και την επιφάνεια του τεμαχιδίου.

2. Το *παραμένον νερό*, είναι εκείνο το μέρος του νερού που είναι δεσμευμένο με ισχυρούς δεσμούς στο πλέγμα του περλίτη και δεν απομακρύνεται από τον κόκκο κατά την διόγκωσή του. Αυτό το είδος νερού δεν επιδρά άμεσα στην διόγκωση του περλίτη, έχει όμως σημαντική επίδραση στο ιξώδες του τήγματος που με τη σειρά του σχετίζεται με τη θέρμανση. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του κόκκου σε παραμένον νερό τόσο περισσότερο μειώνεται το ιξώδες του κόκκου σε όλο το φάσμα της θερμοκρασίας

Υπάρχει σαφώς ένα ακόμα είδος νερού το οποίο απομακρύνεται από το τεμαχίδιο πριν την έναρξη της διόγκωσης αλλά λόγω του ότι δεν πραγματοποιήθηκε ποσοτικός του προσδιορισμός επελέγη να συμπεριληφθεί στο επιδρών νερό.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, λαμβάνει υπόψη την διαφορετική επίδραση που έχει στο συνολικό φαινόμενο το επιδρών και το παραμένον νερό, θεωρώντας ότι το επιδρών νερό συγκεντρώνεται στο εσωτερικό της φυσαλίδας

ατμού που σχηματίζεται εντός του τεμαχιδίου, ενώ το παραμένον νερό παραμένει διαλελυμένο στο τήγμα. Με αυτή τη θεώρηση, η διόγκωση του τεμαχιδίου οφείλεται μόνο στο επιδρών νερό, το οποίο λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, ατμοποιείται και διογκώνεται πιέζοντας και διογκώνοντας με τη σειρά του τα τοιχώματα του τεμαχιδίου, τα οποία έχουν μαλακυνθεί λόγω της μείωσης του ιξώδους του τήγματος που σχηματίζεται. Το παραμένον νερό, το οποίο και βρίσκεται διαλελυμένο εντός του τήγματος που περιβάλλει την φυσαλίδα αερίου, αντιμετωπίζεται ως συστατικό αυτού και με αυτόν τον τρόπο συνυπολογίζεται η επίδραση που έχει στην τιμή του ιξώδους.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6 διεξήχθη μέτρηση της απώλειας πύρωσης που παρουσιάζουν τα δείγματα που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης αλλά και στην συμβατική κάμινο. Όσον αφορά στα δείγματα που διογκώθηκαν με την νέα μέθοδο, παρατηρήθηκε ότι το 40 % περίπου του αρχικά περιεχόμενου νερού του αδιόγκωτου περλίτη παραμένει στα δείγματα μετά την διόγκωση τους στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο. Αυτά τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν υπόψη στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, έτσι ώστε μετά την εισαγωγή στο μοντέλο της συνολικής περιεκτικότητας του κόκκου σε νερό, να πραγματοποιείται αυτόματα ο υπολογισμός της μάζας του επιδρώντος νερού (60%) αλλά και της μάζας του νερού το οποίο παραμένει διαλελυμένο στο περλιτικό κέλυφος (40%).

### 7.2.2.3. Πυκνότητα κόκκου

Η πυκνότητα του αδιόγκωτου περλίτη όπως μετρήθηκε στην λήκυθο βρέθηκε ότι είναι  $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Οι Zahringer et al. (2001) στο μαθηματικό μοντέλο που ανέπτυξαν θεωρούν ότι η πυκνότητα του περλιτικού τήγματος είναι σταθερή και ίση με  $2350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Οι Murase και McBirney μετά από μέτρηση της πυκνότητας οψιδιανού σε εύρος θερμοκρασίας από 800 έως 1250 °C παρατήρησαν ότι η μεταβολή της τιμής της πυκνότητας του υλικού είναι ασήμαντη και είναι περίπου  $2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Murase and McBirney, 1973). Ο Kucuk στην διδακτορική του διατριβή ασχολήθηκε με την μελέτη της δομικών και φυσικοχημικών μεταβολών των υάλων και υαλωδών τηγμάτων και ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πυκνότητας τους σε θερμοκρασία 1400°C (Kucuk, 1999). Μετά από εφαρμογή του μαθηματικού αυτού μοντέλου για τον προσδιορισμό της πυκνότητας τηγμάτων με χημική σύσταση αυτή του περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδο, οι τιμές που βρέθηκαν ήταν 2294 και 2332  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  αντίστοιχα. Επειδή οι διαφορές αυτές δεν θεωρούνται σημαντικές, αποφασίστηκε στο μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής να θεωρηθεί ότι η πυκνότητα του περλιτικού τήγματος παραμένει σταθερή σε σχέση με τη θερμοκρασία και ίση με  $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  σε όλες τις περιπτώσεις. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην μέση τιμή των παραπάνω πυκνοτήτων.

#### 7.2.2.4. Ιξώδες του περλιτικού τήγματος

Η διόγκωση του περλίτη εξαρτάται σημαντικά από το ιξώδες του τήγματος που σχηματίζεται σαν αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας στο τεμαχίδιο. Το ιξώδες του τήγματος μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ η μαλάκυνση του περλιτικού υλικού που περιβάλλει τη φυσαλίδα ατμού που σχηματίζεται από το επιδρών νερό, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη της διόγκωσης. Οι Giordano et al. μελέτησαν της επίδραση της θερμοκρασίας αλλά και της χημικής σύστασης στην τιμή του ιξώδους των μαγμάτων και δημιούργησαν ένα πολυπαραμετρικό αλγεβρικό μοντέλο υπολογισμού της τιμής του (Giordano et al., 2008). Το μοντέλο που δημιουργήθηκε βασίζεται σε περισσότερες από 1770 διαφορετικές πειραματικές μετρήσεις του ιξώδους άνυδρων αλλά και πλουσίων σε πτητικά στοιχεία πυριτικών τηγμάτων. Στο παραπάνω μοντέλο, η εξάρτηση της τιμής του ιξώδους από την θερμοκρασία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση των Vogel-Filcher-Tammann (Vogel, 1921, Fulcher, 1925):

$$\log \mu = J + \frac{X}{T_m - Y} \quad (7.6)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, οι παράμετροι J, X και Y αποτελούν τον προ-εκθετικό παράγοντα, την εικονική ενέργεια ενεργοποίησης (pseudo-activation energy) και της θερμοκρασία του μοντέλου VFT, αντίστοιχα. Η τιμή της παραμέτρου J ισούται με  $\log \mu$  (Pa·s) σε άπειρη θερμοκρασία αντιπροσωπεύοντας έτσι το κατώτατο όριο της τιμής του ιξώδους. Στο μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται ο συντελεστής J επελέγη να έχει την προκαθορισμένη τιμή ίση με -4.55. Στον υπολογισμό της τιμής των παραμέτρων X και Y λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που έχει σ' αυτή το είδος και η ποσότητα των συστατικών του τήγματος. Οι τιμές των παραμέτρων X και Y υπολογίζονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$X = \sum_{i=1}^7 (b_i M_i) + \sum_{i=1}^3 [b_{1j} (M_{1j} M_{2j})] \quad (7.7)$$

$$Y = \sum_{i=1}^6 (c_i N_i) + [c_{11} (N_{11} N_{21})] \quad (7.8)$$

Όπου οι συντελεστές M και N εκφράζουν την επί τις εκατό περιεκτικότητα του τήγματος σε κάθε οξειδίο (mol%). Οι τιμές των παραμέτρων  $b_i$  και  $c_i$  των εξισώσεων 7.7 και 7.8 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

Πίνακας 7.3. Οι τιμές των συντελεστών υπολογισμού των παραμέτρων X και Y ( $J=-4.55\pm 0.21^a$ ) συναρτήσει της σύστασης του τήγματος σε οξειδία (mol%) (Giordano, 2008).

| Σύμβολο  | Οξείδιο   | Τιμή               | Σύμβολο  | Οξείδιο  | Τιμή           |
|----------|---|--------------------|----------|--|----------------|
| $b_1$    | SiO <sub>2</sub> + TiO <sub>2</sub>   | 159.6<br>(7)       | $c_1$    | SiO <sub>2</sub>   | 2.75<br>(0.4)  |
| $b_2$    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -<br>173.3<br>(22) | $c_2$    | TA <sup>c</sup>  | 15.7<br>(1.6)  |
| $b_3$    | FeO(T) + MnO+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                  | 72.1<br>(14)       | $c_3$    | FM <sup>d</sup>  | 8.3<br>(0.5)   |
| $b_4$    | MgO   | 75.7<br>(13)       | $c_4$    | CaO  | 10.2<br>(0.7)  |
| $b_5$    | CaO   | -39.0<br>(9)       | $c_5$    | NK <sup>e</sup>  | -12.3<br>(1.3) |
| $b_6$    | Na <sub>2</sub> O+V <sup>b</sup>  | -84.1<br>(13)      | $c_6$    | ln(1+V)  | -99.5<br>(4)   |
| $b_7$    | V+ln(1+H <sub>2</sub> O)  | 141.5<br>(19)      | $c_{11}$ | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FM+CaO-<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )*(NK+V) | 0.30<br>(0.04) |
| $b_{11}$ | (SiO <sub>2</sub> +TiO <sub>2</sub> )*(FM)                                  | -2.43<br>(0.3)     |          |  |                |
| $b_{12}$ | (SiO <sub>2</sub> +TA+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )*(NK+H <sub>2</sub> O) | -0.91<br>(0.3)     |          |  |                |
| $b_{13}$ | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )*(NK)                                      | 17.6<br>(1.8)      |          |  |                |

<sup>a</sup> Οι αριθμοί εντός της παρένθεσης στον εκάστοτε συντελεστή καθορίζει το εύρος της τιμής εντός της οποίας το όριο εμπιστοσύνης προσεγγίζει το 95%.

<sup>b</sup> Άθροισμα των H<sub>2</sub>O+F<sub>2</sub>O<sub>-1</sub>.

<sup>c</sup> Άθροισμα των TiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

<sup>d</sup> Άθροισμα των FeO(T)+MnO+MgO

<sup>e</sup> Άθροισμα των Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O

Οι τιμές των παραμέτρων X και Y που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ιξώδους του τήγματος με βάση την εξίσωση 7.6, υπολογίστηκαν για την περίπτωση περλιτών που προέρχονται από τα ορυχεία του Τράχηλα και του Τσιγκράδου από τις εξισώσεις 7.7 και 7.8 αντίστοιχα και από τα δεδομένα του Πίνακα 7.3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7.4 για διάφορες περιεκτικότητες του περλίτη σε νερό.



Πίνακας 7.4. Οι τιμές των συντελεστών  $J$ ,  $X$  και  $Y$  όπως υπολογίσθηκαν από τις εξισώσεις 7.7 και 7.8. για περλίτη που προέρχεται από το ορυχείο του Τράχηλα (TR) και του Τσιγκράδου (CH) για διάφορες περιεκτικότητες σε νερό.

| Προέλευση περλίτη | Περιεκτικότητα σε νερό (% wt) | $J$   | $X$     | $Y$   |
|-------------------|-------------------------------|-------|---------|-------|
| Τράχηλας (TR)     | 0.5                           | -4.55 | 11563.5 | 202.1 |
|                   | 1                             | -4.55 | 11383.4 | 153.2 |
|                   | 2                             | -4.55 | 11004.1 | 97    |
|                   | 3                             | -4.55 | 10642.5 | 61.9  |
| Τσιγκράδο (CH)    | 0.5                           | -4.55 | 11251.8 | 229.4 |
|                   | 1                             | -4.55 | 11078.4 | 180.8 |
|                   | 2                             | -4.55 | 10711.7 | 125.1 |
|                   | 3                             | -4.55 | 10361.7 | 90.3  |

Μετά από προσαρμογή μιας εξίσωσης πρώτου βαθμού στα δεδομένα του πίνακα 7.4 προέκυψαν οι εξισώσεις 7.9 και 7.10, σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της παραμέτρου  $X$  συναρτήσει της περιεκτικότητας του περλίτη σε νερό για τα δείγματα που προέρχονται από τον Τράχηλα και το Τσιγκράδο αντίστοιχα:

$$X_{TR} = -369.79w_{H_2O} + 11749 \quad (7.9)$$

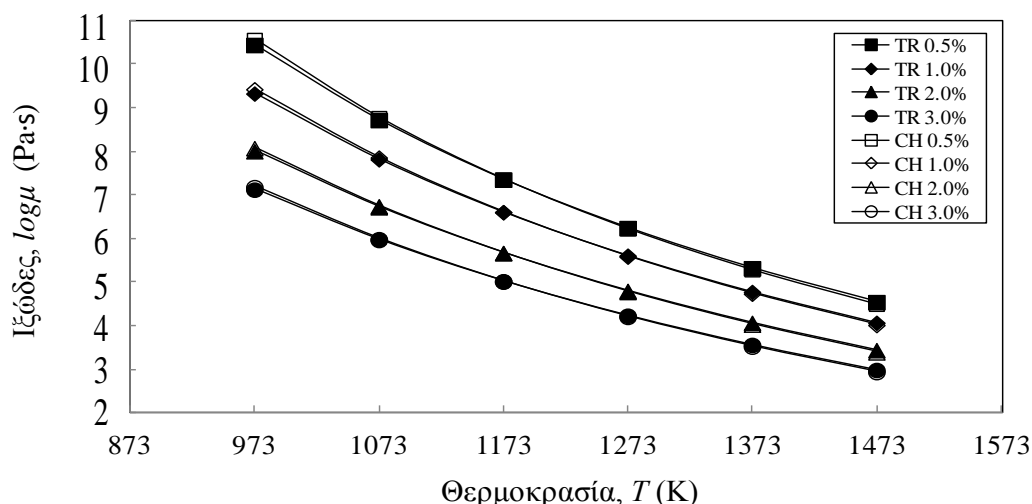
$$X_{CH} = -357.44w_{H_2O} + 11432 \quad (7.10)$$

Αντίστοιχα, με προσαρμογή εξίσωσης δευτέρου βαθμού στα δεδομένα του πίνακα 7.4 προέκυψαν οι τιμές της παραμέτρου  $Y$  συναρτήσει της περιεκτικότητάς τους σε νερό, για περλίτες προερχόμενους από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδου, αντίστοιχα.

$$Y_{TR} = 15.472(w_{H_2O})^2 - 109.09w_{H_2O} + 250.71 \quad (7.11)$$

$$Y_{CH} = 15.381(w_{H_2O})^2 - 108.33w_{H_2O} + 277.64 \quad (7.12)$$

Με βάση τις εξισώσεις (7.9), (7.10), (7.11) και (7.12) και θεωρώντας την τιμή της παραμέτρου  $J$  σταθερή και ίση με -4.55, από την εξίσωση 7.6 μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή του ιξώδους του περλιτικού τήγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.4.



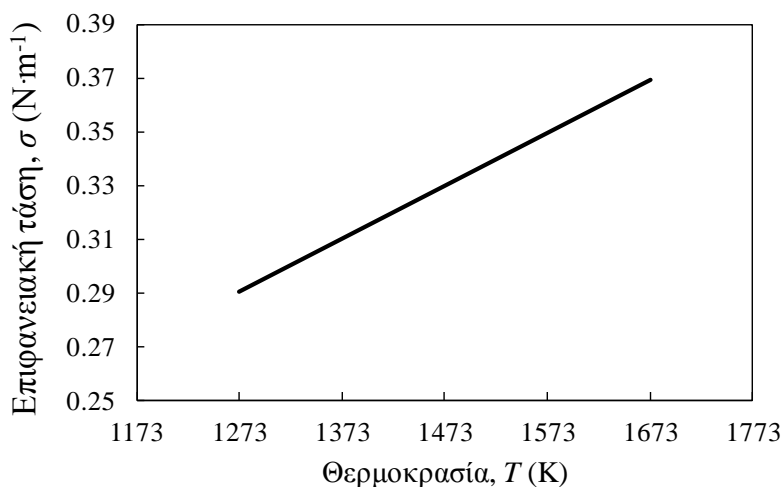
Σχήμα 7.4. Το ιξώδες συναρτήσει της θερμοκρασίας για περλίτες δύο διαφορετικών χημικών συστάσεων και τεσσάρων διαφορετικών περιεκτικότητας σε νερό όπως υπολογίστηκε με εφαρμογή του μοντέλου των Giordano et al.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τιμή του ιξώδους του τήγματος για αύξηση της θερμοκρασίας του κόκκου από 973 K έως 1473 K, μειώνεται κατά 6 τάξεις μεγέθους. Το παραμένον νερό φαίνεται ότι επηρεάζει σημαντικά την τιμή του ιξώδους του κελύφους, η οποία μειώνεται όσο η περιεκτικότητά του περλίτη σε παραμένον νερό αυξάνει. Αύξηση της περιεκτικότητας του περλιτικού τήγματος σε νερό κατά 1% προκαλεί μείωση της τιμής του ιξώδους κατά μία περίπου τάξη μεγέθους (Friedman et al., 1963; McBirney and Murase, 1984; Zahringer et al., 2001). Επιπλέον, η επίδραση της διαφορετικής χημικής σύστασης των δύο δειγμάτων στην τιμή του ιξώδους είναι ανεπαίσθητη αφού οι καμπύλες δειγμάτων διαφορετικής προέλευσης αλλά ίδιας περιεκτικότητας σε νερό συμπίπτουν.

#### 7.2.2.5. Επιφανειακή τάση του περλιτικού τήγματος

Η επιφανειακή τάση αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια φυσαλίδας-περλιτικού τήγματος, και αποτελεί μια δύναμη η οποία αντιτίθεται στην τάση διόγκωσης της φυσαλίδας. Η τιμή της επιφανειακής τάσης του περλιτικού τήγματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Οι Proussevitch et al. και Proussevitch και Sahagian στην μελέτη που έκαναν σχετικά με την ανάπτυξη φυσαλίδων σε ρυολιθικής σύστασης μάγματα, θεωρούν ότι η τιμή της επιφανειακής τάσης σ' αυτά τα υλικά είναι σταθερή και ίση με  $0.32 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$  (Proussevitch et al. 1993, Proussevitch and Sahagian 1998). Οι Murase και McBirney μελέτησαν την επιφανειακή τάση τήγματος οψιδιανού με περιεκτικότητα σε νερό 0.5% σε θερμοκρασιακό εύρος 1000-1400°C και κατέληξαν ότι η επιφανειακή τάση του υλικού παρουσιάζει γραμμική αύξηση (Murase and McBirney, 1973). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση για τον προσδιορισμό της επιφανειακής τάσης του τήγματος περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας (Zahringer et al. 2001).

$$\sigma = 0.09317 + 1.971 \cdot 10^{-4} T_m \quad (7.13)$$



Σχήμα 7.5. Μεταβολή της επιφανειακής τάσης οφιδιανού με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (0.5 %) στο θερμοκρασιακό εύρος 1000-1400°C (Murase and McBirney, 1973; Zahringer et al., 2001).

#### 7.2.2.6. Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του περλίτη

Επειδή ο κύριος μηχανισμός θέρμανσης των τεμαχιδίων περλίτη είναι η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου διόγκωσης στα στερεά τεμαχίδια, για την χρησιμοποίηση της εξίσωσης μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι απαραίτητη η γνώση του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας του περλίτη, τόσο για τα διογκωμένα όσο και για τα αδιόγκωτα τεμαχίδια.

Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής ακτινοβολίας για περλίτες προερχόμενους από τα ορυχεία Τράχηλα και Τσιγκράδου παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5. Η μέτρηση των τιμών του πραγματοποιήθηκε στη συσκευή Μέτρησης Εκπεμπτικότητας AE1 RD1 (Devices and Services Company).

Πίνακας 7.5. Τα αποτελέσματα ολικής κανονικής εκπεμπτικότητας ε αδιόγκωτων και διογκωμένων δειγμάτων.

| Δείγμα   | Ολική κανονική εκπεμπτικότητα, ε |
|--|----------------------------------|
| Αδιόγκωτος περλίτης Τσιγκράδου                 | 0.73                             |
| Αδιόγκωτος περλίτης Τράχηλα                    | 0.72                             |
| Διογκωμένος λειοτριβημένος περλίτης Τσιγκράδου | 0.52                             |
| Διογκωμένος λειοτριβημένος περλίτης Τράχηλα    | 0.58                             |

Μετά από δοκιμή ευαισθησίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων από την τιμή του συντελεστή εκπεμπτικότητας αποφασίστηκε η χρήση μίας τιμής για τον αδιόγκωτο περλίτη και μίας τιμής για τον διογκωμένο ανεξάρτητα της χημικής του σύστασης και της προέλευσής του. Έτσι, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών και όσο το τεμαχίδιο παραμένει αδιόγκωτο η εκπεμπτικότητα του έχει τιμή 0.7 ενώ μετά την έναρξη της διόγκωσης και εφόσον ο συντελεστής διόγκωσης ξεπεράσει την τιμή 1 η εκπεμπτικότητα του τεμαχιδίου λαμβάνει την τιμή 0.55.

#### 7.2.2.7. Συντελεστής θερμοχωρητικότητας

Η θερμοχωρητικότητα του περλίτη καθώς και του τήγματος που σχηματίζεται κατά τη θέρμανσή του, είναι σημαντική θερμοφυσική ιδιότητα, γιατί έχει άμεση σχέση με το ισοζύγιο ενέργειας στο τεμαχίδιο και ιδίως με την ποσότητα της θερμικής ενέργειας που συσσωρεύεται σ' αυτό. Οι King et al προτείνουν την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της τιμής της θερμοχωρητικότητας περλίτη από τον οποίο έχει απομακρυνθεί όλη η ποσότητα του νερού που αυτός περιέχει, συναρτήσει της θερμοκρασίας (King et al. 1948).

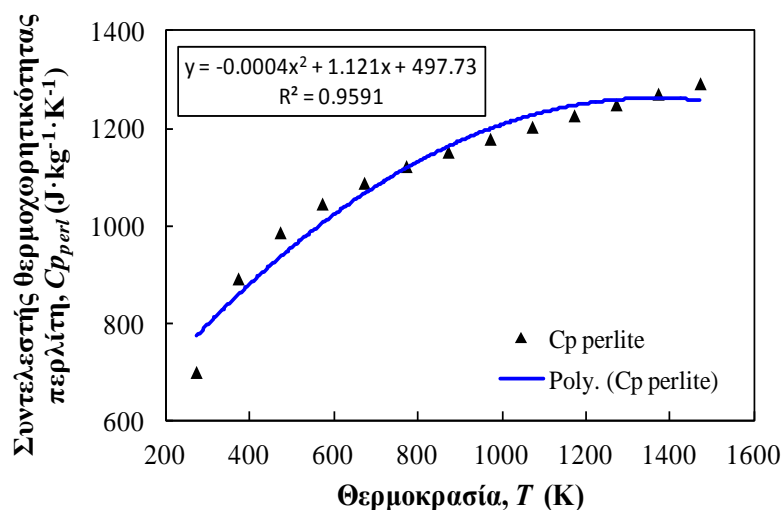
$$C_p(0\%H_2O) = (24.25 + 4.66 * 10^{-3}T - 6.62 * 10^{-5}T^{-2}) * 41.868 \quad (7.14)$$

Θεωρώντας ότι τα τεμαχίδια είναι σφαιρικά και ότι κάθε σφαίρα αποτελείται από ένα τμήμα άνυδρου περλίτη και από ένα τμήμα νερού υπό μορφή ατμού που είναι συγκεντρωμένος στο κέντρο της σφαίρας, τότε η συνολική θερμοχωρητικότητα του τεμαχιδίου μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων του άνυδρου περλίτη και του ατμού που περιλαμβάνεται εντός της φουσαλίδας.

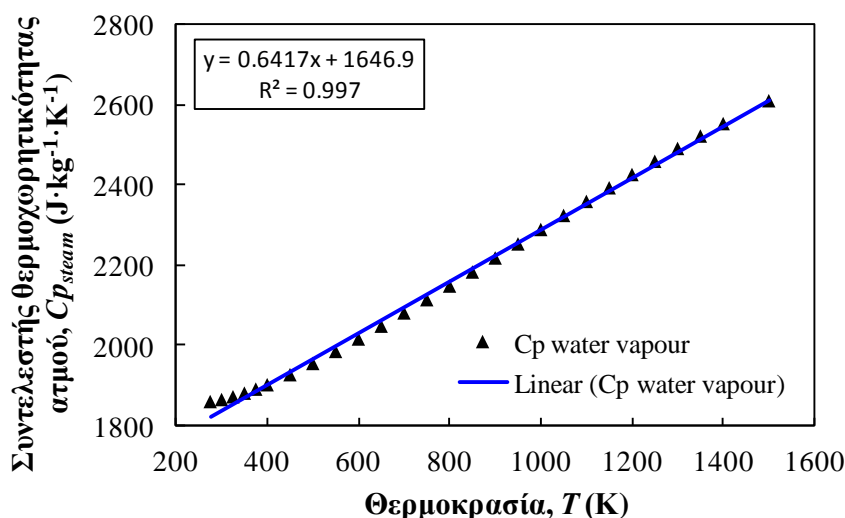
Η θερμοχωρητικότητα του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση η οποία προέκυψε από προσαρμογή γραμμικής εξίσωσης πρώτου βαθμού στα δεδομένα της βιβλιογραφίας [Barnes, 1932, Gordons, 1934,]:

$$C_{P(steam)} = 0.6417T + 1646.9 \quad (7.15)$$

Στα διαγράμματα του σχήματος 7.6 φαίνεται η θερμοχωρητικότητα άνυδρου περλίτη, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 7.14 και στο σχήμα 7.7 η θερμοχωρητικότητα του ατμού όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 7.15 συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχήμα 7.6. Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας άνυδρου περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως υπολογίζεται από την εξίσωση των King et al.

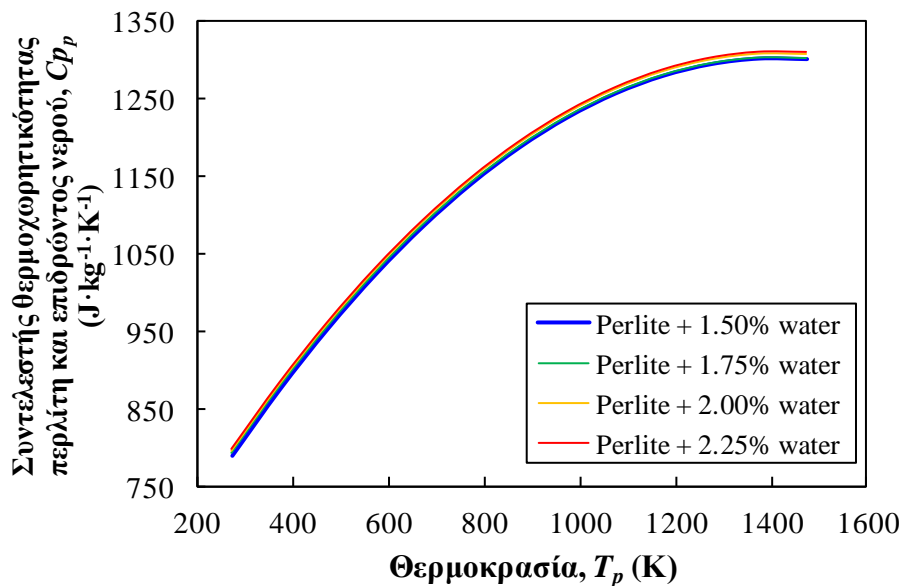


Σχήμα 7.7. Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας του ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας (Barnes 1932, Gordon 1934) και η προσαρμοσμένη γραμμική εξίσωση

Επειδή η ποσότητα ατμού εντός της φουσαλίδας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή κατά την διάρκεια της διόγκωσης και ίση με τη μάζα του επιδρώντος νερού, η θερμοχωρητικότητα του τεμαχιδίου συνολικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ανάλογη των θερμοχωρητικοτήτων και του λόγου των μαζών περλιτικού τήγματος και νερού στο τεμαχίδιο. Η εξίσωση από την οποία υπολογίζεται η θερμοχωρητικότητα του κόκκου συναρτήσει της περιεκτικότητας του σε νερό και της θερμοκρασίας είναι η εξής:

$$Cp_p(X\%H_2O) = (X\%H_2O/100) * (0.6417 * T_p + 1646.9) + ((100 - X\%H_2O)/100) * (-0.0004 * T_p + 1.121 * T_p + 497.73) \quad (7.16)$$

Στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η θερμοχωρητικότητα του κόκκου περλίτη για τέσσερις περιεκτικότητες σε νερό συναρτήσει της θερμοκρασίας όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (7.16).



Σχήμα 7.8. Η θερμοχωρητικότητα του κόκκου συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες περιεκτικότητες του σε νερό, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 7.16.

### 7.3. Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου διόγκωσης

Το δυναμικό μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, στηρίζεται στην εφαρμογή του ισοζυγίου ορμής και ενέργειας στο επίπεδο ενός τεμαχιδίου περλίτη που διογκώνεται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο, τόσο σε μικροσκοπική όσο κι σε μακροσκοπική κλίμακα. Η μαθηματική μοντελοποίηση σε μικροσκοπική κλίμακα αναφέρεται στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου και της πίεσης της φυσαλίδας αερίου που σχηματίζεται εντός αυτού, που τόσο μεμονωμένα όσο και σε αλληλεπίδραση, αποτελούν τα φαινόμενα τα οποία έχουν την σημαντικότερη επίδραση στην διόγκωση του περλίτη. Σε μακροσκοπική κλίμακα, η μαθηματική μοντελοποίηση αφορά στην εφαρμογή του ισοζυγίου της ορμής στο τεμαχίδιο για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του και επίσης στην εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας στο σύστημα αέρα – τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης για τον προσδιορισμό της θερμοκρασιακής κατανομής του αέρα εντός του θαλάμου. Τα παραπάνω φαινόμενα μεταφοράς αναλύονται μέσω μη γραμμικού συστήματος αλγεβρικών και συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Οι βασικές παραδοχές που έγιναν για την ανάπτυξη του μακροσκοπικού και μικροσκοπικού τμήματος του μαθηματικού μοντέλου αναφέρονται παρακάτω, έτσι ώστε να καταστεί σαφής ο σκοπός και η ακρίβεια του μοντέλου, αλλά και τα όρια εφαρμογής του.

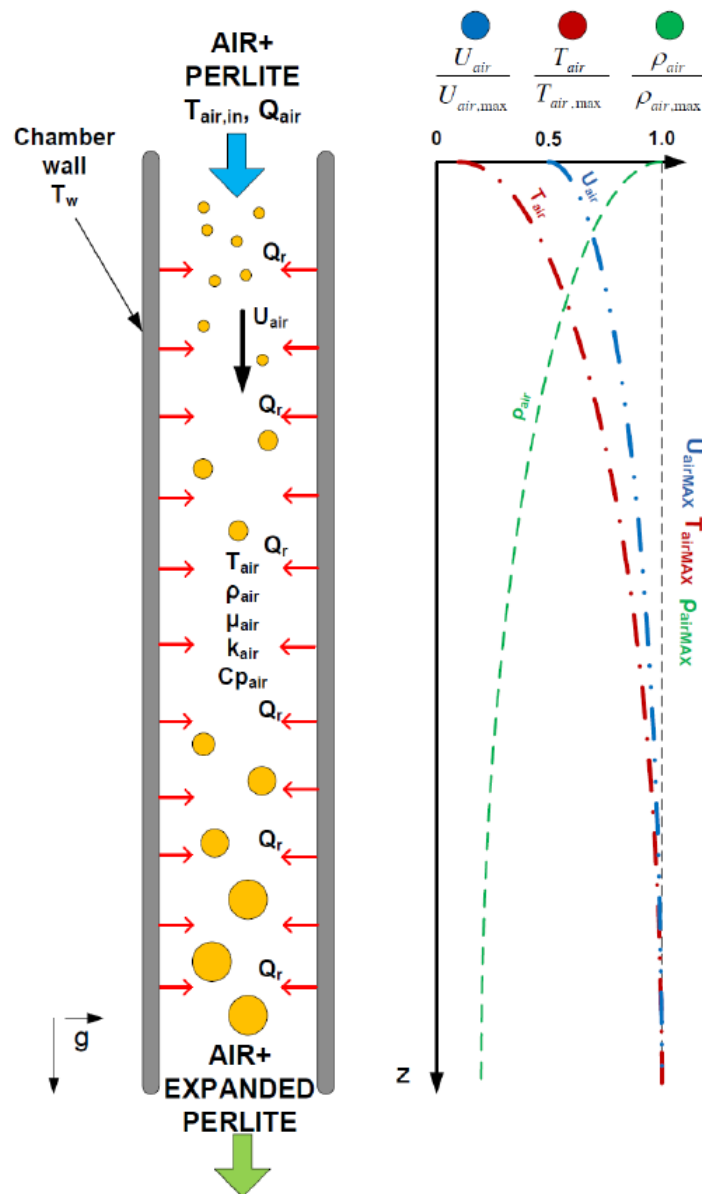
- Ο αέρας εισέρχεται στον θάλαμο θέρμανσης από όλη την επιφάνεια διατομής του, ενώ δεν συμβαίνει πτώση πίεσης. Η πίεση εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι σταθερή και ίση με 1 atm.

- Η ακτινική μεταβολή της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του αέρα καθ' όλο το μήκος της καμίνου θεωρείται ότι δεν είναι σημαντική και έτσι η μεταβολή των παραπάνω μεγεθών εξετάζεται σε μονοδιάστατο σύστημα συντεταγμένων.
- Η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου θέρμανσης είναι λεία
- Η περιεκτικότητα του αέρα σε CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O είναι αμελητέα και επομένως ο αέρας δεν θερμαίνεται με τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία από τα τοιχώματα. Ο αέρας εντός του θαλάμου διόγκωσης θεωρείται μέσο διαφανές στην απορρόφηση θερμικής ακτινοβολίας.
- Κάθε κόκκος περλίτη θεωρείται ότι έχει σφαιρικό σχήμα σε όλη την διάρκεια της διόγκωσης του. Η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη σ' όλη τη μάζα αυτού, ενώ η μεταβολή της οφείλεται στην θέρμανση του κόκκου με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή μεταξύ τεμαχιδίου και αέρα και με ακτινοβολία μεταξύ τεμαχιδίου και τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης.
- Δεν συμβαίνει μεταφορά μάζας μεταξύ της διεπιφάνειας φυσαλίδας-κελύφους αλλά και μεταξύ κελύφους-περιβάλλοντος
- Η συνολική μάζα του επιδρώντος νερού που περιέχει το τεμαχίδιο, σχηματίζει μία μόνο φυσαλίδα ατμού και παραμένει συγκεντρωμένη στην φυσαλίδα αυτή, χωρίς να υπάρχει καμιά μεταφορά μάζας του ατμού προς το τήγμα ή το περιβάλλον, σε όλη την διάρκεια της διόγκωσης.
- Ο ατμός συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο. Η ενθαλπία εξάτμισης του νερού που περιέχεται στο τεμαχίδιο λαμβάνεται υπόψη στο ισοζύγιο ενέργειας του τεμαχιδίου, ενώ το έργο που καταναλώνεται για την διόγκωση της φυσαλίδας θεωρείται αμελητέο.

Τα σημαντικότερα μακροσκοπικά φαινόμενα που έχουν ληφθεί υπόψη για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου, καθώς και η σχηματική μεταβολή των ορισμένων βασικών φυσικών μεγεθών που συμβαίνει εντός του θαλάμου διόγκωσης, απεικονίζονται στο σχήμα 7.9.

Ο αέρας εισάγεται στον θάλαμο διόγκωσης από το ανώτερο τμήμα του και από όλη του τη διατομή. Καθώς κατέρχεται και βρισκόμενος σε επαφή με τα θερμά τοιχώματα του θαλάμου προσλαμβάνει θερμική ενέργεια με αποτέλεσμα την σταδιακή θέρμανσή του κατά μήκος της καμίνου. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα επιδρά στην πυκνότητα του που μειώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου και της ταχύτητας του. Τα τεμαχίδια των οποίων η περιοχή εισόδου συμπίπτει με αυτή του αέρα κατερχόμενα ανταλλάσσουν θερμική ενέργεια με αυτόν. Ο

περλίτης λαμβάνει θερμική ενέργεια από τον αέρα όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη από αυτή του κόκκου. Σε αντίθετη περίπτωση, ο περλίτης αποβάλλει θερμική ενέργεια προς τον αέρα. Επιπλέον, τα τεμαχίδια απορροφούν θερμική ενέργεια μέσω θερμικής ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται από την θερμή εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης. Η απορρόφηση θερμικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων και τελικά την έναρξη της διόγκωσης τους. Η διόγκωση που επιδρά στον όγκο και την πυκνότητα των τεμαχιδίων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας κίνησης των τεμαχιδίων εντός του θαλάμου διόγκωσης λόγω της αύξησης της οπισθέλκουσας δύναμης και της άνωσης. Η ταχύτητα του τεμαχιδίου επηρεάζεται όπως είναι φυσικό και από την μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης.



Σχήμα 7.9. Σχηματική παράσταση των σημαντικότερων μακροσκοπικών φαινομένων που συμβαίνουν στο θάλαμο διόγκωσης και σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος της καμίνου.



### 7.3.1. Οι εξισώσεις κίνησης του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης

Οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται επάνω σ' ένα τεμαχίδιο περλίτη κατά την καθοδική κίνηση του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, είναι η βαρύτητα,  $F_G$ , η άνωση,  $F_B$ , και η οπισθέλκουσα δύναμη,  $F_D$ . Η δύναμη της βαρύτητας εξαρτάται από την μάζα του σωματιδίου, ενώ η φορά της είναι πάντοτε καθοδική επιταχύνοντας την κίνηση του σωματιδίου. Το μέτρο της δύναμης της βαρύτητας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_G = m_p g \quad (7.17)$$

Η δύναμη της άνωσης αντιτίθεται στην κίνηση του σωματιδίου επιβραδύνοντας την κίνησή του. Η άνωση εξαρτάται από τον όγκο του σωματιδίου και την πυκνότητα του αέρα, ενώ το μέτρο της δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$F_B = \rho_{air} g V_p \quad (7.18)$$

Μία ακόμα δύναμη η οποία αντιτίθεται στην κίνηση του σωματιδίου είναι η οπισθέλκουσα δύναμη. Το μέτρο της εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα, τη διατομή του τεμαχιδίου, τη σχετική ταχύτητα του τεμαχιδίου ως προς τον αέρα και το συντελεστή οπισθέλκουσας (Drag Coefficient-  $C_D$ ), ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ( $Re_p$ ) του σωματιδίου. Η οπισθέλκουσα υπολογίζεται από την παρακάτω αλγεβρική εξίσωση:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{air} C_D A_{proj} (U_{air} - U_p)^2 \quad (7.19)$$

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυνάμεις που δρουν στο τεμαχίδιο και εφαρμόζοντας το ισοζύγιο της ορμής σ' αυτό (2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα) έχουμε ότι:

$$\sum F = m \gamma \quad (7.20)$$

Με βάση ότι η επιτάχυνση ( $\gamma$ ) είναι η παράγωγος της ταχύτητας ως προς τον χρόνο, η εξίσωση 7.20 γράφεται:

$$\sum F = m \frac{dU}{dt} \quad (7.21)$$

Αντικαθιστώντας τις τρεις δυνάμεις που ασκούνται στο τεμαχίδιο, η μεταβολή της ταχύτητας του συναρτήσκει του χρόνου, δίνεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{(F_G - F_B - F_D)}{m} \quad (7.22)$$

Εισάγοντας στην εξίσωση 7.22 τις εξισώσεις υπολογισμού των δυνάμεων  $F_G$ ,  $F_B$  και  $F_D$ , (Εξισώσεις (7.17 - 7.19), προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της μεταβολής της ταχύτητας του σωματιδίου με τον χρόνο:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_{air}}{\rho_p} g - \frac{3}{4} \frac{\rho_{air} C_D (U_{air} - U_p)^2}{d_p \rho_p} \quad (7.23)$$

Από την εξίσωση 7.23 μπορεί να υπολογιστεί η θέση που βρίσκεται το τεμαχίδιο εντός του θαλάμου με τη χρησιμοποίηση της παρακάτω εξίσωσης που συνδέει τη μεταβολή της θέσης του σωματιδίου με την ταχύτητά του:

$$U_p = \frac{dz}{dt} \quad (7.24)$$

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds του σωματιδίου και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση η οποία ισχύει όταν ο αριθμός Reynolds είναι μεταξύ  $1 < Re_p < 800$  (Schiller and Nauman, 1933).

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (7.25)$$

Ο αριθμός Reynolds ( $Re_p$ ) των τεμαχιδίων υπολογίζεται από την εξίσωση (Liang and Zhu, 1998):

$$Re_p = \frac{\rho_{air} d_p |U_p - U_{air}|}{\mu_{air}} \quad (7.26)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, για να υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds του σωματιδίου, πρέπει να είναι γνωστή η ταχύτητα του αέρα. Αυτή θεωρούμε ότι μεταβάλλεται μόνο κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, ότι είναι ίδια σ' όλη την επιφάνεια κάθε οριζόντιας διατομής του και ίση με τη μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα στη διατομή αυτή. Η ταχύτητα του αέρα υπολογίζεται από την ογκομετρική του παροχή, η οποία όμως μεταβάλλεται λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του κατά μήκος της καμίνου. Εάν  $\dot{Q}_{in}$  είναι η ογκομετρική παροχή του αέρα στην είσοδο του θαλάμου διόγκωσης, σε θερμοκρασία εισόδου του αέρα  $T_{air,in}$ , τότε η ογκομετρική παροχή του αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας του, δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_{in} \frac{T_{air}}{T_{air,in}} \quad (7.27)$$

Και επομένως η ταχύτητα του είναι ίση με:

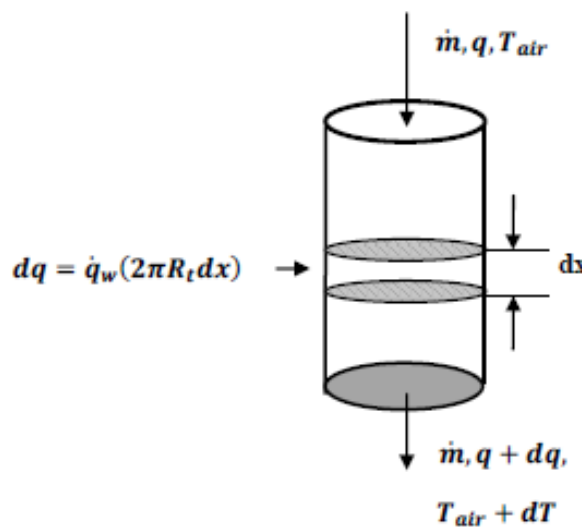
$$U_{air} = \frac{\dot{Q}_{air}}{A} \quad (7.28)$$

Όπου  $A$  είναι η διατομή του σωλήνα του θαλάμου διόγκωσης.

### 7.3.2. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου της ηλεκτρικής καμίνου

Ο αέρας εισέρχεται από το άνω μέρος του θαλάμου θέρμανσης και θερμαίνεται με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή από το τοίχωμα του θαλάμου που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτόν. Θέρμανση του αέρα με μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τα τοιχώματα του θαλάμου θεωρούμε ότι δεν συμβαίνει γιατί ο αέρας λόγω της συμμετρίας που χαρακτηρίζει τα διατομικά μόρια του οξυγόνου  $O_2$  και του αζώτου  $N_2$ , που είναι τα κύρια συστατικά του, θεωρείται σώμα διαφανές στη θέρμανση με ακτινοβολία (Lienhardt J. IV and Lienhardt J. V, 2003). Η υπόθεση αυτή δεν ισχύει για τα τεμαχίδια περλίτη τα οποία απορροφούν ενέργεια με ακτινοβολία και επομένως σ' αυτή την περίπτωση η συμβολή της ακτινοβολίας στην θέρμανσή τους είναι σημαντική και πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς.

Η θερμοκρασία του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης υπολογίζεται πραγματοποιώντας το ισοζύγιο ενέργειας σ' ένα στοιχειώδες τμήμα του σωλήνα του θαλάμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10. Το διαφορικό ισοζύγιο ενέργειας ρεύματος αέρα που κινείται εντός του θαλάμου θέρμανσης της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης.

Αν θεωρήσουμε ένα τμήμα του αγωγού απειροστού μήκους  $dx$ , τότε η θερμότητα που μεταφέρεται με συναγωγή από όλη την επιφάνεια του αγωγού η οποία είναι  $2\pi R dx$ , στον αέρα με τον οποίο είναι σε επαφή, είναι ίση με:

$$dq = \dot{q}_w A_w = \dot{q}_w (2\pi R_i dx) = h(2\pi R_i dx)(T_w - T_{air}) \quad (7.29)$$

Η θερμότητα  $dq$  που μεταφέρεται από το θερμό τοίχωμα του θαλάμου με συναγωγή προς τον αέρα, είναι ίση με τη θερμότητα που συσσωρεύει στην αντίστοιχη μάζα αέρα και η οποία είναι ίση με:

$$dq = \dot{m}C_p dT \quad (7.30)$$

Από την ισότητα του  $dq$  στις εξισώσεις 7.29 και 7.30 προκύπτει ότι:

$$\dot{m}C_p dT = h(2\pi R_t dx)(T_w - T_{air}) \quad (7.31)$$

Από την οποία τελικά λαμβάνουμε ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου είναι ίση με:

$$\frac{dT_{air}}{dx} = \left( \frac{\pi D_t h}{\dot{m}C_{p,air}} \right) (T_w - T_{air}) \quad (7.32)$$

Αν η θερμοκρασία του αέρα κατά την είσοδό του στο θάλαμο είναι ίση με  $T_{air,in}$  τότε για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (7.32) η οριακή τιμή της θερμοκρασίας είναι:

$$\text{Για } x = 0 \quad T_{air} = T_{air,in} \quad (7.33)$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης 7.32 επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης της ηλεκτρικής καμίνου, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η τιμή του συντελεστή συναγωγής,  $h$ , κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$h = \frac{k_{air} Nu}{D_t} \quad (7.34)$$

Επομένως για να υπολογιστεί πρέπει να είναι γνωστή η μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα, κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Η τιμή του αριθμού Nusselt εξαρτάται από το είδος και το βαθμό ανάπτυξης της ροής του αέρα εντός του θαλάμου, καθώς και από το λόγο της διαμέτρου προς το μήκος του αγωγού. Οι σχέσεις και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της κάθε μιας από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt παρουσιάζονται στον πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6. Εξισώσεις υπολογισμού του αριθμού Nusselt κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης για διάφορες συνθήκες ροής.

| Χαρακτηριστικά ροής   | Συνθήκη εφαρμογής  | Εξίσωση   | Αναφορά                 |
|---|--|---|-------------------------|
| Στρωτή ροή, σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος, πλήρως ανεπτυγμένη ροή (θερμικά και υδροδυναμικά)       | $Re \leq 2300$<br>$Re \cdot D/L \leq 20$<br>$Re \cdot Pr \cdot D/L \leq 20$<br>$Pr \geq 0.6$       | $Nu = 3.66$   | (Cengel, 2006)          |
| Στρωτή ροή, μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος, πλήρως ανεπτυγμένη ροή (θερμικά και υδροδυναμικά) | $Re \leq 2300$<br>$Re \cdot D/L \leq 20$<br>$Re \cdot Pr \cdot D/L \leq 20$<br>$Pr \geq 0.6$       | $Nu = 4.36$   | (Cengel, 2006)          |
| Στρωτή ροή, υδροδυναμικά πλήρως ανεπτυγμένη ροή, θερμικά αναπτυσσόμενη.                             | $Re \leq 2300$<br>$Re \cdot D/L \leq 20$<br>$Re \cdot Pr \cdot D/L \geq 20$                        | <i>Hausen equation</i><br>$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 \frac{D}{L} Re Pr}{1 + 0.04 \left( \frac{D}{L} Re Pr \right)^{2/3}}$  | (Hausen, 1943)          |
| Στρωτή ροή, υδροδυναμικά και θερμικά αναπτυσσόμενη.   | $Re \leq 2300$<br>$Re \cdot D/L \geq 20$<br>$Re \cdot Pr \cdot D/L \geq 20$<br>$0.48 < Pr < 16700$ | <i>Sieder-Tate equation</i><br>$Nu = 1.86 \left( \frac{Re Pr D}{L} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$   | (Sieder and Tate, 1936) |
| Μεταβατική και τυρβώδης ροή   | $Re > 2300$<br>$0.5 < Pr < 2000$   | <i>Gnielinski equation</i><br>$Nu = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{8} \right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)}$<br>όπου $f = \frac{1}{(0.79 \ln Re - 1.64)^2}$ | (Gnielinski, 1976)      |

Όπως φαίνεται ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τον αριθμό Reynolds και τον αριθμό Prandtl, οι οποίοι για τον τροφοδοτούμενο στο θάλαμο αέρα δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Re = \frac{\rho_{air} d U_{air}}{\mu_{air}} \quad (7.35)$$

$$Pr_{air} = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{air}} = \frac{C_{p,air} \mu_{air}}{k_{air}} \quad (7.36)$$

### 7.3.3. Θερμοκρασία του τεμαχιδίου κατά την κίνηση του κατά μήκος του θαλάμου της ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης

Στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε έγινε η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του τεμαχιδίου περλίτη, κατά την κίνηση του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, είναι ομοιόμορφη κάθε στιγμή σ' όλη τη μάζα του τεμαχιδίου. Η παραδοχή αυτή έγινε για λόγους απλούστευσης του μοντέλου και μείωσης του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την επίλυση του. Η εγκυρότητά της επιβεβαιώνεται με τον έλεγχο της τιμής του αριθμού *Biot* του τεμαχιδίου στις συνθήκες που επικρατούν στην κάμινο.

Ο αριθμός *Biot* υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$Bi = \frac{h_c L_{ch}}{k_p} \quad (7.37)$$

Όπου  $h_c$ , ο συντελεστής συναγωγής του συστήματος σφαιρικού τεμαχιδίου - αέρα,  $L_{ch}$  το χαρακτηριστικό μήκος του σφαιρικού τεμαχιδίου και  $k_p$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού από το οποίο αποτελείται το σφαιρικό τεμαχίδιο. Όταν οι τιμές που λαμβάνει ο αριθμός *Biot* είναι μικρότερες του 0.1, τότε η διαφορά στις τιμές της θερμοκρασίας που παρατηρούνται στο σύνολο της μάζας ενός σφαιρικού σωματιδίου, δεν αναμένεται να μεγαλύτερες από 5%. Αυτό σημαίνει ότι οι αποκλίσεις στις τιμές της ακτινικής κατανομής της θερμοκρασίας εντός του τεμαχιδίου είναι πολύ μικρές και μπορεί να θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία είναι ίδια σε όλη την μάζα του τεμαχιδίου (Cengel, 2006). Ο αριθμός *Biot* είναι ένα μέτρο σύγκρισης του ρυθμού μεταφοράς της θερμότητας με συναγωγή από το μέσο που περιβάλλει το τεμαχίδιο προς την επιφάνεια του τεμαχιδίου, με τον ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας με αγωγή από την επιφάνεια του τεμαχιδίου προς το εσωτερικό αυτού. Όταν η τιμή του αριθμός *Biot* είναι μικρή, τότε ο ρυθμός διάχυσης της θερμότητας εντός του τεμαχιδίου είναι πολύ μεγαλύτερος από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στο τεμαχίδιο και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η θερμότητα διαχέεται πολύ γρήγορα εντός του τεμαχιδίου, το τεμαχίδιο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και η θερμοκρασία είναι ίδια σ' όλη τη μάζα του. Το χαρακτηριστικό μήκος σφαιρικού σωματιδίου είναι ο λόγος της επιφανείας προς τον όγκο του και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Cengel, 2006):

$$L_{ch} = \frac{1}{6} D_p \quad (7.38)$$

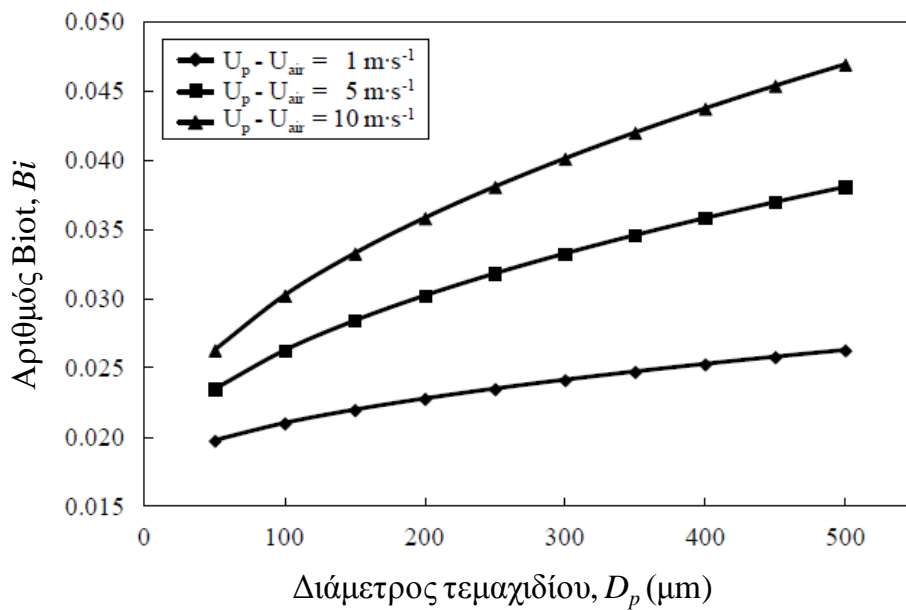
Ο συντελεστής συναγωγής σφαιρικού σωματιδίου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_c = \frac{k_{air} Nu_c}{D_p} \quad (7.39)$$

Ο αριθμός Nusselt για ένα σφαιρικό σωματίδιο υπολογίζεται από την εξίσωση Ranz-Marshall (Ranz and Marshall, 1952a,b):

$$Nu_c = 2 + (0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.333}) \quad (7.40)$$

Με βάση της παραπάνω εξισώσεις υπολογίστηκε ο αριθμός *Biot* για ένα συμπαγή αδιόγκωτο κόκκο περλίτη που εισάγεται σε ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 700°C.



Σχήμα 7.11. Ο αριθμός *Biot* για κόκκους διαφόρων διαμέτρων οι οποίοι εισάγονται σε ρεύμα αέρα θερμοκρασίας 700°C για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις σχετικής ταχύτητας  $|U_p=U_{air}|$ .

Στους υπολογισμούς του αριθμού *Biot* που παρουσιάστηκαν, οι ιδιότητες του αέρα υπολογίστηκαν σε θερμοκρασία 700 °C, θεωρώντας ότι η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του σωματιδίου είναι ίση με  $1.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Η τιμή αυτή είναι ίδια με την θερμική αγωγιμότητα του αδιόγκωτου περλίτη σε θερμοκρασία 25 °C, όπως αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση που προτείνουν οι Zahring et al, ενώ ταυτόχρονα είναι και η χαμηλότερη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σ' όλο το θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής της (Zahring et al. 2001). Αυτό σημαίνει ότι η τιμή αυτή οδηγεί στον υπολογισμό του υψηλότερου αριθμού *Biot* για την συγκεκριμένη περίπτωση. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των υπολογισμών, οι τιμές του αριθμού *Biot* είναι σημαντικά χαμηλότερες της κρίσιμης τιμής 0.1 σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, επιβεβαιώνοντας την αρχική υπόθεση ότι η θερμοκρασία στο σύνολο της μάζας του τεμαχιδίου είναι ίδια και ομοιόμορφα κατανομημένη σ' αυτό.

#### Ισοζύγιο ενέργειας στο τεμαχίδιο περλίτη

Τα τεμαχίδια περλίτη εισάγονται στο θάλαμο διόγκωσης από το άνω μέρος αυτού μαζί με τον αέρα. Κατά την καθοδική τους πορεία θερμαίνονται με μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από

τα τοιχώματα του θαλάμου που βρίσκονται σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτά και με συναγωγή από τον αέρα με τον οποίο βρίσκονται σε επαφή καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης τους, εφόσον η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του τεμαχιδίου. Στην αντίθετη περίπτωση θερμότητα μεταφέρεται με συναγωγή από το τεμαχίδιο στον αέρα. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω με δεδομένο ότι ο αριθμός *Biot* είναι μικρότερος του 0.1, μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία του τεμαχιδίου είναι ίδια σ' όλη τη μάζα του. Επειδή ο αέρας είναι μέσο διαφανές στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, δεν λαμβάνει ούτε εκπέμπει προς κανένα άλλο σώμα ενέργεια με ακτινοβολία. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κάποια ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται επίσης και για την εξάτμιση του νερού της φυσαλίδας. Βάση των παραπάνω το ισοζύγιο ενέργειας στο τεμαχίδιο είναι:

$$\dot{q}_p = \dot{q}_c + \dot{q}_r - \dot{q}_{ev} \quad (7.41)$$

όπου ο όρος  $\dot{q}_c$  εκφράζει την μεταφορά θερμότητα με συναγωγή μεταξύ του τεμαχιδίου και του αέρα, ο όρος  $\dot{q}_r$  μεταφορά θερμότητα με ακτινοβολία μεταξύ του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης και του τεμαχιδίου και ο όρος  $\dot{q}_{ev}$  την κατανάλωση ενέργειας για την εξάτμιση του νερού της φυσαλίδας.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταξύ τεμαχιδίου και αέρα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Davies, 1988):

$$\dot{q}_c = A_p h_c (T_{air} - T_p) \quad (7.42)$$

όπου  $A_p$  η επιφάνεια του σωματιδίου και  $h_c$  ο συντελεστής συναγωγής του συστήματος αέρα σωματιδίου η τιμή του οποίου βρίσκεται από την εξίσωση 7.39. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με την μορφή θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια του τοιχώματος της καμίνου στο σωματίδιο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Davies, 1988):

$$\dot{q}_r = A_p \sigma \epsilon_p (T_p^4 - T_w^4) \quad (7.43)$$

όπου  $\sigma$  η σταθερά Boltzmann με τιμή  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  και  $\epsilon_p$  η εκπεμπτικότητα του σωματιδίου.

Τέλος, η κατανάλωση θερμικής ενέργειας για την εξάτμιση του νερού της φυσαλίδας στην μορφή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης έχει σταθερή τιμή ( $\Delta H_{evH_2O} = 40.68 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) και εξαρτάται μόνο από την ποσότητα του επιδρώντος νερού.

$$\dot{q}_{ev} = -\Delta H_{ev} \frac{M_{H_2O,eff}}{M} \quad (7.44)$$



όπου  $M_{H_2O,eff}$  η μάζα του επιδρόντος νερού και  $M$  η γραμμομοριακή μάζα του. Θεωρώντας ότι η μάζα του νερού εντός της φυσαλίδας είναι σταθερή, η ενέργεια που καταναλώνεται για την εξάτμισή του συναρτίζει της πίεσης και της ακτίνας της φυσαλίδας, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\dot{q}_{ev} = -\Delta H_{ev} \left( \frac{P_b}{R_g T_p} \right) \left( \frac{4\pi R_b^3}{3} \right) \quad (7.45)$$

Η ροή θερμικής ενέργειας προς το τεμαχίδιο έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση ενέργειας, η οποία θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας σ' όλη τη μάζα του τεμαχιδίου, συνδέεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του με την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{q}_p = m_p C_{p,p} \left( \frac{\partial T_p}{\partial t} \right) \quad (7.46)$$

Εξισώνοντας τις 7.42, 7.43 και 7.45 με την 7.46 προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση η οποία χρησιμοποιήθηκε στο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου συναρτίζει του χρόνου:

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\varepsilon_p s (T_p^4 - T_w^4) A_s}{\rho_p C_{p,p} V_p} + \frac{A_s h_c (T_{air} - T_p)}{\rho_p C_{p,p} V_p} - \Delta H_{ev} \left( \frac{P_b}{R_g T_p} \right) \left( \frac{4\pi R_b^3}{3} \right) \quad (7.47)$$

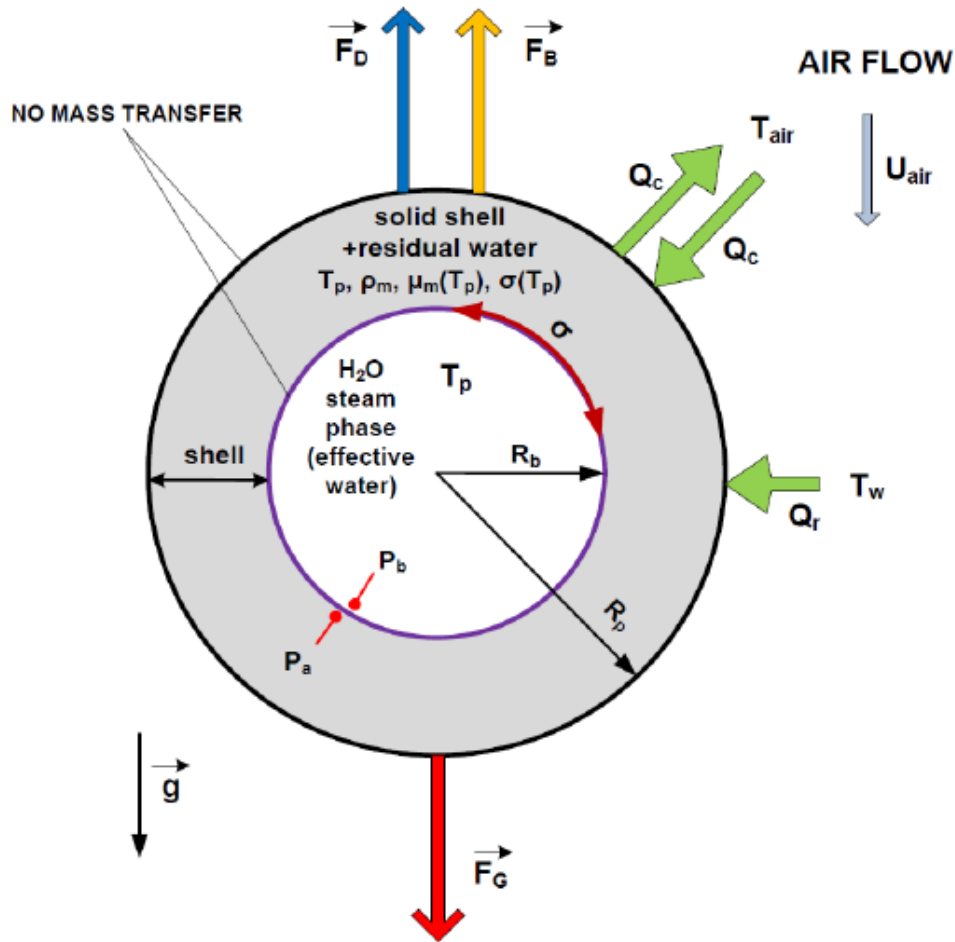
#### 7.3.4. Το μοντέλο σχηματισμού και διόγκωσης της φυσαλίδας ατμού εντός του τεμαχιδίου περλίτη

Για την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου σχηματισμού και διόγκωσης της φυσαλίδας ατμού που σχηματίζεται εντός του τεμαχιδίου περλίτη, ελήφθη υπόψη η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη ενός σημαντικού αριθμού μοντέλων, που είχαν σκοπό να περιγράψουν τη διεργασία σχηματισμού φυσαλίδων στην παραγωγή αφρωδών πολυμερών υλικών (Patel 1980, Amon and Denson 1984), όπως και στην ανάπτυξη φυσαλίδων που σχηματίζονται κατά την αποσυμπίεση και άνοδο του μάγματος (Proussevitch et al. 1993, Proussevitch and Sahagian 1998). Στις περιπτώσεις αυτές, η εμφάνιση και ανάπτυξη των φυσαλίδων οφείλεται στην διάχυση πτητικών τα οποία είτε προϋπήρχαν σε μορφή διαλύματος εντός των ρευστών είτε προστίθενται τεχνητά σ' αυτά, από την κύρια μάζα του ρευστού προς τη φυσαλίδα. Με βάση τον νόμο του Henry σχετικά με την διαλυτότητα αερίων σε ρευστά, μειώνοντας την πίεση του συστήματος, η διαλυτότητα του αερίου στην ρευστή φάση μειώνεται, προκαλώντας την διάχυση του αερίου και τον σχηματισμό μικροφυσαλίδων στην μάζα του.

Στο μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται, το τεμαχίδιο του περλίτη θεωρείται ότι αποτελείται από έναν αρχικό σφαιρικό πυρήνα νερού και από ένα περλιτικό κέλυφος. Η αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου έχει σα συνέπεια την εξάτμιση του νερού και τη σταδιακή διόγκωση της φυσαλίδας εντός του περλιτικού κελύφους. Ο ατμός που σχηματίζεται αντιμετωπίζεται ως ιδανικό αέριο. Η κεντρική φυσαλίδα θεωρείται ότι αποτελείται μόνο από το επιδρών νερό, ενώ το στερεό κέλυφος διατηρεί την αρχική περλιτική του σύσταση. Το παραμένον νερό το οποίο ανέρχεται στη συγκεκριμένη περίπτωση των περλιτικών υλικών που εξετάστηκε στο 40% του συνολικού νερού βρίσκεται και παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας διαλελυμένο εντός του στερεού κελύφους. Κατά την θέρμανση του κόκκου, η αύξηση της θερμοκρασίας του κόκκου έχει τις εξής επιπτώσεις:

- η ενθαλπία του ατμού αυξάνει με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης που ασκεί στην διεπιφάνεια ατμού-κελύφους.
- το ιξώδες του στερεού κελύφους μειώνεται και λόγω της πίεσης που ασκείται από τον ατμό υποχωρεί προκαλώντας αύξηση της διαμέτρου του κόκκου και μείωση της πυκνότητάς του

Οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στην διεπιφάνεια φυσαλίδας-κελύφους είναι η επιφανειακή τάση ( $\sigma$ ), η πίεση του ατμού ( $P_b$ ) και η πίεση του περιβάλλοντος ( $P_a$ ). Η πίεση του ατμού δρα στην κατεύθυνση διόγκωσης της φυσαλίδας ενώ οι άλλες δύο δυνάμεις ( $\sigma$  και  $P_a$ ) αντιτίθενται προς αυτή. Η διόγκωση λοιπόν οφείλεται μόνο στην πίεση που ασκεί ο ατμός που σχηματίστηκε από το επιδρών νερό, αφού το υπόλοιπο παραμένει διαλελυμένο στο στερεό κέλυφος. Σημειώνεται όμως ότι το παραμένον νερό επηρεάζει σημαντικά την τιμή του ιξώδους του κελύφους. Στο σχήμα 7.12 παρουσιάζεται το θεωρούμενο τεμαχίδιο περλίτη με την εσωτερική φυσαλίδα του ατμού και το περλιτικό κέλυφος. Επιπλέον απεικονίζονται οι δυνάμεις που δρουν κατά την διόγκωσή του καθώς και οι θερμοφυσικές ιδιότητες που μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας του.



Σχήμα 7.12. Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου διόγκωσης φυσαλίδας το οποίο περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των πιέσεων, της επιφανειακής τάσης, των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του κελύφους και την μεταβολή του μεγέθους φυσαλίδας και κόκκου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πυκνότητα του αδιόγκωτου κόκκου είναι  $2290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ενώ η πυκνότητα του κελύφους (περλιτικό τήγμα) είναι  $2300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Ο υπολογισμός της αρχικής ακτίνας της φυσαλίδας βασίζεται στην παραδοχή ότι η συνολική πυκνότητα του κόκκου είναι ίδια με την πυκνότητα του αδιόγκωτου σωματιδίου ( $2290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Ο αρχικός όγκος του τεμαχιδίου είναι:

$$V_{p,i} = \frac{4}{3} \pi R_{p,i}^3 \quad (7.48)$$

όπου  $R_{ap,i}$  η αρχική ακτίνα του τεμαχιδίου.

Η μάζα του τεμαχιδίου θεωρείται ότι παραμένει σταθερή σ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας, ενώ υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$m_p = \frac{4}{3} \pi R_{p,i}^3 \rho_p \quad (7.49)$$

όπου  $\rho_p$  η πυκνότητα του τεμαχιδίου περλίτη. Η μάζα του περλιτικού κελύφους το οποίο θα παραμείνει στο τεμαχίδιο μετά το πέρας της διεργασίας, μπορεί να υπολογισθεί με βάση την αρχική περιεκτικότητα του τεμαχιδίου περλίτη σε επιδρών νερό, από την εξίσωση:

$$m_m = (1 - w_{H_2O,eff})m_p \quad (7.50)$$

όπου  $w_{ho2O,eff}$  ο λόγος μαζών επιδρώντος νερού και κόκκου. Ο όγκος του περλιτικού κελύφους παραμένει σταθερός κατά την εξέλιξη της διόγκωσης, επειδή έχει γίνει η παραδοχή ότι η μάζα και η πυκνότητα του τεμαχιδίου παραμένει σταθερή. Επομένως έχουμε ότι:

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_p} \quad (7.51)$$

όπου  $V_{im}$  και  $\rho_m$  ο όγκος και η πυκνότητα του τήγματος. Ο αρχικός όγκος της φυσαλίδας ατμού που σχηματίζεται εντός του τεμαχιδίου, είναι ίσος με τη διαφορά των όγκων του σωματιδίου και του κελύφους και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{b,i} = V_{p,i} - V_m \quad (7.52)$$

όπου  $D_{p,i}$  και  $G_{b,i}$  ο αρχικός όγκος του σωματιδίου και της φυσαλίδας, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η αρχική ακτίνα της φυσαλίδας από την παρακάτω αλγεβρική εξίσωση:

$$R_{b,i} = \sqrt[3]{R_{p,i}^3 - \frac{3}{4\pi} \frac{m_m}{\rho_m}} \quad (7.53)$$

Ο ατμός στην φυσαλίδα αερίου αντιμετωπίζεται ως ιδανικό αέριο και επομένως η πίεση του υπολογίζεται από τον νόμο των ιδανικών αερίων, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_b(t) = \frac{NR_g T_p}{V_b(t)} \quad (7.54)$$

Η αντιμετώπιση του ατμού ως ιδανικό αέριο και η περιγραφή της συμπεριφοράς του από την καταστατική εξίσωση των αερίων αποτελεί παραδοχή η οποία γίνεται συχνά στα μοντέλα διόγκωσης (Patel 1980, Amon and Denson 1984, Prousevitch et al. 1993, Zahringer et al. 2001). Η πίεση του ατμού συναρτήσει της ακτίνας της φυσαλίδας δίνεται από την παρακάτω αλγεβρική εξίσωση:

$$P_b(t) = \frac{3NR_g T_p}{4\pi R_b^3(t)} \quad (7.55)$$

όπου  $R_g$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $R_g=8.314462 \text{ J}\cdot\text{mole}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) και  $N$  ο αριθμός moles του νερού στην φυσαλίδα. Η ταχύτητα μεταβολής της ακτίνας του τήγματος,  $U_m$ , λόγω της αύξησης του όγκου και συνεπώς της ακτίνας της φυσαλίδας  $R_{ib}$ , υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση συνέχειας (Continuity equations) σ' ένα τεμαχίδιο, θεωρώντας σφαιρική συμμετρία για την διεπιφάνεια φυσαλίδας - τήγματος και σταθερή πυκνότητα τήγματος που σχηματίζεται (Patel, 1980; Pay and Favelukis, 2002):

$$U_m = \left( \frac{R_b}{r} \right)^2 \frac{dR_b}{dt} \quad (7.56)$$

όπου  $r$  η ακτινική συντεταγμένη. Η εξίσωση 7.56 ισχύει στην περίπτωση κατά την οποία η πυκνότητα του τήγματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα του ατμού και εφόσον οι φάσεις θεωρούνται ασυμπίεστες. Τα μαγματικά τήγματα χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλές τιμές ιξώδους ενώ οι ροές τους χαρακτηρίζονται από χαμηλούς αριθμούς Reynolds ( $Re \ll 1$ ) (Pai and Favelukis, 2002). Ο συνδυασμός της εξίσωσης Navier-Stokes για έρπουσες ροές σε σφαιρική συμμετρία, σε συνδυασμό με την εξίσωση ακτινικής ταχύτητας του τήγματος (7.56) και το ισοζύγιο τάσεων στην διεπιφάνεια φυσαλίδας-κελύφους, καταλήγει στην παρακάτω συνήθη διαφορική εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της ακτίνας της φυσαλίδας συναρτήσει του χρόνου (Patel, 1980; Shafi and Flumerfelt, 1996; Pai and Favelukis, 2002; Elshereef et al. 2010):

$$\frac{dR_b}{dt} = \frac{R_b}{4\mu_m} \left( P_b(t) - P_a - \frac{2\sigma}{R_b} \right) \quad (7.57)$$

Η αρχική συνθήκη για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης είναι η αρχική ακτίνα της φυσαλίδας αερίου κατά την είσοδο του τεμαχιδίου στην κάμινο:

$$R_b(t=0) = R_{b,i} \quad (7.58)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η αρχική ακτίνα της φυσαλίδας οφείλει να είναι μεγαλύτερη μιας κρίσιμης τιμής έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξή της ( Shafi and Flumerfelt, 1997; Pai and Favelukis, 2002):

$$R_{b,cr} = \frac{2\sigma}{P_{b,i} - P_a} \quad (7.59)$$

Οι εξισώσεις 7.55 και 7.57 αποτελούν το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων το οποίο συνδέει τη μεταβολή της πίεσης του ατμού που σχηματίζεται εντός της φυσαλίδας με την ακτίνα του και από το οποίο τελικά μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή του όγκου της φυσαλίδας με τον χρόνο.

Επειδή ο όγκος του τεμαχιδίου είναι ίσος με το άθροισμα των όγκων του τήγματος και της φυσαλίδας και με δεδομένο ότι η μάζα και πυκνότητα του τήγματος θεωρούνται σταθερές, η μεταβολή του όγκου του συναρτήσει του χρόνου, υπολογίζεται από την παρακάτω αλγεβρική εξίσωση:

$$V_p(t) = V_m + \frac{4}{3}\pi R_b^3(t) \quad (7.60)$$

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι η ακτίνα του τεμαχιδίου είναι ίση με:

$$R_b(t) = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \left( V_m + \frac{4}{3}\pi R_b^3(t) \right)} \quad (7.61)$$

Η εξέλιξη διόγκωσης του τεμαχιδίου ποσοτικά εκφράζεται από τον βαθμό διόγκωσης ( $E$ ), που ως μέγεθος ορίζεται ως ο λόγος της τρέχουσας ακτίνας του τεμαχιδίου προς την αρχική του ακτίνα. Δηλαδή:

$$E(t) = \frac{R_p(t)}{R_{p,i}} \quad (7.62)$$

Η μεταβολή της πυκνότητας του τεμαχιδίου κατά τη διάρκεια της διόγκωσης εξαρτάται από την ακτίνα που έχει το τεμαχίδιο κάθε στιγμή και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\rho_p(t) = \frac{R_{p,i}^3 \rho_{p,i}}{R_p^3(t)} \quad (7.63)$$

Τέλος, το πάχος του κελύφους ( $S(t)$ ), το οποίο μειώνεται κατά την εξέλιξη της διόγκωσης, υπολογίζεται από την διαφορά των ακτίνων του τεμαχιδίου και της φυσαλίδας σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$S(t) = R_p(t) - R_b(t) \quad (7.64)$$

Οι διαφορικές εξισώσεις υπολογισμού της ταχύτητας (7.23) και της θερμοκρασίας (7.47) του τεμαχιδίου, καθώς και η διαφορική εξίσωση υπολογισμού της μεταβολής της ακτίνας της φυσαλίδας (7.57) συναρτήσει του χρόνου, μπορούν να μετασχηματιστούν με τη χρήση της διαφορικής εξίσωσης της ταχύτητας του τεμαχιδίου:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{U_p} \quad (7.65)$$

Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των παραπάνω φυσικών μεγεθών σε σχέση με τη θέση που βρίσκεται το τεμαχίδιο στο θάλαμο διόγκωσης και έτσι τα αποτελέσματα γίνονται συμβατά με τη διαφορική εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου.

#### **7.4. Συνολικό μαθηματικό μοντέλο διόγκωσης τεμαχιδίου περλίτη κατά την κίνησή του κατά μήκος της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου**

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελείται από ένα σύστημα αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων η επίλυση των οποίων καταλήγει στον προσδιορισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα συναρτήσει της απόστασης από την είσοδο του θαλάμου διόγκωσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου, καθώς και της ακτίνας της φυσαλίδας ατμού που σχηματίζεται εντός του τεμαχιδίου συναρτήσει τόσο του χρόνου όσο και της θέσης του τεμαχιδίου στο θάλαμο. Στην ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου έχουν συμπεριληφθεί και οι εξισώσεις υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του περλιτικού κελύφους, αλλά και των

τοπικών ρεολογικών και θερμικών χαρακτηριστικών της ροής. Στην συνέχεια συνοψίζεται το σύνολο των εξισώσεων που απαρτίζουν το μαθηματικό μοντέλο.

Τα δεδομένα που εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο είναι τα εξής:

- Αρχική διάμετρος τεμαχιδίου,  $D_{p,i}$  (μm)
- Περιεκτικότητα τεμαχιδίου σε νερό  $w_{H_2O}$  (%)
- Θερμοκρασία θαλάμου στο σημείο  $x=0$   $T_{wallmin}$  (K)
- Θερμοκρασία θαλάμου στο σημείο  $x=2.70$  m  $T_{wallmax}$  (K)
- Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα  $Q_{air,in}$  (L·min<sup>-1</sup>)
- Θερμοκρασία τροφοδοτούμενου αέρα  $T_{air,in}$  (K)

Οι εξισώσεις που αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο είναι οι ακόλουθες:

*Εξισώσεις προσδιορισμού ιδιοτήτων αέρα και περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας.*

$$\rho_{air} = \frac{P}{R_g T_{air}} \quad (7.1)$$

$$\mu_{air} = \mu_{air,ref} \left( \frac{T_{air}}{T_{air,ref}} \right)^{n_{ref}} \quad (7.2)$$

$$k_{air} = \alpha_{k,1} T_{air}^3 + \alpha_{k,2} T_{air}^2 + \alpha_{k,3} T_{air} + \alpha_{k,4} \quad (7.3)$$

$$C_{p,air} = \alpha_{C_p,1} T_{air}^3 + \alpha_{C_p,2} T_{air}^2 + \alpha_{C_p,3} T_{air} + \alpha_{C_p,4} \quad (7.4)$$

$$Pr_{air} = \frac{\nu_{air}}{\alpha_{air}} = \frac{C_{p,air} \mu_{air}}{k_{air}} \quad (7.5)$$

$$\log \mu = J + \frac{X}{T_m - Y} \quad (7.6)$$

$$X_{TR} = -369.79 w_{H_2O} + 11749 \quad (7.9)$$

$$X_{CH} = -357.44 w_{H_2O} + 11432 \quad (7.10)$$

$$Y_{TR} = 15.472 (w_{H_2O})^2 - 109.09 w_{H_2O} + 250.71 \quad (7.11)$$

$$Y_{CH} = 15.381 (w_{H_2O})^2 - 108.33 w_{H_2O} + 277.64 \quad (7.12)$$

$$\sigma = 0.09317 + 1.971 \cdot 10^{-4} T_m \quad (7.13)$$

$$C_{p,0}(0\%H_2O) = (24.25 + 4.66 \cdot 10^{-3} T - 6.62 \cdot 10^{-5} T^2) \cdot 41.868 \quad (7.14)$$

$$C_{p(steam)} = 0.6417T + 1646.9 \quad (7.15)$$

$$C_{p,p}(X\%H_2O) = (X\%H_2O/100) \cdot (0.6417 \cdot T_p + 1646.9) + \\ ((100 - X\%H_2O)/100) \cdot (-0.0004 \cdot T_p + 1.121 \cdot T_p + 497.73) \quad (7.16)$$

Εξισώσεις κίνησης τεμαχιδίου:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_{air}}{\rho_p} g - \frac{3}{4} \frac{\rho_{air} C_D (U_{air} - U_p)^2}{d_p \rho_p} \quad (7.23)$$

$$U_p = \frac{dz}{dt} \quad (7.24)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (7.25)$$

$$Re_p = \frac{\rho_{air} d_p |U_p - U_{air}|}{\mu_{air}} \quad (7.26)$$

Εξισώσεις θέρμανσης αέρα:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_{in} \frac{T_{air}}{T_{air,in}} \quad (7.27)$$

$$U_{air} = \frac{\dot{Q}_{air}}{A} \quad (7.28)$$

$$\frac{dT_{air}}{dz} = \left( \frac{\pi D_t h}{\dot{m} C_{p,air}} \right) (T_w - T_{air}) \quad (7.32)$$

$$h = \frac{k_{air} Nu}{D_t} \quad (7.34)$$

$$Re = \frac{\rho_{air} d U_{air}}{\mu_{air}} \quad (7.35)$$

$$L_{hyd} = 0.05 \cdot Re \cdot D_t$$

$$L_{th} = 0.05 \cdot Re \cdot Pr \cdot D_t$$

Εντολή ελέγχου IF..THEN..ELSE..END IF για τον προσδιορισμό της κατάλληλης εξίσωσης υπολογισμού του τοπικού αριθμού Nusselt από μία από τις εξισώσεις του πίνακα 7.6.



Εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας στο τεμαχίδιο:

$$h_c = \frac{k_{air} Nu_c}{D_p} \quad (7.39)$$

$$Nu_c = 2 + (0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.333}) \quad (7.40)$$

Εντολή ελέγχου IF..THEN..ELSE..END IF για τον ορισμό της εκπεμπτικότητας του τεμαχιδίου ανάλογα με το αν η διόγκωση έχει αρχίσει ( $e_p=0.55$ ) ή όχι ( $e_p=0.70$ ).

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\varepsilon_p s (T_p^4 - T_w^4) A_s}{\rho_p C_{p_p} V_p} + \frac{A_s h_c (T_{air} - T_p)}{\rho_p C_{p_p} V_p} - \Delta H_{ev} \left( \frac{P_b}{R_g T_p} \right) \left( \frac{4\pi R_b^3}{3} \right) \quad (7.47)$$

Εξισώσεις διόγκωσης φουσαλίδας:

$$P_b(t) = \frac{3 N R_g T_p}{4\pi R_b^3(t)} \quad (7.55)$$

$$\frac{dR_b}{dt} = \frac{R_b}{4\mu_m} \left( P_b(t) - P_a - \frac{2\sigma}{R_b} \right) \quad (7.57)$$

Αρχική συνθήκη εξίσωσης  
7.57:

$$R_{b,i} = \sqrt[3]{R_{p,i}^3 - \frac{3}{4\pi} \frac{m_m}{\rho_m}} \quad (7.53)$$

$$E(t) = \frac{R_p(t)}{R_{p,i}} \quad (7.62)$$

$$\rho_p(t) = \frac{R_{p,i}^3 \rho_{p,i}}{R_p^3(t)} \quad (7.63)$$

$$S(t) = R_p(t) - R_b(t) \quad (7.64)$$

## 7.5. Αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου

Το σύστημα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο επιλύεται με το πρόγραμμα Berkeley Madonna έκδοσης V 8.3.18. που εκτελείται σε υπολογιστή των εξής τεχνικών χαρακτηριστικών: επεξεργαστής dual-core Intel Pentium T3200 (2 GHz) -3 GB Μνήμη RAM - λειτουργικού πρόγραμμα Windows Vista (32-bit). Η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Runge-Kutta 4<sup>ης</sup> τάξης με βήμα επίλυσης  $\Delta x=0.001m$ . Η επίλυση κάθε ενός από τα σενάρια που παρουσιάζονται στην συνέχεια διαρκεί λιγότερο από 1s. Ο κώδικας που γράφτηκε γι' αυτό το σκοπό παρουσιάζεται στο Παράρτημα IV της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

### 7.5.1. Ρυθμός θέρμανσης και χαρακτηριστικά ροής του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης

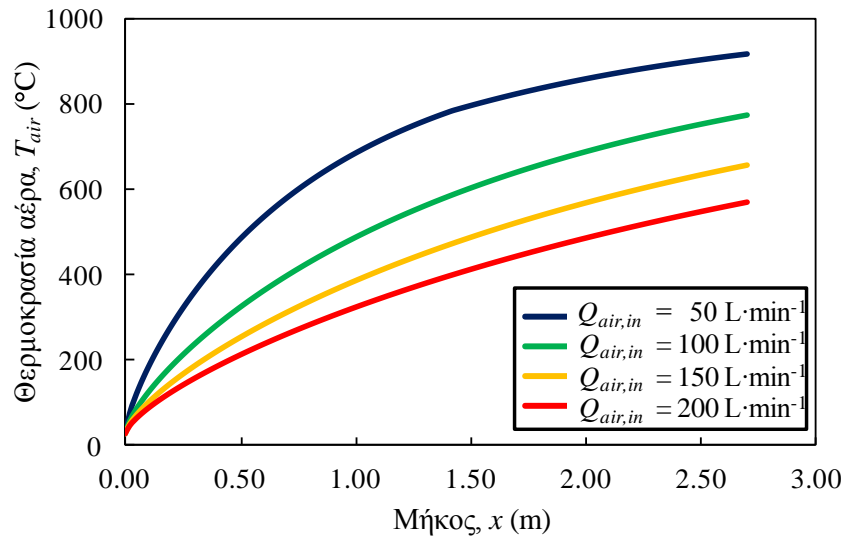
Στην ενότητα αυτή, μελετάται η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων της καμίνου όπως η ογκομετρική παροχή και η θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου αέρα και η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου στην θερμοκρασιακή κατανομή χαρακτηριστικά της ροής του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7.4 με το πρόγραμμα Berkeley Madonna. Μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας της καμίνου οι οποίες είναι οι εξής:

- Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος,  $T_w = 1273K$  και ρυθμοί τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50, 100, 150$  και  $200 L \cdot min^{-1}$
- Γραμμικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος κατά την οποία η θερμοκρασία του τοιχώματος στο ανώτερο τμήμα της καμίνου είναι  $T_1 = 973 K$  και στην έξοδο της  $T_6 = 1473K$  και ρυθμοί τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50, 100, 150$  και  $200 L \cdot min^{-1}$
- Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος,  $T_w = 1273K$  και ρυθμός τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 L \cdot min^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

#### 7.5.1.1 Σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων καμίνου

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα που τροφοδοτείται στο θάλαμο διόγκωσης του περλίτη κατά μήκος του θαλάμου για θερμοκρασία εισόδου του αέρα ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

298 K και θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου ίση με 1000 °C, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.13.

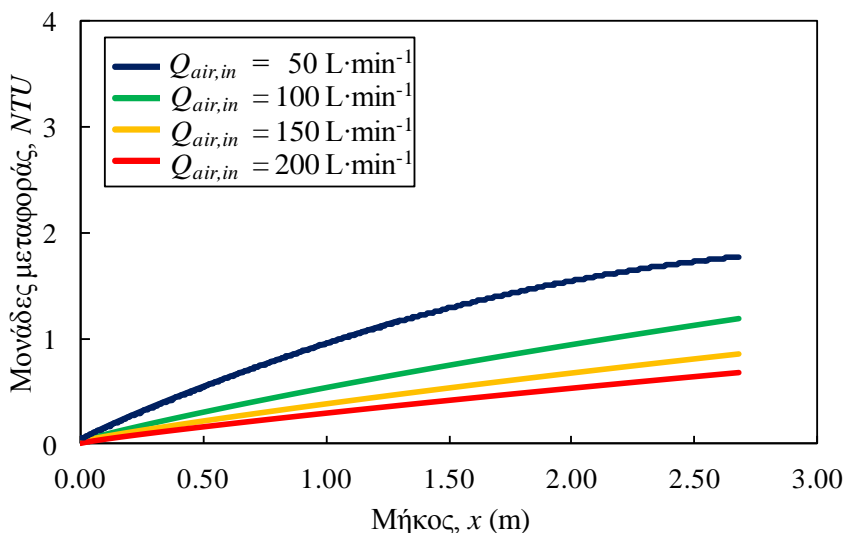


Σχήμα 7.13. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1000 °C και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L · min<sup>-1</sup>.

Παρατηρείται ότι η αύξηση του ογκομετρικού ρυθμού παροχής του αέρα μειώνει σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα κατά μήκος του θαλάμου, όπως επίσης και την τελική θερμοκρασία εξόδου του από αυτόν. Η αύξηση της παροχής αέρα από 50 σε 200 L · min<sup>-1</sup> οδηγεί σε μια πτώση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα της τάξης των 340 °C. Η θερμοκρασιακή κατανομή του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης προκύπτει από την διαφορική εξίσωση (7.32) η οποία περιλαμβάνει τον αδιάστατο παράγοντα:

$$Number\ of\ transfer\ units\ (NTU) = \frac{\pi Dh}{\dot{m} C_{p_{air}}} x \quad (7.66)$$

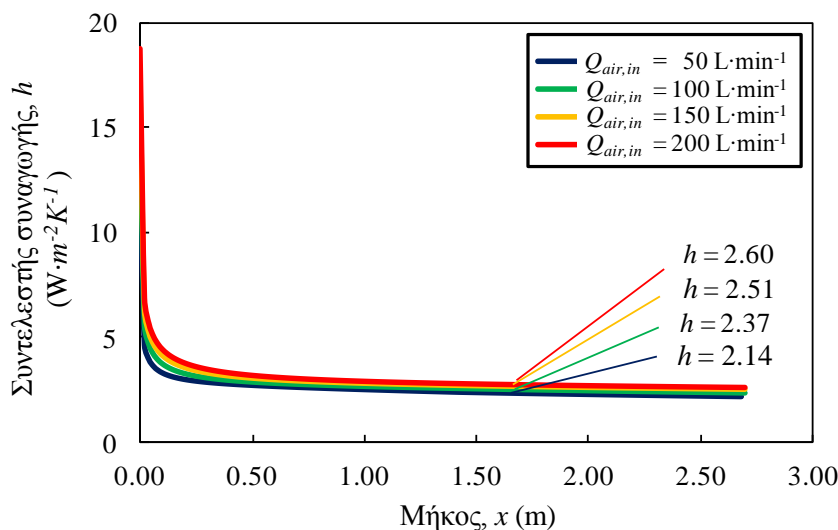
Η αδιάστατη αυτή παράμετρος ονομάζεται συντελεστής μονάδων μεταφοράς (*number of transfer units-NTU*) και είναι ένα μέτρο καθορισμού της αποτελεσματικότητας μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των θερμών τοιχωμάτων και του αέρα. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας από τα τοιχώματα του θαλάμου στη μονάδα μάζας του αέρα.



Σχήμα 7.14. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για παροχές αέρα  $50, 100, 150$  και  $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 7.14, ο ρυθμός θέρμανσης του αέρα είναι ανάλογος της τιμής των μονάδων μεταφοράς θερμότητας και αντιστρόφως ανάλογος του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα. Αύξηση της ογκομετρικής παροχής του αέρα συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού ροής μάζας του αέρα και αυτό έχει σα συνέπεια όπως υποδηλώνει η εξίσωση 7.66 μείωση της τιμής των μονάδων μεταφοράς θερμότητας.

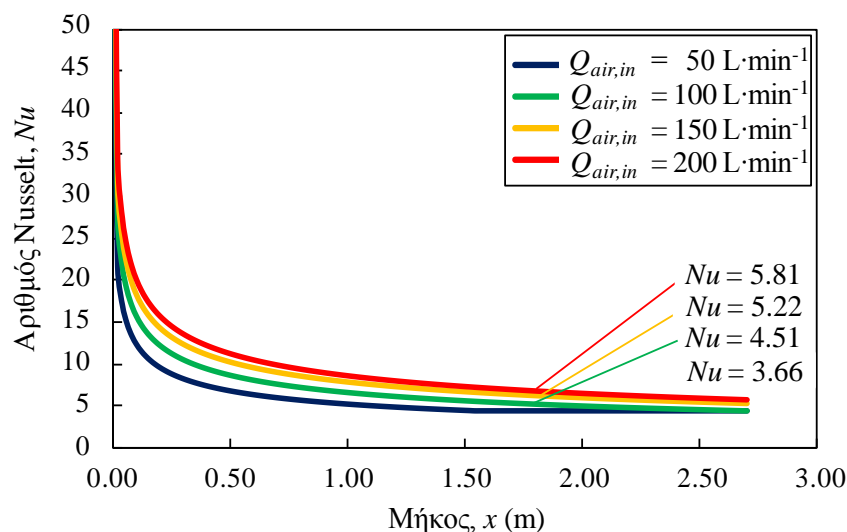
Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος που καθορίζει την αποτελεσματικότητα της θέρμανσης του αέρα από τα θερμά τοιχώματα της καμίνου είναι ο συντελεστής συναγωγής  $h$  του αέρα, η τιμή του οποίου υπολογίζεται από την εξίσωση 7.34. Στο σχήμα 7.15 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες παροχές αέρα και σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος  $T_w = 1273\text{ K}$ .



Σχήμα 7.15. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής θερμότητας από το τοίχωμα στον αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος  $1273\text{ K}$  και για παροχές αέρα  $50, 100, 150$  και  $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.15, ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας από το τοίχωμα του θαλάμου στον αέρα εξαρτάται από την ογκομετρική παροχή του αέρα. Συγκεκριμένα, η τιμή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του αυξάνει με αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα με αποτέλεσμα να εννοείται η μεταφορά θερμότητας όσο αυξάνει ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα. Παρατηρείται επίσης, ότι στο ανώτερο τμήμα της καμίνου όπου η ροή αναπτύσσεται θερμικά και υδροδυναμικά ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λαμβάνει υψηλές τιμές σ'όλες τις ογκομετρικές παροχές. Στην συνέχεια, όταν η ροή έχει αναπτυχθεί ο συντελεστής συναγωγής μειώνεται αισθητά μέχρι, ασυμπτωτικά, να προσεγγίσει μία σταθερή τιμή η οποία εξαρτάται από το ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα.

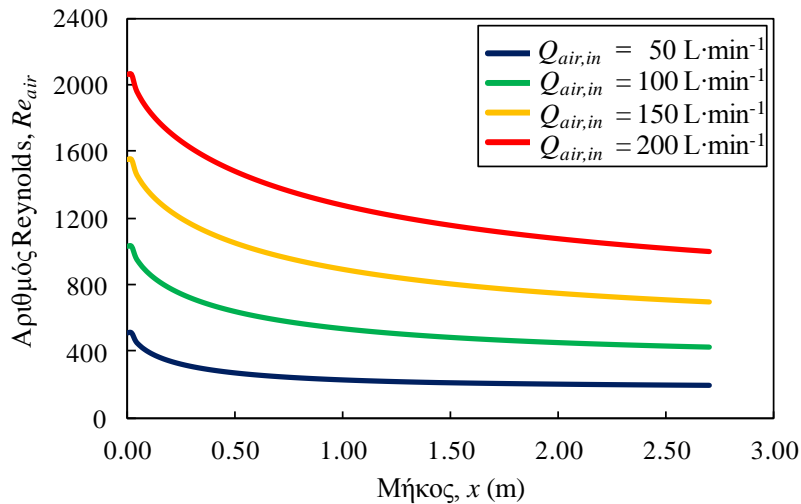
Στο διάγραμμα 7.16 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή Nusselt κατά μήκος του αγωγού για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w=1000$  °C και για διάφορες παροχές αέρα. Ο αριθμός Nusselt εξαρτάται από το συντελεστή συναγωγής  $h$  και υπολογίζεται από την εξίσωση 7.40.



Σχήμα 7.16. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 7.16, αύξηση της ογκομετρικής παροχής του αέρα οδηγεί σε αύξηση της τιμής του αριθμού Nusselt. Επιπλέον, η τιμή του αριθμού Nusselt είναι αυξημένη στην περιοχή εισόδου του αέρα ενώ στην συνέχεια μειώνεται προσεγγίζοντας ασυμπτωτικά την τιμή 3.66 η οποία αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τιμή του αριθμού  $Nu$  στην περίπτωση στρωτής ροής ανεπτυγμένων θερμικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών και σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος.

Στο σχήμα 7.17 παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Reynolds κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες ογκομετρικές παροχές αέρα και για θερμοκρασία τοιχώματος 1273K.



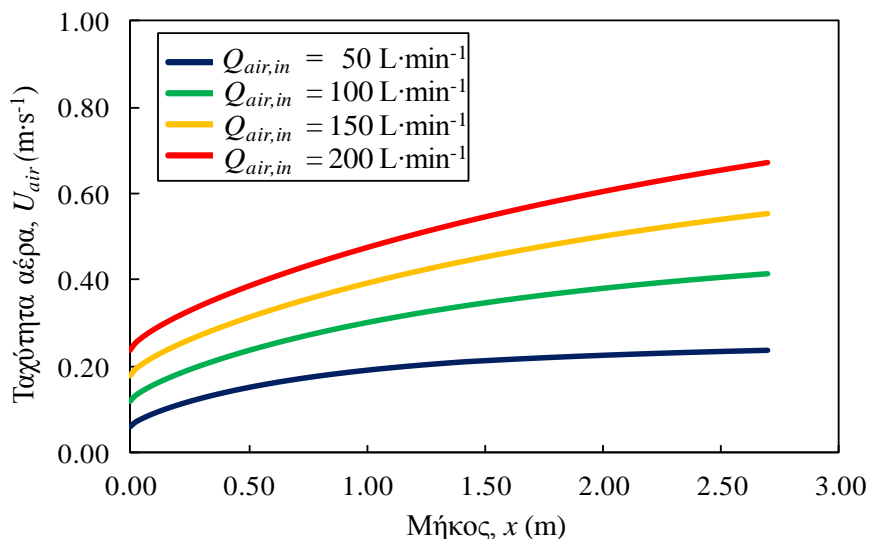
Σχήμα 7.17. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

Ο αριθμός Reynolds εξαρτάται σημαντικά από την ογκομετρική παροχή του αέρα στον θάλαμο θέρμανσης. Στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι ο μέγιστος ( $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) η τιμή του στην περιοχή εισόδου προσεγγίζει τις 2000 μονάδες, ενώ όσο μεγαλώνει η απόσταση από την περιοχή αυτή, η τιμή του αριθμού Reynolds μειώνεται αισθητά. Παρόμοια είναι η τάση που εμφανίζει η τιμή του αριθμού Reynolds και για τις άλλες περιπτώσεις ρυθμού τροφοδοσίας αέρα. Είναι όμως φανερό ότι η τιμή του μειώνεται σε όλο το μήκος του θαλάμου όσο μειώνεται ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα. Οι τιμές του αριθμού Reynolds όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του σχήματος 7.17, δείχνουν ότι η ροή εντός του αγωγού για το εύρος των ρυθμών τροφοδοσίας αέρα που εξετάστηκαν ( $Q_{air,in} = 50\text{-}200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) είναι στρωτή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αριθμός Reynolds κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

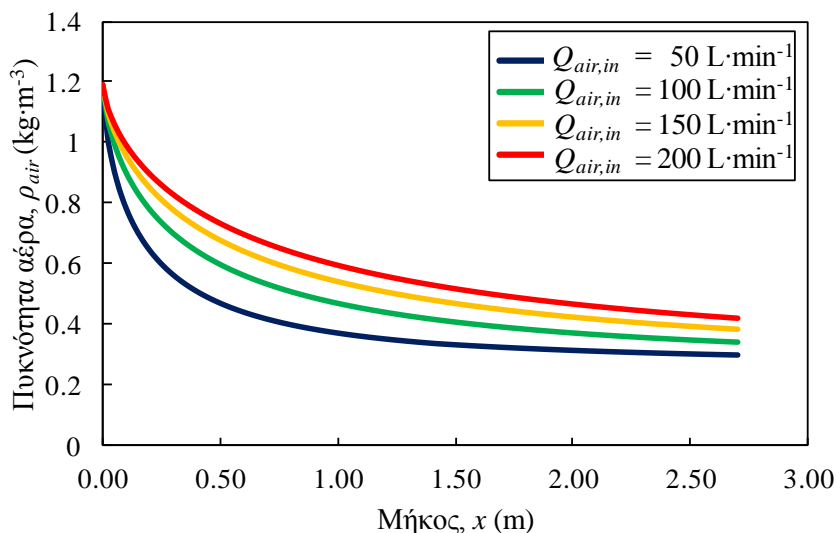
$$Re = \frac{\rho_{air} d U_{air}}{\mu_{air}} \quad (7.35)$$

Τα μεγέθη που επηρεάζουν την τιμή του αριθμού Reynolds είναι η ταχύτητα του αέρα, η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του. Στο σχήμα 7.18 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες παροχές αέρα και σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου.



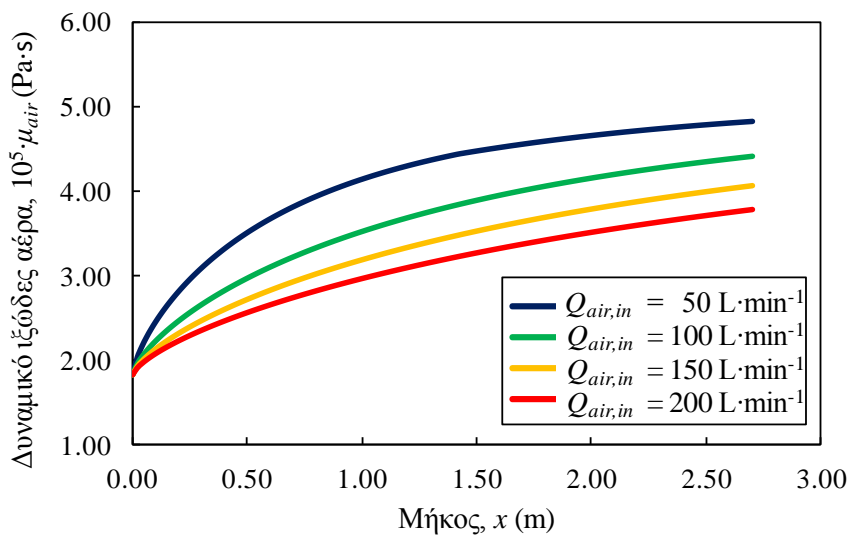
Σχήμα 7.18. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του σχήματος 7.18, η ταχύτητα του αέρα αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα. Παρατηρείται επίσης σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι 200 L·min<sup>-1</sup> η ταχύτητα του αέρα στην είσοδο της καμίνου είναι 0.23 m·s<sup>-1</sup> ενώ κατά την έξοδό του έχει ταχύτητα 0.67 m·s<sup>-1</sup>. Η ταχύτητα του αέρα αυξάνει στην περίπτωση αυτή κατά τρεις φορές κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι χαμηλός ( $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας που αποκτά ο αέρας. Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα του αέρα κατά την είσοδό του στον θάλαμο διόγκωσης είναι περίπου 0.06 m·s<sup>-1</sup> ενώ εξέρχεται από αυτόν με ταχύτητα που ξεπερνά τα 0.24 m·s<sup>-1</sup>. Εδώ παρατηρείται ότι η ταχύτητα του αέρα τετραπλασιάζεται κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία του αέρα έχει σημαντική επίδραση στην πυκνότητα του. Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνει η θερμοκρασία του με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του και της ογκομετρικής του ροής εντός του θαλάμου. Στο σχήμα 7.19 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος,  $T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  και για διάφορες παροχές αέρα.



Σχήμα 7.19. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.19, η πυκνότητα του αέρα εντός του θαλάμου θέρμανσης μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της ογκομετρικής παροχής του. Η μείωση αυτή της πυκνότητας οφείλεται στη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα που παρατηρείται, όπως φαίνεται καθαρά και στο Σχήμα 7.13. Στο σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για τις τέσσερις περιπτώσεις ογκομετρικής παροχής αέρα.



Σχήμα 7.20. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για θερμοκρασία τοιχώματος 1273 K και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.20, η αύξηση του δυναμικού ιξώδους του αέρα είναι σημαντική κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι μικρός. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται στους χαμηλότερους ρυθμούς τροφοδοσίας.

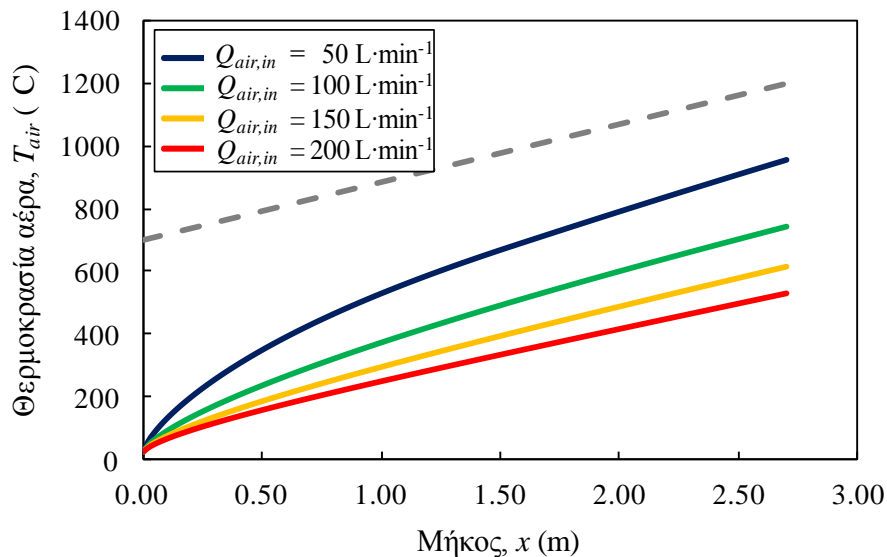


Από τα σχήματα 7.18, 7.19, 7.20, φαίνεται ότι τα μεγέθη τα οποία επηρεάζουν τον αριθμό Reynolds μεταβάλλονται σημαντικά κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Η αύξηση της ταχύτητας του αέρα λόγω της μείωσης της πυκνότητάς του δεν είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει αύξηση του αριθμού Reynolds κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, γιατί είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της πυκνότητας του αέρα. Την σημαντικότερη επίδραση φαίνεται να έχει η μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα η τιμή του οποίου αυξάνει κατά μήκος του αγωγού από 1.5 ( $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) έως 2.5 φορές ( $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) και, εφόσον βρίσκεται στον παρονομαστή της εξίσωσης υπολογισμού του αριθμού Reynolds, προκαλεί μείωση στον αριθμό Reynolds.

#### 7.5.1.2 Μεταβλητή θερμοκρασία τοιχώματων

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται τα θερμικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά του αέρα στην περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία του θαλάμου θέρμανσης μεταβάλλεται κατά μήκος του, λόγω της διαφορετικής ρύθμισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των θερμικών αντιστάσεων. Η βάρθρωση στην θερμοκρασία του τοιχώματος σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης συμπεριλήφθηκε στο μαθηματικό μοντέλο με την εισαγωγή μίας γραμμικής εξίσωσης σύμφωνα με την οποία η τιμή της θερμοκρασία του τοιχώματος στο σημείο  $x = 0$  ισούται με την θερμοκρασία λειτουργίας του πρώτου ζεύγους θερμικών αντιστάσεων ενώ η θερμοκρασία του τοιχώματος στο σημείο  $x = 2.70\text{m}$  ισούται με την θερμοκρασία στην οποία ρυθμίζεται κάθε φορά να λειτουργεί το έκτο και τελευταίο ζεύγος αντιστάσεων.

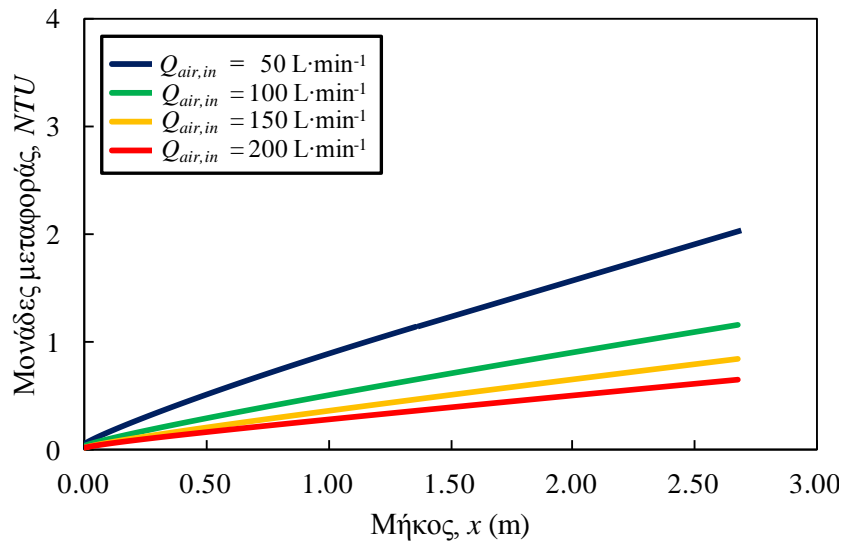
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα θερμικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά του αέρα στην περίπτωση που η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης μεταβάλλεται γραμμικά κατά το μήκος του από τους  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  (είσοδο θαλάμου διόγκωσης) μέχρι τους  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  (έξοδος θαλάμου διόγκωσης). Όπως και προηγουμένως, μελετήθηκαν και παρουσιάζονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας και ταχύτητας του αέρα, του συντελεστή συναγωγής, των αριθμών  $Re$  και  $Nu$  αλλά και των σημαντικών ιδιοτήτων του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για ρυθμούς τροφοδοσίας αέρα 50, 100, 150 και  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Στο σχήμα 7.21 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διαφορετικές ογκομετρικές παροχές αέρα.



Σχήμα 7.21. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος (γκρι διακεκομμένη γραμμή) και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Και σε αυτή την περίπτωση, η θερμοκρασία του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης και σε όλο το μήκος του αυξάνει όσο μειώνεται η ογκομετρική του παροχή. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδό του από τον θάλαμο διόγκωσης ανέρχεται στους 950, 740, 615 και 530 °C για ρυθμούς τροφοδοσίας 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , αντίστοιχα. Η κατανομή της θερμοκρασίας σε αυτή την περίπτωση διαφέρει αισθητά σε σχέση με την κατανομή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.13 στο οποίο η θερμοκρασία του τοιχώματος της καμίνου είναι ίδια σε όλο της το μήκος. Στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα είναι έντονη στις περιοχές κοντά στην είσοδο της καμίνου και ασυμπτωτικά τείνει να αποκτήσει την θερμοκρασία του τοιχώματος, ενώ στην περίπτωση μεταβλητής θερμοκρασία τοιχώματος, η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κοντά στην είσοδο του θαλάμου είναι ομαλότερη. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη θερμοκρασία που έχει το τοίχωμα του θαλάμου στην περιοχή εισόδου του αέρα η οποία ξεκινά από 700 °C και αυξάνει σταδιακά κατά μήκος του. Φαίνεται επίσης ότι, ειδικά σε χαμηλές ογκομετρικές παροχές, η θερμοκρασία του αέρα αυξάνει σχεδόν αναλογικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του τοιχώματος.

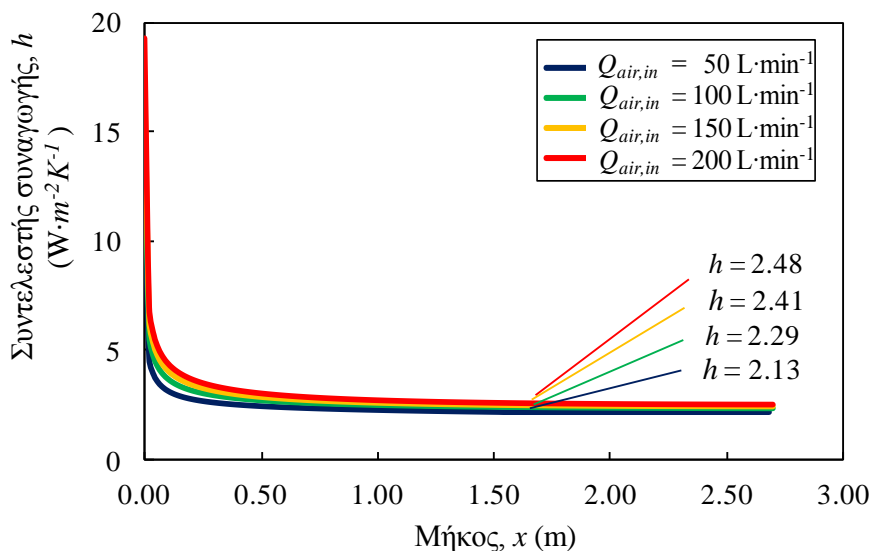
Στο σχήμα 7.22 παρουσιάζεται η μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας συναρτήσει του μήκους και για διάφορες παροχές αέρα.



Σχήμα 7.22. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (NTU) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L · min<sup>-1</sup>.

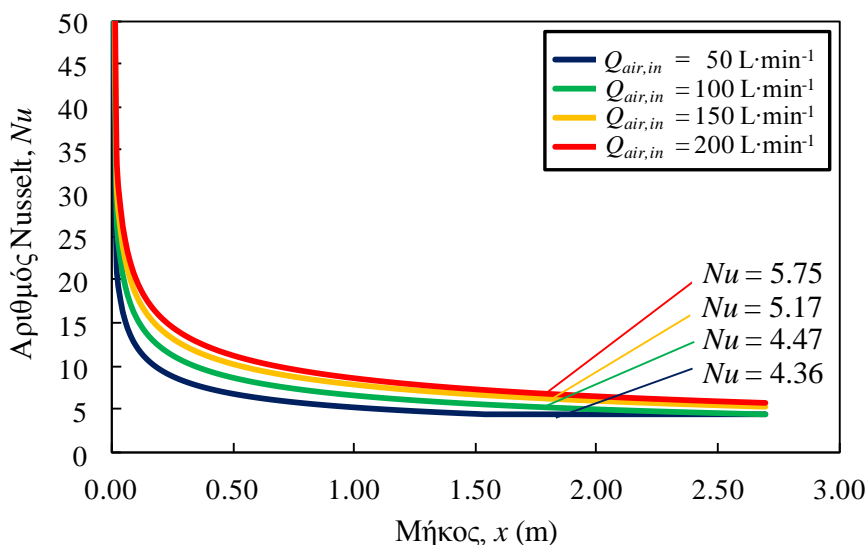
Η απόδοση της θέρμανσης είναι μεγαλύτερη για μικρές παροχές αέρα ενώ μειώνεται με αύξηση της ογκομετρικής του τροφοδοσίας κατά σχεδόν όμοιο τρόπο με την περίπτωση που η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης είναι σταθερή (Σχήμα 7.14). Οι μειωμένες τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής στις περιπτώσεις αυξημένης τροφοδοσίας αέρα στον θάλαμο διόγκωσης δικαιολογούν τον χαμηλότερο ρυθμό ανόδου της θερμοκρασία του αέρα στις περιπτώσεις αυτές.

Στο σχήμα 7.23, παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας αέρα. Η τιμή του συντελεστή συναγωγής μειώνεται κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης σε όλες τις περιπτώσεις τροφοδοσίας αέρα, ενώ φαίνεται να τείνει στις τιμές 2.48, 2.41, 2.29 και 2.13 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> για ρυθμούς τροφοδοσίας αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>, αντίστοιχα.



Σχήμα 7.23. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

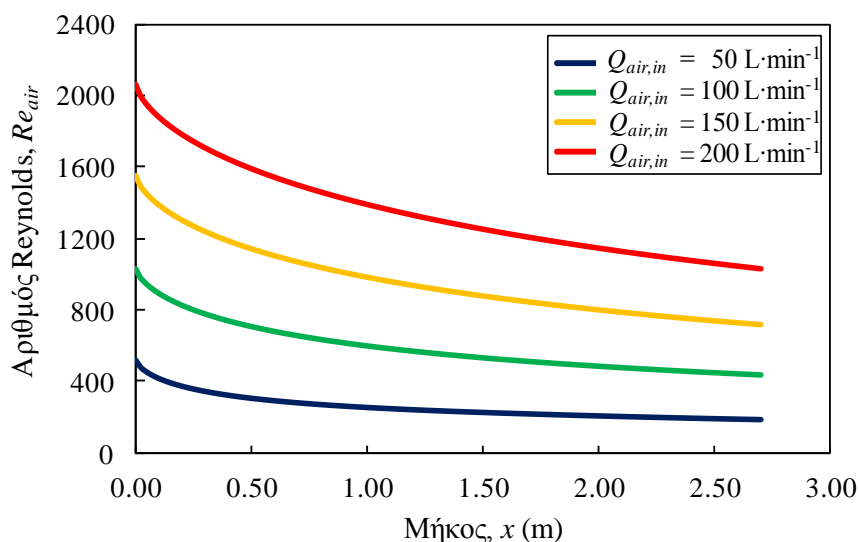
Έντονη είναι και η μεταβολή του αριθμού Nusselt κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.24.



Σχήμα 7.24. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.

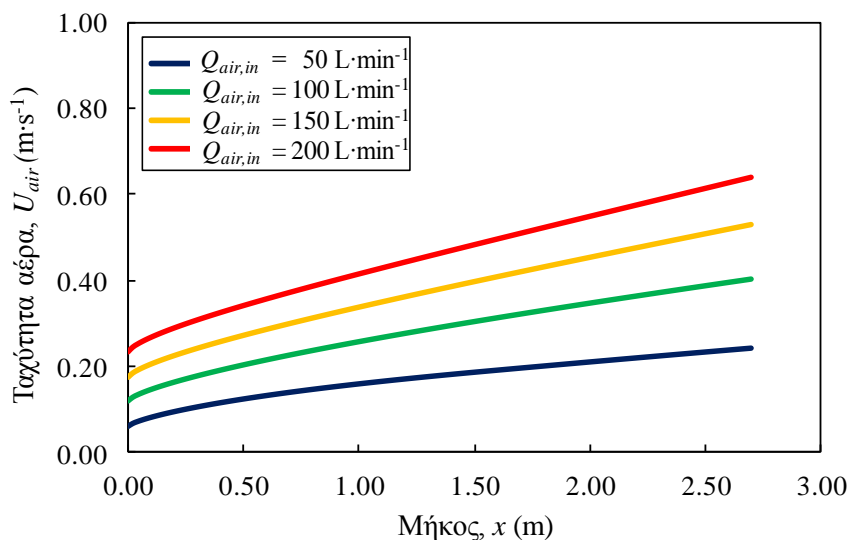
Η τιμή του αριθμού Nusselt αυξάνει με αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα, γεγονός το οποίο παρατηρείται επίσης και στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος. Ο αριθμός Nusselt για ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή 4.36 στην έξοδο του θαλάμου

Στο σχήμα 7.25 παρουσιάζεται η μεταβολή του αριθμού Reynolds κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες ογκομετρικές παροχές αέρα στον θάλαμο διόγκωσης.



Σχήμα 7.25. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Ο αριθμός Reynolds μειώνεται κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης με την μείωση της ογκομετρικής ροής. Σ'όλες όμως τις περιπτώσεις η τιμή του δεν υπερβαίνει το 2100 το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ροή εντός του θαλάμου στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι στρωτή. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας, της πυκνότητας και του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης μεταβάλλεται κατά μήκος του.

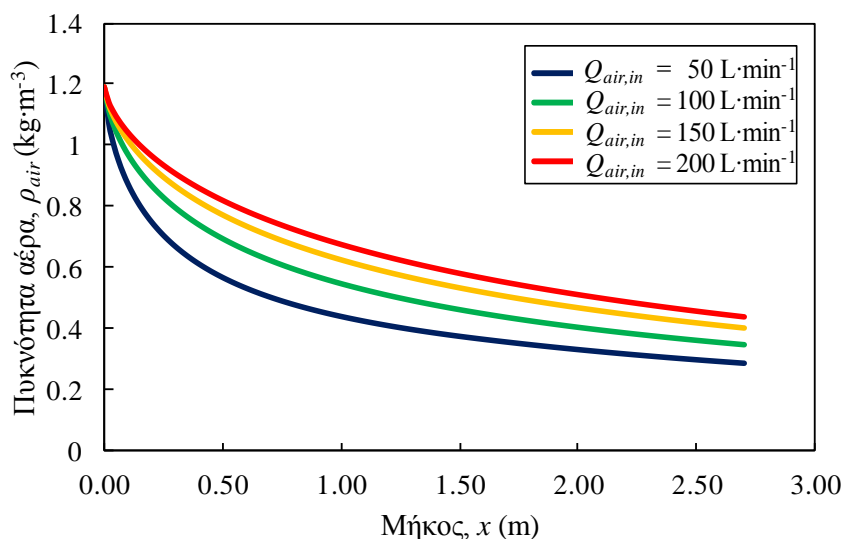


Σχήμα 7.26. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.26, η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις ογκομετρικής του παροχής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , η ταχύτητα εισόδου του είναι  $0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ενώ, ο

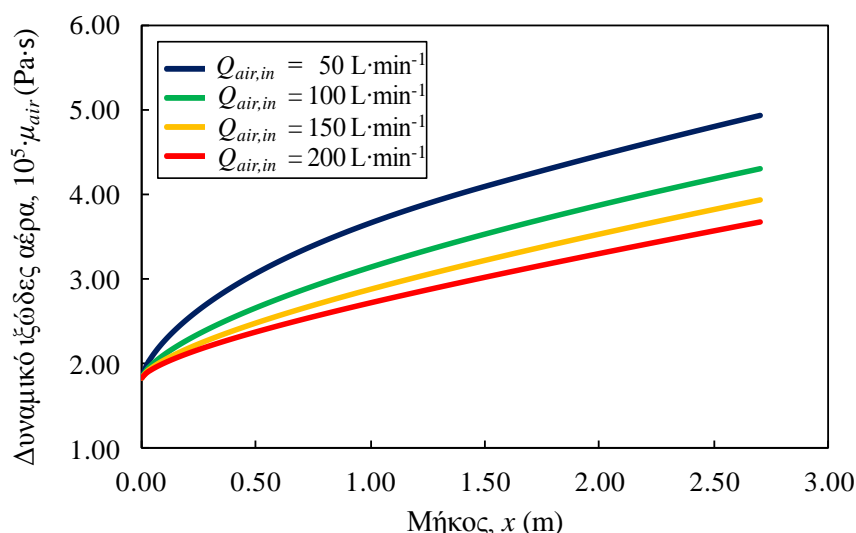
αέρα εξέρχεται από τον θάλαμο διόγκωσης με ταχύτητα  $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , παρουσιάζοντας έτσι αύξηση της ταχύτητάς του κατά 4 φορές περίπου. Στην περίπτωση, που η παροχή του αέρα είναι  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , η ταχύτητα εξόδου του αέρα παρουσιάζεται αυξημένη κατά 2.5 φορές σε σχέση με την ταχύτητα εξόδου του. Η εντονότερη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην περίπτωση μικρών ογκομετρικών παροχών οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι η αύξηση της ταχύτητας του αέρα είναι πιο ομαλή στην περίπτωση μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας τοιχώματος και συμβαίνει σε όλο σχεδόν το μήκος του θαλάμου διόγκωσης σε σύγκριση με την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει με σύγκριση των καμπυλών των σχημάτων 7.18 και 7.26.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του αγωγού για διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας του αέρα.



Σχήμα 7.27. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.27, η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα είναι σημαντική κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Λόγω όμως της ομαλότερης αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, η μεταβολή της πυκνότητας του είναι λιγότερο απότομη σε σχέση με την ισοθερμοκρασιακή κατανομή ιδίως, στις περιπτώσεις που η ογκομετρική παροχή του αέρα ξεπερνά τα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Στην συνέχεια (Σχήμα 7.28), παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης και για διαφορετικές παροχές αέρα.

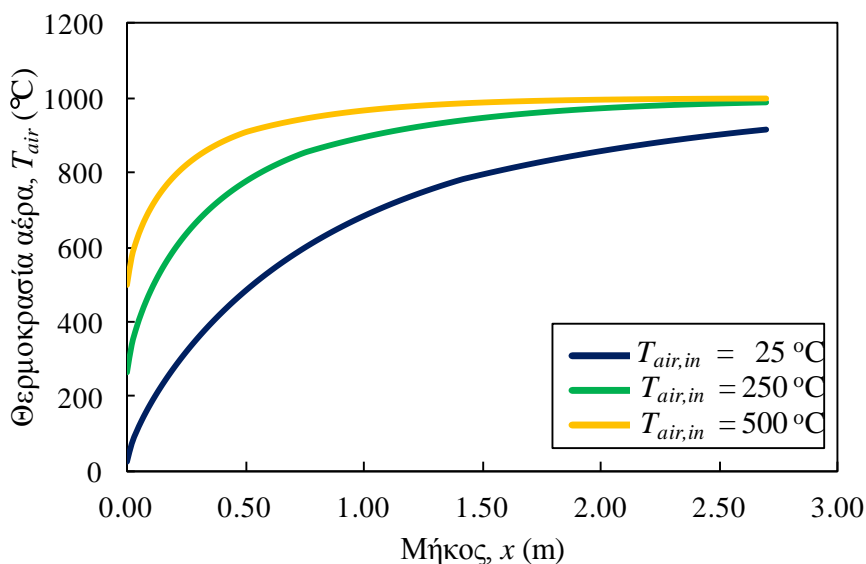


Σχήμα 7.28. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου και για παροχές αέρα 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Το δυναμικό ιξώδες του αέρα αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας με συνέπεια αύξηση της παροχής του αέρα να μειώνει το δυναμικό ιξώδες του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του.

#### 7.5.1.3. Σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων καμίνου και τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα

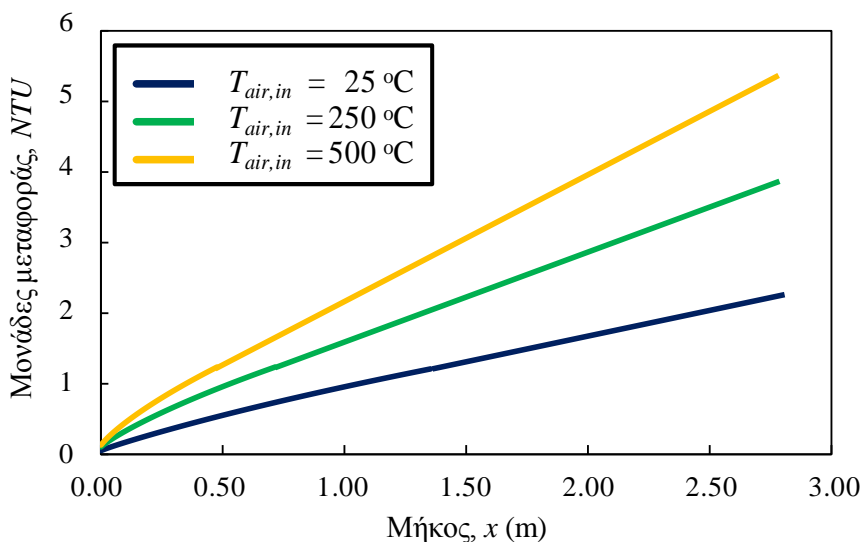
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα θερμικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά ροής του αέρα στην περίπτωση κατά την οποία το τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης έχει σταθερή θερμοκρασία σε όλο του το μήκος ίση με  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  ενώ ο τροφοδοτούμενος αέρας έχει θερμοκρασία 25, 250 και  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  κατά την είσοδο του στον θάλαμο διόγκωσης. Στο σχήμα 7.29 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης για τις περιπτώσεις αυτές.



Σχήμα 7.29. Μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Η τροφοδοσία του θαλάμου με προθερμασμένο αέρα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων θερμοκρασιών σε όλο το μήκος της καμίνου σε σχέση με την θερμοκρασιακή κατανομή που παρατηρείται όταν τροφοδοτείται αέρας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση που ο τροφοδοτούμενος αέρας έχει την θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία του αέρα κατά την έξοδό του από τον θάλαμο διόγκωσης δεν υπερβαίνει τους 900 °C για θερμοκρασία τοιχώματος 1000 °C και παροχή αέρα 50 L·min<sup>-1</sup>, ενώ όταν ο τροφοδοτούμενος αέρας είναι προθερμασμένος από 250-500 °C, η θερμοκρασία εξόδου του είναι σχεδόν ίδια με την θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης. Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στον θάλαμο διόγκωσης επιδρά σημαντικά στο ρυθμό θέρμανσης και της τελική θερμοκρασία αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης παρέχοντας έτσι την δυνατότητα δημιουργίας ενός πιο ελεγχόμενου θερμοκρασιακού πεδίου εντός του θαλάμου διόγκωσης. Με την τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα, καθίσταται δυνατή η λειτουργία της καμίνου σε συνθήκες υψηλών παροχών αέρα και συνεπώς μικρότερων χρόνων παραμονής χωρίς να συνοδεύεται η επιλογή αυτή από παράλληλη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα εντός της καμίνου. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μονάδες μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του αγωγού για διαφορετική θερμοκρασία εισόδου του αέρα.

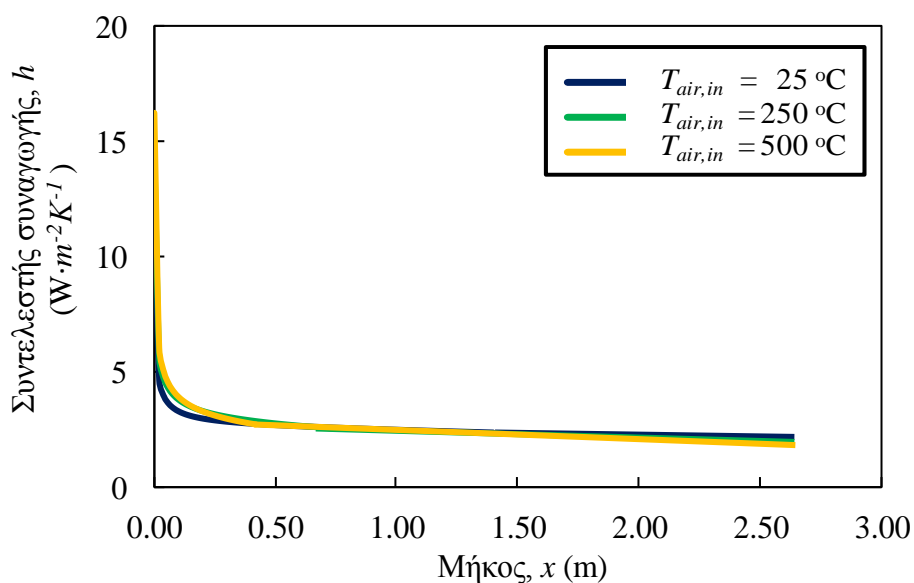




Σχήμα 7.30. Μεταβολή των μονάδων μεταφοράς θερμότητας (NTU) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

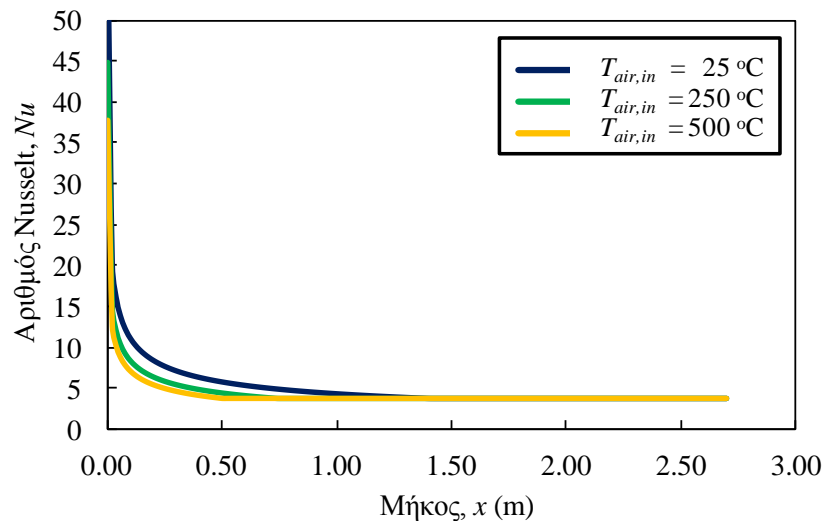
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.30, οι μονάδες μεταφοράς θερμότητας είναι αισθητά αυξημένες στις περιπτώσεις τροφοδοσίας της καμίνου με προθερμασμένο αέρα πράγμα που σημαίνει ότι η αποτελεσματικότητα της θέρμανσης είναι μεγαλύτερη σε αυτές τις περιπτώσεις.

Στο σχήμα 7.31, παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συναγωγής του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι 50 L · min<sup>-1</sup>, η θερμοκρασία του τοιχώματος είναι 1000 °C ενώ η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του στην κάμινο είναι 25, 250 και 500 °C.



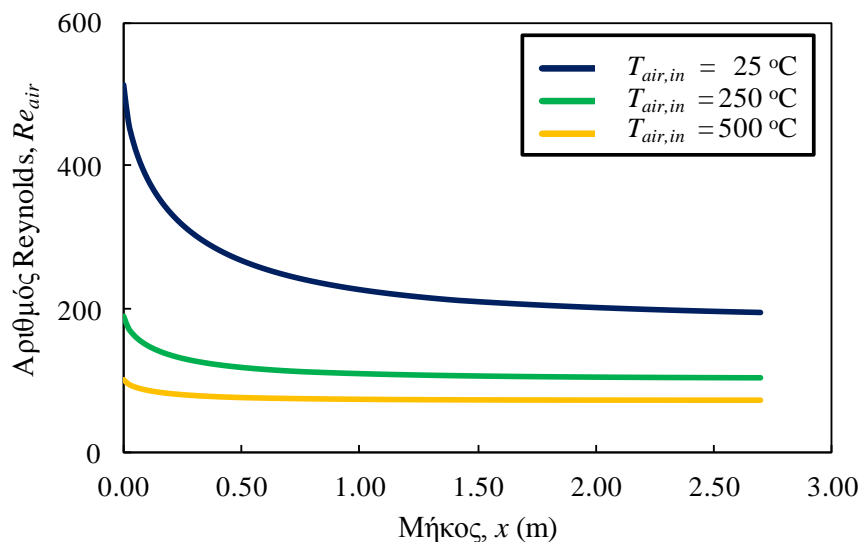
Σχήμα 7.31. Μεταβολή του συντελεστή συναγωγής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L · min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή του συντελεστή συναγωγής είναι αυξημένη κοντά στην είσοδο του θαλάμου διόγκωσης. Σε απόσταση 1 m από την κορυφή του θαλάμου, ο συντελεστής συναγωγής και στις τρεις περιπτώσεις έχει τιμή  $2.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  ενώ στην συνέχεια η τιμή του παρουσιάζει ελαφρά πτωτική τάση. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και ο αριθμός Nusselt, η μεταβολή του οποίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.32. Η αρχική τιμή του συντελεστή Nusselt κοντά στην περιοχή εισόδου του αέρα είναι αυξημένη σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται.



Σχήμα 7.32. Μεταβολή του αριθμού Nusselt του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , παροχές αέρα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

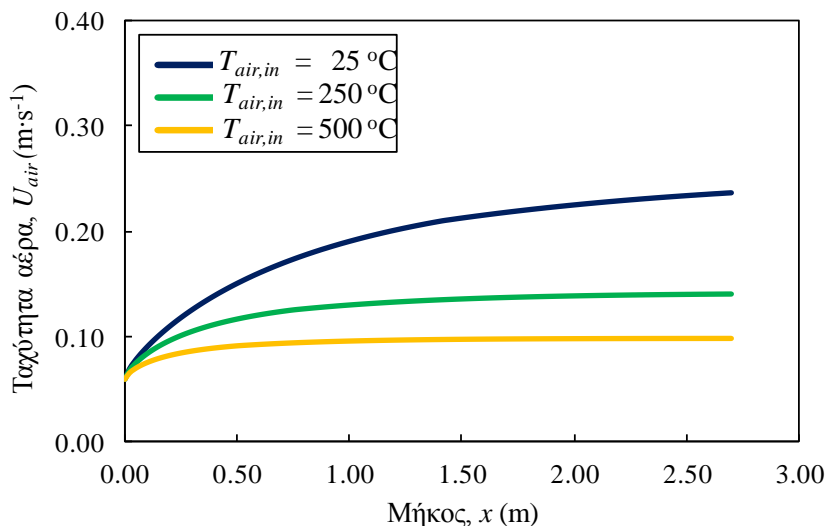
Η μείωση της τιμής του κατά μήκος του αγωγού είναι χαρακτηριστική και για τις τρεις καμπύλες οι οποίες σταθεροποιούνται στην τιμή 3.66. Το μήκος των 2.7m του αγωγού είναι αρκετό ώστε η ροή να αναπτυχθεί θερμικά και υδροδυναμικά και να προσεγγίσει τελικά την τιμή αυτή. Η περιοχή εισόδου έχει μεγαλύτερη έκταση στην περίπτωση που ο αέρας τροφοδοτείται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (1.4m) σε σύγκριση με τις περιπτώσεις στις οποίες η θερμοκρασία του αέρα κατά την είσοδό του είναι  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  (0.76m) και  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (0.52m).



Σχήμα 7.33. Μεταβολή του αριθμού Reynolds του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , παροχές αέρα  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Όπως φαίνεται από το σχήμα 7.33, η τιμή του αριθμού Reynolds της είναι αυξημένη κοντά στην περιοχή εισόδου του αέρα, ενώ μειώνεται έντονα κατά μήκος του αγωγού μέχρι τελικά να προσεγγίσει σταθερή τιμή στις περιπτώσεις τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα, η οποία είναι 104 για την περίπτωση θερμοκρασίας αέρα στην είσοδό του  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  και 71 για την περίπτωση τροφοδοσίας αέρα σε θερμοκρασία  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι τιμές του αριθμού Reynolds δείχνουν ότι και σε αυτή την περίπτωση η ροή του αέρα εντός του θαλάμου είναι στρωτή.

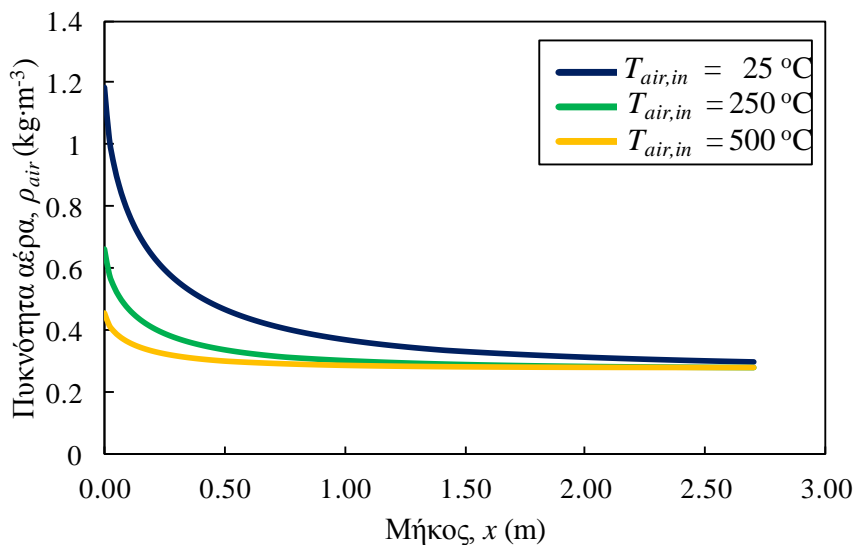
Στο Σχήμα 7.34 παρουσιάζεται μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του αγωγού για διάφορες θερμοκρασίες αέρα κατά την είσοδό του και σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος σε όλο του το μήκος,



Σχήμα 7.34. Μεταβολή της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται έντονα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης λόγω της έντονης εξάρτησης της πυκνότητας του αέρα από την θερμοκρασία του. Η είσοδος του αέρα στον θάλαμο διόγκωσης πραγματοποιείται με την ίδια ταχύτητα εφόσον η ογκομετρική παροχή του είναι ίδια. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αέρας εισέρχεται στον θάλαμο διόγκωσης με ταχύτητα 0.06 m·s<sup>-1</sup> ενώ εξέρχεται από αυτόν με ταχύτητα 0.24, 0.14 και 0.1 για θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C, αντίστοιχα.

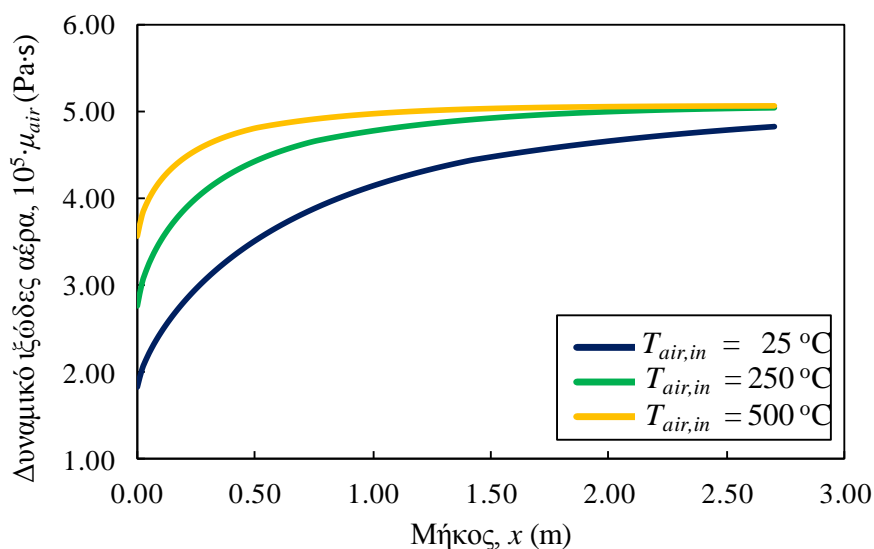
Στο σχήμα 7.35 παρουσιάζεται η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου και ρυθμό ογκομετρικής τροφοδοσίας αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και για θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.



Σχήμα 7.35. Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Παρατηρείται μείωση της πυκνότητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης σε όλες τις περιπτώσεις. Η μεταβολή όμως είναι εντονότερη όταν ο αέρας που τροφοδοτείται στον θάλαμο διόγκωσης βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό τόσο η ταχύτητα του αέρα όσο και ο αριθμός Reynolds είναι αυξημένοι σε αυτή την περίπτωση. Η πυκνότητα του προθερμασμένου αέρα έχει ήδη μειωθεί στον προθερμαντήρα με αποτέλεσμα την διόγκωσή του. Αυτό βέβαια δεν συμβαίνει στην περίπτωση που ο τροφοδοτούμενος αέρας είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε αυτή την περίπτωση η μείωση στην πυκνότητα του είναι εντονότερη λόγω του μεγαλύτερου θερμοκρασιακού εύρους που συναντά.

Στο σχήμα 7.36 παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διαφορετικές θερμοκρασίες εισερχόμενου αέρα.



Σχήμα 7.36. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου 1000 °C, παροχές αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Η μεταβολή του ιξώδους είναι και εδώ αρκετά σημαντική στην περίπτωση που ο τροφοδοτούμενος αέρας βρίσκεται στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.36, το δυναμικό ιξώδες του αέρα μεταβάλλεται σε όλο σχεδόν το μήκος της καμίνου σε αντίθεση με τις περιπτώσεις τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα, όπου το δυναμικό ιξώδες σύντομα σταθεροποιείται στην τιμή  $5 \cdot 10^{-5}$  Pa·s.

#### 7.5.1.4. Συμπεράσματα ενότητας

Η προσομοίωση της λειτουργίας της καμίνου διόγκωσης σε διάφορες συνθήκες από το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7.4 προσφέρει με τα παρακάτω συμπεράσματα όσων αφορά στα χαρακτηριστικά του αέρα:

1. Αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα μειώνει την θερμοκρασία σε όλο το μήκος της καμίνου. Στις περιπτώσεις που ο τροφοδοτούμενος αέρας δεν είναι προθερμασμένος, η θερμοκρασία εξόδου του για τα σενάρια που εξετάστηκαν λαμβάνει τις τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.7. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ( $z=2.70\text{m}$ ) όπως υπολογίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας του και τον προθερμαντήρα εκτός λειτουργίας.

| Συνθήκες λειτουργίας<br>θαλάμου διόγκωσης | Θερμοκρασία αέρα στο σημείο<br>$x=2.70\text{ m}$ (έξοδος)<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|---|---|
| ISO-50                                    | 916   |
| ISO-100                                   | 770   |
| ISO-150                                   | 654   |
| ISO-200                                   | 570   |
| GRAD-50                                   | 954   |
| GRAD-100                                  | 740   |
| GRAD-150                                  | 615   |
| GRAD-200                                  | 530   |

2. Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα αυξάνει σημαντικά το ρυθμό θέρμανσης και την τελική θερμοκρασία του αέρα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα όπως υπολογίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο για θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , παροχή αέρα  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Πίνακας 7.8. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα ( $z=2.70\text{m}$ ) όπως υπολογίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διαφορετικές θερμοκρασίες εισερχόμενου αέρα.

| Συνθήκες λειτουργίας<br>θαλάμου διόγκωσης | Θερμοκρασία αέρα στο σημείο $x=2.70\text{ m}$ (έξοδος)<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|---|--|
| ISO-50                                    | 916  |
| ISO-50-Pr-250                             | 989  |
| ISO-50-Pr-500                             | 999  |

3. Σε όλα τα σενάρια που παρουσιάστηκαν ο αριθμός Reynolds της ροής δεν ξεπέρασε την τιμή των 2100 μονάδων που σηματοδοτεί των χαρακτηριστικών της από στρωτή σε μεταβατική. Η τιμή του αριθμού Reynolds αυξάνει όσο μεγαλύτερη είναι η ογκομετρική παροχή του αέρα και η μέγιστη τιμή του υπολογίστηκε ίση με  $Re = 2064$  στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $200\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

4. Το μαθηματικό μοντέλο επιτρέπει την μελέτη επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων της καμίνου (θερμοκρασία τοιχώματος, ρυθμός τροφοδοσίας και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα) στην κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα εντός αυτής και επομένως τη ρύθμιση τους ανάλογα με τις εκάστοτε επιθυμητές συνθήκες.

### 7.5.2. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου στη διόγκωση τεμαχιδίων περλίτη

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης που έχουν οι συνθήκες λειτουργίας της καμίνου όπως η θερμοκρασία του τοιχώματος της, ο ρυθμός και η θερμοκρασία τροφοδοσίας του αέρα στο ρυθμό θέρμανσης και την θερμοκρασία του τεμαχιδίου, την ταχύτητα και τον χρόνο παραμονής του και στον βαθμό διόγκωσης του. Η διόγκωση του περλίτη μελετήθηκε στις ακόλουθες συνθήκες:

- Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος,  $T_w = 1000$  °C και ρυθμοί τροφοδοσίας αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.
- Γραμμικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος κατά την οποία η θερμοκρασία του τοιχώματος στο ανώτερο τμήμα της καμίνου είναι 700 °C και στην έξοδο της 1200 °C και ρυθμοί τροφοδοσίας αέρα 50, 100, 150 και 200 L·min<sup>-1</sup>.
- Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος,  $T_w = 1000$  °C και ρυθμός τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50$  L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 25, 250 και 500 °C.

Μελετήθηκε και παρουσιάζεται η επίδραση των παραπάνω συνθηκών στα ακόλουθα μεγέθη:

- μεταβολή της θερμοκρασίας του κόκκου, του αέρα και του τοιχώματος του θαλάμου θέρμανσης κατά μήκος της καμίνου
- μεταβολή του βαθμού διόγκωσης του τεμαχιδίου
- μεταβολή της ταχύτητας του τεμαχιδίου και του αέρα
- χρόνος παραμονής του τεμαχιδίου εντός του θαλάμου διόγκωσης

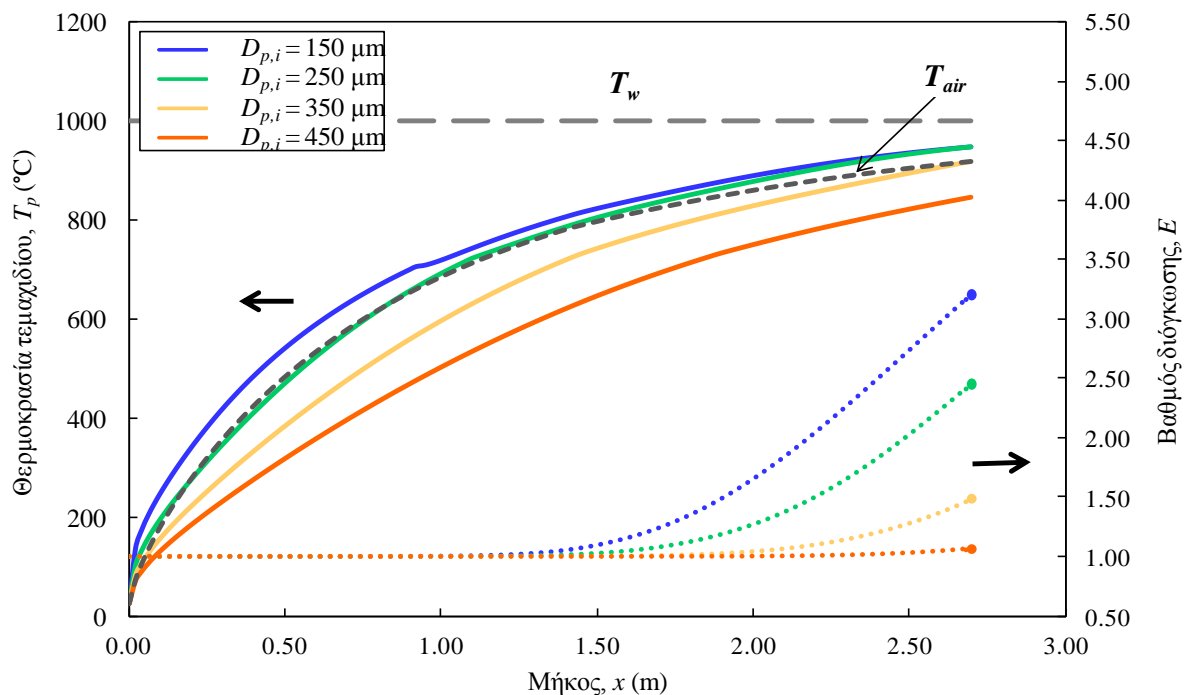
#### 7.5.2.1. Σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα και ενός τεμαχιδίου περλίτη κατά την κίνηση του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση που η

θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου είναι σταθερή σε όλο του το μήκος ίση με  $1000^{\circ}\text{C}$ , η ογκομετρική παροχή του αέρα ήταν 50, 100, 150 και  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και η αρχική διάμετρο τεμαχιδίου είναι 150, 250, 350 και  $450 \mu\text{m}$ .

#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

Στο σχήμα 7.40 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και ο βαθμός διόγκωσης του τεμαχιδίου κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου είναι  $1000^{\circ}\text{C}$  και ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .



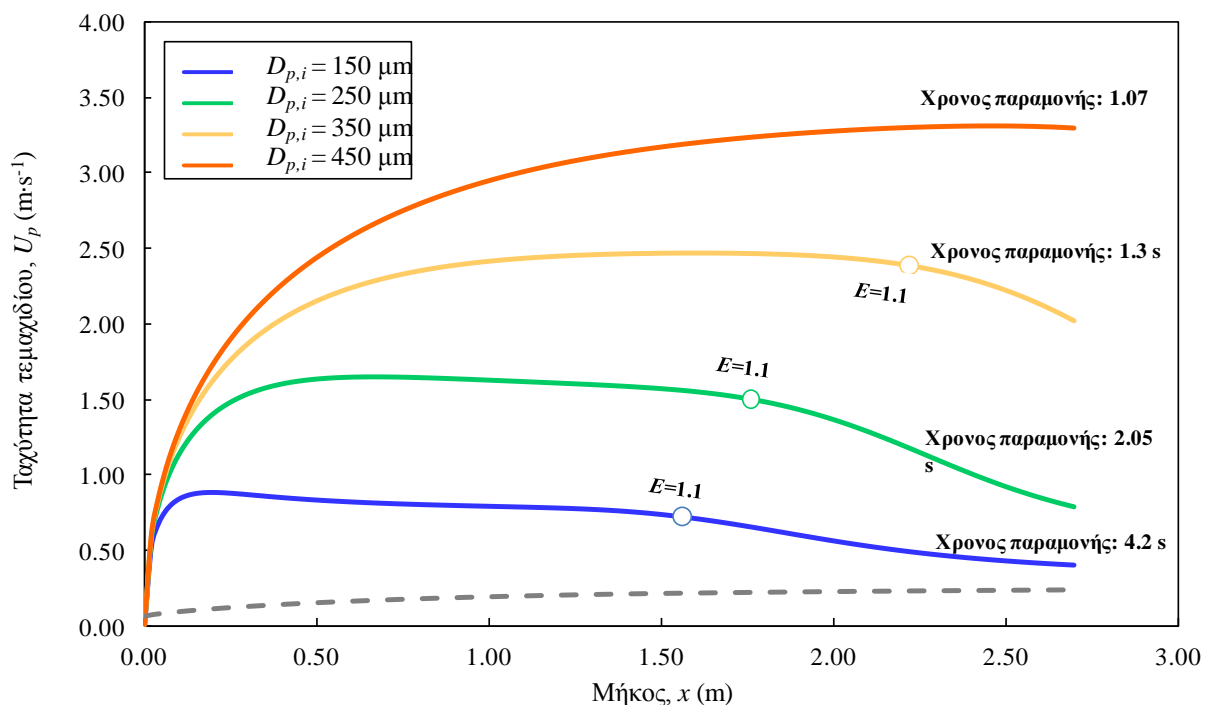
Σχήμα 7.40. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^{\circ}\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Παρατηρείται ότι, η θερμοκρασία του τεμαχιδίου αυξάνει κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης ανεξάρτητα από το μέγεθος της αρχικής διαμέτρου του. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη στα λεπτομερέστερα κλάσματα. Η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων για τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150 και  $250 \mu\text{m}$  είναι  $948^{\circ}\text{C}$  ενώ τα πιο αδρομερή τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 350 και  $450 \mu\text{m}$  εξέρχονται από την κάμινο σε θερμοκρασία 918 και  $845^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία του λεπτομερέστερου τεμαχιδίου ( $D_{p,i} = 150 \mu\text{m}$ ) είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του αέρα σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης, ενώ όταν η αρχική διάμετρος των τεμαχιδίων ξεπερνά τα  $250 \mu\text{m}$ , η θερμοκρασία τους είναι μικρότερη από αυτή του αέρα σε όλο το μήκος της τροχιάς τους. Όσον αφορά τον βαθμό διόγκωσης, τα λεπτομερή τεμαχίδια των οποίων η αρχική διάμετρος είναι μικρότερη από  $350 \mu\text{m}$



διογκώνονται 2.5 -3.2 φορές σε σχέση με την αρχική του διάμετρο ενώ τα χονδρόκοκκα τεμαχιδίων λιγότερο από 1.5 φορές. Η μεγαλύτερη θερμοκρασία που αποκτούν τα λεπτόκοκκα τεμαχίδια εντός του θαλάμου είναι και ο λόγος για τον οποίο ο βαθμός διόγκωσης τους είναι μεγαλύτερος. Η αλλαγή κλίσης της καμπύλης της θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος για τεμαχίδιο με αρχική διάμετρο 150  $\mu\text{m}$  σε μήκος  $x = 0.92\text{m}$  περίπου οφείλεται στην αλλαγή της τιμής της εκπεμπτικότητας του κόκκου όταν αρχίζει το τεμαχίδιο να διογκώνεται.

Στο σχήμα 7.41 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και σημειώνεται ο χρόνος παραμονής του εντός του θαλάμου διόγκωσης της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου. Επιπλέον, με κύκλο στα διαγράμματα σημειώνεται η απόσταση  $x$  στην οποία ο βαθμός διόγκωσης του τεμαχιδίου αποκτά την τιμή 1.1.



Σχήμα 7.41. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Η κίνηση των τεμαχιδίων εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι αρχικά επιταχυνόμενη ανεξάρτητα της αρχικής τους διαμέτρου. Η επιτάχυνση των τεμαχιδίων μειώνεται έως ότου αυτά αποκτήσουν την οριακή τους ταχύτητα η οποία είναι 0.88, 1.64, 2.46 και 3.31  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  για τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα. Το μήκος το οποίο χρειάζεται να διανύσει κάθε τεμαχίδιο για να αποκτήσει την οριακή του ταχύτητα είναι ανάλογο της αρχικής του διαμέτρου. Ενώ το λεπτομερέστερο τεμαχίδιο αποκτά την οριακή του ταχύτητα μόλις διανύσει 0.18 m, η οριακή ταχύτητα του χονδρόκοκκου τεμαχιδίου ( $D_{p,i} = 450\mu\text{m}$ ) επιτυγχάνεται σε μήκος 2.50m.

Η ταχύτητα των τεμαχιδίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον χρόνο παραμονής τους εντός του θαλάμου διόγκωσης ο οποίος είναι σχεδόν τετραπλάσιος για τα λεπτομερή τεμαχίδια ( $D_{p,i} < 250\mu\text{m}$ - Χρόνος παραμονής 4.2 s) σε σύγκριση με τον χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων με αρχική διάμετρο 450 $\mu\text{m}$  (Χρόνος παραμονής 1.07s).

Στις περιπτώσεις που η αρχική διάμετρος των τεμαχιδίων είναι μικρότερη από 350  $\mu\text{m}$ , παρατηρείται έντονη μείωση της ταχύτητας των τεμαχιδίων όταν ο βαθμός διόγκωσης του γίνει μεγαλύτερος από 1.1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διόγκωση του τεμαχιδίου έχει σαν συνέπεια την μείωση της πυκνότητας του και αύξηση του όγκου του επηρεάζοντας άμεσα το μέτρο της άνωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση των τεμαχιδίων με την έναρξη της διόγκωσης του. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όταν ο βαθμός διόγκωσης του κόκκου ξεπεράσει το 1.1. Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται η μέγιστη ταχύτητα και η ταχύτητα εξόδου των τεμαχιδίων ανάλογα με την αρχική τους διάμετρο.

Πίνακας 7.9. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων.

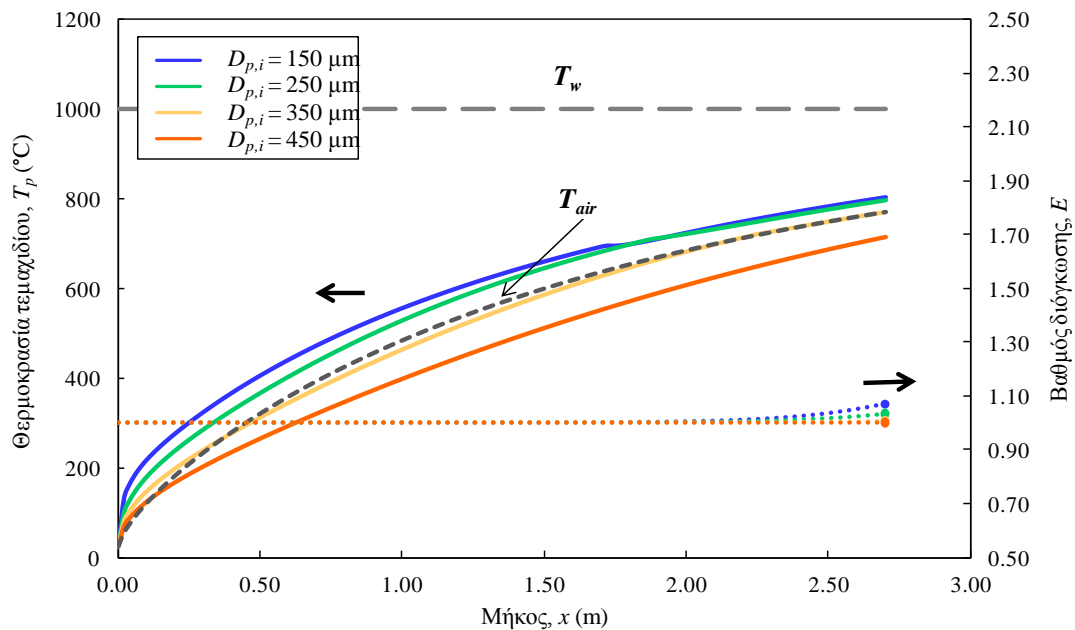
| Αρχική διάμετρος τεμαχιδίου, $D_{p,i}$ ( $\mu\text{m}$ ) | Μέγιστη ταχύτητα, $U_{max}$ (m/s) | Ταχύτητα εξόδου, $U_{ex}$ (m/s) | $\frac{U_{exit} - U_{max}}{U_{max}} \cdot 100\%$ |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| 150  | 0.88                              | 0.40                            | -54.5  |
| 250  | 1.64                              | 0.79                            | -51.8  |
| 350  | 2.46                              | 2.04                            | -17.1  |
| 450  | 3.30                              | 3.30                            | 0  |

Όπως διαπιστώνεται από τη σύγκριση των μέγιστων και των τελικών τιμών της ταχύτητας των τεμαχιδίων που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7.9, η μείωση της ταχύτητας των κόκκων λόγω διόγκωσης μπορεί να ξεπεράσει το 50 % οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο σε αύξηση του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων αυτών στην κάμινο. Ο αυξημένος χρόνος παραμονής των λεπτομερέστερων τεμαχιδίων είναι μία από τις βασικές αιτίες αυξημένης θερμοκρασίας που παρουσιάζουν τα τεμαχίδια σε αυτά σε σύγκριση με τα χονδρομερέστερα τεμαχίδια των οποίων η αρχική διάμετρος ξεπερνά τα 350  $\mu\text{m}$ .

#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα 100 L·min<sup>-1</sup>

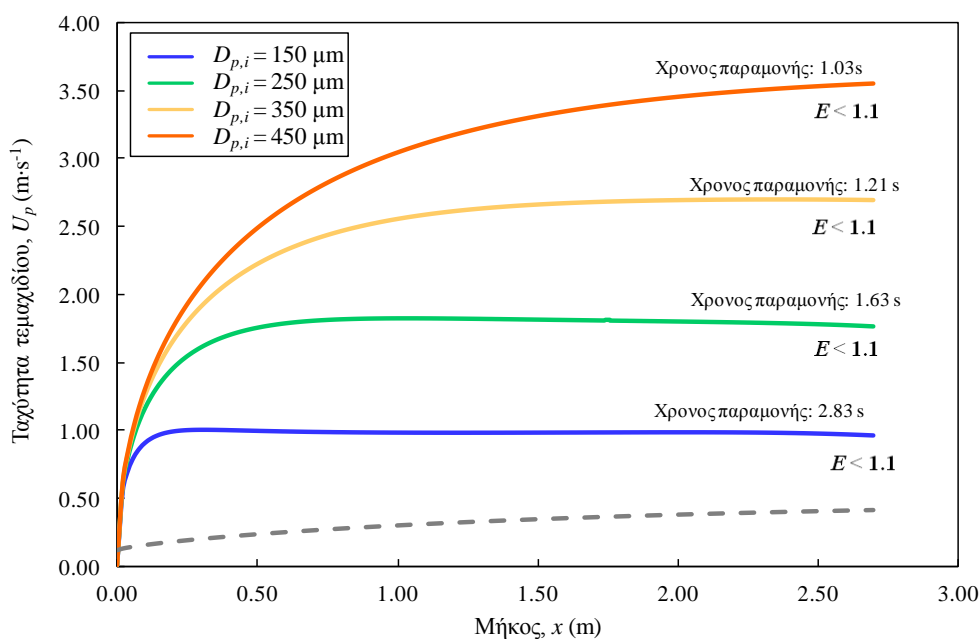
Στο σχήμα 7.42 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχωμάτων καμίνου και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα 100 L·min<sup>-1</sup> και για αρχική διάμετρο κόκκου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ . Όπως φαίνεται, σε καμία περίπτωση η θερμοκρασία του τεμαχιδίου δεν ξεπερνά τους 800 °C, γεγονός το οποίο υποδηλώνει την ανεπαρκή διόγκωση τους η οποία

επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου και από τα διαγράμματα του βαθμού διόγκωσης των τεμαχιδίων συναρτήσει του μήκους.



Σχήμα 7.42. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w=1000^{\circ}\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Στο σχήμα 7.43 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας των τεμαχιδίων και του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ σημειώνεται και ο χρόνος παραμονής τους εντός της καμίνου.



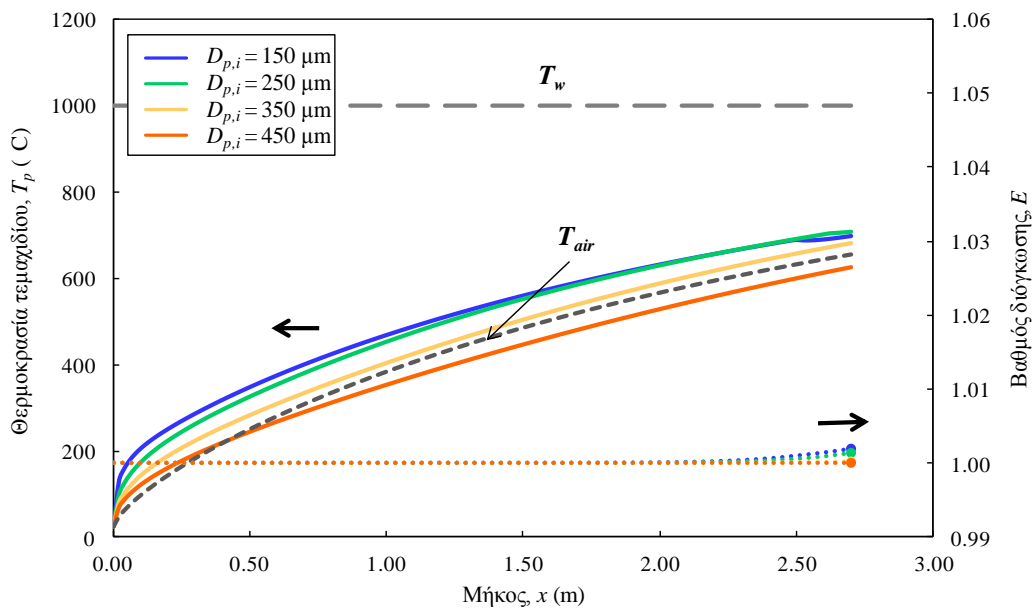
Σχήμα 7.43. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή

θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w=1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ min}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Η ανεπαρκής διόγκωση ανεξάρτητα της αρχικής διαμέτρου των τεμαχιδίων έχει ως αποτέλεσμα τα τεμαχίδια να κινούνται με την οριακή ταχύτητα στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής τους εντός του θαλάμου διόγκωσης. Εξαιρέση αποτελεί το τεμαχίδιο με αρχική διάμετρο  $450 \mu\text{m}$  το οποίο παρουσιάζει συνεχή αύξηση της ταχύτητας του κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ φαίνεται ότι δεν έχει φθάσει την οριακή του ταχύτητα κατά την έξοδό του από τον θάλαμο διόγκωσης. Η ταχύτητα εξόδου των τεμαχιδίων είναι  $0.95, 1.76, 2.70$  και  $3.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  για τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου  $150, 250, 350$  και  $450\mu\text{m}$ , αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη ταχύτητα που αποκτούν τα τεμαχίδια εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι  $0.99, 1.82, 2.69$  και  $3.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Η μέγιστη ταχύτητα του αέρα στην περίπτωση αυτή είναι  $0.42 \text{ m/s}$  και συμπίπτει με την ταχύτητα του αέρα κατά την έξοδό του από τον θάλαμο διόγκωσης. Ελαφρά μείωση της ταχύτητας των τεμαχιδίων των οποίων η αρχική διάμετρος δεν ξεπερνά τα  $350 \mu\text{m}$  μετά την απόκτηση της οριακής τους ταχύτητας παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση, όπως υποδηλώνει η ελαφρά αρνητική κλίση των αντίστοιχων διαγραμμάτων αλλά και η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της τελικής ταχύτητάς τους (ταχύτητα εξόδου). Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 και σχετίζονται με την επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα και της θερμοκρασίας του θαλάμου στον βαθμό διόγκωσης του περλίτη. Ο συνδυασμός θερμοκρασίας τοιχώματος  $1000^\circ\text{C}$  και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  είναι οριακός για να επιτευχθεί αποτελεσματική διόγκωση του περλίτη στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

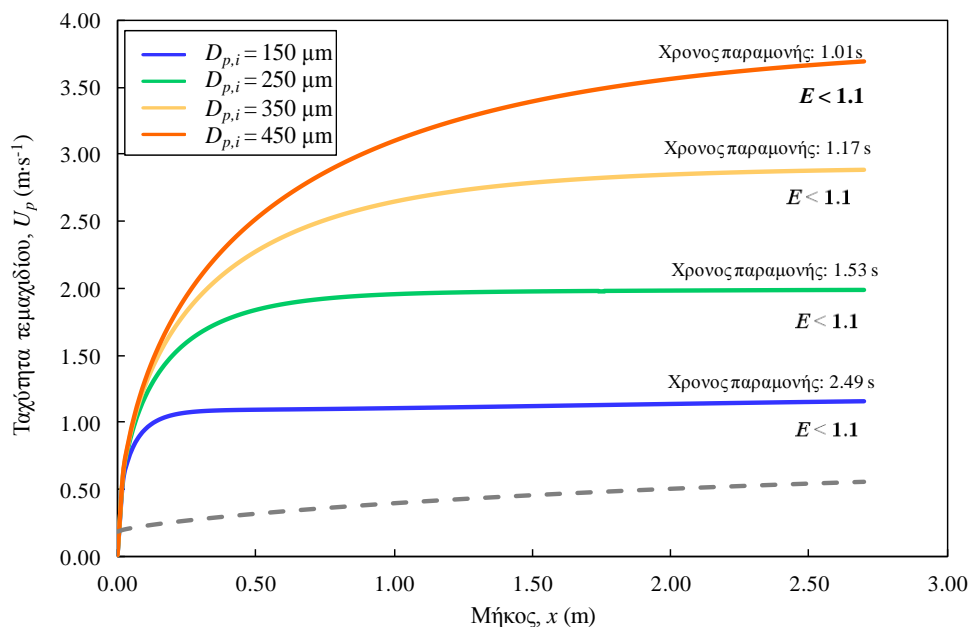
#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα $150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

Στο σχήμα 7.44 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχωμάτων καμίνου και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα  $150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και αρχικής διαμέτρου κόκκων  $150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ . Η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων είναι αντιστρόφως ανάλογη της αρχικής τους διαμέτρου και είναι  $698^\circ\text{C}$  για τεμαχίδιο αρχικής διαμέτρου  $150\mu\text{m}$  και  $624^\circ\text{C}$  για το τεμαχίδιο με την μέγιστη αρχική διάμετρο ( $D_{p,i} = 450\mu\text{m}$ ).



Σχήμα 7.44. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w=1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Ο βαθμός διόγκωσης δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση την τιμή 1.002 που είναι η τιμή που παρατηρείται στα λεπτόκοκκα τεμαχίδια ( $D_{p,i} = 150 \mu\text{m}$ ). Ιδιαίτερα χαμηλή είναι η θερμοκρασία του αέρα σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ η θερμοκρασία του στην έξοδό του μόλις ξεπερνά τους  $650^\circ\text{C}$ .

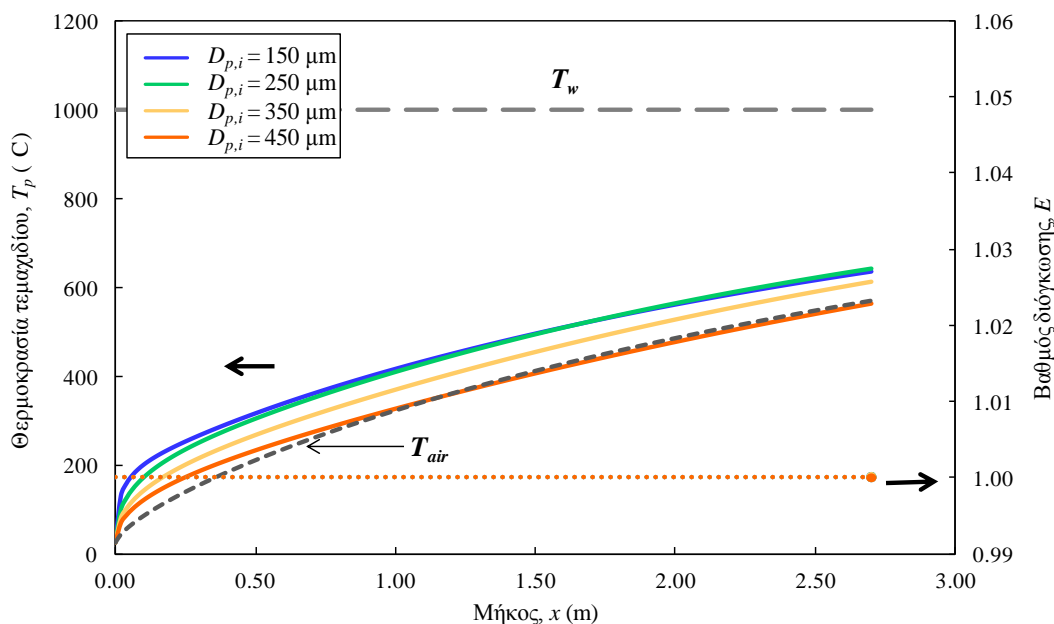


Σχήμα 7.45. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Η ταχύτητα των τεμαχιδίων αυξάνει με την είσοδό τους στον θάλαμο διόγκωσης και για τα τεμαχίδια των οποίων η αρχική διάμετρος είναι μικρότερη των 350  $\mu\text{m}$  σταθεροποιείται χωρίς να υπόκειται σε περαιτέρω μείωση, φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις ρυθμού τροφοδοσίας αέρα (50 και 100  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Η οριακή ταχύτητα με την οποία κινούνται τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250 και 350  $\mu\text{m}$  έχει τιμή 1.16, 1.98 και 2.88  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , αντίστοιχα, ενώ τα τεμαχίδια με την μεγαλύτερη αρχική διάμετρο ( $D_{p,i} = 450\mu\text{m}$ ) εξέρχονται επιταχυνόμενα από τον θάλαμο με ταχύτητα εξόδου 3.7  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ο υψηλός ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ταχύτητά του κατά μήκος του θαλάμου η οποία φαίνεται να αυξάνει και την ταχύτητα των σωματιδίων μειώνοντας τον χρόνο παραμονής τους.

#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα 200 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$

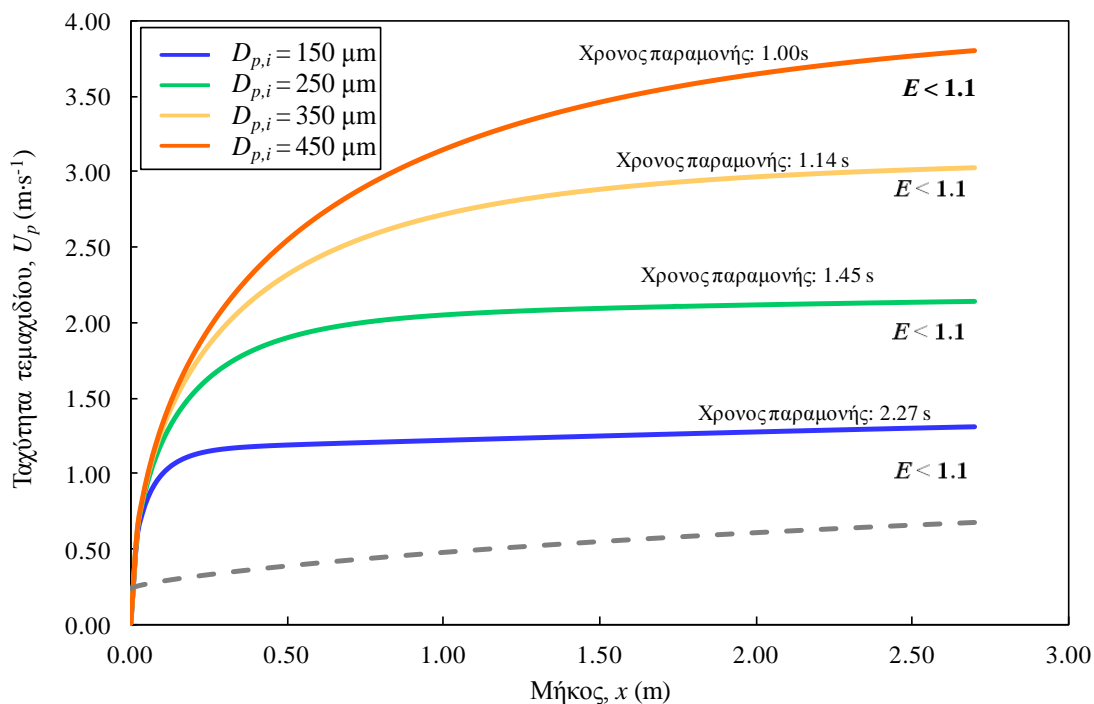
Στο σχήμα 7.46 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχωμάτων καμίνου και μέγιστου ρυθμού τροφοδοσίας αέρα (200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) και για αρχική διάμετρο κόκκου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 7.46. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και 450  $\mu\text{m}$ .

Όπως φαίνεται, η διόγκωση των τεμαχιδίων είναι ασήμαντη σε όλες τις περιπτώσεις αρχικής διαμέτρου τους. Η σημαντικότερη αιτία για την αναποτελεσματική διόγκωση είναι η ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία των τεμαχιδίων σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης με τιμές εξόδου 637, 641, 613 και 564 $^\circ\text{C}$  για αρχική διάμετρο τεμαχιδίων 150, 250, 350 και 450 $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα.

Σημαντικά μειωμένη παρουσιάζεται και η θερμοκρασία του αέρα η οποία στην πλειονότητα των περιπτώσεων λαμβάνει χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με την θερμοκρασία των τεμαχιδίων. Στο σχήμα 7.47 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας των τεμαχιδίων και του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ σημειώνεται και ο χρόνος παραμονής τους εντός της καμίνου στην περίπτωση κατά την οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ήταν χαμηλότερος, οι λεπτομερέστεροι κόκκοι αρχικά κινούνται επιταχυνόμενοι έως ότου αποκτήσουν την οριακή τους ταχύτητα ενώ η ταχύτητα των χονδρομερέστερων συνεχίζει να αυξάνει σε όλο το μήκος της διαδρομής τους. Η αυξημένη ογκομετρική παροχή και κατά συνέπεια η αυξημένη ταχύτητα του αέρα οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες των τεμαχιδίων εντός του θαλάμου και μικρότερους χρόνους παραμονής.



Σχήμα 7.47. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου,  $T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Εξαιτίας της αυξημένης τιμής της ταχύτητας του αέρα και της επίδρασης της στην ταχύτητα των κόκκων, ο χρόνος παραμονής του εντός του θαλάμου διόγκωσης παρουσιάζεται μειωμένος σε σύγκριση με τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, κατά τις οποίες ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ήταν χαμηλότερος ( $50, 100$  και  $150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

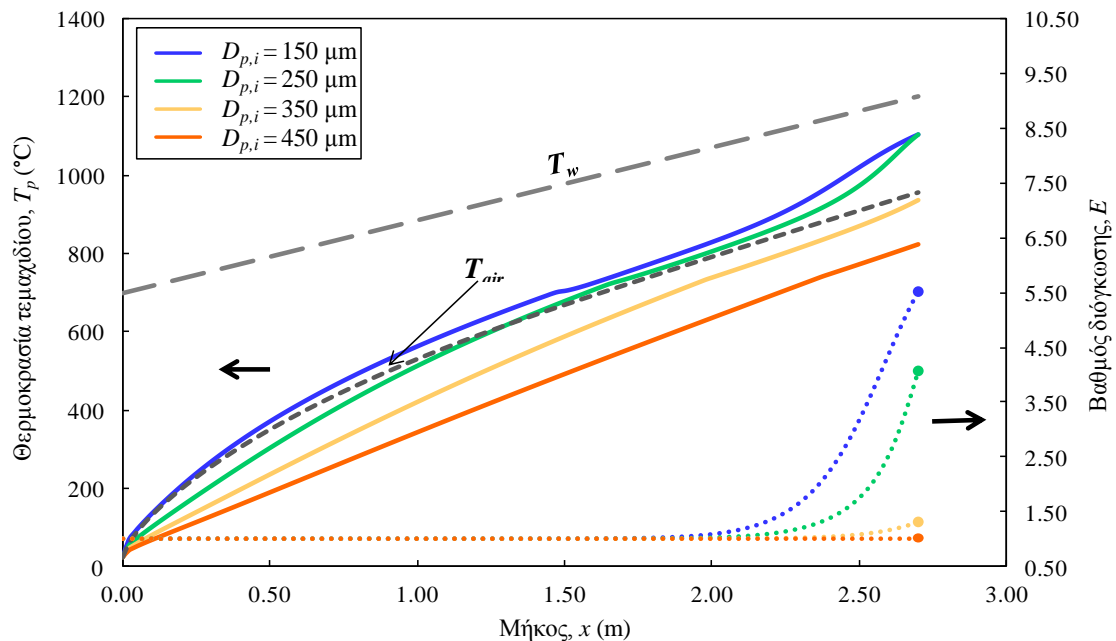
7.5.2.2. *Αύξουσα θερμοκρασία τοιχώματος κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης της καμίνου*

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και του βαθμού διόγκωσης των τεμαχιδίων περλίτη με αρχική διάμετρο τεμαχιδίου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση που η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου μεταβάλλεται γραμμικά σε όλο το μήκος του με ελάχιστη τιμή στην είσοδο του θαλάμου 700 °C και μέγιστη στην έξοδό του 1200 °C και όταν η ογκομετρική παροχή του αέρα είναι 50, 100, 150 και 200  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$

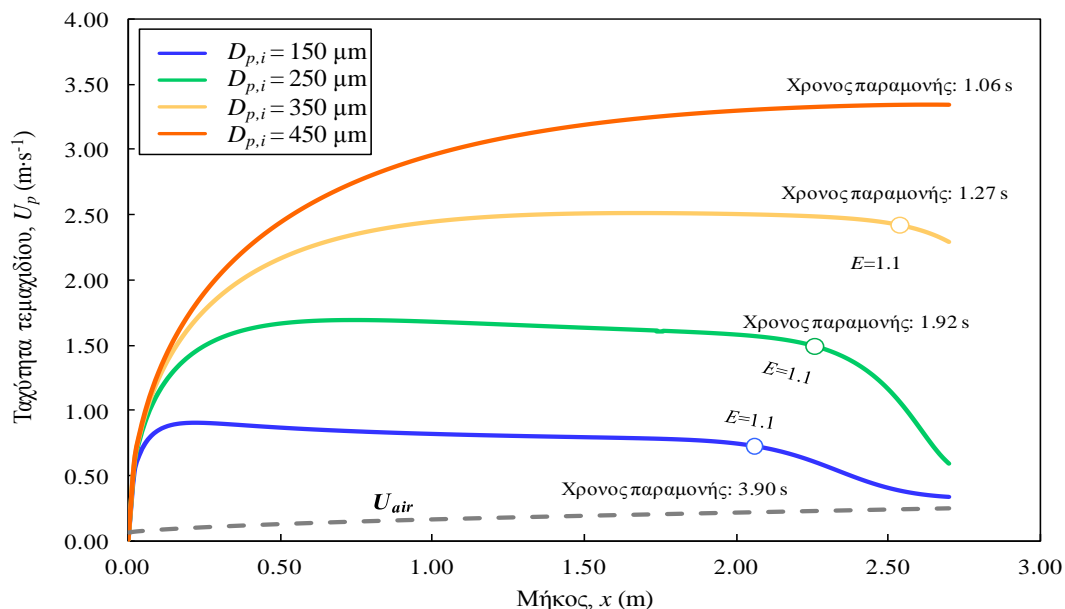
Στο σχήμα 7.48 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση που η θερμοκρασία του τοιχώματος της καμίνου αυξάνει από 700 °C στην είσοδο του θαλάμου μέχρι 1200°C στην έξοδο του και όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας αέρα είναι 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  και τα τεμαχίδια έχουν αρχική διάμετρο 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ . Η γραμμική θερμοκρασιακή μεταβολή του τοιχώματος κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ανάλογου θερμοκρασιακού προφίλ τόσο στα τεμαχίδια όσο και στον αέρα. Το θερμοκρασιακό προφίλ των τεμαχιδίων αλλά και του αέρα είναι σχεδόν γραμμικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.48 και διαφέρει σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που μελετήθηκαν ίδιου ρυθμού τροφοδοσίας αέρα και ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης (σχήμα 7.40). Η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων είναι 1105, 1103, 937 και 823 °C για αρχική διάμετρο τεμαχιδίων 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ . Ικανοποιητικό βαθμός διόγκωσης κατά την έξοδό τους από τον θάλαμο διόγκωσης παρουσιάζουν μόνο τα τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 150 ( $E = 5.5$ ) και 250  $\mu\text{m}$  ( $E = 4.1$ ).





Σχήμα 7.48. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Μετά την έναρξη της διόγκωσης, η μείωση της ταχύτητας των τεμαχιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου παραμονής τους, όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.49 ενώ αποτελεί τον βασικό λόγο για τον οποίο η θερμοκρασία τους αυξάνει αισθητά μετά από την απόσταση 2 m που έχουν διανύσει εντός του θαλάμου διόγκωσης.



Σχήμα 7.49. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

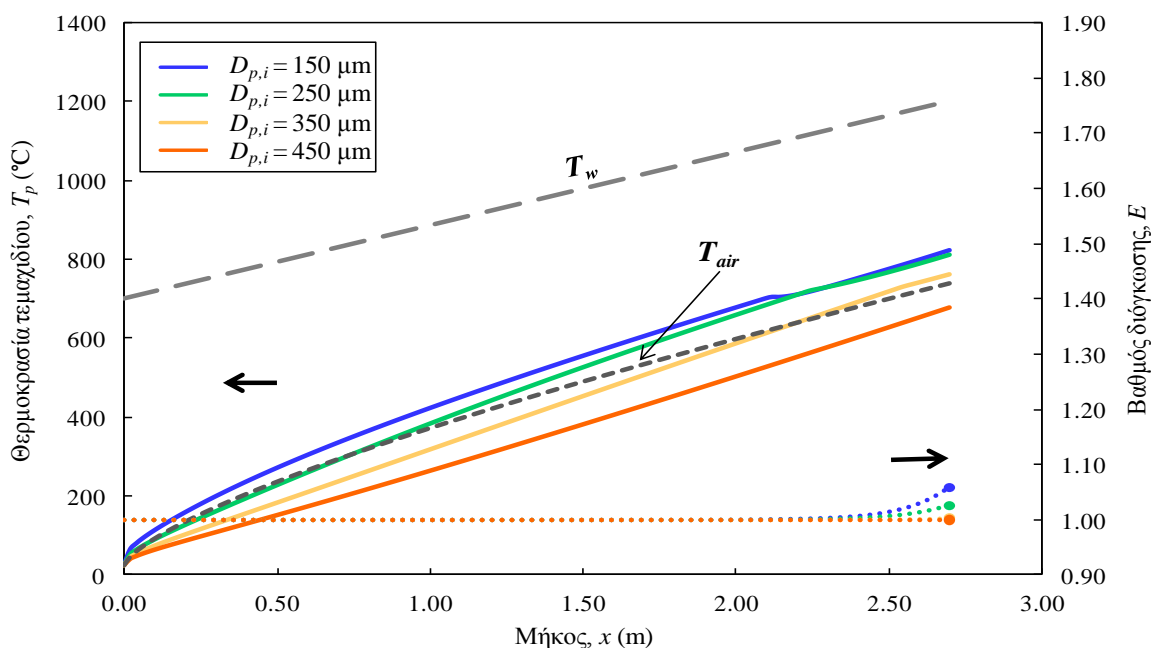
Στον πίνακα 7.10 συγκρίνονται οι μέγιστες ταχύτητες που αποκτούν τα τεμαχίδια στον θάλαμο διόγκωσης και οι ταχύτητες που έχουν κατά την έξοδό τους από τον θάλαμο διόγκωσης.

Πίνακας 7.10. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων.

| Αρχική διάμετρος τεμαχιδίου, $D_{p,i}$ ( $\mu\text{m}$ ) | Μέγιστη ταχύτητα, $U_{max}$ (m/s) | Ταχύτητα εξόδου, $U_{exit}$ (m/s) | $\frac{U_{exit} - U_{max}}{U_{max}} \cdot 100\%$ |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 150  | 0.9                               | 0.34                              | -62.2  |
| 250  | 0.72                              | 0.63                              | -12.5  |
| 350  | 2.51                              | 2.31                              | -7.9   |
| 450  | 3.35                              | 3.35                              | 0  |

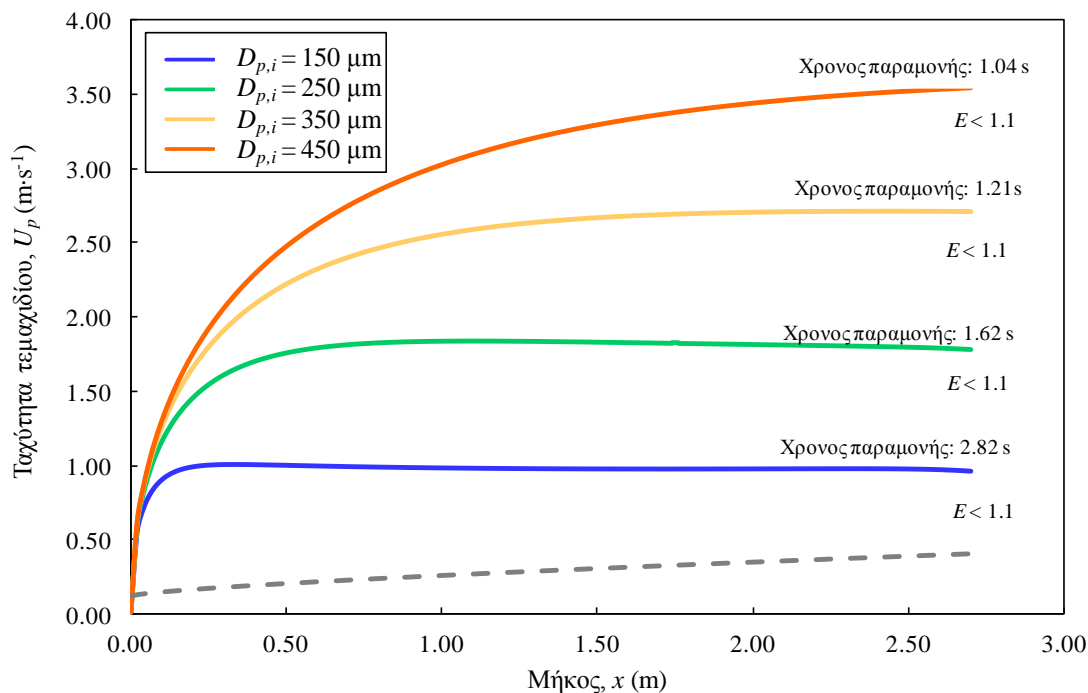
Η ταχύτητα των λεπτόκοκκων σωματιδίων κατά την έξοδό τους από τον θάλαμο διόγκωσης είναι μειωμένη κατά 62.2% σε σχέση με την οριακή ταχύτητα την οποία απέκτησαν σε μήκος τροχιάς μόλις 0.2 m και ενώ η διάμετρός τους ήταν η αρχική. Στην περίπτωση που η αρχική διάμετρος των τεμαχιδίων είναι 450  $\mu\text{m}$ , η ταχύτητα τους αυξάνει σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ η μέγιστη τιμή της συμπίπτει με την ταχύτητα εξόδου του τεμαχιδίου από τον θάλαμο ( $U_{max}=U_{exit}= 3.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Το ποσοστό μείωσης της τελικής ταχύτητας των σωματιδίων ως προς την μέγιστη εξαρτάται άμεσα από τον βαθμό διόγκωσης τους όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα 7.10 και είναι εντονότερη στις περιπτώσεις που η διόγκωση των σωματιδίων είναι σημαντική.

#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$



Σχήμα 7.50. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Παρατηρείται ότι η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα από  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  σε  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων. Αναλυτικότερα, η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  είναι 822, 812, 764 και 679  $^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, η διόγκωση τους ανεξάρτητα από την αρχική τους διάμετρο είναι ασήμαντη. Έτσι, ο μέγιστος βαθμός διόγκωσης που παρατηρείται στα τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 150  $\mu\text{m}$  είναι 1.06 ενώ η έναρξη της διόγκωσης τους συμβαίνει σε μήκος 2.3 m από την είσοδο των τεμαχιδίων στον θάλαμο διόγκωσης. Σημαντικός παράγοντας της χαμηλής θερμοκρασίας των τεμαχιδίων είναι και η χαμηλή θερμοκρασία του αέρα σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα παρατηρείται στην έξοδο του θαλάμου διόγκωσης και έχει τιμή 740  $^{\circ}\text{C}$ . Το προφίλ θερμοκρασίας του αέρα είναι σχεδόν γραμμικό και παράλληλο με το θερμοκρασιακό προφίλ του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης. Στο σχήμα 7.51 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου και ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .



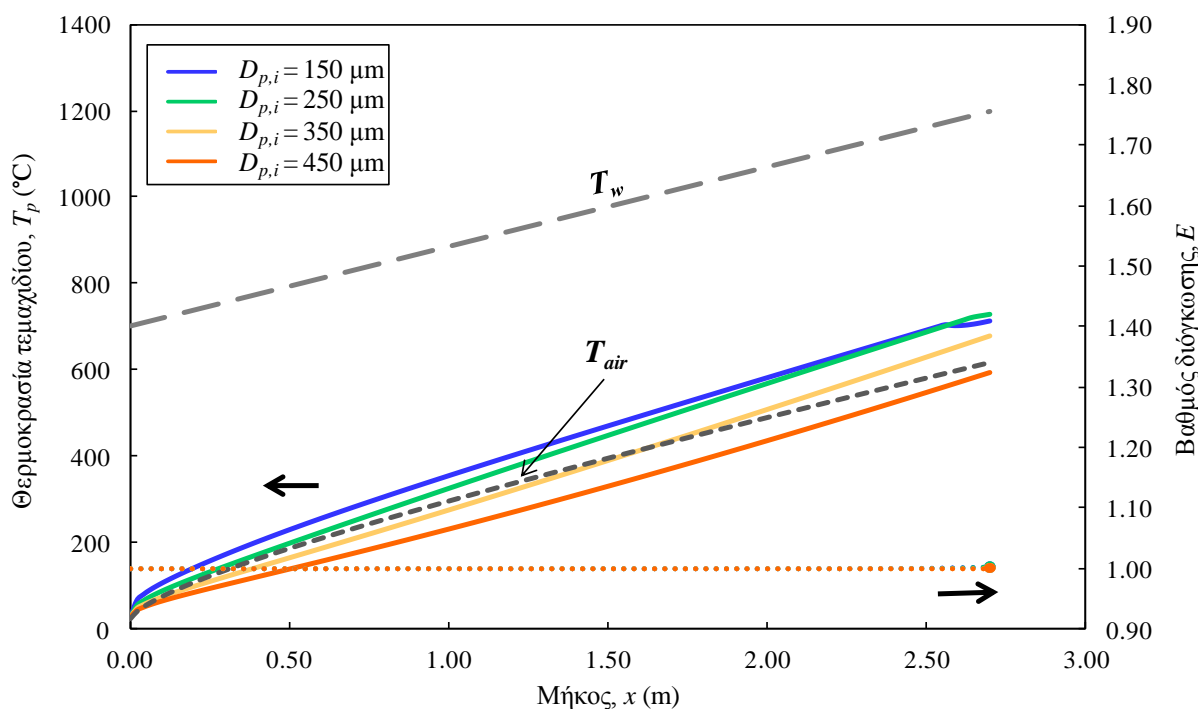
Σχήμα 7.51. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 7.51, η ταχύτητα των τεμαχιδίων αυξάνει κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Η οριακή ταχύτητα των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250 και 350  $\mu\text{m}$  είναι 0.96, 1.78 και  $2.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , αντίστοιχα. Η ταχύτητα εξόδου του τεμαχιδίου αρχικής διαμέτρου 450  $\mu\text{m}$  είναι  $3.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ενώ η κίνηση του τεμαχιδίου δεν έχει παύσει να είναι επιταχυνόμενη. Η

αύξηση της ογκομετρικής παροχής του αέρα από 50 σε 100 L·min<sup>-1</sup> δεν φαίνεται να έχει επίδραση στον χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων αυτής της αρχικής διαμέτρου.

### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα 150 L·min<sup>-1</sup>

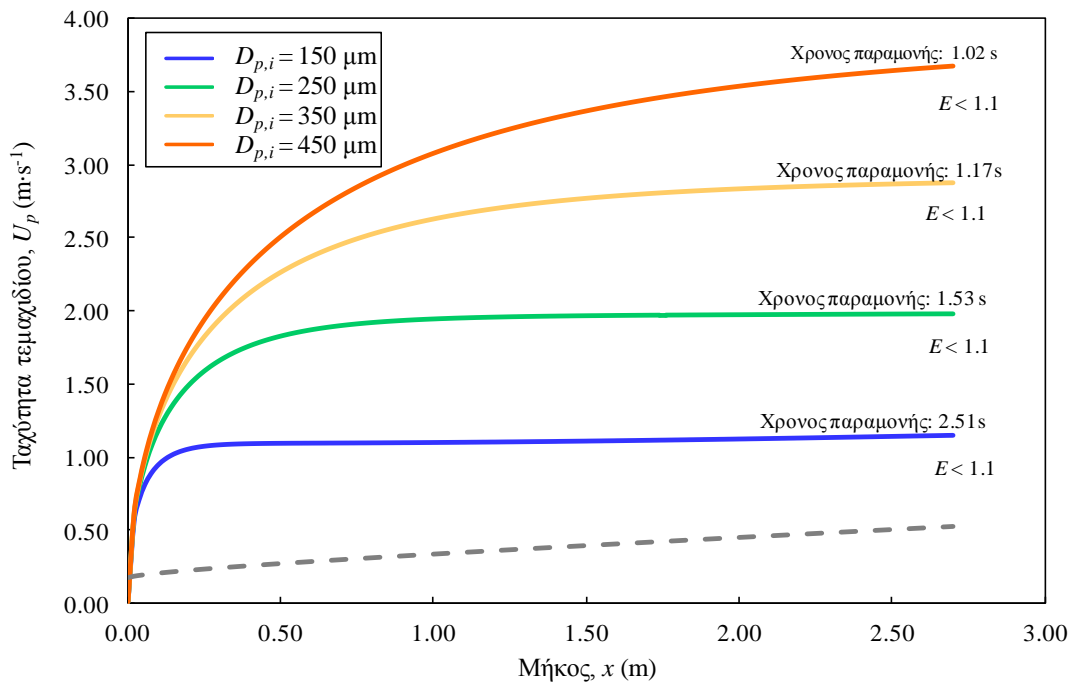
Στο σχήμα 7.52 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση αύξουσας θερμοκρασίας τοιχωμάτων καμίνου, ρυθμού τροφοδοσίας αέρα 150 L·min<sup>-1</sup> και για αρχική διάμετρο κόκκου 150, 250, 350 και 450 μm.



Σχήμα 7.52. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Η θερμοκρασία των τεμαχιδίων στην περίπτωση κατά την οποία ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι 150 L·min<sup>-1</sup> δεν ξεπερνά τους 728 °C που είναι η θερμοκρασία εξόδου του τεμαχιδίου αρχικής διαμέτρου 250 μm. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450 °C είναι 715, 729, 677 και 594 °C, αντίστοιχα. Η υψηλότερη θερμοκρασία εξόδου του τεμαχιδίου αρχικής διαμέτρου 250 μm σε σύγκριση με το τεμαχίδιο αρχικής διαμέτρου 150 μm, οφείλεται στο γεγονός ότι το τεμαχίδιο με την μικρότερη αρχική διάμετρο διογκώνεται ελαφρώς και λόγω αυτού ο συντελεστής εκπεμπτικότητας του αλλάζει από 0.7 σε 0.55 με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία από τα τοιχώματα της καμίνου προς το σωματίδιο. Το τεμαχίδιο με αρχική διάμετρο 250 μm δεν διογκώνεται καθόλου και για αυτό τον λόγο η τιμή της εκπεμπτικότητας του παραμένει 0.7 με

αποτελεσμα την αποτελεσματικότερη θέρμανση του σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης λόγω της ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία του αέρα είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ η τιμή κατά της στην έξοδο του θαλάμου διόγκωσης είναι 615 °C. Το προφίλ της θερμοκρασίας του αέρα αλλά και των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης είναι σχεδόν γραμμικό και μεταβάλλεται παράλληλα με το προφίλ θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης.

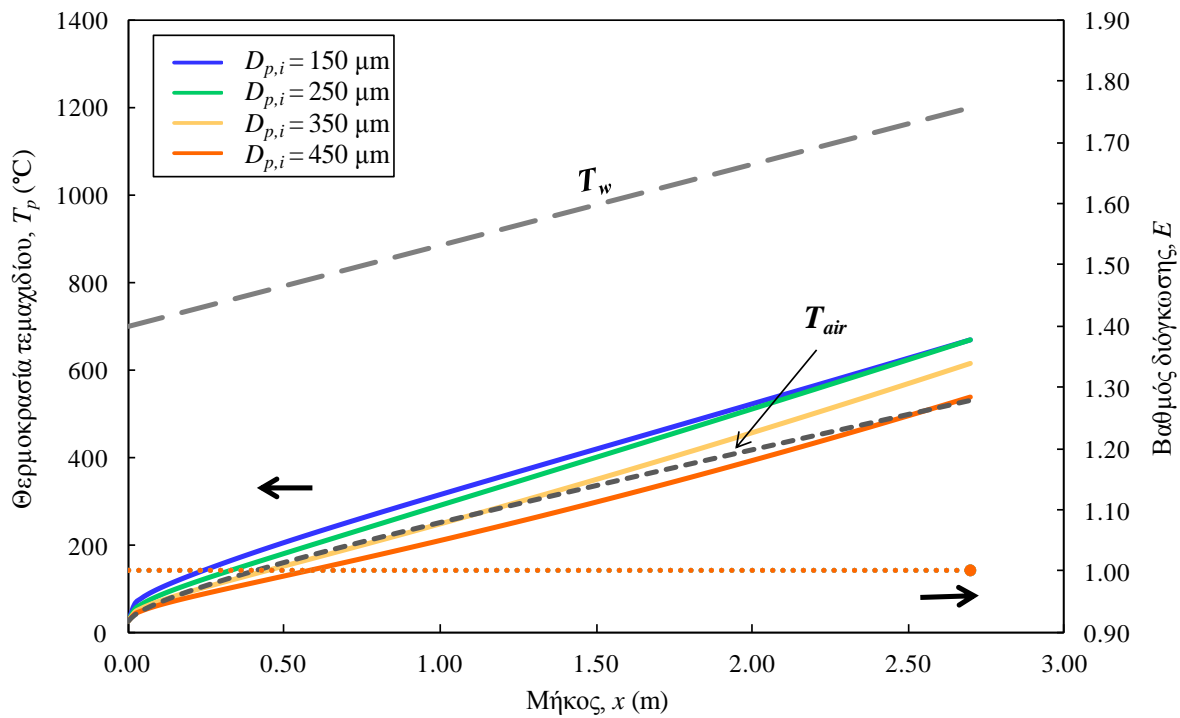


Σχήμα 7.53. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 150 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu m$ .

Ο χρόνος παραμονής εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu m$  2.51, 1.53, 1.17 και 1.02 s και ενώ η ταχύτητα των τεμαχιδίων κατά την έξοδό τους από τον θάλαμο διόγκωσης λαμβάνει τιμές 1.15, 1.98, 2.87 και 3.68  $m \cdot s^{-1}$ , αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές ταχύτητας συμπίπτουν με τις οριακές ταχύτητες των τεμαχιδίων με αρχική διάμετρο μικρότερη των 450  $\mu m$ . Ο αέρας εξέρχεται του θαλάμου διόγκωσης με ταχύτητα 0.53  $m \cdot s^{-1}$  ενώ η ταχύτητα εισόδου του είναι 0.18  $m \cdot s^{-1}$ .

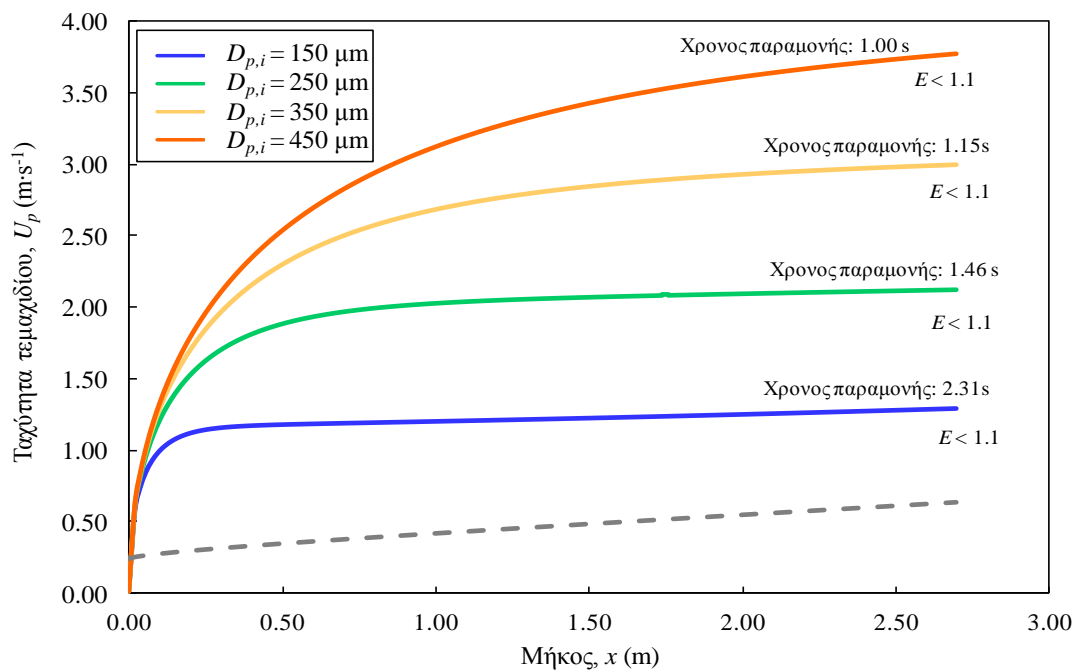
#### Ρυθμός τροφοδοσίας αέρα 200 $L \cdot \text{min}^{-1}$

Στο σχήμα 7.54 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας τοιχωμάτων καμίνου, ρυθμού τροφοδοσίας αέρα 200  $L \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο κόκκου 150, 250, 350 και 450  $\mu m$ .



Σχήμα 7.54. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu\text{m}$ .

Στην περίπτωση αυτή, που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι ο μέγιστος, η θέρμανση των κόκκων είναι τελείως αναποτελεσματική και για τον λόγο αυτό δεν λαμβάνει χώρα διόγκωση των τεμαχιδίων ανεξάρτητα της αρχικής τους διαμέτρου. Η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  είναι 668, 667, 613 και 539  $^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Ιδιαίτερα χαμηλές τιμές λαμβάνει και η θερμοκρασία του αέρα, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης ενώ ο αέρας εξέρχεται σε θερμοκρασία μόλις 530  $^{\circ}\text{C}$ . Γραμμική είναι και η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης. Στο σχήμα 7.55 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα και των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης.



Σχήμα 7.55. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 200 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και  $450 \mu m$ .

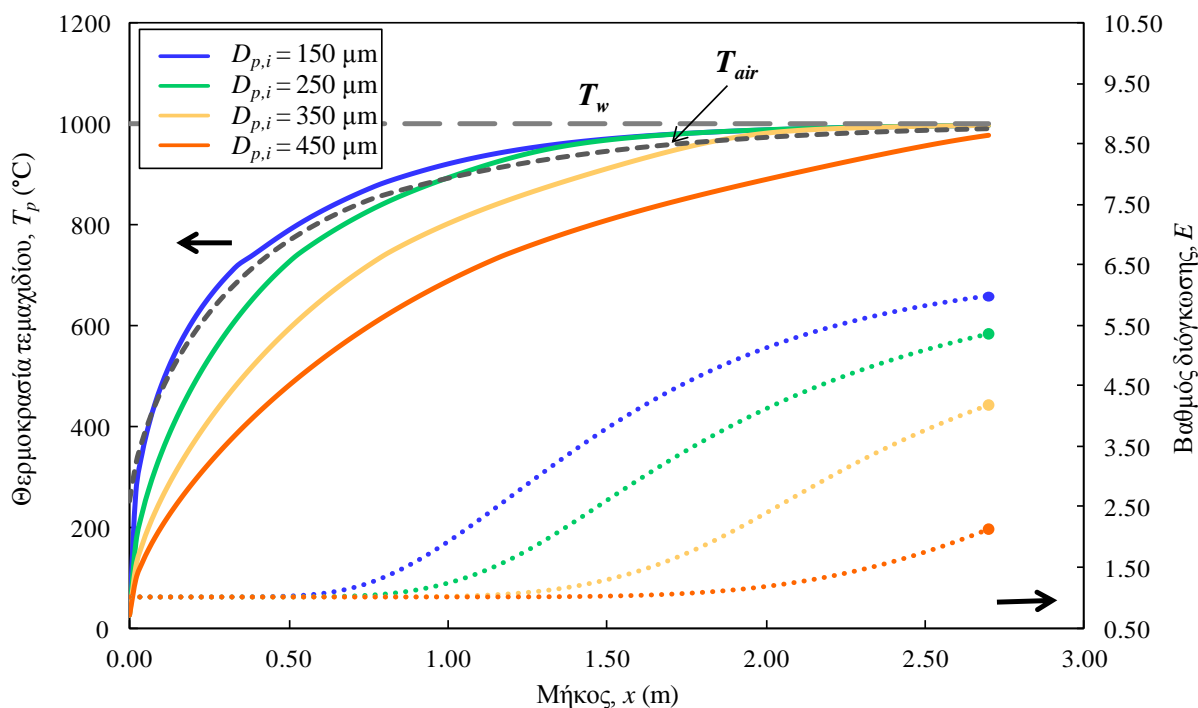
Ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι ιδιαίτερα μειωμένος και δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση τα 2.31s και αντιστοιχεί στον χρόνο παραμονής του πλέον λεπτόκοκκου τεμαχιδίου ( $D_{p,i} = 150 \mu m$ ). Η ταχύτητα του αέρα αυξάνει σημαντικά εντός του θαλάμου διόγκωσης ενώ η τιμή της στην έξοδο του θαλάμου διόγκωσης είναι  $2.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Οριακή ταχύτητα αποκτούν τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250 και  $350 \mu m$  με αντίστοιχες τιμές  $1.29, 2.12$  και  $3.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  οι οποίες είναι αυξημένες σε σύγκριση με τις περιπτώσεις που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα ήταν  $100$  και  $150 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του αέρα στην περίπτωση που παρουσιάζεται.

### 7.5.2.3. Τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα

Στην ενότητα αυτή μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας, του βαθμού διόγκωσης και της ταχύτητας των τεμαχιδίων περλίτη εντός του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση που η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου είναι σταθερή σε όλο το μήκος του και ίση με  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , ενώ ο αέρας τροφοδοτείται στο θάλαμο με ρυθμό  $50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισόδου  $250$  και  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία, η ταχύτητα και το μέγεθος του τεμαχιδίου μελετώνται για αρχική διάμετρο τεμαχιδίων  $150, 250, 350$  και  $450 \mu m$ .

Θερμοκρασία τροφοδοτούμενου αέρα 250 °C

Στο σχήμα 7.56 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος καμίνου 1000 °C, ρυθμού τροφοδοσίας αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 250 °C. Η θερμοκρασία των τεμαχιδίων παρουσιάζει έντονη αύξηση σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης, γεγονός το οποίο σχετίζεται άμεσα με την θερμοκρασία του αέρα και την προθέρμανσή του πριν την είσοδό του στον θάλαμο διόγκωσης. Η θερμοκρασία του αέρα ξεπερνά τους 800 °C σε μήκος 0.56 m. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, η θερμοκρασία εξόδου των τεμαχιδίων αλλά και του αέρα σχεδόν συμπίπτει με την θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης στους 1000 °C.



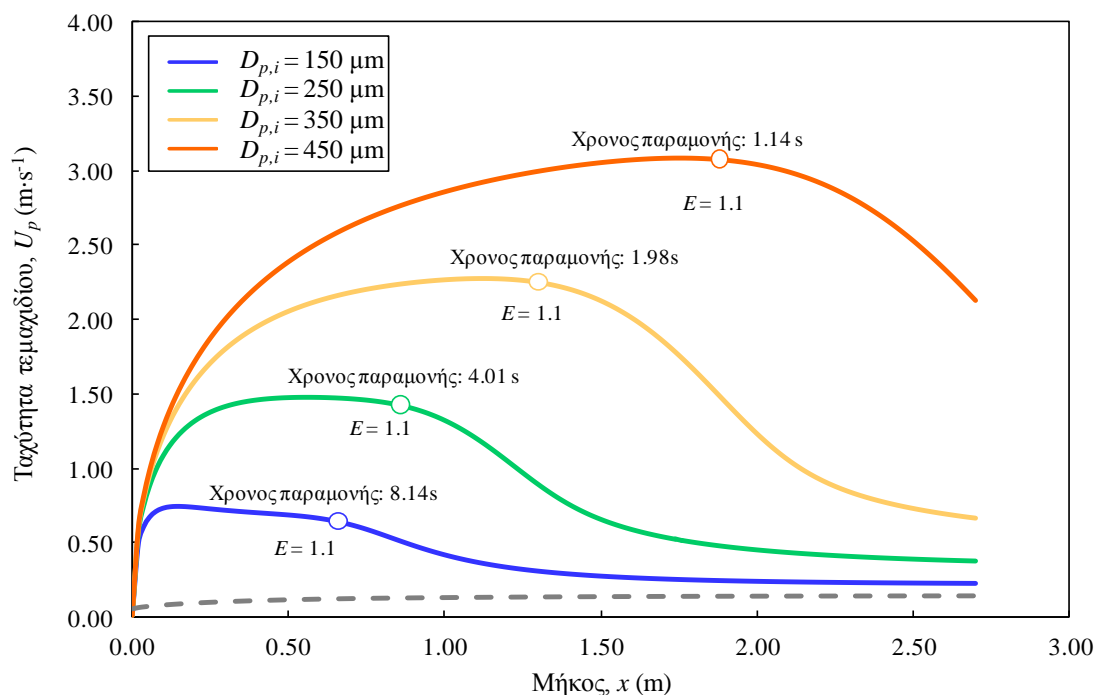
Σχήμα 7.56. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου 1000°C, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 250 °C και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και 450  $\mu\text{m}$ .

Η υψηλή θερμοκρασία του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την διόγκωση των τεμαχιδίων σε ικανοποιητικό βαθμό, ιδιαίτερα για τα τεμαχίδια των οποίων η αρχική διάμετρο δεν ξεπερνά τα 450  $\mu\text{m}$ . Αναλυτικότερα, ο τελικός βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  είναι 5.97, 5.35, 4.17 και 2.13, αντίστοιχα. Η διόγκωση των τεμαχιδίων πραγματοποιείται σε μεγάλο τμήμα του θαλάμου διόγκωσης, γεγονός που εξασφαλίζει την ομαλότερη διεξαγωγή της διεργασίας. Η διόγκωση των τεμαχιδίων αρχικής



διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  ξεκινά σε μήκος 0.22, 0.36, 0.56 και 0.82 m ενώ συνεχίζεται σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης.

Στο σχήμα 7.57 παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας του αέρα και των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης, αλλά και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων εντός αυτού στην περίπτωση που η θερμοκρασία τοιχώματος είναι σταθερή και ίση με 1000 °C, και ο ρυθμός τροφοδοσίας του προθερμασμένου αέρα ( $T_{air,in} = 250^\circ\text{C}$ ) είναι 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Όπως φαίνεται, η επίδραση της διόγκωσης στην ταχύτητα των κόκκων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι μέγιστες τιμές ταχύτητας των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  είναι 0.74, 1.48, 2.28 και 3.08  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ενώ αμέσως μετά την έναρξη της διόγκωσης τα τεμαχίδια επιβραδύνονται με αποτέλεσμα η ταχύτητα εξόδου τους να γίνεται αντίστοιχα 0.22, 0.38, 0.67 και 2.13  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Η μείωση της ταχύτητας έχει άμεση επίδραση στον χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων εντός του θαλάμου διόγκωσης που στην περίπτωση των λεπτόκοκκων ( $D_{p,i} = 150 \mu\text{m}$ ) είναι λίγο μεγαλύτερος από 8 s.

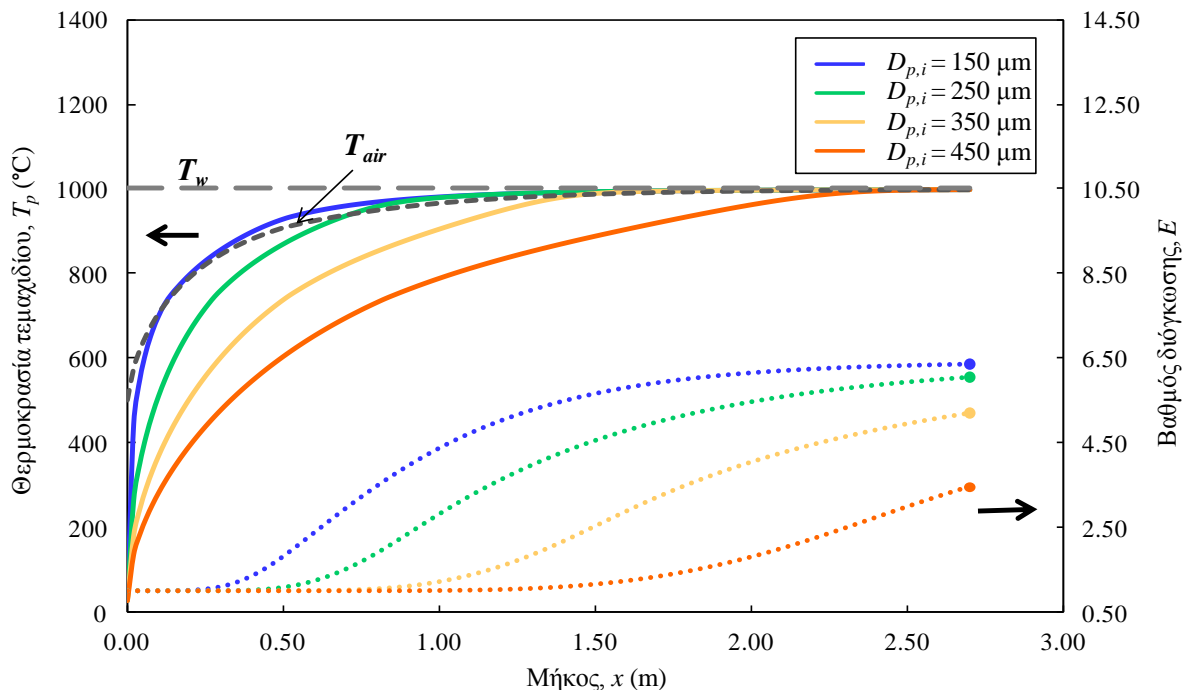


Σχήμα 7.57. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου 1000°C, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 250° C και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i}=150, 250, 350$  και 450  $\mu\text{m}$ .

#### Θερμοκρασία τροφοδοτούμενου αέρα 500 °C

Στο σχήμα 7.58 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και του βαθμού διόγκωσης τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης στην περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας

τοιχώματος καμίνου 1000 °C, ρυθμού τροφοδοσίας αέρα 50 L·min<sup>-1</sup> και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 500 °C.

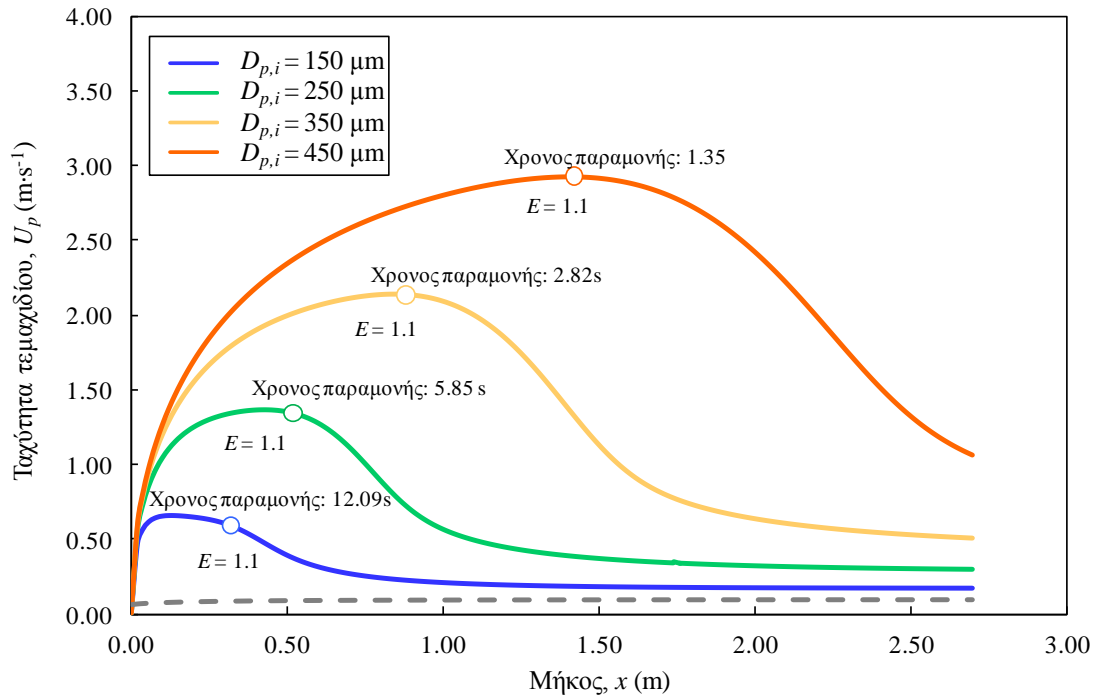


Σχήμα 7.58. Η μεταβολή της θερμοκρασίας των τεμαχιδίων (συμπαγείς γραμμές) και του βαθμού διόγκωσης τους κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου 1000°C, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 500°C και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και 450  $\mu\text{m}$ .

Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα σε θερμοκρασία 500 °C έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του αέρα να είναι μεγαλύτερη από 900 °C στο μεγαλύτερο μήκος του θαλάμου διόγκωσης ( $0.46\text{m} < x$ ). Το γεγονός αυτό έχει άμεση επίδραση στην θερμοκρασία των τεμαχιδίων που κατά την έξοδο τους ξεπερνά τους 990 °C ανεξάρτητα από την αρχική τους διάμετρο. Αποτέλεσμα της εμφάνισης μεγαλύτερων θερμοκρασιών των κόκκων είναι η διόγκωσή τους σε βαθμό μεγαλύτερο από 3.4. Αναλυτικότερα, τα τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  εξέρχονται του θαλάμου διογκωμένα σε βαθμό 6.35, 6.04, 5.20 και 3.45, αντίστοιχα. Στις συνθήκες αυτές τα λεπτομερέστερα τεμαχίδια ( $D_{p,i} = 150\mu\text{m}$ ) αρχίζουν να διογκώνονται σε μήκη μόλις 0.10 m από την είσοδο του θαλάμου. Η έναρξη της διόγκωσης καθυστερεί για τα υπόλοιπα τεμαχίδια και ανάλογα με την αρχική τους διάμετρο -250, 350 και 450 $\mu\text{m}$  -πραγματοποιείται αφότου διανύσουν μήκος 0.20, 0.38 και 0.62 m.

Στο σχήμα 7.59 παρουσιάζεται η μεταβολή τη ταχύτητας του αέρα και των τεμαχιδίων κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης αλλά και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων εντός αυτού για την περίπτωση σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος και ρυθμό τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα ( $T_{air,in} = 500 \text{ °C}$ ) 50 L·min<sup>-1</sup>. Η αύξηση του βαθμού διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων σε σύγκριση με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που

εξετάσθηκαν. Ο χρόνος παραμονής του λεπτομερέστερου τεμαχιδίου είναι ελαφρά μεγαλύτερος από 12 s.



Σχήμα 7.59. Η μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου (συμπαγείς γραμμές) και του αέρα (διακεκομμένη γραμμή) κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης και ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων για σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος καμίνου 1000 °C, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα,  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα 500 °C και για αρχική διάμετρο τεμαχιδίου  $D_{p,i} = 150, 250, 350$  και 450  $\mu\text{m}$ .

Η μείωση της ταχύτητας του αέρα με την έναρξη της διόγκωσης είναι σημαντική και παρατηρείται σε όλα τα τεμαχίδια ανεξάρτητα από την αρχική τους διάμετρο.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.11 δείχνουν ότι η τελική ταχύτητα των τεμαχιδίων είναι μέχρι και 78 %, περίπου μικρότερη από την μέγιστη ταχύτητα τους.

Πίνακας 7.12. Οι μέγιστες και τελικές ταχύτητες των σωματιδίων και η % μεταβολή της τιμής τους για διάφορες αρχικές διαμέτρους τεμαχιδίων.

| Αρχική διάμετρος τεμαχιδίου, $D_{p,i}$ ( $\mu\text{m}$ ) | Μέγιστη ταχύτητα, $U_{max}$ (m/s) | Ταχύτητα εξόδου, $U_{exit}$ (m/s) | $\frac{U_{exit} - U_{max}}{U_{max}} \cdot 100\%$ |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 150  | 0.66                              | 0.18                              | -72.7  |
| 250  | 1.37                              | 0.30                              | -78.1  |
| 350  | 2.14                              | 0.51                              | -76.1  |
| 450  | 2.92                              | 1.07                              | -63.4  |

#### 7.5.2.4. Συμπεράσματα ενότητας

- Ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα δεν πρέπει να ξεπερνάει τα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  διότι η θερμοκρασία του αέρα εντός της κάμινο μειώνεται αισθητά, γεγονός το οποίο προκαλεί ανεπαρκή θέρμανση των τεμαχιδίων και εμποδίζει τη διόγκωσή τους.
- Όταν η κάμινο λειτουργεί ισοθερμοκρασιακά ( $T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) και ο αέρας τροφοδοτείται στην κάμινο με ρυθμό  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, φαίνεται ότι μόνο εφόσον η αρχική διάμετρος των κόκκων είναι μικρότερη των  $350 \mu\text{m}$  πραγματοποιείται διόγκωσή τους σε προχωρημένο βαθμό. Παράλληλα με την διόγκωση, οι κόκκοι αυτών των κοκκομετριών βιώνουν μείωση της μέγιστης ταχύτητας τους που απέκτησαν όσο ήταν αδιόγκωτοι. Η μείωση αυτή ξεπερνά το 50%, λόγω της επίδρασης που έχει η μείωση της πυκνότητας και η αύξηση της διαμέτρου του κόκκου στο μέτρο της οπισθέλκουσας δύναμης και της άνωσης.
- Ο αυξημένος χρόνος παραμονής και η μικρή μάζα των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου  $150$  και  $250 \mu\text{m}$  έχουν ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη θέρμανσή τους σε όλες τις περιπτώσεις σε σύγκριση με τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια. Μάλιστα, η θερμοκρασία τους ξεπερνά την θερμοκρασία του αέρα στο μεγαλύτερο μήκος της διαδρομής τους σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν.
- Ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων είναι άμεσα συνυφασμένος με την αρχική τους κοκκομετρία. Στην περίπτωση ISO-100 που δεν πραγματοποιείται διόγκωση σε εμφανή τουλάχιστον βαθμό, ο χρόνος παραμονής των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου  $150$  και  $450 \mu\text{m}$  είναι  $2.83 \text{ s}$  και  $1.03 \text{ s}$ , αντίστοιχα.
- Η τροφοδοσία αέρα στην κάμινο διόγκωσης δεν επιδρά σημαντικά στον χρόνο παραμονής των χονδρόκοκκων τεμαχιδίων. Η αύξηση της τροφοδοσίας του αέρα από  $50$  σε  $200 \text{ L}/\text{min}$  στην περίπτωση ISO επιφέρει μείωση του χρόνου παραμονής του τεμαχιδίου αρχικής διαμέτρου  $450 \mu\text{m}$  από  $1.07 \text{ s}$  σε  $1 \text{ s}$ .
- Η επίδραση της ταχύτητας του αέρα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στα λεπτόκοκκα τεμαχίδια σε σύγκριση με τα λεπτόκοκκα. Στις περιπτώσεις GRAD 100, GRAD 150 και GRAD 200, τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου  $150 \mu\text{m}$ , τα οποία εξέρχονται αδιόγκωτα, παραμένουν στην κάμινο για χρόνους  $2.8 \text{ s}$ ,  $2.5 \text{ s}$  και  $2.3 \text{ s}$ , αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχοι χρόνοι παραμονής των τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου  $450 \mu\text{m}$  είναι μόλις  $1.04 \text{ s}$ ,  $1.02 \text{ s}$  και  $1.00 \text{ s}$ .

- Στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται αύξουσα θερμοκρασία κατά μήκος της καμίνου, η θέρμανση του κόκκου γίνεται κατά τρόπο τέτοιο που κατά μήκος της διαδρομής του η θερμοκρασία του αυξάνει σχεδόν παράλληλα με την θερμοκρασία της καμίνου.
- Ο χρόνος παραμονής των αδιόγκωτων τεμαχιδίων ίδιας διαμέτρου δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασιακή ρύθμιση του τοιχώματος του θαλάμου.
- Στις περιπτώσεις GRAD 100, GRAD 150 και GRAD 200, τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150  $\mu\text{m}$ , τα οποία εξέρχονται αδιόγκωτα, παραμένουν στην κάμινο για χρόνους 2.8 s, 2.5 s και 2.3s, αντίστοιχα.
- Όσον αφορά στα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 450  $\mu\text{m}$ , η επαρκής διόγκωση τους παρατηρείται μόνο όταν ο αέρας εισέρχεται στην κάμινο προθερμασμένος σε θερμοκρασία 250 °C ή και περισσότερους

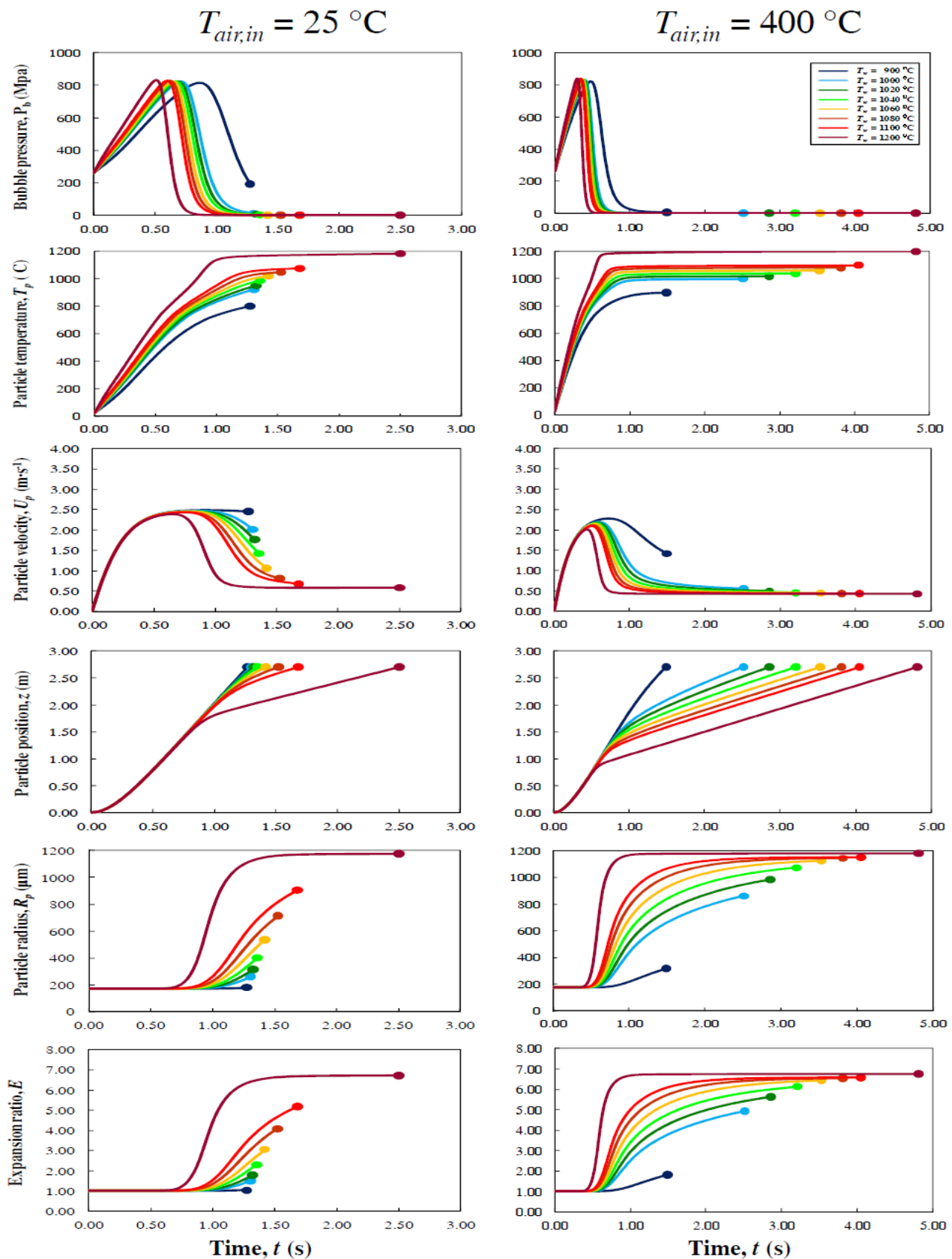
### 7.5.3. Προσομοίωση διόγκωσης τεμαχιδίων διαφορετικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται προσομοίωση της διόγκωσης ενός τεμαχιδίου περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης εστιάζοντας στη μελέτη της χρονικής εξέλιξης των καταστατικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου. Παρουσιάζεται προσομοίωση της διόγκωσης τεμαχιδίων περλίτη χημικής σύστασης και περιεκτικότητας σε νερό που συμπίπτουν με τα χαρακτηριστικά περλιτών από το ορυχείο του Τσιγκράδου και του Τράχηλα. Ακολουθεί μελέτη της επίδρασης των βασικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου (περιεκτικότητα σε νερό και αρχική διάμετρος) στον τελικό βαθμό διόγκωσης του, όπως υπολογίζεται από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορες θερμοκρασίες λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου και για προσθήκη αέρα με ρυθμό 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  θερμοκρασίας εισόδου 20 και 400 °C.

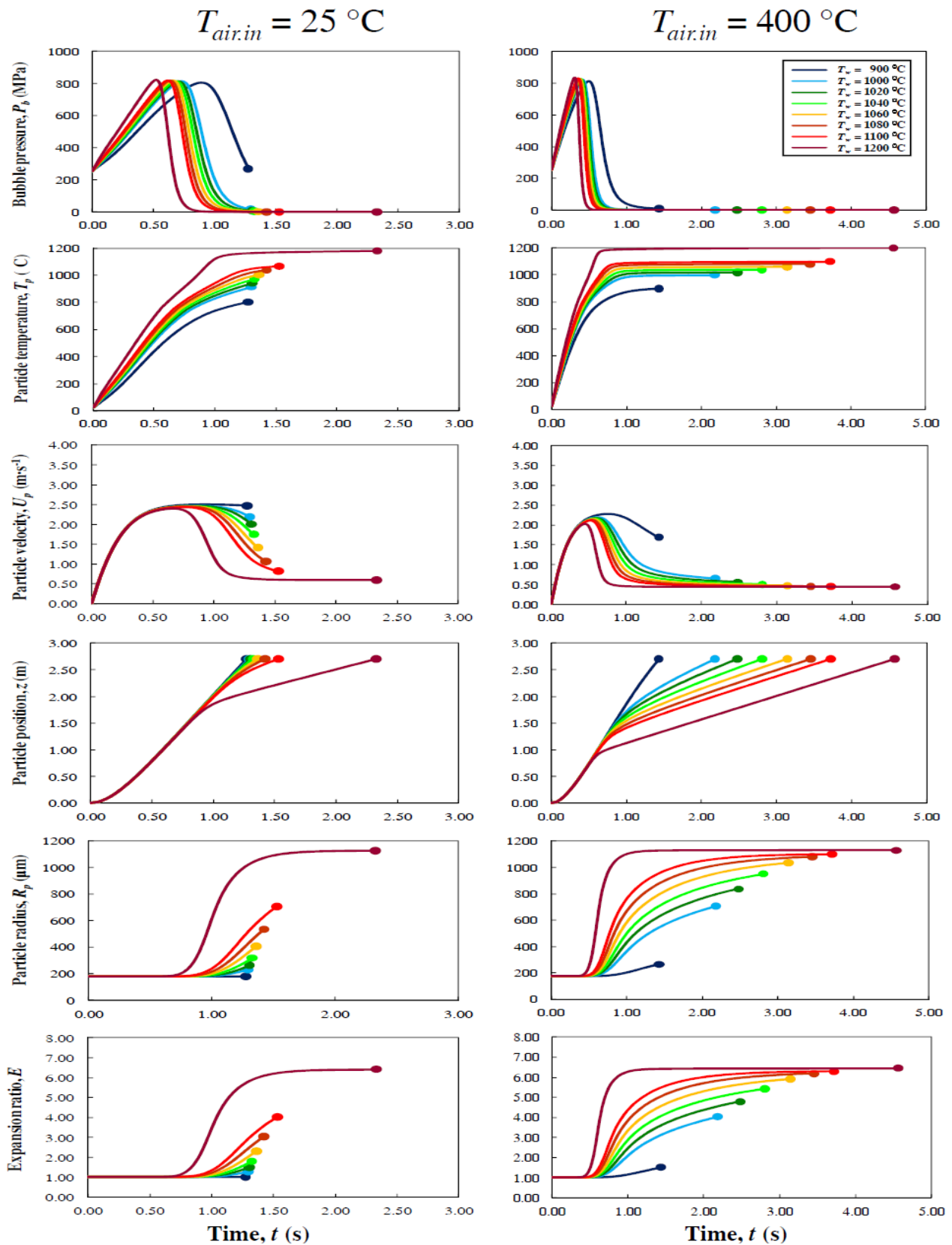
#### 7.5.3.1. Χρονική μεταβολή των κυρίων καταστατικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου

Στην ενότητα αυτή μελετάται η χρονική μεταβολή των κυρίων καταστατικών χαρακτηριστικών τεμαχιδίων περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου αρχικής διαμέτρου 350  $\mu\text{m}$ . Η μελέτη γίνεται για τεμαχίδια που διογκώνονται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας τοιχώματος θαλάμου, με ρυθμό τροφοδοσίας αέρα 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , με προθέρμανση του αέρα σε θερμοκρασία 400 °C, αλλά και στην περίπτωση εισαγωγής του αέρα στον θάλαμο διόγκωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή της πίεσης εντός της φυσαλίδας που σχηματίζεται εντός του τεμαχιδίου,  $P_b$  (MPa), της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου,  $T_p$  (°C), της ταχύτητας του τεμαχιδίου,  $U_p$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), της θέσης του

σωματιδίου εντός του θαλάμου διόγκωσης,  $z$  (m), της ακτίνας του σωματιδίου,  $R_p$  ( $\mu\text{m}$ ) και του βαθμού διόγκωσης,  $E$ . Η μεταβολή των παραπάνω μεγεθών μελετήθηκε σε θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης 900, 1000, 1100 και 1200 °C. Επιπλέον, λόγω της σημαντική μεταβολής που παρουσιάζει ο βαθμός διόγκωσης του τεμαχιδίου στο διάστημα θερμοκρασίας τοιχώματος  $T_w = 1000 - 1100$  °C θεωρήθηκε σκόπιμη η διενέργεια ανάλυσης ευαισθησίας της διεργασίας στο θερμοκρασιακό αυτό διάστημα. Η μελέτη ευαισθησίας του φαινομένου στην επίδραση της θερμοκρασίας τοιχώματος θαλάμου, πραγματοποιήθηκε μέσω επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου για θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης 1020, 1040, 1060 και 1080 °C. Στο σχήμα 7.60 παρουσιάζεται η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων που αφορά τεμαχίδιο χημικής σύστασης αντίστοιχης με περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα, το οποίο έχει περιεκτικότητα σε επιδρών νερό 2.00 % και αρχική διάμετρο τεμαχιδίου 350  $\mu\text{m}$ . Στην αριστερή στήλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στις οποίες η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα είναι 25 °C, ενώ η δεξιά περιέχει τα αποτελέσματα στα οποία ο αέρας εισάγεται προθερμασμένος σε θερμοκρασία 400 °C. Αντίστοιχα, στο σχήμα 7.61 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μελέτη που αφορά τεμαχίδιο το οποίο κατεργάζεται υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες και του οποίου η χημική σύσταση συμπίπτει με περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου ενώ η περιεκτικότητα του σε επιδρών νερό ανέρχεται σε 1.75% κατά βάρος.



Σχήμα 7.60. Χρονική μεταβολή των κύριων χαρακτηριστικών τεμαχιδίου Τράχηλα αρχικής διαμέτρου 350  $\mu\text{m}$ , κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (αριστερή στήλη) και  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (δεξιά στήλη).



Σχήμα 7.61. Χρονική μεταβολή των κύριων χαρακτηριστικών τεμαχιδίου Τσιγκράδου αρχικής διαμέτρου 350  $\mu\text{m}$ , κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα  $50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (αριστερή στήλη) και  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  (δεξιά στήλη).



Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των σχημάτων 7.60 και 7.61, η χρονική μεταβολή των καταστατικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου περλίτη είναι σημαντική κατά τη διαδρομή του κόκκου στις συνθήκες που μελετήθηκαν.

Η πίεση εντός της φυσαλίδας αυξάνει σε όλες τις περιπτώσεις κατά την φάση θέρμανση του τεμαχιδίου έως ότου η θερμοκρασία του ξεπεράσει τους 650 °C, περίπου. Στην θερμοκρασία αυτή το ιξώδες του περλιτικού κελύφους μειώνεται σημαντικά και η ακτίνα του τεμαχιδίου αρχίζει να αυξάνει υπό την επίδραση της πίεσης του ατμού που σχηματίζεται εντός του. Η αύξηση αυτή της ακτίνας του τεμαχιδίου και του συνολικού όγκου του έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης στο εσωτερικό του. Η θερμοκρασία του τεμαχιδίου αυξάνει συνεχώς, ενώ φαίνεται ότι εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν με σαφήνεια ότι η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στον θάλαμο διόγκωσης οδηγεί σε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχιδίου. Η επιβράδυνση του τεμαχιδίου μετά την έναρξη της διόγκωσης είναι σημαντική λόγω της επίδρασης της πυκνότητας του στο μέτρο, τόσο της οπισθέλκουσας δύναμης, όσο και της άνωσης. Η μείωση της ταχύτητας τεμαχιδίων ίδιας αρχικής διαμέτρου εξαρτάται μόνο από τον βαθμό διόγκωσής τους.

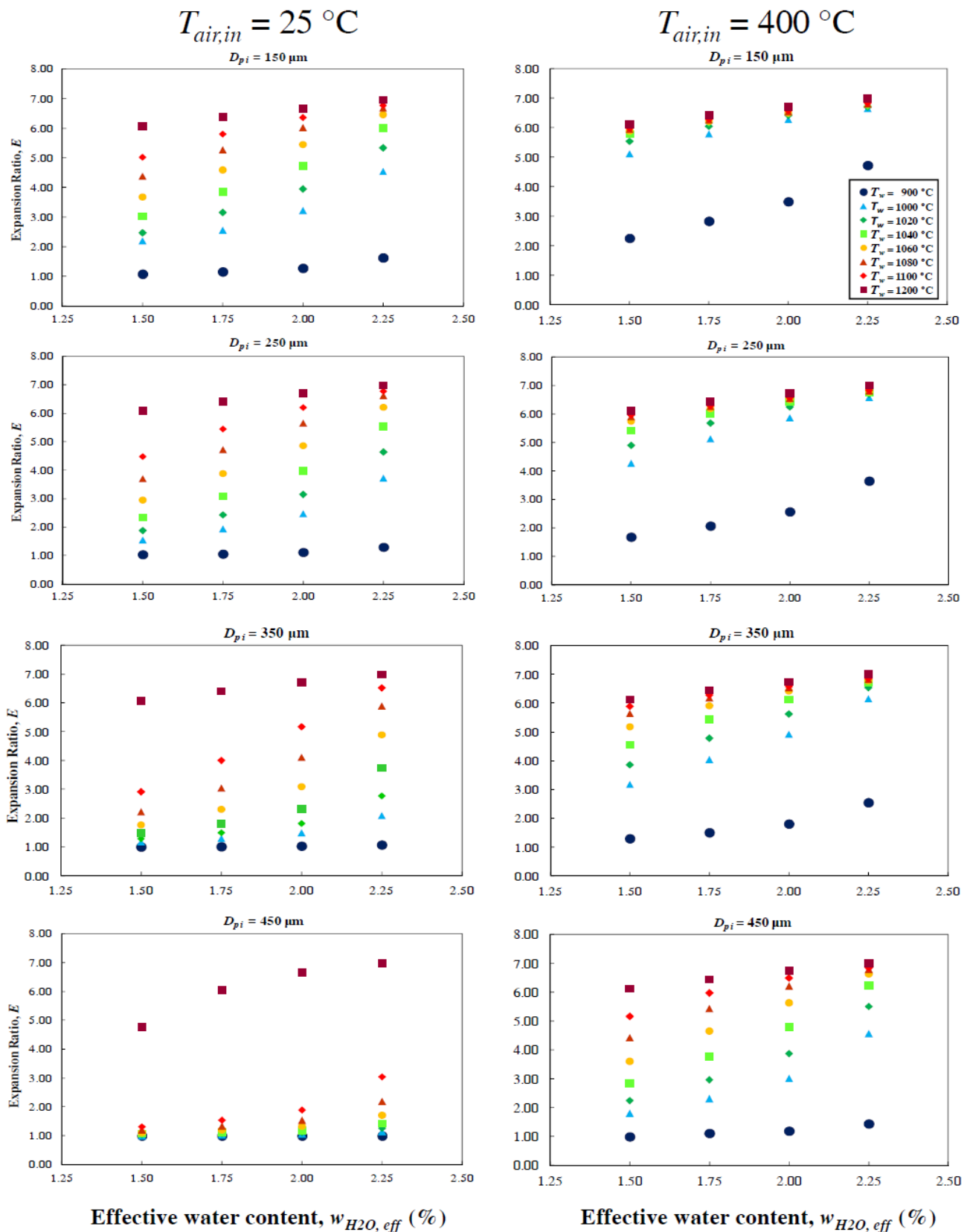
Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στο θάλαμο διόγκωσης επιδρά, θετικά στην αποτελεσματικότερη θέρμανση αλλά και στη διόγκωση των τεμαχιδίων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος διατηρείται στους 1000 °C και ο τροφοδοτούμενος αέρας έχει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τεμαχίδιο περλίτη Τράχηλα και Τσιγκράδου δεν διογκώνονται σημαντικά, ενώ στην περίπτωση που ο τροφοδοτούμενος αέρας είναι προθερμασμένος στους 400 °C, ο τελικός βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων ξεπερνά την τιμή 4 και για τα δύο τεμαχίδια.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των σχημάτων 7.60 και 7.61, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις που έγιναν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6) οι οποίες έδειξαν ευκολότερη διογκωσιμότητα του περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα σε σύγκριση με περλίτη από το Τσιγκράδο. Σε όλες τις περιπτώσεις ο τελικός βαθμός διόγκωσης του τεμαχιδίου Τράχηλα (Σχήμα 7.60) όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα είναι μεγαλύτερος από τον βαθμό διόγκωσης τεμαχιδίου Τσιγκράδου (Σχήμα 7.61). Όταν η θερμοκρασία επιφάνειας του θαλάμου διόγκωσης είναι 1100 °C και ο αέρας τροφοδοτείται σε θερμοκρασία 25 °C, ο τελικός βαθμός διόγκωσης τεμαχιδίου Τράχηλα είναι 5.2 ενώ τεμαχιδίου του Τσιγκράδου είναι 4.1.

*7.5.3.2. Μελέτη επίδρασης της αρχικής διαμέτρου του τεμαχιδίου και της περιεκτικότητάς του σε επιδρών νερό.*

Τόσο οι φυσικές όσο και οι χημικές ιδιότητες του τεμαχιδίου έχουν καθοριστική σημασία στην εξέλιξη της διόγκωσης, όπως φάνηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο που προηγήθηκε. Ιδιαίτερα σημαντική φυσική ιδιότητα του κόκκου είναι η αρχική του διάμετρος. Τα λεπτόκοκκα τεμαχίδια κινούνται με μικρότερη ταχύτητα, όπως έχουν ήδη δείξει τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου, με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένο χρόνο παραμονής εντός του θαλάμου διόγκωσης, ενώ ταυτόχρονα ο ρυθμός θέρμανσης τους είναι μεγαλύτερος από αυτό των χονδρότερων τεμαχιδίων. Ο συνδυασμός των παραπάνω παρατηρήσεων δείχνει ότι η διόγκωση κόκκων μεγάλης κοκκομετρίας είναι δυσκολότερη σε σύγκριση με την διόγκωση λεπτομερέστερων κλασμάτων. Σε σχέση με τις χημικές ιδιότητες των κόκκων, μεγάλη σημασία έχει η περιεκτικότητα τους σε νερό, επειδή συνδέεται άμεσα, και επομένως έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του ιξώδους του περλίτη.

Στο σχήμα 7.62 παρουσιάζεται η τελική φαινόμενη πυκνότητα τεμαχιδίων περλίτη, όπως αυτή υπολογίζεται από το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, για διαφορετικές συνθήκες διόγκωσης και φυσικοχημικές ιδιότητες τεμαχιδίου (αρχική διάμετρος και περιεκτικότητα σε επιδρών νερό). Η μελέτη έγινε για σταθερή θερμοκρασία σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης, ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία τροφοδοσίας του αέρα  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ο υπολογισμός των τελικών βαθμών διόγκωσης πραγματοποιήθηκε για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  και περιεκτικότητας σε επιδρών νερό 1.50, 1.75, 2.00 και 2.25 %.



Σχήμα 7.62. Ο τελικός βαθμός διόγκωσης τεμαχιδίων περλίτη αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$  και περιεκτικότητας σε επιδρών νερό 1.50, 1.75, 2.00 και 2.25% όπως υπολογίσθηκε από το μαθηματικό μοντέλο για διάφορες θερμοκρασίες τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης, ρυθμό τροφοδοσίας αέρα 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  και θερμοκρασία αέρα κατά την είσοδό του στον θάλαμο 25°C και 400°C.

Είναι φανερό από το Σχήμα 7.62, ότι για σημαντικά μεγάλο εύρος κοκκομετρίας της πρώτης ύλης αλλά και της περιεκτικότητας της σε νερό, η κατεργασία του περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο, εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου, καθώς μεταβολή της θερμοκρασίας τοιχώματος ακόμα και κατά 20 °C, διαφοροποιεί αισθητά τον βαθμό διόγκωσης του προϊόντος κατεργασίας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε ίδιες συνθήκες κατεργασίας, τεμαχίδια μικρότερης αρχικής διαμέτρου διογκώνονται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τα τεμαχίδια μεγαλύτερης κοκκομετρίας. Όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης είναι 900 °C και με τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στην κάμινο παρατηρείται μερική διόγκωση λεπτομερών τεμαχιδίων περλίτη με αρχική διάμετρο μικρότερη των 250 μm. Αντίστοιχα, όταν η αρχική διάμετρος των τεμαχιδίων ξεπερνά τα 350 μm, η διόγκωση είτε είναι ανεπαρκής είτε δεν παρατηρείται καθόλου. Γενικότερα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, όταν η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης είναι μεγαλύτερη από 1100 °C ο τελικός βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων είναι σε όλες τις περιπτώσεις υψηλός ( $E > 4.7$ ) πράγμα που σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η ρύθμιση του θαλάμου διόγκωσης σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1100 °C για να επιτευχθεί ικανοποιητική διόγκωση σε τεμαχίδια περλίτη με αρχική διάμετρο που ξεπερνά τα 350 μm.

Η περιεκτικότητα του τεμαχιδίου σε επιδρών νερό έχει ιδιαίτερη σημασία στην εξέλιξη της διόγκωσης διότι αύξηση της περιεκτικότητας του αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας την πίεση των ατμών που σχηματίζονται εντός του τεμαχιδίου και μειώνει το ιξώδες του περλιτικού κελύφους. Τα αποτελέσματα του σχήματος 7.62 δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του κόκκου σε επιδρών νερό τόσο αποτελεσματικότερη είναι η διόγκωσή του. Είναι ενδεικτικό το γεγονός ότι, όταν λεπτόκοκκο τεμαχίδιο ( $D_{p,i} = 150 \mu\text{m}$ ) κατεργάζεται στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο με θερμοκρασία τοιχώματος 1000 °C και θερμοκρασία τροφοδοτούμενου αέρα 25 °C, ο τελικός βαθμός διόγκωσης που επιτυγχάνεται είναι 2 στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του τεμαχιδίου σε επιδρών νερό είναι η ελάχιστη ( $w_{H_2O, \text{eff}} = 1.50\%$ ), ενώ όταν η περιεκτικότητά του ξεπερνά το 2.00% ο τελικός βαθμός διόγκωσης του κόκκου ξεπερνά το 4.5%. Έτσι, αύξηση της περιεκτικότητας του τεμαχιδίου σε επιδρών νερό κατά 0.75% μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του τελικού βαθμού διόγκωσης του τεμαχιδίου κατά 125%.

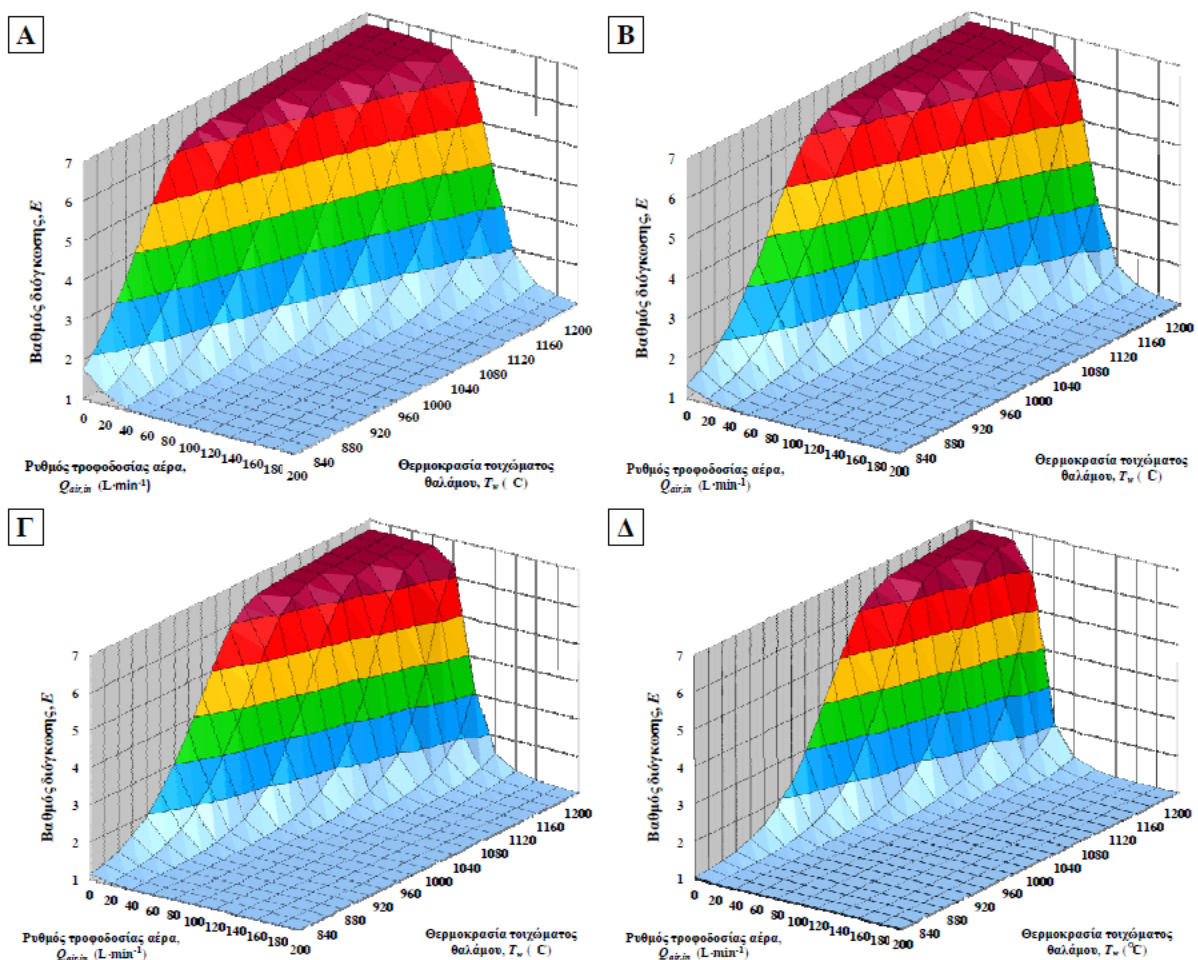
#### **7.5.4. Συσχετισμός του εύρους κοκκομετρίας της τροφοδοσίας με τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου.**

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση που έχει η ταυτόχρονη μεταβολή των κυρίων παραμέτρων λειτουργίας του θαλάμου διόγκωσης οι οποίες περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία του

θαλάμου διόγκωσης, το ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα αλλά και τη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα στον τελικό βαθμό διόγκωσης τεμαχιδίων διαφόρων αρχικών διαμέτρων. Η μελέτη έγινε για τεμαχίδια περλίτη που έχουν χημική σύσταση όμοια με αυτή του περλίτη που προέρχεται από το ορυχείο του Τράχηλα.

7.5.4.1. Επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας αέρα και της θερμοκρασίας του τοιχώματος στο βαθμό διόγκωσης

Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση που έχει στον βαθμό διόγκωσης η μεταβολή του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα από 0-200 L·min<sup>-1</sup> και της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης όταν αυτή μεταβάλλεται από 800-1200 °C. Στα διαγράμματα Α έως Δ του Σχήματος 7.63 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού διόγκωσης για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450 μm, αντίστοιχα.

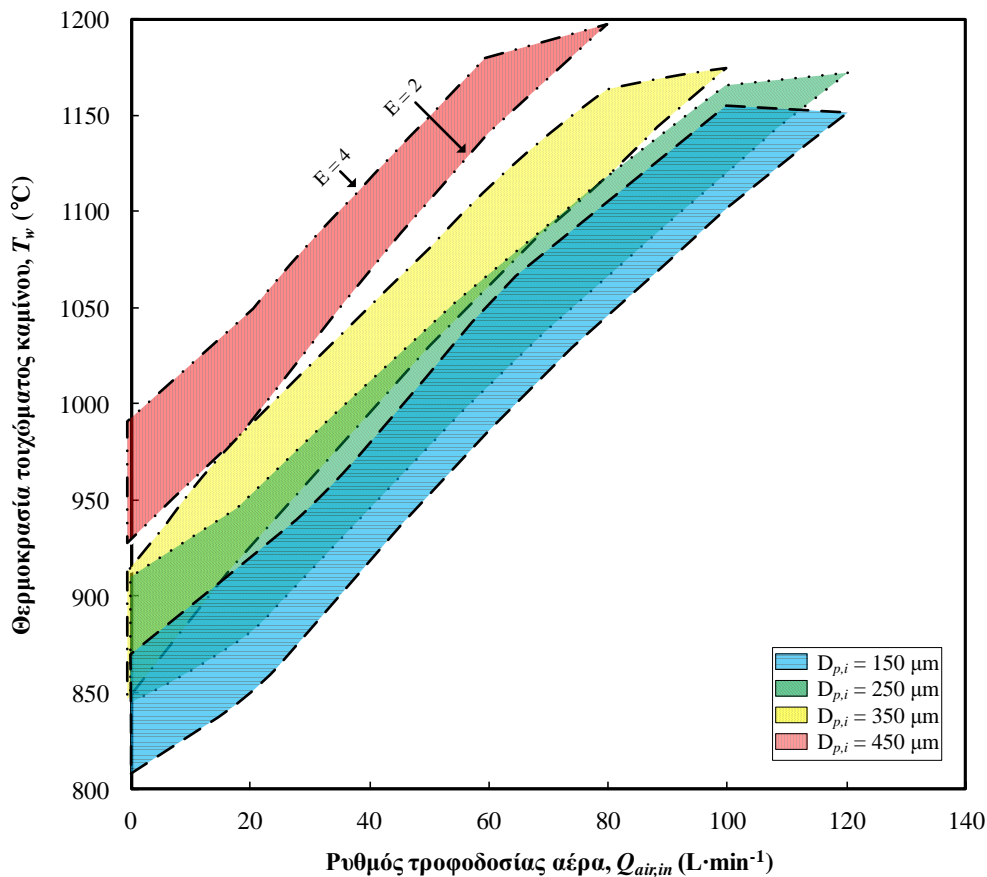


Σχήμα 7.63. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου και του ρυθμού τροφοδοσίας αέρα για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150 μm (Α), 250 μm (Β), 350 μm (Γ) και 450 μm (Δ).

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι ο βαθμός διόγκωσης ανάλογα με τον ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα και την θερμοκρασία του τοιχώματος μπορεί να κυμανθεί από 1 έως 7. Επίσης, αύξηση της αρχικής διαμέτρου του τεμαχιδίου έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη επιβολής χαμηλότερων ρυθμών τροφοδοσίας αέρα και υψηλότερων θερμοκρασιών στο τοίχωμα του θαλάμου για να επιτευχθούν ικανοποιητικοί βαθμοί διόγκωσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα δεν υπερβαίνει την τιμή 4. Επομένως αυτό που πρακτικά ενδιαφέρει είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών στις οποίες ο βαθμός διόγκωσης είναι μεταξύ 2-4. Από τα διαγράμματα του σχήματος 7.63 φαίνεται ότι οι συνθήκες αυτές για τα τεμαχίδια διαμέτρου 150  $\mu\text{m}$  περιλαμβάνονται εντός του χωρίου με συντεταγμένες  $(T_w, Q_{air,in})$ : [(830,0),(880,0),(1200,140),(1200,120)], για τα τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 250  $\mu\text{m}$  εντός του χωρίου συντεταγμένων  $(T_w, Q_{air,in})$ : [(850,0),(920,0),(1200,130),(1200,110)], για τα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 350  $\mu\text{m}$  εντός του χωρίου συντεταγμένων  $(T_w, Q_{air,in})$ : [(880,0),(950,0),(1200,115),(1200,90)] και τέλος για τα τεμαχίδια με αρχική διάμετρο 450  $\mu\text{m}$  εντός του χωρίου με συντεταγμένες  $(T_w, Q_{air,in})$ : [(925,0),(985,0),(1200,80),(1200,70)].

Στο διάγραμμα του σχήματος 7.64 παρουσιάζονται οι συνθήκες θερμοκρασίας τοιχώματος και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα στις οποίες ο βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων κυμαίνεται μεταξύ  $E=2$  και  $E=4$  για αρχική διάμετρο τεμαχιδίων 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ . Όπως είναι λογικό, η άνω αριστερή πλευρά των χωρίων καθορίζει τις συνθήκες ούτως ώστε ο βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων να είναι  $E=4$ . Αντίστοιχα, η κάτω και δεξιά πλευρά κάθε τετράπλευρου δείχνει τις συνθήκες που πρέπει να εφαρμοστούν ώστε ο βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων να είναι  $E=2$ .



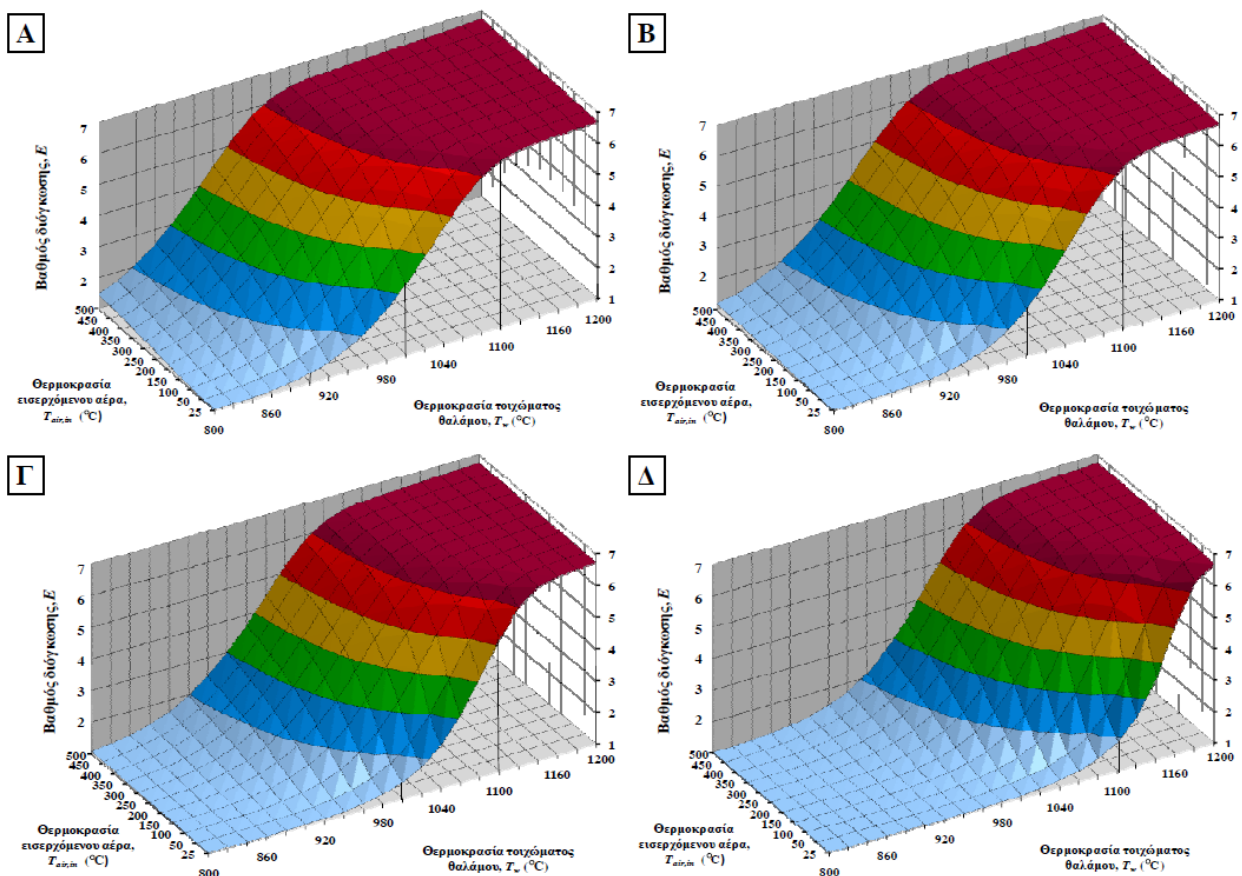
Σχήμα 7.64. Συνθήκες θερμοκρασίας καμίνου και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη με βαθμός διόγκωσης μεταξύ  $E=2$  και  $E=4$  από τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450 $\mu\text{m}$ .

Η αλληλοεπικάλυψη δύο ή και περισσότερων περιοχών δείχνει ότι υπό τις συνθήκες στις οποίες παρατηρείται είναι δυνατόν να κατεργαστούν ταυτόχρονα περλίτες διαφορετικής αρχικής κοκκομετρίας και τελικά να προκύψει διογκωμένο προϊόν με αποδεκτή φαινόμενη πυκνότητα παρότι η πρώτη ύλη αποτελείτο από κόκκους διαφόρων κοκκομετριών. Στο σχήμα 7.64 διακρίνονται εκτενείς περιοχές διπλής αλληλοεπικάλυψης που αφορούν στις συνθήκες διόγκωσης των κλασμάτων αρχικών κοκκομετριών 150 και 250  $\mu\text{m}$  αλλά και 250 και 350  $\mu\text{m}$ . Υπάρχουν επίσης σημεία στα οποία παρατηρείται τριπλή αλληλοεπικάλυψη για τα κλάσματα των αρχικών κοκκομετριών που αναφέρθηκαν. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατόν να κατεργαστεί ένα μείγμα με αρχικό κοκκομετρικό εύρος 150-350  $\mu\text{m}$  στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και να παραχθεί διογκωμένος περλίτη σε αποδεκτό βαθμό διόγκωσης ( $E=2-4$ ) ενώ η περιεκτικότητα του σε μη επαρκώς διογκωμένους κόκκους θα είναι μικρή και το φαινόμενο επικολλήσεων λόγω υπερθέρμανσης των λεπτόκοκκων τεμαχιδίων περιορισμένο. Όσον αφορά στα τεμαχίδια αρχικών διαμέτρων 150 και 250  $\mu\text{m}$  (μπλε και πράσινη περιοχή) αλλά και τα τεμαχίδια αρχικών διαμέτρων 250 και 350  $\mu\text{m}$  (κίτρινη και πράσινη περιοχή) παρατηρείται αλληλοεπικάλυψη των περιοχών κατεργασίας τους σε όλο το εύρος ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα, πράγμα που σημαίνει ότι ένα

μείγμα πρώτης ύλης με τα προαναφερθέντα κοκκομετρικά εύρη μπορεί να κατεργαστεί στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης σε μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας δίνοντας προϊόν διογκωμένο σε ικανοποιητικό βαθμό και χωρίς την εκτενή παρουσία επικολλήσεων στην κάμινο. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι, η περιοχή που ορίζει τις συνθήκες κατεργασίας περλιτών με αρχική διάμετρο 450  $\mu\text{m}$  (κόκκινο τετράπλευρο) πρακτικά δεν επικαλύπτεται από καμία άλλη, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται στενό εύρος κοκκομετρίας όταν κατεργάζονται χονδρόκοκκα τεμαχίδια περλίτη στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης.

#### 7.5.4.2. Επίδραση θερμοκρασίας του τοιχώματος και του εισερχόμενου αέρα στο βαθμό διόγκωσης

Στην παρούσα ενότητα μελετάται η επίδραση που έχει στον βαθμό διόγκωσης η μεταβολή της θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα, ο οποίος τροφοδοτείται στην κάμινο με ρυθμός 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  και της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης όταν αυτή μεταβάλλεται από 800-1200  $^{\circ}\text{C}$ . Στα διαγράμματα Α έως Δ του Σχήματος 7.65 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού διόγκωσης για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ , αντίστοιχα.



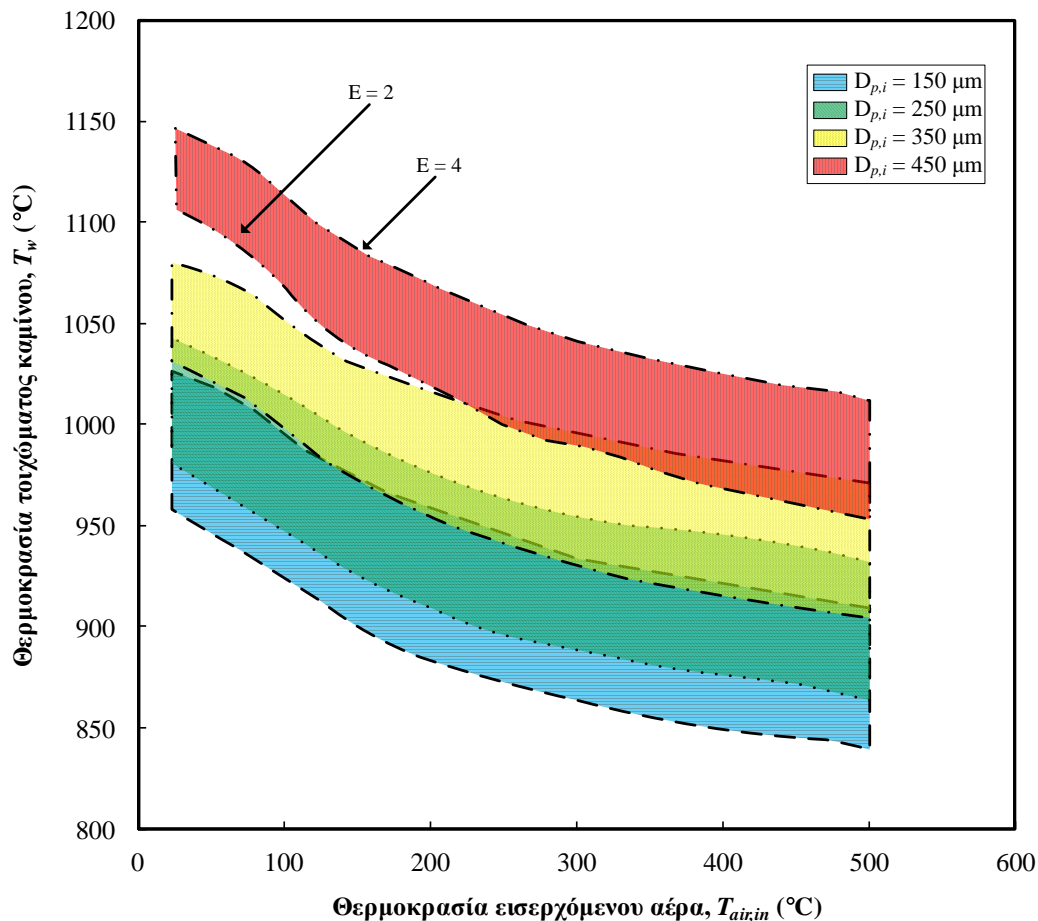
Σχήμα 7.65. Η μεταβολή της φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου και της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου αέρα για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150  $\mu\text{m}$  (Α), 250  $\mu\text{m}$  (Β), 350  $\mu\text{m}$  (Γ) και 450  $\mu\text{m}$  (Δ).



Από τα διαγράμματα του σχήματος 7.65 φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του τροφοδοτούμενου αέρα επιδρά θετικά στο βαθμό διόγκωσης των τεμαχιδίων, ενώ ταυτόχρονα ο ίδιος βαθμός διόγκωσης μπορεί να επιτευχθεί σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, για τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150  $\mu\text{m}$ , αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα από 25 $^{\circ}$  σε 500  $^{\circ}\text{C}$  συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας του τοιχώματος του θαλάμου από 950  $^{\circ}$  σε 840  $^{\circ}\text{C}$ , έτσι ώστε ο βαθμός διόγκωσης των τεμαχιδίων να είναι  $E=2$ . Αντίστοιχες μειώσεις παρατηρούνται και για τα τεμαχίδια των υπόλοιπων αρχικών διαμέτρων. Για σωματίδια αρχικής διαμέτρου 250  $\mu\text{m}$  η θερμοκρασία του τοιχώματος μειώνεται από 980 $^{\circ}$  σε 870  $^{\circ}\text{C}$ , για σωματίδια αρχικής διαμέτρου 350  $\mu\text{m}$  η μείωση είναι από 1030  $^{\circ}$  σε 900  $^{\circ}\text{C}$  ενώ για τα πιο αδρόκοκκα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 450  $\mu\text{m}$ , η προθέρμανση του αέρα σε θερμοκρασία 500  $^{\circ}\text{C}$  επιτρέπει την μείωση της θερμοκρασίας του θαλάμου από τους 1105 $^{\circ}$  στους 950  $^{\circ}\text{C}$  έτσι ώστε ο βαθμός διόγκωσης να είναι  $E=2$ .

Επίσης, από τα διαγράμματα του σχήματος 7.65 φαίνεται ότι για να επιτευχθεί ικανοποιητικός βαθμός διόγκωσης στα τεμαχίδια με μεγαλύτερη αρχική διάμετρο πρέπει να εφαρμοστούν εντονότερες  $\sigma$ . Δηλαδή μεγαλύτερη θερμοκρασία του τροφοδοτούμενου αέρα και μεγαλύτερη θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου για τον ίδιο ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα. Συγκεκριμένα, αν τροφοδοτείται αέρας στους 250  $^{\circ}\text{C}$  η ελάχιστη θερμοκρασία για να επιτευχθεί βαθμός διόγκωσης  $E=2$  στα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150  $\mu\text{m}$  είναι 870  $^{\circ}\text{C}$ , στα τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 250  $\mu\text{m}$  είναι 890  $^{\circ}\text{C}$ , σε εκείνα με αρχική 350  $\mu\text{m}$  είναι 930 $^{\circ}\text{C}$  ενώ στα τεμαχίδια με την μέγιστη αρχική διάμετρο ( $D_{p,i} = 450 \mu\text{m}$ ) είναι 990  $^{\circ}\text{C}$ .

Στο σχήμα 7.66 παρουσιάζονται οι συνθήκες θερμοκρασίας εισερχόμενου αέρα και τοιχώματος θαλάμου στις οποίες επιτυγχάνεται βαθμός διόγκωσης μεταξύ  $E=2$  και  $E=4$  για ρυθμό τροφοδοσίας αέρα 50  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$  σε τεμαχίδια αρχικής κοκκομετρίας 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 7.66. Συνθήκες θερμοκρασίας καμίνου και θερμοκρασίας τροφοδοτούμενου αέρα με ρυθμό παροχής  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη με βαθμός διόγκωσης μεταξύ  $E=2$  και  $E=4$  από τεμαχίδια αρχικής διαμέτρου 150, 250, 350 και 450  $\mu\text{m}$ .

Στο διάγραμμα του σχήματος 7.66 παρουσιάζονται οι συνθήκες στις οποίες πρέπει να διεξαχθεί η διόγκωση για να επιτευχθεί ικανοποιητική διόγκωση του κάθε κοκκομετρικού κλάσματος, αλλά και οι συνθήκες που μπορεί να επιτευχθεί ο ζητούμενος βαθμός διόγκωσης όταν η τροφοδοσία αποτελείται από περισσότερα εκ του ενός κοκκομετρικά κλάσματα. Αντίστοιχα με το διάγραμμα του σχήματος 7.64, όπου υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μίας περιοχής από άλλη, σημαίνει ότι στις συνθήκες που ορίζει η σκιασμένη περιοχή είναι δυνατόν να κατεργαστούν ταυτόχρονα δείγματα με διαφορετική αρχική κοκκομετρία, προσφέροντας τελικά προϊόν του οποίου ο βαθμός διόγκωσης θα είναι από  $E=2$  έως  $E=4$ . Εκτενής αλληλοεπικάλυψη παρατηρείται για τα ζεύγη αρχικών κοκκομετριών 150  $\mu\text{m}$  και 250  $\mu\text{m}$  αλλά και 250  $\mu\text{m}$  και 350  $\mu\text{m}$ , γεγονός το οποίο σημαίνει ότι, στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης η κατεργασία πρώτων υλών με κοκκομετρικό εύρος 150  $\mu\text{m}$  έως 250  $\mu\text{m}$  ή 250  $\mu\text{m}$  έως 350  $\mu\text{m}$  είναι εφικτή και προσφέρει με προϊόν διογκωμένο σε ικανοποιητικό βαθμό ( $2 < E < 4$ ). Αλληλοεπικάλυψη περιοχών μειωμένης όμως έκτασης παρατηρείται και στις συνθήκες διόγκωσης τεμαχιδίων αρχικής κοκκομετρίας 350 και 450  $\mu\text{m}$ , γεγονός το οποίο σημαίνει ότι είναι δυνατή η ταυτόχρονη κατεργασία των δύο αυτών

κοκκομετριών για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη σε βαθμό μεταξύ E=2 και E=4, υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα θα υπερβαίνει τους 200 °C. Η τριπλή αλληλοεπικάλυψη που παρατηρείται στο διάγραμμα αφορά στις συνθήκες διόγκωσης τεμαχιδίων αρχικής διαμέτρου 150, 250 και 350 μm παρά το στενό θερμοκρασιακό εύρος που έχει, εκτίνεται σε θερμοκρασίες εισερχόμενου αέρα από 100 ° έως 500 °C, περίπου, και δείχνει ότι είναι δυνατή η κατεργασία πρώτης ύλης με εύρος κοκκομετρίας 150-350 μm για την παραγωγή διογκωμένου δείγματος με βαθμό διόγκωσης μεταξύ E=2 και E=4.

## 7.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων μαθηματικού μοντέλου και πειραματικών δεδομένων

Ο έλεγχος αξιοπιστίας των προβλέψεων του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε για την περιγραφή της διόγκωσης του περλίτη σε κάθετη ηλεκτρική κάμινο πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση του βαθμού διόγκωσης που υπολογίζεται από το μαθηματικό μοντέλο με τον βαθμό διόγκωσης που μετρήθηκε σε πειραματικές δοκιμές.

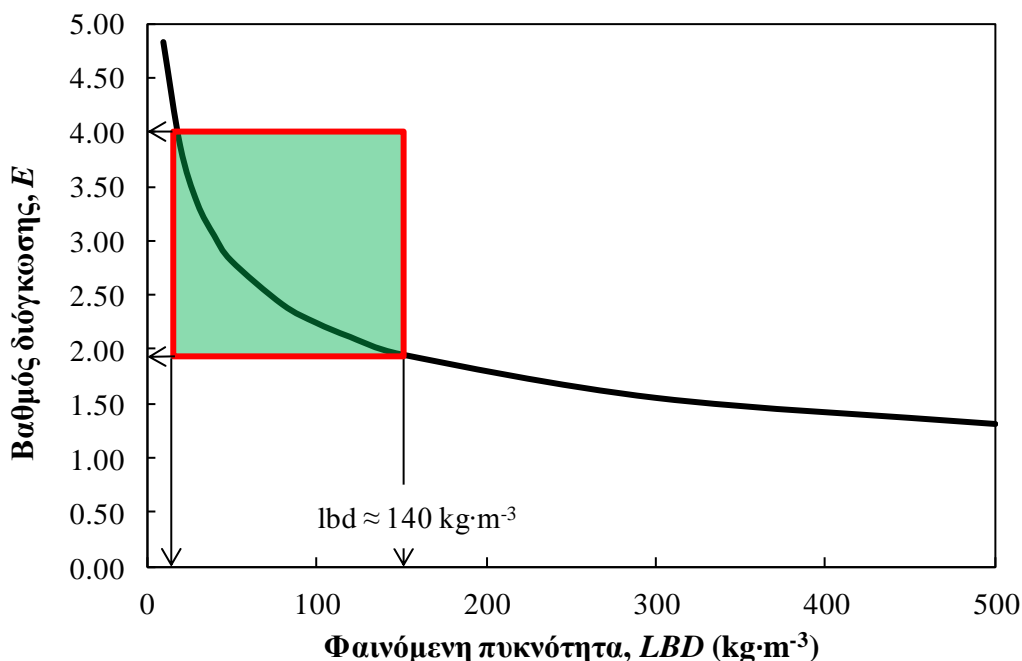
Οι πειραματικές δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν σαν μέτρο σύγκρισης αφορούσαν τη διόγκωση περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα με κοκκομετρία +150 μm -220 μm και συνθήκες διόγκωσης: ρυθμός τροφοδοσίας αέρα  $Q_{air,in} = 50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα  $T_{air,in} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , θερμοκρασία τοιχώματος θαλάμου διόγκωσης  $T_w = 800^\circ, 900^\circ, 975^\circ, 1000^\circ$  και  $1025 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ο βαθμός διόγκωσης των δειγμάτων ορίζεται ως η τρίτη ρίζα του πηλίκου της πυκνότητας του αδιόγκωτου δείγματος προς την πυκνότητα του διογκωμένου προϊόντος.

$$E = \sqrt[3]{\frac{\rho_{unexp}}{\rho_{exp}}} \quad (7.67)$$

Η πυκνότητα του διογκωμένου περλίτη που απαιτείται στην εξίσωση 7.67 είναι η βελτιωμένη τιμή της φαινόμενης πυκνότητας απουσία της επίδρασης του όγκου των κενών χώρων μεταξύ των τεμαχιδίων. Θεωρώντας ότι το διογκωμένο δείγμα αποτελείται εξολοκλήρου από τεμαχίδια σφαιρικά και ίδιου μεγέθους, τότε πολλαπλασιάζοντας την φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος με τον συντελεστή 1.91 προσδιορίζεται η πυκνότητα του δείγματος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο όγκος των κενών χώρων.

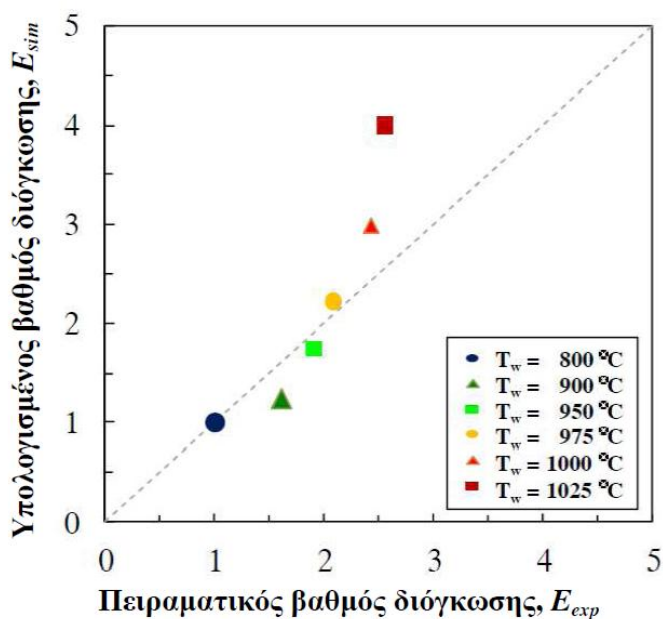
$$\rho = 1.91 \cdot LBD \quad (7.68)$$

Εναλλακτικά πάντως, για τον υπολογισμό του βαθμού διόγκωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι φαινόμενες πυκνότητες στην εξίσωση 7.67 αφού η σχέση 7.68 ισχύει για διογκωμένο ή αδιόγκωτο δείγμα περλίτη.



Σχήμα 7.67. Συσχετισμός του βαθμού διόγκωσης ( $E$ ) με την φαινόμενη πυκνότητα ( $LBD$ ).

Στο σχήμα 7.68 παρουσιάζονται οι βαθμοί διόγκωσης που υπολογίζονται από το μαθηματικό μοντέλο  $E_{sim}$ , και οι βαθμοί διόγκωσης που προέκυψαν από πειραματικές δοκιμές,  $E_{exp}$ .



Σχήμα 7.68. Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων διόγκωσης περλίτη με τις τελικές τιμές βαθμού διόγκωσης όπως υπολογίσθηκαν από το μαθηματικό μοντέλο για τα αντίστοιχα σενάρια.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τελικοί βαθμοί διόγκωσης που υπολογίζονται από το μαθηματικό μοντέλο είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου διόγκωσης είναι μικρότερη ή ίση με 1000 °C. Για θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1000 °C παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των υπολογισμένων από το μοντέλο τιμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η απόκλιση των τιμών που προβλέπονται από το μαθηματικό μοντέλο και των πειραματικών αποτελεσμάτων στις υψηλότερες θερμοκρασίες του τοιχώματος οφείλονται στο γεγονός ότι όταν η θερμοκρασία του θαλάμου είναι μεγαλύτερη των 1000 °C μεγάλο ποσοστό των τεμαχιδίων επικολλάται στα τοιχώματα του θαλάμου με αποτέλεσμα το προϊόν που λαμβάνεται να μην περιέχει όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της διόγκωσης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου και έχει μεγαλύτερη επίδραση στα πιο λεπτόκοκκα σωματίδια γιατί σε αυτά αυξάνεται γρηγορότερα η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής τους είναι μεγαλύτερος εντός του θαλάμου με αποτέλεσμα όταν τα τεμαχίδια αποκτήσουν την θερμοκρασία μαλάκυνσης του περλίτη να επικολλούνται ευκολότερα στο τοίχωμα του θαλάμου. Η απώλεια αυτή των ικανοποιητικά διογκωμένων τεμαχιδίων έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντος που αποτελείται από τεμαχίδια μικρότερου βαθμού διόγκωσης και επομένως υψηλότερης φαινόμενης πυκνότητας.

### **7.7. Συμπεράσματα κεφαλαίου**

Το δυναμικό μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε με σκοπό την προσομοίωση της διόγκωσης τεμαχιδίου περλίτη εντός της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης. Αποτελείται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων διατήρησης ενέργειας και ορμής για τον αέρα και το τεμαχίδιο κατά μήκος της τροχιάς που διαγράφει στον θάλαμο θέρμανσης, αλλά και από μη-γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και του κόκκου συναρτήσει της θερμοκρασίας. Με εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, γίνεται δυνατή η απεικόνιση των μέτρων της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και των υπόλοιπων ιδιοτήτων του αέρα κατά μήκος του θαλάμου θέρμανσης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος που καθορίζονται από τη θερμοκρασία του τοιχώματος της ηλεκτρικής καμίνου, τον ρυθμό τροφοδοσίας του αέρα εντός αυτής και από την θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα. Μέσω της επίλυσης ισοζυγίου δυνάμεων στο τεμαχίδιο, υπολογίζεται η ταχύτητα του τεμαχιδίου συναρτήσει τόσο του χρόνου όσο και της θέσης του, ενώ η εφαρμογή ισοζυγίου ενέργειας του συστήματος αέρας-τοιχώμα-τεμαχίδιο έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του κόκκου, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά θέρμανσης και κίνησης του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης, από την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Βάσει του αριθμού Reynolds, η ροή εντός του θαλάμου διόγκωσης είναι στρωτή για ρυθμούς τροφοδοσίας μέχρι και  $200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ .
- Η ταχύτητα του αέρα αυξάνει κατά μήκος του θαλάμου μέχρι και 4 φορές λόγω της θέρμανσης του. Η επίδραση της ταχύτητας του αέρα στην ταχύτητα κίνησης των τεμαχιδίων είναι μικρή.
- Στις περιπτώσεις εφαρμογής ισοθερμοκρασιακού προφίλ στο τοίχωμα του θαλάμου, το προφίλ μέσης θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του έχει μορφή παραβολική, που τέμνει την θερμοκρασία του τοιχώματος της καμίνου. Όταν η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης μεταβάλλεται κατά το μήκος του γραμμικά, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα πραγματοποιείται σχεδόν παράλληλα με την θερμοκρασία του τοιχώματος (γραμμική μεταβολή).
- Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στον θάλαμο διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την εξίσωση της θερμοκρασίας του αέρα και του τοιχώματος στο μεγαλύτερο μέρος του αγωγού.

Στο νέο μοντέλο φυσαλίδας ατμού που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση του φαινομένου της διόγκωσης, γίνεται η παραδοχή ότι το 60% του νερού του κόκκου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του μέσα σε μία φυσαλίδα ενώ το υπόλοιπο 40% είναι διαλελυμένο στο στερεό κέλυφος που περιβάλλει την φυσαλίδα. Η άνοδος της θερμοκρασίας του κόκκου οδηγεί σε αύξηση τη πίεσης εντός της φυσαλίδας ενώ ταυτόχρονα το ιζώδες και η συνεκτικότητα του κελύφους μειώνονται, με αποτέλεσμα ο κόκκος να διογκώνεται. Η μεταβολή της ακτίνας του κόκκου που επιδρά και στην πυκνότητα του, επηρεάζει τα χαρακτηριστικά κίνησης αλλά και θέρμανσης του τεμαχιδίου. Με την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου διόγκωσης γίνεται δυνατή η μελέτη της διόγκωσης με την νέα μέθοδο που αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση τόσο των χαρακτηριστικών λειτουργίας της καμίνου όσο και των φυσικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης στη διόγκωση των κόκκων.

Αναφορικά με την επίδραση των συνθηκών λειτουργίας της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου στην διόγκωση του περλίτη, παρατηρούνται τα εξής:

- Η θερμοκρασία του τοιχώματος του θαλάμου θέρμανσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επιδρά στην θέρμανση των τεμαχιδίων λόγω της έντονης επίδρασης της

μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολίας από τα τοιχώματα του θαλάμου στα τεμαχίδια περλίτη. Σε αρκετές περιπτώσεις η θερμοκρασία του αέρα με τον οποίο τα τεμαχίδια είναι σε επαφή έχει θερμοκρασία μικρότερη από αυτά, γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αέρας σε αρκετές περιπτώσεις προκαλεί μείωση και όχι αύξηση της θερμοκρασίας των κόκκων λόγω της απαγωγής θερμότητας που επέρχεται.

- Η αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό του βαθμού διόγκωσης των τεμαχιδίων: α) λόγω της μείωσης που επιφέρει στην θερμοκρασία του αέρα εντός του θαλάμου και β) λόγω της αύξησης της ταχύτητας του αέρα και του κόκκου αντίστοιχα, με αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου παραμονής των τεμαχιδίων στην κάμινο. Αν και ο μέγιστος ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη σχετίζεται με την θερμοκρασία της καμίνου και την αρχική κοκκομετρία της πρώτης ύλης, εντούτοις ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα πρέπει να μην ξεπερνά τα  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , αφού αν και σε ορισμένες περιπτώσεις τα προϊόντα που προκύπτουν έχουν αυξημένο βαθμό διόγκωσης, εντούτοις η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος αυξάνει σημαντικά λόγω της μεγάλης ποσότητας ενέργειας που απομακρύνεται από τον θάλαμο διόγκωσης με την μορφή αισθητής θερμότητας του αέρα.
- Η προθέρμανση του τροφοδοτούμενου αέρα έχει ευεργετικά αποτελέσματα στην θέρμανση και διόγκωση του κόκκου και αποτελεί τον μόνο τρόπο εξασφάλισης παράλληλα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής ταχύτητας αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης.

Οι φυσικές ιδιότητες της πρώτης ύλης έχουν επίσης καθοριστική σημασία στην διόγκωση και η γνώση της επίδρασης αυτών οδηγεί στην σωστή ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου με απώτερο σκοπό την παραγωγή διογκωμένου περλίτη ικανοποιητικών χαρακτηριστικών. Σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες των πρώτων υλών φαίνεται ότι:

- Η κοκκομετρική κατανομή της πρώτης ύλης έχει ιδιαίτερη σημασία στη διόγκωση περλίτη με την νέα μέθοδο. Ο λόγος είναι η έντονη εξάρτηση της ταχύτητας πτώσης και της θέρμανσης των τεμαχιδίων από την μάζα και επιφάνεια τους. Η παρατήρηση αυτή έχει μεγάλη σημασία αφού αναδεικνύει το κοκκομετρικό εύρος της τροφοδοσίας του περλίτη ως μία σημαντική παράμετρο για την παραγωγή υψηλής ποιότητας διογκωμένου περλίτη που χαρακτηρίζεται από κοκκομετρική ομοιογένεια. Όπως φάνηκε από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, είναι δυνατή η κατεργασία δειγμάτων περλίτη με εύρος κοκκομετρίας  $150 \mu\text{m} - 250 \mu\text{m}$  ή  $250 \mu\text{m} - 350 \mu\text{m}$  για την παραγωγή διογκωμένων δειγμάτων με βαθμό διόγκωσης από  $E = 2$  έως  $E = 4$  υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας καμίνου και ρυθμού τροφοδοσίας αέρα, οι οποίες αναλύονται στην ενότητα 7.5.4.1. Με προθέρμανση του αέρα, φάνηκε επίσης ότι το εύρος κοκκομετρίας της πρώτης

ύλης μπορεί να διευρυνθεί περαιτέρω από 150  $\mu\text{m}$  έως 350  $\mu\text{m}$  και να παραχθεί διογκωμένος περλίτης με βαθμό διόγκωσης μεταξύ  $E=2$  και  $E=4$  και συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας της καμίνου που παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 7.5.4.2. Η κατεργασία των τεμαχιδίων των οποίων η αρχική διάμετρο είναι 450  $\mu\text{m}$  δεν φαίνεται να είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί επιτυχώς μαζί με πρώτη ύλη μικρότερης κοκκομετρίας.

- Η χημική σύσταση της πρώτης ύλης αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα στην διόγκωση, ενώ το νερό αναγνωρίζεται ως το σημαντικότερο «συστατικό» του περλίτη λόγω της έντονης επίδρασης που έχει στην κατεύθυνση μείωσης του ιξώδους του κόκκου. Κόκκοι με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό, όπως ο περλίτης που προέρχεται από το ορυχείο του Τράχηλα, διογκώνονται σε υψηλότερο βαθμό σε σύγκριση με κόκκους των οποίων η περιεκτικότητα σε νερό είναι μικρότερη, όπως περλίτης από το ορυχείο του Τσιγκράδου όταν κατεργάζονται υπό τις ίδιες συνθήκες. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται τόσο από τα πειράματα διόγκωσης στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο αλλά και από το μαθηματικό μοντέλου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό. Μάλιστα, η επίδραση του νερού στο ιξώδες υπερκαλύπτει την διαφορά στην χημική σύσταση των περλιτών Τσιγκράδου και Τράχηλα.

Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα όταν η θερμοκρασία του θαλάμου διόγκωσης δεν ξεπερνά τους 1000 °C. Στις περιπτώσεις που το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες καμίνου ο υπολογιζόμενος τελικός βαθμός διόγκωσης υπερεκτιμάται λόγω της αδυναμίας προσδιορισμού της επίδρασης των επικολλήσεων και της παραδοχής διατήρησης της μάζας όλου του νερού στον κόκκο. Στις περιπτώσεις αυτές όμως μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την μελέτη και πρόληψη της δημιουργίας επικολλήσεων στην εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου διόγκωσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 8.1. Γενικά συμπεράσματα

Βασικός στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη μίας νέας τεχνολογίας που θα επιτρέπει την παραγωγή λεπτομερών τεμαχιδίων διογκωμένου περλίτη με βελτιωμένες ιδιότητες και κυρίως μεγαλύτερη αντοχή και μικρότερο εξωτερικό πορώδες μέσω της καλύτερης ρύθμισης των συνθηκών υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα η διόγκωση. Προς αυτή την κατεύθυνση, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινος διόγκωσης, ενώ οι σημαντικότερες διαφορές της νέας τεχνολογίας σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διόγκωσης είναι:

- Η θέρμανση της καμίνου γίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις που περιβάλουν το τοίχωμα του κυλινδρικού θαλάμου διόγκωσης και όχι με φλόγα, οπότε εξασφαλίζεται καλύτερος έλεγχος της θερμοκρασίας στο θάλαμο διόγκωσης αλλά και ηπιότερες συνθήκες θέρμανσης της τροφοδοσίας. Επιπλέον, η ανεξάρτητη και ακριβής ρύθμιση τους επιτρέπει την εφαρμογή του επιθυμητού θερμοκρασιακού προφίλ κατά μήκος του θαλάμου.
- Ο περλίτης τροφοδοτείται από το άνω μέρος της καμίνου, κινείται καθοδικά καθ' όλη τη διάρκεια της κατεργασίας, ενώ απουσιάζουν θερμά ανοδικά ρεύματα και καπναέρια που θα περιέπλεκαν την κίνηση του.
- Ο χρόνος παραμονής του περλίτη εντός του θαλάμου διόγκωσης αλλά και η θερμοκρασία της καμίνου ελέγχεται με την διοχέτευση στην κάμινο αέρα, ο οποίος κινείται στη ίδια κατεύθυνση με τον περλίτη.
- Ο τροφοδοτούμενος περλίτης θερμαίνεται και διογκώνεται σταδιακά, με τη θερμότητα που εκπέμπεται από το θερμό τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης αλλά και με τη θερμική ενέργεια που λαμβάνει από τον αέρα και όχι με τροφοδοσία του απ' ευθείας στη φλόγα του καυστήρα
- Η τροφοδοσία του περλίτη πραγματοποιείται με περυγιοφόρο τροφοδότη που συνοδεύεται από σύστημα απομόνωσης του σιλό τροφοδοσίας της πρώτης ύλης και του εσωτερικού της καμίνου (σύστημα airlock).

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση της διόγκωσης περλίτη έγινε σαφές, ότι οι σημαντικότερες παράμετροι που επιδρούν την διόγκωση είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος θέρμανσης του κόκκου. Για τον λόγο αυτό, ο προσδιορισμός των συνθηκών που επικρατούν εντός του θαλάμου διόγκωσης αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα ζητούμενα στην παρούσα διδακτορική διατριβή καθώς επίσης και ο τρόπος που αυτές συσχετίζονται και επηρεάζονται από τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου.

Οι δύο αυτές παράμετροι επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του αέρα μέσα στο θάλαμο διόγκωσης. Λόγω αδυναμίας διεξαγωγής αξιόπιστων πειραματικών μετρήσεων των δύο αυτών σημαντικών μεγεθών εντός του πεδίου ροής για λόγους που αναλύονται στην διδακτορική διατριβή, αποφασίστηκε η διερεύνηση της κατανομής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του αέρα κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του θαλάμου μέσω προσομοίωσης της λειτουργίας της καμίνου με τη μέθοδο CFD. Μελετήθηκαν σενάρια ισοθερμοκρασιακής κατανομής αλλά και αύξουσας θερμοκρασίας της καμίνου, ενώ εξετάστηκε και η περίπτωση τροφοδοσίας προθερμασμένου αέρα στην κάμινο. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα της μελέτης αυτής είναι τα εξής:

- Το είδος ροής που επικρατεί εντός του θαλάμου διόγκωσης για το εύρος ρυθμού τροφοδοσίας αέρα  $50-200 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  είναι η στρωτή. Η φορά κίνησης του ρεύματος αέρα είναι καθοδική, ενώ μόνο πολύ κοντά στο τοίχωμα του θαλάμου διόγκωσης υπολογίζονται ανοδικά ρεύματα τα οποία όμως σε όλες τις περιπτώσεις έχουν ιδιαίτερα μικρότερη ταχύτητα σε σύγκριση με την ταχύτητα καθόδου του αέρα στον άξονα του θαλάμου. Η ένταση των ανοδικών ρευμάτων είναι μεγαλύτερη κοντά στην περιοχή εισόδου του αέρα ενώ η ταχύτητα τους μειώνεται σημαντικά όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , ενώ με περαιτέρω αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα επικρατεί ολοκληρωτικά η καθοδική κίνηση του αέρα. Γίνεται σαφές ότι η κίνηση των κόκκων είναι καθοδική υπό την επίδραση της βαρύτητας σε όλο το εύρος των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου που μελετήθηκαν.
- Η υψηλή ταχύτητα εισόδου του αέρα μέσω των ακροφυσίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περιδίνησης στην κεφαλή του θαλάμου και εμφάνιση αρνητικών ταχυτήτων που πιθανώς επηρεάζουν την κίνηση του περλίτη. Παρόλα αυτά, η επανακυκλοφορία του αέρα εντοπίζεται σε περιορισμένη έκταση γύρω από την κεφαλή, ενώ η εξάλειψη του φαινομένου θεωρείται βέβαιη αν αυξηθεί ο αριθμός των οπών εισόδου του αέρα ώστε να μειωθεί η ταχύτητα εισόδου του
- Η τροφοδοσία αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη παραβολικού θερμοκρασιακού προφίλ, σε όλο το μήκος του θαλάμου διόγκωσης,

εξασφαλίζοντας συνθήκες σταδιακά αυξανόμενης θερμοκρασίας του περλίτη κατά την κατεργασία του στον θάλαμο διόγκωσης. Η τροφοδοσία αέρα με ρυθμό μεγαλύτερο από  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  θα πρέπει να αποφεύγεται λόγω της σημαντικής μείωσης που προκαλεί στη θερμοκρασία του θαλάμου αλλά και λόγω των αυξημένων απωλειών θερμικής ενέργειας από την έξοδο του θαλάμου.

- Μόνο στην περίπτωση που ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα είναι  $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  και η κάμινο λειτουργεί σε ισοθερμοκρασιακή ρύθμιση δημιουργείται περιοχή -μειωμένης έκτασης- εντός του θαλάμου διόγκωσης όπου ο αέρας προσεγγίζει τη θερμοκρασία του τοιχώματος ( $T_{air} = T_w = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) σε όλη την διατομή του
- Η τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του και στην περίπτωση ισοθερμοκρασιακής λειτουργίας, τη δημιουργία περιοχής υψηλής θερμοκρασίας, που προσεγγίζει τη θερμοκρασία του τοιχώματος στο κατώτερο ήμισυ του θαλάμου διόγκωσης
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδο του από το θάλαμο διόγκωσης η απόκλιση των πειραματικών μετρήσεων από τις υπολογισμένες τιμές περιορίζεται σε ποσοστό μικρότερο του 16%.
- Η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης με θερμοστοιχείο εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα λόγω της θερμικής ακτινοβολίας που απορροφά, καθιστώντας όλες τις πειραματικές μετρήσεις αναξιόπιστες

Μετά τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής εντός του θαλάμου διόγκωσης και τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος σε αυτά, ακολούθησαν πειράματα διόγκωσης περλίτη στην νέα κάμινο αλλά και σε έμφλογη συμβατική κάμινο πιλοτικών επίσης διαστάσεων. Η αξιολόγηση έγινε με μέτρηση της φαινόμενης και πραγματικής πυκνότητας, της αντοχής σε συμπίεση στα 3cm, της υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητας, της κοκκομετρικής κατανομής, της απώλειας πύρωσης αλλά και μορφολογικά σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Στα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία διόγκωσης περλιτών συγκαταλέγονται τα εξής:

- Η διόγκωση περλίτη στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο μπορεί, μετά από κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της, να προσφέρει υψηλής ποιότητας διογκωμένα προϊόντα ανταγωνιστικά και σε αρκετές περιπτώσεις καλύτερα από τα αντίστοιχα συμβατικά.
- Στις σημαντικές ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών συγκαταλέγονται η φαινόμενη πυκνότητα, η έλαιο και ύδρο απορροφητικότητα και η αντοχή τους σε συμπίεση. Μετά από αξιολόγηση των ιδιοτήτων των διογκωμένων δειγμάτων παρατηρήθηκε

συσχετισμός μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας με τις υπόλοιπες ιδιότητες. Ο συσχετισμός είναι διαφορετικός, ανάλογα με την μέθοδο διόγκωσης που εφαρμόζεται και την προέλευση της πρώτης ύλης, ενώ προτείνεται ένας αριθμός εξισώσεων μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης των ιδιοτήτων των διογκωμένων περλιτών με ικανοποιητική ακρίβεια εισάγοντας μόνο την φαινόμενη πυκνότητα τους.

- Η αντοχή σε συμπίεση στα 3 cm των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο είναι μέχρι και 7 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα αντίστοιχης φαινόμενης πυκνότητας
- Η υδρο-απορροφητικότητα των δειγμάτων CH που διογκώθηκαν στην ηλεκτρική κάμινο παρουσιάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις μειωμένη μέχρι και 20% σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην έλαιο-απορροφητικότητα η οποία παρουσιάζει μείωση σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις η οποία φθάνει το 17% σε σύγκριση με την έλαιο- απορροφητικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων. Η διόγκωση του δείγματος TR στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο δεν επιφέρει ουσιαστική βελτίωση στην απορροφητικότητα των δειγμάτων σε νερό και έλαιο εκτός κάποιων εξαιρέσεων
- Η περιεκτικότητα των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων σε επαρκώς διογκωμένους κόκκους είναι σε αρκετές περιπτώσεις μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των δειγμάτων που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης
- Μορφολογικά, τα δείγματα που προέκυψαν από κατεργασία στην νέα κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης εμφανίζουν περισσότερους σφαιρικούς κόκκους και μειωμένο ανοιχτό επιφανειακό πορώδες ενώ έχουν σημαντική περιεκτικότητα σε τεμαχίδια περιορισμένου κοκκομετρικού εύρους, σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα τεμαχίδια
- Η απώλεια πύρωσης των συμβατικά διογκωμένων δειγμάτων παρουσιάζεται μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα διογκωμένα δείγματα της ηλεκτρικής καμίνου
- Όσον αφορά στη θερμοκρασία του θαλάμου πρέπει να ξεπεράσει τους 1000 °C για την παραγωγή επαρκώς διογκωμένων δειγμάτων περλίτη. Επιπλέον ο ρυθμός τροφοδοσίας του αέρα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 100 L·min<sup>-1</sup> ενώ μέχρι και τα 50 L·min<sup>-1</sup> δεν φαίνεται να επιδρά αρνητικά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διογκωμένου περλίτη.

Συγκρίνοντας τις ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH) και του Τράχηλα (TR), φάνηκαν τα εξής:

- Η διογκωσιμότητα του περλίτη TR είναι μεγαλύτερη από αυτή του περλίτη CH κυρίως λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας του δείγματος TR σε νερό και αλκάλια.
- Ο βέλτιστος συνδυασμός φαινόμενης πυκνότητας-πραγματικής πυκνότητας παρατηρείται σε δείγματα φαινόμενης πυκνότητας  $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  στους περλίτες TR, και σε δείγματα φαινόμενης πυκνότητας  $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  στους περλίτες CH.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο σκοπεύει στην προσομοίωση την διόγκωσης τεμαχιδίου περλίτη εντός του θαλάμου της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του κόκκου και του περιβάλλοντος της καμίνου καθώς επίσης η μεταβολή της πυκνότητας και του μεγέθους του συνθέτου πεπλεγμένο σύστημα αλληλεπίδρασης, ενώ η προσομοίωση της διεργασίας απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση των ισοζυγίων ορμής και ενέργειας του τεμαχιδίου και του αέρα αλλά και του μοντέλου προσομοίωσης της διόγκωσης του κόκκου. Επιπλέον, λόγω του σημαντικού εύρους θερμοκρασιών που συναντώνται στην κάμινο, το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις εξισώσεις υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του αέρα και περλίτη συναρτήσει της θερμοκρασίας τους.

Για την προσομοίωση της διόγκωσης του κόκκου αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο διόγκωσης, στο οποίο έγινε η εξής θεώρηση: στο κέντρο του κόκκου υπάρχει φυσαλίδα εντός της οποίας περιέχεται το επιδρών στην διόγκωση νερό, το ποσοστό του οποίου είναι το 60% της συνολικής περιεκτικότητας του αδιόγκωτου περλίτη σε νερό. Όπως συμβαίνει στην πράξη, έτσι και στο μαθηματικό μοντέλο, η διόγκωση του κόκκου πραγματοποιείται λόγω της ατμοποίησης του περιεχόμενου νερού και των πιέσεων που ασκούνται από αυτό εφόσον το ιξώδες του περλίτη έχει μειωθεί και η θερμοκρασία του έχει ξεπεράσει το σημείο μαλάκυνσης του. Το μαθηματικό μοντέλο προσφέρει την δυνατότητα διαμόρφωσης σεναρίων μεταβάλλοντας τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης αλλά και τις συνθήκες λειτουργίας της καμίνου διόγκωσης με τελικό σκοπό τη προσομοίωση της διεργασίας για διάφορες συνθήκες διόγκωσης και περλίτη διαφορετικής χημικής σύστασης. Τελικά προβλέπονται τα εξής

- η θερμοκρασιακή κατανομή και η κατανομή ταχύτητας του αέρα εντός του θαλάμου διόγκωσης, αλλά και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και των αδιάστατων όρων  $Re$ ,  $Nu$ ,  $NTU$  (Number of Transfer Units).
- η χωρική και χρονική μεταβολή των θερμοφυσικών ιδιοτήτων και καταστατικών χαρακτηριστικών του τεμαχιδίου αλλά και του μεγέθους του

Από την προσομοίωση της διόγκωσης περλίτη με το νέο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, φάνηκαν τα εξής:

- Το μαθηματικό μοντέλο επιτρέπει την μελέτη επίδρασης των συνθηκών διόγκωσης και των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης στη διόγκωση του κόκκου.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με το μαθηματικό μοντέλο όταν η θερμοκρασία της καμίνου είναι έως 1000 °C ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες καμίνου ο βαθμός διόγκωσης υπερεκτιμάται.
- Η πειραματική παρατήρηση της διόγκωσης των τεμαχιδίων του Τράχηλα σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τα τεμαχίδια του Τσιγκράδου, υπολογίζεται και από το μαθηματικό μοντέλο και οφείλεται στην διαφορετική περιεκτικότητα τους σε νερό και την επίδραση του στο ιξώδες του τεμαχιδίου. Η επίδραση του νερού υπερκαλύπτει την επίδραση της διαφορετικής χημικής σύστασης των δύο ποιοτήτων περλίτη.
- Η διόγκωση των λεπτόκοκκων τεμαχιδίων είναι ευκολότερη και συμβαίνει νωρίτερα σε σύγκριση με τα χονδρόκοκκα, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου παραμονής τους και της πιθανότητας προσκόλλησης τους στην επιφάνεια του θαλάμου εφόσον υπερθερμανθούν. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη ταχύτητα που αναπτύσσουν τα λεπτόκοκκα τεμαχίδια πριν τη διόγκωση, αλλά και στη μικρότερη μάζα τους που απαιτεί μικρότερα ποσά θερμικής ενέργειας για την ανύψωση της θερμοκρασίας του σε σύγκριση με τα πιο αδρόκοκκα.
- Η μεταβολή της ταχύτητας του κόκκου είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τη διάρκεια της διόγκωσης, λόγω της επίδρασης της πυκνότητας και της διαμέτρου του κόκκου στην οπισθέλκουσα δύναμη και την άνωση, και αυξάνει σημαντικά τον χρόνο παραμονής των τεμαχιδίων στην κάμινο διόγκωσης
- Είναι δυνατή η ταυτόχρονη κατεργασία περλίτη με εύρος κοκκομετρίας 150  $\mu\text{m}$  – 250  $\mu\text{m}$  αλλά και 250  $\mu\text{m}$  – 350  $\mu\text{m}$  για την παραγωγή διογκωμένου περλίτη μετά από κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της καμίνου που παρουσιάστηκαν στην διδακτορική διατριβή. Επιπλέον, η χρήση προθερμασμένου αέρα φάνηκε ότι μπορεί να οδηγήσει στην διεύρυνση του κοκκομετρικού εύρους της πρώτης ύλης και να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη κατεργασία δείγματος με κοκκομετρική κατανομή μεταξύ 150  $\mu\text{m}$  – 350  $\mu\text{m}$ , ενώ η στενή κοκκομετρική κατανομή των πιο χονδρόκοκκων δειγμάτων ( $D_{p,i} = 450 \mu\text{m}$ ) αποτελεί περιοριστικό παράγοντα.

## 8.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συνέβαλε στον κλάδο των βιομηχανικών ορυκτών αναπτύσσοντας μια εξολοκλήρου νέα μέθοδο διόγκωσης περλίτη η οποία χαρακτηρίζεται από την δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης των συνθηκών διόγκωσης με σκοπό την παραγωγή διογκωμένων μικροσφαιριδίων διογκωμένου περλίτη υψηλής ποιότητας. Η πειραματική έρευνα συμπληρώνεται από σημαντικό αριθμό πειραματικών δοκιμών διόγκωσης με τη συμβατική μέθοδο και σύγκριση των προϊόντων των δύο μεθόδων διόγκωσης που έδειξε ότι τα προϊόντα της κάθετης ηλεκτρικής καμίνου παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με τα συμβατικά διογκωμένα δείγματα όσον αφορά στη μορφολογία τους, τη μηχανική τους αντοχή και την υδρο- και έλαιο-απορροφητικότητα τους. Η εφαρμογή της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα, η οποία και αποτελεί το επόμενο βήμα εξέλιξης της διεργασίας, απαιτεί τη διερεύνηση των παρακάτω ζητημάτων:

- Οφείλει να μελετηθεί η ενεργειακή κατανάλωση της μεθόδου και να συγκριθεί με την κατανάλωση ενέργειας της συμβατικής έμφλογης μεθόδου διόγκωσης με σκοπό τη σύγκριση του κόστους παραγωγής στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθεί η ενεργειακή κατανάλωση των επιμέρους λειτουργικών συσκευών έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη ρύθμιση τους από την άποψη της οικονομικότητας της μεθόδου. Για παράδειγμα, πρέπει να μελετηθεί εάν θα συνέφερε η προσθήκη προθερμαντήρα αέρα ή ενεργειακά η θέρμανση της καμίνου είναι οικονομικότερη όταν πραγματοποιείται από τις θερμικές αντιστάσεις.
- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της καμίνου ώστε να αντιμετωπιστούν ζητήματα όπως οι επικολλήσεις που αντιμετωπίζονται ως ένα βαθμό από την χρήση δόνησης και την εμφύσηση αέρα από την κεφαλή του θαλάμου διόγκωσης. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις η παραγωγή διογκωμένου περλίτη δυσχεραίνεται σημαντικά λόγω αυτής της επιπλοκής και πρέπει να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικότερα.
- Η διαστασιολόγηση της καμίνου έχει ιδιαίτερη σημασία. Πρέπει λοιπόν να μελετηθούν τα βέλτιστα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά (μήκος και διάμετρος) έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση της και να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες. Μέσω μεταβολής του μήκους του θαλάμου φαίνεται δυνατή η επέκταση της χρήσης της νέας κάθετης ηλεκτρικής καμίνου διόγκωσης στην κατεργασία περλίτη μεγαλύτερης αρχικής κοκκομετρίας λόγω της αύξησης του χρόνου θέρμανσης του τεμαχιδίου. Επίσης, είναι πιθανόν η αύξηση της διαμέτρου του θαλάμου να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας της καμίνου. Όσον αφορά στην διάμετρο του θαλάμου όμως,

χρειάζεται να εξεταστεί η επίδραση που θα είχε αύξηση της στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του αέρα εντός αυτού. Είναι πιθανόν, αύξηση της διαμέτρου να οδηγήσει σε επέκταση της αντίθετης ανοδικής ροής αέρα από τα τοιχώματα του θαλάμου διόγκωσης προς το κέντρο του, συνθήκες οι οποίες είναι ανεπιθύμητες αφού με τον τρόπο αυτό στερείται η δυνατότητα ελέγχου των συνθηκών διόγκωσης. Παρότι, το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας του αέρα όπως φάνηκε και από την μελέτη CFD, αποτελεί περιοριστικό παράγοντα το γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό αυξάνουν οι ενεργειακές απώλειες της καμίνου.

- Η προσθήκη προθερμαντήρα αέρα στο διάγραμμα ροής της διεργασίας φαίνεται ότι προσφέρει ακόμα περισσότερες επιλογές από την άποψη των συνθηκών διόγκωσης αλλά η επίδραση του στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του διογκωμένου περλίτη οφείλει να εξεταστεί
- Θα ήταν επίσης ενδιαφέρουσα η μελέτη προθέρμανσης της πρώτης ύλης πριν το στάδιο της διόγκωσης έτσι ώστε να απομακρύνεται από την τροφοδοσία τόσο η υγρασία όσο και το χαλαρά συνδεδεμένο νερό το οποίο δεν προσφέρει τίποτα στη διόγκωση. Εξάλλου, η πρακτική αυτή ακολουθείται και σε ορισμένες συμβατικές καμίνους διόγκωσης όπως φάνηκε στη διδακτορική διατριβή και συντελεί στην εξοικονόμηση ενέργειας του συστήματος.

Όσον αφορά στο μαθηματικό μοντέλο διόγκωσης του κόκκου περλίτη που παρουσιάστηκε στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο τη διδακτορικής διατριβής, τα παρακάτω ζητήματα χρήζουν περαιτέρω έρευνας:

- Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της διόγκωσης του περλίτη αλλά και τα υπόλοιπα μοντέλα διόγκωσης περλίτη που συναντώνται στην βιβλιογραφία, δεν επιτρέπουν τη μεταφορά μάζας νερού από το τεμαχίδιο στο περιβάλλον. Κάτι τέτοιο εισάγει σφάλμα στους υπολογισμούς καθώς είναι βέβαιο ότι μέρος του νερού του κόκκου φεύγει από το τεμαχίδιο του περλίτη πριν ακόμα ξεκινήσει η διόγκωση ενώ ένα άλλο μέρος αυτού παραμένει στον κόκκο κατά την διάρκεια της διόγκωσης χωρίς να συμμετέχει στην διόγκωση. Θα είχε ενδιαφέρον ο ποσοτικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας του κόκκου σε επιδρών, παραμένων αλλά και ασθενώς συγκρατούμενο νερό που απομακρύνεται πριν την διόγκωση και στη συνέχεια η επίδραση των τριών αυτών ειδών νερού να ληφθεί υπόψη ξεχωριστά στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι το πρώτο που κάνει διάκριση του νερού σε παραμένων και επιδρών. Παρόλα αυτά, η διάκριση οφείλει να επεκταθεί και για το νερό που απομακρύνεται από τον κόκκο πριν από την διόγκωση. Η δομή του μαθηματικού μοντέλου επιτρέπει με ευκολία την εισαγωγή τέτοιων συνθηκών για την διακριτοποίηση του νερού. Ο ποσοτικός όμως ορισμός των



διαφόρων ομάδων οφείλει να γίνει μετά από κατάλληλες πειραματικές μετρήσεις και όχι με τον ορισμό αυθαίρετων ποσοτήτων.

- Θα ήταν ενδιαφέρουσα η πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής εντός του θαλάμου διόγκωσης στις 3 διαστάσεις και η σύζευξη του με το μοντέλο διόγκωσης για την προσομοίωση της τρισδιάστατης κίνησης του κόκκου. Κάτι τέτοιο δεν επετεύχθη διότι ήταν αδύνατη η εισαγωγή του μοντέλου διόγκωσης στο κώδικα που αναπτύχθηκε στο FLUENT λόγω της μεταβολής του μεγέθους και της πυκνότητας του κόκκου κατά μήκος της τροχιάς του κόκκου. Πραγματοποιήθηκε επίλυση του μοντέλου CFD και μελέτη κίνησης τεμαχιδίων περλίτη σταθερής όμως διαμέτρου και πυκνότητας με εφαρμογή του μοντέλου DPM (Discrete Phase Model) αλλά αποφασίστηκε τα αποτελέσματα της μελέτης να μην παρουσιαστούν. Θα ήταν ενδιαφέρουσα η διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξη μαθηματικών εντολών (UDF's- User Defined Functions) σε γλώσσα προγραμματισμού C έτσι ώστε να μπορέσει να εισαχθεί το μοντέλο διόγκωσης περλίτη που αναπτύχθηκε στον κώδικα του Fluent που περιγράφει το πεδίο ροής σε τρεις διαστάσεις έτσι ώστε να περιγραφεί η διόγκωση του κόκκου στις τρεις διαστάσεις

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Διεθνής βιβλιογραφία

Abalos, R., Erdmann, E., Destefanis, H. A. (2003) Surface Modification of volcanic glasses (perlites) by water vapor, *Latin American Applied Science*. Online access: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0327-07932003000100010](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932003000100010)

Acocella, J. , Tomozawa, M., Watson, E. B. (1984) The nature of dissolved water in sodium silicate glasses and its effect on various properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 65, p.p. 355-372.

Allen, M. J., (1992) The expanding perlite industry, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Industrial Minerals Congress*, Surrey, Serial publication, pp 51-56.

Amon, M. and Denson, M. (1984) A study of the dynamics of foam growth: analysis of the growth of closely spaced spherical bubbles, *Polymer Engineering Science*, 24, 1026-1034.

Angelopoulos, P. M., Gerogiorgis, D. I., Paspaliaris, I. (2012) Mathematical modeling and simulation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering*, Athens, 2, pp.331-338.

Angelopoulos, P.M., Kapralou, C., Taxiarchou, M. (2011) CFD modelling of vertical electrical furnace for perlite expansion-Study of the air temperature and velocity profiles, *Proceedings of the 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Athens, Greece.

Armstrong Company's Website (2012), Ultima® Ceiling Panels, <http://www.armstrong.com/pdbupimages/195433.pdf>

Austin, G. and Barker, J. M. (1994) Production and marketing of perlite in the western United States, *Proceedings of the 29<sup>st</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, California, pp. 39-67.

Azam, M. A. (1942) Oil absorption of pigments, industrial and engineering chemistry, analytical edition, IENNA, 14, pp. 545.

Barker, J. M. and Harris, M. J. (1990) Practices and problems of perlite expansion and testing at the New Mexico. Bureau of geology and mineral resources, Socorro, New Mexico, in *Industrial Rocks and Minerals of the Pacific Northwest*, Paper 23, pp. 63-68.

- Barnes, C. (1932) The entropy of steam and the water-gas reaction, *Journal of Physical Chemistry*, 36, pp. 1143-1151.
- Barnes, R. E. (1962) Perlite Industry, AIME Transactions (Mining), 223, pp. 180-183.
- Beudant, F.(1822) Voyage minéralogique et géologique en Hongrie, Paris.
- Blevins, L.G. and Pitts, W.M. (1999). Modeling of bare and aspirated thermocouples in compartment fires, *Fire Safety Journal*, 33, pp. 239-259.
- Bolen, W.P. (2011) *Minerals Yearbook: Perlite, Annual report of the United States Geological Survey*, United States Department of the Interior, September 2012. Online access: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/perlite/>.
- Breese, R.O.Y. and Barker, J.M. (1994) *Perlite in Industrial Minerals and Rocks*, 6th ed., Society of Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Littleton.
- Brohez, S., Delvosalle, C., Marlair, G. (2004), A two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires, *Fire Safety Journal*, 39, pp. 399-411.
- Caley, E.R. and Richards, J.F. (1956) Theophrastus On Stones: Greek text, English translation and commentary, The Ohio State University, Ohio.
- Chang, L.Y. (2002) *Industrial Mineralogy: Materials, Processing and Uses*, 1<sup>st</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey.
- Carvalho, J.A. and Dos Santos, W.F.N. (1990) Radiation errors in .temperature measurements with thermocouples in a cylindrical combustor. International Communication in Heat and Mass Transfer,17, pp. 663- 673.
- Cengel, Y. (2006) *Heat Transfer: A Practical Approach*, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw- Hill, New York.
- Chamberlin, R. M. and Barker, J. M. (1996) Genetic aspects of commercial perlite deposits in New Mexico, *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, Texas, pp. 171-186.
- Chatterjee, K.K. (2008), *Uses of Industrial Minerals, Rocks and Freshwater*. Nova Science Publishers, New York.
- Chorin, A. J. (1968) Numerical solution of Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation*, 22, pp.745-762.
- Dalakishvili, A. I. (2005) Glass formation in perlite- and obsidian-containing batches, *Glass Physics and Chemistry*, 31, pp. 820-822.

- Davies, T.W. (1988) Transient conduction in a sphere with counteracting radiative and convective heat transfer at the surface, *Applied Mathematical Modelling*, 12, pp. 429-433.
- De, D. S. (1981) Measurement of flame temperature with a multi-element thermocouple, *Journal of Energy Institute*, 54, pp. 113–116.
- Denton, J. S., Tuffen, H., Gilbert, J. S. Odling, N. (2009) The hydration and alteration of perlite and Rhyolite, *Journal of the Geological Society*, 166, pp. 895-904.
- Drysdale, D.T. Lacy, E.D. Tarney, J. (1963) Water minus in natural glass, *Analyst*, 88, pp. 131-133.
- ElsHEREEF, R., Vlachopoulos, J., Elkamel, A. (2010) Comparison and analysis of bubble growth and foam formation models, *Engineering Computations*. 27, pp. 387-408.
- Erickson, A. A., Ort, M. H., Carrasco-Nunez, G. (2011) Rhyolitic phreatomagmatism explored: Tepexitl tuff ring (Eastern Mexican Volcanic Belt), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, pp. 325-341.
- Esmark, J. (1798) *Kurze Beschreibung einer Mineralogischen Reise durch Ungarn, Siebenburgen und das Banat: Neves Berpann*, 2, Freyberg.
- Evans, A. M. (1993) *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*, 3<sup>rd</sup> ed., Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Fichtel, J. E. (1791) *Mineralogische Bemerkungen von der Karpathen: Wein*, (Mineralogical observations from the Carpathians) Vienna.
- Fluent Inc., *Fluent user's guide*, Lebanon, USA. (2003).
- Friedman, I., Long, W., Smith R.. (1963) Viscosity and water content of rhyolite glass. *Journal of Geophysical Research*. 68 (24), pp.6523-6535.
- Friedman, I., Smith, R. L., Long, W. D. (1966) Hydration of natural glass and formation of perlite. *Geological Society of American Bulletin*, 77, pp. 323-327.
- Fulcher, G.S. (1925) Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses. *Journal of the American Ceramic Society*. 8 (6), pp. 8339-355.
- Ghajar, A. J. and Tam, L. M. (1994) Heat Transfer Measurements and Correlations in the Transition Region for a Circular Tube with Three Different Inlet Configurations, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 8, pp 79-90.

- Giordano, D., Russell, J.K., Dingwell, D.B. (2008) Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth and Planetary Science Letters*. 271, pp. 123-134.
- Gnielinski, V. (1976) New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *International Chemical Engineering*, 16, pp. 359-368.
- Gordon, A. R. (1934) Calculation of thermodynamic quantities from spectroscopic data for polyatomic molecules; the free energy, entropy and heat capacity of steam, *Journal of Chemical Physics*, 2), pp. 65-72.
- Hausen, H. (1943) Darstellung des warmenüberganges in rohren durch verallgemeinerte potenzbeziehungen. *VDI Z Beihefte Verfahrenstechnik*.
- Harben, P. W. and Kuzvart, M. (1996) Industrial Minerals: A Global Geology, *Metal Bulletin*, Surrey.
- Heaney, P. J. and Veblen, D. R. (1991), Observation of the  $\alpha$ - $\beta$  phase transition in quartz: A review of the imaging and diffraction studies and some new results, *American Mineralogist*.76, pp. 1018-1032.
- Heide, K. and Heide, G. (2011) Vitreous state in nature-Origin and properties, *Chemie der Erde-Geochemistry*.71, pp. 305-335.
- Hill, N. R., *Production of Stabilized Wet Process Phosphoric Acid*. U.S. Patent 4.164.550, filed 1978, issued 1979.
- Ihinger, P. D., Zhang, Y., Stolper, E. M. (1999) The speciation of dissolved water in rhyolitic melt, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, pp. 3567-3578.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2006) *Fundamental of heat and mass transfer*, 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, New York.
- Jackson, J. D., Cotton, M. A., Axcell, B. P, (1989) Studies of mixed convection in vertical tubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 10 (1), pp. 2-15.
- Johannsen, A. (1939) *A Descriptive Petrography of Igneous Rocks*, 3<sup>rd</sup> vol., University of Chicago Press
- Judd, J. W. (1886) On marekanite and its allies, *Geological Magazine*, 3, pp. 241-248.
- Kadey, F. L. (1963) Petrographic Techniques in perlite evaluation, *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Transactions*, 222, p. 332-336.

- Karalis, T., Taxiarchou, M. (2006) Current applications and future trends of perlite worldwide, *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, (AMIREG)*. Hania, pp. 227-234.
- Kendall, T. (2000) No sign of bubble bursting: Perlite uses and markets, *Industrial Minerals*, pp.51-59.
- Kanthal Company's webpage (Accessed: 2013), [www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/tube/kanthal-apm/](http://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/tube/kanthal-apm/) .
- King, L. (2006) Lightweights fight it out, *Industrial Minerals*, pp.48-51
- King, E. G., Todd, S. S., Kelley, K.K. (1948) *Perlite thermal data and energy required for expansion*, United States Bureau of Mines,
- Klaproth, M. H. (1812-13) *Chemical Untersuchung des Marekanits*, Berlin Abhandl Physikal Klasse, pp. 49-58.
- Klipfel, A., Founti, M., Zahringer, K., Martin, J.P., Petit, J.P. (1998) Numerical simulation and experimental validation of the turbulent combustion and perlite expansion process in an industrial perlite expansion furnace. *Flow, Turbulence and Combustion*, 60, pp. 283- 300.
- Klipfel, A., Zahringer, K., Founti, M., Martin, J-P., Petit, J-P. (1997) Numerical simulation and experimental validation of the turbulent combustion and perlite expansion processes in an industrial perlite expansion furnace, *11<sup>th</sup> Symposium on the turbulent shear flows*, Grenoble.
- Koleske J. V. (2012) *Koleske paint and coating testing manual*, 14<sup>th</sup> ed. of the Gardner-Sward handbook, ASTM International
- Kucuk, A., (1999). *Structure and physicochemical properties of glasses and glass melts*. PhD Thesis, Alfred University, New York, USA.
- Kytola Company's webpage (Accessed 2013), [www.kytola.com](http://www.kytola.com), Flow Meters Specifications.
- Launder, B. E., Spalding, D. B. (1972), *Mathematical models of turbulence*, New York Academic press, London.
- Le Maitre, R. W. (2002) *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Recommendations of the International Union of Geological Science Subcommittee.
- Lehmann, H. and Rossler, M. (1974) A contributor to the nature of water binding in perlites, *Thermal Analysis*, 4<sup>th</sup> ICTA, proceedings 2, pp. 619-628.

- Lenhardt W. B. (1950) Processing perlite ore for expansion, *Rock products*, 53, pp. 98-100.
- Liang, S.F., and Zhu, C. (1998) *Principles of Gas - Solid Flows*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lienhard IV, J. and Lienhard V, J. (2003) *A Heat Transfer Textbook*, 3<sup>rd</sup> ed., Phlogiston press, Cambridge.
- Lorenz, W., and Muller, P. (1982) Perlite in El Salvador, Central America: Industrial rocks and minerals of the Southwest, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, New Mexico, pp. 103-107.
- Marshall. R. R. (1961) Devitrification of natural glass. *Geological Society of American Bulletin*, 72 (10), pp.1493-1520.
- McBirney, A.R. and Murase, T. (1984) Rheological properties of magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Science*. 12, pp. 337-357.
- Murase, T. and McBirney, A.R. (1973) Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures, *Geological Society of American Bulletin*, 84, pp. 3563- 3592.
- Naert, K. A. (1974) *Geology, Extrusive History and Analysis of Characteristics of Perlites from No Agua, New Mexico*, PhD Thesis, Pennsylvania State University.
- Nasedkin V. (1963) Water-bearing Acid Volcanic Glasses Genesis and Alteration, *Moscow Academic Scientific Publishing House*, pp. 196.
- Nasedkin V. and Panesh V.I. (1967) Hydroxyl and water in the same varieties of natural and artificial silicate glasses, *Vodnye Vulkanicheskie Stekla y Postvulkanicheskie Mineraly (Water-bearing Volcanic Glasses and Postvolcanic Minerals)*, *Moscow Nauka Publishing House*, pp. 26-55.
- Noetstaller, R. (1988) *Industrial Minerals: A Technical Review*, The World Bank, Washington.
- Papanastassiou, D.J. (1979) Perlite expansion in a vertical furnace - a simplified theoretical analysis. Perlite Institute, *Perlite Institute Annual Meeting*, Dubrovnik, pp.67-71.
- Pai, V., and Favelukis, M. (2002), Dynamics of Spherical Bubble Growth, *Journal of Cellular Plastics*, **38**, pp. 403-419.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B. (1972), A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp. 1787

- Patel, R.D. (1980) Bubble growth in a viscous Newtonian liquid. *Chemical Engineering Progress*, 35, pp. 2352-2356.
- Pavie, J. and Lambelin, J-P. (1999) Application of two-thermocouple probe technique in sooty fire environments. *Fire Safety Science, Proceedings of the 6th International Symposium*, Poitiers, pp. 1210
- Peppas, A., Taxiarchou, M., Koffa, E., Karalis, T., Amanatidis, A. (2006) Development of Closed Porous Microcellular Products from Perlite, AMIREG, Hania, pp. 235-241.
- Perlite Institute webpage (2011), Perlite-General Information, [http://www.perlite.org/library-perlite-info/PhysicalCharacteristics\\_Perlite.pdf](http://www.perlite.org/library-perlite-info/PhysicalCharacteristics_Perlite.pdf)
- Pitts, W. M., Braun, E., Peacock, R.D., Mitler, H. E., Johnsson, E. L., Reneke, P. A., Blevins, L. G. (1999) Temperature uncertainties for bare-bead and aspirated thermocouple measurements in fire environments. *Proceedings of the Joint meeting of Combustion Institute*, Washington DC, pp. 508-5011.
- Pitts, D. R. and Sissom, L. E. (1977) Schaum's outline of *Theory and Problems of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Proussevitch, A.A., Sahagian, D.L., Anderson, A.T. (1993) Dynamics of diffusive bubble growth in magmas: isothermal case. *Journal of Geophysical Research*, 98 (B12), pp. 22283- 22307.
- Proussevitch, A.A. and Sahagian, D.L. (1998) Dynamics and Energetics of bubble growth in magmas: Analytical formulation and numerical modeling, *Journal of Geophysical Research*, 103(B8), pp. 18223-18251
- Ranz, W.E. and Marshall, W.R. (1952a) Evaporation from drops, Part I, *Chemical Engineering Progress*, 48, pp. 141-146.
- Ranz, W.E. and Marshall, W.R. (1952b) Evaporation from drops, Part II, *Chemical Engineering Progress*, 48, pp.173-180.
- Robertson, R. H. S. (1963) Perlite' and Palygorskite in Theophrastus, *The Classical Review*, 13, pp. 132.
- Ross, C. S. and Smith, R. L. (1955) Water and other volatiles in volcanic glasses, *American Mineralogist*, 40, pp. 1071-1089.
- Rotella, M. and Simandl, G. (2001) Marilla perlite- volcanic glass occurrence, British Columbia, Canada, *Proceedings of the 37<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, Victoria, pp. 263-272.



- Roulia, M., Chassapis, K., Kapoutsis, J. A., Kamitsos, E. I., Savvidis, T. (2006) Influence of thermal treatment on the water release and the glassy structure of perlite, *Journal of Material Science*, 41(18), pp. 5870-5881.
- Scadron, M. D., Warshasky, I. (1952) Experimental determination of time constants and Nusselt numbers for bare-wire thermocouples in high-velocity air streams and analytical approximations of conduction and radiation errors, *NASA Scientific and Technical Information Program Office*, NACA Tech. Note 2599
- Schiller, L. and Nauman, A. (1933) Über die grundlegende Berechnung bei der Scwekraftaufbereitung, *Ver. Deutch Ing.* 44, pp. 318-320.
- Schundler Company's Website (2012), *Industrial Uses of Perlite and Vermiculite*, <http://www.schundler.com/indl.htm>
- Senergin, B. (1801) *Nova Acta Academiae Scientarum Imperialis Petropolitinae*, xii, p. 237.
- Shackley, D. (1988) *Characterization and Expansion of Perlite*, PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham.
- Shafi, M.A., Flumerfelt, R.W. (1997) Initial bubble growth in polymer foam processes, *Chemical Engineering Science*, 52 (4), 627-633.
- Shannon, K. S. and Butler, B. W. 2003. (2003) A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments, *2<sup>nd</sup> International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress and 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, Orlando, American Meteorological Society, Boston, MA. pp. 109, Online access: <http://ams.confex.com/ams/FI>.
- Sieder, N. E., Tate, G. E. (1936) Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes, *Industrial Engineering Chemistry*, 28, pp. 1429-1435.
- Siegel, R. and Howell J. R. (1992) *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3<sup>rd</sup> edition, Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC.
- Singh, M. and Garg, M. (1991) Perlite-based building materials-a review of current applications, *Construction and Building Materials*, 5 (2), pp. 75-81.
- Stolper, E. (1982) Water in silicate glasses: an infrared spectroscopic study, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81, pp. 1-17.
- Stieg, F. B. Jr (1956) Color and CPVC, *Official Digest, Federation of Paint and Varnish Production Clubs*, 38, p.695.

Sutherland, W. (1893) The viscosity of gases and molecular force, *Philosophical Magazine*, S 5, 36, pp. 507-531.

Tagawa M, Ohta Y. (1997) Two-thermocouple probe for fluctuating temperature measurement in combustion—rational estimation of mean and fluctuating time constants. *Combustion and Flame*, 106, pp. 549–560.

Vogel, D.H. (1921) Temperaturabhängigkeitsgesetz der viskosität von flüssigkeiten. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 22, pp. 645- 646.

Weber, R. H. and Austin, G. S. (1982) Perlite in New Mexico, *Industrial Minerals and Rocks of the Southwest, Proceedings of 17<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, New Mexico, pp. 97-101.

Whitson, D. N. (1982) Geology of the perlite deposit at No Agua Peaks, New Mexico, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals*, New Mexico pp.89-95.

Yoshino, H., Kamiya, K., Nasu, H. (1990) IR study on the structural evolution of sol-gel derived SiO<sub>2</sub> gels in the early stage of conversion to glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 126 (1-2), pp 68-78.

Zahringer, K. (1998) *Etude thermohydraulique du phénomène d'expansion de la perlite. Applications à un four industriel*, Ph.D. thesis. Ecole Centrale Paris, France.

Zahringer, K., Klipfel, A., Martin, J.-P., Petit, J.-P., Founti, M. (1997a) Experimental and computational investigation of vertical perlite expansion furnace, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, Porto.

Zahringer, K., Martin, J.-P., Petit, J.-P. (2001) Numerical simulation of bubble growth in expanding perlite. *Journal of Material Science*. 36, pp. 2691- 2705.

Zahringer, K., Petit, J.-P., Martin, J.-P., Klipfel, A., Founti, M. (1997b). Etude experimentale et modelisation numerique d'un four d'expansion pour des materiaux isolants d'origine minerale, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Congres Francais de Genie des Procedes*, Paris.

Ελληνική βιβλιογραφία

Αγγελόπουλος, Π.(2007) *Μελέτη νέων τεχνικών διόγκωσης περλίτη*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Παπαθεοδώρου, Α. Κ. (1991) *Συμβολή στην μελέτη διόγκωσης ηφαιστιτών*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική σχολή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Περράκη-Λοϊσίου, Θ. (2007) *Σημειώσεις στο μάθημα: Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα*, ΕΜΠ, Αθήνα.

Ρούλια, Μ. (1996) ,Περλίτης: ένα βιομηχανικό ορυκτό κάτω από το βλέμμα ενός χημικού, *Χημικά Χρονικά*, 5, σελ. 458-460.

Τσαγγάρης, Σ (1995), *Μηχανική των ρευστών*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.

Φιλιππίδης, Α. (1986) *Σημειώσεις κοιτασματολογίας, βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα*, Σχολή Θετικών Επιστημών, Α.Π.Θ.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

## ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

Στον παράρτημα αυτό παρατίθενται οι κοκκομετρικές αναλύσεις των αρχικών περλιτικών δειγμάτων από τα ορυχεία του Τσιγκράδου και του Τράχηλα καθώς επίσης και των παραγομένων κλασμάτων στενότερη κοκκομετρίας.

Πίνακας Ι.1: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού δείγματος περλίτη Τσιγκράδο (CH-I).

| Μέγεθος (μm) | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +707         | 0.19                   | 0.19                              | 99.81                            |
| -707+595     | 0.07                   | 0.26                              | 99.74                            |
| -595+500     | 0.11                   | 0.37                              | 99.63                            |
| -500+420     | 0.13                   | 0.50                              | 99.50                            |
| -420+297     | 4.38                   | 4.88                              | 95.12                            |
| -297+200     | 21.17                  | 26.05                             | 73.95                            |
| -200+100     | 41.92                  | 67.97                             | 32.03                            |
| -100+50      | 27.22                  | 95.20                             | 4.80                             |
| -50+30       | 3.67                   | 98.87                             | 1.13                             |
| -30+20       | 0.65                   | 99.51                             | 0.49                             |
| -20          | 0.49                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία   | 100                    |                                   |                                  |

Πίνακας Ι.2: Κοκκομετρική ανάλυση αρχικού δείγματος περλίτη Τράχηλα (TR-I).

| Μέγεθος (μm) | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +297         | 0.92                   | 0.92                              | 99.08                            |
| -297+200     | 32.65                  | 33.57                             | 66.43                            |
| -200+100     | 41.64                  | 75.21                             | 24.79                            |
| -100+50      | 21.92                  | 97.13                             | 2.87                             |
| -50+30       | 2.21                   | 99.34                             | 0.66                             |
| -30+20       | 0.34                   | 99.67                             | 0.33                             |
| -20          | 0.33                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία   | 100                    |                                   |                                  |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Πίνακας Ι.3: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-F

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +140.58        | 8.13                   | 8.13                              | 91.87                            |
| -140.58+103.58 | 19.17                  | 27.3                              | 72.7                             |
| -103.58+76.32  | 27.3                   | 54.6                              | 45.4                             |
| -76.32+56.23   | 22.41                  | 77.01                             | 22.99                            |
| -56.23+41.83   | 13.48                  | 90.49                             | 9.51                             |
| -41.83+30.53   | 7.38                   | 97.87                             | 2.13                             |
| -30.53+22.49   | 0.68                   | 98.55                             | 1.45                             |
| -22.49+16.57   | 0.43                   | 98.98                             | 1.02                             |
| -16.57+12.21   | 0.15                   | 99.13                             | 0.87                             |
| -12.21+9       | 0.22                   | 99.35                             | 0.65                             |
| -9+6.63        | 0.26                   | 99.61                             | 0.39                             |
| -6.63+4.88     | 0.22                   | 99.83                             | 0.17                             |
| -4.88          | 0.17                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

Πίνακας Ι.4: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-M

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| -351.46+258.95 | 1.98                   | 1.98                              | 98.02                            |
| -258.95+190.8  | 17.54                  | 19.52                             | 80.48                            |
| -190.8+140.58  | 37.25                  | 56.77                             | 43.23                            |
| -140.58+103.58 | 30.92                  | 87.69                             | 12.31                            |
| -103.58+76.32  | 9.97                   | 97.66                             | 2.34                             |
| -76.32+56.23   | 1.94                   | 99.6                              | 0.4                              |
| -56.23         | 0.40                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πίνακας I.5: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος CH-C

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +351.46        | 12.88                  | 12.88                             | 87.12                            |
| -351.46+258.95 | 34.83                  | 47.71                             | 52.29                            |
| -258.95+190.8  | 26.17                  | 73.88                             | 26.12                            |
| -190.8+140.58  | 14.29                  | 88.17                             | 11.83                            |
| -140.58+103.58 | 6.73                   | 94.9                              | 5.1                              |
| -103.58+76.32  | 2.42                   | 97.32                             | 2.68                             |
| -76.32+56.23   | 0.8                    | 98.12                             | 1.88                             |
| -56.23+41.83   | 0.71                   | 98.83                             | 1.17                             |
| -41.83+30.53   | 0.65                   | 99.48                             | 0.52                             |
| -30.53+22.49   | 0.35                   | 99.83                             | 0.17                             |
| -22.49         | 0.17                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

Πίνακας I.6: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-F.

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +190.8         | 1.5                    | 1.5                               | 98.5                             |
| -190.8+140.58  | 10.64                  | 12.14                             | 87.86                            |
| -140.58+103.58 | 21.39                  | 33.53                             | 66.47                            |
| -103.58+76.32  | 26.68                  | 60.21                             | 39.79                            |
| -76.32+56.23   | 20.55                  | 80.76                             | 19.24                            |
| -56.23+41.83   | 11.86                  | 92.62                             | 7.38                             |
| -41.83+30.53   | 4.84                   | 97.46                             | 2.54                             |
| -30.53+22.49   | 1.5                    | 98.96                             | 1.04                             |
| -22.49+16.57   | 0.25                   | 99.21                             | 0.79                             |
| -16.57+12.21   | 0.1                    | 99.31                             | 0.69                             |
| -12.21+9       | 0.18                   | 99.49                             | 0.51                             |
| -9+6.63        | 0.21                   | 99.7                              | 0.3                              |
| -6.63+4.88     | 0.18                   | 99.88                             | 0.12                             |
| -4.88          | 0.12                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Πίνακας Ι.7: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-M

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +258.95        | 3.34                   | 3.34                              | 96.66                            |
| -258.95+190.8  | 20.41                  | 23.75                             | 76.25                            |
| -190.8+140.58  | 37                     | 60.75                             | 39.25                            |
| -140.58+103.58 | 27.46                  | 88.21                             | 11.79                            |
| -103.58+76.32  | 9.59                   | 97.8                              | 2.2                              |
| -76.32+56.23   | 1.94                   | 99.74                             | 0.26                             |
| -56.23         | 0.29                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

Πίνακας Ι.8: Κοκκομετρική κατανομή κλάσματος TR-C

| Μέγεθος (μm)   | Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Παραμένοντος (%) | Αθροιστικό Βάρος Διερχομένου (%) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| +351.46        | 4.58                   | 4.58                              | 95.42                            |
| -351.46+258.95 | 22.82                  | 27.4                              | 72.6                             |
| -258.95+190.8  | 35.07                  | 62.47                             | 37.53                            |
| -190.8+140.58  | 25.03                  | 87.5                              | 12.5                             |
| -140.58+103.58 | 9.6                    | 97.1                              | 2.9                              |
| -103.58+76.32  | 2.46                   | 99.56                             | 0.44                             |
| -76.32         | 0.44                   |                                   |                                  |
| Τροφοδοσία     | 100                    |                                   |                                  |

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ**

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΩΝ ΠΕΡΛΙΤΩΝ

**ΙΙ.1. Εργαστηριακή μέτρηση της απορροφητικής ικανότητας δείγματος διογκωμένου περλίτη σε νερό**

Η μέθοδος σκοπεύει στον προσδιορισμό της μάζας νερού η οποία μπορεί να απορροφηθεί-κατακρατηθεί από διογκωμένο περλίτη δεδομένης μάζας. Εκφράζεται σε γραμμάρια αναρροφούμενου νερού από ένα γραμμάριο περλίτη και η μεθοδολογία αποτελεί εσωτερική οδηγία της εταιρίας S&B Industrial Minerals S.A.

Εξοπλισμός

- Ογκομετρικός κύλινδρος (διαμέτρου 50mm) και όγκου μεγαλύτερου από 500 mL με αφαιρούμενη βάση για την προσαρμογή διάτρητη βάση (κόσκινο 100 mesh).
- Στατήρας για τα κύλινδρο
- Γυάλινος ογκομετρικός κύλινδρος χωρητικότητας 1000 mL (με διαβάθμιση 10 mL).
- Ζυγός ακριβείας 0.1 g
- 3 ποτήρια ζέσης 250 mL
- Δείγμα διογκωμένου περλίτη όγκου 500 mL, περίπου.
- 250 mL απιονισμένο νερό
- Χρονόμετρο
- Χωνί

Περιγραφή μεθόδου

Από το προϊόν της διόγκωσης διαχωρίζεται με δειγματοληψία δείγμα διογκωμένου περλίτη όγκου 500 ml, περίπου. Το δείγμα εισάγεται στον κατάλληλα διαμορφωμένο ογκομετρικό κύλινδρο. Η ιδιοκατασκευή του κυλίνδρου περιλαμβάνει την αφαίρεση του κάτω τμήματος του και την αντικατάσταση του από ανθεκτικό υδροπερατό υλικό (φύλλο κοσκίνων) με μήκος βροχίδας 150μm (Mesh No. 100). Η αντικατάσταση του στεγανού πάτου από υδροπερατό υλικό πραγματοποιείται έτσι ώστε να επιτρέπεται η διέλευση του νερού μόνο και όχι των κόκκων. Ο κύλινδρος με τον περλίτη κρούεται κάθετα πάνω σε σταθερή επιφάνεια με αποτέλεσμα την συμπίεση του υλικού. Φροντίζεται μετά από 10 κρούσης ο όγκος του περλίτη να είναι περίπου 400



ml. Σε περίπτωση που κατά την διάρκεια των κρούσεων ο όγκος του περλίτη μειωθεί περαιτέρω των 400 ml συμπληρώνεται αντίστοιχη ποσότητα περλίτη έτσι ώστε να προσεγγίσει ο όγκος του τα 400 ml. Το βάρος του στεγνού δείγματος ζυγίζεται και σημειώνεται (A). Εν συνεχεία, ογκομετρώνται 250 ml νερού και εισάγονται στον ογκομετρικό κύλινδρο. Λαμβάνει χώρα φυσική εκροή μέρους του νερού από το κάτω τμήμα του κυλίνδρου μέσω του υδροπερατού πάτου. Σε χρονικά διαστήματα 3, 5, 7, 10 και 30 min ζυγίζεται αθροιστικά το βάρος του εκλυόμενου νερού. Για τον υπολογισμό της υδροαπορροφητικότητας λαμβάνεται υπόψη η τελευταία μέτρηση που εκφράζει την συνολική ποσότητα νερού που απομακρύνθηκε από τον περλίτη με το πέρας 30 min (B). Τελικά η απορροφητικότητα του δείγματος σε νερό βρίσκεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$w.a. \left[ \frac{gr.H_2O}{gr.perl} \right] = \frac{250 - B( gr )}{A( gr )}$$

## **II.2. Εργαστηριακή μέτρηση της απορροφητικής ικανότητας δείγματος διογκωμένου περλίτη σε έλαιο**

Η μέθοδος σκοπεύει στον προσδιορισμό της μάζας λινελαίου που μπορεί να απορροφηθεί από δεδομένη μάζα διογκωμένου περλίτη. Αποτελεί μέθοδο ASTM εν μέρει τροποποιημένη. (ASTM Standards (2002), Standard method for oil absorption of pigments by Gardner-Coleman Method, D1483-95)

### Εξοπλισμός

- Ζυγός με ακρίβεια 0.0001 g.
- Υάλινος ή πλαστικός περιέκτης (petri ή ύαλος ωρολογίου)
- Προχοΐδα με διαβάθμιση 0,1 mL
- Σπάτουλα ατσάλινη
- Λινέλαιο ακατέργαστο (που να τηρεί τις προδιαγραφές του D234-82 (1998) και να φέρει αριθμό οξύτητας  $3 \pm 1$ ).
- Δείγμα διογκωμένου περλίτη 0,75-1 g

### Περιγραφή μεθόδου

Διαχωρίζεται αντιπροσωπευτική ποσότητα διογκωμένου περλίτη μάζας 0.75 – 1 gr και μετά από ζύγισή της σε ζυγό ακριβείας εισάγεται στον περιέκτη (petri) ενώ το βάρος του δείγματος καταγράφεται (A). Στην συνέχεια πραγματοποιείται προσθήκη λινελαίου στάγδην από την προχοΐδα ενώ παράλληλα ο περλίτης και το λινέλαιο αναμιγνύονται με σπαθίδα. Η προσθήκη λινελαίου σταματά όταν δημιουργηθεί πηγμέντο (pigment) το οποίο οπτικά φαίνεται κορεσμένο σε έλαιο. Σημειώνεται ο όγκος του καταναλισκόμενου λινελαίου (B). Το ειδικό βάρος του λινελαίου

είναι  $0.91 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $\Gamma$ ). Τελικά η απορροφητικότητα του δείγματος σε έλαιο προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$o.a. \left[ \frac{gr.oil}{gr.perl} \right] = \frac{100 * B * \Gamma}{A}$$

### II.3. Μέθοδος προσδιορισμού αντοχής σε συμπίεση 3 cm σε διογκωμένο περλίτη

Η μέθοδος παρέχει με πληροφορίες σχετικά με την μηχανική αντοχή του διογκωμένου περλίτη και πιο συγκεκριμένα με την θλιπτική τάση που απαιτείται έτσι ώστε να συμπιεστεί το προς εξέταση δείγμα κατά 3 cm. Εκφράζεται σε psi και αποτελεί εσωτερική οδηγία της εταιρίας S&B Industrial Minerals S.A.

#### Εξοπλισμός

- 800 mL διογκωμένου περλίτη
- Συσκευή μέτρησης αντοχής σε συμπίεση αποτελούμενη από σύστημα χειροκίνητης υδραυλικής πρέσας και μανόμετρο

#### Περιγραφή μεθόδου

Η διάταξη περιλαμβάνει υδραυλική χειροκίνητη πρέσα με ενσωματωμένο μανόμετρο έτσι ώστε να είναι γνωστή η πίεση του υδραυλικού συστήματος και άρα και η πίεση που ασκεί ο γρύλος στο δείγμα. Διαχωρίζεται με δειγματοληψία 800 ml περίπου διογκωμένου περλίτη. 500 ml δείγματος εισάγονται στο ειδικό κυλινδρικό δοχείο γνωστής εσωτερικής διαμέτρου (A) το οποίο στην συνέχεια κρούεται κάθετα σε οριζόντια επιφάνεια (συνήθως πάτωμα ή πάγκος εργασίας) για 25 φορές. Η κρούση έχει ως αποτέλεσμα την πάκτωση του υλικού. Στην συνέχεια εφαρμόζεται στο δοχείο κατάλληλη προέκταση και προστίθενται το υπόλοιπο δείγμα περλίτη. Το δοχείο μαζί με την προέκταση που προστέθηκε κρούονται ακόμα 25 φορές κατά τον ίδιο τρόπο όπως πριν. Μετά τις επαναλαμβανόμενες κρούσεις αφαιρείται η προέκταση του δοχείου και απορρίπτεται ο περλίτης που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του δοχείου. Το δοχείο με το δείγμα τοποθετείται στον γρύλλο και χειροκίνητα μέσω εμβόλου γνωστής διαμέτρου (B) εφαρμόζεται πίεση στο δείγμα, το μέτρο της οποίας είναι γνωστό από την ένδειξη του μανομέτρου. Η επιφάνεια του δείγματος έρχεται σε επαφή με σταθερή επιφάνεια της διάταξης με αποτέλεσμα την συμπίεση του δείγματος. Όταν το δείγμα συμπιεστεί κατά 3 cm σημειώνεται η ένδειξη του μανομέτρου ( $\Gamma$ ). Τελικά η αντοχή του δείγματος σε συμπίεση στα 3 cm δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$c.s.[p.s.i] = \frac{\Gamma \cdot A}{B}$$

Ο λόγος επιφανείας δειγματοφορέα/εμβόλου της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής των δειγμάτων σε συμπίεση στα 3 cm έχει τιμή 9.71.

#### **Π.4. Μέτρηση της διογκωσιμότητας σε δείγμα διογκωμένου περλίτη (δοκιμή sinks-shattered-floaters)**

Η πραγματοποίηση της μέτρησης αποσκοπεί στον προσδιορισμό της κατά βάρος ή κατά όγκο σύστασης του προϊόντος που προέκυψε από την διόγκωση σε διογκωμένους, κατακερματισμένους ή ημι-διογκωμένους και αδιόγκωτους κόκκους. Αποτελεί εσωτερική οδηγία της εταιρίας S&B Industrial Minerals S.A.

##### Εξοπλισμός

- κώνος Imhoff
- 300 ml διογκωμένου περλίτη
- 1000 ml απιονισμένου νερού
- 20 σταγόνες κυανού της βρωμοθυμόλης
- βέργα

##### Περιγραφή μεθόδου

Αρχικά πραγματοποιείται δειγματοληψία για την συγκέντρωση περίπου 300ml διογκωμένου δείγματος. Το ακριβές βάρος (A) και όγκος (B) του δείγματος μετρώνται και καταγράφονται. Ογκομετρούνται 650 ml απιονισμένου νερού και εισάγονται σε κώνο Imhoff. Επιπλέον, στον κώνο προστίθενται 20 περίπου σταγόνες κυανού της βρωμοθυμόλης (bromothymol blue). Το δείγμα περλίτη εισάγεται στον κώνο και στην συνέχεια προστίθενται ακόμα 300 ml απιονισμένου νερού. Το μείγμα ανακατεύεται με την κυκλική κίνηση βέργας για 20 φορές έτσι ώστε να ομογενοποιηθεί. Πραγματοποιείται έκπλυση της βέργας και των εσωτερικών τοιχωμάτων του κώνου από προσκολλημένα τεμαχίδια τα οποία επανεισάγονται στον κώνο. Ο κώνος αφήνεται σε ηρεμία για 45 λεπτά και στην συνέχεια σημειώνεται ο όγκος των τεμαχιδίων που έχουν επικαθίσει (sinks- όγκος Γ), που αιωρούνται (shattered- όγκος Δ) και αυτών που επιπλέουν (floaters- όγκος Ε). Τα επιπλέοντα σωματίδια συλλέγονται με την χρήση κουτάλας και οδηγούνται προς ξήρανση. Η ξήρανση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία  $105\pm 3$  °C για 24 ώρες. Μετά την ξήρανση, το δείγμα ζυγίζεται και το βάρος του σημειώνεται (Ζ). Ο διαχωρισμός μεταξύ των βασιζομένων και των

αιωρούμενων σωματιδίων είναι αδύνατος λόγω των μη διακριτών ορίων τους. Τελικά η ποσοστιαία περιεκτικότητα του δείγματος στις τρεις ομάδες κόκκων πραγματοποιείται ως εξής:

$$\text{βυθιζόμενοι κόκκοι: } \text{sink}[\%v/v] = \frac{\Gamma}{B} \cdot 100$$

$$\text{αιωρούμενοι κόκκοι: } \text{shattered}[\%v/v] = \frac{\Delta}{B} \cdot 100$$

$$\text{επιπλέοντες κόκκοι: } \text{floaters}[\%v/v] = \frac{E}{B} \cdot 100$$

$$\text{επιπλέοντες κόκκοι: } \text{floaters}[\%w/w] = \frac{Z}{A} \cdot 100$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

### ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ

Πίνακας ΙΙΙ.1. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-I) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| CHI1              | 98.5                        | 1059                      | 1              | 4.67               | 94.33             | 81.93             | 4.2                               | 2.93                 | 61.4        | 1.28            |
| CHI2              | 180                         | 702                       | 2.29           | 3.43               | 94.28             | 78.9              | 1.8                               | 1.45                 | >95.0       | 1.3             |
| CHI3              | 126                         | 810                       | 1              | 4                  | 95                | 80.41             | 2.81                              | 2.11                 | 78.4        | 1.21            |
| CHI4              | 98.4                        | 902                       | 1.79           | 6.07               | 92.14             | 79.45             | 3.95                              | 2.75                 | 55.1        | 1.31            |
| CHI5              | 146                         | 730                       | 2.26           | 3.55               | 94.19             | 75.71             | 2.57                              | 1.7                  | 84.7        | 1.14            |
| CHI6              | 110                         | 786                       | 1.61           | 4.19               | 94.2              | 76.89             | 3.21                              | 2.15                 | 69.9        | 1.22            |
| CHI7              | 125                         | 688                       | 2.58           | 4.52               | 92.9              | 73.48             | 2.9                               | 2.34                 | 72.0        | 1.04            |
| CHI8              | 97.3                        | 1066                      | 1.38           | 4.48               | 94.14             | 81.33             | 4.05                              | 2.4                  | 60.0        | 0.93            |
| CHI9              | 95                          | 1095                      | 1.03           | 4.83               | 94.14             | 81.22             | 4                                 | 2.44                 | 61.4        | 0.99            |
| CHI10             | 95.1                        | 1105                      | 0.83           | 4.17               | 95                | 84.84             | 3.7                               | 2.6                  | 57.9        | 1.05            |
| CHI11             | 90.9                        | 1067                      | 1.25           | 4.38               | 94.37             | 83.13             | 3.8                               | 2.62                 | 58.3        | 0.9             |

l.b.d.= loose bulk density (φαινόμενη πυκνότητα ή βάρος μονάδας όγκου).

s.d. = skeletal density (πυκνότητα skeletal)

w.a. = water absorption (ύδρο- απορροφητικότητα)

o.a. = oil absorption (έλαιο-απορροφητικότητα)

c.s. = compression strength (αντοχή σε συμπίεση)

l.o.i.= Loss on ignition (απώλεια βάρους κατά την πύρωση στους 1050 °C)

Πίνακας III.2. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-F) στην κάθετη ηλεκτρική κάμμο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | s.d. kg/m <sup>3</sup> | Sinks % v/v | Shattered % v/v | Floaters % v/v | Floaters % w/w | w.a. g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a. g oil/g perl | c.s. psi | L.o.I. % w/w |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| CHF1              | 113.5                    | 1198                   | 0.59        | 1.03            | 98.38          | 93.19          | 3.12                           | 2.09              | 72.0     | 1.20         |
| CHF2              | 140                      | 541                    | 0.65        | 1.61            | 97.74          | 88.21          | 2.42                           | 1.79              | >95.0    | 1.01         |
| CHF3              | 111.1                    | 1337                   | 0.5         | 0.83            | 98.67          | 93.02          | 3.35                           | 2.24              | 70.0     | 1.09         |

Πίνακας III.3. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος μέσης κοκκομετρίας περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην κάθετη ηλεκτρική κάμμο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | s.d. kg/m <sup>3</sup> | Sinks % v/v | Shattered % v/v | Floaters % v/v | Floaters % w/w | w.a. g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a. g oil/g perl | c.s. psi | L.o.I. % w/w |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| CHM1              | 256                      | 625                    | 7           | 0               | 93             | 78.25          | 1.43                           | 1.18              | >95.0    | 1.39         |
| CHM2              | 146.5                    | 438                    | 3.22        | 2.14            | 96.64          | 81.74          | 2.39                           | 1.7               | >95.0    | 1            |
| CHM3              | 84.1                     | 706                    | 1.51        | 4.55            | 93.94          | 84.04          | 4.36                           | 3.29              | 64.6     | 1.08         |
| CHM4              | 68.6                     | 837                    | 1.4         | 8.91            | 89.69          | 72.26          | 5.9                            | 3.35              | 35.0     | 0.76         |
| CHM5              | 80.7                     | 830                    | 2.33        | 7               | 90.7           | 74.29          | 5.37                           | 3.1               | 36.4     | 0.53         |
| CHM6              | 121.7                    | 623                    | 1.43        | 0.97            | 97.6           | 85.44          | 3.09                           | 2.27              | 74.2     | 1.11         |
| CHM7              | 88.8                     | 1068                   | 1.3         | 2.7             | 96             | 83.43          | 4.09                           | 2.67              | 44.5     | 1.12         |
| CHM8              | 76.1                     | 1255                   | 1.33        | 3.33            | 95.33          | 84.09          | 4.72                           | 3.41              | 42.4     | 1.19         |
| CHM9              | 108.1                    | 720                    | 2           | 3.3             | 94.7           | 85.62          | 3.99                           | 2.41              | 63.6     | 1.25         |
| CHM10             | 85.8                     | 834                    | 1.25        | 4.1             | 94.7           | 81.43          | 4.14                           | 2.87              | 53.0     | 0.67         |
| CHM11             | 78.2                     | 858                    | 1.17        | 7.17            | 91.7           | 77.07          | 5.64                           | 3.39              | 36.4     | 0.57         |
| CHM12             | 74.3                     | 1095                   | 1.18        | 12.94           | 85.88          | 66.52          | 5.44                           | 3.65              | 36.0     | 0.49         |
| CHM13             | 89.7                     | 1044                   | 1.25        | 3.75            | 95             | 87.56          | 4.09                           | 2.87              | 57.2     | 1.19         |
| CHM14             | 95.9                     | 640                    | 1.5         | 2.83            | 95.67          | 85.89          | 3.85                           | 3.24              | 57.2     | 1.24         |
| CHM15             | 255                      | 703                    | 15.3        | 4               | 80.67          | 44.7           | 1.37                           | 1.08              | >95.0    | 2.01         |
| CHM16             | 86.9                     | 804                    | 1.93        | 11.94           | 86.13          | 60.84          | 4.11                           | 2.71              | 44.5     | 1.61         |
| CHM17             | 89.4                     | 818                    | 1.5         | 4.5             | 94             | 83.15          | 4.28                           | 3.52              | 56.2     | 1.42         |
| CHM18             | 87.2                     | 878                    | 1.67        | 3.33            | 95             | 83.79          | 4.35                           | 3.01              | 48.7     | 1.18         |

Πίνακας III.4. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-C) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| CHC1              | 86.14                       | 1214                      | 2              | 4.33               | 93.67             | 74.09             | 4.29                              | 2.67                 | 38.1        | 1.12            |
| CHC2              | 86.65                       | 1036                      | 2.26           | 6.45               | 91.29             | 72.58             | 4.41                              | 2.99                 | 40.6        | 1.19            |
| CHC3              | 218.8                       | 714                       | 10.35          | 3.79               | 85.86             | 57.65             | 1.65                              | 1.36                 | >95.0       | 1.31            |
| CHC4              | 91.8                        | 756                       | 2.06           | 5.59               | 92.35             | 73.29             | 4                                 | 3.26                 | 45.6        | 1.11            |
| CHC5              | 140.7                       | 776                       | 6.45           | 3.87               | 89.68             | 64.11             | 2.65                              | 2.05                 | 70.0        | 0.93            |

Πίνακας III.5. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-I) στην κάθετη ηλεκτρική κάμνο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| TRI1              | 290.9                       | 659                       | -              | -                  | 94.83             | -                 | 0.42                              | 1.24                 | >95         | 1.53            |
| TRI2              | 172.7                       | 390                       | 4.8            | 0.04               | 95.16             | 79.4              | 1.98                              | 1.83                 | >95         | 1.47            |
| TRI3              | 132                         | 338                       | 1.55           | 5.08               | 93.4              | 74.3              | 2.71                              | 2.69                 | 90          | 1.49            |
| TRI4              | 85                          | 452                       | 1.04           | 8.96               | 90                | 68.7              | 4.54                              | 4.57                 | 57.2        | 1.61            |
| TRI5              | 71.21                       | 683                       | 0.78           | 14.52              | 84.7              | 65.3              | 5.35                              | 4.61                 | 45.6        | 1.63            |
| TRI6              | 59.2                        | 711                       | 0.61           | 16.09              | 83.3              | 62.2              | 7.05                              | 5.49                 | 28.4        | 1.83            |
| TRI7              | 60.5                        | 709                       | 0.82           | 15.48              | 83.7              | 69                | 6.68                              | 5.18                 | 29.7        | 1.72            |
| TRI8              | 49                          | 1194                      | 0.42           | 14.98              | 84.6              | 60.4              | 7.29                              | 6.23                 | 14.8        | 1.67            |
| TRI9              | 47.9                        | 1241                      | 0.52           | 30.52              | 67.86             | 51                | 8.17                              | 5.67                 | 10.6        | 1.78            |
| TRI10             | 99.9                        | 415                       | 0.97           | 10.65              | 88.39             | 81.1              | 4.11                              | 2.61                 | 53          | 1.21            |
| TRI11             | 70                          | 1026                      | 1.02           | 18.98              | 80                | 74.59             | 5.59                              | 4.05                 | 36          | 1.5             |
| TRI12             | 52.9                        | 1460                      | 0.31           | 30.94              | 68.75             | 51.76             | 7.49                              | 4.41                 | 12.7        | 1.42            |
| TRI13             | 58.7                        | 847                       | 0.64           | 17.36              | 82                | 58.3              | 6.39                              | 5.3                  | 26.5        | 1.63            |
| TRI14             | 58.8                        | 1414                      | 0.81           | 29.51              | 69.68             | 60.17             | 7.09                              | 4.7                  | 22.2        | 1.55            |
| TRI15             | 98.8                        | 458                       | 0.97           | 12.33              | 86.7              | 70                | 3.81                              | 3.31                 | 65.7        | 1.55            |
| TRI16             | 44                          | 1079                      | 0.52           | 21.55              | 77.93             | 68.66             | 9.32                              | 5.61                 | 16.9        | 1.64            |
| TRI17             | 87                          | 415                       | 0.94           | 11.56              | 87.5              | 83.09             | 4.58                              | 2.65                 | 41.7        | 1.15            |
| TRI18             | 62.1                        | 914                       | 0.78           | 17.34              | 81.88             | 78.29             | 6.84                              | 4.01                 | 30.7        | 0.81            |
| TRI19             | 61.1                        | 452                       | 1              | 13.67              | 85.33             | 79.5              | 6.89                              | 4.17                 | 33.2        | 1.22            |
| TRI20             | 93.8                        | 754                       | 0.97           | 13.17              | 85.8              | 65.43             | 4.11                              | 3.78                 | 46.6        | 1.96            |
| TRI21             | 112.3                       | 714                       | 1.62           | 14.63              | 83.75             | 58.7              | 3.69                              | 3.1                  | 44.5        | 1.87            |



Πίνακας III.6. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| TRF1              | 64.9                        | 831                       | 0.97           | 4.19               | 94.84             | 87.88             | 6                                 | 2.94                 | 33          | 1.15            |
| TRF2              | 114.5                       | 383                       | 1.55           | 1.55               | 96.9              | 89.02             | 3.02                              | 1.74                 | 92.7        | 0.81            |
| TRF3              | 96.6                        | 633                       | 1.38           | 3.1                | 95.52             | 87.97             | 3.8                               | 2.23                 | 65.4        | 0.98            |

Πίνακας III.7. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος μέσης κοκκομετρίας περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-M) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| TRM1              | 57.3                        | 935                       | 0.81           | 22.42              | 76.77             | 57.05             | 8.18                              | 4.44                 | 20.6        | 1.1             |
| TRM2              | 41.2                        | 959                       | 0.52           | 21.55              | 77.93             | 67.76             | 10.78                             | 5.14                 | 20.6        | 0.77            |
| TRM3              | 75.3                        | 396                       | 0.83           | 13.17              | 86                | 80.51             | 5.43                              | 3.94                 | 33.9        | 0.97            |
| TRM4              | 58.1                        | 635                       | 0.5            | 18.17              | 81.33             | 73.31             | 7.63                              | 3.66                 | 24.7        | 1.32            |

Πίνακας III.8. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-C) στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| TRC1              | 37.7                        | 1018                      | 0.5            | 28.17              | 71.33             | 54.82             | 12.81                             | 6.14                 | 4.6         | 0.75            |
| TRC2              | 108.1                       | 574                       | 2.26           | 23.55              | 74.19             | 62.8              | 4.09                              | 2.32                 | 92.7        | 1.06            |
| TRC3              | 56.2                        | 719                       | 0.69           | 22.07              | 77.24             | 64.08             | 8.73                              | 4.52                 | 11          | 0.94            |

Πίνακας III.9. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-I) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | s.d. kg/m <sup>3</sup> | Sinks % v/v | Shattered % v/v | Floaters % v/v | Floaters % w/w | w.a. g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a. g oil/g perl | c.s. psi | L.o.I. % w/w |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| Conv-CHI-A        | 90.75                    | 517                    | 1.75        | 2.32            | 95.95          | 79.92          | 4.26                           | 3.33              | 44.5     | 1.53         |
| Conv-CHI-B        | 119.2                    | 455                    | 1.87        | 2.95            | 95.18          | 76.96          | 2.89                           | 2.08              | 61.4     | 1.7          |
| Conv-CHI-C        | 149.7                    | 470                    | 4.45        | 3.33            | 92.22          | 62.43          | 2.29                           | 1.58              | 64.27    | 1.7          |

Πίνακας III.10. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | s.d. kg/m <sup>3</sup> | Sinks % v/v | Shattered % v/v | Floaters % v/v | Floaters % w/w | w.a. g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a. g oil/g perl | c.s. psi | L.o.I. % w/w |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| Conv-CHF-A        | 92.53                    | 423                    | 0.78        | 3.38            | 95.84          | 70.71          | 4                              | 2.91              | 40.3     | 1.73         |
| Conv-CHF-B        | 115.7                    | 536                    | 1.04        | 4.15            | 94.81          | 68.91          | 3.28                           | 2.19              | 41.3     | 1.71         |
| Conv-CHF-C        | 144.5                    | 505                    | 3           | 4.89            | 92.11          | 58.08          | 2.18                           | 1.67              | 45.2     | 1.69         |

Πίνακας III.11. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του δείγματος περλίτη μέσης κοκκομετρίας από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | s.d. kg/m <sup>3</sup> | Sinks % v/v | Shattered % v/v | Floaters % v/v | Floaters % w/w | w.a. g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a. g oil/g perl | c.s. psi | L.o.I. % w/w |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| Conv-CHM-A        | 67.9                     | 503                    | 1.99        | 1.07            | 96.94          | 78.05          | 6.29                           | 4.05              | 26.8     | 1.58         |
| Conv-CHM-B        | 87.5                     | 563                    | 3.35        | 1.55            | 95.1           | 68.95          | 4.27                           | 2.89              | 29.3     | 1.78         |
| Conv-CHM-C        | 113.6                    | 527                    | 0.51        | 4.78            | 94.71          | 75.93          | 3.28                           | 2.7               | 53.0     | 1.64         |
| Conv-CHM-D        | 143.7                    | 493                    | 0.78        | 7.58            | 91.64          | 63.59          | 2.99                           | 1.81              | 58.1     | 1.73         |

Πίνακας III.12. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου (CH-C) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Conv-CHC-A        | 63.7                        | 510                       | 1.71           | 2.03               | 96.26             | 76.78             | 6.1                               | 4.34                 | 20.1        | 1.45            |
| Conv-CHC-B        | 90.14                       | 439                       | 2.23           | 1.56               | 96.21             | 75.4              | 3.91                              | 3.02                 | 31.1        | 1.45            |
| Conv-CHC-C        | 116.8                       | 485                       | 4.38           | 2.59               | 93.03             | 67.87             | 3.08                              | 2.08                 | 45.90       | 1.34            |
| Conv-CHC-D        | 140.8                       | 483                       | 5.06           | 1.61               | 93.33             | 68.7              | 2.31                              | 1.77                 | 63.56       | 1.42            |

Πίνακας III.13. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του αρχικού δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-I) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Conv-TRI-A        | 47.6                        | 419                       | 0.99           | 4.18               | 94.83             | 83.95             | 7.27                              | 4.38                 | 8.2         | 1.44            |
| Conv-TRI-B        | 72.7                        | 464                       | 2.61           | 5.97               | 91.42             | 63.25             | 4.83                              | 3.26                 | 18.5        | 1.91            |
| Conv-TRI-C        | 101.8                       | 366                       | 3.37           | 6.07               | 90.56             | 61.04             | 3.41                              | 2.2                  | 20.8        | 1.81            |
| Conv-TRI-D        | 124.9                       | 440                       | 3.45           | 8.05               | 88.5              | 55.89             | 2.58                              | 2.02                 | 35.7        | 1.75            |

Πίνακας III.14. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του λεπτόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-F) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Conv-TRF-A        | 59.8                        | 487                       | 1.88           | 0.94               | 97.19             | 72.74             | 6.12                              | 3.48                 | 9.3         | 1.63            |
| Conv-TRF-B        | 80.2                        | 467                       | 2.58           | 1.61               | 95.81             | 68.63             | 4.2                               | 2.74                 | 11.7        | 1.71            |
| Conv-TRF-C        | 115.7                       | 520                       | 3.33           | 3.67               | 93                | 62.56             | 3.35                              | 2.06                 | 21.3        | 1.63            |

Πίνακας III.15. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία δείγματος περλίτη μέσης κοκκομετρίας από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-M) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Conv-TRM-A        | 37.22                       | 319                       | 0.52           | 4.65               | 94.83             | 88.15             | 10.24                             | 5.08                 | 3.1         | 1.83            |
| Conv-TRM-B        | 57.21                       | 482                       | 2              | 4.67               | 93.33             | 70.51             | 6.57                              | 2.53                 | 8.2         | 1.93            |
| Conv-TRM-C        | 87.1                        | 594                       | 4.52           | 3.55               | 91.94             | 51.93             | 4.5                               | 2.24                 | 11.7        | 2.21            |

Πίνακας III.16. Οι ιδιότητες των διογκωμένων περλιτών που προέκυψαν από κατεργασία του χονδρόκοκκου δείγματος περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα (TR-C) στην έμφλογη συμβατική κάμινο.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | s.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | Sinks<br>% v/v | Shattered<br>% v/v | Floaters<br>% v/v | Floaters<br>% w/w | w.a.<br>g H <sub>2</sub> O/g perl | o.a.<br>g oil/g perl | c.s.<br>psi | L.o.I.<br>% w/w |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| Conv-TRC-A        | 38.7                        | 509                       | 0.61           | 6.06               | 93.33             | 84.28             | 11.8                              | 6.63                 | 5.8         | 1.98            |
| Conv-TRC-B        | 55.7                        | 416                       | 3.1            | 6.55               | 90.35             | 65.61             | 7.1                               | 4.04                 | 4.5         | 1.9             |
| Conv-TRC-C        | 115.7                       | 458                       | 6.45           | 7.1                | 86.45             | 60.43             | 3.67                              | 2.36                 | 29.5        | 1.93            |

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πίνακας III.17. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διάγκωσης.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d.<br>kg/m <sup>3</sup> | d10<br>(μm) | d50<br>(μm) | d90<br>(μm) | d99<br>(μm) |
|-------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CHI1              | 98.5                        | 92          | 377         | 627         | 886         |
| CHI2              | 180                         | 251         | 462         | 600         | 693         |
| CHI3              | 126                         | 180         | 416         | 592         | 817         |
| CHI4              | 98.4                        | 93          | 352         | 632         | 819         |
| CHI5              | 146                         | 176         | 440         | 605         | 816         |
| CHI6              | 110                         | 108         | 269         | 521         | 788         |
| CHI7              | 125                         | 108         | 269         | 521         | 788         |
| CHI8              | 97.3                        | 117         | 390         | 625         | 966         |
| CHI9              | 95                          | 107         | 313         | 592         | 809         |
| CHI10             | 95.1                        | 105         | 313         | 593         | 867         |
| CHI11             | 90.9                        | 118         | 339         | 598         | 871         |
| CHF1              | 113.5                       | 82          | 177         | 358         | 487         |
| CHF2              | 140                         | 116         | 253         | 372         | 423         |
| CHF3              | 111.1                       | 80          | 182         | 390         | 478         |
| CHM1              | 256                         | 174         | 261         | 375         | 422         |
| CHM2              | 146.5                       | 148         | 356         | 460         | 498         |
| CHM3              | 84.1                        | 125         | 413         | 540         | 622         |
| CHM4              | 68.6                        | 42          | 259         | 494         | 632         |
| CHM5              | 80.7                        | 53          | 322         | 559         | 681         |
| CHM6              | 121.7                       | 136         | 368         | 543         | 621         |
| CHM7              | 88.8                        | 104         | 381         | 582         | 673         |
| CHM8              | 76.1                        | 121         | 428         | 605         | 661         |
| CHM9              | 108.1                       | 103         | 398         | 591         | 626         |
| CHM10             | 85.8                        | 117         | 390         | 625         | 966         |
| CHM11             | 78.2                        | 65          | 374         | 579         | 683         |
| CHM12             | 74.3                        | 209         | 588         | 728         | 839         |
| CHM13             | 89.7                        | 82          | 337         | 497         | 616         |
| CHM14             | 95.9                        | 114         | 357         | 498         | 616         |
| CHM15             | 255                         | 120         | 233         | 390         | 516         |
| CHM16             | 86.9                        | 65          | 264         | 559         | 669         |
| CHM18             | 87.2                        | 126         | 384         | 602         | 708         |
| CHC1              | 86.14                       | 164         | 519         | 815         | 1032        |
| CHC2              | 86.65                       | 197         | 520         | 784         | 972         |
| CHC3              | 218.8                       | 207         | 379         | 564         | 699         |
| CHC4              | 91.8                        | 171         | 509         | 764         | 938         |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Πίνακας ΙΙΙ.18. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διάγκωσης.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | d10 (μm) | d50 (μm) | d90 (μm) | d99 (μm) |
|-------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| TRI9              | 47.9                     | 487      | 684      | 843      | 986      |
| TRI10             | 99.9                     | 82       | 301      | 540      | 712      |
| TRI11             | 70                       | 74       | 322      | 557      | 802      |
| TRI12             | 52.9                     | 533      | 689      | 822      | 937      |
| TRI14             | 58.8                     | 97       | 393      | 540      | 773      |
| TRI16             | 44                       | 101      | 392      | 591      | 826      |
| TRI17             | 87                       | 89       | 337      | 531      | 729      |
| TRI18             | 62.1                     | 98       | 374      | 565      | 798      |
| TRI19             | 61.1                     | 104      | 374      | 575      | 797      |
| TRF1              | 64.9                     | 150      | 426      | 568      | 674      |
| TRF2              | 114.5                    | 73       | 283      | 410      | 496      |
| TRF3              | 96.6                     | 81       | 297      | 431      | 556      |
| TRM1              | 57.3                     | 275      | 518      | 649      | 807      |
| TRM2              | 41.2                     | 263      | 500      | 619      | 783      |
| TRM3              | 75.3                     | 116      | 391      | 550      | 658      |
| TRM4              | 58.1                     | 129      | 433      | 594      | 700      |
| TRC1              | 37.7                     | 217      | 551      | 706      | 882      |
| TRC2              | 108.1                    | 116      | 374      | 550      | 765      |
| TRC3              | 56.2                     | 126      | 405      | 617      | 849      |

Πίνακας ΙΙΙ.19. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τσιγκράδου στην συμβατική έμφλογη κάμινο διάγκωσης.

| Κωδικός δείγματος | l.b.d. kg/m <sup>3</sup> | d10 (μm) | d50 (μm) | d90 (μm) | d99 (μm) |
|-------------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Conv-CHI-A        | 90.75                    | 102      | 362      | 651      | 531      |
| Conv-CHI-B        | 119.2                    | 106      | 297      | 563      | 705      |
| Conv-CHI-C        | 149.7                    | 140      | 264      | 461      | 615      |
| Conv-CHF-A        | 92.53                    | 87       | 170      | 414      | 565      |
| Conv-CHF-B        | 115.7                    | 95       | 245      | 557      | 644      |
| Conv-CHF-C        | 144.5                    | 100      | 190      | 270      | 440      |
| Conv-CHM-A        | 67.9                     | 92       | 250      | 559      | 743      |
| Conv-CHM-B        | 87.5                     | 112      | 245      | 508      | 683      |
| Conv-CHM-C        | 113.6                    | 108      | 249      | 487      | 626      |
| Conv-CHM-D        | 143.7                    | 112      | 223      | 466      | 644      |
| Conv-CHC-A        | 63.7                     | 174      | 481      | 892      | 989      |
| Conv-CHC-B        | 90.14                    | 139      | 418      | 742      | 964      |
| Conv-CHC-C        | 116.8                    | 170      | 394      | 621      | 886      |
| Conv-CHC-D        | 140.8                    | 202      | 391      | 606      | 838      |

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πίνακας III.20. Κοκκομετρική κατανομή των διογκωμένων δειγμάτων που προέκυψαν από κατεργασία περλίτη από το ορυχείο του Τράχηλα στην συμβατική έμφλογη κάμινο διάγκωσης.

| <b>Κωδικός<br/>δείγματος</b> | <b>l.b.d.<br/>kg/m<sup>3</sup></b> | <b>d10<br/>(μm)</b> | <b>d50<br/>(μm)</b> | <b>d90<br/>(μm)</b> | <b>d99<br/>(μm)</b> |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Conv-TRI-A                   | 47.6                               | 108                 | 298                 | 715                 | 1057                |
| Conv-TRI-B                   | 72.7                               | 94                  | 243                 | 607                 | 897                 |
| Conv-TRI-C                   | 101.8                              | 104                 | 248                 | 572                 | 795                 |
| Conv-TRI-D                   | 124.9                              | 96                  | 241                 | 524                 | 754                 |
| Conv-TRF-A                   | 59.8                               | 77                  | 172                 | 479                 | 655                 |
| Conv-TRF-B                   | 80.2                               | 68                  | 125                 | 414                 | 616                 |
| Conv-TRF-C                   | 115.7                              | 84                  | 178                 | 381                 | 535                 |
| Conv-TRM-A                   | 37.22                              | 205                 | 409                 | 800                 | 1063                |
| Conv-TRM-B                   | 57.21                              | 249                 | 421                 | 719                 | 980                 |
| Conv-TRM-C                   | 87.1                               | 212                 | 423                 | 615                 | 903                 |
| Conv-TRC-A                   | 38.7                               | 178                 | 450                 | 915                 | 1207                |
| Conv-TRC-B                   | 55.7                               | 156                 | 380                 | 811                 | 1184                |
| Conv-TRC-C                   | 115.7                              | 194                 | 368                 | 608                 | 891                 |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΔΙΟΥ ΠΕΡΛΙΤΗ ΣΤΗΝ ΚΑΘΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟ

Στην συνέχεια ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής για την προσομοίωση της διόγκωσης τεμαχιδίου περλίτη στην κάθετη ηλεκτρική κάμινο διόγκωσης και παρουσιάστηκε εκτενώς στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής. Η επίλυση του πραγματοποιείται στο πρόγραμμα Berkeley Madonna έκδοσης 8.3.18.

## METHOD RK4

|             |        |
|-------------|--------|
| STARTTIME   | = 0    |
| STOPTIME    | = 2.7  |
| DT          | = 0.05 |
| Rename time | = x    |

## Εισαγωγή δεδομένων σεναρίου

|                     |        |   |
|---------------------|--------|---|
| Dpmicron            | = 250  | Αρχική διάμετρος τεμαχιδίου, $D_{p,i}$          |
| H <sub>2</sub> Oall | = 2    | Περιεκτικότητα τεμαχιδίου σε νερό,              |
| Tparticle_initial   | = 298  | Αρχική θερμοκρασία τεμαχιδίου, $T_{p,in}$       |
| Twallminimum        | = 1273 | θερμοκρασία καμίνου σε x=0, (K)                 |
| Twallmaximum        | = 1273 | θερμοκρασία καμίνου σε x=2.7, (K)               |
| Tairinlet           | = 297  | Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα, $T_{air,in}$ (K) |
| Qairin              | = 50   | ρυθμός τροφοδοσίας αέρα, $Q_{air,in}$           |

## Γεωμετρικά χαρακτηριστικά θαλάμου διόγκωσης

|    |                     |  |
|----|---------------------|--|
| Lo | =2.7                | μήκος θαλάμου, m                           |
| Do | =0.134              | διάμετρος θαλάμου, m                       |
| Ro | =Do/2               | ακτίνα θαλάμου, m                          |
| Po | =2*PI*Ro            | περίμετρος θαλάμου, m                      |
| Ao | =PI*Ro <sup>2</sup> | επιφάνεια διατομής θαλάμου, m <sup>2</sup> |
| So | =Lo*Po              | επιφάνεια θαλάμου, m <sup>2</sup>          |
| Vo | =Lo*Ao              | όγκος θαλάμου, m <sup>3</sup>              |

## Φυσικές σταθερές μαθηματικού μοντέλου

|       |            |   |
|-------|------------|---|
| Rg    | = 8.314462 | παγκόσμια σταθερά αερίων, $m^3 \cdot kPa \cdot K^{-1} \cdot kmol^{-1}$    |
| MBair | = 28.97    | μοριακό βάρος αέρα, $kg \cdot kmol^{-1}$                                  |
| Rgair | = 0.002831 | $Rg / MBair$ , σταθερά αέρα σε $m^3 \cdot ATM \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ |
| g     | = 9.81     | επιτάχυνση βαρύτητας, $m \cdot s^{-2}$                                    |



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΙΚΡΟΣΦΑΙΡΙΔΙΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΟΥ ΠΕΛΡΙΤΗ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

|        |                       |   |
|--------|-----------------------|---|
| MBH2O  | 18                    | μοριακό βάρος νερού, $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$                           |
| J      | -4.55                 | Σταθερά υπολογισμού ιξώδους τήγματος  |
| Pa     | 1                     | ατμοσφαιρική πίεση, ATM   |
| Pap    | = Pa*101325           | ατμοσφαιρική πίεση, Pa  |
| Bc     | = $5.67\cdot 10^{-8}$ | σταθερά Boltzman, $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^4$ |
| Dhevap | = 40680               | ενθαλπία εξάτμισης νερού, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$                        |

**Αρχικό μέγεθος φυσαλίδας και ποσότητα νερού**

|        |  |  |
|--------|--|--|
| mmelt  | = $m_p \cdot ((100 - H_{2Oeff})/100)$                                    | μάζα τήγματος, kg  |
| Vmelt  | = $m_p \cdot ((100 - H_{2Oeff})/100) / D_{melt}$                         | όγκος τήγματος, $\text{m}^3$                                   |
| H2Oeff | = $0.6 \cdot H_{2Oall}$  | Περιεκτικότητα κόκκου σε επιδρών νερό, %κ.β.                   |
| H2O    | = $(H_{2Oeff}/100) \cdot m_p$  | μάζα επιδρώντος νερού, kg                                      |
| N      | = $H_{2O} \cdot 1000 / MBH_{2O}$   | moles νερού στην φυσαλίδα, mol                                 |
| Rbi    | = $((3 \cdot (V_{pi} - V_{melt})) / (4 \cdot \pi))^{1/3}$                | αρχική ακτίνα φυσαλίδας, m                                     |
| Vbi    | = $(4/3) \cdot \pi \cdot (R_{bi})^3$                                     | αρχικός όγκος φυσαλίδας, $\text{m}^3$                          |
| Pbi    | = $(3 \cdot N \cdot R_g \cdot T_{pin}) / (4 \cdot \pi \cdot (R_{bi})^3)$ | αρχική πίεση ατμού, Pa   |
| PbiATM | = $P_{bi} / 101325$  | αρχική πίεση ατμού, atm  |
| Diampi | = $D_{pmicron} \cdot 10^{-6}$  | διάμετρος τεμαχιδίου, $D_p$ (m)                                |
| Rpi    | = $D_{iampi} / 2$  | ακτίνα τεμαχιδίου, $R_p$ (m)                                   |
| Api    | = $\pi \cdot D_{iampi}^2 / 4$  | επιφάνεια προβολής, $A_p$ ( $\text{m}^2$ )                     |
| Spi    | = $\pi \cdot D_{iampi}^2$  | επιφάνεια τεμαχιδίου, $S_p$ ( $\text{m}^2$ )                   |
| Vpi    | = $\pi \cdot D_{iampi}^3 / 6$  | όγκος τεμαχιδίου, $V_p$ ( $\text{m}^3$ )                       |
| Mp     | = $D_{parti} \cdot V_{pi}$   | μάζα τεμαχιδίου, $m_p$ (kg)                                    |
| Dparti | = 2290   | πυκνότητα αδιόγκωτου τεμαχιδίου, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Dmelt  | = 2300   | πυκνότητα κελύφους-τήγματος, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$     |

**Υπολογισμός θερμοφυσικών ιδιοτήτων αέρα**

*Πυκνότητα*

|        |                                       |   |
|--------|---------------------------------------|---|
| doair  | = $1 / (R_{gair} \cdot T_{airinlet})$ | αρχική πυκνότητα αέρα, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$                      |
| dair   | = $1 / (R_{gair} \cdot T_{air})$      | πυκνότητα αέρα συναρτήσει της θερμοκρασίας, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| minair | = $doair \cdot Q_0$                   | ρυθμός ροής μάζας αέρα, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$                     |

*Θερμική αγωγιμότητα*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

$$\begin{aligned}
 k_{air} &= F1k \cdot T_{air}^3 + F2k \cdot T_{air}^2 + F3k \cdot T_{air} + F4k \\
 F1cp &= 1.5207 \cdot 10^{-11} \\
 F2cp &= -4.8574 \cdot 10^{-8} \\
 F3cp &= 1.0184 \cdot 10^{-4} \\
 F4cp &= -3.9333 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

*Θερμοχωρητικότητα*

$$\begin{aligned}
 c_{pair} &= (F1cp \cdot T_{air}^3 + F2cp \cdot T_{air}^2 + F3cp \cdot T_{air} + F4cp) \cdot 1000 \\
 F1cp &= -8.0144 \cdot 10^{-11} \\
 F2cp &= 2.10788 \cdot 10^{-7} \\
 F3cp &= 2.06329 \cdot 10^{-5} \\
 F4cp &= 0.983672495
 \end{aligned}$$

*Ιξώδες*

$$\begin{aligned}
 \text{Visc}_{air} &= \text{Visc}_{airref} \cdot (T_{air}/T_{ref})^{n_{ref}} && \text{εξίσωση υπολογισμού ιξώδους αέρα,} \\
 &&& \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\
 \text{Visc}_{airwall} &= \text{Visc}_{airref} \cdot (T_{wall}/T_{ref})^{n_{ref}} && \text{εξίσωση υπολογισμού ιξώδους αέρα σε} \\
 &&& \text{θερμοκρασία } T_w, \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\
 T_{ref} &= 273 && \text{θερμοκρασία αναφοράς για ιξώδες αέρα,} \\
 &&& \text{K} \\
 n_{ref} &= 0.70 && \text{συντελεστής υπολογισμού ιξώδους} \\
 \text{Visc}_{airref} &= 1.72 \cdot 10^{-5} && \text{Ιξώδες αέρα σε θερμοκρασία } 273 \text{ K,} \\
 &&& \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}$$

*Αριθμός Prandtl*

$$Pr = c_{pair} \cdot \text{Visc}_{air} / k_{air}$$

**Θερμοφυσικές ιδιότητες τήγματος**

*Επιφανειακή τάση*

$$\begin{aligned}
 \text{ST} &= \text{IF } T_p < 1273 \text{ THEN stA} \\
 \text{ELSE } \text{stMurase} & \\
 \text{stA} &= 0.29 \\
 \text{stMurase} &= 0.09 + (1.971 \cdot (10^{-4}) \cdot (T_p - 273)) && \text{υπολογισμός} && \text{επιφανειακής} \\
 &&& \text{τάσης, N/m} &&
 \end{aligned}$$

*Ιξώδες τήγματος*

```

meltvis      = IF Tr<450          THEN      meltviscon
ELSE meltvisgior
Meltvislog   = J + (Xm/(Tr-Y))
meltvisgior  = 10^Meltvislog      ιξώδες τήγματος, Pa·s
meltviscon   = 6.2*(10^33)        άνω φράγμα ιξώδους, Pa·s

```

*Προσδιορισμός τιμών των σταθερών υπολογισμού ιξώδους συναρτήσει της περιεκτικότητας του τεμαχιδίου Τράχηλα σε νερό*

```

Xm =      IF H2Oeffective =1.5 THEN  Xa      ELSE
          IF H2Oeffective=1.75 THEN Xb      ELSE
          IF H2Oeffective=2.00 THEN Xc      ELSE Xd

```

*Τιμές σταθεράς Xm*

```

Xa      =11383.4
Xb      =11320.6
Xc      =11256.9
Xd      =11130

```

```

Y =      IF H2Oeffective =1.5 THEN  Ya      ELSE
          IF H2Oeffective=1.75 THEN Yb      ELSE
          IF H2Oeffective=2.00 THEN Yc      ELSE Yd

```

*Τιμές σταθεράς Y*

```

Ya      = 153.2
Yb      = 141.3
Yc      = 130.6
Yd      = 112.4

```

*Θερμοχωρητικότητα τεμαχιδίου*

```

Cpmelt      =(-0.0004*(Tr^2))+ (1.121*Tr)+497.73  θερμοχωρητικότητα άνυδρου
CpH2O       =(0.6417*Tr)+1646.9                  περλίτη, J/kgK
Cppp        =((H2Oeff/100)*CpH2O)+(((100-
H2Oeff)/100)*Cpmelt)                             θερμοχωρητικότητα τεμαχιδίου ,
                                                    J/kgK

```

*Εκπεμπτικότητα τεμαχιδίου*

```

e      =      IF Exprat <= 1.001  THEN  eunexp
          ELSE eexp
eunexp      = 0.7      εκπεμπτικότητα αδιόγκωτου
eexp        =0.55     περλίτη
              εκπεμπτικότητα διογκωμένου
              περλίτη

```

**Χαρακτηριστικά ροής κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης**

|      |                                    |   |
|------|------------------------------------|---|
| Qo   | = Qo1/(1000*60)                    | ογκομετρική ροή εισόδου αέρα, m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> |
| Uo   | = (Qo/Ao)                          | ταχύτητα εισόδου αέρα, m/s                                    |
| Q    | = Qo*Tair/To                       | ογκομετρική ροή αέρα, m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>         |
| Uair | = Q / Ao                           | ταχύτητα αέρα, m/s  |
| Re   | = dair*uair*Do/Visc <sub>air</sub> | αριθμός Reynolds  |

*Υπολογισμός αριθμού Nusselt κατά μήκος του θαλάμου διόγκωσης*

$$L = x + (L_o/3000)$$

Nu =

{ Case 1: στρωτή ροή, πλήρως ανεπτυγμένα υδροδυναμικά και θερμικά χαρακτηριστικά }

IF Re < 2300 And Re \* Do / L <= 20 AND Re\*Pr\*Do / L <= 20 AND Pr >= 0.6  
THEN NufulllamT ELSE

{ Case 2: στρωτή ροή, πλήρως ανεπτυγμένη υδροδυναμικά, αναπτυσσόμενη θερμικά }

IF Re < 2300 And Re \* Do / L <= 20 And NOT Re\*Pr\*Do / L <= 2  
THEN NuHausen ELSE

{ Case 3: στρωτή ροή, αναπτυσσόμενη υδροδυναμικά και θερμικά }

IF Re < 2300 And NOT Re\*Do / L <= 20 And NOT Re\*Pr\*Do/L <= 20  
AND 0.48 < Pr < 16700

THEN NuSiederTate ELSE

{ Case 4: ροή μεταβατικών χαρακτηριστικών ή τυρβώδης 2300 < Re < 10000 }

IF 2300 < Re < 5000000 and 0.5 < Pr < 2000 THEN NuGnielinski ELSE NuSiederTate

NufulllamT = IF Twallminimum=Twallmaximum THEN 3.66 ELSE 4.36

$$NuHausen = 3.66 + ((0.0668*(Do/L)*Re*Pr)/(1+0.04*((Do/L)*Re*Pr)^{(2/3)}))$$

$$NuSiederTate = 1.86*((Re*Pr)^{(1/3)})*((Do/L)^{(1/3)})*((Visc_{air}/Visc_{airwall})^{0.14})$$

$$f = (0.79*\log_{10}(Re)-1.64)^{-2}$$

$$NuGnielinski = (f/8)*(Re-1000)*Pr / (1+12.7*((f/8)^{(1/2)})*((Pr^{(2/3)}))-1)$$

*Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής*

$$h_{wall}To_{air} = k_{air}*Nu/Do$$

### Υπολογισμός θερμοκρασιακής κατανομής αέρα

$$d/dt(T_{air}) = (T_{wall} - T_{air}) * (h_{wall} * \rho_{air} * \pi * D_o) / (c_{p,air} * m_{air})$$

$$\text{init } T_{air} = T_o$$

*Υπολογισμός θερμοκρασίας αγωγού στην περίπτωση διαβάθμισης*

$$T_{wall} = (T_{wallmin}) + (T_{wallmax} - T_{wallmin}) / L_o * x$$

$$NTU = (\rho_{air} * D_o * h_{wall} * T_o * x) / (m_{air} * c_{p,air}) \quad \begin{array}{l} \text{Μονάδες} \\ \text{θερμότητας, NTU} \end{array} \quad \text{μεταφοράς}$$

### Υπολογισμός ταχύτητας σωματιδίων

$$d/dT(U_p) = \frac{((D_{part} - D_{air}) * g / (U_p * D_{part})) - (3 * CD * D_{air} * ((U_p - U_{air})^2) / (4 * D_{amp} * D_{part} * U_p))}{U_p}$$

$$\text{INIT } U_p = 0.01$$

*Χρόνος σωματιδίου*

$$d/dt(\text{Time}_p) = 1/U_p$$

$$\text{INIT } \text{Time}_p = 0$$

*Υπολογισμός συντελεστή οπισθέλκουσας τεμαχιδίου CD*

$$CD = (24/Re_p) * (1 + (0.15 * (Re_p^{0.687})))$$

$$Re_p = (ABS(U_p - U_{air}) * D_{amp} * D_{air}) / \nu_{air}$$

### Υπολογισμός θερμοκρασίας τεμαχιδίου

*Συναγωγή*

$$d/dT(T_{pc}) = (-h_c * (T_{pc} - T_{air}) * S_p) / (D_{part} * V_{part} * C_{p,p}) * (1/U_p)$$

$$\text{INIT } T_{pc} = T_{pin}$$

$$h_c = N_{up} * k_{air} / D_{amp}$$

$$N_{up} = 2 + (0.6 * (Re_p^{0.5}) * (Pr^{1/3}))$$

*Ακτινοβολία*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

$$d/dT(T_{pr}) = (-e^{bc} * ((T_{pr}^4) - (T_{wall}^4)) * S_p) / (D_{part} * V_{part} * C_{pp}) * (1/U_p)$$

$$INIT T_{pr} = T_{pin}$$

*Συνδυασμός μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και λανθάνουσας εξάτμισης νερού*

$$d/dT(T_p) = ((-e^{bc} * ((T_p^4) - (T_{wall}^4)) * S_p) / (D_{part} * V_{part} * C_{pp}) + ((-h_c * (T_p - T_{air})) * S_p) / (D_{part} * V_{part} * C_{pp}) - (D_{Hevap} * N)) * (1/U_p)$$

$$INIT T_p = T_{pin}$$

**Εξισώσεις φυσαλίδας**

$$P_b = (3 * N * R_g * T_p) / (4 * \pi * (R_b^3)) \quad \text{Πίεση φυσαλίδας, Pa}$$

$$d/dt(R_b) = (R_b * (P_b - P_a - (2 * \sigma / R_b)) / (4 * \rho_{melt} * \nu)) * (1/U_p) \quad \text{Διόγκωση φυσαλίδας}$$

$$INIT R_b = R_{bi}$$

**Μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά τεμαχιδίου**

|               |   |  |
|---------------|---|--|
| $D_{part}$    | $= M_p / (V_{part})$                                | πυκνότητα τεμαχιδίου, $kg \cdot m^{-3}$      |
| $LBD$         | $= D_{part} * 0.52$                                 | φαινόμενη πυκνότητα, $LBD (kg \cdot m^{-3})$ |
| $R_{pmic}$    | $= (((3 * V_{part}) / (4 * \pi))^{(1/3)}) * (10^6)$ | ακτίνα τεμαχιδίου, $R_p (\mu m)$             |
| $R_p$         | $= ((3 * V_{part}) / (4 * \pi))^{(1/3)}$            | Ακτίνα τεμαχιδίου, (m)                       |
| $D_{iampmic}$ | $= D_{iamp} * (10^6)$                               | διάμετρος τεμαχιδίου, $D_p (\mu m)$          |
| $P_b\_Mpa$    | $= P_b * (10^{-6})$                                 | πίεση φυσαλίδας, $P_b (MPa)$                 |
| $V_b$         | $= 4 * \pi * (R_b^3) / 3$                           | Όγκος φυσαλίδας, ( $m^3$ )                   |
| $D_{iamp}$    | $= 2 * R_p$   | Διάμετρος τεμαχιδίου, (m)                    |
| $Ex_{prat}$   | $= R_p / R_{pi}$                                    | Βαθμός διόγκωσης τεμαχιδίου, $E$             |
| $Shell$       | $= (R_p - R_b) * (10^6)$                            | Πάχος τοιχώματος τεμαχιδίου, ( $\mu m$ )     |
| $V_{part}$    | $= V_{melt} + V_b$                                  | Όγκος τεμαχιδίου, ( $m^3$ )                  |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

### ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΕΡΛΙΤΗ ΜΕ ΤΗΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ (LBD).

Πίνακας V1. Εξισώσεις συσχετισμού φαινόμενης πυκνότητας και υδρο- και έλαιο- απορροφητικότητας και αντοχής σε συμπίεση για περλίτες από το ορυχείο του Τράχηλα και του Τσιγκράδο που διογκώθηκαν στην κάθετη ηλεκτρική (γκρί φόντο) και τη συμβατική κάμινο διόγκωσης (λευκό φόντο).

| Προέλευση α ύλης    | Ιδιότητα                     | Μέθοδος διόγκωσης   |
|---------------------|------------------------------|---|
| Περλίτης Τσιγκράδου | Υδρο απορροφητικότητα        | VEF*: $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=10.746 \cdot e^{-0.01 \cdot LBD}$ ( $R^2 = 0.9341$ )        |
|                     |                              | CONV**: $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=11.835 \cdot e^{-0.011 \cdot LBD}$ ( $R^2=0.9365$ )       |
|                     | Έλαιο- απορροφητικότητα      | $o.a.[g.oil \cdot g.perl^{-1}]=6.1573 \cdot e^{-0.008 \cdot LBD}$ ( $R^2 = 0.8503$ )              |
|                     |                              | $o.a.[g.oil \cdot g.perl^{-1}]=7.6309 \cdot e^{-0.01 \cdot LBD}$ ( $R^2=0.9371$ )                 |
|                     | Υδρο-έλαιο απορροφητικότητα  | $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=1.4809 \cdot o.a. - 0.0454$ ( $R^2=0.7838$ )                      |
|                     |                              | $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=1.5627 \cdot o.a. - 0.3461$ ( $R^2=0.9363$ )                      |
|                     | Αντοχή σε συμπίεση στα 3 cm. | $c.s.[p.s.i.] = -0.0063 \cdot LBD^2 + 1.9764 \cdot LBD - 75.019$ ( $R^2=0.8143$ )                 |
|                     |                              | $c.s.[p.s.i.] = -0.0029 \cdot LBD^2 + 1.0718 \cdot LBD - 35.537$ ( $R^2=0.7774$ )                 |
| Περλίτης Τράχηλα    | Υδρο απορροφητικότητα        | VEF: $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=15.705 \cdot e^{-0.013 \cdot LBD}$ ( $R^2 = 0.9294$ )        |
|                     |                              | CONV: $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=15.759 \cdot e^{-0.014 \cdot LBD}$ ( $R^2=0.9161$ )         |
|                     | Έλαιο- απορροφητικότητα      | $o.a.[g.oil \cdot g.perl^{-1}]=0.0003 \cdot LBD^2 - 0.0849 \cdot LBD + 8.7318$ ( $R^2 = 0.7525$ ) |
|                     |                              | $o.a.[g.oil \cdot g.perl^{-1}]=0.0008 \cdot LBD^2 - 0.1648 \cdot LBD + 10.634$ ( $R^2=0.8373$ )   |
|                     | Υδρο-έλαιο απορροφητικότητα  | $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=1.5298 \cdot o.a. - 0.0341$ ( $R^2=0.6337$ )                      |
|                     |                              | $w.a.[g.H_2O^{-1} \cdot g.perl]=1.888 \cdot o.a. - 0.4295$ ( $R^2=0.9023$ )                       |
|                     | Αντοχή σε συμπίεση στα 3 cm. | $c.s.[p.s.i.] = -0.0032 \cdot LBD^2 + 1.398 \cdot LBD - 44.837$ ( $R^2=0.8571$ )                  |
|                     |                              | $c.s.[p.s.i.] = 0.027 \cdot LBD^2 - 0.1272 \cdot LBD + 6.334$ ( $R^2=0.8807$ )                    |

\* VEF: Vertical Electrical FURNACE (Κάθετη ηλεκτρική κάμινο)

\*\* CONV: Expansion in Conventional Furnace (Διόγκωση σε συμβατική κάμινο).

