

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**Σχολή Τεχνολογικών Επιστημών
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Τομέας Ενέργειας, Βιομηχανικών Διεργασιών & Τεχνολογίας Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

**Προσομοίωση Ροής & Φαινομένων Μεταφοράς σε
Ασβεστοποιητή Τσιμέντου με Υπολογιστική Ρευστοδυναμική**

**Μεταπτυχιακή Εργασία
Δημήτριος Κ. Φείδαρος**

Βόλος - Ιούνιος 2000



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 1972/1

Ημερ. Εισ.: 21-06-2004

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: Δ

666.94

ΦΕΙ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

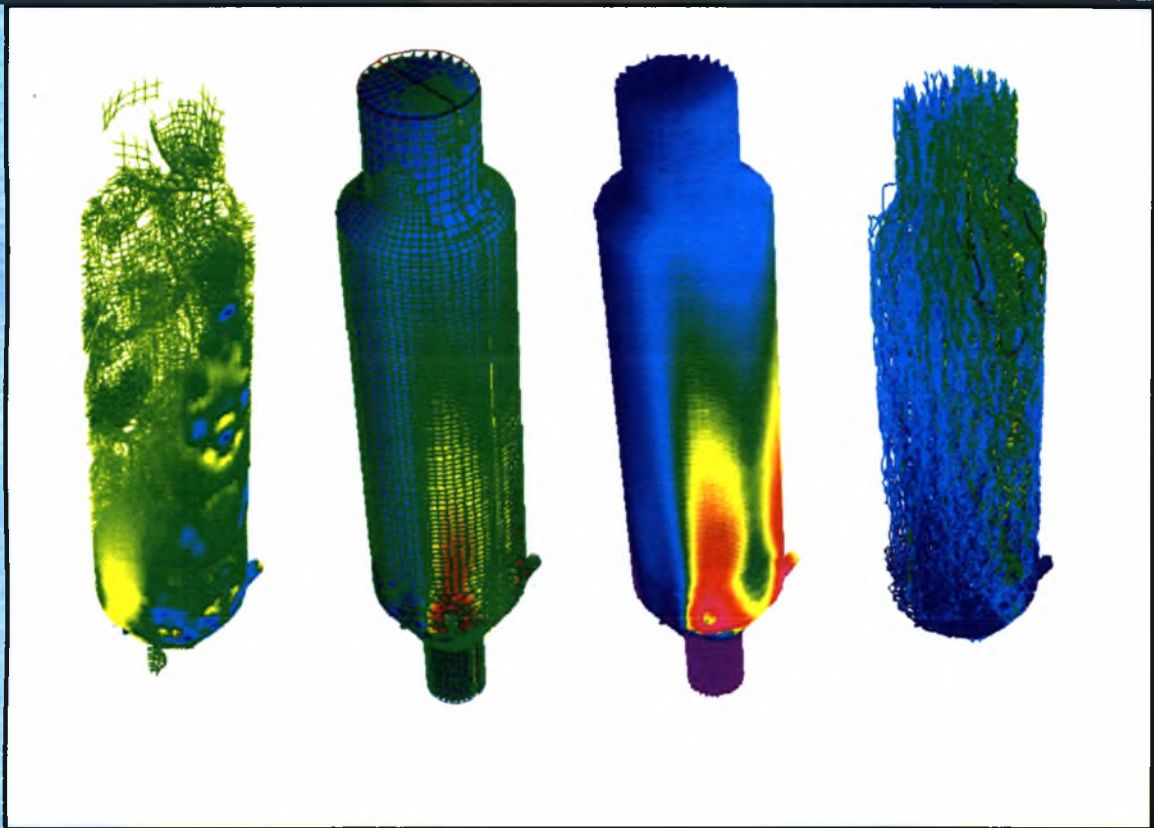
Σχολή Τεχνολογικών Επιστημών

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Τομέας Ενέργειας, Βιομηχανικών Διεργασιών & Τεχνολογίας Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής



**Προσομοίωση Ροής & Φαινομένων Μεταφοράς σε
Ασβεστοποιητή Τσιμέντου με Υπολογιστική Ρευστοδυναμική**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Δημήτριος Κ. Φείδαρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικ. Σπ. Βλάχος

Βόλος – Ιούνιος 2000



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062120

Περιεχόμενα

1. Αντικείμενο και Στόχοι της Εργασίας	5
1.1 Δομή της Εργασίας	6
2. Διεργασίες Παραγωγής Τσιμέντου	8
2.1 Πρώτες Ύλες & Σύσταση Τσιμέντου	8
2.1.1 Σύσταση του Τσιμέντου	9
2.1.2 Διεργασίες Παραγωγής Τσιμέντου	10
2.2 Περιγραφή διεργασιών έψησης	13
2.2.1 Περιστροφικός κλίβανος	14
2.2.2 Προθέρμανση	16
2.2.3 Ψυγείο κλίνκερ	18
2.2.4 Συστήματα ασβεστοποίησης	19
2.2.5 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας	27
2.2.6 Μετρήσεις και έλεγχος του ασβεστοποιητή	30
2.3 Καύσιμα στη Βιομηχανία Τσιμέντου	33
2.3.1 Στερεά καύσιμα – Κάρβουνο	38
2.3.2 Πτητικές ουσίες	39
2.3.3 Ανάλυση κάρβουνου	40
2.3.4 Θερμογόνος δύναμη	40
2.3.5 Θερμογόνος δύναμη και θερμική κατανάλωση	41
2.3.6 Θερμοχημικές αντιδράσεις και όγκοι αερίων	42
2.3.7 Μετατροπή των αερίων όγκων στη θερμοκρασία λειτουργίας	43
2.3.8 Θερμοκρασία ανάφλεξης του άνθρακα	43
2.3.9 Χρόνος καύσης	44
2.3.10 Μεταφορά θερμότητας κατά την καύση κάρβουνου	45
2.3.11 Αέρια καύσης	46
2.3.12 Θερμοκρασία φλόγας	46
2.3.13 Προεπεξεργασία του κάρβουνου	47
2.3.14 Συγκέντρωση της σκόνης του κάρβουνου	47
2.3.15 Επάρκεια θερμικής ενέργειας	48
2.3.16 Ξήρανση του κάρβουνου	48
2.3.17 Κονιορτοποίηση κάρβουνου	49
2.3.18 Μέθοδος λειτουργίας των μύλων του άνθρακα	49
2.4 Φαρίνα	53
2.4.1 Ασβεστώδη συστατικά	53
2.4.2 Αργιλώδη συστατικά	55
2.4.3 Διορθωτικά συστατικά	56
2.4.4 Βοηθητικά συστατικά των πρώτων υλών του τσιμέντου	57
2.4.5 Ανόργανες ενώσεις του κλίνκερ τσιμέντου Portland	61
2.4.6 Λανθάνουσα σύνθεση του κλίνκερ	63
2.4.7 Μέτρο Τσιμέντου (Cement moduli)	65
2.4.8 Υδραυλικό μέτρο	65
2.4.9 Λόγος αλουμίνιας	66
2.4.10 Τύποι για τον ασβεστόλιθο	66
2.4.11 Τυποποίηση Ασβεστόλιθου (Lime Standard)	67
3. Μαθηματικά Μοντέλα	68
3.1 Αεροδυναμικό μοντέλο - Σχήμα Euler	68
3.1.1 Μοντέλα Μεταφοράς Θερμότητας	70
3.1.2 Το k-ε μοντέλο τύρβης	74
3.2 Δυναμική Σωματιδίων	76
3.2.1 Εξίσωση Κίνησης Σωματιδίων	77
3.2.2 Ολοκλήρωση των Εξισώσεων Τροχιάς	80
3.2.3 Κατανομές Μεγεθών Σωματιδίων	80
3.2.4 Συνοριακές συνθήκες διακριτής φάσης	81

3.3	Υπολογισμοί Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας	81
3.3.1	Νόμος 1 ^η 6 Θέρμανση ή Ψύξη Σωματιδίου	82
3.3.2	Νόμος 2 Εξάτμιση Σταγονιδίου	83
3.3.3	Νόμος 4 Εξάτμιση Πηκτικών	85
3.3.4	Νόμος 5 Μοντέλο επιφανειακής αντίδρασης καύσης	88
3.3.5	Γενικές ετερογενείς επιφανειακές αντιδράσεις	92
3.3.6	Σύνοψη χημικής συμπεριφοράς σωματιδίων	93
3.4	Μοντέλο Ακτινοβολίας	94
3.4.1	Εφαρμογές της Μετάδοσης Θερμότητας με Ακτινοβολία	94
3.4.2	Επιλογή του μοντέλου ακτινοβολίας	95
3.4.3	Μοντέλο Ακτινοβολίας P-1	97
3.4.4	Εξισώσεις για το μοντέλο P-1	97
3.5	Μοντέλο Χημικών Αντιδράσεων	100
3.5.1	Περιγραφή Μοντέλου Κλάσματος Μίγματος (PDF approach)	101
3.5.2	Εξίσωση μεταφοράς για το κλάσμα μίγματος	106
3.5.3	Κλάσμα μίγματος εναντίον του ισοδύναμου λόγου	107
3.5.4	Περιγραφή χημικού συστήματος - Χημική ισορροπία	108
3.5.5	Αλληλεπίδραση τύρβης και χημείας στο μοντέλο PDF	111
4.	Χαρακτηριστικά μοντέλου ασβεστοποιητή	114
4.1	Εισαγωγή	114
4.1.1	Συνοπτική περιγραφή	114
4.1.2	Γεωμετρία κατασκευής	116
4.1.3	Γεωμετρική Περιγραφή Ασβεστοποιητή	117
4.1.4	Κατασκευή Πλεγμάτων	119
4.1.5	Σχήματα Πλέξης	122
4.1.6	Πλέγματα προσομοιώσεων παρούσας εργασίας	126
4.2	Χαρακτηριστικά ασβεστοποιητή της ΑΓΕΤ	137
4.2.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ασβεστοποιητή	138
4.2.2	Καύση Κάρβουνου	140
4.3	Ανάλυση σύστασης κάρβουνου	145
4.4	Ασβεστοποίηση	148
4.4.1	Θερμοδυναμική της Ασβεστοποίησης	149
4.4.2	Μαθηματικό Μοντέλο Χημικής Κινητικής	151
4.5	Ποσοτική περιγραφή εισόδων του ασβεστοποιητή	155
4.5.1	Σύνοψη εισόδων	158
4.6	Κατανομή μεγεθών κόκκων	161
4.7	Συνοριακές Συνθήκες της Προσομοίωσης	166
4.7.1	Αρχικές Συνθήκες Διακριτής Φάσης	169
4.7.2	Συνοριακές συνθήκες σωματιδιακής φάσης	169
5.	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων και Συζήτηση	171
5.1	Πορεία Επίλυσης	172
5.1.1	Αριθμητικά Σχήματα	173
5.1.2	Γραμμικοποίηση	175
5.1.3	Διακριτοποίηση	175
5.1.4	Σχήματα διαφόρισης	176
5.1.5	Γραμμικοποιημένη μορφή των διακριτοποιημένων εξισώσεων	178
5.1.6	Συντελεστές Υπο-χαλάρωσης	178
5.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	178
6.	Συμπεράσματα και Προτάσεις	236
6.1	Συμπεράσματα	236
6.2	Προτάσεις	237
7.	Βιβλιογραφία	240

Πρόλογος

Σε μια εποχή, όπου τα προβλήματα που απασχολούν την ανθρωπότητα είναι ολόένα και πιο περίπλοκα, οι μηχανικοί καλούνται να δώσουν απαντήσεις για να καλύψουν τις τεχνολογικές ανάγκες που δημιουργεί η ανάπτυξη. Όμως, η ξέφρενη πορεία των τελευταίων ετών αφήνει στην κοινωνία προβλήματα, όπως η άκρατη καταναλωτική στάση του ανθρώπου των τελευταίων δεκαετιών, η αποξένωση και αποκοπή του ατόμου από το κοινωνικό σύνολο. Αγνοώντας προς στιγμήν το ορατό (ή αόρατο, για πολλούς) φάσμα της σκοπιμότητας και του καιροσκοπισμού και εστιάζοντας στο 'θαυμαστό', κόσμο της τεχνολογίας και επιστήμης ξεδιπλώνεται ένας ορίζοντας, που στον αγαθό, ιδεατό κόσμο, τον οποίο εγώ φαντάζομαι, λειτουργεί από τον άνθρωπο για τον άνθρωπο, προσπαθώντας να αμβλύνει ή να λύσει τα προβλήματα και όχι να δημιουργήσει καινούργια ή και να οξύνει αυτά που ήδη υπάρχουν.

Πέρα από όλες τις ενστάσεις και τα διλήμματα που προβληματίζουν σοβαρά τον άνθρωπο πάνω σ' αυτό τον πλανήτη, αξίζει να αναγνωρίσουμε τον αγώνα του κάθε ανθρώπου που προσπάθησε να βελτιώσει τη δική του ζωή του, αλλά και των συνανθρώπων του. Βέβαια, εάν κάθε επιστήμονας συλλογιζόταν την έκταση και την εξέλιξη της αρχικής του προσπάθειας, ίσως η δίψα και ο αρχικός ενθουσιασμός για την ανακάλυψη ή την εφεύρεση, να μαραίνονταν πάνω στις δυσοίωνες προοπτικές της κακής χρήσης και εκμετάλλευσης της επιστημονικής του σκέψης, από τα σπάργανα της. Ευτυχώς, όμως αυτό, πριν από κάποια χρόνια ήταν μια απόμακρη και βαθιά χαμένη σκέψη στο μυαλό του εφευρέτη ή επιστήμονα. Βέβαια, ο αιώνας που μόλις φεύγει, έχει να επιδείξει πλείστα παραδείγματα αλόγιστης χρήσης της επιστημονικής σκέψης, με την κατασκευή οπλικών συστημάτων για την ακόρεστη ικανοποίηση της ματαιοδοξίας του ανθρώπου για εξουσία. Παρόλα αυτά, πρέπει να δούμε πως οι προκλήσεις και οι επιταγές της σημερινής κοινωνίας, δημιουργούν και αναδεικνύουν όχι μόνο προβλήματα, αλλά και λύσεις σε ερωτήματα ή βασανιστικές καταστάσεις που ταλανίζουν πολύ κόσμο. Ποιος μπορεί να αγνοήσει τα επιτεύγματα της ιατρικής, τις δυνατότητες των τηλεπικοινωνιών ή των μεταφορών σήμερα;

Η χαρά της απασχόλησης που έχει δημιουργικό και παραγωγικό περιεχόμενο σήμερα είναι προνόμιο λίγων ανθρώπων, είτε γιατί η εξεύρεση μιας θέσης εργασίας είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση, είτε γιατί πολλοί άνθρωποι δεν καταφέρνουν να βρουν το περιβάλλον που τους ταιριάζει. Πιστεύω, πως, όταν ένας άνθρωπος θέσει ένα προσωπικό στόχο ζωής και προσπαθήσει να τον επιτύχει, κτίζοντας με πολύ κόπο τον ίδιο του τον εαυτό, όπως αυτός θα ορίσει, άσχετα από το τελικό αποτέλεσμα, θα έχει επιτύχει τουλάχιστον την αυτογνωσία του κάτι που σήμερα δεν βρίσκεται σε υπερεπάρκεια.

Στο Πανεπιστήμιο σίγουρα, δεν τα μαθαίνουμε όλα, αλλά μαθαίνουμε να ερευνούμε, να αμφισβητούμε και να αποδεικνύουμε ότι και όταν μπορούμε. Η έρευνα πολλές φορές (σχεδόν πάντα) ακολουθεί το μακρύ και ατελείωτο δρόμο της αρετής, που όλοι διδαχθήκαμε από την μυθολογία μας. Οι διαδικασίες και οι μέθοδοι είναι πολλές, μα το ζητούμενο είναι πάντα ένα, και αυτό είναι η αλήθεια.

Οι επιστημονικές μέθοδοι που ακολουθούνται για την ανάδειξη της αλήθειας είναι πανάρχαιοι και κλασικοί, μα τα εργαλεία και οι θεωρήσεις γίνονται ολοένα και πιο σύγχρονες. Σήμερα, η αλήθεια είναι και ψηφιακή, μια και η εισβολή των ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι καθολική. Βεβαίως, η ψηφιακή επανάσταση θέλοντας και μη, είναι σάρκα της επιστήμης, όποτε όποιες και αν είναι οι υποκειμενικές προσωπικές απόψεις μας, καλό θα είναι στην αρχή να την αποδεχθούμε και στην συνέχεια να συμπορευτούμε μαζί της.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, αλλά και οδηγό την φυσική μου ροπή να συνδunάζω τα ενδιαφέροντα μου, διάλεξα ως αντικείμενο της μεταπτυχιακής μου εργασίας την μελέτη των φαινομένων ροής και μεταφοράς, που λαμβάνουν χώρα μέσα σε μία βιομηχανική διάταξη με την βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η παρούσα εργασία εκτελέστηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Έργο 96ΣΥΝ3/121 'Μοντελοποίηση και έλεγχος διεργασιών ασβεστοποιητή για την παραγωγή τσιμέντου' με συγχρηματοδότηση από την ΓΓΕΤ και την ΑΓΕΤ-Ηρακλής.

Στην προσπάθεια αυτή, είχα αρωγούς όλη την ομάδα του Εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών. Συγκεκριμένα, δεν μπορώ να μην αναφερθώ στην βοήθεια και την καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή μου κ. Νικόλαο Βλάχο, στην συμπαράσταση των υποψηφίων διδασκτόρων Ι. Σαρρή, Γ. Κούτλα, Ν. Κατσαβό, Αικ. Μπαξεβάνου και Μ. Γρυπάρη, καθώς και τους επιστημονικούς συνεργάτες του εργαστηρίου Δρ. Ι. Λεκάκη και Δρ. Φ. Κουμπουλή. Εδώ, πρέπει να τιμήσω και να αναφέρω, την αφανή αλλά ακούραστη προσπάθεια του φοιτητή Χρ. Δριτσέλη, που συνεργάστηκε μαζί μου στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον κ. Θ. Πίσσια (Χημ. Μηχανικό του εργοστασίου 'Όλυμπος' ΑΓΕΤ-Ηρακλής) και την Ουρ. Φάλτση (Χημ. Μηχανικό της Enernac-Flutec), για την καθοριστική συμβολή τους και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Αν. Καθ. Β. Μποντόζογλου και Επικ. Καθ. Δ. Βαλουγεώργη. Τέλος, δε θα μπορούσα να αγνοήσω την ηθική συμπαράσταση των γονιών μου, αλλά και να τονίσω πως χωρίς την βοήθεια των παραπάνω η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί.

1. Αντικείμενο και Στόχοι της Εργασίας

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μια προσέγγιση και επίλυση ενός τεχνολογικού προβλήματος με υπολογιστικές μεθόδους. Το αντικείμενο αφορά την μελέτη των φαινομένων ροής και μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα σε διάταξη ασβεστοποίησης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τσιμέντου. Για την μελέτη αυτή αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Ο έλεγχος των διεργασιών ασβεστοποίησης στην βιομηχανία τσιμέντου έχει ιδιαίτερη σημασία, μια και οι επιπτώσεις της αντανακλούν στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, στην συνολική ενεργειακή απαίτηση της εγκατάστασης αλλά και στις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις σε ποιότητα του παραγόμενου τσιμέντου, που άνετα θα μπορούσαν να συσχετιστούν με τα τελευταία σεισμικά γεγονότα, ο έλεγχος της ασβεστοποίησης φαντάζει ως μια από τις βασικότερες ενέργειες, που μπορεί να συγκεράσει την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και την επίτευξη συνθηκών παραγωγής τελικού προϊόντος ανώτερης ποιότητας. Αυτό απαιτεί κατανόηση των μηχανισμών της ροής, της καύσης και της ασβεστοποίησης που συμβαίνουν στην συγκεκριμένη διάταξη. Στα πλαίσια της διερεύνησης των μηχανισμών αυτών, χρησιμοποιήθηκε ένας εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Fluent), που παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων, ώστε να επιτρέπει την μελέτη των φαινομένων ροής και μεταφοράς στην παραπάνω διάταξη.

Οι συγκεκριμένοι στόχοι που ετέθησαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής διακρίθηκαν σε τρία επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο, ο στόχος ήταν η ανάπτυξη των απαραίτητων μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση των φαινομένων ροής και μεταφοράς στο ασβεστοποιητή. Ο δεύτερος στόχος ήταν εγκατάσταση και η εκμάθηση του κώδικα Fluent καθώς και η γνώση των καινοτόμων μεθόδων λειτουργίας του. Και τέλος στο τρίτο επίπεδο ο στόχος ήταν, η εφαρμογή των μοντέλων και του κώδικα στην επίλυση του παραπάνω τεχνολογικού προβλήματος καθώς και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων βασισμένων σε θεμελιώδεις αρχές.

Κατά την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου, αντιμετωπίστηκαν προβλήματα στην κατασκευή της γεωμετρίας του πλέγματος και στην εκτέλεση που ανέδειξε κάποιες λειτουργικές ασυμβατότητες του πακέτου, που μόνο η σοβαρή ενασχόληση τα ανέσυρε στην επιφάνεια. Ο κώδικας Fluent αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ (Cross platform) και έχει την δυνατότητα υπολογισμού μεταβατικών και μη ελλειπτικών και παραβολικών ροών με ή χωρίς τύρβη και μπορεί να προσομοιώσει την δυναμική σωματιδίων με προσέγγιση κατά Lan-

grange. Οι βασικοί λόγοι που συνετέλεσαν στην αγορά του συγκεκριμένου πακέτου ήταν, ο εμπλουτισμός της εργαλειοθήκης του Εργ. Ρ&Σ για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων με καμπυλόγραμμες συντεταγμένες, η ενίσχυση της εκπαίδευσης των φοιτητών με την χρήση των τελευταίων τεχνικών και μεθόδων CFD, αλλά κυρίως για να λειτουργήσει ως γεννήτρια ερεθισμάτων για την ανάπτυξη επιμέρους ανοιχτών πηγαίων εργαστηριακών κωδίκων. Η χρήση ενός εμπορικού πακέτου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, πάντα δίνει τη βεβαιότητα της σωστής λειτουργίας σε κάτι δοκιμασμένο, αλλά και πολλές φορές η περιορισμένη δυνατότητα επέμβασης στον πηγαίο κώδικα, στερεί από τον χρήστη την αμεσότητα του προβλήματος.

Η εφαρμογή του κώδικα στο συγκεκριμένο τεχνολογικό πρόβλημα έγινε, εφόσον είχε εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων σε βασικές και πολύπλοκες ροές (πχ. καύση κάρβουνου), με δεδομένα από την βιβλιογραφία. Το κύριο αντικείμενο της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ροής της αέριας φάσης, ο χειρισμός της σωματιδιακής φάσης με προσαρμογή μοντέλων καύσης και ασβεστοποίησης και η διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

1.1 Δομή της Εργασίας

Στο Κεφαλαίο 2 γίνεται αναφορά στην συνολική διαδικασία για την παρασκευή τσιμέντου, που από την βιβλιογραφία είναι γνωστή ως διεργασία έψησης (pyroprocess). Αρχικά δίνεται μια γενική εικόνα των διατάξεων που την αποτελούν, από τμήμα σε τμήμα. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται επιγραμματικά οι αλληλοεπιδράσεις που σημειώνονται στις διατάξεις έψησης, και πώς αυτές μπορούν να επηρεάσουν την τελική ποιότητα του τσιμέντου. Δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην λειτουργία της ασβεστοποίησης και στα συστήματα ανακομιστών προθέρμανσης, με την ανάλυση της λειτουργίας διαφόρων συστημάτων ασβεστοποίησης που βρίσκουν εφαρμογή στην διεθνή τσιμεντοβιομηχανία και παρουσιάζονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας της παρούσας διάταξης. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνεται περιγραφή του καυσίμου που χρησιμοποιείται και παρουσιάζονται στοιχεία και προδιαγραφές του κάρβουνου που χρησιμοποιούνται, από διάφορες τσιμεντοβιομηχανίες του εξωτερικού, και δίνονται πληροφορίες για τις διεργασίες ξήρανσης και διαχωρισμού του. Στο τρίτο μέρος του κεφαλαίου, δίνονται στοιχεία για την φαρίνα που εισέρχεται στο ασβεστοποιητή, μια και αποτελεί το βασικό συστατικό για την παραγωγή "κλίνκερ".

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο της προσομοίωσης, όπου πρώτα, αναφέρονται οι εξισώσεις μεταφοράς (σχήμα Euler) και έπειτα επεξηγείται το σχήμα Lagrange για τα σωματίδια. Στο τμήμα αυτό, περιγράφονται τα μοντέλα της εξάτμισης και καύ-

σης των πτητικών, της καύσης του στερεού άνθρακα, που συσχετίζονται με τις εξισώσεις μεταφοράς μάζας και ενέργειας. Στο τέλος, του κεφαλαίου περιγράφεται και το μοντέλο χημικών αντιδράσεων, που εφαρμόζεται για να προσομοιάσει με ακρίβεια και οικονομία την συμπεριφορά των χημικών στοιχείων.

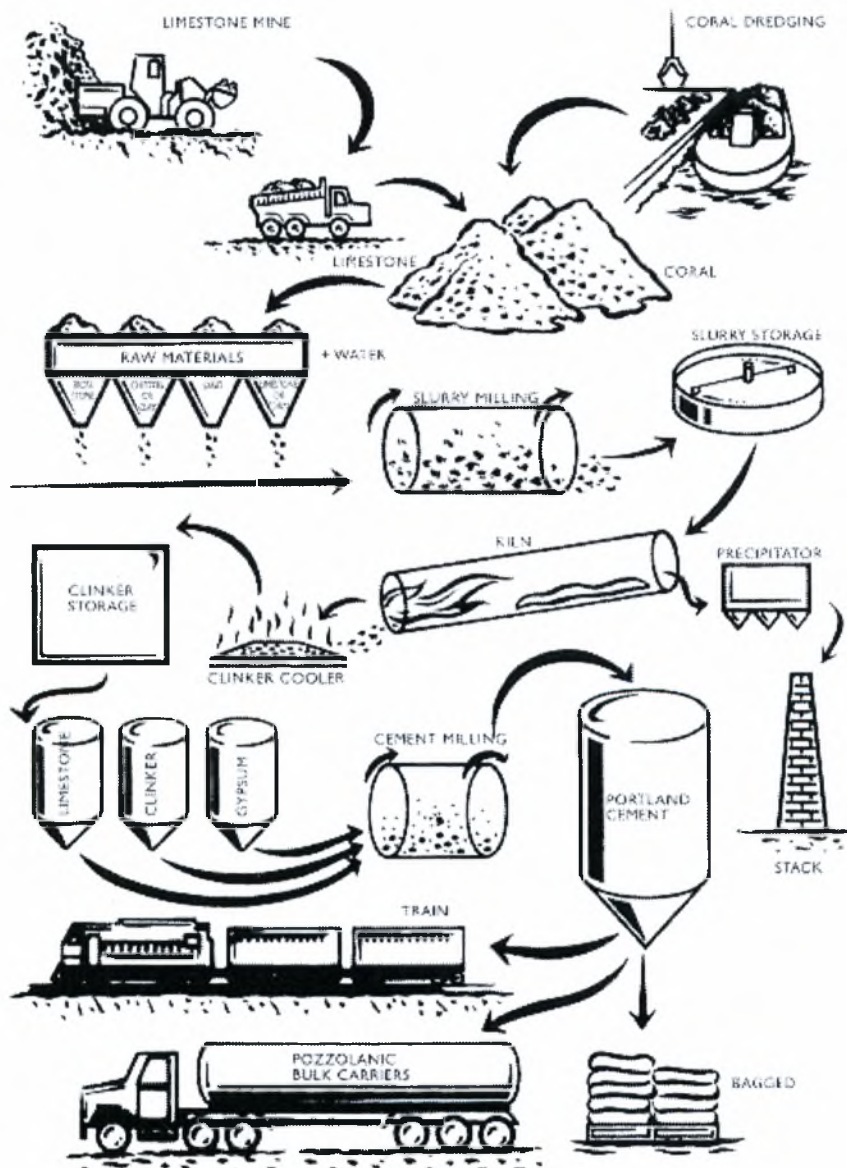
Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η διατύπωση του βιομηχανικού προβλήματος που πραγματεύεται αυτή η εργασία. Γίνεται μια σύντομη περιγραφή του όγκου ελέγχου και δίνονται αναλυτικά στοιχεία για την γεωμετρία της διάταξης. Παρουσιάζονται τα υπολογιστικά πλέγματα και ο τρόπος παραγωγής τους. Διασαφηνίζονται τα μοντέλα προσομοίωσης κατά περίπτωση και δίνονται στοιχεία για την λειτουργία του συγκεκριμένου ασβεστοποιητή. Τέλος, αναλύονται οι αρχικές και οι συνοριακές συνθήκες του φυσικού μοντέλου του προβλήματος.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται συνοπτική αναφορά στην διαδικασία επίλυσης και στους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πορεία σύγκλισης. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται και συζητώνται τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των διαφόρων περιπτώσεων της παραμετρικής μελέτης. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εκτίμηση των αποτελεσμάτων και γίνονται προτάσεις επάνω στην γενική θεώρηση της ασβεστοποίησης, ως παραγωγικής διαδικασίας.

2. Διεργασίες Παραγωγής Τσιμέντου

2.1 Πρώτες Ύλες & Σύσταση Τσιμέντου

Οι απαραίτητες πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου είναι τα ασβεστώδη και τα αργιλώδη υλικά. Τα ασβεστώδη παίρνονται από τον ασβεστόλιθο, τα θαλάσσια όστρακα και την κιμωλία, ενώ τα αργιλώδη, από τον άργιλο, τον αργιλικό σχιστόλιθο, τη στυπτηριακή σχιστόλιθο και την άμμο (για το πυρίτιο και το αλουμίνιο). Η γραμμή παραγωγής τσιμέντου φαίνεται στο Σχήμα 2-1



Σχήμα 2-1 Συνολική γραμμή παραγωγής τσιμέντου [4]

Η αναλογία των πρώτων υλών εξαρτάται από τη χημική σύνθεσή τους και τον τύπο του παραγόμενου τσιμέντου. Ως εκ τούτου απαιτείται συνεχής ανάλυση των πρώτων υλών.

Για την κατεργασία των οποίων ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- ⇒ Αρχικά, γίνεται θραύση του ασβεστόλιθου έως ότου η μέση διάμετρός του να γίνει 10 mm.
- ⇒ Κατόπιν, αναμειγνύεται με άλλες πρώτες ύλες, αποθηκεύεται και γίνεται δειγματοληπτικός έλεγχος.
- ⇒ Ακολουθεί περαιτέρω θραύση σε μύλους φαρίνας προς ελάττωση του μεγέθους μέχρι 90% , πέρασμα σε κόσκινο 200 βροχίδων (οπών), αποθήκευση και ανάμιξη.
- ⇒ Τέλος, οδηγούνται στον Περιστροφικό Κλίβανο (ΠΚ) για έψηση.

2.1.1 Σύσταση του Τσιμέντου

Μια τυπική ανάλυση συστατικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1 [2]

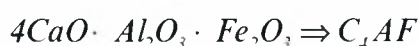
Πίνακας 2-1 Τυπική ανάλυση συστατικών

Φυσική πρώτη ύλη	Ποσοστιαία σύσταση					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	A.Π.
Ασβεστόλιθος	52,0	5,7	0,8	0,3	0,4	40,4
Σχίστης	3,2	53,8	18,9	7,7	2,2	13,1
Άργιλος	0,5	61,0	16,9	12,4	0,4	7,8
Μετάλλευμα Σιδήρου	-	6,7	1,4	89,7	6,4	0,2

Οι πρώτες ύλες περιέχουν και ένα μικρό ποσοστό από προσμίξεις. Επειδή το MgO τήκεται στις θερμοκρασίες κλινκεροποίησης, βοηθάει στην έψηση. Επίσης, βοηθάει στην σφαιροποίηση του κλίνκερ αλλά το πλέγμα που δημιουργείται είναι ανεπιθύμητο διότι μεγάλες συγκεντρώσεις του στο τσιμέντο το κάνουν σαθρό. Τα αλκάλια (K₂O και Na₂O) βρίσκονται στην άμμο και την άργιλο. Αν και η αναλογία αυτών των οξειδίων στα περισσότερα τσιμέντα είναι μικρότερη του 1% μπορεί να παίζουν ένα σημαντικό επιβλαβή ρόλο στον ΠΚ διότι αποτελούν την μεγαλύτερη αιτία σχηματισμού δακτυλιδιών. Στο τσιμέντο επιδρούν δυσμενώς στην διαστολή πέρα από μια αναλογία.

Το κλίνκερ αποτελείται από τέσσερα βασικά οξείδια με αναλογία :64% CaO, 22% SiO₂, 3,5% Al₂O₃ και 3 % Fe₂O₃

Τα κύρια συστατικά του κλίνκερ είναι οι κάτωθι σύμπλοκες ενώσεις :



Το C_3S είναι σπουδαίος παράγοντας για τη μηχανική αντοχή του τσιμέντου. Το κοινό τσιμέντο Portland έχει αναλογία C_3S από 52 έως 62%, ενώ όταν υπάρχει αναλογία C_3S μεγαλύτερη από 65 % στο κλίνκερ, η έψηση είναι πολύ δύσκολη και δίνει πολύ πτωχή χαρακτηριστική τζίρα. Το C_2S βρίσκεται σε αναλογία 22%. Οι τελικές συγκεντρώσεις των C_3S και C_2S εμφανίζονται όταν το κλίνκερ ψήνεται στους $1470^{\circ}C$. Οι θερμοκρασίες στη ζώνη έψησης μερικές φορές ποικίλουν σε ακραία όρια και αυτό επιδρά στις αναλογίες των C_3S και C_2S . Επειδή απαιτείται ψηλότερη θερμοκρασία για τον σχηματισμό του C_3S από ότι του C_2S , χαμηλότερη έψηση οδηγεί σε ψηλότερη αναλογία του C_2S . Το C_3A είναι υπεύθυνο για την κατεργασιμότητα του τσιμέντου. Η κανονική αναλογία του στο κλίνκερ είναι 6-8%, ενώ υψηλότερο C_3A δίνει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Τσιμέντο με υψηλό C_3A δεν αντέχει στην προσβολή των θεικών ενώσεων του νερού. Το C_4AF προσδίδει το χρώμα στο τσιμέντο. Υψηλή αναλογία στο κλίνκερ δίνει σκουρόχρωμο τσιμέντο. Ο σίδηρος Fe επειδή είναι εύτηκτος σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές της κλινκεροποίησης, διευκολύνει τον σχηματισμό των άλλων συστατικών του κλίνκερ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Γενικά, είναι αναγκαίο να υπάρχει συνεχής έλεγχος της σύνθεσης της φαρίνας και διαρκής ρύθμιση της ποιότητάς της, με γνώμονα την καλή ποιότητα κλίνκερ και την εύκολη εψησιμότητά του. Η ομοιόμορφη σύνθεση της φαρίνας έχει μεγάλη σπουδαιότητα για τη σωστή λειτουργία του ΠΚ.

2.1.2 Διεργασίες Παραγωγής Τσιμέντου

Οι διεργασίες για την παραγωγή τσιμέντου, διακρίνονται σε τρεις ομάδες που η κάθε μια βαραίνει ισόποσα στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Οι ομάδες αυτές κατατάσσονται με χρονική σειρά εκτέλεσης σε διεργασίες πριν την έψηση, σε διεργασίες έψησης και σε αυτές μετά την έψηση.

Διεργασίες πριν την έψηση

Περιλαμβάνονται, όλες οι βασικές λειτουργίες που αφορούν την ποιότητα της σύστασης του μίγματος των πρώτων υλών και της καύσιμης ύλης, εάν αυτή είναι το κάρβουνο. Σε αυτή την ομάδα των διεργασιών εντάσσεται η προετοιμασία και ο έλεγχος της λεπτότητας των πρώτων υλών και του κάρβουνου. Συγκεκριμένα, οι διεργασίες που απαρτίζουν την πρώτη ομάδα είναι οι εξής:

- i) Λατόμευση πρώτων υλών (και εξόρυξη κάρβουνου)*
- ii) Θραύση και κατακερματισμός πρώτων υλών*
- iii) Προομογενοποίηση του μίγματος των πρώτων υλών*
- iv) Άλεση στους μύλους φαρίνας*

ν) *Ομογενοποίηση*

Διεργασίες έψησης

Οι διεργασίες έψησης έχουν ως «τελικό» προϊόν το κλίνκερ, και αποτελούν από τις ζωτικότερες διεργασίες σε σημασία, για την ποιότητα του τσιμέντου. Οι διεργασίες έψησης, περιγράφονται και αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου, καθώς η ασβεστοποίηση ως διεργασία ανήκει σ' αυτή την ομάδα. Γενικά, το σύνολο αυτών των διεργασιών έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον μηχανικό, γιατί πραγματοποιούνται όλες οι χημικές αντιδράσεις και οι μετασχηματισμοί, γίνεται η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και παρατηρείται η μεγαλύτερη ποσοστιαία συμμετοχή στο συνολικό κόστος παραγωγής (περίπου 35%). Το σύνολο των διεργασιών αυτών στις οποίες ανήκει και η ασβεστοποίηση συνοψίζεται παρακάτω:

- i) *Προθέρμανση πρώτων υλών.* Στην διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ απαερίων και προαλεσμένης φαρίνας. Ο χρόνος προθέρμανσης των σωματιδίων φαρίνας είναι συνάρτηση του μεγέθους και της φύσης της. Η συστοιχία των κυκλώνων μέσα στους οποίους γίνεται η εναλλαγή θερμότητας, δηλαδή η ανακομιδή θερμότητας, ονομάζεται και συστοιχία ανακομιστών προθέρμανσης.
- ii) *Ασβεστοποίηση.* Η διεργασία αυτή εισήχθηκε στην παραγωγή τσιμέντου τα τελευταία (30) χρόνια. Η καινοτομική συνεισφορά της διεργασίας είναι η εισαγωγή ενός νέου θαλάμου, μεταξύ τρίτου και τετάρτου επιπέδου ανακομιστών, στο οποίο προσαρμόζεται σύστημα καύσης. Ο θάλαμος αυτός τροφοδοτείται με φαρίνα με απώτερο σκοπό να πραγματοποιηθεί κατά 90 με 95% η ασβεστοποίηση της φαρίνας, δηλαδή η διάσπαση του CaCO_3 σε CaO και CO_2 . Έτσι, η είσοδος της ασβεστοποιημένης πλέον φαρίνας στον ΠΚ να γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, σε σχέση με τα απλά συστήματα, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις του και ταυτόχρονα αυξάνοντας την αποδοτικότητα του.
- iii) *Η κυρίως έψηση.* Η διεργασία αυτή λαμβάνει χώρα μέσα στον ΠΚ, όπου οι επικρατούσες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 1350 και 1450°C. Κατά την έψηση, το υλικό εισόδου μετασχηματίζεται με ομώνυμες αντιδράσεις σε ασβεστοπυριτικές, ασβεστοαργιλικές και ασβεστοσιδηραργιλικές ενώσεις, που στο σύνολο τους αποτελούν το 'κλίνκερ'.
- iv) *Ψύξη του κλίνκερ.* Η ψύξη του κλίνκερ γίνεται για να επιτευχθεί η κατάλληλη κρυσταλλογραφική δομή που απαιτείται, έτσι ώστε το τσιμέντο που τελικά θα σχηματιστεί να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Διεργασίες μετά την έψηση

Αμέσως μετά το ψυγείο, το ψυχρό πλέον κλίνκερ οδηγείται στις διατάξεις συνάλεσης με γύψο και διάφορα πρόσθετα βελτιωτικά. Οι μύλοι που χρησιμοποιούνται είναι σφαιρόμυλοι, και καταναλώνουν το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται συνολικά σε όλες τις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου. Με την συνάλεση του κλίνκερ στους σφαιρόμυλους ολοκληρώνεται και η σειρά διεργασιών για την παραγωγή τσιμέντου.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου αυτού, γίνεται μια συστηματική προσέγγιση των βασικών διεργασιών, που συντελούνται κατά την παραγωγή τσιμέντου, έχοντας ως βασικό σημείο αναφοράς την λειτουργία και τις διεργασίες του ασβεστοποιητή. Επιπλέον, παρουσιάζονται και οι αλληλεπιδράσεις του ασβεστοποιητή και των άλλων τμημάτων στη διεργασία έψησης για την παραγωγή τσιμέντου.

2.2 Περιγραφή διεργασιών έψησης

Οι διεργασίες έψησης έχουν σπουδαία σημασία για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, καθώς και για την οικονομική λειτουργία του συστήματος. Αποτελούνται από τις διεργασίες θέρμανσης-ξηράνσης της φαρίνας, την ασβεστοποίηση της, την καύση-συσσωμάτωση (sintering) αυτής και την ψύξη του κλίνκερ.

Η φαρίνα είναι το βασικό υλικό τροφοδοσίας και αποτελείται κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο και διοξείδιο του πυριτίου που χρησιμοποιείται σε κονιοροποιημένη μορφή. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης-ξηράνσης, η φαρίνα θερμαίνεται στους 800°C. Από 100°C έως 500°C, λαμβάνει χώρα η σταδιακή εξάτμιση του ελεύθερου και δεσμευμένου ύδατος. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η διεργασία ασβεστοποίησης. Στους 850-890°C, αρχίζει η ισχυρά ενδόθερμη αντίδραση της ασβεστοποίησης, κατά την οποία το ανθρακικό ασβέστιο διασπάται σε οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα. Η απαραίτητη θερμότητα (ενέργεια ενεργοποίησης) για την εκκίνηση της αντίδρασης ασβεστοποίησης προσφέρεται από την καύση του καυσίμου, το οποίο εισάγεται μαζί με τον απαιτούμενο αέρα στην διάταξη ασβεστοποίησης, σε κατάλληλη θερμοκρασία. Ακολουθεί η καύση-sintering, στην οποία η φαρίνα θερμαίνεται στους 1450°C (θερμοκρασία κλινκεροποίησης - σημείο τήξης του μίγματος). Οι αντιδράσεις κλινκεροποίησης διαρκούν περίπου 10-20 λεπτά. Ένα μεγάλο μέρος του μίγματος βρίσκεται σε υγρή φάση, μέχρι το οξείδιο του άνθρακα να αντιδράσει όλο. Τέλος, το κλίνκερ ψύχεται στους 100-300°C, και στερεοποιείται.

Πολλοί μέθοδοι και συνδυασμοί αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί σε εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής τσιμέντου για να πραγματοποιούν τις προαναφερθείσες διεργασίες. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, στην διαδικασία έψησης, είναι η ξηρή μέθοδος της προθέρμανσης με κατακόρυφες συστοιχίες ανακομιστών προθέρμανσης, όπου η διεργασία ασβεστοποίησης συντελείται έξω από τον περιστροφικό κλίβανο (ΠΚ). Το σύστημα της έψησης αποτελείται από τον περιστροφικό κλίβανο, τις συστοιχίες ανακομιστών προθέρμανσης, τον ασβεστοποιητή και το ψυγείο. Η θέρμανση-ξηράνση γίνεται στο σύστημα ανακομιστών, η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται στον ασβεστοποιητή, η καύση-sintering γίνεται στον περιστροφικό κλίβανο και η διεργασία ψύξης στο ψυγείο του κλίνκερ.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας που διέπουν την ξηρή μέθοδο προθέρμανσης δίνονται στην συνέχεια:

- i) Η διεργασία καύσης-sintering πραγματοποιείται μέσα στον περιστροφικό κλίβανο, όπου το υλικό εκτίθεται σε καυσαέρια θερμοκρασίας 2000°C και επιτυγχάνεται η θερμοκρασία κλινκεροποίησης (sintering). Τα αέρια που παράγονται κατά την καύση, χρησιμοποιούνται*

στο σύστημα προθέρμανσης, με σκοπό την θέρμανση της φαρίνας (τροφοδοσία) κοντά στη θερμοκρασία ασβεστοποίησης και την εξάτμιση της υγρασίας.

ii) Η διαδικασία ασβεστοποίησης πραγματοποιείται στον ασβεστοποιητή, πριν την εισαγωγή της φαρίνας στον κλίβανο, σε θερμοκρασίες της τάξης των 850-890°C, ενώ η καύσιμη ύλη παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την πραγματοποίηση της ενδόθερμης αντίδρασης ασβεστοποίησης.

iii) Στο ψυγείο πραγματοποιείται η διεργασία ψύξης, κατά την οποία ποσότητες ψυχρού αέρα έρχονται σε επαφή με το θερμό κλίνκερ, με αποτέλεσμα το κλίνκερ να ψύχεται στην κατάλληλη θερμοκρασία.

Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζονται οι διατάξεις που συναθροίζουν το σύστημα διεργασίας έψησης με βάση τη ξηρή μέθοδο προθέρμανσης της φαρίνας.

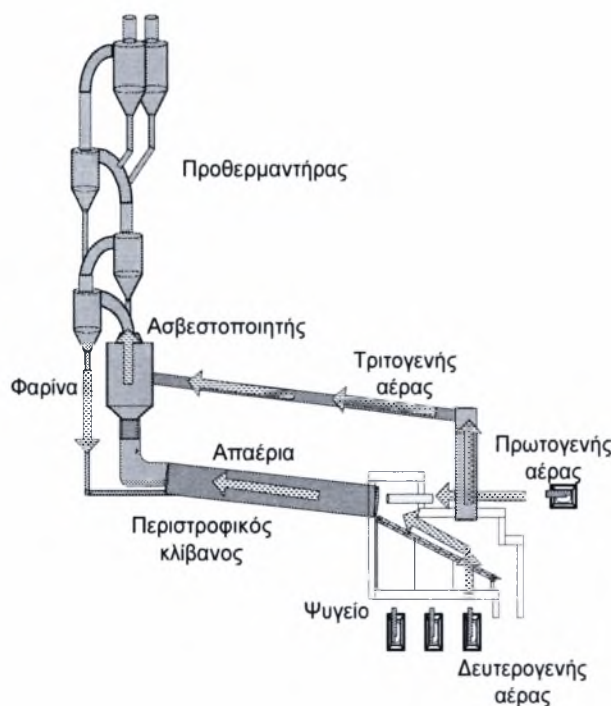
2.2.1 Περιστροφικός κλίβανος

Με βάση την ξηρή μέθοδο τροφοδοσίας, η πιο απλή και μικρή διάταξη που υπάρχει ή έχει χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου απαιτεί, ο περιστροφικός κλίβανος να συνδυάζεται με μια κατακόρυφη σειρά ανακομιστών και έναν ασβεστοποιητή που λειτουργεί έξω από τον κλίβανο.

Ο περιστροφικός κλίβανος είναι ένας κύλινδρος με εσωτερική επίστρωση (συνήθως από

πυρότουβλα), ο οποίος περιστρέφεται με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρων. Το μήκος του κυμαίνεται μεταξύ 50-150m και η διάμετρός του από 3 έως 6m, ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Ο περιστροφικός κλίβανος τοποθετείται με μια μικρή κλίση 3-6° ως προς την οριζόντια διεύθυνση. Στο εσωτερικό του περιστροφικού κλιβάνου υπάρχει ένας καυστήρας, τοποθετημένος στον κεντρικό άξονα του κλιβάνου. Το καύσιμο εισάγεται μέσω του καυστήρα με τη βοήθεια δέσμης αέρα (πρωτογενής αέρας). Επιπλέον, εισάγεται και δευτερογενής αέρας που έχει προθερμανθεί από τα καυσαέρια.



* Σχήμα 2-2 Θέση του περιστροφικού κλιβάνου

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2, η φαρίνα εισάγεται από τα αριστερά του κλιβάνου, καθώς αυτός περιστρέφεται. Το υλικό ρέει αργά προς το μέρος του καυστήρα, στη δεξιά άκρη του κλιβάνου, και εκτίθεται σε αέριες μάζες με θερμοκρασία 2000°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θερμαίνεται στους 1450°C, όπου λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις κλινκεροποίησης. Μετά τη ζώνη καύσης, το υλικό (κλίνκερ) οδηγείται στο ψυγείο, όπου ψύχεται στους 100-300°C. Ένα μέρος της ενέργειας του θερμού κλίνκερ χρησιμοποιείται για να θερμάνει τον πρωτογενή αέρα ενώ το υπόλοιπο για το δευτερογενή και τριτογενή αέρα που χρησιμοποιείται στο σύστημα καύσης του κλιβάνου και του ασβεστοποιητή αντίστοιχα. Σημαντικές μεταβλητές για την λειτουργία του περιστροφικού κλιβάνου είναι η δυναμικότητα και το φορτίο του. Το φορτίο του κλιβάνου προσδιορίζει τη δυναμικότητα του κλιβάνου. Το φορτίο του περιστροφικού κλιβάνου αντιπροσωπεύει το βαθμό πλήρωσης του κλιβάνου. Το υλικό συσσωρεύεται σε ένα μέρος του κλιβάνου. Το πηλίκο του εμβαδού που καταλαμβάνει το υλικό προς το εμβαδόν διατομής του κλιβάνου, καλείται βαθμός ή ποσοστό της πλήρωσης του κλιβάνου (Σχήμα 2-3). Ο βαθμός πλήρωσης κυμαίνεται μεταξύ 5-17% της συνολικού όγκου του κλιβάνου, αλλά για τη σωστή λειτουργία του κλιβάνου δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 13%, καθόσον εμποδίζεται η μεταφορά θερμότητας. Ο βαθμός πληρότητας του κλιβάνου έχει μεγάλη επίδραση και στην απόδοση του κλιβάνου. Για σταθερή διάμετρο κλιβάνου, η απόδοση του αυξάνεται, όταν αυξάνεται η πλήρωση του κλιβάνου και αντίστροφα. Οι παράγοντες που επιδρούν στην πληρότητα του κλιβάνου είναι κατά κύριο λόγο η κλίση του κλιβάνου και κατά δεύτερο λόγο το κλάσμα του μήκους προς την διάμετρο. Μεγάλες κλίσεις του κλιβάνου οδηγούν σε χαμηλά φορτία, ενώ μεγάλα πηλίκια μήκους προς διάμετρο του κλιβάνου οδηγούν σε υψηλά φορτία.



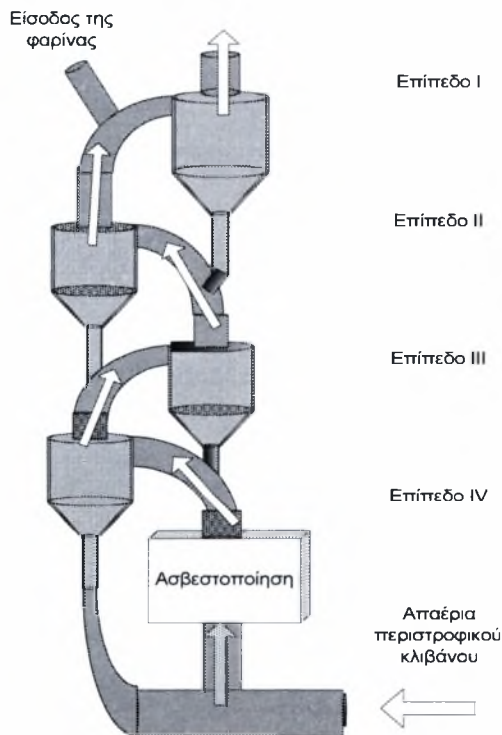
Σχήμα 2-3 Φορτίο πλήρωσης ΠΚ

τη περιστροφική ταχύτητα του κλιβάνου. Έτσι, ο χρόνος παραμονής της φαρinas στον κλιβάνο μπορεί να ελεγχθεί, αλλάζοντας την ταχύτητα περιστροφής του κλιβάνου. Εκτός από τη ροή της φαρinas μέσα στον κλιβάνο, λαμβάνει χώρα και η διεργασία της καύσης-sintering, η

οποία επηρεάζει την ταχύτητα της καθώς μετατρέπεται από στερεά σε ρευστή κατάσταση. Αυτή η διαφοροποίηση πρέπει επίσης, να ληφθεί υπόψη για την εκτίμηση του χρόνου παραμονής της φαρίνας μέσα στον περιστροφικό κλίβανο.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κλιβάνου, σχηματίζεται μια προστατευτική επένδυση πάνω στα πυρότουβλα της εσωτερικής επένδυσης του κλιβάνου. Ένα λεπτό στρώμα ρευστού κλίνκερ με χαμηλό ιξώδες επικάθεται-επικολλάται στα τοιχώματα του κλιβάνου. Η ψύξη των τοιχωμάτων του κλιβάνου έχει ως συνέπεια την αύξηση του ιξώδους στρώματος, που λειτουργεί προστατευτικά για τα τοιχώματα, καθώς αυξάνει την διάρκεια ζωής της εσωτερικής επένδυσης του. Η ψύξη γίνεται με διέλευση κρύου νερού μέσα από ενσωματωμένους αγωγούς μέσα στον ΠΚ. Η επένδυση ονομάζεται "τζίρα" και έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των πυρότουβλων.

2.2.2 Προθέρμανση



Σχήμα 2-4 Συστοιχία ανακομιστών προθέρμανσης

Το σύστημα τεσσάρων επιπέδων ανακομιστών προθέρμανσης είναι η πιο κοινή και τυπική διάταξη προθέρμανσης της φαρίνας, που χρησιμοποιείται σύμφωνα με τη ξηρή μέθοδο στις περισσότερες βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου. Αποτελείται από τέσσερις ανακομιστές-κυκλώνες τοποθετημένους κατακόρυφα, όπως δείχνει το Σχήμα 2-4. Κάθε ανακομιστής που επικοινωνεί με τον επόμενο, σχηματίζει ένα επίπεδο προθέρμανσης. Στο κάτω μέρος κάθε κυκλώνα υπάρχει ένας σωλήνας απορροής που οδηγεί την φαρίνα στο επόμενο στάδιο. Ο σωλήνας απορροής του τελευταίου κυκλώνα, οδηγεί τη φαρίνα στον περιστροφικό κλίβανο.

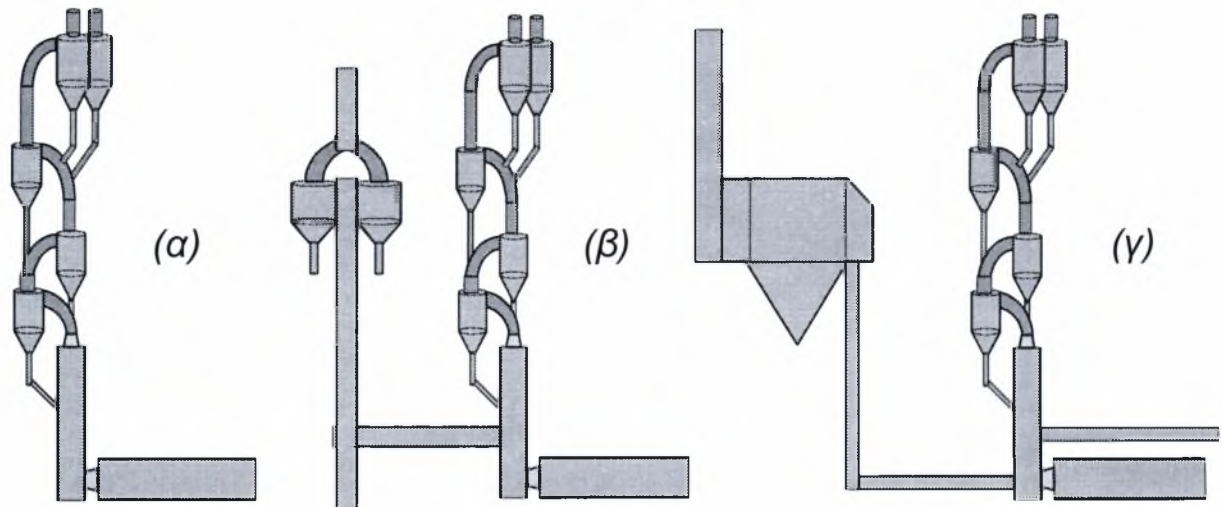
Η εισαγωγή της φαρίνας γίνεται από το πρώτο και υψηλότερο επίπεδο προθέρμανσης, ενώ τα θερμά αέρια που εξέρχονται από τον κλίβανο εισάγονται από το χαμηλότερο επίπεδο του τελευταίου ανακομιστή προθέρμανσης και ρέουν ως τα υψηλότερα επίπεδα. Όταν η φαρίνα έρθει σε επαφή με τα θερμά αέρια, πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των σωματιδίων της και συγχρόνως μεταφέρεται θερμότητα από τα απαέρια στα σωματίδια. Με αυτό τον τρόπο, θερμαίνεται η φαρίνα και επιτυγχάνεται η θερμοκρασία ασβεστοποίησης.

Η φαρίνα συναντά τα θερμά αέρια στον αγωγό προσαγωγής που οδηγεί στον ανακομιστή του πρώτου επιπέδου, όπου και παρασέρνεται για να γίνει ο διαχωρισμός της και το στάδιο θέρμανσης της. Στη συνέχεια, η φαρίνα μέσω του σωλήνα απορροής στο κάτω μέρος του πρώτου κυκλώνα, συναντά στο σωλήνα προσαγωγής του δεύτερου επιπέδου προθέρμανσης θερμά αέρια, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν τη φαρίνα στο δεύτερο επίπεδο ανακομιστών, όπου πραγματοποιείται παρόμοια διαδικασία. Όταν η φαρίνα εγκαταλείπει τον κυκλώνα του τρίτου επιπέδου, εισέρχεται στη ζώνη ασβεστοποίησης, όπου πραγματοποιείται η ασβεστοποίηση της φαρίνας. Η ασβεστοποιημένη, πλέον φαρίνα και τα απαέρια οδηγούνται στον κυκλώνα του τέταρτου επιπέδου προθέρμανσης και στη συνέχεια στον περιστροφικό κλίβανο. Στα υψηλά επίπεδα προθέρμανσης εξατμίζεται το νερό της φαρίνας, ενώ στα χαμηλότερα επίπεδα θερμαίνεται η φαρίνα κοντά στη θερμοκρασία ασβεστοποίησης, ασβεστοποιείται και τελικά, εισάγεται στον περιστροφικό κλίβανο με κατάλληλη θερμοκρασία.

Στο πρώτο επίπεδο προθέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν δυο όμοιοι κυκλώνες προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερος διαχωρισμός της φαρίνας. Όμως, για την μεγαλύτερη αποδοτικότητα, χρησιμοποιούνται συνήθως δυο γραμμές προθέρμανσης και όχι υπερδιαστασιοποιημένοι αγωγοί απορροής και προσαγωγής, ανακομιστές και διατάξεις συνδέσεων, που μπορεί να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα.

Η συγκέντρωση των αλκαλίων στο τσιμέντο επιβάλλεται να είναι χαμηλή, διότι τα αλκάλια επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Η συγκέντρωσή τους δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.6%, για να διασφαλιστεί η ποιότητα του σκυροδέματος. Τα αλκάλια εισάγονται στον περιστροφικό κλίβανο και μεταβιβάζονται στο κλίνκερ, από τα μεταλλικά στοιχεία της φαρίνας και από το καύσιμο, κατά τη διάρκεια της έψησης. Μετά τους 800°C, αρχίζει η εξάτμιση των πτητικών αλκαλίων τα οποία μεταφέρονται μέσω των αέριων καύσης έξω από τον κλίβανο. Στις ψυχρότερες ζώνες των διαδικασιών έψησης, τα αλκάλια συμπυκνώνονται (κυρίως στο τρίτο και στο τέταρτο επίπεδο προθέρμανσης). Συγκεκριμένα, το 81-97 % του K_2 συμπυκνώνεται κατά την προθέρμανση, ενώ το Na_2 συμπυκνώνεται σε χαμηλότερο ποσοστό. Έτσι μόνο, το 3-19% των αλκαλίων αφήνει την συστοιχία ανακομιστών προθέρμανσης μέσω των απαερίων. Συνεπώς, η σκόνη που μεταφέρεται με τα απαέρια μπορεί να εισαχθεί πάλι για έψηση, παρά την χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια. Η επανείσοδος αυτής της «σκουριάς» αλκαλίων καλείται "εξωτερικός αλκαλικός κύκλος", ενώ η επανείσοδος των συμπυκνωμένων αλκαλίων με τη φαρίνα μέσα στον κλίβανο "εσωτερικός αλκαλικός κύκλος". Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειωθεί ο εσωτερικός αλκαλικός κύκλος και συνεπώς να μειωθεί η περιεκτικότητα του κλίνκερ σε αλκάλια είναι η παράκαμψη ενός μέρους των απαερίων από το χαμηλότερο μέρος του σωλήνα προσαγωγής του τέταρτου επιπέδου της προθέρμανσης.

Το Σχήμα 2-5 δείχνει τρία διαφορετικά συστήματα παράκαμψης για την διάταξη προθέρμανσης.



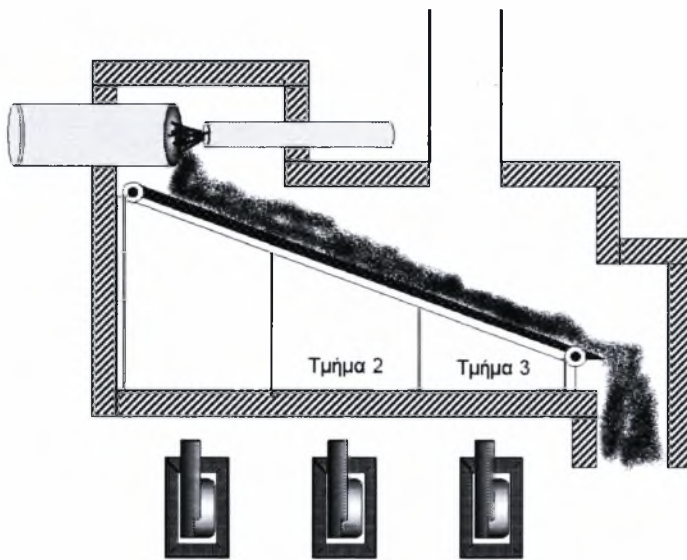
Σχήμα 2-5 α) Ολική, β) Μερική & γ) Μηδενική χρησιμοποίηση των απαερίων στα συστήματα προθέρμανσης

Στο πρώτο (α) σύστημα, τα αέρια παράκαμψης διαχωρίζονται σε δυο κυκλώνας, καθαρίζονται από τη σκόνη και επιστρέφουν στη διάταξη προθέρμανσης. Το δεύτερο (β) σύστημα, είναι όμοιο με το πρώτο, με τη διαφορά ότι τα καθαρά αέρια οδηγούνται σε ένα πέμπτο κυκλώνα. Στο τρίτο (γ) σύστημα, τα αέρια παράκαμψης οδηγούνται απευθείας σε ένα συλλέκτη σκόνης. Για κάθε ένα από τα παραπάνω συστήματα παράκαμψης, τα αέρια πρέπει να ψυχθούν κάτω από τους 480°C ($\sim 900^{\circ}\text{F}$) με κρύο αέρα, εξαιτίας της χημικής συμπεριφοράς των αλκαλίων. Μετά από αυτό, ειδικότερα για το τρίτο σύστημα, το αέρια πρέπει να ψυχθούν με σταγονίδια νερού για την απόκτηση κατάλληλης θερμοκρασίας εισόδου στο συλλέκτη σκόνης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παράκαμψη πάνω από 25% του συνολικού όγκου των απαερίων δεν είναι πρακτική γιατί από το ποσοστό αυτό και πέρα, η μείωση των αλκαλίων είναι πολύ χαμηλή ενώ το λειτουργικό κόστος είναι πολύ υψηλό. Συνήθως, μόνο το 3-10% του συνολικού όγκου των απαερίων παρακάμπτεται. Συγκεκριμένα, για ποσοστό παράκαμψης 10%, η σκόνη που μεταφέρεται από τα αέρια είναι ίση με το 1% της συνολικής μάζας της φαρίνας.

2.2.3 Ψυγείο κλίνκερ

Το ψυγείο αποτελεί ένα μέρος της διάταξης έψησης, στο οποίο πραγματοποιείται η ψύξη του κλίνκερ, αποτελείται από μεταφορικές ταινίες που κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες. Η περιοχή ψύξης είναι διαιρεμένη σε πολλά τμήματα, που ορίζουν αντίστοιχες ζώνες αέρα (θερμές και ψυχρές ζώνες). Το ψυγείο υποστηρίζεται επίσης από φουσητήρες αέρος. Προς το



Σχήμα 2-6 Ψυγείο κλίνκερ

τέλος της διάταξης, υπάρχει η έξοδος για το ψυχρό κλίνκερ και οι αεραγωγοί για την οδήγηση του τριτογενή αέρα.

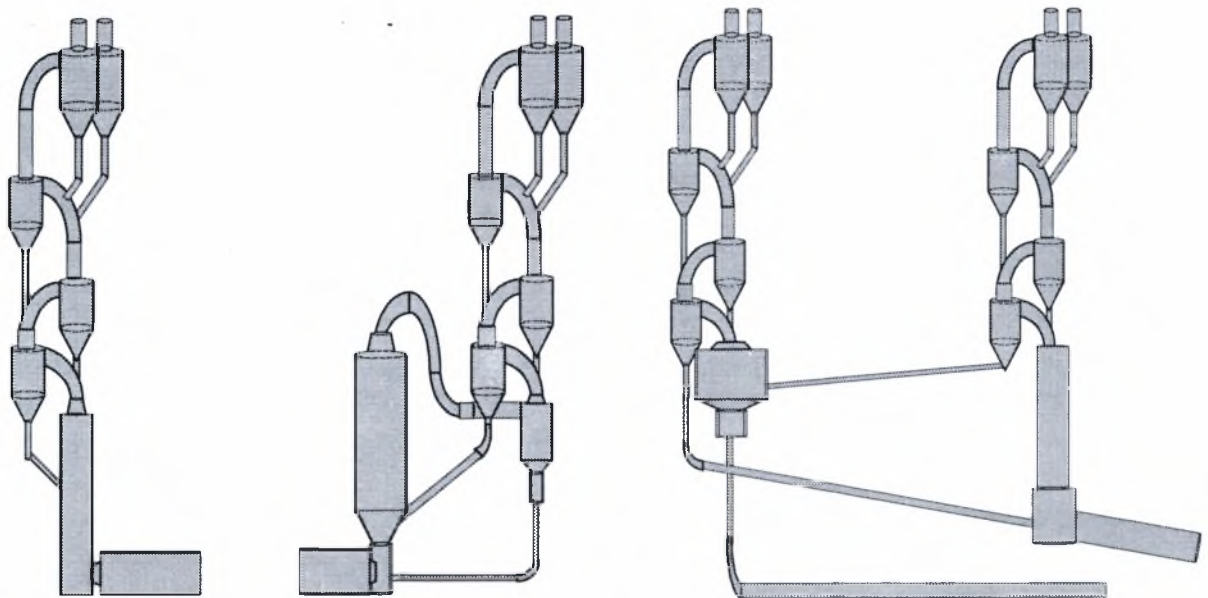
Το κλίνκερ εξέρχεται από τον κλίβανο και εισέρχεται στο ψυγείο, στο οποίο εναποτίθεται στο σύστημα των μεταφορικών ταινιών, σχηματίζοντας τη στρώση κλίνκερ. Το θερμό κλίνκερ κινείται προς την έξοδο του ψυγείου. Οι φουσητήρες παρέχουν πρωτογενή αέρα στα τμήματα-ζώνες του ψυγείου

από όπου διαπερνούν τη στρώση του κλίνκερ. Έτσι, ο πρωτογενής αέρας θερμαίνεται ενώ το κλίνκερ ψύχεται. Ο δευτερογενής αέρας θερμαίνεται έως τους 900°C και χρησιμοποιείται σαν αέρας καύσης στον περιστροφικό κλίβανο, ενώ ο τριτογενής αέρας θερμαίνεται στους $750\text{-}850^{\circ}\text{C}$ και χρησιμοποιείται σαν αέρας καύσης στον ασβεστοποιητή. Το κλίνκερ στο τέλος της διεργασίας έχει ψυχθεί στους $100\text{-}300^{\circ}\text{C}$.

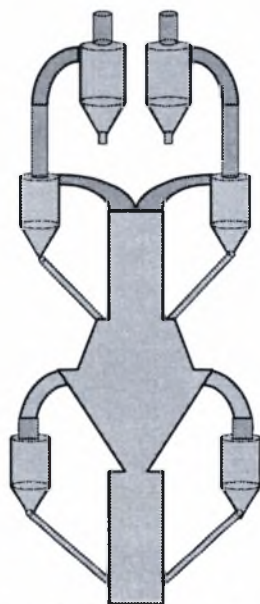
2.2.4 Συστήματα ασβεστοποίησης

Ο ασβεστοποιητής είναι ένας αντιδραστήρας εντός του οποίου πραγματοποιείται η διάσπαση της φαρίνας σε οξείδιο του ασβεστίου και διοξείδιο του άνθρακα. Η φαρίνα αφού θερμανθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία εισάγεται στον ασβεστοποιητή, μαζί με το καύσιμο και τον θερμό τριτογενή αέρα. Η απαιτούμενη θερμότητα-ενέργεια για την πραγματοποίηση της ισχυρά ενδόθερμης αντίδρασης της ασβεστοποίησης της φαρίνας, προσδίδεται από το καύσιμο. Η ασβεστοποιημένη πλέον φαρίνα εισάγεται στον περιστροφικό κλίβανο.

Υπάρχουν πολλά συστήματα ασβεστοποίησης τα οποία χρησιμοποιούνται, στην βιομηχανία τσιμέντου. Η επιλογή του συστήματος προθέρμανσης το οποίο λειτουργεί σε συνδυασμό με τον ασβεστοποιητή, για την κατάλληλη θέρμανση της φαρίνας λίγο πριν την εισαγωγή της στον ασβεστοποιητή, εξαρτάται από την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Ο τρόπος εισαγωγής και χρησιμοποίησης, των απαερίων του κλιβάνου και του αέρα του ψυγείου εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα του προϊόντος και από το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Η απαίτηση χαμηλής συγκέντρωσης NO_x είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διάταξη (κατασκευαστική συγκρότηση) του ασβεστοποιητή. Οι τρόποι να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν γ. την



Σχήμα 2-7 Συστοιχία α) 4 επιπέδων, β) 5 επιπέδων ανακομιστών και γ) 2 δίδυμων γραμμών 4 επιπέδων προθέρμαν-

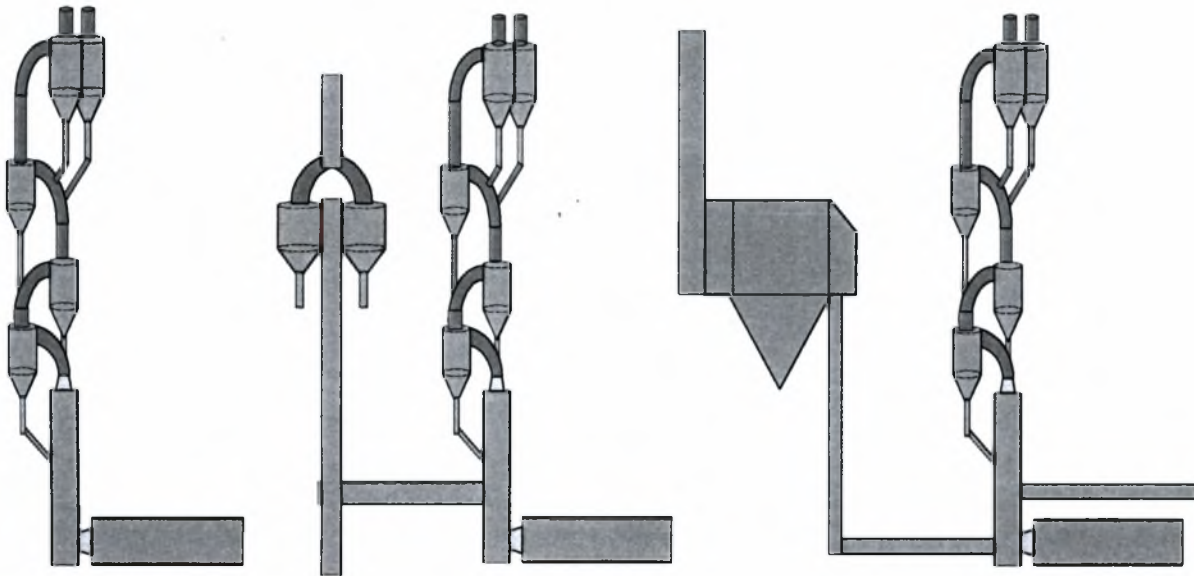


Σχήμα 2-8 Διπλή συστοιχία προθέρμανσης

κατηγοριοποίηση (κατάταξη) των συστημάτων ασβεστοποίησης, γιατί ο αντιδραστήρας ασβεστοποίησης είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να συνεργάζεται με τα υπόλοιπα μέρη των διαδικασιών έψησης, ικανοποιώντας τις παραπάνω απαιτήσεις. Για αυτό το λόγο θα αναφερθούν και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του αντιδραστήρα ασβεστοποίησης με όλα τα μέρη των διαδικασιών έψησης. Μεταξύ των αντιδραστήρων που έχουν χρησιμοποιηθεί ή χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνονται ένας φούρνος, μια ρευστοποιημένη κλίνη, μια ειδική μετατροπή του προσαγωγού του χαμηλότερου επιπέδου προθέρμανσης, ένας κυλινδρικός θάλαμος, ένας κυκλώνας και μερικές ειδικές κατασκευές για αφύγρανση. Ως σύστη-

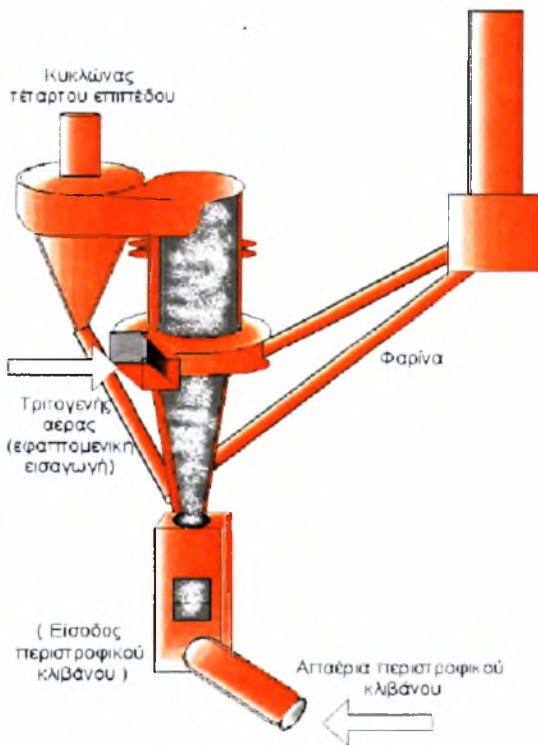
μα προθέρμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συστοιχία ανακομιστών (4) επιπέδων προθέρμανσης, η συστοιχία (5) επιπέδων αντίστοιχα, το δίδυμο σύστημα με δυο σειρές προθέρμανσης, ή το σύστημα διπλού κυκλώνα προθέρμανσης (2 δίδυμες (4) επιπέδων συστοιχίες ανακομιστών με κατάλληλη σύνδεση με τον ασβεστοποιητή και τον ΠΚ).

Η χρησιμοποίηση των απαερίων του κλιβάνου μπορεί να είναι ολική, μερική ή μηδενική (για τη θέρμανση της φαρίνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ολόκληρη η ποσότητα των απαερίων ή ένα μέρος αυτών-παράκαμψη ή να μην χρησιμοποιηθεί καθόλου) (Σχήμα 2-9).



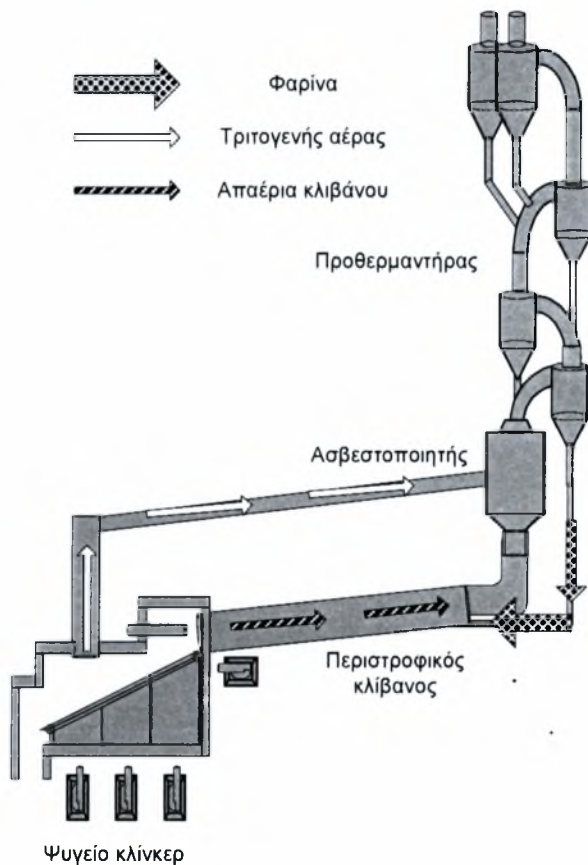
Σχήμα 2-10 Συνολική, Μερική & Μηδενική χρησιμοποίηση των απαερίων του Π.Κ. στα συστήματα προθέρμανσης

Ο θερμός αέρας από το ψυγείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αέρας καύσης στον ασβεστοποιητή, καθώς και για την προθέρμανση της φαρίνας. Μπορεί να εισαχθεί στον ασβεστοποιητή μέσω ενός ξεχωριστού αγωγού, ή μέσω του περιστροφικού κλιβάνου. Συνδυασμοί αυτών των διατάξεων συνθέτουν το σύνολο της λειτουργίας του συστήματος ασβεστοποίησης σε μονάδες παραγωγής τσιμέντου. Η 4 επιπέδων συστοιχία ανακομιστών είναι το πιο κοινό σύστημα προθέρμανσης στη βιομηχανία τσιμέντου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται τα απαέρια του κλιβάνου (χωρίς παράκαμψη) για να θερμάνουν την φαρίνα στη θερμοκρασία ασβεστοποίησης, ενώ ο αέρας από το ψυγείο μεταφέρεται από ξεχωριστό αγωγό και χρησιμοποιείται σαν αέρας καύσης στον ασβεστοποιητή.



Σχήμα 2-9 Τομή του ασβεστοποιητή Flash Furnash

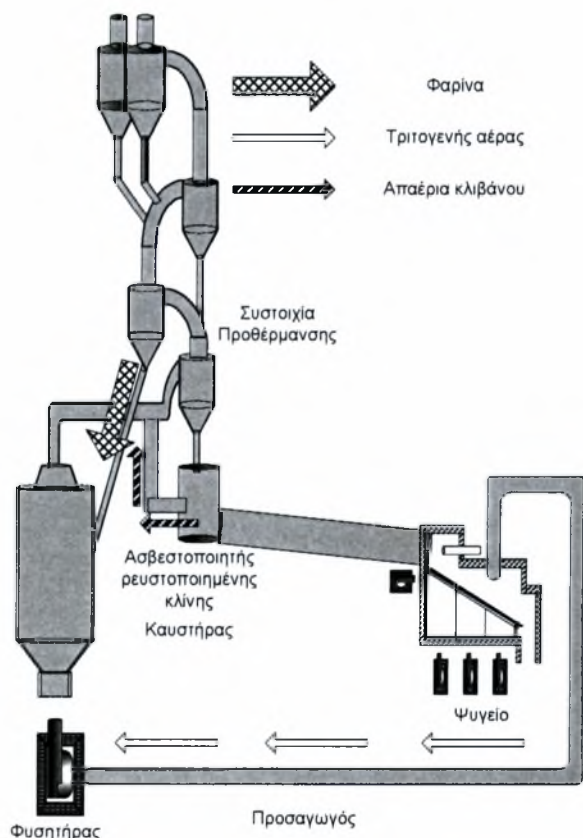
Συστήματα ασβεστοποίησης που λειτουργούν με βάση αυτή την αρχή είναι: α) SF Suspension Preheater, β) MFC Suspension Preheater, γ) RSP Suspension Preheater, δ) AG Pyroclon Precalciner και ε) KSV Preheater. Στην διάταξη ανακομιστών προθέρμανσης SF, ο αντιδραστήρας ασβεστοποίησης καλείται Flash Furnash, μια τομή του οποίου διακρίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2-11 Διάταξη συστημάτων έψησης κατά την διεργασία SF

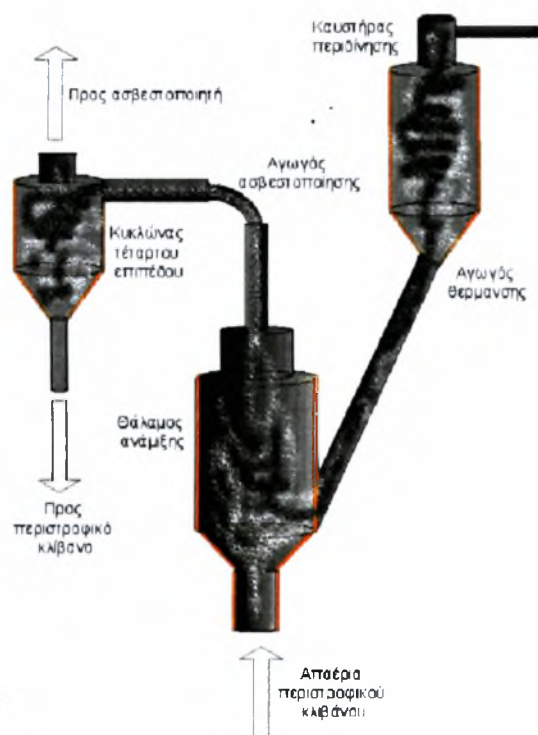
Αυτή η δράση οδηγεί στην ανάπτυξη μια περιοχής αρνητικής πίεσης στον άξονα του θαλάμου. Για αυτό το λόγο το καύσιμο και η φαρίνα εισάγονται κατά τον άξονα του θαλάμου. Η παραγόμενη θερμότητα από το καύσιμο προσδίδεται στη φαρίνα για να γίνει η ασβεστοποίηση της φαρίνας. Μετά τον θάλαμο αντίδρασης το μίγμα περνάει στον τέταρτο ανακομιστή προθέρμανσης. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ολόκληρη η διαδικασία έψησης.

Στο Σχήμα 2-11 φαίνεται ένας ασβεστοποιητής τύπου Flash Furnash. Όπως διακρίνεται, ο ασβεστοποιητής αποτελείται από δύο μέρη. Το χαμηλότερο μέρος είναι ο θάλαμος περιδίνησης (vortex chamber) ενώ το άνω μέρος είναι ο θάλαμος αντίδρασης (reaction chamber). Στο χαμηλότερο μέρος, ο θερμός αέρας εισάγεται από το ψυγείο εφαπτομενικά συναντά τα απαέρια καύσης από τον ΠΚ και το μίγμα ανέρχεται με τα σωματίδια της φαρίνας να εκτελούν περιστροφική κίνηση. Εξαιτίας της περιστροφικής σπειροειδής κίνησης, η διασπορά των σωματιδίων είναι πολύ μεγάλη.



Σχήμα 2-12 Συστοιχία προθέρμανσης MFC διάταξης
Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών-TMMB

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-12, ο θερμός αέρας από το ψυγείο εισάγεται μέσω ξεχωριστού αγωγού επαπτομενικά στο θάλαμο ανάμιξης, ενώ τα απαέρια του κλιβάνου εισάγονται από τον πυθμένα (βάση). Η ασβεστοποιημένη φαρίνα αφήνει τον ασβεστοποιητή από το άνω επίπεδο και εισέρχεται στον κλιβάνο.

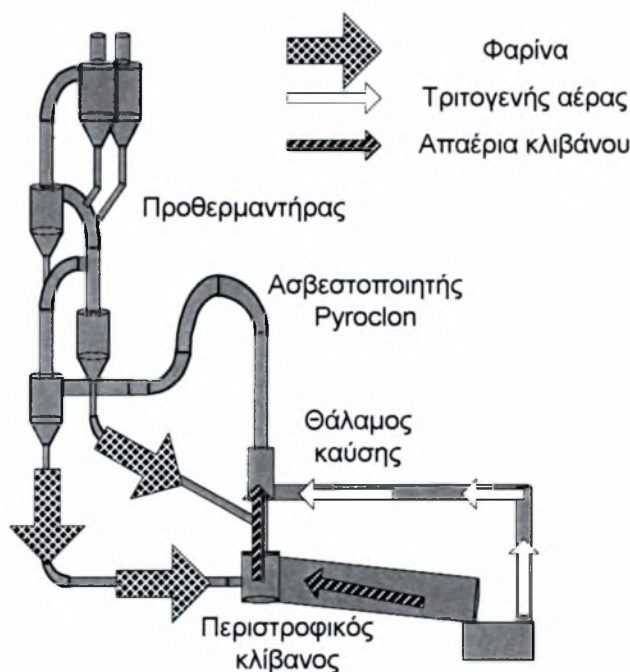


Σχήμα 2-13 Τομή του τροποποιημένου αγωγού για την διάταξη ανακομιστών RSP

ληλο με το προηγούμενο, το οποίο οδηγεί στον κυκλώνα του τέταρτου επιπέδου του προθέρμανσης. Τα αέρια καύσης περιστρέφονται στο πρώτο τμήμα, ενώ η φαρίνα εισάγεται στο πάνω επίπεδο του πρώτου τμήματος, θερμαίνεται από τα αέρια καύσης και οδηγείται στον θάλαμο ανάμιξης. Αφού συναντήσει τα απαέρια του κλιβάνου, η φαρίνα οδηγείται στο δεύτερο διαμέρισμα, στο οποίο πραγματοποιείται η ασβεστοποίηση. Έπειτα η ασβεστοποιημένη φαρίνα οδηγείται στον τετάρτου επιπέδου ανακομιστή προθέρμανσης.

Στη διάταξη ανακομιστών προθέρμανσης MFC (Mitsubishi Fluidised Calcliner), ο ασβεστοποιητής είναι μία ρευστοποιημένη κλίνη και λειτουργεί σε συνδυασμό με μία συνήθη συστοιχία τεσσάρων ανακομιστών προθέρμανσης (Σχήμα 2-12).

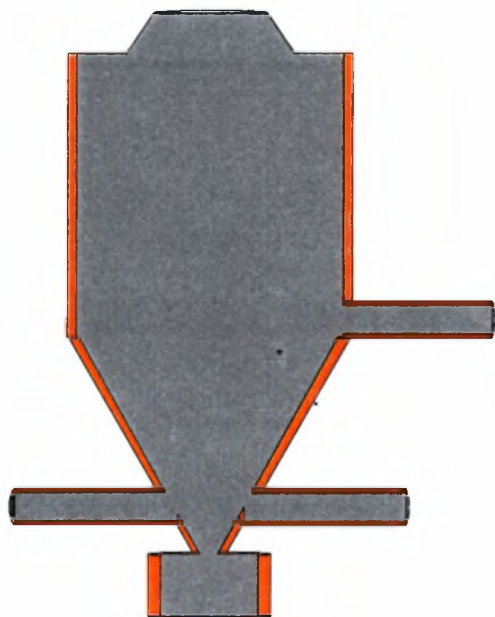
Στη διάταξη ανακομιστών προθέρμανσης RSP (Rainforced Suspension Preheater), ο αντιδραστήρας ασβεστοποιητής λειτουργεί και αυτός με μία συνήθη συστοιχία τεσσάρων ανακομιστών προθέρμανσης σε συνδυασμό με μια τροποποίηση του τελευταίου επιπέδου προσαγωγού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-13 αποτελείται από δυο τμήματα. Το πρώτο είναι ο χώρος θέρμανσης, ο οποίος τροφοδοτείται με ένα καυστήρα περιδίνησης και το δεύτερο, είναι ο χώρος ασβεστοποίησης, παράλ-



Σχήμα 2-14 Συστοιχία προθέρμανσης-ασβεστοποίησης AG Pyroclon

Στη διάταξη AG Pyroclon Precalciner Rainforced Suspension Preheater (πρωτοεμφανίστηκε από τους Humboldt & Weday), ο ασβεστοποιητής είναι μια τροποποίηση του προσαγωγού αερίων (Σχήμα 2-14). Αυτός ο αγωγός επικοινωνεί με θάλαμο καύσης, όπου η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται με τα απαέρια του κλιβάνου και τον τριτογενή αέρα του ψυγείου. Έπειτα, η ασβεστοποιημένη φαρίνα εισάγεται στο κυκλώνα του τέταρτου επιπέδου προθέρμανσης από την κορυφή και από τη βάση. Όπως δείχνει και το σχήμα, ένας ξεχωριστός αγωγός οδηγεί το τριτογενή αέρα στο θάλαμο καύσης.

Στη διάταξη KSV (Kawasaki Spouted Bed and Vortex chamber αναπτύχθηκε από την Kawasaki Heavy Industries Co.), ο αντιδραστήρας ασβεστοποίησης είναι ένας φούρνος, ο οποίος λειτουργεί σε συνδυασμό με μία συνήθη 4 επιπέδων συστοιχία ανακομιστών προθέρμανσης και αποτελείται από δυο τμήματα. Το πρώτο διαμέρισμα, είναι ένα κεκλιμένη κυλιόμενη κλίνη. Έχει μια είσοδο στη βάση του για τα απαέρια του κλιβάνου, και άλλες δυο εισόδους για την εφαιπτομενική είσοδο του τριτογενούς αέρα από το ψυγείο. Η φαρίνα εισάγεται στο κυλινδρικό θάλαμο του κυλιόμενης κλίνης, όπου έχουν τοποθετηθεί καυστήρες. Τα σωματίδια της φαρίνας κυκλοφορούν μέσα στο θάλαμο όπου πραγματοποιείται η διεργασία ασβεστοποίησης. Η ασβεστοποιημένη φαρίνα με τη βοήθεια των αερίων μεταφέρεται στο άνω μέρος του θαλάμου περιδίνησης, και από εκεί στο ανακομιστή



Σχήμα 2-15 Τομή ασβεστοποιητή KSV

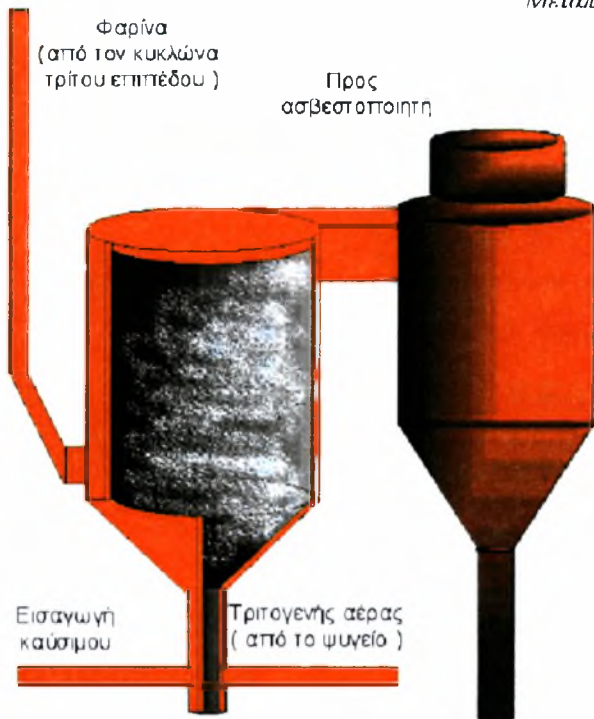
προθέρμανσης μέσω του προσαγωγού.

Υπάρχουν συστήματα ασβεστοποίησης, τα οποία λειτουργούν σε συνδυασμό με συμβατικές συστοιχίες ανακομιστών χωρίς παράκαμψη των απαερίων καύσης και η ροή του θερμού αέρα από το ψυγείο γίνεται μέσω του περιστροφικού κλιβάνου. Έτσι το λειτουργικό κόστος μειώνεται και αποφεύγονται μερικά προβλήματα ελέγχου. Τέ-

μενη κλίνη. Έχει μια είσοδο στη βάση του για τα απαέρια του κλιβάνου, και άλλες δυο εισόδους για την εφαιπτομενική είσοδο του τριτογενούς αέρα από το ψυγείο. Η φαρίνα εισάγεται στο κυλινδρικό θάλαμο του κυλιόμενης κλίνης, όπου έχουν τοποθετηθεί καυστήρες. Τα σωματίδια της φαρίνας κυκλοφορούν μέσα στο θάλαμο όπου πραγματοποιείται η διεργασία ασβεστοποίησης. Η ασβεστοποιημένη φαρίνα με τη βοήθεια των αερίων μεταφέρεται στο άνω μέρος του θαλάμου περιδίνησης, και από εκεί στο ανακομιστή



Σχήμα 2-16 Τομή της τροποποιημένης εισαγωγής φαρίνας, που υφίσταται συγχρόνως ασβεστοποίηση



Σχήμα 2-17 Άποψη του προασβεστοποιητή

τοια συστήματα χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες διαδικασίες:

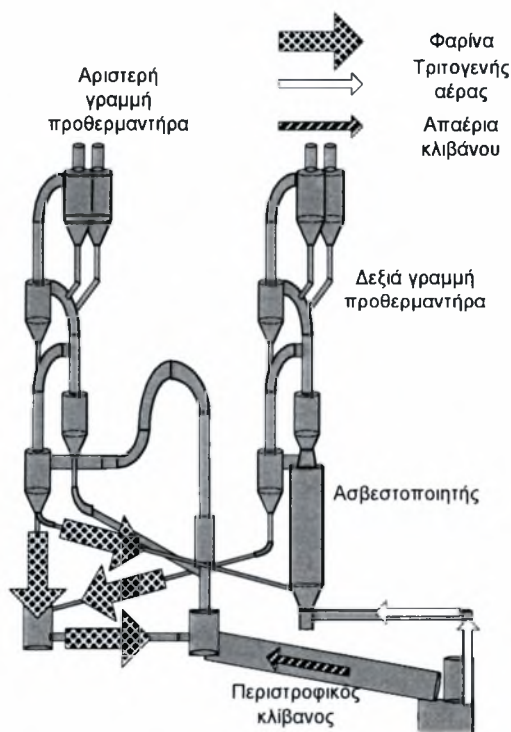
α) Η διεργασία AG Pyroclon Precalciner S πραγματοποιείται όπως ακριβώς και η διεργασία AG Pyroclon Precalciner R, με τη διαφορά ότι ο αέρας καύσης για την ασβεστοποίηση διέρχεται μέσω του κλιβάνου.

β) Στη διεργασία εισόδου kiln inlet (αναπτύχθηκε από την F.L. Smidth. Co.) ο ασβεστοποιητής είναι μια τροποποίηση της εισόδου του περιστροφικού κλιβάνου. Η φαρίνα εισάγεται μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου σωλήνα στον κλιβάνο (Σχήμα 2-18). Όταν η φαρίνα συναντά τα θερμά απαέρια του κλιβάνου αποκτά μια περιστροφική

κίνηση και οδηγείται στην διάταξη προθέρμανσης και ξεκινά η διεργασία της ασβεστοποίησης. Η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται στη ζώνη τροφοδοσίας και ο απαραίτητος αέρας καύσης δίνεται μέσω του περιστροφικού κλιβάνου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-19, η ασβεστοποιημένη και μη φαρίνα εισάγονται από τον αγωγό τροφοδοσίας με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα ανάμιξης.

Υπάρχουν επίσης συστήματα ασβεστοποίησης

τα οποία λειτουργούν σε συνδυασμό με συμβατικές διατάξεις προθέρμανσης (με παράκαμψη μέρους ή ολόκληρης της ποσότητας των απαερίων του κλιβάνου) με σκοπό να μειωθεί ο εσωτερικός αλκαλικός κύκλος και να επιτευχθεί χαμηλή συγκέντρωση αλκαλίων στο τελικό προϊόν. Ένα τέτοιο σύστημα είναι και το "FLS Precalcining system for low alkalis cement". Σ' αυτό το σύστημα, τα απαέρια του κλιβάνου δεν χρησιμοποιούνται στην προθέρμανση, αλλά παρακάμπτονται 100% και οδηγούνται σε ένα συλλέκτη σκόνης, όπου καθαρίζονται και αποβάλλονται. Ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιείται σε τέτοια συστήματα ασβε-

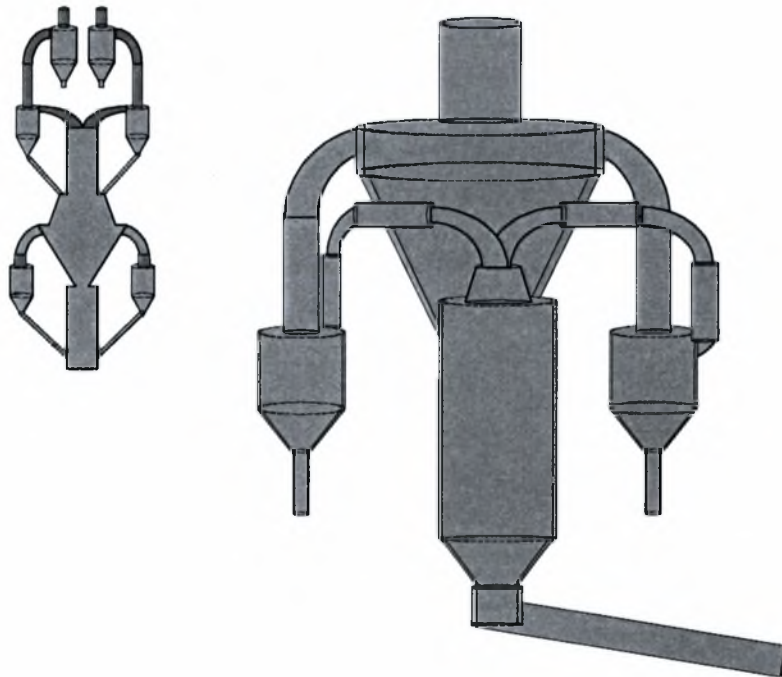


Σχήμα 2-18 Δύο γραμμές προθέρμανσης φαρίνας

στοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-19

Όπως δείχνει το Σχήμα 2-19, ο ασβεστοποιητής είναι ένας κύλινδρος με κωνική διαμόρφωση στη βάση του, από όπου εισάγεται το καύσιμο. Ο αέρας από το ψυγείο εισάγεται από το χαμηλότερο στάδιο του ασβεστοποιητή και ανέρχεται προς την διάταξη προθέρμανσης μαζί με τα σωματίδια φαρίνας. Η ανάμιξη της φαρίνας και του καυσίμου γίνεται πριν την εισαγωγή του αέρα καύσης, εξαιτίας της μεθόδου εισαγωγής του καυσίμου.

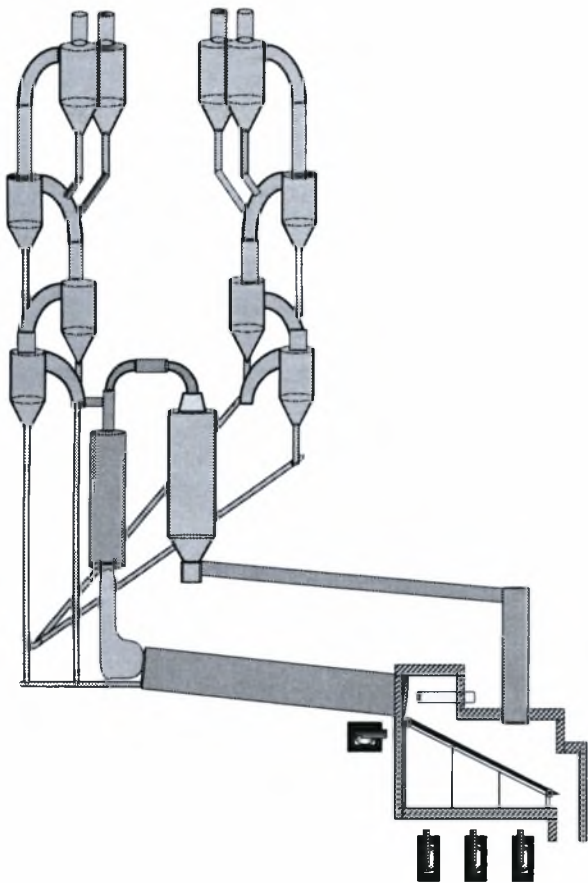
Με σκοπό να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση, μερικά συστήματα ασβεστοποίησης λειτουργούν με ένα δίδυμο σύστημα προθέρμανσης (2) γραμμές προθέρμανσης, αντί ενός μεγάλου κατακόρυφου συστήματος προθερμαντήρων. Έτσι, αποφεύγονται προβλήματα υπερδιαστασιολογήσεως στους προσαγωγούς συνδέσεις κτλ. που προκαλούν προβλήματα αεροδυναμικής και λειτουργικής φύσης. Ένα τέτοιο σύστημα που χρησιμοποιεί την παραπάνω αρχή περιγράφεται στην συνέχεια και έχει αναπτυχθεί από την F.L. Smidth Co..



Σχήμα 2-19 Διπλό σύστημα ανακομιστών προθέρμανσης DOPOL Polysius

Σε αυτό το σύστημα, χρησιμοποιείται ένας ξεχωριστός ασβεστοποιητής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-20, τα θερμά απαέρια του κλιβάνου χρησιμοποιούνται στην αριστερή γραμμή του προθερμαντήρα και τα αέρια καύσης από τον ασβεστοποιητή χρησιμοποιούνται από τη δεξιά γραμμή του προθέρμανσης. Η προθερμασμένη φαρίνα από τα τελευταία επίπεδα της αριστερής γραμμής προθέρμανσης οδηγείται στον ασβεστοποιητή. Η ασβεστοποιημένη πλέον φαρίνα μεταφέρεται στο τέταρτο επίπεδο της δεξιάς γραμμής προθέρμανσης μέσω αγωγού αερίων και από εκεί στην είσοδο του κλιβάνου.

Σε μερικά άλλα συστήματα ασβεστοποίησης, χρησιμοποιείται ο διπλός κυκλώνας προθέρμανσης αντί των δυο ξεχωριστών γραμμών προθέρμανσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί υψηλή απόδοση. Τέτοιο σύστημα είναι και το σύστημα που χρησιμοποιείται και στη διεργασία Polysius Precalcining AT. Η φαρίνα θερμαίνεται σε ένα σύστημα προθέρμανσης διπλού κυκλώνα και η ασβεστοποίηση λαμβάνει χώρα στον αγωγό που συνδέει την είσοδο του κλιβάνου και τους κυκλώνες.



Σχήμα 2-20 Σχηματική περιγραφή διαδικασίας έψησης

Ο τριτογενής αέρας από το ψυγείο μεταφέρεται μέσω του κλιβάνου μαζί με τα απαέρια στον θάλαμο που είναι εφοδιασμένος με καυστήρες. Η προθερμασμένη φαρίνα εισάγεται στον θάλαμο, όπου το καύσιμο καίγεται και πραγματοποιείται η ασβεστοποίηση. Στη συνέχεια, η ασβεστοποιημένη πλέον φαρίνα οδηγείται στα χαμηλότερα επίπεδα της διάταξης προθέρμανσης, όπου διαχωρίζεται και εισάγεται στον περιστροφικό κλίβανο. Τέλος, μια τροποποίηση του συστήματος αυτού μπορεί να γίνει μεταφέροντας το τριτογενή αέρα μέσω ξεχωριστού σωλήνα.

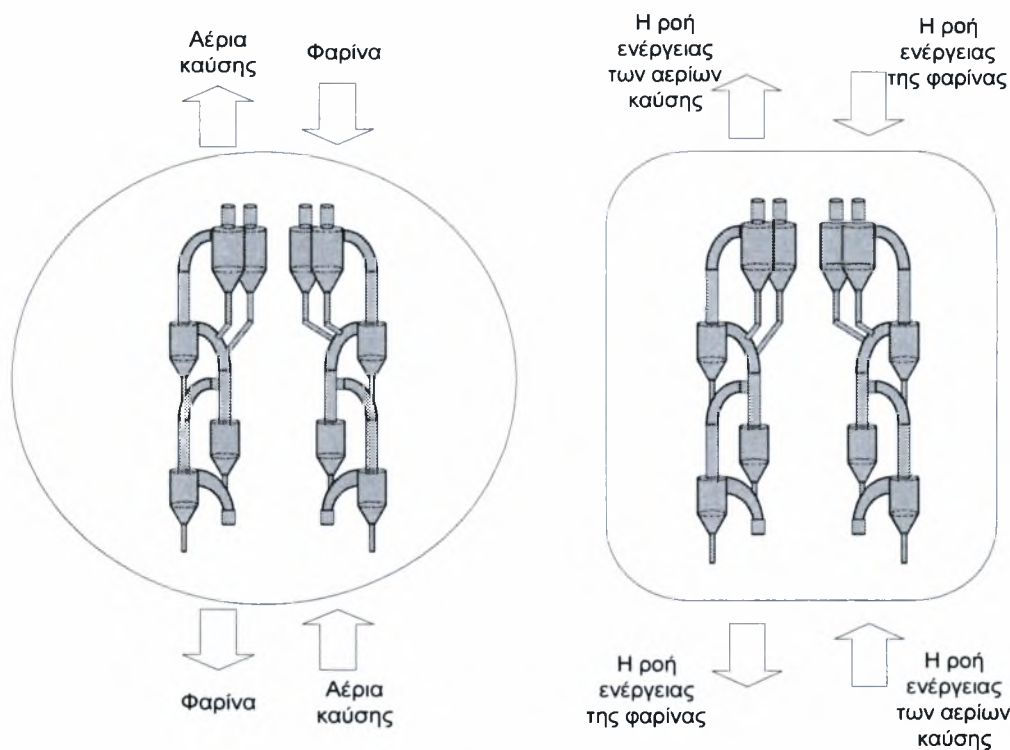
2.2.5 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας

Σ' αυτή την ενότητα, θα παρουσιαστούν τα ισοζύγια μάζας για κάθε μέρος των διαδικασιών έψησης (προθέρμανση, ασβεστοποιητής, κλίβανος και ψυγείο) με σκοπό να εξεταστούν όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και να προσδιοριστεί μια καλή λειτουργία κάθε μέρους, όπως και των μεταβλητών που μπορούν να διαχειριστούν έτσι ώστε να ελεγχθεί το σύστημα. Η ακόλουθη εικόνα δείχνει τα μέρη του συστήματος των διαδικασιών έψησης, στα οποία θα γίνουν ισοζύγια μάζας και ενέργειας. (Σχήμα 2-21)

Το σύστημα αποτελείται από τον περιστροφικό κλίβανο, τον ασβεστοποιητή, το ψυγείο και το σύστημα προθέρμανσης, το οποίο είναι ένα σύστημα δυο ξεχωριστών γραμμών προθέρμανσης. Η ασβεστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ένα κύλινδρο με άνω και κάτω κωνική διάμορφωση. Η προθερμασμένη φαρίνα εισάγεται στον ασβεστοποιητή από τους ανακομιστές

τρίτου επιπέδου των γραμμών προθέρμανσης, μαζί με το καύσιμο και τον τριτογενή αέρα, ο οποίος διέρχεται μέσω ξεχωριστού αγωγού. Τα αέρια καύσης από τον ασβεστοποιητή και τα απαέρια του κλιβάνου αναμιγνύονται σε μια ξεχωριστή κυλινδρική διαμόρφωση και χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση της φαρίνας. Για κάθε μέρος του συστήματος θα δοθούν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

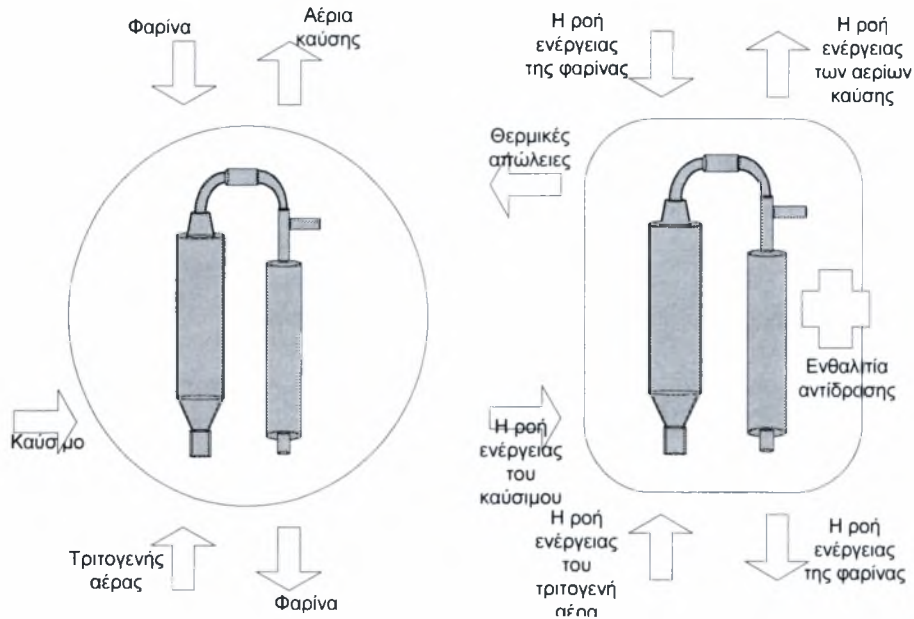
Πρώτα θα εξεταστεί το σύστημα της προθέρμανσης. Οι ακόλουθες εικόνες δείχνουν τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Όπως φαίνεται, η ροή μάζας που εισέρχεται είναι η ροή μάζας της φαρίνας στα άνω επίπεδα και των αερίων καύσης στα κάτω επίπεδα. Η ροή μάζας που εξέρχεται, είναι η ροή μάζας της φαρίνας στα κάτω επίπεδα και η ροή μάζας των αερίων καύσης στα άνω επίπεδα. Στην ίδια εικόνα παρουσιάζεται και το ισοζύγιο ενέργειας του προθερμαντήρα. Η ροή ενέργειας που εισέρχεται και εξέρχεται είναι αυτή της φαρίνας και των αερίων καύσης αντίστοιχα, πριν και μετά την ανταλλαγή θερμότητας. Υπάρχει επίσης ακόμη μια εξερχόμενη ενέργεια ροής, που αντιστοιχούν στις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.



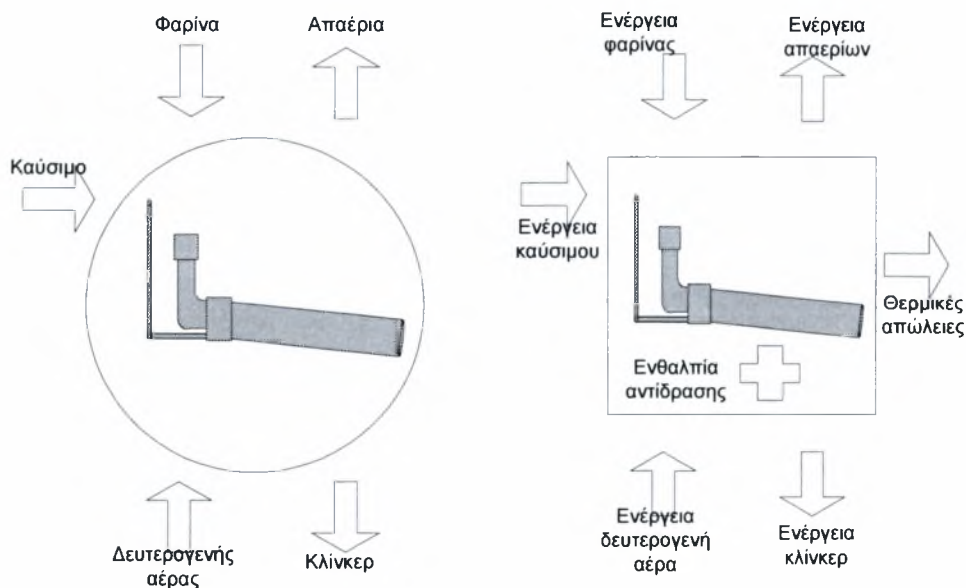
Σχήμα 2-21 Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας στην τεσσάρων επιπέδων συστοιχία ανακομιστών

Στη συνέχεια δίνονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για τον ασβεστοποιητή. Η ροή μάζας που εισέρχεται είναι της φαρίνας, του τριτογενή αέρα και του καυσίμου. Η ροή μάζας που εξέρχεται είναι της ασβεστοποιημένης φαρίνας και των αερίων καύσης. Για το ισοζύγιο ενέργειας, η ροή ενέργειας που εισέρχεται είναι η ροή ενέργειας της φαρίνας και του τριτογενή αέρα και αυτή που εξέρχεται είναι η ροή ενέργειας της ασβεστοποιημένης φαρίνας και των αερίων καύσης, καθώς και κάποιων θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Το ποσό της

συνολικής ροής ενέργειας που εισέρχεται μείον της συνολικής ροής ενέργειας που εξέρχεται είναι η ενθαλπία αντίδρασης της εισερχόμενης φαρίνας και αντιστοιχεί στο ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου που διασπάστηκε προς οξείδιο του ασβεστίου και μονοξείδιο του άνθρακα. Το επόμενο Σχήμα 2-22 δείχνει τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για τον ασβεστοποιητή.



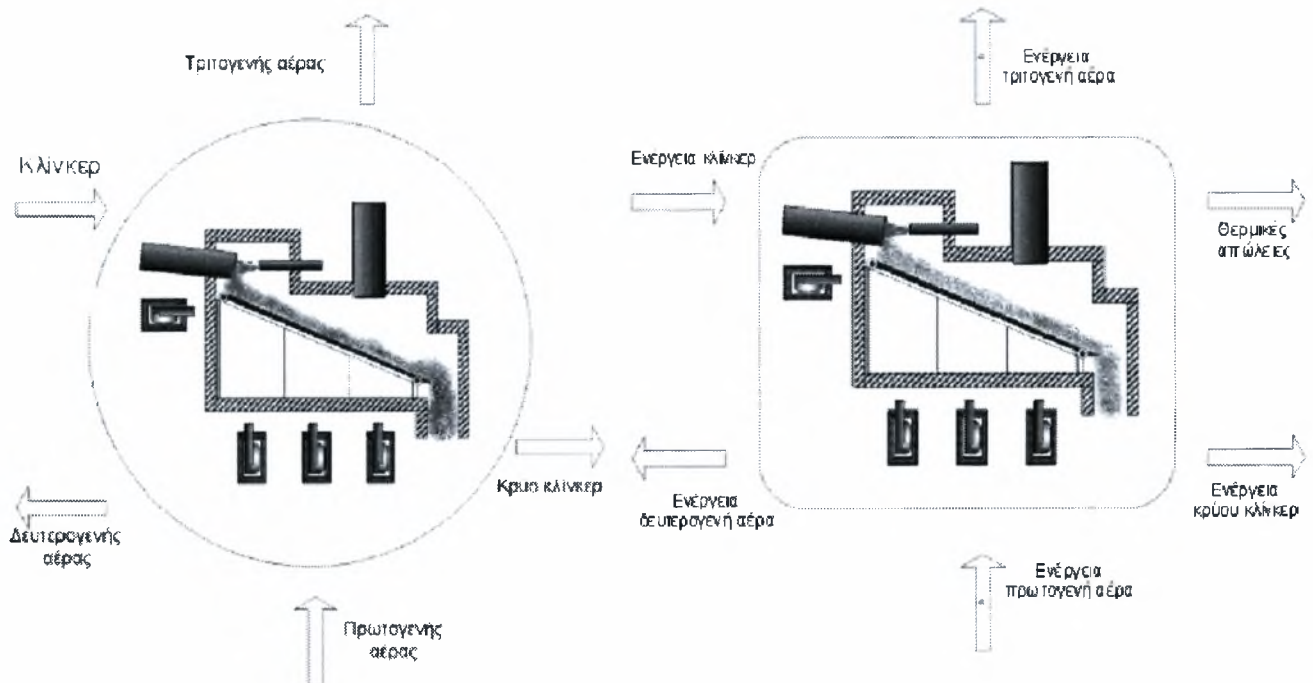
Σχήμα 2-22 Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας στον προασβεστοποιητή



Σχήμα 2-23 Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας στο περιστροφικό κλίβανο

Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για τον περιστροφικό κλίβανο περιγράφονται στη συνέχεια και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-23. Η εισερχόμενη ροή μάζας είναι η ροή μάζας της ασβεστοποιημένης φαρίνας, του δευτερογενή αέρα καύσης και του καυσίμου. Η εξερχόμενη ροή μάζας είναι του κλίνκερ και των απαερίων του κλιβάνου. Για το ισοζύγιο ενέργειας, η

εισερχόμενη ροή ενέργειας είναι της ασβεστοποιημένης φαρίνας, του δευτερογενή αέρα καύσης και του καύσιμου, ενώ η εξερχόμενη ροή ενέργειας είναι του κλίνκερ, των απαερίων καθώς και κάποιων θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Το ποσό της συνολικής εισερχόμενης μείον εξερχόμενης ροής ενέργειας είναι η ενθαλπία αντίδρασης για τον σχηματισμό του κλίνκερ.



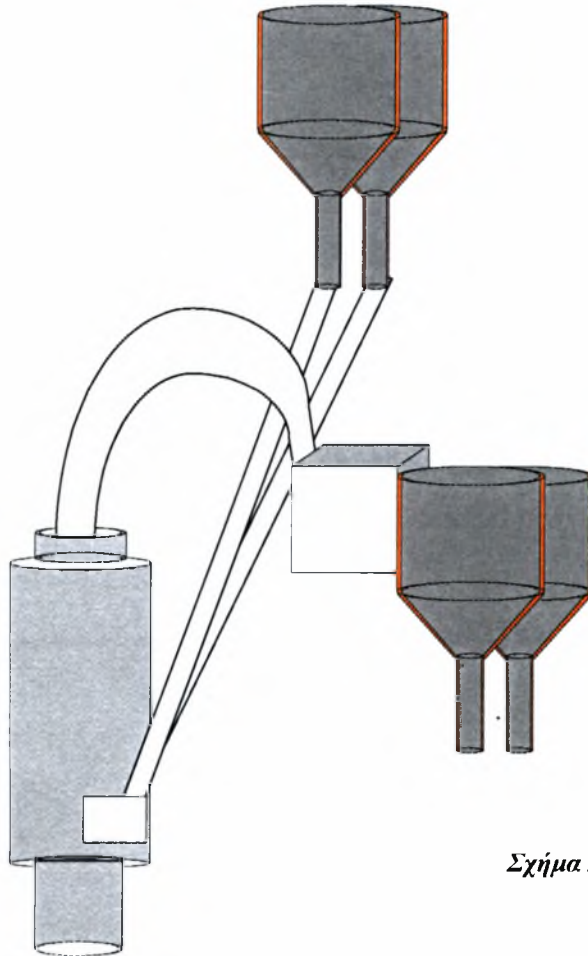
Σχήμα 2-24 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας για το ψυγείο κλίνκερ

Τέλος, δίνονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για το ψυγείο. Η εισερχόμενη ροή μάζας είναι η ροή μάζας του θερμού κλίνκερ και του πρωτογενή αέρα. Η εξερχόμενη ροή μάζας είναι του δευτερογενή αέρα, του τριτογενή αέρα και του ψυχρού κλίνκερ. Για το ισοζύγιο ενέργειας, η εισερχόμενη ροή ενέργειας είναι αυτή της ασβεστοποιημένης φαρίνας, του δευτερογενή αέρα, ενώ η εξερχόμενη ροή ενέργειας είναι αυτή του δευτερογενή αέρα, του τριτογενή αέρα και του ψυχρού κλίνκερ του καθώς και θερμικών απωλειών που σημειώνονται προς το περιβάλλον.

2.2.6 Μετρήσεις και έλεγχος του ασβεστοποιητή

Σ' αυτό το σημείο, θα παρουσιαστούν η λειτουργία και οι απαραίτητες μετρήσεις για τον έλεγχο του ασβεστοποιητή. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-25, η φαρίνα από τους σωλήνες τροφοδοσίας του τρίτου επιπέδου των ανακομιστών προθέρμανσης, εισάγεται στο χαμηλότερο επίπεδο του ασβεστοποιητή, λίγο πάνω από την κωνική του βάση. Ο τριτογενής αέρας εισάγεται στον ασβεστοποιητή μέσω του αγωγού διαχωρισμού αερίων από τη βάση του ασβεστοποιητή. Για την καύση μέσα στον ασβεστοποιητή χρησιμοποιείται κάρβουνο σε λεπτό

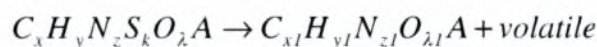
διαμερισμό. Τα αερία του κλιβάνου οδηγούνται, όπως φαίνεται και στο σχήμα, μέσω αγωγού στο θάλαμο ανάμιξης, όπου συναντούν το μίγμα της ασβεστοποιημένης φαρίνας και των αερίων καύσης του ασβεστοποιητή. Το μίγμα ρέει προς το χαμηλότερο επίπεδο προθέρμανσης και η ασβεστοποιημένη φαρίνα από το ανακομιστή του τέταρτου επιπέδου οδηγείται στον ΠΚ.



Σχήμα 2-25 Προασβεστοποιητής

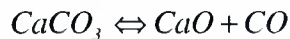
Μέσα στον ασβεστοποιητή πραγματοποιείται η καύση της καύσιμης ύλης και η ασβεστοποίηση της φαρίνας. Ο όγκος του ασβεστοποιητή μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιοχές:

Στη ζώνη μεταφοράς θερμότητας (προανάμιξης-προθέρμανσης), στη ζώνη πυρόλυσης και καύσης των πτητικών συστατικών του κάρβουνου και στη ζώνη καύσης του κάρβουνου. Στη πρώτη ζώνη, η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα μεταξύ της φαρίνας, του τριτογενή αέρα και του κάρβουνου και έτσι αποκτούν την ίδια θερμοκρασία. Το κάρβουνο αποτελείται από C, H, O, N και σκόνη. Σε υψηλές θερμοκρασίες πραγματοποιείται η πυρόλυση του κάρβουνου, παράγοντας πτητικά συστατικά CO, H₂, CO₂, CH₄, C₂H₄, H₂S, N και βαριά οργανικά συστατικά (tar), σύμφωνα με την αντίδραση:



Αυτή η αντίδραση γίνεται στη δεύτερη ζώνη. Τα πτητικά καίγονται γρήγορα και το υπόλοιπο του κάρβουνου καίγεται στην τρίτη ζώνη, όπου πραγματοποιούνται οι ακόλουθες αντιδράσεις char-O₂, char-CO₂, char-H₂O C-H₂O καύση. Στη δεύτερη και τρίτη ζώνη πραγματοποιείται παράλληλα και η αντίδραση ασβεστοποίησης της φαρίνας, χρησιμοποιώντας την ενέργεια που ελευθερώνεται από την καύση.

Η φαρίνα μετά τον ασβεστοποιητή, εισάγεται στον ΠΚ, όπου η συνεχίζεται και ολοκληρώνεται η ασβεστοποίηση της φαρίνας κατά την αντίδραση:



Λαμβάνοντας υπόψη τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ασβεστοποίησης της φαρίνας είναι δυνατό να υπολογιστεί η ροή μάζας του ανθρακικού ασβεστίου, η ενέργεια του καύσιμου και ο βαθμός ασβεστοποίησης μαζί με τις κατάλληλες μετρήσεις. Οι απαραίτητες μετρήσεις είναι η ογκομετρική παροχή της ροής των αερίων και οι συγκεντρώσεις των σε δυο σημεία. Στην είσοδο του κλιβάνου και στο τέλος του αγωγού που συνδέει τον ασβεστοποιητή με το θάλαμο ανάμιξης. Η παροχή μάζας του οξυγόνου που εισάγεται μέσα στον ασβεστοποιητή και στον κλίβανο μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις του όγκου του δευτερογενή και τριτογενή αέρα. Έτσι, η μαζική παροχή του οξυγόνου μπορεί να υπολογιστεί, μετρώντας το οξυγόνο που εγκαταλείπει τον ασβεστοποιητή και τον ΠΚ μείον το οξυγόνο που τροφοδοτείται. Από τη μάζα του οξυγόνου που αντιδρά στον κλίβανο και στον ασβεστοποιητή είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται μέσα στον ασβεστοποιητή και στον κλίβανο, και κατ' επέκταση η ροή ενέργειας του καύσιμου. Με δεδομένη τη μάζα του καύσιμου μπορεί να υπολογιστεί η θερμική ενέργεια του καύσιμου. Αν η μέτρηση του διοξειδίου του άνθρακα είναι η ολική, τότε είναι δυνατό να υπολογιστεί αυτή που αντιστοιχεί στην ασβεστοποίηση. Έτσι, η ποσότητα του ανθρακικού ασβεστίου που εισάγεται και αντιδρά στον ασβεστοποιητή και στον κλίβανο μπορεί να υπολογιστεί. Με γνωστή την ποσότητα της φαρίνας που εισάγεται μπορεί να υπολογιστεί η περιεκτικότητα της φαρίνας σε ανθρακικό ασβέστιο. Με γνωστές τις παραπάνω τιμές μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός ασβεστοποίησης της φαρίνας στον ασβεστοποιητή.

Ο κύριος στόχος του έλεγχου του συστήματος είναι η συγκράτηση του βαθμού ασβεστοποίησης σε επιθυμητά επίπεδα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ελέγχοντας την ροή ενθαλπίας αντίδρασης της εισαγόμενης φαρίνας στον ασβεστοποιητή, η οποία είναι μέτρο του βαθμού ασβεστοποίησης, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

2.3 Καύσιμα στη Βιομηχανία Τσιμέντου

Τα καύσιμα μπορούν να ταξινομηθούν, ως προς τη φυσική κατάσταση, σε στερεά, υγρά και αέρια. Και οι τρεις τύποι καυσίμων καταναλώνονται στη βιομηχανία τσιμέντου. Στα στερεά καύσιμα ανήκουν, το κάρβουνο (άνθρακας), ο λιγνίτης, ο ποάνθρακας (peat), τα καυσόξυλα και ο οπτάνθρακας (coke). Ο άνθρακας και ο λιγνίτης χρησιμοποιούνται στους περιστροφικούς κλιβάνους τσιμέντου και στους ξηραντήρες. Το κωκ χρησιμοποιείται στους επιμήκεις αζονικούς κλιβάνους τσιμέντου. Ανάμεσα στα υγρά καύσιμα συγκαταλέγεται και το αργό πετρέλαιο, το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον στη βιομηχανία τσιμέντου. Το φυσικό αέριο είναι το πιο κοινό από τα αέρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται. Η χρήση άλλων αερίων καυσίμων είναι μικρότερης σημασίας.

Η κατανομή της κατανάλωσης καυσίμων στις μονάδες παραγωγής τσιμέντου, αντιστοιχεί στις ακόλουθες λειτουργίες :

Πίνακας 2-2 Κατανομή της κατανάλωσης καυσίμου

Ξηρή Διαδικασία Παραγωγής (κατά προσέγγιση) :	
Λειτουργία κλιβάνου	83 %
Ξήρανση της φαρίνας	14 %
Ξήρανση του κάρβουνου	3 %
Υγρή Διαδικασία Παραγωγής	
Λειτουργία του κλιβάνου	96 %
Ξήρανση του κάρβουνου	4 %

Η πρώτη εμπορική επιτυχία στη βιομηχανία τσιμέντου έγινε στις ΗΠΑ από τον Thomas A. Edison, το 1890 με την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα ως καύσιμη ύλη. Ο ίδιος, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, επέφερε βελτιώσεις στην καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα, που πλέον πραγματοποιούνταν μέσα στον περιστροφικό κλίβανο, αυξάνοντας έτσι πάρα πολύ την αποδοτικότητα του κλιβάνου. Η πολυετής εφαρμογή ανέδειξε την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα σε εμπειρική επιστήμη, όπου το θεωρητικό υπόβαθρο συνήθως έπεται της πρακτικής εφαρμογής.

Στο παρελθόν, ο άνθρακας ήταν το κύριο καύσιμο για τη βιομηχανία τσιμέντου. Όμως, τα τελευταία χρόνια το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έχουν εκτοπίσει τον άνθρακα κυρίως για οικονομικούς λόγους. Η τελευταία πετρελαϊκή κρίση είχε σαν αποτέλεσμα, την αναθέρμανση του ενδιαφέροντος για την εκμετάλλευση του άνθρακα. Η κατανάλωση του άνθρακα σημείωσε ποσοστιαία αύξηση στο σύνολο χρησιμοποιούμενων καυσίμων για την γερμανική βιομηχανία τσιμέντου από 2% στο 6% την τριετία 1973-1975.

Το κόστος επένδυσης (εγκαταστάσεις, λειτουργία, εξοπλισμός, επεξεργασία, διακίνηση, προσωπικό) των ορυχείων άνθρακα είναι περίπου 20 φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο για τις πηγές πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενώ, το κόστος εκμετάλλευσης του φυσικού αερίου είναι 3 ~ 5 φορές χαμηλότερο από αυτό για το ακατέργαστο πετρέλαιο. Η μεταφορά διά θαλάσσης του φυσικού αερίου δεν απαιτεί εξειδικευμένες εγκαταστάσεις και το κόστος κατασκευής των αγωγών φυσικού αερίου είναι ένα μικρό μέρος του κόστους κατασκευής των σιδηροδρόμων, για τη μεταφορά του άνθρακα. Γενικά, το κόστος επένδυσης των αγωγών φυσικού αερίου αποσβένεται μέσα σε 3 ~ 5 χρόνια. Από την άλλη μεριά όμως, η βιομηχανία τσιμέντου εξαρτάται μόνο από έναν προμηθευτή, όταν ο εφοδιασμός της σε καύσιμα γίνεται με αγωγούς φυσικού αερίου. Το κόστος εγκατάστασης της μονάδας επεξεργασίας του κάρβουνου σε μια βιομηχανία τσιμέντου κυμαίνεται περίπου σε 15-20% του κόστους της συνολικής εγκατάστασης. Το φυσικό αέριο αντίθετα πλεονεκτεί αφού δεν έχει ανάγκη ειδικής προεπεξεργασίας και συγχρόνως δεν απαιτεί αποθήκευση.

Η επεξεργασία ενός τόνου άνθρακα και η κονιορτοποίηση του (παραμένουσα ποσότητα μόνο το 8-10 % της αρχικής σε κόσκινο διαμετρήματος 0.09 mm) συνδέεται με τις ακόλουθες ενεργειακές απαιτήσεις :

Πίνακας 2-3 Ενεργειακές ανάγκες επεξεργασίας κάρβουνου

Διεργασία	Ανάγκες σε KWh/t
Ξήρανση	2.0
Κονιορτοποίηση	25.0
Συλλογή σκόνης	1.5
Μεταφορά	5.0
Απώλειες στον υποσταθμό	2.5
Σύνολο	36.0

Ανάλογα, με τη θερμογόνο δύναμη του άνθρακα είναι δυνατό να υποτεθεί ένας λόγος κλίνκερ προς άνθρακα 4 προς 1. Αυτό δείχνει μια επιπρόσθετη ενεργειακή απαίτηση 9 kWh ανά τόνο κλίνκερ, όταν συγκρίνεται με το φυσικό αέριο.

Η μεταπήδηση από άνθρακα σε φυσικό αέριο στις ήδη λειτουργούσες εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου, οδηγεί σε ολοένα και χαμηλότερα κόστη παραγωγής τσιμέντου, που αγγίζουν την τάξη του 8-10%, ενώ ταυτόχρονα η παραγωγή τσιμέντου ανά εγκατάσταση αυξάνεται περίπου κατά 6-8%.

Πίνακας 2-4 Ποσοστά χρησιμοποίησης καυσίμων για την παρασκευή τσιμέντου στις ΗΠΑ (1975)

Βιομηχανίες τσιμέντου	Είδος Καύσιμου	Παραγόμενο κλίνκερ t (metric)	Παραγόμενο κλίνκερ [%]	Κάρβουνο [t]	Πετρέλαιο [t]	Φυσικό Αέριο [m ³]
36	Κάρβουνο	12,790	21.9			
9	Πετρέλαιο	2,983	5.0			
18	Φυσικό αέριο	5,178	8.9			
21	Κάρβουνο, πετρέλαιο	8,060	13.8			
42	Κάρβουνο, φυσικό αέριο	13,213	22.6			
27	Πετρέλαιο, φυσικό αέριο	10,493	17.9			
15	Κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο	5,819	9.9			
168		58,536	100.0	7,568,000	1,282,585	4.5 x10 ⁹

Η καύση του φυσικού αερίου και του πετρελαίου ουσιαστικά δεν αφήνει καθόλου κατάλοιπα (κυρίως τέφρα) και έτσι είναι ευκολότερο να γίνει κατάλληλη ανάμιξη τους στην τροφοδοσία. Αυτό επιτρέπει την ομοιόμορφη και ομογενή χημική σύνθεση της τροφοδοσίας, κάτι που δεν μπορεί να γίνει με το κάρβουνο ανεξαρτήτως του ποσοστού τέφρας που μπορεί να περιλαμβάνεται σε αυτό. Το πλεονέκτημα αυτό συναντάται και στη χρήση του υγραερίου.

Ο Πίνακας 2-4 περιέχει δεδομένα αναφορικά με την κατανάλωση των τριών ειδών καυσίμου για την παραγωγή τσιμέντου στις ΗΠΑ το 1975, ταξινομημένα σύμφωνα με το είδος της διεργασίας παραγωγής (ξηρή ή υγρή)

Πίνακας 2-5 Κατανάλωση καυσίμου στις ΗΠΑ ανά διεργασία παραγωγής τσιμέντου

Παραγωγή κλίνκερ	Καύσιμη Ύλη			
	Υγρή	Ξηρή	Αναμειγμένη	Σύνολο
Εγκαταστάσεις τσιμέντου	98	64	6	168
Παραγωγή 1000 t (907 kg)	36,413	25,179	2,947	64,539
Σύνολο (%)	56.4	39.0	4.6	100.0
Κατανάλωση καυσίμου				
Ανθρακας, 1000 t (907 kg)	4,215	3,182	0,171	7,568
Πετρέλαιο, 1000 t (907 kg)	0,972	0,294	0,017	1,283
Φυσικό αέριο, εκατομμύρια m ³	3.0	1.2	0.3	4.5
* Nach : Mineral Industry Surveys, U.S. Dept. of the interior According to : Bureau of Mines, Washington, D.C., Sept. 1976				
** Assumed : sp. gr. of fuel oil = 1				

Ο Πίνακας 2-5 περιέχει δεδομένα αναφορικά με την κατανάλωση καύσιμου ανά μονάδα βάρους του παραγόμενου τσιμέντου στις ΗΠΑ το 1975, ταξινομημένα σύμφωνα με το είδος του καύσιμου.

Πίνακας 2-6 Μέση κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα βάρους παραγόμενου τσιμέντου στις ΗΠΑ (1975)

Είδος καύσιμου	Καύσιμο / τόνο	Btu / lb	Kcal / kg
Κάρβουνο	471 lb	2159	1550
Πετρέλαιο	327 lb	2943	1632
Φυσικό αέριο	6365 lb	3278	1817
1. 11,715 Btu / lb = 6500 kcal / kg 2. 18,000 Btu / lb = 10,000 kcal / kg, 1 gallon = 8.33 lb 3. 1030 Btu / lb = 9162 kcal / Nm ³ 4. 1 t = 2000 lb = 907 kg			

Στη Ρωσία, το 60 % του παραγόμενου κλίνκερ (ετήσια παραγωγή τσιμέντου κατά προσέγγιση 104 εκατομμύρια τόνοι) παρασκευάζεται με την καύση φυσικού αερίου. Αυτό αντιστοιχεί σε κατανάλωση φυσικού αερίου $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{έτος}$. Κατά προσέγγιση ίσο μέρος του εναπομείναντος κλίνκερ (40%) ετοιμάζεται από πετρέλαιο και κάρβουνο.

Στη πρώην ΟΔ της Γερμανίας, η κατανάλωση των διάφορων ειδών καυσίμου για την παραγωγή τσιμέντου είχε ως εξής: Από τα περίπου 36 εκατομμύρια τόνους παραγόμενου κλίνκερ, το 72 % γινόταν με πετρέλαιο, το 22 % με φυσικό αέριο και άλλα βιομηχανικά αέρια (με κατανάλωση 769 εκατομμύρια τόνους κυβικών μέτρων αερίου) ενώ μόνο το 6 % παράγονταν με άνθρακα.

Ο άνθρακας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τσιμέντου πρέπει να πληροί κατά το ελάχιστο τις προδιαγραφές που εμφανίζονται στον Πίνακα 2-7.

Πίνακας 2-7 Βασική σύσταση κάρβουνου για παραγωγή τσιμέντου

Κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV)	6500-7000 kcal/kg
Ποσοστό Τέφρας	12-15 %
Ποσοστό Πτητικών Ουσιών	18-22 %
Ποσοστό Υγρασίας	ως 12 % όπως παραδίδεται

Σε μερικές ανατολικές ευρωπαϊκές χώρες χρησιμοποιείται το καφέ κάρβουνο (brown coal) για την παραγωγή του κλίνκερ. Ο άνθρακας αυτός παρουσιάζει τις ακόλουθες ιδιότητες:

Πίνακας 2-8 Τυπική σύσταση κάρβουνου

Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV)	4800 kcal/ kg
Ποσοστό Τέφρας	12 %
Ποσοστό Πτητικών Ουσιών	40-50 %
Λεπτότητα	40 % υπόλοιπο σε κόσκινο διαμετρήματος 0.09

Στη πρώην ΛΔ της Γερμανίας, χρησιμοποιούνταν ανάμιξη καυσίμων με επιτυχία. Η σύνθεση της ήταν η ακόλουθη :50-75 % λιγνίτης και 50-25 % ασφαλτούχου άνθρακα. Στους κλιβάνους Lerol, τα καύσιμα είχαν την ακόλουθη μίξη: 40% λιγνίτης και 60% πισσούχος άνθρακα.

Η βιομηχανία τσιμέντου στην πρώην ΕΣΣΔ χρησιμοποιούσε άνθρακα από κοντινά ορυχεία, ο οποίος συχνά, ήταν αμφίβολης ποιότητας, πχ τέφρα και λάσπη του κάρβουνου. Ο Πίνακας 2-9 περιέχει πληροφορίες για τις ιδιότητες του άνθρακα που χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις τσιμέντου που παραθέτονται.

Πίνακας 2-9 Χαρακτηριστικά κάρβουνου στα εργοστάσια τσιμέντου της πρώην ΕΣΣΔ

Όνομα Εγκατάστασης	Τύπος κάρβουνου	Τέφρα %	Πτητικές ουσίες	Θερμογόνος Δύναμη LHV (kcal/kg)
<i>Alexeyevsk</i>	<i>Donec-coal</i>	<i>19.8</i>	<i>25.3</i>	<i>6144</i>
<i>Gigant</i>	<i>Donec & moscow coal</i>	<i>22.4</i>	<i>18.2</i>	<i>5875</i>
<i>Krasnojarsk</i>	<i>Czeremchovsk-coal</i>	<i>22.6</i>	<i>23.7</i>	<i>5435</i>
<i>Kuvasaysk</i>	<i>Tash-kumyt-coal</i>	<i>15.4</i>	<i>30.2</i>	<i>5420</i>
<i>Magnitogorsk</i>	<i>Magnitogorsk-gas coal</i>	<i>20.6</i>	<i>25.1</i>	<i>5810</i>
<i>Nevjansk</i>	<i>Magnitogorsk-gas coa;</i>	<i>19.9</i>	<i>22.4</i>	<i>5345</i>
<i>Timluysk</i>	<i>Czeremchovsk- Czuchansk coal</i>	<i>21.2</i>	<i>29.1</i>	<i>5105</i>
<i>Jashkinsk</i>	<i>Anzhersk-coal</i>	<i>14.9</i>	<i>15.8</i>	<i>6395</i>
<i>Akmjansk</i>	<i>Baltic oil shale</i>	<i>41.4</i>	<i>42.2</i>	<i>3730</i>
<i>Punane-kounda</i>	<i>Baltic oil shale III class</i>	<i>63.7</i>	<i>-</i>	<i>3025</i>

2.3.1 Στερεά καύσιμα – Κάρβουνο

Τα στερεά καύσιμα αποτελούνται από οργανικά και ανόργανα συστατικά. Στα οργανικά συστατικά συμπεριλαμβάνονται ο άνθρακας, το υδρογόνο, το οξυγόνο και το άζωτο. Το θείο και η τέφρα συμπεριλαμβάνονται στα ανόργανα συστατικά. Η τέφρα του κάρβουνου αποτελείται ποσοτικά από 15-21% Al_2O_3 , 25-40% SiO_2 , 20-45% Fe_2O_3 , 1-5% CaO , 0.5-1% MgO και 2-8 % SO_3 . Μερικά είδη κάρβουνου παρουσιάζουν περιεκτικότητα σε χλωρίδια, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 0.01-0.1 %. Άνθρακες με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα περιέχουν ως 0.4 % χλωρίδια και ως 0.02 % φθορίδια.

Η τέφρα του καφέ κάρβουνου (brown coal) αποτελείται από 25-40% CaO , 3-10% Al_2O_3 , 0.5-5% MgO και ως 40% SO_3 . Εκτός από τα ανόργανα συστατικά, η τέφρα του κάρβουνου περιέχει άλατα (χλωριούχα και θειούχα) καθώς και πτητικές ουσίες, όπως κρυσταλλοποιημένο νερό σε αργιλώδη στοιχεία. Επίσης, περιέχει διοξείδιο του άνθρακα σε ανθρακικά άλατα και θειούχο οξύ σε φθορίδια.

Πίνακας 2-10 Στοιχειώδη σύνθεση ορυκτού κάρβουνου και κωκ

Συστατικά	Ορυκτό κάρβουνο (%)	Κωκ (%)
Άνθρακας	60-92	80-90
Υδρογόνο	1-5	0.4-2
Οξυγόνο	2-14	-
Άζωτο	0.3-2	-
Θείο	0.5-4	0.4-1
Τέφρα	5-15	8-14
Υγρασία	2-15	1-1.5

Τα εύφλεκτα συστατικά (καύσιμες ποσότητες) είναι το κάρβουνο, το υδρογόνο και το θείο. Κατά την καύση, αυτά τα συστατικά αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα και παράγεται θερμότητα. Όσο η αναλογία των εύφλεκτων συστατικών αυξάνεται στο καύσιμο, αυξάνεται και η θερμογόνος δύναμη αυτού. Κατά τον προσδιορισμό της ποιότητας του καύσιμου μετράται μόνο ο άνθρακας και το υδρογόνο. Το θείο, αν και εύφλεκτο, δεν είναι επιθυμητό, αφού κατά την καύση του παράγεται διοξείδιο του θείου, το οποίο σε συνδυασμό με το νερό σχηματίζει θειικό οξύ. Το θειικό οξύ προκαλεί διάβρωση στα μεταλλικά μέρη των διατάξεων καύσης και έπειτα ως ελεύθερο απαέριο στην ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται πολύ ρυπογόνα προς το περιβάλλον. Το θείο που παραμένει στην τέφρα του κάρβουνου αποτελεί μέρος του κλίνκερ κατά τη διαδικασία έψησης, μειώνοντας έτσι την ποιότητα του κλίνκερ και συνεισφέροντας στον αλκαλικό κύκλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε πολλές περιπτώσεις, ένα μικρό

ποσό θείου είναι επιθυμητό, αφού προκαλεί θείωση των αλκαλικών οξειδίων. Αυτά τα θειούχα αλκάλια, αποτελούν τις πιο σταθερές θειούχες φάσεις και αφήνουν τον κλίβανο μαζί με το κλίνκερ, μειώνοντας έτσι τον αλκαλικό κύκλο στο σύστημα του κλιβάνου. Μόνο υπερβολική ποσότητα θείου επιφέρει επιβλαβείς εκπομπές του διοξειδίου θείου από τον κλίβανο. Η τέφρα και η υγρασία είναι ανεπιθύμητα συστατικά στα καύσιμα και χαρακτηρίζονται ως αδρανή συστατικά. Κατά την διάρκεια της έψησης, η τέφρα αφομοιώνεται εξολοκλήρου από το κλίνκερ. Επομένως, η χημεία της τέφρας του κάρβουνου πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της σύνθεσης για την τροφοδοσία αναμεμειγμένου καυσίμου.

Σε ότι αφορά την ξήρανση του κάρβουνου πρέπει να σημειωθεί ότι εντελώς ξηρό κάρβουνο είναι πολύ δύσκολο να αναφλεχθεί. Όπως είναι γνωστό, ο άνθρακας δεν αντιδρά απ' ευθείας με το περιβάλλον οξυγόνο. Η καύση προς μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα εκτυλίσσεται με αλυσιδωτές αντιδράσεις, στις οποίες ο άνθρακας αντιδρά πρώτα με τις πιο ενεργές ρίζες υδροξυλίων (OH). Η παρουσία μικρών ποσοτήτων υδρατμού είναι απαραίτητη για την ανάφλεξη του καυσίμου. Έτσι, η διαδικασία της ξήρανσης του κάρβουνου δεν στοχεύει στην πλήρη αποξήρανσή του. Η υγρασία στο κονιορτοποιημένο κάρβουνο σε ποσοστό 1-1.5% υποβοηθά την καύση.

2.3.2 Πτητικές ουσίες

Η περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες είναι σημαντικός παράγοντας για την κατάταξη των ειδών του κάρβουνου. Η απώλεια βάρους ως αποτέλεσμα της απανθράκωσης του κάρβουνου σε συνθήκες έλλειψης αέρα, αντιπροσωπεύει το σύνολο των πτητικών ουσιών. Τα κάρβουνα από νεώτερους γεωλογικούς σχηματισμούς περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου, υδρογόνου και αζώτου σε σχέση με τα κάρβουνα παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών. Κατά την καύση αυτών των στοιχείων και των ενώσεών τους, παράγονται περισσότερα πτητικά στοιχεία σε αντίθεση με τα κάρβουνα των παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών.

Κατά την καύση του κάρβουνου, το μήκος της φλόγας εξαρτάται από το περιεχόμενο σε πτητικές ουσίες. Κάρβουνα με υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες δημιουργούν μακριά φλόγα και ονομάζονται «μακριάς-φλόγας κάρβουνα», ενώ κάρβουνα που περιέχουν χαμηλή ποσότητα πτητικών ουσιών παράγουν κοντή φλόγα και ονομάζονται κοντής-φλόγας κάρβουνα. Παρόλα αυτά, τα κάρβουνα συμπεριφέρονται διαφορετικά όταν καίγονται σε κονιορτοποιημένη μορφή στους περιστροφικούς κλιβάνους. Τα μακριάς-φλόγας κάρβουνα που εισάγονται σε κονιορτοποιημένη μορφή στο ζεστό περιστροφικό κλίβανο, αποσυνθέτονται με μεγάλη ταχύτητα. Οι αεριοποιημένες πτητικές ουσίες καίγονται γρήγορα και τα σωματίδια κωκ που προκύπτουν έχουν υψηλό πορώδες. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη και καθολική πρό-

σβαση του οξυγόνου επιταχύνοντας την καύση του κωκ. Αυτές οι περιπτώσεις αναδεικνύουν γρήγορη καύση που περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή της διάταξης καύσης, δημιουργώντας έτσι κοντή φλόγα.

Τα κάρβουνα κοντής-φλόγας περιέχουν χαμηλή ποσότητα πτητικών ουσιών και αποσυνθέτονται αργά κατά την καύση τους μέσα στις διατάξεις καύσεις σε κονιορτοποιημένη μορφή. Το χαμηλό περιεχόμενο σε πτητικές ουσίες προκαλεί αργή καύση κατά μήκος μιας αρκετά μεγάλης ζώνης (περιοχή) μέσα στον κλίβανο και έτσι το πιο πυκνό κωκ καίγεται με χαμηλή ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το κοντής-φλόγας κάρβουνο να δημιουργεί μακριά φλόγα κατά την καύση του στον περιστροφικό κλίβανο σε κονιορτοποιημένη μορφή.

Το τυπικό περιεχόμενο σε πτητικές ουσίες για τα κάρβουνα που καίγονται σε κονιορτοποιημένη μορφή είναι 18-22%. Όμως, κατά την διαδικασία επίτευξης κατάλληλης κονιορτοποίησης είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθούν εξίσου χαμηλό ποσοστό αεριοδών κάρβουνων στον περιστροφικό κλίβανο.

2.3.3 Ανάλυση κάρβουνου

Δυο είδη ανάλυσης χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία, γενικά, για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των κάρβουνων:

- Η άμεση ανάλυση (Proximate analysis)

Περιέχει ποσοτικό προσδιορισμό για την υγρασία, τις πτητικές ουσίες, τον άνθρακα και τη τέφρα. Η άμεση ανάλυση δίνει μια γρήγορη και προκαταρκτική εκτίμηση του κάρβουνου.

- Η απόλυτη ανάλυση (Ultimate analysis)

Γίνεται για τον ακριβή υπολογισμό της διαδικασίας της καύσης και περιλαμβάνει τον ποσοτικό προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας και τις ποσότητες άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου, αζώτου, θείου και τέφρας.

2.3.4 Θερμογόνος δύναμη

Η πιο σημαντική ιδιότητα των καυσίμων είναι η θερμογόνος δύναμη, η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται κατά τη διάρκεια της καύσης ενός χιλιόγραμμου καυσίμου στην διάταξη καύσης. Η θερμογόνος δύναμη προσδιορίζεται αποκλειστικά με θερμιδομέτρηση. Ο υπολογισμός της θερμογόνου αξίας που απορρέει από την απόλυτη ανάλυση (ultimate analysis) αποτελεί στοιχειώδη πληροφορία.

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη, η οποία αποτελεί πρότυπο στην ευρωπαϊκή πρακτική, λαμβάνει υπόψη τις θερμικές απώλειες, που απαιτούνται για την εξάτμιση της υγρασίας του

κάρβουνου καθώς και του νερού που παράγεται από την καύση του υδρογόνου. Αυτή η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί με τη συμπύκνωση των ατμών του νερού, πχ κατά την διαδικασία ψύξης των καυσαερίων. Παρόλα αυτά, αφού η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι πάνω από τους 100°C, η θερμότητα εξάτμισης (539 Kcal/Kg νερού) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία του κλιβάνου. Χωρίς καθόλου υγρασία και υδρογόνο στο καύσιμο, η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ισούται με την ανώτερη θερμογόνος δύναμη. Η παρακάτω σχέση χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ανώτερης σε κατώτερη θερμογόνος δύναμη.

$$LHV = HHV - (V_w + F_w) \times R, \text{ όπου}$$

V_w : ποσότητα [σε kg] του νερού καύσης που παράγεται από την καύση 1 kg καυσίμου, στερεού ή υγρού ή από ένα m^3 αερίου καυσίμου

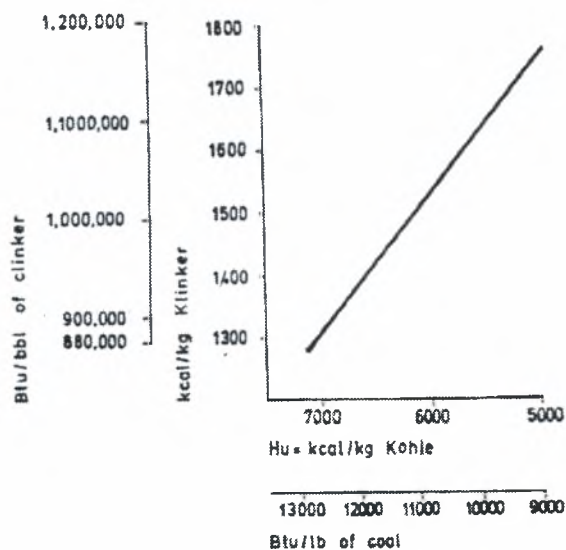
F_w : ποσότητα [σε kg] υγρασίας σε 1 kg καυσίμου

R : Θερμότητα εξάτμισης νερού (~ 539 kcal/kg)

2.3.5 Θερμογόνος δύναμη και θερμική κατανάλωση

Για τη διασφάλιση της οικονομικής λειτουργίας του κλιβάνου, η θερμογόνος δύναμη του κάρβουνου πρέπει να είναι περίπου 7000 kcal/kg. Κάρβουνο με χαμηλότερη θερμογόνος δύ-

ναμη αυξάνει την ειδική θερμότητα κατανάλωσης για την έψηση του κλίνκερ, μειώνοντας ταυτόχρονα την ειδική απόδοση του κλιβάνου. Στο Σχήμα 2-26 δίνεται γραφικά η σχέση ειδικής κατανάλωσης και της θερμογόνου δύναμης του κάρβουνου κατά την έψηση του κλίνκερ στον περιστροφικό κλίβανο.



Σχήμα 2-26 Ειδική κατανάλωση θερμότητας για την έψηση κλίνκερ ως προς την θερμογόνος δύναμη του κάρβουνου

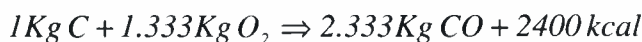
2.3.6 Θερμοχημικές αντιδράσεις και όγκοι αερίων

Οι θερμοχημικές αντιδράσεις κατά την καύση του άνθρακα, του υδρογόνου και του θείου είναι :

A) Άνθρακας

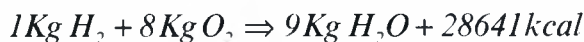


Με ανεπάρκεια οξυγόνου, η καύση του άνθρακα παράγει μονοξείδιο του άνθρακα σύμφωνα με την εξίσωση



Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση στην θερμογόνο δύναμη κατά $8100 - 2400 = 5700$ kcal/kg καυσίμου και αυτό δείχνει την αναγκαιότητα ύπαρξης περίσσειας αέρα καύσης προκειμένου να αποφευχθεί η ατελής καύση.

B) Υδρογόνο

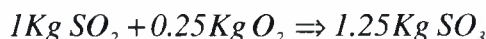


Η συμπύκνωση των ατμών του νερού θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ανώτερης θερμογόνου δύναμης (HHV) στην τιμή των 33,492 kcal.

Γ) Θείο



Σε ένα θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 400 °C και 1200°C, το 1-5 % περίπου του διοξειδίου του θείου οξειδώνεται προς τριοξείδιο του θείου :



Για τη μετατροπή της ποσοτικής ανάλυσης της καύσης σε αέριους όγκους και αντίστροφα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 2-11.

Πίνακας 2-11 Μετατροπή ποσοτικής χημικής ανάλυσης

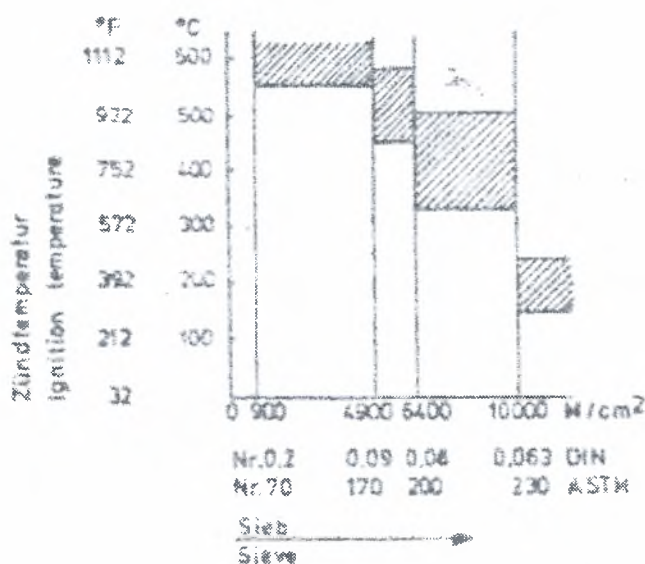
Αέριο	Τύπος	gr /lt	lt/gr
Αέρας	-	1.2928	0.7735
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	1.2504	0.7997
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	1.9768	0.5059
Άζωτο	N ₂	1.2507	0.7995
Οξυγόνο	O ₂	1.4290	0.6998
Διοξείδιο του θείου	SO ₂	2.9266	0.3417
Ατμοί νερού	H ₂ O	0.8035	1.2444

2.3.7 Μετατροπή των αερίων όγκων στη θερμοκρασία λειτουργίας

Η του όγκου των αερίων είναι για όλα τα σταθερά αέρια για κάθε βαθμό °C το 1/273 του όγκου τους στους 0°C με αρκετά καλή ακρίβεια προσέγγισης. Ο όγκος κάθε αερίου στη θερμοκρασία λειτουργίας για ισοβαρή μεταβολή (μεταβολή υπό σταθερή πίεση) είναι: $V_t = V_0 \cdot T/273$, όπου V_t είναι ο όγκος σε t °C, V_0 ο όγκος στους 0 °C, T η απόλυτη θερμοκρασία (t + 273) Kelvin.

2.3.8 Θερμοκρασία ανάφλεξης του άνθρακα

Η θερμοκρασία ανάφλεξης είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του καύσιμου, όπου η αντίδραση της καύσης φθάνει τη ταχύτητα που εξασφαλίζει την αδιάλειπτη καύση του καυσίμου. Προκειμένου να επιτευχθεί η θερμοκρασία ανάφλεξης απαιτείται μια καθορισμένη χρονική περίοδος (χρόνος ανάφλεξης), που είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να προσεγγίσει η επιφάνεια του καυσίμου τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Αυτός ο χρόνος προσδιορίζεται από τη θερμοκρασιακή κλίση και τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Προκύπτει από το γεγονός ότι η επιφάνεια είναι ένας καθοριστικός παράγοντας της ανάφλεξης και εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου στην περίπτωση του κάρβουνου. Έτσι, είναι πιθανό να ρυθμιστεί η θερμοκρασία ανάφλεξης και ο χρόνος ανάφλεξης ελέγχοντας τη λεπτότητα του κονιοροποιημένου κάρβουνου. Το γράφημα του Σχήματος 2-27 δείχνει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας ανάφλεξης και της λεπτότητας του κάρβουνου. Τα άνω όρια αναφέρονται στον ανθρακίτη και τα κάτω όρια σε κάρβουνα με υψηλό ποσοστό πτητικών ουσιών.



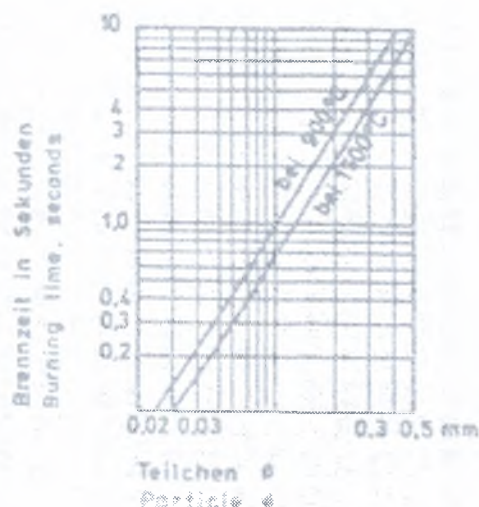
Σχήμα 2-27 Θερμοκρασίες ανάφλεξης σκόνης ορυκτού κάρβουνου

Το διάγραμμα δείχνει ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης του κονιορτοποιημένου κάρβουνου είναι μεταξύ 200 και 550°C. Είναι περισσότερο φανερό ότι η ανάφλεξη του κάρβουνου επηρεάζεται περισσότερο από τη λεπτότητα της διαμέρισης του παρά από την περιεκτικότητά του σε πτητικές ουσίες.

Το κονιορτοποιημένο κάρβουνο και ο αέρας καύσης πρέπει να θερμανθούν ως τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Σε 20% περίσσεια αέρα, η θέρμανση του αέρα καύσης απαιτεί περίπου το 90%, ενώ η θέρμανση του κάρβουνου μόλις το 10% της θερμότητας που απαιτείται για την ανάφλεξη.

2.3.9 Χρόνος καύσης

Όσο γρηγορότερα μετακινούνται και αντικαθίστανται από φρέσκο αέρα τα απαέρια καύσης, τόσο γρηγορότερα καίγονται τα σωματίδια του κάρβουνου. Για να εκπληρωθεί αυτή η προϋπόθεση, απαιτείται μεγάλη σχετική ταχύτητα μεταξύ αέρα καύσης και σωματιδίων του κάρβουνου. Η διαδικασία της καύσης αποτελείται από δυο φάσεις : την εξάλειψη των πτητικών ουσιών και την καύση των στερεών συστατικών, πχ του κωκ. Ο Gumz ανέπτυξε μια σχέση για τον υπολογισμό του χρόνου καύσης για τα σωματίδια σκόνης του κάρβουνου. Το διάγραμμα του Σχήματος 2-28 δεικνύει το χρόνο καύσης σε δευτερόλεπτα, για σωματίδια κάρβουνου μεταξύ 0.02 και 0.5 mm, σε θερμοκρασίες καύσης 900-1500K.



Σχήμα 2-28 Συσχέτιση μεταξύ χρόνου καύσης και μεγέθους σωματιδίου κονιορτοποιημένου κάρβουνου

2.3.10 Μεταφορά θερμότητας κατά την καύση κάρβουνου

Κατά την καύση, η μεταφορά της θερμότητας προς το περιβάλλον γίνεται κυρίως με ακτινοβολία και σε μικρότερο βαθμό με συναγωγή. Μόνο το 13% του όγκου του περιστροφικού κλιβάνου συνήθως πληροίται και για αυτό το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας μεταφέρεται προς την επένδυση του κλιβάνου, ενώ ένα σχετικά μικρό ποσό παραλαμβάνεται από τη φάρινα του κλιβάνου.

Το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς θερμότητας γίνεται με ακτινοβολία. Οι αρχές της ακτινοβολίας για τα στερεά σώματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη περίπτωση της ακτινοβολίας της φλόγας, η οποία δεν απασχολεί το συνολικό θερμικό φάσμα. Μονατομικά και διατομικά αέρια όπως είναι το άζωτο και το οξυγόνο βρίσκονται στο εύρος του υπέρυθρου, και είναι εξολοκλήρου διαφανή. Ως εκ τούτου, η θερμική ακτινοβολία τους ισούται με το μηδέν και η παρουσία τους είναι άνευ σημασίας. Από την άλλη μεριά, αέρια με υψηλότερο αριθμό ατόμων, όπως για παράδειγμα το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και το διοξείδιο του θείου, αναπτύσσουν μια σημαντική θερμική ακτινοβολία, σύμφωνα με το εύρος συχνοτήτων απορρόφησης στη περιοχή του υπέρυθρου. Το διοξείδιο του άνθρακα για παράδειγμα, ακτινοβολεί στην ακόλουθη περιοχή συχνοτήτων απορρόφησης $\lambda = 2.64-2.84 \text{ nm}, 4.13-4.47 \text{ nm}$ και $13.0-17.0 \text{ nm}$.

Οι ατμοί νερού έχουν πέντε φάσματα απορρόφησης με τα ακόλουθα μέγιστα μήκη κύματος $\lambda = 1.36 \text{ nm}, 1.85 \text{ nm}, 2.70 \text{ nm}, 5.90 \text{ nm}$ και 19.60 nm . Η εξάρτηση της ακτινοβολίας των αερίων με τη θερμοκρασία είναι διαφορετική από την αντίστοιχη των στερεών σωμάτων. Η αντιπροσωπευτική μορφή για το διοξείδιο του άνθρακα είναι $T^{3.5}$ και για τους υδρατμούς T^3 αντί του T^4 που προκύπτει από το νόμο των Stefan-Boltzmann.

Κατά συνέπεια, τα ενεργά συστατικά του κονιοροποιημένου κάρβουνου που ακτινοβολούν είναι :

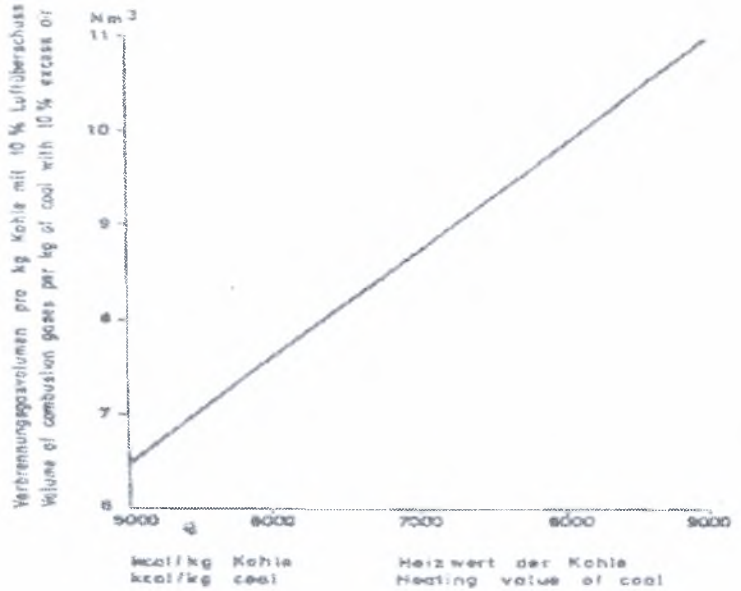
- i) Το περιεχόμενο σε διοξείδιο του άνθρακα στη φλόγα των αερίων*
- ii) Το περιεχόμενο του νερού στη φλόγα των αερίων και*
- iii) Το περιεχόμενο της αιωρούμενης σκόνης στη φλόγα των αερίων*

Ο Schack ανέπτυξε τις σχέσεις για τον υπολογισμό της θερμότητας που ακτινοβολούν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό. Οι συνθήκες που συνθέτουν τις σχέσεις αυτές, πληροφορούν για την μεταφορά θερμότητας από τα αέρια στη ζώνη κλινκεροποίησης :

- i) Αύξηση της θερμοκρασίας της φλόγας*
- ii) Αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού και*
- iii) Αύξηση της διαμέτρου του κλιβάνου ως τα ανώτερα όρια.*

2.3.11 Αέρια καύσης

Το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-29, δεικνύει τον όγκο των αερίων καύσης, ο οποίος προκύπτει από την καύση 1 kgf κάρβουνου με θερμογόνο αξία μεταξύ 5000 και 9000 kcal/kg και παροχή 10% περίσσειας αέρα. Το διάγραμμα βασίζεται σε ανάλυση περίπου τριάντα ειδών αμερικανικών κάρβουνων.

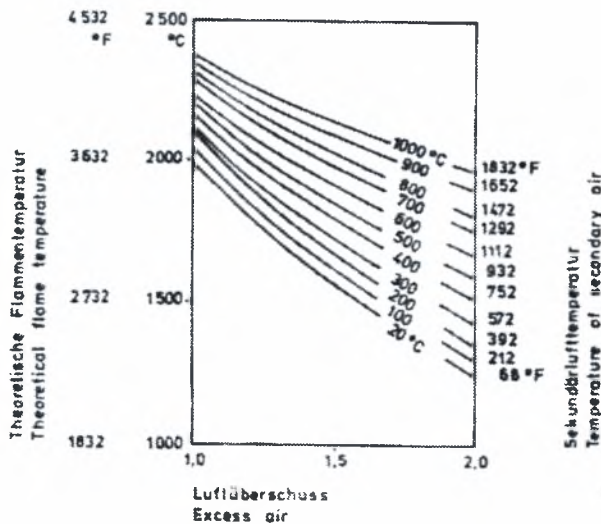


Σχήμα 2-29 Όγκοι αερίων καύσης από 1 kg κάρβουνου εξαρτώμενοι από τη θερμογόνο δύναμη

2.3.12 Θερμοκρασία φλόγας

Η θεωρητική θερμοκρασία φλόγας από την καύση του κάρβουνου μπορεί να υπολογιστεί

από την ακόλουθη σχέση :
$$T_{theor.} = \frac{Q}{V_G \times C_P}$$



όπου, $T_{theor.}$ είναι η θερμογόνος δύναμη του κάρβουνου, σε kcal/kg, V_G ο όγκος των αερίων καύσης, σε Nm^3/kg και C_P η ειδική θερμότητα των αερίων καύσης.

Στο Σχήμα 2-30, η θεωρητική θερμοκρασία φλόγας παρουσιάζεται ενάντια στο ρυθμό περίσσειας του αέρα και τη θερμοκρασία του δευτερογενή αέρα.

Σχήμα 2-30 Θεωρητική θερμοκρασία φλόγας για διάφορα ποσοστά περίσσειας αέρα

2.3.13 Προεπεξεργασία του κάρβουνου

Η κονιορτοποίηση του κάρβουνου απαιτεί ειδικές προφυλάξεις για να αποφευχθεί η έκρηξη της σκόνης του άνθρακα, η οποία εκδηλώνεται αν και εφόσον υπάρχουν οι κάτωθι συνθήκες :

- ⇒ Η συγκέντρωση της σκόνης άνθρακα στο μίγμα των αερίων είναι μεταξύ των ορίων έκρηξης
- ⇒ Η περιεκτικότητα του αερίου μίγματος σε οξυγόνο είναι επαρκής για να γίνει η έκρηξη
- ⇒ Υπαρξη επαρκούς θερμικής ενέργειας, ικανής για να προκαλέσει έκρηξη

Θεωρητικά, επομένως η έλλειψη ενός από τους παραπάνω παράγοντες είναι αρκετός για να αποφευχθεί η έκρηξη της σκόνης του κάρβουνου. Στη πράξη όμως, είναι δόκιμο να εκλείπουν δυο ή αν είναι δυνατό και οι τρεις παράγοντες.

2.3.14 Συγκέντρωση της σκόνης του κάρβουνου

Για το ορυκτό κάρβουνο, το εύρος της έκρηξης είναι, ανάμεσα σε όρια συγκέντρωσης από 150gr (κάτω όριο έκρηξης) ως 1500gr σκόνης κάρβουνου (άνω όριο έκρηξης) ανά 1m^3 αέρα σε κανονικές συνθήκες. Αυτά τα όρια ποικίλλουν, ανάλογα με το περιεχόμενο του αερίου και τη λεπτότητα του κάρβουνου. Η λεπτότητα της σκόνης του κάρβουνου πρέπει να είναι ισοδύναμη ως προς το υπόλοιπο (10-15%) από διαμέριση 1 kg κάρβουνου που γίνεται σε κόσκινο τύπου 170 (διαμέτρηση οπής 88 μm). Έτσι, η συγκέντρωση της κυμαίνεται κάτω από το κάτω όριο έκρηξης ανάμεσα σε 0 και $150\text{gr}/\text{m}^3$ και είναι εμφανώς περιορισμένη. Στη κονιορτοποίηση του κάρβουνου, αυτό το εύρος της συγκέντρωσης δεν μπορεί να υφίσταται, εξαιτίας των υπέρμετρων απαιτήσεων σε αέρια. Η χρησιμοποίηση του κάρβουνου με συγκέντρωση σκόνης ανάμεσα στα όρια έκρηξης, μεταξύ 150 και $1500\text{gr}/\text{m}^3$, γενικώς αποφεύγεται για λόγους επικινδυνότητας ακόμα και όταν δεν πληρούνται, οι άλλοι δύο παράγοντες εκρηκτικότητας. Η συγκέντρωση της σκόνης του κάρβουνου που είναι πάνω από το άνω όριο έκρηξης είναι η μόνη αποτελεσματική συγκέντρωση, η οποία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις ξήρανσης- κονιορτοποίησης του κάρβουνου.

Στα συστήματα ξήρανσης-κονιορτοποίησης, το μέγιστο ποσοστό οξυγόνου που πρέπει να υπάρχει είναι περίπου 14%. Μέρος των επανακυκλοφορούντων απαερίων προκαλούν μείωση του ποσοστού οξυγόνου. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε οξυγόνο, μερικές φορές μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνες καταστάσεις κατά την εκκίνηση λειτουργίας της βιομηχανικής εγκατάστασης. Χαμηλώνοντας τη περιεκτικότητα του οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κάτω ορίου έκρηξης και τη μείωση του άνω ορίου έκρηξης, περιορίζοντας έτσι το εύρος της έκρηξης και αυξάνοντας τη θερμοκρασία ανάφλεξης του αερίου μίγματος.

2.3.15. Επάρκεια θερμικής ενέργειας

Η θερμική ενέργεια που απαιτείται για να προκαλέσει έκρηξη μπορεί να δημιουργηθεί από τις ακόλουθες τρεις πηγές :

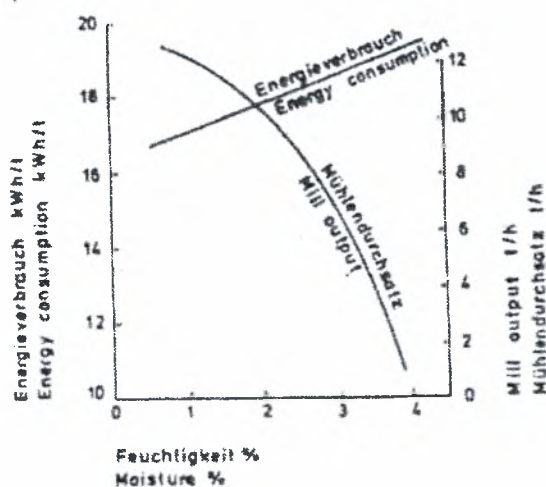
- ⇒ Αυτανάφλεξη του κάρβουνου
- ⇒ Υπερθέρμανση του κάρβουνου από περίσσεια θερμών και αποξηραμένων αερίων, και
- ⇒ Υπερθέρμανση των μηχανικών μερών

2.3.16 Ξήρανση του κάρβουνου

Η ξήρανση του κάρβουνου με περιεκτικότητα υγρασίας 15-40% πραγματοποιείται κυρίως σε ξηραντήρες κυλινδρικού τύπου, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της ξήρανσης της φαρίνας. Η θερμοκρασία των αερίων καύσης που εισέρχονται στο ξηραντήρα δεν πρέπει να ξεπερνά τους 450°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ειδική θερμότητα κατανάλωσης να είναι μεγαλύτερη για την ξήρανση του κάρβουνου σε σύγκριση με την ξήρανση της φαρίνας. Η θερμοκρασία των αερίων που αφήνουν τον ξηραντήρα είναι περίπου 120°C και του αποξηραμένου κάρβουνου 70°C.

Ο ρυθμός εξάτμισης κατά την ξήρανση του κάρβουνου στους κυλινδρικούς ξηραντήρες είναι της τάξης των 25-35 kg υδρατμών για κάθε m³ του όγκου του ξηραντήρα ανά ώρα. Η ανεκμετάλλευτη θερμότητα από τους περιστροφικούς κλιβάνους και από τα ψυγεία του κλίνκερ, χρησιμοποιείται για να ξηράνει το κάρβουνο, αλλά συχνά, χρησιμοποιείται και θερμός αέρας από τον κλίβανο. Η θερμική κατανάλωση κατά την ξήρανση του κάρβουνου στους ξηραντήρες ανέρχεται κατά προσέγγιση σε 1500 kcal ανά Kg νερού.

Το κάρβουνο πρέπει να αποξηραίνεται έτσι ώστε να παραμένει ένα αναγκαίο ποσοστό υγρασίας της τάξης του 1-1.5 %. Το μέγιστο ποσοστό υγρασίας του άνθρακα που δύναται να αποξηρανθεί στις εγκαταστάσεις ξήρανσης-κονιορτοποίησης είναι 15%. Αυτό το όριο επι-



βάλλεται από την μέγιστη θερμοκρασία των θερμών αερίων που εισάγονται στην εγκατάσταση ξήρανσης-κονιορτοποίησης, και δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 450°C.

Σχήμα 2-31 Συσχέτιση της υγρασίας του κάρβουνου με την έξοδο σωληνοειδούς μύλου και της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας κονιορτοποίησης

2.3.17 Κονιορτοποίηση κάρβουνου

Η κονιορτοποίηση του άνθρακα πραγματοποιείται είτε σε κοίλους είτε σε σωληνοειδείς μύλους. Η λεπτότητα του κονιορτοποιημένου άνθρακα πρέπει να είναι ίση με το υπόλοιπο 1.5-2% σε κόσκινο διαμετρήματος No 0.2 (900M/cm²) και με το 15% στο κόσκινο διαμετρήματος No 0.09 (4900M/cm²). Κατά κανόνα όσο μικρότερος είναι ο περιστροφικός κλίβανος, τόσο λεπτότερος πρέπει να είναι και ο άνθρακας. Η ενεργειακή κατανάλωση για την κονιορτοποίηση του κάρβουνου βρίσκεται σε ένα εύρος μεταξύ 10-30 kWh/t. Η υγρασία του κάρβουνου έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του μύλου. Αύξηση της υγρασίας κατά 1-3 % προκαλεί μείωση της απόδοσης του μύλου περίπου κατά 45-50 %, και συγχρόνως αύξηση της ειδικής ενέργειας κατανάλωσης κατά 10% για το ίδιο μέγεθος σωματιδίου. Αυτός ο συσχετισμός παριστάνεται στο Σχήμα 2-31.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το κάρβουνο πρέπει να ξηραίνεται μέχρι το ποσοστό της υγρασίας γίνει 1-1.5%.

2.3.18 Μέθοδος λειτουργίας των μύλων του άνθρακα

Ως προς τον εναρμονισμό του μύλου άνθρακα και του ΠΚ υπάρχουν βασικά δυο διαφορετικοί μέθοδοι λειτουργίας:

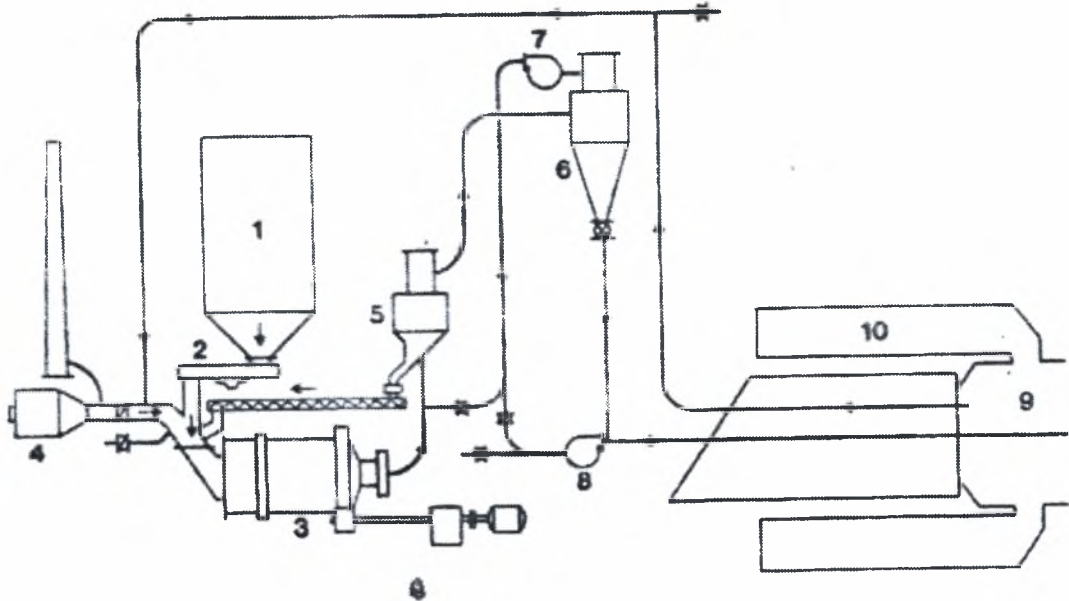
- **Ο μύλος απευθείας πυροδότησης**

Αυτός ο μύλος λειτουργεί σε απευθείας σύνδεση με τον περιστροφικό κλίβανο και πρέπει να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του κλιβάνου. Το κόστος επένδυσης αυτού του είδους μύλου είναι κατά προσέγγιση 40% χαμηλότερο από την αντίστοιχη εγκατάσταση με δοχείο καύσης. Παρόλα αυτά, κάτω από κάποιες περιστάσεις, η λειτουργική εξάρτηση του κλιβάνου με τους απευθείας μύλους πυροδότησης δεν επιτυγχάνεται.

Ο έλεγχος της φλόγας του περιστροφικού κλιβάνου περιπλέκεται από τη ύπαρξη του μύλου απευθείας πυροδότησης. Οι υδρατμοί διασκορπίζονται μαζί με το αποξηραμένο κάρβουνο μέσα στον περιστροφικό κλίβανο, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία φλόγας. Είναι επιβεβαιωμένο ότι για κάθε ποσοστιαία μονάδα της υγρασίας του κάρβουνου χαμηλώνει η θερμοκρασία φλόγας κατά 10-14°C, μειώνοντας έτσι την απόδοση του κλιβάνου. Επίσης, είναι εμπειρικά γνωστό ότι μείωση της θερμοκρασίας φλόγας κατά 10°C προκαλεί μείωση της παραγωγής του κλιβάνου τουλάχιστον κατά 1%.

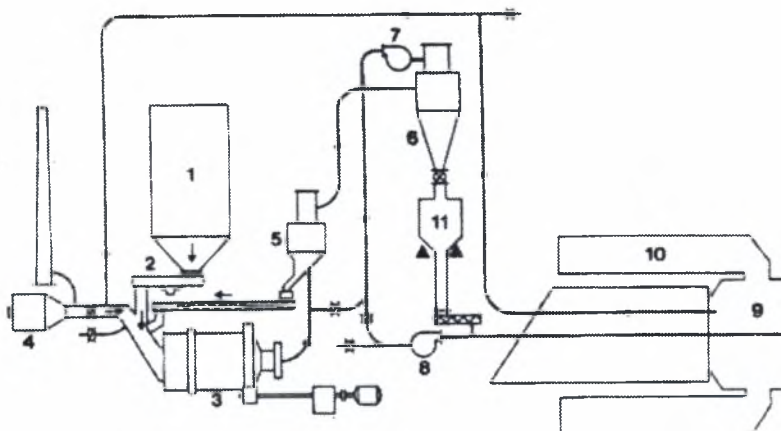
Το Σχήμα 2-32, εμφανίζει μια παρόμοια διάταξη με τη διαφορά ότι υπάρχει επιπλέον αεροκαπνοκαθαριστής (ball mill). Η θερμότητα ξήρανσης παρέχεται από το έξοδο του ΠΚ, μέ-

σω θερμών αερίων που προσάγονται από ειδικά εγκατεστημένους φυσητήρες. Κατά τα άλλα, ο μύλος αυτός παρουσιάζει όλα τα μειονεκτήματα του μύλου απευθείας πυροδότησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 2-32 Μύλος απ' ευθείας πυροδότησης FLS Tirax

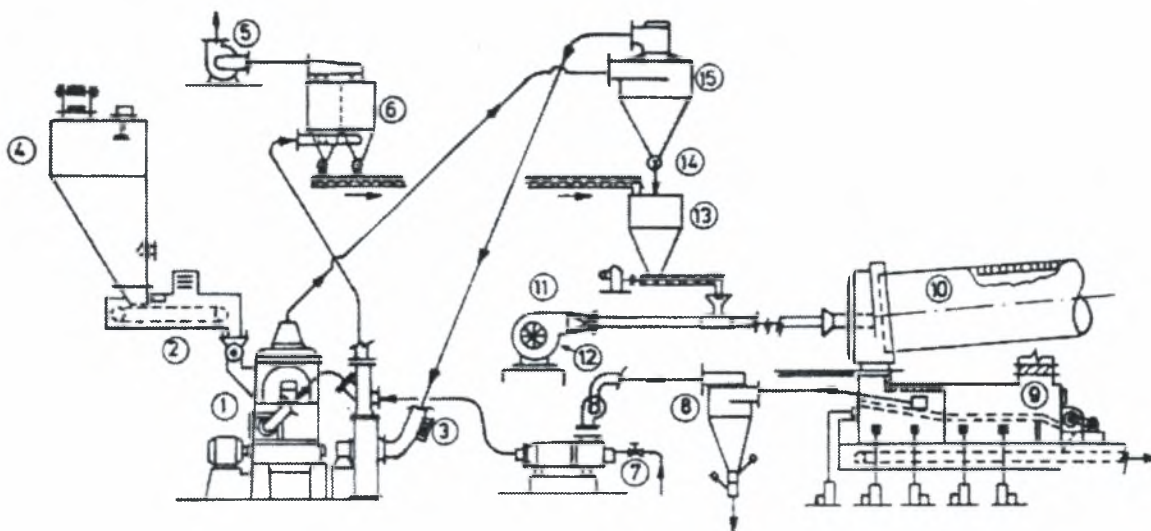
Τα μειονεκτήματα του μύλου απευθείας πυροδότησης ελαχιστοποιούνται στη διάταξη που δείχνει το Σχήμα 2-33. Ένας κώνος τροφοδοσίας με ικανότητα αποθήκευσης μερικών ωρών, αναρτάται πάνω σε ειδικά κελιά φόρτωσης, που τοποθετούνται ανάμεσα στον κυκλώνα συλλογής και στον φυσητήρα πρωτογενούς αέρα και ελέγχουν τη τροφοδοσία του μύλου. Η σκόνη άνθρακα παρέχεται στον περιστροφικό κλίβανο μέσω ενός τροφοδότη κοχλιώδους μεταφοράς. Η έξοδος του αέρα από το μύλο οδηγείται στον κλίβανο ως πρωτογενής αέρας.



Σχήμα 2-33 Μύλος ημιάμεσης πυροδότησης κάρβουνου FLS

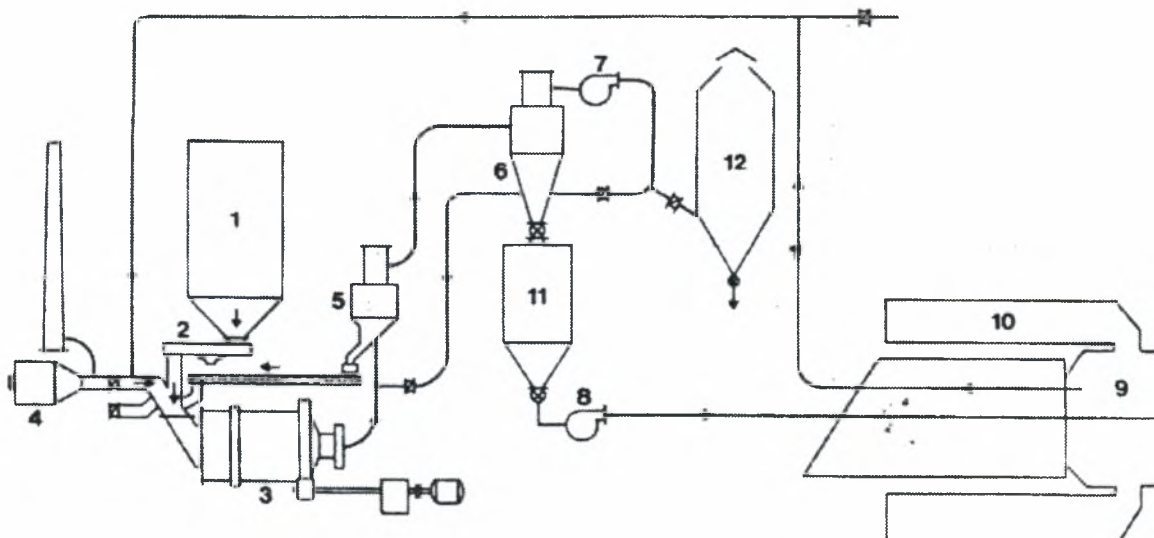
- Η κεντρική εγκατάσταση κονιορτοποίησης ή σύστημα δοχείου πυροδότησης

Η ικανότητα της κεντρικής εγκατάστασης κονιορτοποίησης είναι αισθητά υψηλότερη από την κατανάλωση κάρβουνου του κλιβάνου. Έτσι δημιουργούνται αποθέματα σκόνης κάρβου-νου, συσσωρεύονται και φράζουν την επικοινωνία μεταξύ του κλιβάνου και του μύλου. Παρ' όλα αυτά, η κεντρική εγκατάσταση κονιορτοποίησης προτιμάται σε πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής τσιμέντου.



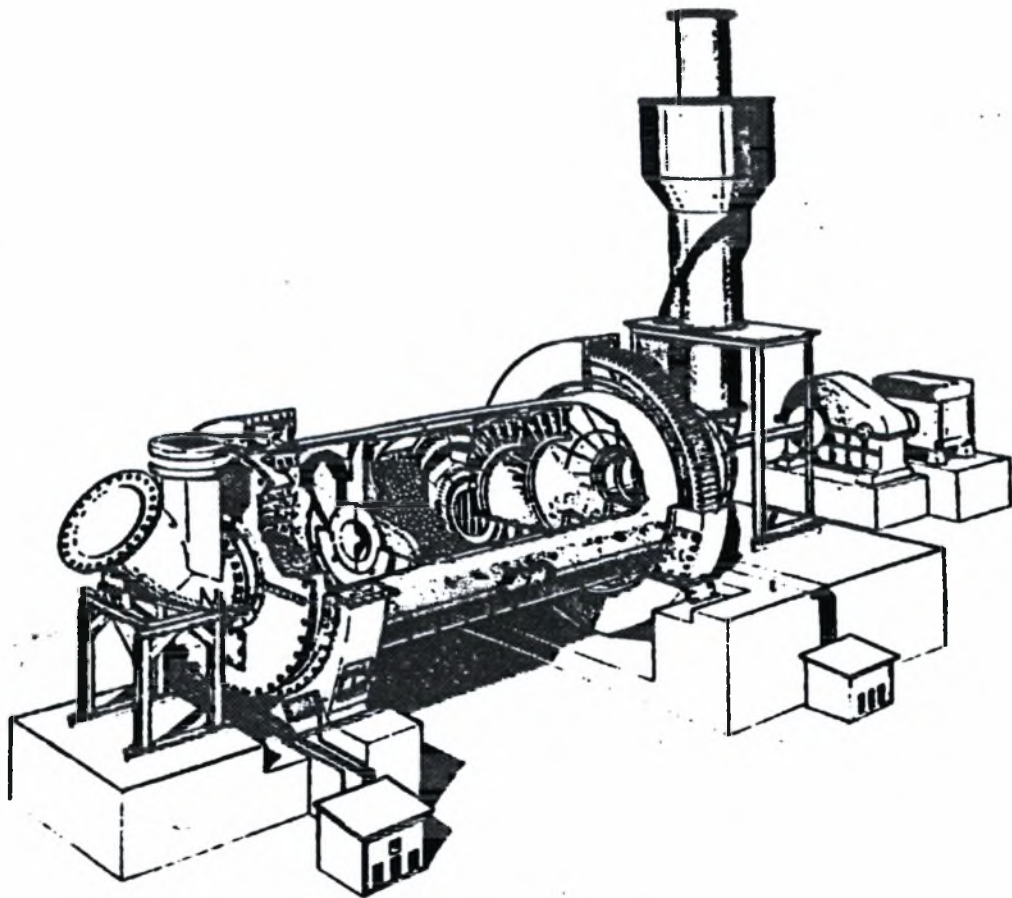
Σχήμα 2-34 Κεντρική εγκατάσταση κονιορτοποίησης κάρβουνου

Το Σχήμα 2-34, δείχνει σχηματικά τη διάταξη μιας κεντρικής εγκατάστασης κονιορτοποίησης ενώ το Σχήμα 2-35, δείχνει μια παρόμοια διάταξη που χρησιμοποιεί μύλους τύπου Tigrax. Ομοίως, η θερμότητα ξήρανσης προσάγεται από το τέλος του περιστροφικού κλιβάνου.



Σχήμα 2-35 Κεντρική εγκατάσταση κονιορτοποίησης κάρβουνου με μύλους τύπου Tigrax

Οι μύλοι που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-33 έως 2-35, είναι σφαιρικοί μύλοι με μεγάλα εσωτερικά ανοίγματα, μέσα στους οποίους πραγματοποιείται η ξήρανση και η κονιορτοποίηση του κάρβουνου με αρχικό ποσοστό υγρασίας έως και 20%. Αποτελούνται από ένα τμήμα ξήρανσης και δυο τμήματα κονιορτοποίησης, τα οποία λειτουργούν σε κλειστό κύκλο με ένα διαχωριστή. Για μεγάλη ροή αέρα στο μύλο, ρυθμίζεται καταλλήλως το άνοιγμα οπής της θυρίδας τροφοδοσίας. Έτσι, αυτή η πλευρά του μύλου εδράζεται σε ένα τριβέα ολίσθησης, όπου η απόληξη του τέλους συγκρατείται σε ένα στροφικό ρουλεμάν (Σχήμα 2-36). Η εταιρία F. L. Smidth, ανέπτυξε μια σειρά από μύλους ξήρανσης-κονιορτοποίησης άνθρακα, με ικανότητα ξήρανσης 4-30t/h. Η απόδοση του μύλου βασίζεται στην ικανότητα σωστής κονιορτοποίησης σε κλειστό κύκλο με διαχωριστή αέρα. Το μέγεθος των σωματιδίων της τροφοδοσίας του μύλου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15mm με μέγιστο ποσοστό υγρασίας 10%. Το προϊόν κονιορτοποιείται σε λεπτότητα 85-88 % με το πέρασμά του σε κόσκινο No 0.09 (4900 Maschen/cm²).



Σχήμα 2-36 Διάταξη ξήρανσης κονιορτοποίησης τύπου Tira από την εταιρία F.L.S.

2.4 Φαρίνα

Για την παραγωγή του τσιμέντου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορυκτά φυσικής προέλευσης καθώς και βιομηχανικά προϊόντα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι ανόργανες χημικές ουσίες που περιέχουν τα κύρια συστατικά του τσιμέντου, όπως είναι το οξείδιο του ασβεστίου (άσβεστος), το οξείδιο του πυριτίου (πυριτία), το οξείδιο του αλουμινίου (αλουμίνα) και το οξείδιο του σιδήρου. Αυτά τα συστατικά σπάνια βρίσκονται στην απαιτούμενη αναλογία σε πρώτες ύλες. Γι' αυτό το σκοπό, συνήθως συλλέγεται κατάλληλο μίγμα ενός υλικού που περιέχει υψηλό ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου (ασβεστώδες συστατικό) και ενός δεύτερου υλικού το οποίο περιέχει σε μικρές ποσότητες, οξείδιο του ασβεστίου και σε μεγαλύτερες οξείδιο του πυριτίου, οξείδιο του αλουμινίου και οξείδιο του σιδήρου (αργιλώδες συστατικό). Τα δύο κύρια συστατικά είναι σε γενικές γραμμές, ασβεστόλιθος και οξείδιο του σιδήρου ή ασβεστόλιθος και ασβεστολιθική άργιλος.

2.4.1 Ασβεστώδη συστατικά

Ασβεστόλιθος

Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) όλων των γεωλογικών σχηματισμών που είναι διάσπαρτο στη φύση, είναι κατάλληλο για την παραγωγή του τσιμέντου Portland. Οι καθαρότερες βαθμίδες του ασβεστόλιθου είναι ο ασβεστίτης και ο αραγονίτης. Ο ασβεστίτης έχει εξαγωνική κρυσταλλική δομή, ενώ ο αραγονίτης κρυσταλλοποιείται ρομβικά. Το ειδικό βάρος του ασβεστίτη είναι 2.7 gr/cm^3 και του αραγονίτη 2.95 gr/cm^3 . Το μάρμαρο αποτελεί μια μακροσκοπική ποικιλία του ασβεστίτη. Όμως, η χρήση του μάρμαρου στην βιομηχανική παραγωγή τσιμέντου δεν είναι προσοδοφόρος.

Οι πιο κοινοί σχηματισμοί του ανθρακικού ασβεστίου, παρόμοιοι προς το μάρμαρο, είναι ο *ασβεστόλιθος* και η *κιμωλία*. Ο ασβεστόλιθος έχει συνήθως λεπτόκοκκη κρυσταλλική δομή και η σκληρότητα του αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η γεωλογική ηλικία του. Η σκληρότητα του ασβεστόλιθου είναι 1,8 έως 3,0 μονάδες της κλίμακας σκληρότητας Mohs. Το ειδικό βάρος του είναι περίπου 2,6 με $2,8 \text{ gr/cm}^3$. Μόνο οι καθαρότερες ποικιλίες του ασβεστόλιθου είναι άσπρες. Ο ασβεστόλιθος συνήθως περιέχει διάφορες προσμίξεις από αργιλώδη υλικά ή ενώσεις του σιδήρου, που επηρεάζουν το λευκό χρώμα του.

Η *κιμωλία* είναι ένα ιζηματοειδες πέτρωμα, το οποίο σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της κρητιδικής γεωλογικής περιόδου. Σε αντίθεση με τον ασβεστόλιθο, η κιμωλία χαρακτηρίζεται από μια απαλή χωμάτινη υφή. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τη κιμωλία κατάλληλη για φαρίνα, ιδιαίτερα κατά την υγρή διαδικασία της παραγωγής τσιμέντου. Αυτό το είδος της φαρίνας ελαχιστοποιεί το κόστος παραγωγής του τσιμέντου εξαιτίας του γεγονότος ότι η εξόρυξη της

κιμωλίας από το έδαφος είναι εύκολη και δεν απαιτείται εξόρυξη με εκρηκτικά μέσα καθώς και διαδικασία θρυμματισμού του υλικού. Σε μερικά κοιτάσματα κιμωλίας, το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου κυμαίνεται μεταξύ 98 και 99 %, με μερικές προσμίξεις οξειδίου του πυριτίου(SiO_2), οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3) και ανθρακικού μαγγανίου (MgCO_3). Το ποσοστό της άσβεστου στη φαρίνα είναι γενικά περίπου 76 ~ 80%. Γι' αυτό το λόγο, οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες του επηρεάζουν αποφασιστικά την επιλογή της μεθόδου παραγωγής του τσιμέντου καθώς και τον τύπο των εγκαταστάσεων παραγωγής.

Ασβεστολιθική άργιλος

Ο ασβεστόλιθος με προσμίξεις οξειδίου του πυριτίου, ενώσεις αργίλου και οξειδίου του σιδήρου καλείται *ασβεστολιθική άργιλος*. Οι σχηματισμοί ασβεστολιθικής αργίλου αποτελούν μεταβατικά στοιχεία προς τα αργιλώδη. Εξαιτίας της ευρείας παρουσίας της ως ορυκτού, η ασβεστολιθική άργιλος χρησιμοποιείται συνήθως ως συστατικό της φαρίνας για την παραγωγή τσιμέντου.

Γεωλογικά, η ασβεστολιθική είναι ιζηματώδη πετρώματα που δημιουργήθηκαν ταυτόχρονα με την ιζηματογένεση του ανθρακικού ασβεστίου και του αργίλου. Η σκληρότητα του είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη του ασβεστόλιθου. Μερικές φορές, η ασβεστολιθική άργιλος περιέχει ασφατούχες ουσίες. Το χρώμα της εξαρτάται από το ποσοστό της αργίλου και ποικίλει από το κίτρινο προς το γκριζο με μαύρο. Η ασβεστολιθική άργιλος αποτελεί άριστη πρώτη ύλη για την παραγωγή του τσιμέντου, γιατί περιέχει τα ασβεστώδη και αργιλώδη συστατικά σε ομογενοποιημένη μορφή. Ο ασβεστούχος άργιλος που παρουσιάζει χημική σύνθεση αντίστοιχη με πρώτη ύλη για την παραγωγή του τσιμέντου Portland, χρησιμοποιείται για την παραγωγή του αποκαλούμενου φυσικού τσιμέντου. Παρόλα αυτά, κοιτάσματα αυτού του τύπου πρώτης ύλης δεν είναι ευρέως διαδεδομένα. Ως προς την ποσοτική αναλογία των ασβεστωδών και αργιλωδών συστατικών στη φαρίνα τσιμέντου έχει καθιερωθεί η ακόλουθη ταξινόμηση, που παρουσιάζεται στους Πίνακες 2-12 και 2-13.

Πίνακας 2-12 Σύσταση σε CaCO_3 ασβεστόλιθων και μαρμάρων για παραγωγή του τσιμέντου

Περιεχόμενο CaCO_3	Ονομασία
96-100 %	Υψηλής καθαρότητας ασβεστόλιθος
90-96 %	Μαρμαρώδης ασβεστόλιθος
75-90 %	Ασβεστώδη μάρμαρο
40-75 %	Μάρμαρο
10-40 %	Αργιλώδης μάρμαρο
4-10 %	Μαρμαρώδης άργιλος
0-4 %	Άργιλος

Πίνακας 2-13 Χημική σύνθεση ασβεστόλιθων και μαρμάρων για παραγωγή του τσιμέντου

Συστατικό	1 Ασβεστόλιθος	2 Ασβεστόλιθος	3 Ασβεστόλιθος	4 Ασβεστόλιθος	5 Μάρμαρο	6 Μάρμαρο	7 Μάρμαρο
SiO ₂	3.76	6.75	4.91	4.74	27.98	33.20	21.32
Al ₂ O ₃	1.10	0.71	1.28	2.00	10.87	8.22	4.14
Fe ₂ O ₃	0.66	1.47	0.66	0.36	3.08	4.90	1.64
CaO	52.46	49.80	51.55	51.30	30.12	27.30	39.32
MgO	1.23	1.48	0.63	0.30	1.95	1.02	0.75
K ₂ O	0.18	Αγνοείται	Αγνοείται	0.16	0.20	0.12	0.06
Na ₂ O	0.22	Αγνοείται	Αγνοείται	0.28	0.33	0.18	0.08
SO ₃	0.01	1.10	0.21	-	0.70	0.37	-
LOI	40.38	39.65	40.76	40.86	24.68	24.59	32.62
Σύνολο	100.00	99.96	100.00	100.00	99.91	99.90	99.93

2.4.2 Αργιλώδη συστατικά

Η δεύτερη σε σημασία πρώτη ύλη για την παρασκευή τσιμέντου είναι η άργιλος και γενικά τα αργιλώδη συστατικά. Η άργιλος σχηματίζεται από την οξείδωση των αλκαλίων και των αλκαλικών ουσιών που περιέχουν άλατα του αργιλικού πυριτίου και από την χημική μετατροπή των προϊόντων τους κυρίως της μαρμαρυγίας και του αστρίου. Το κύριο συστατικό των αργιλωδών αλκαλίων σχηματίζεται από το ένυδρο άλας του αργιλικού πυριτίου. Η άργιλος ταξινομείται στις ακόλουθες ομάδες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-14.

Πίνακας 2-14 Ταξινόμηση των αργιλωδών συστατικών - Χημικοί τύποι και ονομασίες

Ομάδα καολινητικής άργιλου	
Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O	Καολινήτης
Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O	Dickite
Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O	Nacrite
Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ 2H ₂ O	Halloysite
Ομάδα ορυκτής άργιλου Montmorillontile	
Al ₂ O ₃ 4SiO ₂ H ₂ O + nH ₂ O	Montmorillontile
Al ₂ O ₃ 3SiO ₂ nH ₂ O	Μπεντιλίτης
(Al, Fe) ₂ O ₃ 3SiO ₂ nH ₂ O	Nontronite
2MgO 3SiO ₂ nH ₂ O	Σαπωνόλιθος
Ομάδα αργιλικών αλκαλίων	
K ₂ O-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O	Αλκάλια μαρμαρυγίας που περιέχουν illite

Τα ορυκτά της καολινητικής ομάδας διαφέρουν ως προς το ποσοστό του οξειδίου του πυριτίου ως προς την κρυσταλλογραφική δομή και τις οπτικές τους ιδιότητες. Ο προσδιορισμός καολινητικός, αναφέρεται στα καθαρότερα στρώματα του ορυκτού καολινήτη. Τα αργιλώδη έχουν ως επί των πλείστον λεπτόκοκκη δομή. Η διάμετρος των σωματιδίων του αργίλου είναι συνήθως κάτω από 2 μm. Το σημείο τήξης του αργίλου κυμαίνεται μεταξύ 1150°C και 1785°C.

Πίνακας 2-15 Ειδική επιφάνεια και ειδική βαρύτητα ορυκτών αλκαλίων

Ειδική επιφάνεια ορυκτής αργίλου	
Καολινήτης	~15 m ² /gr
Halloysite	~43 m ² /gr
Illite	~100 m ² /gr
Montmorillonite	~800 m ² /gr
Ειδική βαρύτητα	
Καολινήτης	2.60~2.68 gr/cm ³
Halloysite	2.0~2.20 gr/cm ³
Illite	2.76~3.00 gr/cm ³

Η χημική σύνθεση της αργίλου μπορεί να αντιστοιχεί στα καθαρότερα στρώματα αργίλου ή σε αυτές που περιέχουν ένα μικρό ποσοστό χημικών προσμίξεων από ανθρακικό ασβέστιο, διοξείδιο του σιδήρου, άλατα του σιδήρου, άμμο κτλ. Το διοξείδιο του σιδήρου καθορίζει το χρώμα της αργίλου, η όποια χωρίς προσμίξεις είναι λευκή ενώ παρουσία οργανικών ενώσεων επηρεάζει το χρώμα τους. Η κύρια πηγή των αλκαλίων στο τσιμέντο είναι τα αργιλώδη συστατικά της φαρίνας.

Ο Πίνακας 2-16 δείχνει την χημική σύνθεση διάφορων ειδών αργίλου, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του τσιμέντου Portland.

Πίνακας 2-16 Χημική σύσταση αργίλου για παραγωγή τσιμέντου Portland

Ποσοστό Σύστασης	Αργίλος 1	Αργίλος 2	Αργίλος 3	Αργίλος 4
LOI	7.19	8.67	10.40	6.40
SiO ₂	67.29	62.56	52.30	60.10
Al ₂ O ₃	8.97	15.57	24.70	18.00
Fe ₂ O ₃	4.28	4.47	6.10	8.20
CaO	7.27	4.80	4.40	0.80
MgO	1.97	1.38	0.10	0.20
SO ₃	0.32	-	1.10	3.80
K ₂ O	1.20	2.35	0.80	2.50
Na ₂ O	1.51			
Σύνολο	100.00	100.00	99.90	100.00

2.4.3 Διορθωτικά συστατικά

Σε περιπτώσεις όπου, ένα βασικό χημικό συστατικό στο μίγμα της φαρίνας του τσιμέντου δεν βρίσκεται στην κατάλληλη αναλογία, χρησιμοποιούνται ως προσθετικά διάφορα διορθωτικά συστατικά. Έτσι, για την αναπλήρωση του ποσοστού του οξειδίου του πυριτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά ή διορθωτικά συστατικά άμμος, αργιλώδη με υψηλό ποσοστό οξειδίου του πυριτίου κα. Ομοίως, για την αναπλήρωση του οξειδίου του σιδήρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλοιπα πυριτίου, σίδηρος κτλ.

Πίνακας 2-17 Χημική σύνθεση διορθωτικών συστατικών

Συστατικό	Διατομίδια	Βωξίτης	Κατάλοιπα πυριτίου	Σίδηρος	Σκόνη από θερμό κλίβανο	Σκόνη	Άμμος
LOI	6.2	15-20	-	5-12	5-15	0.2-4.0	0.2
SiO ₂	77.0	16-22	6.6-25.0	20-25	11-22	26-36	99.2
Al ₂ O ₃	9.6	44-58	2-16	3-9	5-14	6.5-9.5	-
Fe ₂ O ₃		10-16	62-87	45-60	54-69	5-8	0.5
CaO	0.3	2-4	0.7-0.9	0.5-2.5	1-9	42-50	-
MgO	0.9	0.2-1.0	0.2-2	1.5-7	0.5-2.5	3-4	-
SO ₃	-	-	0.8-8	0.3-0.6	0.2-2.5	2.5-3.0	-
Na ₂ O	1.5	-	-	-	-	0.8-3.5	-
K ₂ O		-	-	-	-	-	-

2.4.4 Βοηθητικά συστατικά των πρώτων υλών του τσιμέντου

Στις επόμενες παραγράφους, παρουσιάζονται τα συστατικά, των οποίων οι ποσότητες περιορίζονται στο τσιμέντο, είτε λόγω προδιαγραφών είτε λόγω βιομηχανικής εμπειρίας.

Οξείδιο του μαγνησίου

Αυτό το συστατικό συνδυάζεται μέχρι 2% κ.β. με τις κύριες φάσεις του κλίνκερ. Πέρα από αυτό το ποσοστό εμφανίζεται στο κλίνκερ ελεύθερο οξείδιο του μαγνησίου (MgO). Το οξείδιο του μαγνησίου αντιδρά με το νερό προς σχηματισμό υδροξυλίου του μαγνησίου (Mg(OH)₂) σύμφωνα με την αντίδραση: $MgO + H_2O \Rightarrow Mg(OH)_2$.

Όμως, η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται αργά, ενώ η αντίδραση σκλήρυνσης έχει ήδη τερματιστεί. Αφού το βασικό μαγνήσιο καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από το οξείδιο του μαγνησίου και σχηματίζεται στο ίδιο σημείο, όπου βρίσκεται το σωματίδιο του οξειδίου του μαγνησίου, μπορεί να θραύσει το υπό σκλήρυνση τσιμέντο, με αποτέλεσμα να εμφανιστούν ρωγμές (διαστολή μαγνησίας).

Το οξείδιο του μαγνησίου εμφανίζεται στον ασβεστόλιθο κυρίως ως δολομίτης (CaCO₃:MgCO₃). Επίσης, η σκουριά του φούρνου μερικές φορές περιέχει υψηλό ποσοστό του οξειδίου του μαγνησίου. Έτσι, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για να διατηρείται το ποσοστό του οξειδίου του μαγνησίου στα επιτρεπτά όρια σε περιπτώσεις, όπου γίνεται συλλογή και χρήση αυτής της σκόνης απαερίων από τον κλίβανο ως αντικατάστατο του αργιλώδους συστατικού της φαρίνας.

Αλκάλια

Τα αλκάλια K_2O και Na_2O παράγονται όταν για πρώτες ύλες χρησιμοποιηθούν είτε άργιλος είτε ασβεστολιθική άργιλος. Οι ενώσεις αυτές, εμφανίζονται σε λεπτή διασπορά στα σωματίδια του αστρίου, του μαρμαρυγία και ιλλίτη και σε μικρό ποσοστό στην τέφρα του κάρβουνου. Στην κεντρική Ευρώπη το ποσοστό του K_2O είναι πολλαπλάσιο του ποσοστού του Na_2O . Σε άλλες περιοχές, όπως στην Αμερική για παράδειγμα, το ποσοστό του Na_2O υπερσχύει. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης στον περιστροφικό κλίβανο, μέρος των αλκαλίων εξατμίζονται στη ζώνη καύσης, σχηματίζοντας την αποκαλούμενη κυκλοφορία των αλκαλίων (Κύκλος αλκαλίων).

Σε συγκεκριμένα σκυροδέματα (που συναντώνται σε μερικές περιοχές της Αμερικής, της Γερμανίας, της Δανίας αλλά και αλλού) συναθροίζονται συστατικά ευαίσθητα προς τα αλκάλια, πχ. το οπάλιο (ένυδρο οξειδίο του πυριτίου), το οποίο αντιδρά με τα αλκάλια του τσιμέντου και κάτω από μερικές ανεπιθύμητες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα διαστολής (διαστολή των αλκαλίων). Όπως είναι γνωστό από την εμπειρία, η διαστολή των αλκαλίων μπορεί να αποφευχθεί, χρησιμοποιώντας τσιμέντο με χαμηλό ποσοστό αλκαλίων. Σε αυτή την περίπτωση, το σύνολο των αλκαλίων, υπολογιζόμενο ως Na_2O (ποσοστό κατά βάρος $Na_2O + 0,659 \% K_2O$) δεν πρέπει να ξεπερνά το 0,6% κατά βάρος. Με βάση τους περιορισμούς που εφαρμόζονται σε άλλες χώρες, στη Γερμανία αποφασίστηκε ένα όριο 0,6% ισοδύναμου Na_2O , αλλά μόνο για το τσιμέντο Portland. Η πρακτική εμπειρία έχει δείξει ότι το όριο του ποσοστού των αλκαλίων μπορεί να είναι υψηλότερο στο τσιμέντο, όταν χρησιμοποιείται σκόνη από κλίβανο. Έτσι, το τσιμέντο με χαμηλό ποσοστό ενεργών αλκαλίων (NA-τσιμέντο) με σύσταση σκόνης περίπου 50%, μπορεί να περιέχει ένα μέγιστο ποσοστό αλκαλίων της τάξης του 0,9%. Επιπλέον, το μέγιστο συνολικό όριο του ποσοστού των αλκαλίων που επιτρέπεται για το τσιμέντο είναι 2%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για την σκόνη αλκαλίων είναι λιγότερο του 6.5%.

Σε περιπτώσεις που απαιτείται NA-τσιμέντο, αλλά το ποσοστό των αλκαλίων στο κλίνκερ που καίγεται από την διαθέσιμη φαρίνα είναι πάνω από τα επιτρεπτά όρια, μέρος των απαερίων πρέπει να παρακαμφθούν, πριν την είσοδό τους στο σύστημα προθέρμανσης, για να απομακρυνθεί μέρος των πτητικών αλκαλίων.

Σ' αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι ομοσπονδιακές προδιαγραφές των ΗΠΑ, (SS-C-192b και AASHO καθώς και αυτές τις ASTM αναφέρουν ότι τα προαιρετικά όρια του ποσοστού των αλκαλίων για το τσιμέντο Portland είναι 0,6 % κατά Na_2O . Αυτό σημαίνει ότι ο τελικός χρήστης πρέπει να καθορίσει το επιθυμητό ποσοστό αλκαλίων να είναι εντός του παραπάνω ορίου, αλλιώς δεν υπάρχουν όρια για το ποσοστό των αλκαλίων.

Θείο

Το θείο εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή σουλφιδίου (πυρίτη και μαρκασίτη, FeS_2) σε όλους σχεδόν τους τύπους φαρίνας. Η έρευνα περίπου (90) αποθεμάτων γερμανικού ασβεστόλιθου, έδειξε ότι το συνολικό ποσοστό του θείου ήταν περίπου 0.16% S και η εξέταση (67) αποθεμάτων αργίλου, έδωσε ποσοστό περίπου 0.22% S. Το ποσοστό του θείου στα καύσιμα ποικίλλει από μηδέν για το φυσικό αέριο μέχρι 3,5% για το αργό πετρέλαιο ενώ για το κάρβουνο, το ποσοστό αυτό είναι περίπου 1.1%. Η εξέταση (21) συστημάτων προθέρμανσης στη Γερμανία έδειξε ότι το ποσοστό του θείου που εισάγεται με τη φαρίνα κυμαίνεται από 0.5 έως 11 gr SO_3 ανά κιλό κλίνκερ, ενώ το θείο που εισάγεται με το καύσιμο, κατά την χρήση ενός εξαιρετικά υψηλού σε ποσοστό θείου πετρελαίου, έδειξε ένα μέγιστο 6 gr SO_3 ανά κιλό κλίνκερ.

Το θείο της φαρίνας και του εξατμιζόμενου καυσίμου στη ζώνη καύσης δίνει διοξείδιο του θείου, το οποίο έρχεται σε επαφή με τα αλκάλια και το οξυγόνο στον κλίβανο, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ατμών θεικών αλκαλίων, οι οποίοι συμπυκνώνονται επάνω στα σωματίδια της φαρίνας στις ψυχρότερες περιοχές του κλιβάνου και των ανακομιστών. Με εξαίρεση ένα μικρό μέρος το οποίο απομακρύνεται με τη σκόνη του κλιβάνου, τα θεικά αλκάλια επιστρέφουν στη ζώνη καύσης και αφήνουν το κλίβανο μαζί με το κλίνκερ, εξαιτίας της χαμηλής πτητικότητας που παρουσιάζουν. Αν το ποσοστό του SO_2 είναι ανεπαρκές για να συνδυαστεί με όλη τη ποσότητα των αλκαλίων, ξεκινά η κυκλοφορία (ο κύκλος αλκαλίων) της μέσης πτητικότητας ανθρακικών αλκαλίων ή της υψηλής πτητικότητας χλωρικών αλκαλίων. Όσα ανθρακικά αλκάλια δεν δεσμεύονται από τις διάφορες φάσεις του κλίνκερ, εξατμίζονται ξανά στη ζώνη καύσης.

Στο σύστημα προθέρμανσης τυχόν περίσσεια του SO_2 είναι ικανή να αντιδράσει με το CaCO_3 και να επιστέψει στον κλίβανο ως CaSO_4 . Στη συνέχεια στη ζώνη καύσης, το CaSO_4 αποσυντίθεται, αυξάνοντας έτσι την κυκλοφορία του SO_2 . Παρόλα αυτά, ένα μέρος θα εμφανιστεί στο κλίνκερ ως μη αποσυντεθημένο CaSO_4 .

Η παρουσία των αλκαλίων στη φαρίνα σε περίσσεια του ποσοστού που έχει δεσμευτεί από το θείο που περιέχει η φαρίνα, επιτρέπει τη χρήση καυσίμων με μεγάλο ποσοστό θείου χωρίς να εκπέμπονται αξιοσημείωτες ποσότητες SO_2 από τα απαέρια του κλιβάνου. Τα σουλφίδια των αλκαλίων συνδυασμένα με το κλίνκερ, εντείνουν την πρόωμη σκλήρυνση του τσιμέντου. Από την άλλη μεριά, το υψηλό ποσοστό θείου μπορεί να επιφέρει αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του θείου στα απαέρια εξόδου, στραγγαλίζοντας το σύστημα προθέρμανσης αλλά και να υποβοηθήσει στον σχηματισμό των δακτυλειοδών επιστρώσεων στον κλίβανο.

Για τον έλεγχο του χρόνου προετοιμασίας, το τσιμέντο χρειάζεται ένα ελάχιστο ποσό σουλφιδίων του ασβεστίου, κυρίως υπό τη μορφή γύψου προστιθέμενου στο κλίνκερ. Από την άλλη μεριά, το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό του SO₃ στο τσιμέντο (για να αποτραπεί η διαστολή των σουλφιδίων) καθορίζεται με βάση διάφορες προδιαγραφές τσιμέντου, από 2.5 έως 4.0%. Στα χαμηλότερα όρια που επιβάλλονται από τις προδιαγραφές, είναι πιθανό να μην υπάρχει ικανή ποσότητα θείου για εκτεταμένη σουλφοποίηση των αλκαλίων.

Χλωρίδια

Το ποσοστό των χλωριδίων στη Γερμανική φαρίνα τσιμέντου κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 0,1% κατά βάρος και μερικές φορές σπανιότερα πάνω από 0,3%. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα χλωρίδια αντιδρούν με τα αλκάλια στον περιστροφικό κλίβανο, σχηματίζοντας αλκαλικά χλωρίδια, τα οποία εγκαταλείπουν τον κλίβανο με τα απαέρια και συμπυκνώνονται στους ανακομιστές προθέρμανσης. Επιστρέφουν στον κλίβανο μαζί με τη φαρίνα, αλλά σε αντίθεση με τα αλκάλια σουλφιδίων, εξατμίζονται ακαριαία στη ζώνη καύσης. Εφόσον συμπυκνώνονται εξ'ολοκλήρου στους ανακομιστές προθέρμανσης, η κυκλοφορία τους περιορίζεται ανάμεσα στη ζώνη καύσης και στους ανακομιστές προθέρμανσης, έως ότου η αύξηση της στρώματος τζίρας διακόψει την λειτουργία του περιστροφικού κλιβάνου. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, μέρος των απαερίων (10 έως 25%) παρακάμπτονται και δεν εισέρχονται στους ανακομιστές προθέρμανσης. Όπως εμπειρικά είναι γνωστό, η παράκαμψη των απαερίων είναι απαραίτητη όταν το ποσοστό των χλωριδίων στη φαρίνα είναι μεγαλύτερο από 0,015% Cl.

Κατά το παρελθόν, το χλωρικό ασβέστιο ως προσθετική ουσία στο τσιμέντο χρησίμευε για την αύξηση της σκληρότητάς του. Αργότερα, αποδείχθηκε ότι προκαλεί διάβρωση του χάλυβα, γεγονός το οποίο είχε καταστρεπτική επίδραση στα συρματόσχοινα προέντασης στις κατασκευές προεντεταμένου σκυροδέματος. Γι' αυτό οι αναθεωρημένες γερμανικές προδιαγραφές για το τσιμέντο κατά DIN 1164 του 1970, δεν επέτρεπαν την προσθήκη χλωριδίων στο τσιμέντο. Παρόλα αυτά, ίχνη χλωρίου περίπου 0,1% είναι επιτρεπτά, αν προέρχονται από τη φαρίνα.

Το ποσοστό των φθοριδίων στη φαρίνα κυμαίνεται από 0.03 έως 0.08 %. Σε αντιδιαστολή με τα χλωρίδια, τα φθορίδια δεν είναι τόσο πτητικές ουσίες και έτσι δεν διαταράσσουν τις διάφορες λειτουργίες, αφού δεν κυκλοφορούν στο σύστημα του κλιβάνου. Η προγενέστερη πρακτική της πρόσθεσης 1% φθοριούχου ασβεστίου στη φαρίνα με σκοπό να διευκολυνθεί η καύση του κλίνκερ έχει εγκαταλειφθεί, αφού η δέσμευση της άσβεστου μπορεί να επιτευχθεί με μεγαλύτερο βαθμό ομογενοποίησης και λεπτότερη κονιορτοποίηση της φαρίνας.

Το ποσοστό των φωσφορούχων είναι πολύ χαμηλό στη φαρίνα. Στη Γερμανία, το ποσοστό του πεντοξειδίου του φωσφόρου (P₂O₅) στο κλίνκερ είναι ανάμεσα στα όρια 15 και

0.25%. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται φαρίνα με μεγαλύτερο ποσοστό φωσφορούχων, πχ. ασβεστόλιθος με υψηλό ποσοστό P_2O_5 , προσδιορίζεται ένα παραδεκτό όριο περίπου 2.5% P_2O_5 στο κλίνκερ. Παρόλα αυτά, πρέπει να αναφερθεί ότι ποσοστό του P_2O_5 της τάξης του 0.5% είναι ικανό να ελαττώσει την σκληρότητα του τσιμέντου και ιδιαίτερα την πρώιμη σκλήρυνσή του.

2.4.5 Ανόργανες ενώσεις του κλίνκερ τσιμέντου Portland

Το κλίνκερ του τσιμέντου Portland, περιέχει κατά προσέγγιση τα χημικά συστατικά που αναφέρονται στο Πίνακα 2-18.

Πίνακας 2-18 Χημική σύνθεση κλίνκερ

Συστατικό	Ποσοστό	Συστατικό	Ποσοστό
SiO_2	16-26 %	CaO	58-67 %
Al_2O_3	4-8 %	MgO	1-5 %
Fe_2O_3	2-5 %	K_2O+Na_2O	0-1 %
Mn_2O_3	0-3 %	SO_3	0.1-2.5 %
TiO_2	0-0.5 %	P_2O_5	0-1.5 %

Το κλίνκερ του τσιμέντου Portland, περιέχει κατά προσέγγιση τις ανόργανες φάσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 2-19 Φάσεις που αναγνωρίζονται, σύμφωνα με την χημική σύσταση του κλίνκερ

Όνομασία	Εύρος ισχύος	Χημικός Τύπος	Συντόμηση
Αλίτης		$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Μπελίτης		$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Τριασβέστουχο αλουμινοξείδιο	$Al_2O_3 > Fe_2O_3$	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Τετρασβεστούχος αλουμινοφερριτης	$Al_2O_3 > Fe_2O_3$	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF
Αλουμινοφερριτικό ασβέστιο	$Al_2O_3 < Fe_2O_3$	$2CaO \cdot (Al_2O_3, Fe_2O_3)$	$C_2(A,F)$
Οξειδίο του ασβεστίου		CaO	
Τριοξειδίο του μαγνησίου		MgO	
Όνομασία	Εύρος ισχύος	Χημικός Τύπος	Συντόμηση
Αλκάλια που περιέχουν αλουμίνα	$(K,Na)_2O > SO_3$	$(K,Na)_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$	$(K,Na)C_3A_3$
Θειικά αλκάλια	$(K,Na)_2O > SO_3$	$(K,Na)_2SO_4$	
Θεικό ασβέστιο	$(K,Na)_2O < SO_3$	$CaSO_4$	

Οι ανόργανες ουσίες του κλίνκερ δεν είναι καθαρές ενώσεις, αλλά μίγματα κρυσταλλικών φάσεων, τα οποία περιέχουν συστατικά άλλων φάσεων σε μικρά ποσά ως συνδυασμούς των αναμιγμένων κρυστάλλων. Αυτοί οι κρύσταλλοι περιέχουν, επίσης προσμίξεις του κλίνκερ που δεν κατόρθωσαν να σχηματίσουν διακριτές φάσεις. Για να χαρακτηριστεί η διαφορά ανάμεσα στις καθαρές ενώσεις και στις ανόργανες ενώσεις του κλίνκερ, οι ονομασίες των βασικών συστατικών του κλίνκερ αλίτης και μπελίτης έχουν παραμείνει σε πρακτική χρήση. Ο

Tornebohm έδωσε αυτές τις ονομασίες το 1897, καθώς ήταν σε θέση να αναγνωρίσει τις ενώσεις αυτές με το μικροσκόπιο, αλλά η χημική τους σύνθεση δεν ήταν γνωστή.

⇒ Ο αλίτης αποτελεί το κυρίαρχο στοιχείο στο κλίνκερ και είναι αυτό που καθορίζει την σκληρότητά του. Έξι μετατροπές του αλίτη είναι γνωστές αλλά μόνο δυο υψηλότερες μετατροπές εμφανίζονται στο κλίνκερ. Αυτές οι μετατροπές σταθεροποιούνται με εισαγωγή ασύνδετων ατόμων.

⇒ Ο μπελίτης είναι κυρίως η β-μετατροπή του αλίτη. Στη θερμοκρασία σύντηξης του κλίνκερ και εφόσον η θερμοκρασία αυτή είναι πάνω από 1420°C , σχηματίζεται ο $\alpha\text{-C}_2\text{S}$. Αν η θερμοκρασία είναι κάτω από 1420°C , τότε σχηματίζεται το $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$. Αυτή η θερμοδυναμική φάση μεταβάλλεται στη μετασταθή β- C_2S καθώς το κλίνκερ ψύχεται στους 670°C . Επιπλέον, με αργή ψύξη του κλίνκερ λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός της ανενεργής γ-φάσης. Η μετάβαση από το β- C_2S στη γ-φάση συνοδεύεται από αύξηση του όγκου κατά 10%, ενώ το κλίνκερ διασπάται. Η γρήγορη ψύξη αλλά και διάφορα χημικά μείγματα τα οποία εμφανίζονται πάντοτε στο μπελίτη, αποτρέπουν τη μετάβαση από τη β-φάση στην ανεπιθύμητη και ανενεργή γ-φάση.

⇒ Ο μπελίτης σκληραίνει πιο αργά από τον αλίτη. Παρόλα αυτά, μετά από κάποιο σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα αποκτά την ίδια σκληρότητα.

⇒ Αν το κλίνκερ περιέχει λιγότερο αλουμίνα από οξείδιο του σιδήρου (υπολογισμοί σε moles), τότε τα δυο συστατικά σε συνδυασμό με τον ασβεστόλιθο σχηματίζουν το αλουμινοφερριτικό ασβέστιο, το οποίο είναι ένα μίγμα από κρυσταλλικές φάσεις με τελικό σύνδεσμο $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, όπου ο σίδηρος μπορεί στη συνέχεια να αντικατασταθεί από το αργίλιο. Αυτή η γραμμή από αναμιγμένους κρυστάλλους είναι ικανή να υπάρχει και στην περίπτωση που το πηλίκιο $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$ υπερβαίνει το 2 προς 1. Όμως, στο κλίνκερ του τσιμέντου Portland, που περιέχει μόνο ουσίες με υψηλό ποσοστό ασβεστόλιθου, αυτή η γραμμή τελειώνει απρόβλεπτα στο πηλίκιο 1/1. Αν το κλίνκερ περιέχει περισσότερο αλουμίνα, το μέρος εκείνο που υπερβαίνει αυτό το πηλίκιο – το οποίο υπακούει στη σχέση $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ – συνορεύει στον ασβεστόλιθο που περιέχει μεγαλύτερες ποσότητες τριασβεστούχου αλουμινοξειδίου.

Παρά το γεγονός ότι το τριασβεστούχο αλουμινοξείδιο αντιδρά πολύ γρήγορα με το νερό, δεν παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες, αλλά σε συνδυασμό με το πυριτικό άλας αυξάνει την αρχική σκληρότητα του τσιμέντου. Η συνεισφορά του αλουμινοφερριτη στη σκλήρυνση του τσιμέντου είναι μικρότερη.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, τα αλκάλια συνορεύουν με τις φάσεις του κλίνκερ, μόνο αν το ποσό του SO_3 , που εμφανίζεται στο κλίνκερ, δεν είναι επαρκές για την ολοκληρωτική δέσμευση σε μορφή αλκαλικών σουλφιδίων τα οποία εισέρχονται σε όλες τις φάσεις του κλίνκερ αλλά, προτιμούν τη φάση της αλουμίνας. Επίσης, σε αυτή τη φάση συνορεύουν ως αναμιγμένοι κρύσταλλοι, ενώ η σύνθεση του χημικού τύπου που αναφέρεται στον Πίνακα 2-19, εμφανίζεται μόνο όταν εισέρχεται ταυτόχρονα το οξείδιο του πυριτίου.

2.4.6 Λανθάνουσα σύνθεση του κλίνκερ

Η χημική ανάλυση παρουσιάζει μια εικόνα της σύνθεσης των οξειδίων στο κλίνκερ ή στο τσιμέντο. Ο Bogue ανέπτυξε μια υπολογιστική μέθοδο, σύμφωνα με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό των ανόργανων ενώσεων του κλίνκερ από τη χημική ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σύνθεση του κλίνκερ που υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή αναφέρεται από τον Bogue ως λανθάνουσα σύνθεση όπου εννοείται πως η σύνθεση που προκύπτει είναι η πιθανή και όχι η πραγματική, και επομένως μπορεί να σημειωθεί ότι η σύνθεση που προσδιορίζεται από την υπολογιστική μέθοδο του Bogue πιθανότατα να μην αντιστοιχεί στην ενεργή σύνθεση.

Λόγω της ξεκάθαρης παρουσίασης της σύνθεσης του κλίνκερ και της πιθανής πρόβλεψης των ιδιοτήτων του τσιμέντου, η υπολογιστική μέθοδος του Bogue είναι σε ευρεία χρήση. Αυτή η μέθοδος εμφανίζεται στις προδιαγραφές της Αμερικής, της Ρωσίας και σε πολλές άλλες χώρες. Παρόλα αυτά, στην προδιαγραφή ASTM περιέχεται ένας περιορισμός που αναφέρει ότι κατά την έκφραση των χημικών ορίων των υπολογιζόμενων ενώσεων δεν σημαίνει ότι τα οξείδια θα παρουσιάζονται ενεργά ή συνολικά ως τέτοιες ενώσεις.

Αν τα οξείδια, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 συμβολίζονται αντίστοιχα από τα γράμματα a , b , c , d και οι σύμπλοκες ενώσεις, C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ομοίως από τα γράμματα w , x , y , z ,

τότε μπορούν να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί, που παρουσιάζονται στην συνέχεια. Με δεδομένο ότι το C_3S περιέχει 73.69% CaO και 26.31% SiO_2 και το C_2S 65.12% CaO και 34.88% SiO_2 . Ο Πίνακας 2-20, δίνει επίσης τη σύνθεση των C_3A και C_4AF .

Πίνακας 2-20 Βοηθητικός πίνακας υπολογισμού

Συστατικά	Ενώσεις			
	C_3S (w)	C_2S (x)	C_3A (y)	C_4AF (z)
(a) CaO	0.7369	0.6512	0.6227	0.4616
(b) SiO_2	0.2631	0.3488	-	-
(c) Al_2O_3	-	-	0.3773	0.2098
(d) Fe_2O_3	-	-	-	0.3286

Ως εκ τούτου, σε κάθε μίγμα των τεσσάρων σύμπλοκων ενώσεων, το CaO είναι ίσο με το 73.69% του C₃S, με το 65.12% του C₂S, με το 62.27% του C₃A και με το 46.16% του C₄AF. Η συνολική ποσότητα του CaO είναι το άθροισμα όλων αυτών των ποσοτήτων, και το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα συστατικά.

$$a = 0,7369w + 0,6512x + 0,6227y + 0,4616z$$

$$b = 0,2631w + 0,3488x$$

$$c = 0,3773y + 0,2098z$$

$$d = 0,3286z$$

και λύνοντας ως προς w, x, y και z, θα είναι

$$w = 4,071a + 7,600b + 6,718c + 1,430d$$

$$x = 8,602b + 5,068c + 1,078d + 3,071a$$

$$y = 2,650c + 1,692d$$

$$z = 3,043d$$

αντικαθιστώντας τα γράμματα με τις ενώσεις που αντιστοιχούν σε αυτές,

$$C_3S = 4,071 CaO + 7,600 SiO_2 + 6,718 Al_2O_3 + 1,430 Fe_2O_3$$

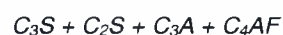
$$C_2S = 8,602 SiO_2 + 5,068 Al_2O_3 + 1,078 Fe_2O_3 + 3,071 CaO$$

$$C_3A = 2,650 Al_2O_3 + 1,692 Fe_2O_3$$

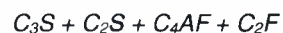
$$C_4AF = 3,043 Fe_2O_3$$

Οι σύμπλοκες ενώσεις σε άλλα συστήματα μπορούν να υπολογιστούν με παρόμοια προσέγγιση. Πρακτικά, οι ακόλουθες συνθέσεις φάσεων μπορούν να συναντηθούν:

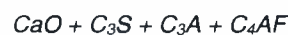
Τυπικό Τσιμέντο (No. 1)



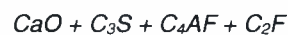
Τσιμέντο με υψηλό ποσοστό οξειδίου του σιδήρου (No. 2)



Τσιμέντο με υψηλό ποσοστό ασβεστόλιθου (No. 3)



Τσιμέντο με υψηλό ποσοστό ασβεστόλιθου και οξειδίου του σιδήρου (No. 4)



Ερευνώντας τις ιδιότητες του τσιμέντου, ο Brown προσδιόρισε μικροσκοπικά το περιεχόμενο των ανόργανων συστατικών διαφόρων κλίνκερ, και συγχρόνως υπολόγισε με τις σχέσεις του Bogue την σύσταση τους, για να συγκρίνει την μέθοδο. Στον Πίνακα 2-21, που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές που προσδιορίστηκαν και με τις δύο μεθόδους

Πίνακας 2-21 Συγκριτικός πίνακας μεθόδων προσδιορισμού ανόργανων ενώσεων στο κλίνκερ

No δείγματος κλίνκερ	C ₃ S [%]		C ₂ S [%]		C ₃ A [%]		C ₄ AF [%]	
	M	B	M	B	M	B	M	B
11	57.7	55.1	12.8	19.4	5.4	12.6	2.8	7.3
18	60.3	48.9	16.9	26.3	6.3	14.0	3.9	6.6
33	70.2	63.5	4.2	12.4	10.0	11.2	4.3	7.9
51	39.6	46.7	44.5	36.5	1.0	4.0	6.3	9.8

M = μικροσκοπική εκτίμηση
B = μέθοδος Bogue

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι στην πρώην ΕΣΣΔ, αναπτύχθηκε μια μέθοδος υγρής χημικής ανάλυσης για τον άμεσο προσδιορισμό της ποσότητας του C₃S, του C₂S και του C₃A. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην διαφορετική διαλυτότητα των παραπάνω ανόργανων ενώσεων στο βορικό και οξικό οξύ

2.4.7 Μέτρο Τσιμέντου (Cement moduli)

Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, το τσιμέντο Portland παράγονταν με βάση κυρίως την εμπειρία που αποκομίζονταν από την εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας. Όταν, όμως συγκρίθηκαν οι χημικές αναλύσεις του τσιμέντου Portland, βρέθηκε ότι υπάρχουν σχέσεις ανάμεσα στην εκατοστιαία αναλογία του ασβεστόλιθου από τη μια μεριά και στον συνδυασμό των ενώσεων του οξειδίου του πυριτίου, οξειδίου του αλουμινίου και του οξειδίου του σιδήρου από την άλλη. Αργότερα, αυτή η αναλογία, έδωσε το έναυσμα για τη δημιουργία της σχέσης, που είναι γνωστή ως υδραυλικό μέτρο.

2.4.8 Υδραυλικό μέτρο

Το υδραυλικό μέτρο χαρακτηρίζει το τσιμέντο με το πηλίκο του οξειδίου του ασβεστίου προς το σύνολο των υδραυλικών παραμέτρων, πχ οξείδιο του πυριτίου, οξείδιο του αργίλου, οξείδιο του σιδήρου. Το υδραυλικό μέτρο έχει την ακόλουθη μορφή :

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1.7 \text{ έως } 2.3 \quad (2.1)$$

Το HM είναι γενικά φραγμένο ανάμεσα στις τιμές 1,7 και 2,3. Το υδραυλικό μέτρο των τσιμέντων καλής ποιότητας ήταν κατά προσέγγιση ίσο με 2. Τσιμέντα με HM < 1,7 παρουσίαζαν κυρίως μικρή σκληρότητα. Τσιμέντα με HM > 2,4 και πάνω παρουσίαζαν μικρή σταθερότητα του όγκου.

Έχει βρεθεί ότι για την αύξηση του HM απαιτείται περισσότερη θερμότητα για την καύση του κλίνκερ. Η σκληρότητα και ιδιαίτερα η αρχική σκληρότητα καθώς και η θερμότητα ενδρωσης αυξάνεται, ενώ η αντίσταση του σε χημικές προσβολές μειώνεται. Κατά καιρούς, το

υδραυλικό μέτρο χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Για την καλύτερη πιστοποίηση του τσιμέντου, αργότερα προστέθηκαν και οι λόγοι του πυριτίου και της αλουμίνας.

2.4.9 Λόγος αλουμίνας

Ο λόγος αλουμίνας ορίζεται ως εξής : $AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ (2.2)

Γενικά, οι τιμές που παίρνει αυτό το πηλίκο είναι μεταξύ 1,5 και 2,5. Τσιμέντα με υψηλό ποσοστό αλουμίνας έχουν πηλίκο αλουμίνας 2,5 και πάνω. Αντίθετα, τσιμέντα με χαμηλό ποσοστό αλουμίνας έχουν πηλίκο αλουμίνας 1,5 και κάτω. Ο λόγος αλουμίνας προσδιορίζει τη σύνθεση της υγρής φάσης του κλίνκερ. Όταν ο λόγος αλουμίνας είναι 0,637, και τα δυο οξειδία βρίσκονται σε γραμμομοριακή αναλογία και έτσι μόνο αλουμινοφερριτικό ασβέστιο μπορεί να σχηματιστεί στο κλίνκερ. Κατά συνέπεια το κλίνκερ δεν μπορεί να περιέχει αριθμητικά τριασβέστουχο αλουμινοξείδιο. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί στο αποκαλούμενο Ferrarì- τσιμέντο, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμότητα ενύδρωσης, αργή χύτευση και μικρή συρρίκνωση. Ένας υψηλός λόγος αλουμίνας σε συνδυασμό με ένα χαμηλό λόγο πυριτίου επιδρά ανάμεσα σε άλλα και στην γρήγορη εναπόθεση του τσιμέντου. Κάτι τέτοιο απαιτεί τη συνθήκη ενός υψηλού πηλίκου θεικού ασβεστίου για τον έλεγχο του χρόνου εναπόθεσης του τσιμέντου.

2.4.10 Τύποι για τον ασβεστόλιθο

Συντελεστής κορεσμού της άσβεστου

Για να επιτευχθεί πλήρης διαπότιση του κλίνκερ με ασβεστόλιθο, η συνολική ποσότητα του διοξειδίου του πυριτίου πρέπει να μετασχηματιστεί σε C_3S και όλο το τριοξείδιο του σιδήρου μαζί με ισοδύναμο ποσό αλουμίνας να μετασχηματιστεί σε C_4AF , ενώ το υπόλοιπο ποσό αλουμίνας να μετατραπεί σε C_3A . Εκφράζοντας με σχέσεις μοριακών βαρών την παραγωγή CaO από τους παραπάνω μετασχηματισμούς, προκύπτει:

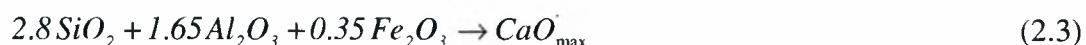
1 μέρος SiO_2 σε C_3S δίνει 2,8 μέρη CaO

1 μέρος Al_2O_3 σε C_3A δίνει 1,65 μέρη CaO

1 μέρος Al_2O_3 σε C_4AF δίνει 1,1 μέρη CaO

1 μέρος Fe_2O_3 σε C_4AF δίνει 0,7 μέρη CaO

Για να περιληφθεί η συνολική αλουμίνα σε ένα μόνο μέρος πρέπει να γίνει η παραδοχή ότι το C_4AF αποτελείται από C_3A και CF . Τότε θεωρητικά ένα μέρος Fe_2O_3 θα δώσει μόνο 0,35 μέρη CaO . Οπότε το μέγιστο ποσό CaO που μπορεί να παραχθεί είναι:



Το επίπεδο ασβεστόλιθου στο κλίνκερ χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή ασβεστολιθικού κορεσμού (LSF-lime saturation factor), που ουσιαστικά είναι ο λόγος του ενεργού περιεχομένου σε ασβεστόλιθο προς το μέγιστο δυνατό περιεχόμενο στο κλίνκερ.

$$LSF = \frac{100CaO}{2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3}$$

(2.4)

Για τεχνικούς λόγους, ο συντελεστής LSF παρουσιάζει διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών 0.8 και 0.95, κατά την παραγωγική διαδικασία. Εάν το κλίνκερ εμφανίζει υψηλό ποσοστό Fe_2O_3 τότε, η αλουμίνα περιορίζεται μόνο στην αναμεμιγμένη κρυσταλλική φάση $C_2(A_4F)$, και έτσι το μέγιστο ποσοστό ασβεστόλιθου στο κλίνκερ αλλά και ο συντελεστής LSF τροποποιούνται ως εξής:

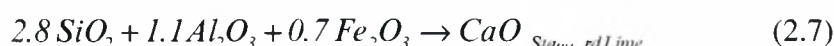


$$LSF = \frac{100CaO}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3} \quad (2.6)$$

2.4.11 Τυποποίηση Ασβεστόλιθου (Lime Standard)

Ο κορεσμός του ασβεστόλιθου που παρουσιάστηκε πριν, βασίστηκε στην παραδοχή ότι μετά την θερμοκρασία sintering, το κλίνκερ ψύχεται με αργό ρυθμό και έτσι κατά την διάρκεια της κρυσταλλοποίησης, η υγρή φάση βρίσκεται σε ισορροπία με την στερεά.

Οπωσδήποτε, αυτό δεν αφορά τις ποιότητες κλίνκερ που περιέχουν C_3A . Στην θερμοκρασία sintering (περίπου $1450^\circ C$) τα ανόργανα συστατικά του πυριτίου (C_3S και C_2S) και ίσως μη μετασχηματισμένος ελεύθερος ασβεστόλιθος βρίσκονται σε στερεή κατάσταση, όπου C_3A και C_4AF βρίσκονται σε κατάσταση τήξης. Η υγρή φάση είναι φτωχότερη σε ποσότητα ασβεστόλιθου από ότι θα ήταν με την συμμετοχή C_3A . Για να αποκατασταθεί η έλλειψη C_3A και κατ' επέκταση η έλλειψη ασβεστόλιθου, γίνεται απόσπαση του υπολειπόμενου ασβεστόλιθου κατά την διάρκεια της διεργασίας κρυσταλλοποίησης από τις στερεές φάσεις, οι οποίες συγχρόνως είναι πιο πλούσιες σε ασβεστόλιθο, είτε σε ελεύθερη μορφή είτε δεσμευμένο στο C_3S . Όμως, επειδή αυτές οι διεργασίες δεν μπορούν να ολοκληρωθούν κατά την διάρκεια της ψύξης με τεχνητά μέσα, πρακτικά η υγρή αλουμίνα δεν μπορεί να παράγει περισσότερο ασβεστόλιθο από ότι έχει απορροφηθεί στην θερμοκρασία sintering. Πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι ο πιο κορεσμένος ασβεστόλιθος από αλουμίνα δίνει πρακτικά δύο γραμμομόρια CaO ανά Al_2O_3 . Επομένως, υπό τεχνικές συνθήκες, αυτό είναι το εφικτό σημείο-όριο, το οποίο καλείται "standard lime".



3. Μαθηματικά Μοντέλα

3.1 Αεροδυναμικό μοντέλο - Σχήμα Euler

Οι εξισώσεις που διέπουν τα φαινόμενα ροής και μεταφοράς με χημικές αντιδράσεις περιγράφονται για την αέρια φάση σε ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler ενώ για τα σωματίδια χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange. Οι μέσης χρονικής τιμής (time-averaged) εξισώσεις των Navier-Stokes, για την μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας του ρευστού μπορούν να εκφραστούν στην παρακάτω γενική μορφή σε ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler και σε κυλινδρικές συντεταγμένες: [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U\Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V\Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho \frac{W}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}) = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma_\Phi r \frac{\partial \Phi}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta}) + S^\Phi \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου U , V , W είναι οι χρονικά μέσες ταχύτητες στην αξονική, ακτινική και περιφερειακή κατεύθυνση, αντίστοιχα. Η εξαρτημένη μεταβλητή, Φ , απεικονίζει τα διάφορα μέσα μεγέθη, όπως τρεις συνιστώσες ταχύτητας, ενθαλπία, κινητική ενέργεια της τύρβης κ.τ.λ. Ο συντελεστής μεταφοράς, Γ_Φ , και ο πηγαίος όρος, S^Φ , δίνονται για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή στον Πίνακα 3.1 που επισυνάπτεται στη συνέχεια.

Επίσης στον Πίνακα 3.1, δίνονται και οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιούνται για το k-ε μοντέλο τύρβης. Το μαθηματικό μοντέλο, που παρουσιάζεται στη γενική του μορφή, μοντελοποιεί και τους όρους της φυγοκέντρου δύναμης (οι όροι τις αγκύλες { }) και του πολικού μέρους των όρων του ιξώδους (οι όροι στις παρενθέσεις []). Οι θεμελιώδεις εξισώσεις δίνονται στην ελλειπτική τους μορφή ώστε να επιτρέπεται η προσομοίωση ροών με περιοχές διάτμησης ή ανακυκλοφορίας.

Πίνακας 3-1 Συντελεστές μεταφοράς και πηγαίοι όροι

Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων			
Συνεχεία	<i>l</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Ορμή στη x-κατεύθυνση	<i>U</i>	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial x})$
Ορμή στη y-κατεύθυνση	<i>V</i>	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial y})$
Ορμή στη z-κατεύθυνση	<i>W</i>	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial z})$
Κυλινδρικό Σύστημα Συντεταγμένων			
Ορμή στην x-κατεύθυνση	<i>U</i>	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial x})$
Ορμή στην r-κατεύθυνση	<i>V</i>	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu_e \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial r})$ $[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e W) - \frac{2\mu_e}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} - 2\frac{\mu_e V}{r^2}] + \{\rho \frac{W^2}{r}\}$
Ορμή στην θ-κατεύθυνση	<i>W</i>	μ_e	$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\frac{\mu_e}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta})$ $[\frac{2}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e V) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e W) + \frac{\mu_e}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\mu_e}{r} \frac{\partial W}{\partial r} -$ $\frac{\mu_e W}{r^2}] - \{\rho \frac{WV}{r}\}$
Κινητική ενέργεια τύρβης	<i>k</i>	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	<i>G</i> - $\rho \epsilon$
Ρυθμός σκέδασης τύρβης	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{\bar{k}} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$
Όπου, <i>G</i> , μ_e , μ_l , <i>C_D</i> , <i>C₁</i> , <i>C₂</i> , σ_k και σ_ϵ είναι οι εξής ποσότητες:			
$G = \mu_e [2\{(\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial r})^2 + (\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{V}{r})^2\} + \{(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x})^2 + (\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta})^2 + (\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W}{r})^2\}] \mu_e$			
$= \mu + \mu_l, \mu_l = C_D \rho \frac{k^2}{\epsilon}, C_D = 0,09, C_1 = 1,44, C_2 = 1,92, \sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,314$			

Ο συντελεστής διάχυσης της ενθαλπίας καθορίζεται ως εξής: $\Gamma_h = \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$

όπου μ_e είναι το ενεργό ιξώδες και σ_ϵ ο αριθμός Prandtl.

3.1.1 Μοντέλα Μεταφοράς Θερμότητας

Αέρια Φάση

Στη μαθηματική μοντελοποίηση της ροής και των αντιδράσεων στον ασβεστοποιητή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιγραφούν επαρκώς τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας. Όπου εξελίσσονται χημικές αντιδράσεις, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντική και επομένως απαιτείται ακριβής υπολογισμός των τοπικών θερμοκρασιών.

Η μεταφορά θερμότητας για την αέρια φάση αλλά και για τα σωματίδια ακολουθεί το ίδιο πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται και στη μεταφορά της ορμής. Δηλαδή, η μεταφορά θερμότητας για τα αέρια γίνεται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler ενώ για τα σωματίδια χρησιμοποιείται ένα σχήμα Lagrange.

Η θεμελιώδης εξίσωση για την μετάδοση θερμότητας στην αέρια φάση είναι παρόμοια με την γενική εξίσωση μεταφοράς. Ειδικότερα, η ενθαλπία (h) υπολογίζεται από την σχέση διατήρησης της ενέργειας για πολικές συντεταγμένες:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U h) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V h) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho \frac{W}{r} \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma_h r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\Gamma_h \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) + S^h \end{aligned} \quad (3.2)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς της ενθαλπίας καθορίζεται από την σχέση:

$$\Gamma_h = \frac{\mu_e}{\sigma_e}$$

όπου, μ_e είναι το ενεργό ιξώδες και σ_e ο αριθμός Prandtl.

Ο πηγαίος όρος, S^h , περιλαμβάνει την διαφασική μεταφορά ενέργειας και την προσθήκη ενέργειας λόγω των χημικών αντιδράσεων αλλά όχι την ιξώδη σκέδαση και την κινητική ενέργεια καθώς στην παρούσα ροή είναι αμελητέες λόγω των μικρών ταχυτήτων.

Σωματίδια

Για το ενεργειακό ισοζύγιο του σωματιδίου στην περίπτωση όπου η μάζα του σωματιδίου αλλάζει λόγω πυρόλυσης ή καύσης ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p H_i - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (3.3)$$

όπου, C_p είναι η ειδική θερμότητα του σωματιδίου, T_p η θερμοκρασία του σωματιδίου, L_v η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη πυρόλυση και H_i ο συνολικός ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ σωματιδίου και περιβάλλοντος. Θεωρώντας τον χρόνο κατά τη διαδικα-

σία επίλυσης μικρό και τις ιδιότητες του σωματιδίου σταθερές δηλαδή $\frac{dc_p}{dt}=0$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$c_p \frac{dT_p}{dt} = H_i - L_i \frac{dm_p}{dt} \quad (3.4)$$

Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ σωματιδίου και περιβάλλοντος λαμβάνει χώρα με τους ακόλουθους τρεις τρόπους:

α) Συναγωγή

$$Q_c = \pi d_p^2 h_c \frac{T_g - T_p}{m_p} \quad (3.5)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς, h_c , δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = Nu \frac{k_g}{d_p} \quad (3.6)$$

όπου, ο αριθμός Nusselt είναι: $Nu = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$ (3.7)

$$k_g = \text{η θερμική αγωγιμότητα του αερίου: } k_g = 6.739 \cdot 10^5 T_g + 6.446 \cdot 10^{-3} \quad (3.8)$$

όπου, Pr είναι ο αριθμός Prandtl και T_g η θερμοκρασία του αερίου.

Η θερμοχωρητικότητα του σωματιδίου υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$c_p = 1214 + 209.3(1 - X_v) - 544.2(1 - X_c) [3] \quad (3.9)$$

όπου, X_v και X_c είναι το κλάσμα της μάζας των ανόργανων συστατικών και του άνθρακα που δεν έχουν καεί, αντίστοιχα.

β) Καύση

Ο ρυθμός θέρμανσης του σωματιδίου από την καύση του άνθρακα είναι:

$$Q_b = \frac{a H_c}{m_p} \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) \quad (3.10)$$

όπου, H_c είναι η ενέργεια της αντίδρασης και a το ποσοστό απορρόφησης ενέργειας από το σωματίδιο κατά τη καύση

γ) Ακτινοβολία

Ο ρυθμός εναλλαγής ενέργειας λόγω ακτινοβολίας μεταξύ του σωματιδίου και του περιβάλλοντος είναι:

$$Q_r = \pi d_p^2 \epsilon_p \sigma \frac{T_R^4 - T_p^4}{m_p} \quad (3.11)$$

Όπου, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann, ϵ_p ο συντελεστής απορρόφησης του σωματιδίου και T_R η θερμοκρασία περιβάλλοντος (υπολογίζεται από το μοντέλο ακτινοβολίας)

Με βάση τα παραπάνω ο ολικός ρυθμός ανταλλαγής είναι:

$$H_t = Q_c + Q_h + Q \quad (3.12)$$

Αν και σε ένα συνολικό ισοζύγιο ενέργειας που θα αφορούσε την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του σωματιδίου και του περιβάλλοντος θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη και η ενέργεια που απορροφά το αέριο από την καύση, η πράξη έχει δείξει ότι σε αυτή την περίπτωση θα παρουσιάζονταν πολύ υψηλές θερμοκρασίες αερίου. Έτσι κατά τον υπολογισμό του ισοζυγίου θεωρείται ότι όλη η ενέργεια που παράγεται από την καύση απορροφάται από το σωματίδιο και η θερμοκρασία του αερίου εξαρτάται μόνο από τη συναγωγή και την ακτινοβολία. Όποτε ο συντελεστής α στην Εξίσωση 3.10 ισούται με μονάδα.

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος με το παρόν αριθμητικό μοντέλο είναι απαραίτητες κάποιες βοηθητικές σχέσεις για τον υπολογισμό των τιμών της πυκνότητας, του μοριακού βάρους, του ενεργού ιξώδους, της θερμοχωρητικότητας και της θερμοκρασίας μίξης όπως περιγράφεται παρακάτω.

Πυκνότητα μίγματος

Η πυκνότητα του αερίου μίγματος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{M_x P}{R T} \quad (3.13)$$

όπου, P είναι η απόλυτη πίεση, M_x το μοριακό βάρος μίγματος, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η θερμοκρασία μίγματος. Το μοριακό βάρος του μίγματος υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_x = \sum \frac{Y_s}{M_s} \quad (3.14)$$

Όπου, Y_s είναι το κλάσμα μάζας και M_s το μοριακό βάρος του συστατικού s .

Σε όλους τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιείται το ποσοστό μάζας των αερίων συστατικών του μίγματος αναγνωρίζοντας είναι το μικρό κλάσμα των στερεών συστατικών της συνολικής μάζας.

Ενεργό ιξώδες

Το ενεργό ιξώδες του αερίου μίγματος υπολογίζεται από την σχέση:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.15)$$

όπου, μ είναι ο συντελεστής μοριακού ιξώδους και μ_t το τυρβώδες ιξώδες.

Το τυρβώδες ιξώδες υπολογίζεται από το μοντέλο k - ϵ ως εξής:

$$\mu_t = C_D \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.16)$$

όπου, C_D είναι εμπειρική σταθερά, ρ η πυκνότητα αερίου μίγματος, k η κινητική ενέργεια της τύρβης και ε ο ρυθμός σκέδασης της τύρβης

Ειδική θερμότητα αερίου μίγματος

Η ειδική θερμότητα του αερίου μίγματος υπολογίζεται από την σχέση:

$$C_{p_x} = \sum_s Y_s (A_s + B_s T + C_s T^2 + D_s T^3) \quad (3.17)$$

Όπου, A_s , B_s , C_s , D_s είναι σταθεροί συντελεστές για το αέριο συστατικό s .

Θερμοκρασία αερίου

Η θερμοκρασία του αερίου, T , υπολογίζεται επαναληπτικά από την παρακάτω σχέση:

$$T = \frac{H}{\bar{C}_p} \quad (3.18)$$

όπου, H είναι η ενθαλπία του αερίου και \bar{C}_p η μέση τιμή της θερμοχωρητικότητας.

3.1.2 Το k-ε μοντέλο τύρβης

Σε ροές με υψηλό αριθμό Reynolds η εξίσωση μεταφοράς της κινητικής ενέργειας της τύρβης λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho k}{\partial t}}_{\text{Ρυθμός Μεταβολής}} + \underbrace{\frac{\partial \rho \bar{u}_i k}{\partial x_i}}_{\text{Αδράνεια}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}'_j k' + \overline{P' u'_j})}_{\text{Διάχυση}} - \underbrace{\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\text{Παραγωγή}} - \underbrace{\mu \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_j}}_{\text{Σκέδαση}} \quad (3.19)$$

ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής, ο δεύτερος την αδράνεια, ο τρίτος την διάχυση, ο τέταρτος την παραγωγή και ο πέμπτος την σκέδαση. Οι όροι αυτοί μοντελοποιούνται ακολούθως:

Διάχυση:

Η διάχυση της ενέργειας και της πίεσης σχετίζονται με την κλίση (gradient) της μέσης κινητικής ενέργειας της τύρβης.

$$-(\rho \bar{u}'_j k' + \overline{P' u'_j}) = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3.20)$$

όπου, σ_k είναι ο αριθμός Prandtl για την κινητική ενέργεια της τύρβης.

Παραγωγή:

Οι τάσεις Reynolds προσομοιώνονται με την έννοια του τυρβώδους ιξώδους.

$$-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{3}{2} \kappa \delta_{ij} \quad (3.21)$$

Σκέδαση:

Οι όροι σκέδασης γίνονται:

$$\mu \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_j} = \rho \epsilon \quad (3.22)$$

Έτσι, η εξίσωση μεταφοράς της κινητικής ενέργειας της τύρβης, k, παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{3}{2} \kappa \delta_{ij} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (3.23)$$

Η εξίσωση μεταφοράς για τη μέση σκέδαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας της τύρβης κατάγεται από ομάδα του Harlow και είναι η παρακάτω:

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής}} + \underbrace{\frac{\partial \bar{\rho} u_j \varepsilon}{\partial x_j}}_{\text{Αδράνεια}} = -2\mu \underbrace{\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right)}_{\text{Παραγωγή}} - 2\mu \underbrace{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}}_{\text{Επίδραση Τύρβης}} \quad (3.24)$$

$$- \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} u'_j \varepsilon' + 2\nu \frac{\partial P}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{\text{Διάχυση}} - 2\mu \underbrace{\left(\nu \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_j \partial x_i} \right)^2}_{\text{Σκέδαση}}$$

όπου ε' είναι η στιγμιαία τιμή της σκέδασης της κινητικής ενέργειας της τύρβης.

Οι όροι της παραπάνω εξίσωσης μοντελοποιούνται ακολούθως :

Παραγωγή:

Οι όροι παραγωγής σχετίζονται με τις τάσεις Reynolds

$$c_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} \bar{\rho} u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (3.25)$$

Επίδραση και Σκέδαση:

Οι όροι της επίδρασης και της σκέδασης της τύρβης μοντελοποιούνται μαζί

$$\rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (3.26)$$

Διάχυση:

Ο όρος της διάχυσης σχετίζεται με την βαθμίδα της σκέδασης

$$\rho \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (3.27)$$

όπου, σ_ε είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl για την τυρβώδη σκέδαση.

Έτσι, η εξίσωση μεταφοράς της σκέδασης της κινητικής ενέργειας της τύρβης, γίνεται:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{\kappa} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho c_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (3.28)$$

Το τυρβώδες ιξώδες μπορεί να εκφραστεί με την βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης, ως εξής:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3.29)$$

Η εξίσωση μεταφοράς για μια βαθμωτή ιδιότητα Φ , μπορεί να εκφραστεί τώρα ως εξής:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j \Phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + F_\Phi \quad (3.30)$$

όπου, σ_Φ είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl / Schmidt για την βαθμωτή ιδιότητα Φ και ο F_Φ αποτελεί τον όρο παραγωγής / σκέδασης.

3.2 Δυναμική Σωματιδίων

Στο εδάφιο που ακολουθεί περιγράφεται η μέθοδος μοντελοποίησης της σωματιδιακής φάσης, ενώ στην συνέχεια, δίνονται πληροφορίες μόνο για τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του ασβεστοποιητή.

Στην παρούσα εργασία ακολουθείται το σχήμα Lagrange, για να προσομοιώσει την δυναμική των σωματιδίων. Η σωματιδιακή φάση μπορεί να αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια, σταγονίδια και φυσαλίδες ή και από συνδυασμό τους. Ο κώδικας υπολογίζει τις τροχιές που διαγράφουν τα 'υπολογιστικά σωματίδια' καθώς αυτά διασπείρονται στην περιβάλλουσα συνεχή φάση (υγρή ή αέρια). Τα 'υπολογιστικά σωματίδια' αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστές οντότητες, γεγονός που βοηθά και στον υπολογισμό της ανταλλαγής μάζας και θερμότητας με την αέρια φάση. Η σύμπλεξη των δύο φάσεων και οι επιπτώσεις αυτής και στις δύο θα περιγραφούν μαθηματικά στην επόμενη παράγραφο.

Η μαθηματική προσομοίωση της σωματιδιακής φάσης συνοψίζεται στα εξής στάδια:

- ⇒ Υπολογισμός των τροχιών που διαγράφουν τα σωματίδια με βάση το σχήμα Lagrange, λαμβάνοντας υπόψη αδρανειακές δυνάμεις, δυνάμεις οπισθέλκουσας και βαρυτικές δυνάμεις για μόνιμες και μεταβατικές ροές,
- ⇒ Πρόβλεψη της επίδρασης της τύρβης κατά την διασπορά των σωματιδίων από την παρουσία τυρβωδών δινών στην συνεχή φάση,
- ⇒ Θέρμανση-ψύξη των 'υπολογιστικών σωματιδίων',
- ⇒ Εξάτμιση και βρασμός υγρών σταγονιδίων, και
- ⇒ Καύση σωματιδίων, στην οποία συμπεριλαμβάνεται η εξάτμιση και η καύση των πτητικών ουσιών καθώς και η καύση του στερεού άνθρακα (char)

Για την προσομοίωση διακριτής φάσης γίνεται η παραδοχή ότι αυτή είναι πλήρως αραιή, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων και οι επιδράσεις του συνολικού κλάσματος όγκου των σωματιδίων επάνω στην συνεχή φάση είναι αμελητέες. Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό κλάσμα όγκου της διακριτής φάσης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10-13% του συνολικού υπολογιστικού όγκου. Βέβαια, ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει για το μαζικό φορτίο της διακριτής φάσης, που σε κάθε περίπτωση μπορεί να υπερβεί κατά πολύ το ποσοστό αυτό και σε αρκετές περιπτώσεις να είναι ίσο ή να υπερτερεί της μάζας της συνεχούς φάσης.

Τέλος, η διασπορά των σωματιδίων που προκαλείται από την τύρβη της αέριας φάσης μπορεί να προβλεφθεί με χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου παρακολούθησης ή από το μοντέλο σωματιδιακού νέφους. Το μοντέλο τυχαίου βηματισμού ή μοντέλο 'random walk' λαμβάνει υπόψη την επίδραση των στιγμιαίων διακυμάνσεων της τυρβώδους ταχύτητας. Το μο-

ντέλο σωματιδιακού νέφους (particle cloud model) παρακολουθεί την στατιστική εξέλιξη ενός νέφους σωματιδίων γύρω από μία μέση τροχιά. Η συγκέντρωση των σωματιδίων μέσα στο σύννεφο περιγράφεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής γύρω από μία μέση τροχιά. Και στα δύο αυτά μοντέλα, τα σωματίδια δεν έχουν άμεση επίπτωση στην παραγωγή και στην σκέδαση της τύρβης της συνεχούς φάσης.

3.2.1 Εξίσωση Κίνησης Σωματιδίων

Η πρόβλεψη της τροχιάς σωματιδίων γίνεται με ολοκλήρωση του ισοζυγίου δυνάμεων που ασκούνται πάνω σ' αυτό (το σωματίδιο νοείται ως ξεχωριστή υπολογιστική οντότητα). Οι συγκεκριμένες δυνάμεις έχουν υποστεί τις απαραίτητες αριθμητικές μετατροπές για να εφαρμοστούν στο Lagrange σύστημα αναφοράς. Το ισοζύγιο δυνάμεων εξισώνει την αδράνεια του σωματιδίου με τις δυνάμεις που ενδέχεται να ασκούνται σ' αυτό και εκφράζεται μαθηματικά με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dU_p}{dt} = F_D(U - U_p) + g_i \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i \quad (3.31)$$

όπου, η δύναμη οπισθέλκουσας F_D είναι:
$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{24\rho_p D_p^2} \quad (3.32)$$

όπου, U η ταχύτητα της συνεχούς φάσης, U_p η ταχύτητα του σωματιδίου, μ το μοριακό ιξώδες, ρ_p η πυκνότητα του σωματιδίου, D_p η διάμετρος του σωματιδίου.

Ο αδιάστατος αριθμός Reynolds, ορίζεται ως εξής:
$$\text{Re} = \frac{\rho D_p |U_p - U|}{\mu} \quad (3.33)$$

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας υπολογίζεται από την σχέση:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (3.34)$$

όπου a_1 , a_2 και a_3 είναι σταθερές που προτείνονται από τους Morsi και Alexander και εφαρμόζονται για ανεμπόδιστα κινούμενα σφαιρικά σωματίδια για διάφορα εύρη τιμών του αριθμού Re. Όταν, η διάμετρος των σωματιδίων είναι μικρότερη του 1 μm τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η σχέση του Stokes για την οπισθέλκουσα δύναμη:

$$F_D = \frac{18\mu}{C_C \rho_p D_p^2} \quad (3.35)$$

όπου, ο συντελεστής C_C είναι η διόρθωση του Cunningham:

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{D_p} \left[1,257 + 0,4 e^{-\frac{1,1 D_p}{2\lambda}} \right] \quad (3.36)$$

όπου, λ είναι η μέση μοριακή ελεύθερη διαδρομή

3.2.1.1 - Μοντέλο Στοχαστικής Παρακολούθησης των Σωματιδίων σε Τυρβώδεις ροές

Για τυρβώδεις ροές η πρόβλεψη της τροχιάς των σωματιδίων γίνεται, χρησιμοποιώντας την μέση ταχύτητα του ρευστού, \bar{u} , στην εξίσωση τροχιάς. Εναλλακτικά, είναι δυνατό να συμπεριληφθεί και η στιγμιαία τιμή της διακύμανσης της ταχύτητας της συνεχούς φάσης:

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.37)$$

έτσι ώστε να προβλεφθεί η διασπορά των σωματιδίων που προκαλείται από την τύρβη. Αυτό γίνεται με την χρήση ενός στοχαστικού μοντέλου (random walk) που προσδιορίζει την στιγμιαία ταχύτητα του ρευστού.

Στην στοχαστική παρακολούθηση, η τυρβώδης διασπορά των σωματιδίων γίνεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης τροχιάς για κάθε ένα σωματίδιο και χρησιμοποιώντας την στιγμιαία ταχύτητα $u = \bar{u} + u'(t)$, κατά μήκος της διαδρομής. Υπολογίζοντας την τροχιά με αυτόν τον τρόπο για ένα επαρκή αριθμό αντιπροσωπευτικών σωματιδίων, μπορεί να ερμηνευτούν οι τυχαίες επιδράσεις της τύρβης στην διασπορά των σωματιδίων. Για την υλοποίηση της παραπάνω ενέργειας χρησιμοποιείται το μοντέλο Discrete Random Walk (DRW) στο οποίο, οι διακυμάνσεις των συνιστωσών της ταχύτητας είναι ασυνεχείς διακριτές σταθερές συναρτήσεις του χρόνου. Οι τυχαίες τιμές διατηρούνται σταθερές για ένα χρονικό διάστημα που καθορίζεται από μια χαρακτηριστική διάρκεια ζωής των δινών.

Το μοντέλο DRW μπορεί να δώσει αφύσικα αποτελέσματα σε περιπτώσεις ισχυρά ανομοιογενών ροών, όπου επικρατεί διάχυση και η κατανομή των σωματιδίων γίνεται ομοιόμορφη. Αντ' αυτού, το μοντέλο DRW θα δείξει μια τάση συγκέντρωσης των σωματιδίων σε περιοχές με χαμηλή τύρβη.

3.2.1.2 Ο χρόνος ολοκλήρωσης

Για την πρόβλεψη της τυρβώδους διασποράς των σωματιδίων γίνεται χρήση της μεθόδου ολοκλήρωσης της κλίμακας χρόνου T κατά την διαδρομή ds του σωματιδίου.

$$T = \int_0^{\infty} \frac{u'_p(t)u'_p(t+s)}{u_p'^2} ds \quad (3.38)$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι ανάλογος με το ρυθμό διασποράς του σωματιδίου, όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές τόσο πιο πολύ τυρβώδης είναι η ροή. Αυτό τεκμηριώνεται και από την σχέση της διάχυσης των σωματιδίων που είναι $\overline{u'_i u'_j} T$.

Για μικρά σωματίδια, τα οποία κινούνται μαζί με το ρευστό, ο χρόνος ολοκλήρωσης εξισώνεται με το χρόνο ολοκλήρωσης Langrange T_L . Αυτή η χρονική κλίμακα προσεγγίζεται από την σχέση:

$$T_L \approx C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.39)$$

όπου, C_L είναι σταθερά που καθορίζεται εξωτερικά αλλά δεν είναι γνωστή σε πολλές περιπτώσεις. Συνδυάζοντας την διάχυση των σωματιδίων $\overline{u'_i u'_j} T$ με τον βαθμωτό ρυθμό διάχυσης ν_i/σ_i που προβλέπεται από το μοντέλο τύρβης (k-ε), λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση:

$$T_L \approx 0.15 \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.40)$$

για το μοντέλο τύρβης k-ε και τις παραλλαγές του.

3.2.1.3 Το μοντέλο Discrete Random Walk

Στο μοντέλο Discrete Random Walk (DRW) ή αλλιώς 'Eddy lifetime', προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση του σωματιδίου με τις διαδοχικά μορφοποιημένες δίνες της τυρβώδους συνεχούς φάσης. Κάθε δίνη χαρακτηρίζεται από μία κανονική κατανομή τυχαίων διακυμάνσεων των τριών συνιστωσών της ταχύτητας u', v', w' και από μία κλίμακα χρόνου τ_e .

Οι τιμές u', v', w' που υπερισχύουν κατά την χρονική διάρκεια της τυρβώδους δίνης λαμβάνονται τυχαία από την κανονική κατανομή πιθανοτήτων, κατά συνέπεια η διακύμανση θα είναι:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.41)$$

όπου ζ , είναι ένας τυχαίος αριθμός που προέκυψε από κανονική κατανομή, και η υπόριζη ποσότητα είναι η τοπική τιμή rms της διακύμανσης της ταχύτητας. Εφόσον, όμως η κινητική ενέργεια της τύρβης είναι γνωστή σε κάθε σημείο της ροής είναι εφικτό να ληφθούν οι rms των διακυμάνσεων των συνιστωσών της ταχύτητας, θεωρώντας ισοτροπία.

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (3.42)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει μόνο για το μοντέλο τύρβης k-ε και για τις παραλλαγές του.

Η χαρακτηριστική διάρκεια ζωής της δίνης ορίζεται είτε ως σταθερή είτε υπολογίζεται από την σχέση:

$$\tau_e = 2T_L \quad (3.43)$$

όπου T_L είναι η κλίμακα χρόνου Lagrange. Η παραπάνω ποσότητα μπορεί να είναι μία τυχαία απόκλιση της κλίμακας χρόνου σύμφωνα με την σχέση:

$$\tau_e = -T_L \log(r) \quad (3.44)$$

όπου r , είναι σταθερός τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 1, και η ποσότητα T_L υπολογίζεται με τον συντελεστή C_L ίσο με 0.15.

Η δυνατότητα υπολογισμού της χαρακτηριστικής διάρκειας ζωής μιας δίνης τ_c παράγει μια πιο ρεαλιστική περιγραφή της συνάρτησης συσχέτισης. Το σωματίδιο υποτίθεται ότι αλληλεπιδρά με την δίνη της συνεχούς φάσης κατά την διάρκεια ζωής της. Όταν η διάρκεια ζωής εκπνεύσει, λαμβάνεται μια νέα τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας εφαρμόζοντας μια νέα τιμή ζ στην Εξίσωση 3.47.

3.2.2 Ολοκλήρωση των Εξισώσεων Τροχιάς

Οι εξισώσεις τροχιάς και κάθε βοηθητική εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά θερμότητας και μάζας από και προς το σωματίδιο, επιλύονται με ολοκλήρωση ανά διακριτά χρονικά βήματα. Με ολοκλήρωση στο χρόνο της Εξίσωσης 3.37 παράγεται η ταχύτητα του σωματιδίου σε κάθε σημείο κατά μήκος της διαδρομής του, ενώ η τροχιά προβλέπεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης:

$$\frac{dx_i}{dt} = u_{i,p} \quad (3.45)$$

Κατά την ολοκλήρωση η ταχύτητα της συνεχούς φάση u_i λαμβάνεται ως η ταχύτητα ρευστού στην θέση του σωματιδίου και υπολογίζεται από τον κεντρικό πίνακα καταχώρησης μεταβλητών των κελιών με ανάπτυξη της σειράς Taylor.

Θεωρώντας ότι ο όρος που περιέχει τις βαρυτικές δυνάμεις του σωματιδίου παραμένει σταθερός για μικρό χρονικό διάστημα και γραμμικοποιώντας τις υπόλοιπες δυνάμεις που ενεργούν σ' αυτό, η εξίσωση τροχιάς μπορεί να διατυπωθεί σε απλή μορφή ως εξής:

$$\frac{dUp}{dt} = (U - Up)\alpha \quad (3.46)$$

όπου $1/\alpha$ είναι ο χρόνος χαλάρωσης για το σωματίδιο. Οι δύο παραπάνω εξισώσεις λύνονται συγχρόνως, για να προσδιοριστεί η ταχύτητα και θέση των σωματιδίου σε κάθε δεδομένη στιγμή.

3.2.3 Κατανομές Μεγεθών Σωματιδίων

Για τα σωματίδια, ένας πρόσφορος τρόπος αντιπροσώπευσης της κατανομής του μεγέθους τους, είναι η έκφραση Rosin-Rammler. Όλο το εύρος των μεγεθών διαιρείται σε ικανό αριθμό διακριτών διαστημάτων, κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από μία μέση διάμετρο για την οποία εκτελούνται οι υπολογισμοί της τροχιάς που διαγράφεται. Εάν θεωρηθεί ότι η κατανομή του μεγέθους είναι του τύπου Rosin-Rammler, τότε το κλάσμα μάζας των σταγονιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από D , δίνεται από την σχέση:

$$M_D = e^{-\left[\left(\frac{D}{D_0}\right)^n\right]} \quad (3.47)$$

όπου D_0 είναι σταθερά μεγέθους και n είναι η παράμετρος της κατανομής μεγέθους.

Η συνάρτηση κατανομής Rosin-Rammler βασίζεται στην παραδοχή ότι υπάρχει μια εκθετική σχέση ανάμεσα στην διάμετρο σωματιδίου D_p και στο κλάσμα μάζας M_D των σωματιδίων με μεγαλύτερη διάμετρο από D . Η ποσότητα D_0 αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη κατηγορία μεγέθους σωματιδίων και η παράμετρος n είναι μοναδική για κάθε κατηγορία μεγέθους. Ο προσδιορισμός για κάθε κατηγορία της παραμέτρου n γίνεται από την σχέση:

$$n = \frac{\ln(-\ln M_D)}{\ln\left(\frac{D/D_0}{D}\right)} \quad (3.48)$$

3.2.4 Συνοριακές συνθήκες διακριτής φάσης

Όταν ένα σωματίδιο προσκρούει σε σύνορο, ένα από τα παρακάτω ενδεχόμενα μπορεί να συμβεί:

- ⇒ Να ανακλαστεί με ελαστική ή ανελαστική κρούση
- ⇒ Να διαφύγει από το σύνορο. Το σωματίδιο θα χαθεί στο σημείο πρόσπτωσης
- ⇒ Να παγιδευτεί στον συνοριακό τοίχο. Μη πτητικά υλικά χάνονται στο σημείο πρόσπτωσης, ενώ τα πτητικά που συνυπήρχαν στο σωματίδιο ελευθερώνονται στην αέρια φάση.

3.3 Υπολογισμοί Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας

Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας εκφράζονται με μια σειρά από μαθηματικές σχέσεις που συγκροτούν με της σειρά τους συγκεκριμένους 'νόμους' με βάσει τους οποίους προσομοιώνονται οι διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα 'υπολογιστικά' σωματίδια.

Το ποιος 'νόμος' θα ενεργοποιηθεί κατά την μοντελοποίηση εξαρτάται από τον τύπο του σωματιδίου που θα επιλεγεί. Ανάλογα με τον τύπο του σωματιδίου επιλέγεται μία δεδομένη ομάδα 'νόμων' μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Οι τύποι σωματιδίων έχουν προκαθορισμένη αλληλουχία φυσικών 'νόμων', που ισχύουν ανάλογα με την περίπτωση. Στον Πίνακα που ακολουθεί, δίνεται ο τύπος του σωματιδίου και οι αντίστοιχοι 'νόμοι'.

Πίνακας 3-2 Νόμοι μοντελοποίησης φυσικοχημικών διεργασιών σωματιδίων

Τύπος Σωματιδίου	Περιγραφή	Νόμοι ενεργοποίησης
Αδρανή	Αδρανή-ψύξη ή θέρμανση	1, 6
Σταγονίδια	Θέρμανση-Εξάτμιση-Βρασμός	1, 2, 3, 6
Καύση σωματιδίων	Θέρμανση-Εξέλιξη πτητικών - Διόγκωση / Συρρίκνωση - Ετερογενής χημική αντίδραση	1, 4, 5, 6

Επιπλέον, για την μοντελοποίηση μη καθορισμένων φυσικοχημικών διεργασιών, είναι δυνατή η κατάστρωση τους από τον χρήστη με κατάλληλη επιλογή των διαθέσιμων νόμων. Οι 'νόμοι' που παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

3.3.1 Νόμος 1 ή 6 Θέρμανση ή Ψύξη Σωματιδίου

Οι Νόμοι θέρμανσης ή ψύξης εφαρμόζονται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου είναι μικρότερη από την θερμοκρασία εξάτμισης (ή την θερμοκρασία εξάτμισης πτητικών ουσιών) T_{vap} που καθορίζεται εξωτερικά και όταν καταναλωθεί το κλάσμα μάζας των πτητικών ουσιών f_{v0} του σωματιδίου, αντίστοιχα. Έτσι, οι συνθήκες ισχύος των νόμων είναι:

$$\text{Νόμος 1} \quad T_p < T_{vap}$$

$$\text{Νόμος 6} \quad m_p \leq (1 - f_{v0})m_{p0}$$

Όπου T_p η τοπική θερμοκρασία σωματιδίου, T_{vap} η θερμοκρασία εξάτμισης των πτητικών, m_p η τρέχουσα τιμή μάζας και m_{p0} η αρχική μάζα του σωματιδίου.

Ο Νόμος 1 εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου πλησιάσει την θερμοκρασία εξάτμισης. Σ' αυτό το σημείο το αδρανές μέχρι τότε σωματίδιο, μπορεί να συμμετέχει και σε διεργασίες μεταφοράς μάζας (Νόμοι 2, 3, 4 & 5) και να επιστρέψει στο Νόμο 6 όταν καταναλωθεί το κλάσμα των πτητικών και καύσιμων στοιχείων του σωματιδίου. Κατά την εφαρμογή των νόμων 1 και 6, χρησιμοποιείται ένα απλό ισοζύγιο ενέργειας για να συσχετίσει την θερμοκρασία του σωματιδίου με την μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής και την απορροφούμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια του σωματιδίου.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \epsilon_p A_p \sigma (\Theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.49)$$

όπου, h είναι ο συντελεστής συναγωγής, A_p η επιφάνεια σωματιδίου, T_∞ η τοπική θερμοκρασία πεδίου, ϵ_p η φωτεινότητα του σωματιδίου, σ η σταθερά Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$), Θ_R η θερμοκρασία σωματιδίου, που προκύπτει από την σχέση:

$$\Theta_R = \left(\frac{I}{4\sigma} \right)^{0.25} \quad I \text{ η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας } [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3.50)$$

Το παραπάνω ισοζύγιο θερμότητας θεωρεί αμελητέα την εσωτερική αντίσταση κατά την μετάδοση θερμότητας, δηλαδή το σωματίδιο έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ενεργοποιείται το μοντέλο ακτινοβολίας P1 (περιγράφεται στην συνέχεια) ή το μοντέλο ακτινοβολίας διακριτοποιημένων τεταγμένων (Discrete ordinates radiation model).

Ο προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής h γίνεται από την συσχέτιση των Ranz και Marshall για σφαιρικά σωματίδια:

$$Nu = \frac{h D_p}{k_\infty} = 2 + 0.6 \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (3.51)$$

όπου, k_∞ η θερμική αγωγιμότητα της αέριας φάσης

Τελικά, η θερμότητα που απορροφάται ή προσδίδεται στο σωματίδιο σε κάθε υπολογιστικό κελί, εμφανίζεται ως όρος πηγής στους αντίστοιχους υπολογισμούς της εξίσωσης ενέργειας της συνεχούς φάσης. Κατά τη διάρκεια ισχύος των Νόμων 1 και 6 τα σωματίδια δεν εναλλάσσουν μάζα με την συνεχή φάση και δεν συμμετέχουν σε καμία χημική αντίδραση.

3.3.2 Νόμος 2 Εξάτμιση Σταγονιδίου

Η ενεργοποίηση του Νόμου 2 γίνεται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου πλησιάσει την θερμοκρασία εξάτμισης και συνεχίζεται μέχρι να καταναλωθεί εντελώς το κλάσμα των πτητικών. Η συνθήκες ισχύος του Νόμου 2 είναι:

$$\begin{aligned} \text{Νόμος 2} \quad T_p &< T_{vap} \\ m_p &> (1 - f_{v,0}) m_{p,0} \end{aligned}$$

Να σημειωθεί ότι εφόσον ξεκινήσει η εξάτμιση, θα συνεχιστεί ακόμη και όταν η θερμοκρασία του σταγονιδίου πέσει κάτω από την θερμοκρασία T_{vap} .

3.3.2.1 Μεταφορά μάζας με τον Νόμο 2

Ο ρυθμός εξάτμισης, διέπεται από την βαθμίδα διάχυσης, όπου η ροή μάζας ατμού του σταγονιδίου στην αέρια φάση σχετίζεται από την βαθμίδα συγκέντρωσης ατμού μεταξύ της επιφάνειας του σταγονιδίου και του καθαρού αερίου:

$$N_i = k_C (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (3.52)$$

όπου, N_i η μοριακή ροή μάζας ατμού, k_C ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, $C_{i,s}$ η συγκέντρωση ατμού στην επιφάνεια του σταγονιδίου και $C_{i,\infty}$ στο καθαρό αέριο, αντίστοιχα.

Η συγκέντρωση του ατμού στην επιφάνεια του σταγονιδίου προσδιορίζεται θεωρώντας ότι η μερική πίεση του ατμού στην διεπιφάνεια ισούται με την πίεση κορεσμένου ατμού P_{sat} στη θερμοκρασία σταγονιδίου T_p .

$$C_{i,s} = \frac{P_{sat}}{RT_p} \quad (3.53)$$

όπου, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

Η συγκέντρωση του ατμού στο καθαρό αέριο είναι γνωστή από την λύση της εξίσωσης μεταφοράς για το στοιχείο i' ή από τον πίνακα ανάκλησης τιμών που δημιουργείται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

$$C_{i,\infty} = X_i \frac{P_{op}}{RT_\infty} \quad (3.54)$$

όπου, X_i είναι το τοπικό κλάσμα γραμμομορίων του στοιχείου i', P_{op} είναι η πίεση λειτουργίας και T_∞ η τοπική θερμοκρασία του αερίου.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, k_C , υπολογίζεται από την σχέση:

$$Nu_{AB} = \frac{k_C D_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_D^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3.55)$$

όπου, ο $D_{i,m}$ συντελεστής διάχυσης του υγρού στο αέριο, Sc ο αδιάστατος αριθμός Schmidt

$$Sc = \frac{D_{i,m} \mu}{\rho} \quad (3.56)$$

Η ροή μάζας ατμού του σωματιδίου γίνεται όρος πηγής του στοιχείου i' στη γενική εξίσωση μεταφοράς των στοιχείων.

Η μάζα του σταγονιδίου μειώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_i \Delta t \quad (3.57)$$

όπου, M_i είναι το μοριακό βάρος του στοιχείου i', m_p και A_p η μάζα και η επιφάνεια του σωματιδίου, αντίστοιχα.

3.3.2.2 Μεταφορά θερμότητας στο σωματίδιο

Η θερμοκρασία του σωματιδίου υπολογίζεται από την εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας που συσχετίζει την μεταβολή της ενέργειας μεταξύ της θερμότητας λόγω συναγωγής, την λανθάνουσα θερμότητα και την θερμότητα λόγω ακτινοβολίας.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \epsilon_p A_p \sigma (\Theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.58)$$

όπου, $\frac{dm_p}{dt}$ είναι ο ρυθμός εξάτμισης, και h_{fg} η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης.

Η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ενεργοποιείται το μοντέλο ακτινοβολίας P1(περιγράφεται στην συνέχεια) ή το μοντέλο ακτινοβολίας διακρι-

τοποιημένων τεταγμένων (Discrete ordinates radiation model). Η θερμότητα που μεταφέρεται από ή προς το σωματίδιο γίνεται όρος πηγής στην εξίσωση ενέργειας της αέριας φάσης.

3.3.3 Νόμος 4 Εξάτμιση πτητικών

Η εξάτμιση των πτητικών εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία του σωματιδίου πλησιάσει και ξεπεράσει την θερμοκρασία εξάτμισης των πτητικών, T_{vap} , και παραμένει σε ισχύ μέχρι να εξαντληθεί το κλάσμα μάζας των πτητικών. Οι συνθήκες ισχύος του Νόμου 4 είναι οι ακόλουθες:

Νόμος 4

$$T_p \geq T_{vap} \quad \text{ή και} \quad T_p \geq T_{bp}$$

$$m_p > (1 - f_{v0} - f_{w0})m_{p0}$$

Όπου, m_p είναι η μάζα σωματιδίου, m_{p0} η αρχική μάζα του σωματιδίου, f_{v0} το κλάσμα μάζας των πτητικών, f_{w0} το κλάσμα μάζας του εξατμιζόμενου ή προς βράση υλικού όταν είναι ενεργοποιημένη η υγρή καύση, σε άλλη περίπτωση είναι $f_{w0}=0$. Το σημείο βρασμού T_{bp} και η θερμοκρασία εξάτμισης T_{vap} πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους όταν χρησιμοποιείται ο νόμος 4. Όταν η υγρή καύση είναι ενεργοποιημένη, οι τιμές T_{bp} και T_{vap} αναφέρονται στις θερμοκρασίες βρασμού και εξάτμισης μόνο για το 'καιγόμενο' υλικό. Παρέχεται η δυνατότητα επιλογής τριών μοντέλων εξάτμισης των πτητικών, τα οποία είναι:

- ⇒ Μοντέλο σταθερού ρυθμού
- ⇒ Μοντέλο μοναδικού ρυθμού εξάτμισης
- ⇒ Μοντέλο (2) ανταγωνιστικών ρυθμών (Kobayashi model)

3.3.3.1 Σταθερός ρυθμός εξάτμισης

Ο σταθερός ρυθμός εξάτμισης των πτητικών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_0 = -\frac{1}{f_{v0} m_{p0}} \cdot \frac{dm_p}{dt} \quad (3.59)$$

όπου, m_p είναι η μάζα σωματιδίου, f_{v0} το κλάσμα μάζας πτητικών, m_{p0} η αρχική μάζα σωματιδίου. Ο σταθερός ρυθμός A_0 ορίζεται εξωτερικά ως δεδομένο εισόδου, και έχει ως προκαθορισμένη τιμή ίση με 12 s^{-1} . Η τιμή αυτή έχει ληφθεί από την εργασία του Pillai για την καύση σωματιδίων κάρβουνου. Η κατάλληλη χρήση της σταθεράς εξάτμισης των πτητικών απαιτεί και τον σαφή ορισμό της θερμοκρασίας εξάτμισης, που ελέγχει την έναρξη της 'αποπτητικοποίησης' του σωματιδίου του κάρβουνου. Οι τιμές που λαμβάνονται από την βιβλιογραφία, αναφέρουν ως κατάλληλη θερμοκρασία την τιμή των 600 K.

3.3.3.2 Μοναδικός ρυθμός εξάτμισης

Το μοντέλο 'αποπτητικοποίησης' μοναδικού ρυθμού θεωρεί ότι ο ρυθμός εξάτμισης των πτητικών έχει εξάρτηση πρώτου βαθμού από το ποσοστό των πτητικών που απομένουν στο καύσιμο σωματίδιο, σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{dm_p}{dt} = -k [m_p - (1 - f_{v0})m_{p0}] \quad (3.60)$$

$$\text{με } k = A \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (3.61)$$

όπου, m_p είναι η μάζα σωματιδίου, f_{v0} το κλάσμα μάζας πτητικών, m_{p0} η αρχική μάζα σωματιδίου, k ο ρυθμός αντίδρασης, A_1 ο προεκθετικός συντελεστής και E_1 η ενέργεια ενεργοποίησης.

Η κινητική της αντίδρασης ορίζεται με την δήλωση του προεκθετικού συντελεστή, τύπου Arrhenius και της ενέργειας ενεργοποίησης της αντίδρασης. Η εξίσωση 3.75 έχει προσεγγιστική αναλυτική λύση της μορφής:

$$m_p(t + \Delta t) = (1 - f_{v0})m_{p0} + [m_p(t) - (1 - f_{v0})m_{p0}]e^{-k \Delta t} \quad (3.62)$$

Η παραπάνω λύση λαμβάνεται θεωρώντας ότι η θερμοκρασία του σωματιδίου μεταβάλλεται αργά μεταξύ των διακριτών χρονικών βημάτων ολοκλήρωσης.

3.3.3.3 Μοντέλο (2) ανταγωνιστικών ρυθμών εξάτμισης (Kobayashi model)

Στο μοντέλο αυτό προβλέπεται η κινητική της αποπτητικοποίησης με δύο ανταγωνιστικούς ρυθμούς, όπως προτάθηκε από τον Kobayashi. Οι δύο ανταγωνιστικοί ρυθμοί προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$R_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_p}\right) \quad \text{και} \quad (3.63)$$

$$R_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_p}\right) \quad (3.64)$$

όπου, R_1 και R_2 είναι οι ανταγωνιστικοί ρυθμοί που ελέγχουν την εξάτμιση των πτητικών σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών. Οι δύο ρυθμοί κινητικής συνδυάζονται για να δώσουν μια έκφραση για την εξάτμιση των πτητικών:

$$\frac{m_v(t)}{m_{p0} - m_{ash}} = \int_0^t (a_1 R_1 + a_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (R_1 + R_2) dt\right) dt \quad (3.65)$$

όπου, $m_i(t)$ είναι το ποσό των πτητικών που εξατμίστηκαν μέχρι την χρονική στιγμή t , m_{p0} η αρχική μάζα σωματιδίου, α_1, α_2 συντελεστές εξάτμισης και m_{ash} η μάζα τέφρας στο σωματίδιο.

Το μοντέλο Kobayashi απαιτεί την είσοδο των κινητικών παραμέτρων A_1, E_1, A_2 και E_2 και την συνεισφορά των δύο αντιδράσεων μέσω των συντελεστών α_1 και α_2 με προκαθορισμένες τιμές. Οι τιμές αυτές είναι $\alpha_1=0.3$ (αργή αντίδραση) και $\alpha_2= 1.0$ (γρήγορη αντίδραση). Από την βιβλιογραφία συστήνεται ότι η τιμή του α_1 πρέπει να είναι ίση με το κλάσμα των πτητικών που προσδιορίζεται από την άμεση ανάλυση του, γιατί αυτός ο ρυθμός αντιπροσωπεύει την εξάτμιση των πτητικών στις χαμηλές θερμοκρασίες. Η παραμετρός α_2 πρέπει να ισούται με την μονάδα, καθώς εκφράζει την απόδοση του ρυθμού εξάτμισης των πτητικών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

3.3.3.4 Συρρίκνωση-Διόγκωση σωματιδίου κατά την εξάτμιση

Η διάμετρος του σωματιδίου αλλάζει κατά την διάρκεια της εξάτμισης των πτητικών σύμφωνα με τον συντελεστή διόγκωσης-συρρίκνωσης, C_{sw} , ο οποίος καθορίζεται εξωτερικά και εφαρμόζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\frac{D_p}{D_{p0}} = 1 + (C_{sw} - 1) \frac{m_{p0} - m_p}{f_{v0} m_{p0}} \quad (3.66)$$

όπου, C_{sw} είναι ο συντελεστής συρρίκνωσης, D_p η διάμετρος σωματιδίου και D_{p0} η αρχική

διάμετρος σωματιδίου. Η ποσότητα $\frac{m_{p0} - m_p}{f_{v0} m_{p0}}$ είναι ο λόγος της μάζας των πτητικών που έχει

εξατμιστεί προς την αρχική μάζα πτητικών. Αυτή η ποσότητα είναι ίση με την μονάδα όταν αρχίζει η εξάτμιση των πτητικών. Όταν ο συντελεστής διόγκωσης είναι ίσος με 1 τότε η διάμετρος των σωματιδίων θα παραμείνει αμετάβλητη, εάν η τιμή του γίνει ίση με 2 τότε η τελική διάμετρος του σωματιδίου θα διπλασιαστεί, όταν εξατμιστεί όλη η ποσότητα των πτητικών. Επίσης, εάν ο συντελεστής διόγκωσης λάβει τιμή ίση με 0.5 τότε η τελική διάμετρος του σωματιδίου υποδιπλασιάζεται.

3.3.3.5 Μεταφορά θερμότητας κατά την εξάτμιση των πτητικών

Η μετάδοση θερμότητας στο σωματίδιο κατά την διάρκεια της 'αποπτητικοποίησης' συμπεριλαμβάνει συνεισφορές ενέργειας από συναγωγή, ακτινοβολία (εάν είναι ενεργοποιημένη) και θερμότητα που καταναλώνεται κατά την αποπτητικοποίηση, σύμφωνα με την εξίσωση 3.58.

Η εξίσωση 3.58 μπορεί να λυθεί αναλυτικά, θεωρώντας ότι η θερμοκρασία και η μάζα του

σωματιδίου δεν αλλάζει μεταξύ των χρονικών βημάτων:

$$T_p(t + \Delta t) = a_p + (T_p(t) - a_p)e^{-\beta_p t} \quad (3.67)$$

$$\text{όπου, } a_p = \frac{h A_p T_\infty + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \epsilon_p \sigma \Theta_R^4}{h A_p + A_p \epsilon_p \sigma T_p^3} \quad (3.68)$$

$$\text{και } \beta_p = \frac{A_p (h + \epsilon_p \sigma T_p^3)}{m_p C_p} \quad (3.69)$$

3.3.4 Νόμος 5 Μοντέλο επιφανειακής αντίδρασης καύσης

Μετά τον τερματισμό της εξάτμισης των πτητικών, αρχίζει η επιφανειακή χημική αντίδραση, της καύσιμης ύλης του σωματιδίου. Σε αυτό ακριβώς το σημείο ενεργοποιείται ο Νόμος 5 (που ισχύει μόνο για καιγόμενα σωματίδια) και εφόσον έχουν εξατμιστεί οι πτητικές ουσίες του σωματιδίου. Οι συνθήκες ισχύος του Νόμου 5 είναι:

$$\begin{aligned} \text{Νόμος 5} \quad & m_p < (1 - f_{v0} - f_{w0})m_{p0} \\ f_{v0} + f_{comb} + f_{ash} = 1 \quad & m_p > (1 - f_{v0} - f_{w0} - f_{comb})m_{p0} \end{aligned}$$

Όπου, f_{comb} το κλάσμα της καύσιμης ύλης του σωματιδίου, f_{w0} το κλάσμα μάζας του εξατμιζόμενου ή προς βράση υλικού όταν είναι ενεργοποιημένη η υγρή καύση, αλλιώς είναι $f_{w0}=0$, f_{ash} είναι κλάσμα μάζας της τέφρας και f_{v0} το κλάσμα μάζας των πτητικών.

Ο Νόμος 5 εφαρμόζεται μέχρι να καταναλωθεί το καύσιμο μέρος του σωματιδίου (char) και να απομείνει μόνο η τέφρα, η οποία με την σειρά της παραλαμβάνεται από το Νόμο 6 (ψύξη), για να παρακολουθηθεί η εναλλαγή των θερμοκρασιών με την αέρια φάση.

Ο Νόμος της επιφανειακής καύσης καταναλώνει το αντιδρόν συστατικό του σωματιδίου με στοιχειομετρική αναλογία S_b , στην επιφάνεια του πυρακτωμένου σωματιδίου, σύμφωνα με την αντίδραση:



όπου, S_b είναι η στοιχειομετρική αναλογία εκφρασμένη σε μάζα οξειδωτικού μέσου ανά μονάδα μάζας άνθρακα (char).

Παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης τριών μοντέλων ρυθμών ετερογενούς επιφανειακής αντίδρασης για καύσιμα σωματίδια, ως εξής:

- ⇒ Μοντέλο διάχυσης (diffusion model)
- ⇒ Μοντέλο περιορισμένου ρυθμού κινητικής / διάχυσης (kinetics/diffusion-limited rate model)
- ⇒ Ενδογενές μοντέλο (intrinsic model)

3.3.4.1 Μοντέλο διάχυσης

Το μοντέλο διάχυσης θεωρεί ότι η επιφανειακή αντίδραση προχωρεί με ένα ρυθμό που καθορίζεται από την διάχυση του οξειδωτικού μέσου της αέριας φάσης στην επιφάνεια του σωματιδίου, σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi D_p D_{im} \frac{m_o T_p \rho_g}{S_b (T_p + T_\infty)} \quad (3.71)$$

όπου, D_{im} είναι ο συντελεστής διάχυσης οξειδωτικού, m_o το τοπικό κλάσμα οξειδωτικού στο αέριο, ρ_g η πυκνότητα του αερίου και S_b ο στοιχειομετρικός συντελεστής της εξίσωσης (3.70).

Η εξίσωση (3.71) παράγεται από το μοντέλο των Baum και Street, και στην οποία αγνοείται η συνεισφορά της κινητικής στην επιφανειακή αντίδραση. Το μοντέλο διάχυσης θεωρεί ότι η διάμετρος του σωματιδίου δεν αλλάζει, και καθώς η μάζα του μειώνεται, μειώνεται συγχρόνως η ενεργή πυκνότητα του με αποτέλεσμα το καύσιμο μέρος (char) να γίνεται πιο πορώδης.

3.3.4.2 Μοντέλο κινητικής / διάχυσης (kinetic-diffusion model)

Το μοντέλο κινητικής / διάχυσης θεωρεί ότι η επιφανειακή αντίδραση προχωρεί με ένα ρυθμό που καθορίζεται είτε από την διάχυση του οξειδωτικού μέσου της αέριας φάσης στην επιφάνεια του σωματιδίου είτε από την κινητική της αντίδρασης. Χρησιμοποιείται το μοντέλο που προτείνουν οι Baum, Street και Field, στον οποίο ο ρυθμός διάχυσης είναι:

$$R_1 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{D_p} \quad (3.72)$$

και ρυθμός της κινητικής είναι:

$$R_2 = C_2 \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right) \quad (3.73)$$

Οι ρυθμοί R_1 και R_2 συνδυάζονται για αποδώσουν τον ρυθμό καύσης του στερεού άνθρακα, σύμφωνα με την σχέση:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p^2 P_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.74)$$

όπου, P_0 είναι η μερική πίεση του οξειδωτικού μέσου στο περιβάλλον αέριο του σωματιδίου και R_2 ο ρυθμός κινητικής, που ενσωματώνει τις επιδράσεις της χημικής αντίδρασης στην εσωτερική επιφάνεια του σωματιδίου άνθρακα και την επιδερμική διάχυση. Η εξίσωση (3.74) επαναδιατυπώνεται σε όρους κλάσματος μάζας οξειδωτικού, ως εξής:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p^2 P_O \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = -\pi D_p^2 \frac{\rho R T m_O}{M_O} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.75)$$

όπου, M_O το μοριακό βάρος του οξειδωτικού.

Το μέγεθος του σωματιδίου θεωρείται ότι παραμένει σταθερό, έως ότου σημαντική μείωση στην μάζα του να οδηγήσει σε νέα εκτίμηση του.

3.3.4.3 Ενδογενές μοντέλο (Intrinsic model)

Το ενδογενές μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο Smith, θεωρώντας ότι η τάξη της αντίδρασης είναι ίση με μονάδα. Όπως και στο μοντέλο κινητικής / διάχυσης, το ενδογενές μοντέλο θεωρεί ότι ο ρυθμός επιφανειακής αντίδρασης περιλαμβάνει τις επιδράσεις της καθαρής διάχυσης και της χημικής αντίδρασης. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί την εξίσωση (3.72) για τον υπολογισμό του ρυθμού διάχυσης R_1 , αλλά ο ρυθμός χημικής αντίδρασης R_2 εκφράζεται ρητώς σε όρους ενδογενών χημικών ρυθμών και ρυθμών διάχυσης στους πόρους, σύμφωνα με την σχέση:

$$R_2 = n \frac{D_p}{6} \rho_p A_g k_i \quad (3.76)$$

όπου, n είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας ή λόγος του ενεργού ρυθμού καύσης προς τον ρυθμό εφικτής καύσης εάν δεν υπάρχει αντίσταση διάχυσης στους πόρους και A_g η ειδική εσωτερική επιφάνεια του στερεού άνθρακα (char).

$$n = \frac{3}{\phi^2} (\phi \coth \phi - 1) \quad (3.77)$$

όπου, ϕ είναι το μέτρο του Thiele:
$$\phi = \frac{D_p}{2} \left[\frac{S_b \rho_p A_g k_i P_O}{D_e C_O} \right] \quad (3.78)$$

όπου, C_O είναι η συγκέντρωση οξειδωτικού στο αέριο και D_e είναι ο ενεργός συντελεστής διάχυσης στους πόρους του σωματιδίου.

Θεωρώντας ότι η κατανομή του μεγέθους των πόρων έχει μόνο ένα μέγιστο (κανονική) και ότι η κανονική διάχυση γίνεται παράλληλα με την διάχυση Knudsen, ο ενεργός συντελεστής διάχυσης προκύπτει από την σχέση:

$$D_e = \frac{\theta}{\tau^2} \left[\frac{1}{D_{kn}} + \frac{1}{D_O} \right]^{-1} \quad (3.79)$$

όπου, D_O είναι ο μοριακός συντελεστής διάχυσης, ρ_i είναι η πυκνότητα πυρολυμένου char, τ το δαιδαλώδες του πορώδους (τυπική τιμή $\tau = \sqrt{2}$), θ το πορώδες του στερεού άνθρακα, που δίνεται από την σχέση:
$$\theta = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_i}$$

και D_{kn} ο συντελεστής διάχυσης Knudsen που δίνεται από την σχέση:

$$D_{kn} = 97 \bar{r}_p \left(\frac{T_p}{M_o} \right)^{0.5} \quad (3.80)$$

όπου, T_p είναι η θερμοκρασία του σωματιδίου, \bar{r}_p η μέση ακτίνα πορώδους, η οποία μπορεί να μετρηθεί από πορώμετρο υδραργύρου.

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι τα μακροπορώδη ($\bar{r}_p > 150 \text{ \AA}$) κυριαρχούν στους άνθρακες χαμηλής τάξης, ενώ τα μικροπορώδη ($\bar{r}_p < 10 \text{ \AA}$) συναντώνται στους άνθρακες υψηλής τάξης. Η ποσότητα A_g είναι η ειδική εσωτερική επιφάνεια του στερεού άνθρακα, η οποία θεωρείται ότι παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της καύσης. Η μέση τιμή της ειδικής εσωτερικής επιφάνειας κατά την διάρκεια της καύσης στερεού άνθρακα είναι μεγαλύτερη από αυτή κατά την πυρόλυση του. Η μέση τιμή A_g για ασφαλτούχο άνθρακα εκτιμάται σε $300 \text{ m}^2/\text{gr}$.

Ο συντελεστής k_i είναι η ενδογενής αντιδρασιμότητα, η οποία έχει την μορφή Arrhenius:

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_p}\right) \quad (3.81)$$

όπου, A_i είναι οι προεκθετικοί συντελεστές και E_i οι ενέργειες ενεργοποίησης για κάθε char. Για την καλύτερη περιγραφή της μεταβολής του μεγέθους του στερεού άνθρακα (και κατ'επέκταση της πυκνότητας) κατά την καύση του, μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση καύσης α , που σχετίζεται με την διάμετρο του σωματιδίου στερεού άνθρακα προς το κλάσμα της καύσιμης ύλης του σωματιδίου U , όπου είναι:

$$U = \frac{1 - m_p}{m_{p0}} \quad \text{και} \quad (3.82)$$

$$\frac{D_p}{D_{p0}} = (1 - U)^\alpha \quad (3.83)$$

όπου, m_p είναι μάζα σωματιδίου στερεού άνθρακα και m_{p0} η αρχική του ποσότητα. Οι δυνατές τιμές που μπορεί να λάβει το α είναι μεταξύ 0 και 0.333.

Οι οριακές τιμές 0 και 0.333 αντιστοιχούν σε μοντέλο με σταθερή διάμετρο και μειούμενη πυκνότητα (ζώνη 1) και σε μοντέλο με μειούμενο μέγεθος σωματιδίου και σταθερή πυκνότητα (ζώνη 3) κατά την καύση, αντίστοιχα. Στην ζώνη 2, που είναι μια ενδιάμεση κατάσταση όπου μειώνεται και το μέγεθος αλλά και η πυκνότητα, η τιμή α είναι ίση περίπου με 0.25. Οι τελευταίες τιμές που ανήκουν στην ζώνη 2 δίνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για μια μεγάλη ποικιλία στερεών ανθράκων.

3.3.4.4 Μεταφορά Θερμότητας και Μάζας κατά την καύση Char

Η επιφανειακή αντίδραση καταναλώνει το οξειδωτικό στοιχείο της αέριας φάσης, και αυτό δίνει αρνητικό όρο πηγής κατά τον υπολογισμό της εξίσωσης μεταφοράς αυτού του στοιχείου. Ομοίως, η επιφανειακή αντίδραση είναι πηγή για τα στοιχεία της αέριας φάσης: τα προϊόντα της ετερογενούς επιφανειακής χημικής αντίδρασης εμφανίζονται στην αέρια φάση ως εξωτερικά καθορισμένα χημικά στοιχεία. Επίσης, αυτή η ετερογενής αντίδραση καταναλώνει ή παράγει ενέργεια, με τρόπο που καθορίζεται από την θερμότητα αντίδρασης. Το ισοζύγιο ενέργειας κατά την διάρκεια της επιφανειακής αντίδρασης είναι:

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + f_h \frac{dm_p}{dt} H_{react} + \epsilon_p A_p \sigma (\Theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.85)$$

όπου, H_{react} είναι η θερμότητα που ελευθερώνεται ή δεσμεύεται κατά την επιφανειακή αντίδραση και f_h είναι ο συντελεστής απ' ευθείας απορρόφησης θερμότητας από το σωματίδιο.

Μόνο ένα ποσοστό $(1-f_h)$ της ενέργειας που παράγεται από την επιφανειακή αντίδραση εμφανίζεται ως όρος πηγής στην εξίσωση ενέργειας της αέριας φάσης, καθώς το σωματίδιο απορροφά το f_h ποσοστό ενέργειας απ' ευθείας. Από την βιβλιογραφία συστήνεται για καύση σωματιδίων άνθρακα η τιμή f_h να τίθεται ίση με 1 όταν το προϊόν της καύσης είναι CO και 0.3 όταν το προϊόν είναι CO₂.

Η μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν ενεργοποιείται το μοντέλο ακτινοβολίας PI ή το μοντέλο ακτινοβολίας διακριτοποιημένων τεταγμένων (Discrete ordinates radiation model). Η θερμότητα που μεταφέρεται από ή προς την αέρια φάση γίνεται όρος πηγής στην αντίστοιχη εξίσωση ενέργειας.

3.3.5 Γενικές ετερογενείς επιφανειακές αντιδράσεις

Ο τύπος του 'καιγόμενου' σωματιδίου που παρουσιάστηκε προηγουμένως για την μοντελοποίηση της καύσης σωματιδίων κάρβουνου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιπτώσεις γενικής ετερογενούς χημικής αντίδρασης σωματιδίων, στις οποίες το στερεό σωματίδιο αντιδρά με την αέρια φάση για να σχηματίσει αέρια και στέρεα προϊόντα. Αυτό πραγματοποιείται με την παράληψη της εξάτμισης των πτητικών ουσιών, θέτοντας μηδενική τιμή στο κλάσμα των πτητικών. Σε αυτή την περίπτωση, ο νόμος αντίδρασης (Νόμος 5) προσομοιώνει μια γενική ετερογενή χημική αντίδραση που 'καταναλώνει' από την αέρια φάση 'οξειδωτικό' για να παράγει προϊόντα αέριας φάσης ή και στερεό υπόλειμμα.

3.3.6 Σύνοψη χημικής συμπεριφοράς σωματιδίων

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται όλοι οι νόμοι που διέπουν τις φυσικοχημικές διεργασίες στις οποίες δύναται να εμπλακούν τα υπολογιστικά σωματίδια κατά την διεργασία της καύσης σωματιδίων κάρβουνου.

Πίνακας 3-3 Σύνοψη φυσικοχημικής συμπεριφοράς υπολογιστικών σωματιδίων κατά την καύση

Συνθήκες Ισχύος	Μοντέλο
$T_p < T_{vap}$	Μοντέλο Θέρμανσης
$T_p \geq T_{vap}$ & $m_p > (1 - f_{v0})m_{p0}$	Εξάτμιση πτητικών
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Σταθερός ρυθμός αντίδρασης 2. Μοναδικός ρυθμός αντίδρασης 3. 2 Ανταγωνιστικοί ρυθμοί αντίδρασης (Kobayashi model)
$m_p < (1 - f_{v0})m_{p0}$ & $m_p > (1 - f_{v0} - f_{comb})m_{p0}$ $f_{v0} + f_{comb} + f_{ash} = 1$	Επιφανειακή χημική αντίδραση
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diffusion-limited rate reaction 2. Kinetic-diffusion surface rate reaction 3. Ενδογενές μοντέλο (Intrinsic model)
$m_p \leq f_{ash} m_{p0}$ $m_p \leq (1 - f_{v0} - f_{comb})m_{p0}$	Ψύξη αδρανών σωματιδίων (Τέφρας)

3.4 Μοντέλο Ακτινοβολίας

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί αναλυτικά μόνο το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Η θέρμανση ή ψύξη των επιφανειών με ακτινοβολία και η πηγές θερμότητας με θετικό ή αρνητικό πρόσημο επίσης λόγω ακτινοβολίας εντός της συνεχούς φάσης μπορούν να συμπεριληφθούν σε προσομοιώσεις μέσω των παρακάτω μοντέλων:

- ⇒ Μοντέλο διακριτής μεταφοράς ακτινοβολίας (Discrete transfer radiation model)
- ⇒ Μοντέλο ακτινοβολίας P-1
- ⇒ Μοντέλο ακτινοβολίας Rosseland
- ⇒ Μοντέλο ακτινοβολίας διακριτών τεταγμένων (DO model)

Η γενική εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία (*RTE*) για ένα μέσο που απορροφά, εκπέμπει και σκεδάζει ακτινοβολία σε μία θέση r και με διεύθυνση s , είναι

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (a + \sigma_s)I(r,s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r,s') \Phi(s \cdot s') d\Omega' \quad (3.86)$$

όπου, r είναι το διάνυσμα θέσης, s το διάνυσμα διεύθυνσης σκέδασης, s' το μήκος διανύσματος, s μήκος διαδρομής (ds μικρό πεπερασμένο μήκος διαδρομής), a ο συντελεστής απορρόφησης, n ο δείκτης διάθλασης, σ_s ο συντελεστής σκέδασης, σ η σταθερά Stefan-Boltzman ($5.762 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$), I η συνολική ένταση ακτινοβολίας που εξαρτάται από την θέση r και την διεύθυνση s , T η τοπική θερμοκρασία, Φ η συνάρτηση φάσης και Ω' η γωνία στερεού.

Η ποσότητα $(a + \sigma_s)$ αντιπροσωπεύει την οπτική λεπτότητα ή την αδιαφάνεια του μέσου, ενώ ο δείκτης διάθλασης n είναι σημαντικός όταν η ακτινοβολία διαπερνά ημί-διαφανή σώματα ή μέσα. Βασική μεταβλητή που ορίζεται εξωτερικά είναι ο συντελεστής απορρόφησης a , κάτι που είναι απαραίτητο σαν στοιχείο εισόδου. Ο συντελεστής απορρόφησης a και ο συντελεστής σκέδασης σ_s μπορεί να είναι σταθερές ή συναρτήσεις των τοπικών συγκεντρώσεων H_2O και CO_2 , του μήκους διαδρομής και της συνολικής πίεσης. Για τους υπολογισμούς του μεταβλητού συντελεστή απορρόφησης, χρησιμοποιείται ένα σταθμικό μοντέλο άθροισης για τα γκρι αέρια.

3.4.1 Εφαρμογές της Μετάδοσης Θερμότητας με Ακτινοβολία

Οι τυπικές εφαρμογές των μοντέλων μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία που μπορούν να προσομοιώσουν με ικανοποιητική επάρκεια, είναι μεταξύ των άλλων και εξής:

- ⇒ Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία από φλόγες
- ⇒ Ακτινοβολία θερμότητας από επιφάνεια σε επιφάνεια
- ⇒ Συνδυασμένη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, συναγωγή και αγωγή
- ⇒ Ακτινοβολία σε διεργασίες γυαλιού, σχεδιασμός οπτικών ινών, διεργασίες κεραμικών

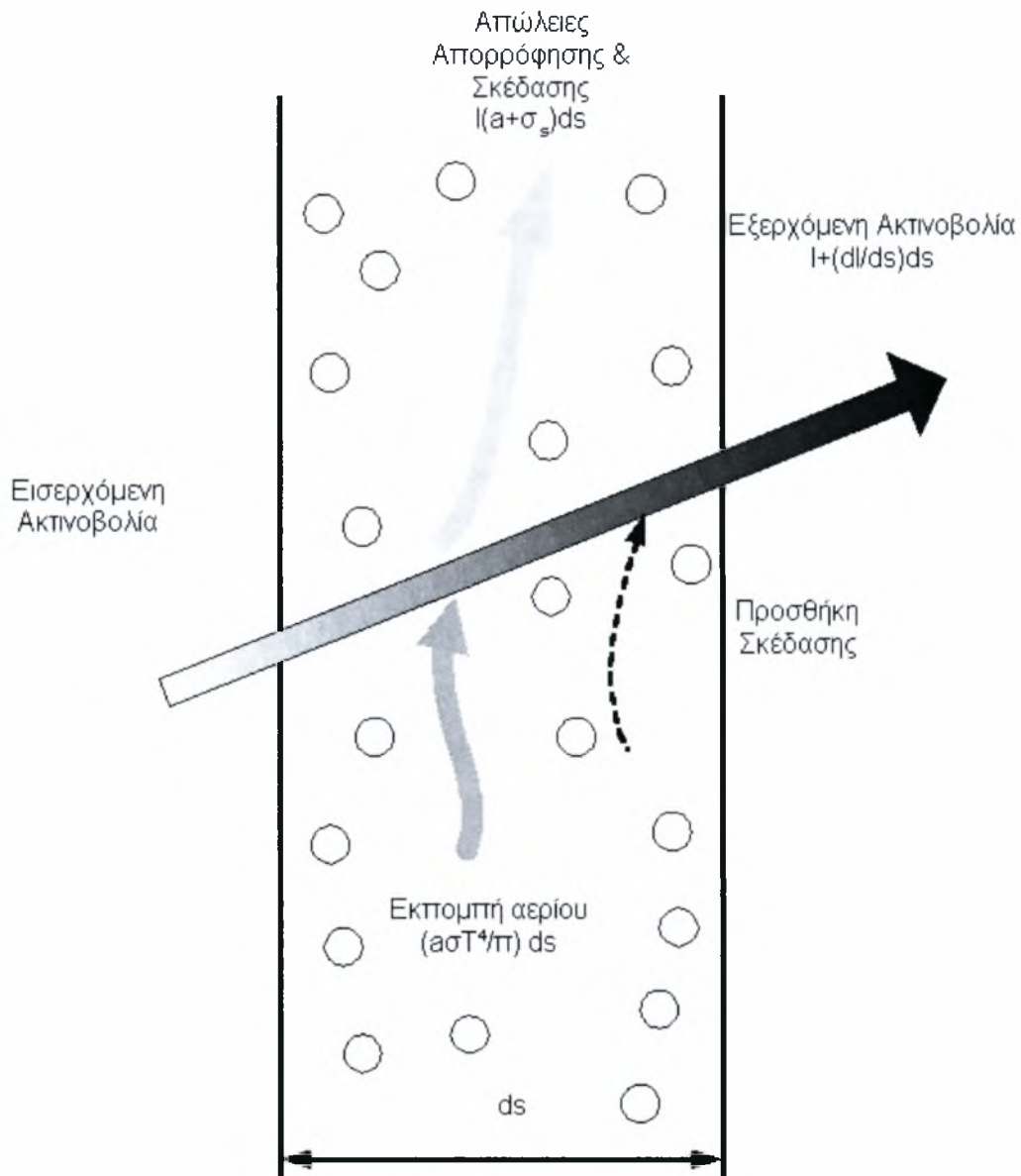
Ο όρος της ακτινοβολίας εισέρχεται μόνο όταν η ροή θερμότητας από ακτινοβολία $q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4)$, είναι μεγάλη ποσότητα συγκρινόμενη με τον ρυθμό μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής ή αγωγής, και τυπικά, αυτό συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες όπου, η τετάρτου βαθμού εξάρτηση της ακτινοβολούσας θερμορροής από την θερμοκρασία κυριαρχεί

3.4.2 Επιλογή του μοντέλου ακτινοβολίας

Η επιλογή τού μοντέλου γίνεται με βάση τις παρακάτω παραμέτρους.

- ⇒ *Οπτική λεπτότητα.* Η οπτική λεπτότητα aL είναι ένας καλός δείκτης για την επιλογή του μοντέλου. Το μέγεθος L είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος, για παράδειγμα σε μια ροή για ένα καυστήρα, το μήκος L είναι η διάμετρος του. Εάν το γινόμενο $aL \gg 1$ τότε τα κατάλληλότερα μοντέλα είναι αυτά του Rosseland και του P-1. Το μοντέλο P-1 χρησιμοποιείται όταν η οπτική λεπτότητα είναι μεγαλύτερη του 1 ($aL > 1$), ενώ όταν η οπτική λεπτότητα είναι μεγαλύτερη του 3 ($aL > 3$), τότε συνίσταται το μοντέλο Rosseland το οποίο είναι οικονομικότερο και αρκετά αποδοτικό. Τα μοντέλα DTRM και DO ισχύουν σε όλο το εύρος της οπτικής λεπτότητας, αλλά έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και μνήμη. Γενικά, σε προβλήματα με οπτική λεπτότητα μεγαλύτερη του 1 πρέπει να χρησιμοποιούνται τα μοντέλα P-1 ή Rosseland, όταν όμως η οπτική λεπτότητα είναι αρκετά μικρή (και ειδικότερα στην περίπτωση $aL < 1$) τότε μόνο τα μοντέλα DTRM και DO είναι κατάλληλα προς χρήση.
- ⇒ *Σκέδαση & Φωτεινότητα.* Τα μοντέλα P-1, Rosseland και DO υπολογίζουν την σκέδαση ενώ το DTRM την αγνοεί. Το μοντέλο Rosseland παρουσιάζει εξαιρετικά μικρή ευαισθησία στην φωτεινότητα των τοίχων, καθώς χρησιμοποιεί συνθήκη θερμοκρασιακής ολίσθησης στα τοιχώματα.
- ⇒ *Επιδράσεις σωματιδίων.* Μόνο τα μοντέλα P-1 και DO λαμβάνουν υπόψη τους την εναλλαγή ακτινοβολία μεταξύ αερίου και σωματιδίων
- ⇒ *Ημιδιαφανείς μέσα και ανακλαστικά συνοριακά τοιχώματα.* Μόνο το μοντέλο DO επιτρέπει την αντανάκλαση της ακτινοβολίας και τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε ημιδιαφανή μέσα όπως στο γυαλί.
- ⇒ *Ακτινοβολία του μη γκρι σώματος.* Μόνο το μοντέλο DO επιτρέπει τον υπολογισμό της ακτινοβολίας μη γκρι σώματος χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο γκρι ζώνης.
- ⇒ *Περιορισμένες πηγές θερμότητας.* Σε προβλήματα με περιορισμένες πηγές θερμότητας, το μοντέλο P-1 μπορεί να υπερεκτιμήσει τις θερμορροές από ακτινοβολία. Το μοντέλο DO

είναι ίσως το καταλληλότερο μοντέλο για τον υπολογισμό την ακτινοβολίας για αυτή την περίπτωση, παρότι και το μοντέλο DTRM με αρκετά μεγάλο αριθμό ακτινών μπορεί να αποδειχθεί και αυτό ικανοποιητικό.



Σχήμα 3-1 Μετάδοση θερμότητας λόγω ακτινοβολίας

3.4.3 Μοντέλο Ακτινοβολίας P-1

Το μοντέλο ακτινοβολίας P-1 είναι η απλούστερη περίπτωση του γενικότερου μοντέλου P-N, το οποίο βασίζεται επάνω στην ανάπτυξη της έντασης της ακτινοβολίας I σε ορθογωνικές ακολουθίες σφαιρικών αρμονικών. Η γενική εξίσωση ακτινοβολίας, για το μοντέλο P-1, μετατρέπεται σε μια εξίσωση με όρους διάχυσης, η οποία έχει μικρές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος. Το μοντέλο περιλαμβάνει τις επιδράσεις της σκέδασης. Ειδικά για προσομοιώσεις καύσης όπου η οπτική λεπτότητα είναι μεγάλη, το μοντέλο P-1 δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκες καμπυλόγραμμες γεωμετρίες.

Όπως όλα τα μοντέλα, έτσι και αυτό παρουσιάζει τους εξής περιορισμούς:

- ⇒ Το μοντέλο P-1 θεωρεί ότι η αντανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια είναι ισοτροπική σε σχέση με την γωνία στερεού.
- ⇒ Η εφαρμογή του μοντέλου υποθέτει ακτινοβολία του γκρι.
- ⇒ Εάν η οπτική λεπτότητα είναι μικρή μπορεί να σημειωθούν απώλειες στην ακρίβεια των υπολογισμών, κάτι που εξαρτάται και την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας.
- ⇒ Το μοντέλο P-1 έχει την τάση να υπερεκτιμά την θερμοροή από ακτινοβολία από περιορισμένες πηγές ακτινοβολίας με θετικό ή αρνητικό πρόσημο.



3.4.4 Εξισώσεις για το μοντέλο P-1

Η θερμοροή λόγω ακτινοβολίας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (3.87)$$

όπου, a είναι ο συντελεστής απορρόφησης, σ_s ο συντελεστής σκέδασης, G η προσπίπτουσα ακτινοβολία και C ο συντελεστής συνάρτησης γραμμικής ανισοτροπικής φάσης.

Εάν εισαχθεί η παράμετρος Γ , η εξίσωση (3.102) γίνεται:

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s}, \quad qr = -\Gamma \nabla G \quad (3.88)$$

Η εξίσωση μεταφοράς για το μέγεθος G λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (3.89)$$

όπου, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.

Αυτή η εξίσωση επιλύεται για να προσδιοριστεί η τοπική ένταση της ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός των εξισώσεων (3.88) και (3.89) δίνει την έκφραση (3.90) που αποτελεί το όρο πηγής στην εξίσωση ενέργειας για να υπολογιστούν οι πηγές θερμότητας.

$$-\nabla q r = aG - 4a\sigma T \quad (3.90)$$

Το μοντέλο P-1 παρέχει την δυνατότητα για μοντελοποίηση ανισοτροπικής σκέδασης μέσω της συνάρτησης γραμμικής ανισοτροπικής σκέδασης φάσης.

$$\Phi(s' \cdot s) = 1 + C s' \cdot s \quad (3.91)$$

Εδώ, το s είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην διεύθυνση σκέδασης, και s' είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στην διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, C είναι ο συντελεστής συνάρτησης γραμμικής ανισοτροπικής φάσης, και αποτελεί ιδιότητα του ρευστού μέσου. (Οι τιμές του C κυμαίνονται από -1 έως 1). Θετική τιμή του C δεικνύει ότι περισσότερη ακτινοβολούσα ενέργεια σκεδάζεται ανάντη και αρνητική τιμή ότι περισσότερη ακτινοβολούσα ενέργεια σκεδάζεται κατάντη ενώ μηδενική τιμή ορίζει ισοτροπική σκέδαση.

3.4.4.1 Επιδράσεις σωματιδίων στο μοντέλο P-1

Η επίδραση των σωματιδίων από την ακτινοβολία μπορούν να προβλεφθεί από το μοντέλο P-1. Η ύπαρξη σωματιδίων στην αέρια φάση αναιρεί τον υπολογισμό της σκέδασης στην αέρια φάση. Για ένα γκρί, απορροφητικό, φωτεινό, σκεδασίμο μέσο που περιέχει απορροφητικά, φωτεινά και σκεδάσιμα σωματίδια, η εξίσωση μεταφοράς για την προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) + 4\pi \left[\alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right] - [a + a_p] G = 0 \quad (3.92)$$

όπου, E_p είναι η ισοδύναμη φωτεινότητα των σωματιδίων και a_p ο ισοδύναμος συντελεστής απορρόφησης.

Οι παραπάνω ποσότητες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$E_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N e_{pn} A_{pn} \frac{\sigma T_{pn}^4}{\pi V} \quad \text{και} \quad (3.93)$$

$$a_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N e_{pn} \frac{A_{pn}}{V} \quad (3.94)$$

όπου, e_{pn} είναι η φωτεινότητα n -οστού σωματιδίου, A_{pn} το εμβαδόν προβολής n -σωματιδίου, T_{pn} η θερμοκρασία του n -σωματιδίου και N ο συνολικός αριθμός σωματιδίων μέσα σε ένα όγκο V .

Η ποσότητα Γ στην εξίσωση (3.107) είναι ίση με:

$$\Gamma = \frac{1}{3[\alpha + \alpha_p + \sigma_p]} \quad (3.95)$$

όπου, α είναι συντελεστής απορρόφησης αερίου, α_p ο συντελεστής απορρόφησης σωματιδίου

και σ_p ο ισοδύναμος συντελεστής σκέδασης σωματιδίου, που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N (1 - f_{pn}) (1 - e_{pn}) \frac{A_{pn}}{V} \quad (3.96)$$

όπου, f_{pn} είναι ο συντελεστής σκέδασης του n-οστού σωματιδίου.

Ο υπολογισμός της σχέσης (3.96) γίνεται κατά την παρακολούθηση της τροχιάς n σωματιδίων. Ο όρος πηγής που εισάγεται στη εξίσωση ενέργειας είναι:

$$-\nabla q_r = -4\pi \left[\alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right] + [a + a_p] G \quad (3.97)$$

Η συνοριακή συνθήκη για προσπίπτουσα ακτινοβολία σε τοίχωμα γίνεται από το εσωτερικό γινόμενο του ορθού διανύσματος με την θερμοροή λόγω ακτινοβολίας, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$q_r \cdot n = -\Gamma \nabla G \cdot n \Rightarrow q_{r,w} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial n} \quad (3.98)$$

Η θερμοροή ακτινοβολίας από τον τοίχο υπολογίζεται με την χρήση των ακόλουθων συνοριακών συνθηκών:

$$I_w(r, s) = f_w(r, s) \quad (3.99)$$

$$f_w(r, s) = \varepsilon_w \frac{\sigma T_w^4}{\pi} + \rho_w I(r, -s) \quad (3.100)$$

όπου, ρ_w είναι ανακλαστικότητα του τοίχου.

Για να εξαλειφθεί η εξάρτηση της γωνίας χρησιμοποιείται η συνοριακή συνθήκη του Marshak:

$$\int_0^{2\pi} I_w(r, s) n \cdot s d\Omega = \int_0^{2\pi} f_w(r, s) n \cdot s d\Omega \quad (3.101)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (3.99) και (3.100) στην εξίσωση (3.101) και εκτελώντας τις ολοκληρώσεις, προκύπτει η παρακάτω θερμοροή:

$$q_{r,w} = -\frac{4\pi\varepsilon_w \frac{\sigma T_w^4}{\pi} - (1 - \rho_w) G_w}{2(1 + \rho_w)} \quad (3.102)$$

Εάν θεωρηθεί ότι οι τοίχοι είναι διάχυτες γκρι επιφάνειες, τότε $\rho_w = 1 - \varepsilon_w$ και η εξίσωση (3.102) γίνεται:

$$q_{r,w} = -\frac{\varepsilon_w}{2(2 - \varepsilon_w)} (4\sigma T_w^4 - G_w) \quad (3.103)$$

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί η θερμοροή $q_{r,w}$ στην εξίσωση ενέργειας και στην εξίσωση συνοριακής συνθήκης για την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

3.5 Μοντέλο Χημικών Αντιδράσεων

Η μοντελοποίηση του κλάσματος μίγματος με την μέθοδο συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (mixture fraction/PDF modelling approach) περιλαμβάνει την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς για ένα ή δύο συντηρητικά βαθμωτά μεγέθη. Σε αυτή την προσέγγιση, δεν επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς για κάθε ένα χημικό στοιχείο, αλλά παράγεται ξεχωριστά η κάθε συνιστώσα συγκέντρωσης του στοιχείου που ενδιαφέρει, από την ήδη προβλεφθείσα κατανομή του κλάσματος μίγματος. Οι μηχανισμοί μίγματος, οι οποίοι μπορεί να είναι άγνωστοι ή εξαιρετικά πολύπλοκοι, δεν ορίζονται ολικώς από τον χρήστη. Η αντιμετώπιση των μηχανισμών αντίδρασης γίνεται με την χρήση των τεχνικών της απείρως γρήγορης χημείας (infinitely fast chemistry) με τις προσεγγίσεις flame sheet και mixed-is-burned, με υπολογισμούς σε χημική ισορροπία και μη. Οι φυσικές ιδιότητες των χημικών στοιχείων και τα δεδομένα ισορροπίας λαμβάνονται από βάση δεδομένων. Επίσης, κατά τους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της τύρβης μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Η παρούσα μέθοδος του κλάσματος μίγματος με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει αναπτυχθεί ειδικά για προσομοιώσεις τυρβώδους καύσης και για χημικές αντιδράσεις, που η εξέλιξη τους καθορίζεται από την τυρβώδη ανάμιξη, καθώς αυτή ελέγχει την οριακή χημική κινητική. Για τέτοια συστήματα, η μέθοδος της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας προσφέρει πολλά οφέλη σε σχέση με την μέθοδο του πεπερασμένου ρυθμού αντίδρασης (finite reaction rate). Η μέθοδος του κλάσματος μίγματος επιτρέπει τον σαφή υπολογισμό ενδιάμεσου σχηματισμού στοιχείων, φαινομένων διαχωρισμού και την σύμπλεξη τύρβης και χημείας. Η μέθοδος είναι υπολογιστικά οικονομική, γιατί δεν απαιτεί την λύση ενός μεγάλου αριθμού εξισώσεων μεταφοράς για κάθε ένα χημικό στοιχείο. Επιπλέον, η προσέγγιση επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό βοηθητικών μεταβλητών όπως της πυκνότητας, και δεν χρησιμοποιεί μέσες τιμές (π.χ. μέση τιμή πυκνότητας πεδίου) κάτι που γίνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένου ρυθμού αντίδρασης. Τέλος, η προσέγγιση του κλάσματος μίγματος εφαρμόζεται σε αντιδρώντες και μη τυρβώδεις ροές.

Η προσέγγιση του κλάσματος μίγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν το μοντέλο χημικής αντίδρασης πληρεί τους παρακάτω περιορισμούς.

- 1) Η ροή να είναι ασυμπίεστη και τυρβώδη
- 2) Εφαρμόζεται μόνο σε μοντέλα διάχυσης χημικής αντίδρασης και όχι σε χημικές αντιδράσεις με προανάμιξη.

Επίσης το αντιδρών σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μόνο ένα 'καύσιμο' (αναγωγικό) και ένα 'οξειδωτικό' στοιχείο ή χημική ένωση, και ένα δευτερεύον ρεύμα (με ένα άλλο 'καύσιμο' και ένα 'οξειδωτικό' στοιχείο ή χημική ένωση).

3.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Κλάσματος Μίγματος (PDF approach)

Η παρούσα προσέγγιση βασίζεται σε απλοποιητικές παραδοχές της στιγμιαίας θερμοχημικής κατάστασης του ρευστού που σχετίζεται με το συντηρητικό βαθμωτό μέγεθος, γνωστό ως κλάσμα μίγματος f . Για ένα δυαδικό σύστημα, που αποτελείται από καύσιμο και οξειδωτικό, το κλάσμα μίγματος μπορεί να διατυπωθεί σε όρους μαζικών κλασμάτων στοιχείων:

$$f = \frac{Z_k - Z_{kO}}{Z_{kF} - Z_{kO}} \quad (3.104)$$

όπου, Z_k είναι το κλάσμα μάζας για το στοιχείο k . Ο δείκτης O υποδηλώνει τιμή για το ρεύμα εισόδου του οξειδωτικού και το F για το αντίστοιχο ρεύμα του καυσίμου, και η Z_k μπορεί να αντιπροσωπεύει το στοιχείο του άνθρακα.

Για ένα απλό σύστημα καυσίμου-οξειδωτικού, το κλάσμα μίγματος μπορεί να δηλωθεί πιο απλά ως το τοπικό κλάσμα μάζας του 'καυσίμου', όπου καύσιμο, σημαίνει το ρεύμα εισόδου καυσίμου. Εάν το ρεύμα εισόδου περιέχει, CH_4 και CO το 'τοπικό κλάσμα μάζας' είναι το κλάσμα μάζας του CH_4 και του CO , και όχι μόνο του CH_4 .

Εάν περιλαμβάνεται και δευτερεύον ρεύμα (άλλο καύσιμο και οξειδωτικό ή μη αντιδρών ρεύμα), το καύσιμο και το δευτερεύον κλάσμα μίγματος είναι απλά τα κλάσματα μάζας του καυσίμου και του δευτερεύοντος ρεύματος. Το σύνολο και των τριών μιγμάτων του συστήματος (καύσιμο, οξειδωτικό και δευτερεύον ρεύμα) είναι ίσο πάντα με την μονάδα:

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \quad (3.105)$$

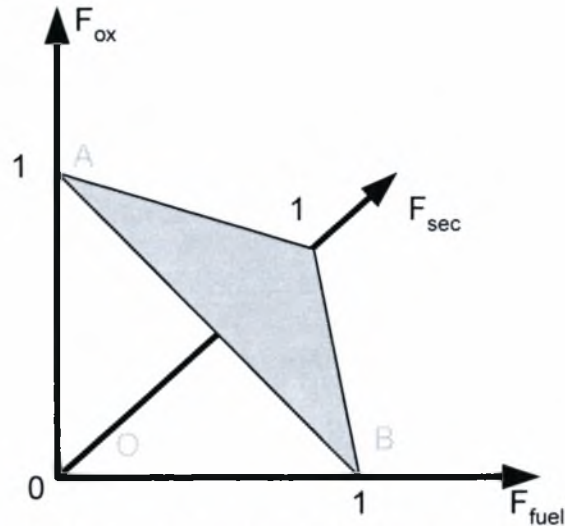
Αυτό σημαίνει ότι μόνο τα σημεία που ανήκουν στο επίπεδο ABC στο Σχήμα 3-2 μπορούν να ικανοποιήσουν την εξίσωση (3.120). Συνεπώς, τα δύο κλάσματα μάζας f_{fuel} και f_{sec} δεν μπορούν να ποικίλουν ανεξάρτητα, γιατί οι τιμές είναι τους είναι έγκυρες μόνο εάν βρίσκονται μέσα στο τρίγωνο OBC του Σχήματος 3-3.

Ουσιαστικά, το πρωτεύον κλάσμα μίγματος f_{fuel} επιτρέπεται να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1, σε περίπτωση μόνο ενός μίγματος, όταν όμως υπάρχει και δεύτερο κλάσμα μάζας τότε η τιμή του ανήκει στο γεωμετρικό τόπο των σημείων που ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

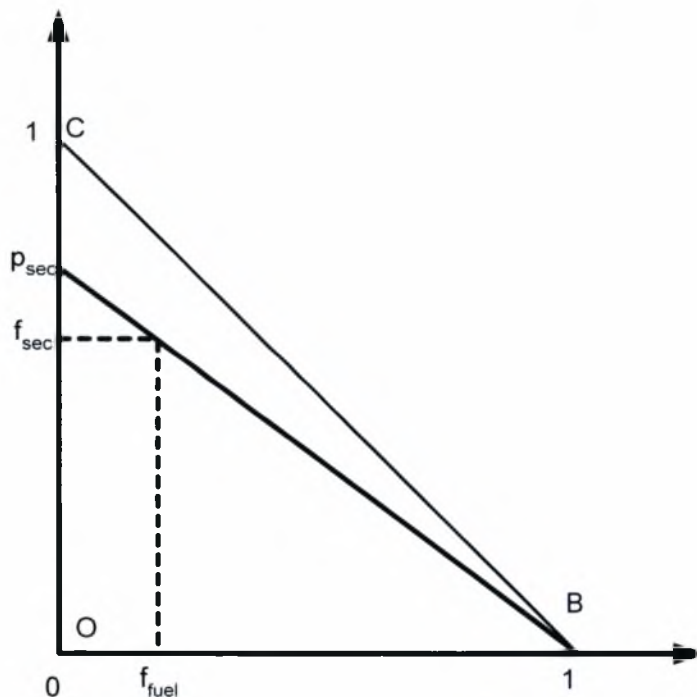
$$f_{sec} = p_{sec} \times (1 - f_{fuel}) \quad (3.106)$$

όπου, p_{sec} είναι το μερικό κλάσμα και συγχρόνως η τομή της γραμμής με τον άξονα του δευτερεύοντος κλάσματος μίγματος.

Αντίθετα με το f_{sec} , το p_{sec} περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0 και 1, ανεξάρτητα από την τιμή του f_{fuel} .



Σχήμα 3-2 Σχηματική απεικόνιση σχέσης f_{fuel} , f_{sec} και p_{sec}



Σχήμα 3-3 Σχέση μεταξύ f_{fuel} , f_{sec} και p_{sec}

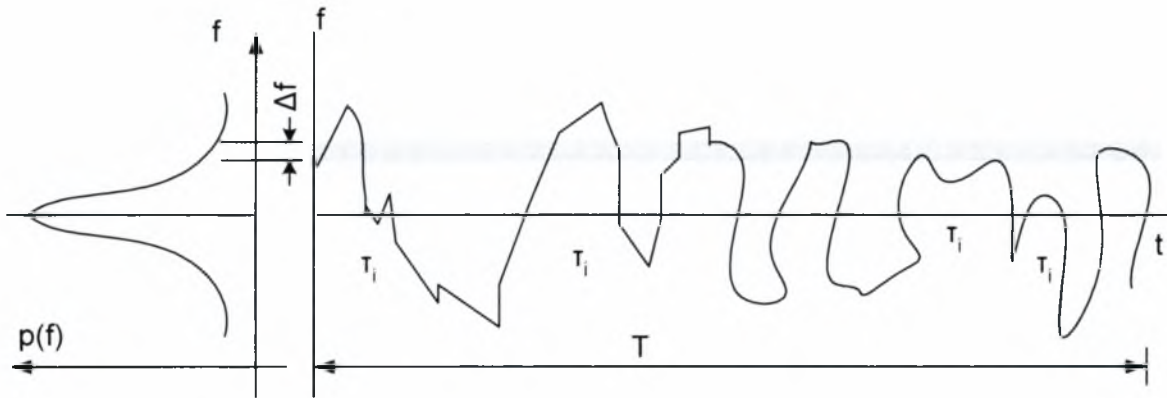
Το δευτερεύον μερικό κλάσμα p_{sec} είναι στατιστικά ανεξάρτητο από το κλάσμα μίγματος f_{fuel} . Αντίθετα με το κλάσμα μίγματος f_{sec} , το p_{sec} δεν είναι συντηρητική βαθμωτή μεταβλητή. Ο ορισμός του μερικού κλάσματος για τη δεύτερη μεταβλητή χρησιμοποιείται στην συνέχεια παντού εκτός από τον καθορισμό του πλούσιου σημείου για το δευτερεύον ρεύμα καυσίμων, το οποίο ορίζεται σε όρους f_{sec} .

3.5.1.1 Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας περιγράφει στο κλάσμα του χρόνου την εξέλιξη της διακύμανσης της μεταβλητής f μεταξύ των τιμών f και $f+\Delta f$, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3-4. Η κατανομή $p(f)$, που εικονίζεται στο αριστερό μέρος του σχήματος, και η ζώνη Δf σχηματίζουν μια περιοχή, που το εμβαδόν της αντιστοιχεί στο μέρος του χρόνου που η f δαπανά εντός του Δf . Η μαθηματική έκφραση για το παραπάνω εμβαδόν είναι:

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (3.107)$$

όπου, τ_i είναι το χρονικό διάστημα που η f δαπανά στο εύρος Δf . Το σχήμα της συνάρτησης $p(f)$, εξαρτάται από την φύση των τυρβωδών διακυμάνσεων της μεταβλητής f . Στην πράξη, η $p(f)$ εκφράζεται σαν μαθηματική συνάρτηση που προσεγγίζει την ΣΠΠ, κάτι που έχει παρατηρηθεί και πειραματικά.



Σχήμα 3-4 Γραφική περιγραφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $p(f)$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p(f)$ περιγράφει τις προσωρινές διακυμάνσεις της f σε τυρβώδη ροή και επιτρέπει να υπολογιστούν οι μέσες χρονικές τιμές των μεταβλητών οι οποίες εξαρτώνται από την f . Οι μέσες χρονικές τιμές των γραμμομοριακών κλασμάτων των χημικών ενώσεων και η θερμοκρασία μπορούν να υπολογιστούν σε αδιαβατικά συστήματα ως εξής:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (3.108)$$

για ένα απλό σύστημα μίγματος. Όταν όμως υπάρχει και δευτερεύον ρεύμα, οι μέσες τιμές υπολογίζονται ως εξής:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \int_0^1 p_1(f_{fuel}) p_2(f_{fuel}, p_{sec}) \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (3.109)$$

όπου p_1 είναι η ΣΠΠ του f_{fuel} και p_2 η ΣΠΠ του p_{sec} .

Ομοίως η πραγματική μέσου χρόνου πυκνότητα του ρευστού μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = \int_0^1 \frac{p(f)}{\rho(f)} df \quad (3.110)$$

για ένα απλό σύστημα μίγματος, και

$$\frac{1}{\rho} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{p_1(f_{fuel})p_2(f_{sec})}{\rho(f_{fuel}, p_{sec})} df_{fuel} dp_{sec} \quad (3.111)$$

όταν υπάρχει και δευτερεύον ρεύμα όπου, $\rho(f)$ ή $\rho(f_{fuel}, p_{sec})$ είναι η στιγμιαία πυκνότητα που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τα στιγμιαία γραμμομοριακά κλάσματα και την θερμοκρασία στην καταστατική εξίσωση των αερίων. Οι εξισώσεις (3.110-3.111) παρέχουν μια πιο ακριβή περιγραφή των μέσων τιμών της πυκνότητας από την εναλλακτική προσέγγιση της εφαρμογής του νόμου των αερίων χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές των χημικών ενώσεων και την θερμοκρασία. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.108) και (3.110 (ή 3.109 και 3.111)), μένει να επιλεγεί το σχήμα της συνάρτησης $\rho(f)$ ή των $p_1(f_{fuel})$ και $p_2(f_{sec})$ έτσι ώστε να προσδιοριστεί η τοπική μέση χρονική κατάσταση του ρευστού σε όλα τα σημεία του πεδίου ροής.

Το σχήμα της Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας περιγράφεται με δύο μαθηματικές συναρτήσεις:

⇒ Την συνάρτηση του διπλού δέλτα (double delta function)

⇒ Την συνάρτηση β (function β)

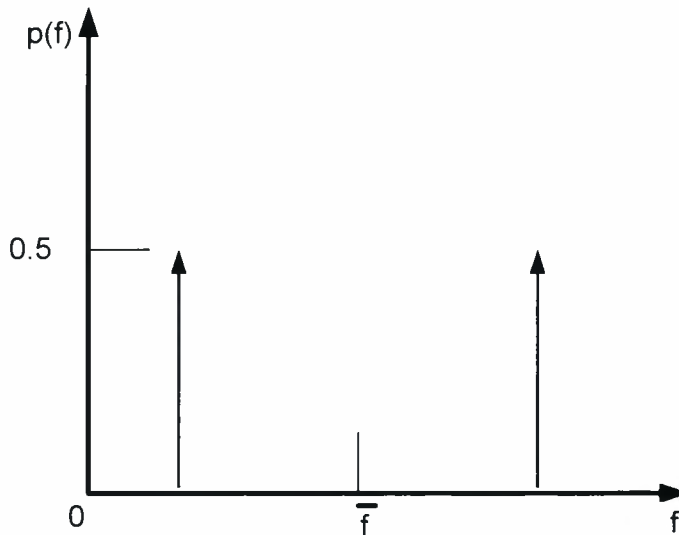
Η συνάρτηση του διπλού δέλτα είναι πιο εύκολα υπολογίσιμη, ενώ η συνάρτηση β έχει επινοηθεί να αντιπροσωπεύει κυρίως πειραματικές παρατηρήσεις των ΣΠΠ. Το σχήμα που παράγεται από αυτές τις συναρτήσεις εξαρτάται αποκλειστικά από το μέσο κλάσμα μίγματος \bar{f} και στην μεταβλητότητα του $\overline{f'^2}$. Η επιλογή αυτών των συναρτήσεων (και άλλων όπως αυτή της κανονικής κατανομής) έχουν τις ρίζες τους στις πειραματικές μετρήσεις διακυμάνσεων συγκέντρωσης. Μια περιγραφή αυτών των συναρτήσεων ακολουθεί παρακάτω:

3.5.1.2 Η συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας διπλού δέλτα

Η συνάρτηση του διπλού δέλτα (Σχήμα 3-5) δίνεται από την σχέση:

$$p(f) = \begin{cases} 0.5 & f = \bar{f} - \sqrt{\overline{f'^2}} \\ 0.5 & f = \bar{f} + \sqrt{\overline{f'^2}} \\ 0 & \text{οπουδήποτε αλλού} \end{cases} \quad (3.112)$$

με κατάλληλα σύνορα κοντά στο $f=1$ και στο $f=0$. Όπως προκύπτει και από τον ορισμό της, η συνάρτηση του διπλού δέλτα υπολογίζεται πολύ εύκολα, αλλά μπορεί να είναι λιγότερο ακριβής από την εναλλακτική συνάρτηση β .



Σχήμα 3-5 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας διπλού Δέλτα

3.5.1.3 Η β -συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας

Το σχήμα της β -συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας δίνεται στην ακόλουθη εξίσωση του \bar{f} και του \bar{f}'^2 :

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (3.113)$$

όπου α είναι

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right] \quad (3.114)$$

και β

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right] \quad (3.115)$$

Οι τιμές της $p(f)$ μπορεί να υπολογιστούν σε όλα τα σημεία της ροής σε όρους των παραμέτρων \bar{f} και \bar{f}'^2 .

Έτσι με δεδομένες τις προβλέψεις των \bar{f} και \bar{f}'^2 σε κάθε σημείο της ροής, η $p(f)$ μπορεί να υπολογιστεί και να χρησιμοποιηθεί ως σταθμική συνάρτηση για να προσδιοριστούν οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των χημικών ενώσεων, η πυκνότητα και η θερμοκρασία με την χρήση των ολοκληρωτικών εξισώσεων (3.108) και (3.110) ή (3.109) και (3.111).

3.5.2 Εξίσωση μεταφοράς για το κλάσμα μίγματος

Η τιμή του f σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πεδίου προκύπτει από την λύση της παρακάτω εξίσωσης μεταφοράς για την μέση χρονική τιμή του f , που επίσης παρουσιάζεται στην συντηρητική της μορφή για τυρβώδη ροή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \overline{f'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (3.116)$$

Ο πηγαίος όρος S_m εμφανίζεται αποκλειστικά μόνο όταν παρουσιάζεται μεταφορά μάζας στην αέρια φάση από αντιδρώντα σωματίδια, σε όλες τις άλλες περιπτώσεις δεν υπάρχουν όροι πηγής για την μεταβλητή f .

Ταυτόχρονα με την λύση της εξίσωσης (3.116), ο κώδικας λύνει την συντηρητική εξίσωση για την μεταβλητότητα του κλάσματος μίγματος, $\overline{f'^2}$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \overline{f'^2}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f}}{\partial x_i} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \overline{f}}{\partial x_i} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (3.117)$$

όπου, σ_t , C_g και C_d είναι σταθερές με τιμές 0.7, 2.86 και 2.6, αντίστοιχα. Η μεταβλητότητα του κλάσματος μίγματος χρησιμοποιείται στο τέλος του μοντέλου για περιγράψει την αλληλεπίδραση της χημείας με την τύρβη.

Για ένα πρόβλημα με δύο κλάσματα μάζας, οι τιμές $\overline{f_{fuel}}$ και $\overline{f'_{fuel}}$ λαμβάνονται από τις εξισώσεις (3.116) και (3.117) με αντικατάσταση των τιμών \overline{f} και $\overline{f'^2}$ και η τιμή $\overline{f_{sec}}$ από την (3.116) με αντικατάσταση της τιμής \overline{f} . Μετά υπολογίζεται η τιμή $\overline{p_{sec}}$ από την εξίσωση (3.106) και η τιμή $\overline{p'_{sec}}$ λαμβάνεται από την λύση της εξίσωσης (3.132) με αντικατάσταση του f από το $\overline{p_{sec}}$. Η λύση του $\overline{p'_{sec}}$ αντί του $\overline{f'_{sec}}$ δικαιολογείται από το γεγονός ότι το ποσό του δευτερεύοντος ρεύματος είναι σχετικά μικρό συγκρινόμενο με την συνολική μαζική παροχή. Για μια προσέγγιση πρώτης τάξης, οι μεταβλητότητες των $\overline{p_{sec}}$ και $\overline{f_{sec}}$ δεν είναι και τόσο ευαίσθητες με το $\overline{f_{sec}}$, και κατά συνέπεια, το ίδιο ισχύει και με τα $\overline{p'_{sec}}$, $\overline{f'_{sec}}$.

3.5.3 Κλάσμα μίγματος εναντίον του ισοδύναμου λόγου

Ο ορισμός του κλάσματος μίγματος μπορεί να κατανοηθεί σε σχέση με τα κοινά μέτρα αντιδρώντων συστημάτων. Θεωρώντας ένα απλό σύστημα καύσης που περιλαμβάνει ένα ρεύμα καυσίμου (F) και ένα ρεύμα οξειδωτικού (O), που η στοιχειομετρία του περιγράφεται συμβολικά από την ακόλουθη χημική αντίδραση:



όπου, r είναι ο μαζικός λόγος αέρα καυσίμου. Με βάση τον ισοδύναμο λόγο ϕ :

$$\phi = \frac{\frac{\text{πραγματικό καύσιμο}}{\text{λόγος αέρα}}}{\frac{\text{στοιχειομετρικό καύσιμο}}{\text{λόγος αέρα}}}$$

η παραπάνω αντίδραση ξαναγράφεται κάτω από γενικότερες συνθήκες μίγματος ως εξής:



Με βάση την στοιχειομετρία της αντίδρασης, το κλάσμα μίγματος για όλο το σύστημα που παράγεται είναι:

$$f = \frac{\phi}{\phi + r} \quad (3.120)$$

Η εξίσωση (3.120) είναι σημαντική, γιατί επιτρέπει τον υπολογισμό του κλάσματος μίγματος σε στοιχειομετρικές συνθήκες ($\phi = 1$) ή σε συνθήκες πλουσίου μίγματος σε καύσιμο, (πχ $\phi > 2$).

Το πλεονέκτημα της μοντελοποίησης με την προσέγγιση του κλάσματος μίγματος οφείλεται στον υπολογισμό της μοναδικής συντηρητικής μεταβλητής f . Όλες οι άλλες βαθμωτές μεταβλητές μπορούν να παραχθούν χωρίς να επιλυθούν εξισώσεις μεταφοράς για όλα τα χημικά στοιχεία που ενδιαφέρουν. Οι στιγμιαίες τιμές των γραμμομοριακών κλασμάτων των χημικών στοιχείων, η πυκνότητα και η θερμοκρασία μπορούν να υπολογιστούν από την δεδομένη περιγραφή της χημείας του αντιδρώντος συστήματος, τους συγκεκριμένους περιορισμούς του συστήματος και από το κλάσμα μίγματος σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πεδίου. Εάν το αντιδρών σύστημα είναι αδιαβατικό, οι στιγμιαίες τιμές του κλάσματος γραμμομορίων, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας εξαρτώνται αποκλειστικά από τα στιγμιαίες τιμές του f .

$$\phi_i = \phi_i(f) \quad (3.121)$$

για ένα απλό σύστημα καυσίμου-οξειδωτικού.

Εάν περιλαμβάνεται και δευτερεύον ρεύμα οι στιγμιαίες τιμές θα εξαρτώνται από το στιγμιαίο κλάσμα μίγματος καυσίμου f_{fuel} και από το μερικό κλάσμα p_{sec} :

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}) \quad (3.122)$$

Στις εξισώσεις (3.121) και (3.122) η ποσότητα ϕ_i αντιπροσωπεύει τις στιγμιαίες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων, την πυκνότητα ή και την θερμοκρασία. Για ένα απλό μη αδιαβατικό σύστημα καυσίμου-οξειδωτικού, οι παραπάνω σχέσεις γενικεύονται στην ακόλουθη:

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \quad (3.123)$$

όπου, H^* είναι η στιγμιαία ενθαλπία:

$$H^* = \sum_f m_f H_f = \sum_f m_f \left[\int_{T_{ref,f}}^T C_{p,f} dT + h_f^o(T_{ref,f}) \right] \quad (3.124)$$

Εάν περιλαμβάνεται και δευτερεύον ρεύμα, τότε είναι:

$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, H^*) \quad (3.125)$$

Τα μη αδιαβατικά συστήματα περιλαμβάνουν όλα αυτά στα οποία η συνολική ενθαλπία δεν ορίζεται μοναδικά με βάση το κλάσμα μίγματος. Συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν πολλαπλές εισόδους καυσίμου και οξειδωτικού διαφορετικών θερμοκρασιών με μετάδοση θερμότητας προς τα τοιχώματα ή από ακτινοβολία, η συμπεριλαμβάνουν σωματίδια, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως μη αδιαβατικά. Οι λεπτομέρειες της λειτουργικής σχέσης μεταξύ ϕ_i (χημικά στοιχεία, πυκνότητα και θερμοκρασία) και κλάσματος μίγματος εξαρτάται από την περιγραφή του συστήματος. Οι επιλογές για την περιγραφή αντιστοιχούν στα μοντέλα του στρώματος φλόγας (mixed-is-burned), χημικής και μη χημικής ισορροπίας. Στην συνέχεια γίνεται η περιγραφή της λειτουργίας του μοντέλου χημικής ισορροπίας που χρησιμοποιείται στο παρόν μοντέλο.

3.5.4 Περιγραφή χημικού συστήματος - Χημική ισορροπία

Το μοντέλο παρέχει τρεις επιλογές για την περιγραφή του χημικού συστήματος όταν χρησιμοποιείται η προσέγγιση του κλάσματος μίγματος, ως εξής:

- ⇒ Προσέγγιση του στρώματος φλόγας (Mixed-is-burned)
- ⇒ Παραδοχή χημικής ισορροπίας (Equilibrium assumption)
- ⇒ Παραδοχή μη χημικής ισορροπίας (Nonequilibrium chemistry)

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η προσέγγιση της χημικής ισορροπίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, για την μοντελοποίηση της καύσης σωματιδίων κάρβουνου και για την διάσπαση του σωματιδίων ανθρακικού ασβεστίου (φαρίνα).

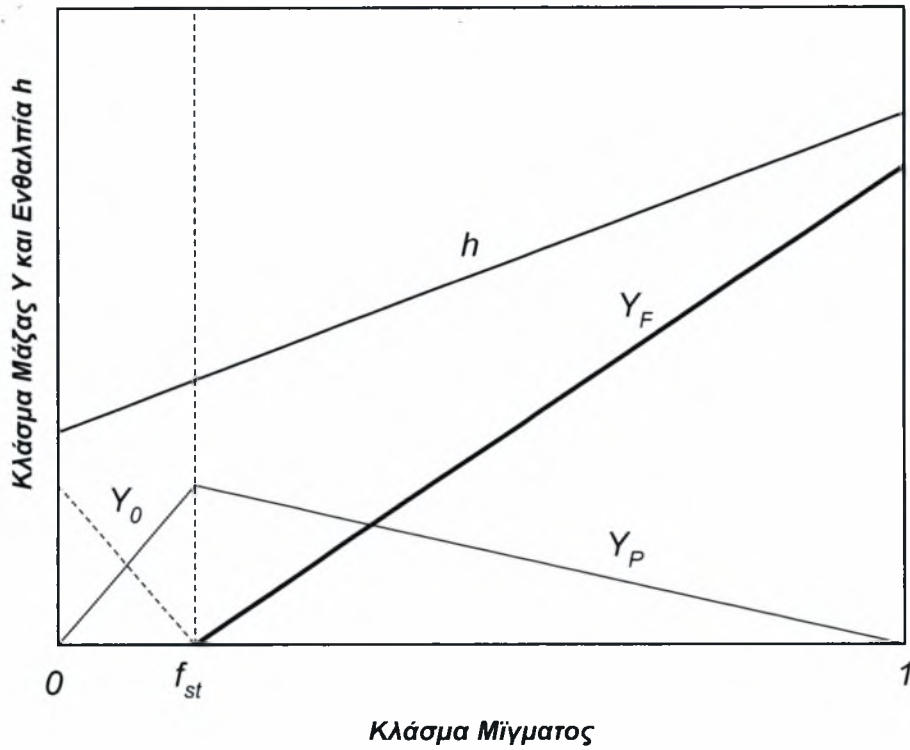
Η προσέγγιση της χημικής ισορροπίας βασίζεται στην παραδοχή ότι η χημική αντίδραση εκτελείται ακαριαία έτσι ώστε να υπάρχει πάντα χημική ισορροπία σε μοριακό επίπεδο. Για να υπολογιστούν τα γραμμομοριακά κλάσματα από το κλάσμα μίγματος χρησιμοποιείται έ-

νας αλγόριθμος που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Το Σχήμα 3-7 δείχνει την εξέλιξη των γραμμομοριακών κλασμάτων για ένα σύστημα αντιδράσεων που περιλαμβάνει 10 χημικά στοιχεία κατά την καύση μεθανίου.

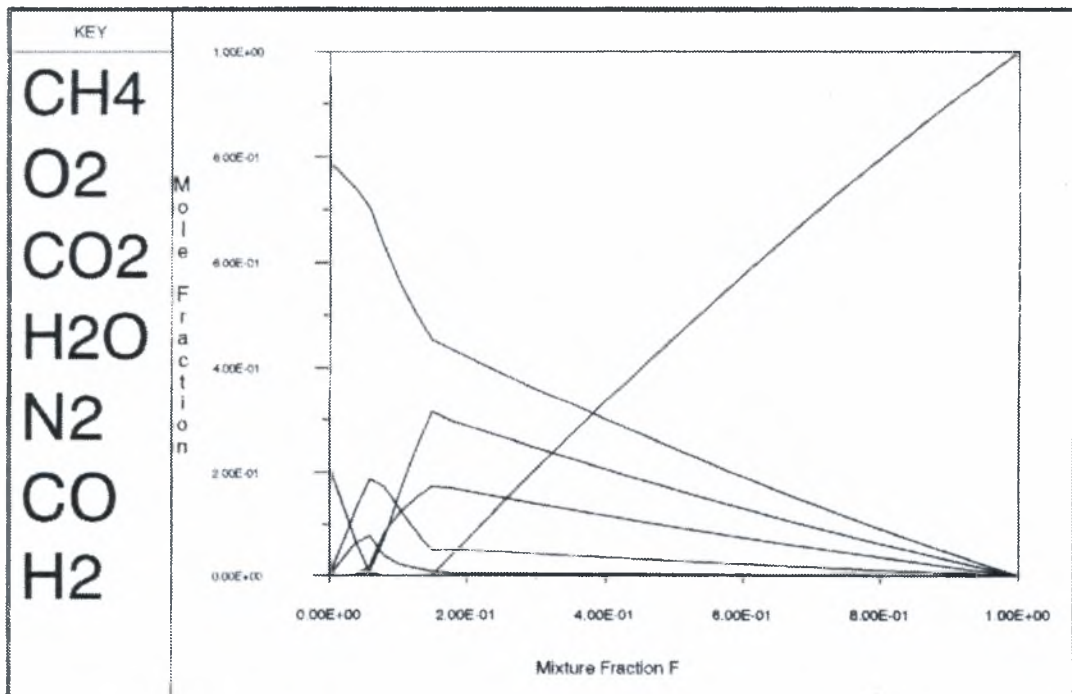
Το μοντέλο ισορροπίας είναι αρκετά ισχυρό εφόσον μπορεί να προβλέψει τον σχηματισμό ενδιάμεσων χημικών ενώσεων χωρίς να απαιτείται λεπτομερής γνώση δεδομένων για την χημική κινητική. Αντί να οριστεί ο αντίστοιχος μηχανισμός και οι ρυθμοί αντίδρασης, ορίζονται τα σημαντικά στοιχεία που εμφανίζονται ή θα προκύψουν στο χημικό σύστημα. Στην συνέχεια, το μοντέλο προβλέπει το γραμμομοριακό κλάσμα της κάθε χημικής ένωσης που βρίσκεται σε χημική ισορροπία.

Η πλήρη χημική ισορροπία περιορίζεται σε τόσες καταστάσεις στις οποίες το στιγμιαίο κλάσμα μίγματος να είναι κάτω από σημείο πλουσίου μίγματος. Σε περιοχές πλουσίου μίγματος (ισοδύναμος λόγος μεγαλύτερος του 1.5), όταν το στιγμιαίο κλάσμα μίγματος ξεπεράσει το σημείο αυτό (f_{rich}), θεωρείται ότι η αντίδραση καύσης κατασβάζεται και το άκαυστο καύσιμο συνυπάρχει με τα αντιδρώντα στοιχεία. Σε τέτοιες περιοχές η σύνθεση, για μία δεδομένη τιμή κλάσματος μίγματος υπολογίζεται από την σύνθεση του οριακού μίγματος ($f=f_{rich}$) και από το κλάσμα μίγματος του ρεύματος εισόδου καυσίμου ($f=1$) που έχει γνωστή στοιχειομετρία. Η στοιχειομετρία δηλώνεται εξωτερικά από τον χρήστη ή προσδιορίζεται αυτόματα από την χημική ισορροπία στο σημείο πλουσίου μίγματος ($f=f_{rich}$). Αυτή η προσέγγιση, γνωστή ως προσέγγιση μερικής χημικής ισορροπίας, επιτρέπει την παράκαμψη πολύπλοκων υπολογισμών ισορροπίας στην περιοχή φλόγας με πλούσιο μίγμα. Αυτό όμως είναι δαπανηρό σε υπολογιστική ισχύ και μπορεί να μην αντιπροσωπεύει την πραγματική διεργασία καύσης. Όταν απαιτείται προσέγγιση πλήρους χημικής ισορροπίας τότε το σημείο f_{rich} δηλώνεται ίσο με την μονάδα.

Τα χημικά στοιχεία και ενώσεις που εισάγονται στο μοντέλο PDF θα πρέπει να υπάρχουν μέσα στην βάση δεδομένων. Εξαιρέσεις κατά την καταχώρηση στοιχείων και ενώσεων θα πρέπει να γίνονται μόνο για τα οξειδία του αζώτου, γιατί οι ρυθμοί αντίδρασης των NO_x είναι πολύ αργοί, και δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με παραδοχές χημικής ισορροπίας. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις NO_x , μπορούν να προβλεφθούν με πολύ καλή ακρίβεια μόνο από τον προεπεξεργαστή NO_x , που μπορεί να ενσωματώσει πεπερασμένους ρυθμούς κινητικών αντιδράσεων.



Σχήμα 3-6 Κλάσμα μάζας ειδών και ενθαλπία.



Σχήμα 3-7 Γραμμομοριακά κλάσματα συστατικών υπολογισμένα σε χημική ισορροπία

3.5.5 Αλληλεπίδραση τύρβης και χημείας στο μοντέλο PDF

Οι εξισώσεις (3.121) και (3.125) περιγράφουν τις στιγμιαίες σχέσεις μεταξύ του κλάσματος μίγματος και των χημικών ειδών, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας όπως προκύπτουν από τα χημικά μοντέλα (μοντέλο χημικής ισορροπίας, στρώματος φλόγας και μοντέλο μη χημικής ισορροπίας). Η πρόβλεψη για την επίδραση της τύρβης στη ροή με χημική αντίδραση σχετίζεται οπωσδήποτε, με τις προβλέψεις των μέσων χρονικών στιγμών των παραπάνω βαθμωτών μεγεθών. Το πώς αυτές οι μέσες χρονικές τιμές σχετίζονται με τις στιγμιαίες τιμές εξαρτάται από το μοντέλο αλληλεπίδρασης τύρβης-χημείας. Το μοντέλο εφαρμόζει την προσέγγιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας ως το πιο προσιτό μοντέλο όταν χρησιμοποιείται η προσέγγιση του κλάσματος μίγματος.

3.5.5.1 Επεκτάσεις της μη αδιαβατικής προσέγγισης του κλάσματος μίγματος

Πολλά αντιδρώντα συστήματα περιλαμβάνουν μετάδοση θερμότητας σε συνοριακά τοιχώματα με συναγωγή ή με ακτινοβολία. Σε αυτά τα συστήματα, η τοπική θερμοχημική κατάσταση δεν συνδέεται πλέον με το κλάσμα μίγματος f , όπως επίσης και με την ενθαλπία H^* . Αυτό ισχύει επειδή η ενθαλπία του συστήματος επιδρά στους υπολογισμούς χημικής ισορροπίας και στην θερμοκρασία της ροής. Συνεπώς, η αλλαγή στην ενθαλπία λόγω των απωλειών θερμότητας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν υπολογίζονται βαθμωτά μεγέθη από το κλάσμα μίγματος. Έτσι, η εξάρτηση των βαθμωτών μεγεθών θα είναι:

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \quad (3.126)$$

όπου, H^* είναι η ενθαλπία που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.124). Σε τέτοια μη αδιαβατικά συστήματα, θα πρέπει να συνυπολογίζονται και οι διακυμάνσεις της τύρβης μέσω της συνάρτησης $p(f, H^*)$. Ο υπολογισμός της $p(f, H^*)$ όμως, δεν ενδείκνυται για πρακτικές εφαρμογές. Το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά με την παραδοχή ότι οι διακυμάνσεις της ενθαλπίας είναι ανεξάρτητες από το επίπεδο της ενθαλπίας δηλαδή ότι οι απώλειες θερμότητας δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις τυρβώδεις διακυμάνσεις της ενθαλπίας. Όταν γίνει η παραπάνω παραδοχή, τότε είναι $p=p(f)$ και

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 \phi_i(f, \bar{H}^*) p(f) df \quad (3.127)$$

Ο προσδιορισμός της $\bar{\phi}_i$ σε μη αδιαβατικό σύστημα απαιτεί τις λύσεις της τροποποιημένης εξίσωσης μεταφοράς για την μέση ενθαλπία:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{H}^*) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{H}^*) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_i}{C_p} \frac{\partial \bar{H}^*}{\partial x_i} \right) + \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (3.128)$$

όπου, S_h είναι ο όρος πηγής που συνδυάζει θερμότητα με ακτινοβολία, μετάδοση θερμότητας στα τοιχώματα και εναλλαγή θερμότητας με σωματίδια.

Όταν περιλαμβάνεται και δευτερεύον ρεύμα, η βαθμωτή εξάρτηση γίνεται:

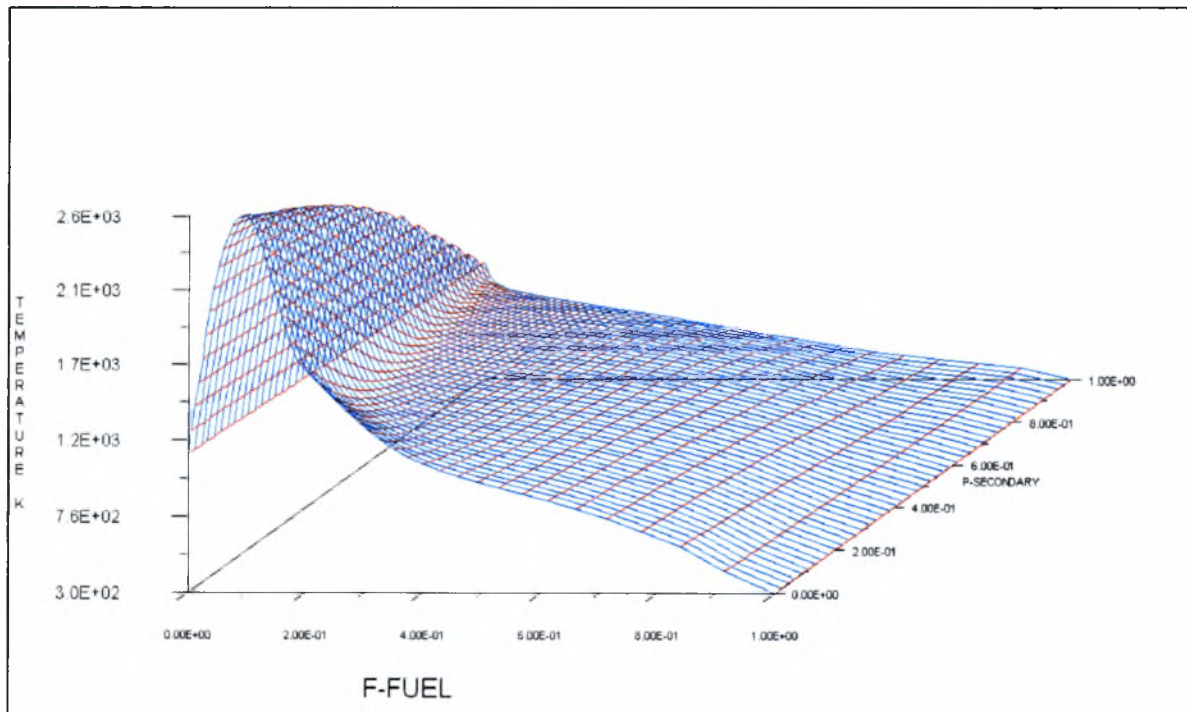
$$\phi_i = \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, H^*) \quad (3.129)$$

και οι μέσες τιμές υπολογίζονται από την σχέση:

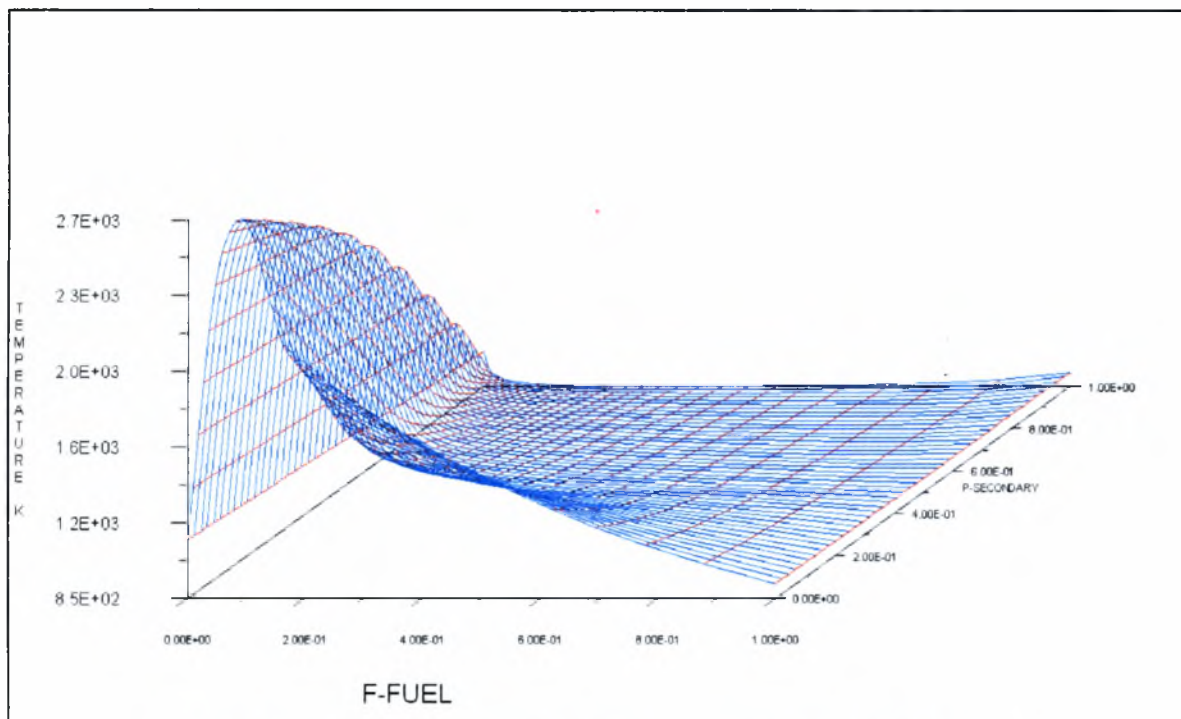
$$\overline{\phi_i} = \int_0^1 \int_0^1 \phi_i(f_{fuel}, p_{sec}, H^*) p_1(f_{fuel}) p_2(p_{sec}) df_{fuel} dp_{sec} \quad (3.130)$$

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, οι μη αδιαβατικές προεκτάσεις στο μοντέλο PDF είναι απαραίτητες σε συστήματα που περιλαμβάνουν μετάδοση θερμότητας σε τοίχους με ακτινοβολία. Επιπλέον, το μη αδιαβατικό μοντέλο συνίσταται και σε ροές πολλαπλών εισόδων καυσίμου και οξειδωτικού με διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου ή σε περιπτώσεις ανακυκλούμενων απαερίων. Τέλος, το μη αδιαβατικό μοντέλο απαιτείται σε ροές που συμπεριλαμβάνονται σωματίδια, γιατί τέτοιες ροές συνδυάζουν μετάδοση θερμότητας στη διακριτή φάση.

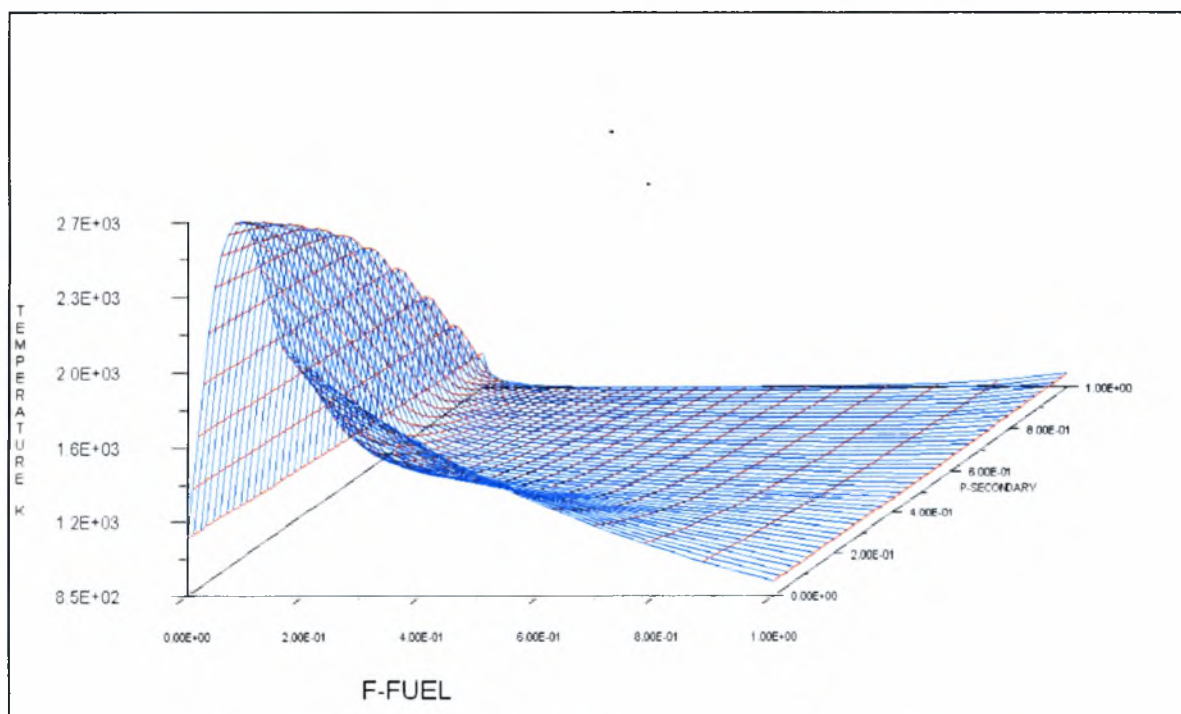
Στην συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-κλασμάτων μίγματος για τα τρία μοντέλα της παρούσας προσομοίωσης, όπως προκύπτουν από τον προεπεξεργαστή prePDF. Το μοντέλο χρησιμοποιεί δύο ρεύματα μιγμάτων (ρεύμα καυσίμου και ασβεστοποίησης) σε αδιαβατικό σύστημα. Οι συστάσεις των ρευμάτων των καυσίμων καθορίζονται από τις απόλυτες αναλύσεις τους (Κεφάλαιο 4) ενώ για το ρεύμα ασβεστοποίησης ορίζεται το αέριο προϊόν της χημικής αντίδρασης που είναι CO_2 .



Σχήμα 3-8 Θερμοκρασίες κλασμάτων μίγματος για την 1^η ποιότητα καυσίμου



Σχήμα 3-9 Θερμοκρασίες κλασμάτων μίγματος για την 2^η ποιότητα καυσίμου



Σχήμα 3-10 Θερμοκρασίες κλασμάτων μίγματος για την 3^η ποιότητα καυσίμου

Οι θερμοκρασίες εισόδου για τα ρεύματα καυσίμου και ασβεστοποίησης κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων ήταν 332.15K για την είσοδο του καυσίμου και 1023.15K για το ρεύμα ασβεστοποίησης.

4. Χαρακτηριστικά μοντέλου ασβεστοποιητή

4.1 Εισαγωγή

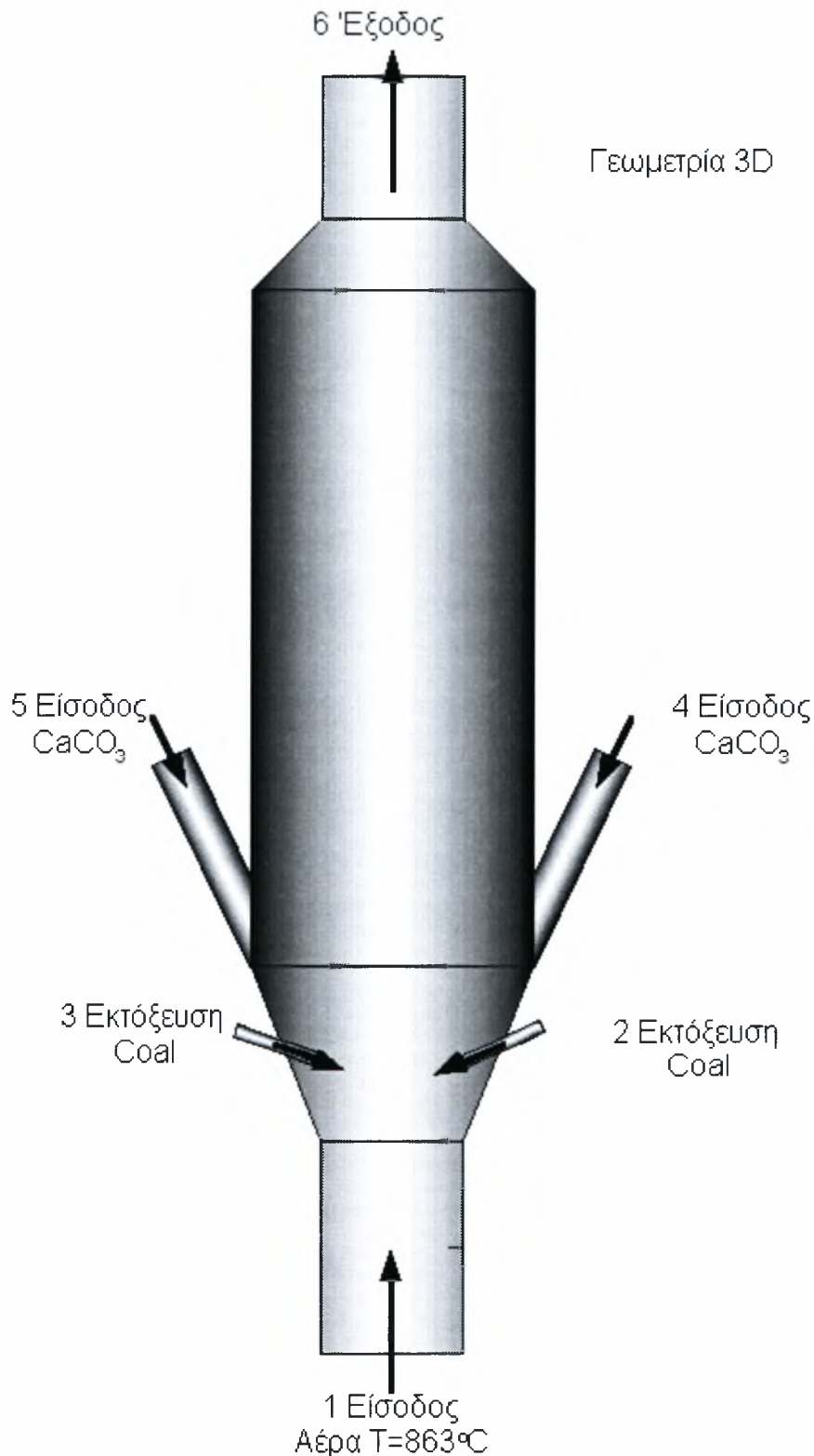
Ο ασβεστοποιητής, η προσομοίωση του οποίου αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι μια πρόσφατη καινοτομία, που προστέθηκε στην σειρά διεργασιών κατά την παραγωγή τσιμέντου. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε όλη η διεργασία έψησης με και χωρίς την ύπαρξη ασβεστοποιητή. Στην παρούσα ενότητα, θα γίνει η διατύπωση και η οριοθέτηση του φυσικού προβλήματος και συγχρόνως, θα εκτεθούν και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου για την προσομοίωση του ασβεστοποιητή.

4.1.1 Συνοπτική περιγραφή

Ο ασβεστοποιητής, συναντάται κατά την διεργασία έψησης, μετά από την τριτοβάθμια συστοιχία των ανακομιστών προθέρμανσης και πριν από τον ανακομιστή του τετάρτου επιπέδου, που ταυτόχρονα αποτελεί την τελευταία διάταξη πριν την είσοδο των βασικών υλικών παραγωγής τσιμέντου στον ΠΚ. Ο ασβεστοποιητής επικοινωνεί με το ψυγείο του ΠΚ διαμέσω του προσαγωγού του τριτογενούς αέρα, που αποτελείται από ρεύμα αέρος (πρωτογενής αέρας) που ανταλλάσσει θερμότητα με το κλίνκερ (προϊόν ΠΚ). Η είσοδος της φαρίνας, που αποτελείται κατά 78% από CaCO_3 και SiO_2 κατά ένα ποσοστό ίσο περίπου με 12~13 %, γίνεται από τους ανακομιστές του τρίτου επιπέδου της διπλής συστοιχίας προθέρμανσης. Μέσα στον ασβεστοποιητή εισέρχονται και σωματίδια κάρβουνου σε λεπτό διαχωρισμό, που είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών θερμοκρασίας για την πραγματοποίηση της διάσπασης του CaCO_3 . Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι η παρούσα διάταξη ασβεστοποίησης, που λειτουργεί στο εργοστάσιο 'Όλυμπος' της ΑΓΕΤ-Ηρακλής, κατά την εκκίνηση της τροφοδοτείται και με υγρό καύσιμο. Το είδος του στερεού καυσίμου μπορεί να είναι κάρβουνο με περίπου 60% στερεό άνθρακα ή πέτκωκ με ποσοστό στερεού άνθρακα που πολλές φορές υπερβαίνει το 85% [12-15].

Η έξοδος του ασβεστοποιητή, οδηγεί την ασβεστοποιημένη πλέον φαρίνα στον ανακομιστή του τετάρτου επιπέδου μέσω ενός θαλάμου ανάμιξης, και μετά από εκεί στον ΠΚ. Από την ίδια έξοδο διαφεύγουν και τα καυσαέρια που προκύπτουν από την καύση του κάρβουνου (ή του πέτκωκ) και τα αέρια (κυρίως CO_2) που προέρχονται από την διάσπαση του CaCO_3 . Στο Σχήμα 4-1, όπου δίνεται ποιοτικά η εικόνα της διάταξης που υπόκειται σε προσομοίωση, ο όγκος έλεγχου περιλαμβάνει την είσοδο του τριτογενούς αέρα, που προέρχεται από το ψυγείο του ΠΚ, τις εισόδους της φαρίνας από τους ανακομιστές-κυκλώνες της διπλής συστοιχίας

ας ανακομιστών του τρίτου επιπέδου, τις δύο σωλήνες μεταφοράς του καυσίμου που καταλήγουν σε δύο ακροφύσια, και την έξοδο της ασβεστοποιημένης φαρίνας και των αερίων της καύσης και της ασβεστοποίησης.



Σχήμα 4-1 Όγκος έλεγχου μοντελοποίησης ασβεστοποιητή.

Η είσοδος της φαρίνας στον ασβεστοποιητή γίνεται από κεκλιμένους σωλήνες, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση. Η διαμόρφωση των σωλήνων τροφοδοσίας της φαρίνας έχει επιλεγεί κατά τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα των δεδομένων εισόδου με αυτά των μετρητικών διατάξεων βασικών μεταβλητών-μεγεθών του προβλήματος. Αφενός, η θέση των οργάνων μέτρησης υπαγορεύει την συγκεκριμένη διαμόρφωση εισόδων για την φαρίνα, αφετέρου, είναι κάτι που ο κώδικας μπορεί να πραγματοποιήσει με άνεση. Η είσοδος του στερεού καυσίμου γίνεται με εκτόξευση από (2) ακροφύσια. Τα ακροφύσια εισόδου παρουσιάζουν με την κατακόρυφο κλίση 30° προς τα κάτω. Τα ακροφύσια τοποθετούνται σε αντιδιαμετρικές θέσεις του ίδιου ύψους, της κάτω κωνικής διαμόρφωσης της διάταξης. Τέλος, η έξοδος της ασβεστοποιημένης φαρίνας (CaO), των απαερίων (κυρίως CO_2) της καύσης και της διάσπασης CaCO_3 , γίνεται από τον άνω κυλινδρικό αγωγό.

4.1.2 Γεωμετρία κατασκευής

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται πλήρως η γεωμετρία της διάταξης ασβεστοποίησης, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια που παραχωρήθηκαν από την ΑΓΕΤ 'Ηρακλής'. Η αποτύπωση των γεωμετρικών διαστάσεων έγινε με βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου AUTO-CAD R14 της Autodesk. Ο βασικοί λόγοι αυτής της ενέργειας, ήταν η λεπτομερής καταγραφή των γεωμετρικών ιδιαιτεροτήτων της συγκεκριμένης διάταξης και η αποτύπωση του σε ηλεκτρονική μορφή για την παραγωγή μηχανολογικών σχεδίων σε οποιαδήποτε όψη χρειάστηκε για την μελέτη της ροής αλλά και των φυσικοχημικών διεργασιών, που λαμβάνουν χώρα. Επίσης, ένας άλλος σημαντικός λόγος, ήταν η εισαγωγή των πληροφοριών, που είχαν παραχθεί από την ηλεκτρονική αποτύπωση του σχεδίων, στον προεπεξεργαστή γεωμετρία του κώδικα FLUENT, για την κατασκευή του πλέγματος της τρισδιάστατης γεωμετρίας. Επειδή, διαπιστώθηκε πως οι δυνατότητες κατασκευής της φυσικής γεωμετρίας του προεπεξεργαστή γεωμετρίας (Gambit) του κώδικα Fluent, δεν ήταν εφάμιλλες του σχεδιαστικού πακέτου Autocad R14, σε επίπεδο σχεδιασμού, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει η εισαγωγή της 3D γεωμετρίας από τα αρχεία που ήδη είχαν δημιουργηθεί, με το προαναφερόμενο πρόγραμμα σχεδιασμού. Η εισαγωγή της γεωμετρίας έγινε με την μετατροπή των σχεδίων Autocad σε αρχεία του προτύπου IGES (Initial Graphics Exchange Specification) που είναι κατάλληλο για την επικοινωνία σχεδιαστικών πακέτων μηχανικού (μεταφορά σχεδίου).

Έτσι, εξασφαλίστηκε η γεωμετρική ομοιότητα του υπολογιστικού πεδίου της προσομοίωσης με την πραγματική μελετούμενη διάταξη, και συγχρόνως βοήθησε στην επιτάχυνση της κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος, που ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα.

4.1.3 Γεωμετρική Περιγραφή Ασβεστοποιητή

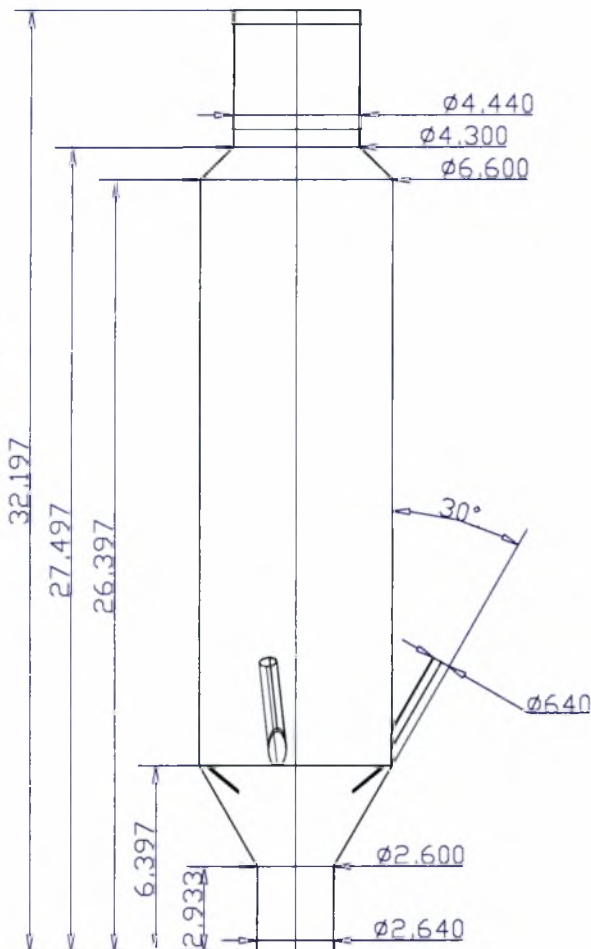
Ο ασβεστοποιητής είναι μια διάταξη, η οποία αποτελείται από κυλινδρικά και κωνικά τμήματα και διαθέτει τριών ειδών εισόδους και μια έξοδο.



Σχήμα 4-2 Τρισδιάστατη άποψη ασβεστοποιητή

Στο Σχήμα 4-2 δίνεται μια τρισδιάστατη άποψη του ασβεστοποιητή, στην οποία διακρίνονται οι εισοδοί και η έξοδος. Η είσοδος της φαρίνας στον ασβεστοποιητή γίνεται μέσω δυο κυλινδρικών σωλήνων. Ο τριτογενής αέρας εισάγεται από το κυλινδρικό τμήμα στη βάση, ενώ το κάρβουνο εισέρχεται σε λεπτή διαμέριση από δύο αντιδιαμετρικά τοποθετημένους εκχυτηρές στην κάτω κωνική διαμόρφωση του ασβεστοποιητή. Η κορυφή του ασβεστοποιητή συνιστά και την έξοδο, από την οποία εξέρχονται τα προϊόντα που παράγονται, όπως ασβεστοποιημένη φαρίνα κτλ.

Στο Σχήμα 4-3, που ακολουθεί απεικονίζεται η πλάγια όψη του ασβεστοποιητή σε δύο διαστάσεις. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτό, η φαρίνα εισάγεται στον ασβεστοποιητή μέσω δύο σωλήνων διαμέτρου 0,6m και πάχος σωληνώσεων 2,5mm. Οι σωλήνες σχηματίζουν γωνία 60° με το οριζόντιο επίπεδο και είναι εφαιπτόμενοι, στο κύριο κορμό της διάταξης. Ο τριτογενής αέρας εισέρχεται από τη βάση, που αποτελείται από ένα ομόκεντρο κυλινδρικό σωλήνα διαμέτρου 2,6m και ανέρχεται κατακόρυφα. Παράλληλα, το κάρβουνο διοχετεύεται στον ασβεστοποιητή από την κάτω κωνική διαμόρφωση. Οι φυσικοχημικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα στον κύριο όγκο του ασβεστοποιητή που συγκροτείται από έναν κύλινδρο με διάμετρο

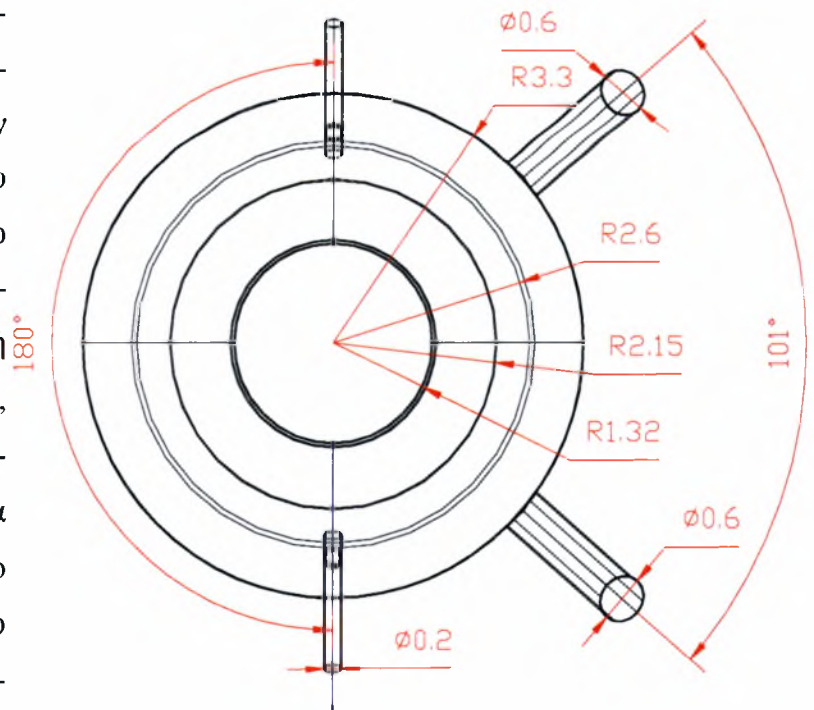


Σχήμα 4-3 Πλάγια όψη ασβεστοποιητή

Στα επόμενα Σχήματα, παρουσιάζονται λεπτομέρειες της κατασκευαστικής διαμόρφωσης των εισαγωγών της φαρίνας και του κάρβουνου, εστιάζοντας στο κάτω μέρος της διάταξης. Η φαρίνα εισάγεται μέσα στον ασβεστοποιητή με την βοήθεια της βαρύτητας, καθώς αυτή ολισθαίνει στο σύστημα σωληνώσεων-συστοιχία ανακομιστών τριών επιπέδων. Το ποσοστό της αρχικής φαρίνας, που τελικά οδηγείται μέσα στον ασβεστοποιητή, εκτιμάται γύρω στο

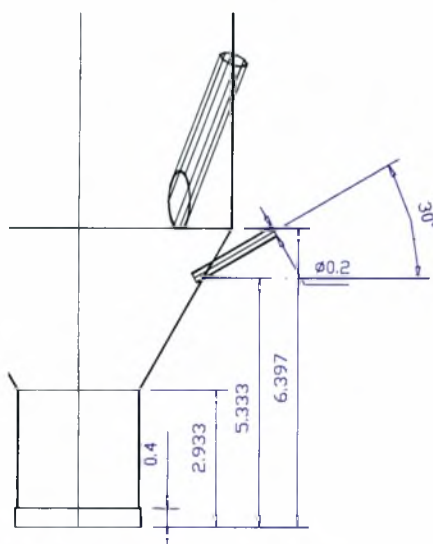
6,6 m και ύψος 20 m. Η άνω κωνική διαμόρφωση έχει ύψος 1,1 m. Η όλη διάταξη καταλήγει σε μια κυλινδρική διαμόρφωση με διάμετρο 4,3 m και ύψος 5 m.

Στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται η κάτωψη του ασβεστοποιητή. Όπως διακρίνεται από το σχήμα οι δυο σωλήνες εισόδου της φαρίνας σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 101°. Επιπλέον, φαίνονται οι διάμετροι των κυλινδρικών τμημάτων που συνιστούν τον ασβεστοποιητή, καθώς και των σωληνών εισόδου της φαρίνας, οι τιμές των οποίων προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Στο ίδιο σχήμα διακρίνονται και οι θέσεις των σωληνών προσαγωγής του κάρβουνο. Η μεταφορά του κάρβουνου γίνεται με πνευματικό σύστημα, εφόσον αυτό αποκτήσει την κατάλληλη υγρασία μετά από την ξήρανση που γίνεται σε αντίστοιχους μύλους.



Σχήμα 4-4 Κάτωψη ασβεστοποιητή

80%. Η φαρίνα εισέρχεται στον κύκλο των διεργασιών έψησης από το πρώτο επίπεδο της συστοιχίας των ανακομιστών προθέρμανσης. Στα τρία επίπεδα, που προηγούνται του ασβεστοποιητή, η φαρίνα διαχωρίζεται και διαμερίζεται έτσι ώστε να μειωθεί αρκετά η μέση διάμετρος των κόκκων φαρίνας. Επίσης, ένα μέρος της φαρίνας δεν διέρχεται και δεν ασβεστοποιείται εντός του ασβεστοποιητή αλλά μεταφέρεται κατ' ευθείαν στο περιστροφικό κλιβάνο. Η μεταφορά αυτής της ποσότητας φαρίνας γίνεται από έναν θάλαμο, που βρίσκεται μεταξύ των ανακομιστών του δεύτερου και τρίτου επιπέδου. Εκεί, διασταυρώνεται ο σωλήνας προσαγωγής από τον κυκλώνα του δεύτερου επιπέδου και ο αντίστοιχος της απαγωγής για το τρίτο επίπεδο και ένας τρίτος που οδηγεί κατευθείαν στο ΠΚ. Αυτή η μεταφορά φαρίνας γίνεται για να ελεγχθεί το θερμοκρασιακό επίπεδο του κλιβάνου, και αποφευχθεί η έντονη θερμοκρασιακή καταπόνηση της επίστρωσης του αλλά και η ποιοτική αλλοίωση του προϊόντος.



Σχήμα 4-5 Λεπτομέρεια του σωλήνα εισαγωγής καισίμου

Στο Σχήμα 4-5, δίνεται σε λεπτομέρεια, η εισαγωγή του κάρβουνου. Η μεταφορά του κάρβουνου μέσα στη διάταξη γίνεται με σωλήνα, που έχει διάμετρο 200 mm και παρουσιάζει κλίση 30° με το οριζόντιο επίπεδο. Βρίσκεται σε ύψος 2.4 m από την αρχή της κωνικής διαμόρφωσης, ενώ σε αυτό το ύψος απέχει από τον κεντρικό κατακόρυφο άξονα κατά 2.68 m. Το κατακόρυφο επίπεδο που ορίζουν τα δύο ακροφύσια και ο άξονας συμμετρίας σχηματίζουν γωνίες 39°5'' με τα ημιεπίπεδα που δημιουργούνται από τον άξονα συμμετρίας και από τους σωλήνες τροφοδοσίας της φαρίνας.

4.1.4 Κατασκευή Πλεγμάτων

Με δεδομένη πλέον την γεωμετρία της διάταξης, έγινε η μετατροπή των αρχείων Autocad R14 σε αρχεία προτύπου IGES. Ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας αναγνώρισε την γεωμετρία σχήματος που δημιουργήθηκε στο σχεδιαστικό πακέτο, χωρίς όμως να είναι σε θέση να διακρίνει την ιδιότητα των επιφανειών της γεωμετρίας. Γι' αυτό το λόγο, πρώτα χρειάστηκε να δηλωθούν εξ' αρχής, όλες οι επιφάνειες που τους συγκροτούσαν την διάταξη και έπειτα από αυτές να συντεθούν οι αντίστοιχοι όγκοι. Μόλις ολοκληρώθηκε η παραπάνω εργασία, έγινε κατάτμηση του συνολικού όγκου σε επιμέρους έτσι ώστε, σε κάθε ένα από αυτούς να εφαρμοστεί και διαφορετικό κατά περίπτωση είδος πλέγματος.

Στα Σχήματα 4-6 έως 4-9, παρουσιάζεται η διάταξη ασβεστοποίησης, έτσι όπως εμφανίστηκε στο προεπεξεργαστή γεωμετρίας Gambit, αμέσως μετά από την εισαγωγή.



Σχήμα 4-6 Κύρια όψη



Σχήμα 4-7 Εστίαση στις κύριες εισόδους



Σχήμα 4-8 Πλάγια όψη

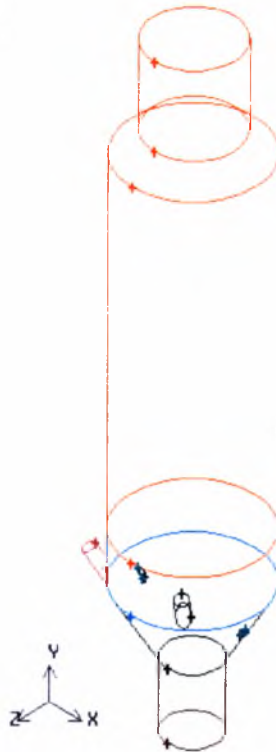


Σχήμα 4-9 Κάτοψη

Αμέσως, μετά ακολούθησε η επεξεργασία του γεωμετρικού όγκου. Σύμφωνα με την τοπολογία διαμορφώθηκε το βασικό περίγραμμα του όλου όγκου και στην συνέχεια έγινε η αποτύπωση των ιδιοτήτων των επιφανειών με στοιχεία που αφορούν την θέση των επιφανειών εντός του υπολογιστικού πεδίου. Στη συνέχεια, ο βασικός όγκος διαχωρίστηκε σε (8) εσωτερικά τμήματα για να επιταχυνθεί και να απλοποιηθεί η διαδικασία κατασκευής του υπολογιστικού πλέγματος. Σε κάθε ένα τμήμα, ήταν δυνατό να εφαρμοστεί και διαφορετικό σχήμα πλέγματος, αρκεί να είχε εξασφαλιστεί η ύπαρξη μιας συνοριακής ενδοεπιφάνειας, έτσι ώστε να συμπίπτουν οι εφαιπόμενες επιφάνειες των κελιών. Αυτό σε μερικές περιπτώσεις έγινε αυτόματα από τον προεπεξεργαστή, δημιουργώντας μόνος αυτές τις απαραίτητες διεπιφάνειες πλέγματος ενώ σε άλλες περιπτώσεις όπου η τοπολογία παρουσίαζε γεωμετρικές πολυπλοκότητες (πχ. σωλήνες προσαγωγής της φαρίνας και του κάρβουνου) χρειάστηκε να καθοριστούν από τον χρήστη οι συντεταγμένες του κάθε κόμβου των συγκεκριμένων επιφανειών. Αυτό, εκτός από τον εξαιρετικά δύσκολο τρόπο εισαγωγής των συντεταγμένων των κόμβων, ήταν και αρκετά χρονοβόρο. Για την κατασκευή των συγκεκριμένων κόμβων δαπανήθηκε

πάνω από το 90% του χρόνου που αφιερώθηκε στην δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή των πλεγμάτων απορρόφησε σχεδόν το 50% του χρόνου περάτωσης της παρούσας εργασίας.

Στο Σχήμα 4-10, παρουσιάζεται το περίγραμμα των επιμέρους όγκων που δημιουργήθηκαν, εντός του βασικού όγκου, που αναγνώρισε ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας.



Σχήμα 4-10 Εσωτερικοί βοηθητικοί όγκοι του υβριδικού πλέγματος

Όπως διακρίνεται και από το Σχήμα 4-10, ο βασικός όγκος έχει τεμαχιστεί σε (8) μικρότερους. Ο πρώτος όγκος περιλαμβάνει το μεγαλύτερο σε όγκο τμήμα της διάταξης, συγκεκριμένα σε αυτόν ανήκουν το μεγαλύτερο τμήμα του κυλινδρικού κορμού, η άνω κωνική διαμόρφωση και ο κύλινδρος άνωθεν αυτής. Ο δεύτερος όγκος περιλαμβάνει το υπόλοιπο του κυλινδρικού κορμού. Οι όγκοι 3 και 4 είναι αντίστοιχα οι εισοδοί της φαρίνας. Ο πέμπτος όγκος είναι η κάτω κωνική διαμόρφωση, οι όγκοι 6 και 7 είναι αντίστοιχα οι εισοδοί του κάρβουνου, και ο τελευταίος όγκος 8 είναι η κυλινδρική είσοδος του τριτογενούς αέρα. Από τους παραπάνω όγκους, μόνο οι όγκοι 2 και 4 κατατμήζονται σε τετραεδρικά κελιά μη δομημένου πλέγματος, ενώ οι υπόλοιποι χρησιμοποιούν εξάπλευρα κελιά δομημένου και αδόμητου πλέγματος, ανάλογα με το είδος των κελιών του γειτνιάζοντος εσωτερικού όγκου. Στην συνέχεια, δίνονται ορισμένα θεωρητικά στοιχεία για είδη του πλέγματος που χρησιμοποιούνται ανά όγκο και περίπτωση.

4.1.5 Σχήματα Πλέξης

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου πλέγματος, εφόσον έχει διαμορφωθεί το περίγραμμα του όγκου, απαιτεί την τοποθέτηση των κόμβων πρώτα στις οριακές γραμμές, μετά στην επιφάνεια που ορίζουν αυτές οι γραμμές και έπειτα στον όγκο που εσωκλείεται από όλες τις οριακές επιφάνειες [7]. Η τοποθέτηση των κόμβων στις γραμμές που ορίζουν την διεπιφάνεια ορίου μπορεί να γίνει με μεταβλητή απόσταση, με σκοπό να δημιουργηθεί ανισοκατανεμημένο πλέγμα. Εφόσον, τοποθετηθούν οι κόμβοι επάνω στις γραμμές που ορίζουν την επιφάνεια, μπορεί να εφαρμοστεί ένα σχήμα πλέγματος, και ταυτόχρονα να δημιουργηθούν και οι υπόλοιποι κόμβοι εντός της επιφανείας. Μετά την εφαρμογή του πλέγματος στις επιφάνειες που περικλείουν το υπολογιστικό όγκο, μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλο σχήμα ανά περίπτωση, έτσι ώστε να δημιουργηθούν και οι θέσεις των κόμβων στο εσωτερικό. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα της απ' ευθείας εφαρμογής ενός πλέγματος σε ένα όγκο χωρίς να ακολουθείται η διαδικασία: διακριτοποίηση γραμμής, πλέξη εξωτερικών επιφανειών και πλεγμάτωση όγκου. Αυτό βέβαια, περιορίζει τις δυνατότητες πύκνωσης και αραιώσης του πλέγματος σε περιοχές που χρήζουν κατάλληλης εστίασης.

Οι δυνατότητες για την τοποθέτηση των κόμβων επάνω σε μια πλευρά περιορίζονται στην επιλογή του αριθμού των κόμβων, της μεταξύ τους απόστασης καθώς και στον καθορισμό του συντελεστή επέκτασης της απόστασης αυτής αλλά και της φοράς (προσανατολισμός) του πυκνού τμήματος της γραμμής. Παράλληλα, παρέχεται και η δυνατότητα της συμμετρικής ανισοκατανομής των κόμβων, δηλαδή να εφαρμόζεται πυκνό ή αραιό σχήμα τοποθέτησης των κόμβων στις δύο άκρες της γραμμής ή στο κέντρο της. Κατά την δημιουργία πλέγματος επάνω σε μια ή και περισσότερες επιφάνειες, πρέπει να δηλωθούν στον προεπεξεργαστή, οι επιφάνειες πλέξης, το σχήμα πλέγματος και οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος. Εφόσον γίνει η επιλογή της επιφανείας, πρέπει στην συνέχεια να προσδιοριστεί το είδος των κελιών και ο τύπος του πλέγματος. Το είδος των κελιών ουσιαστικά αφορά το σχήμα των κελιών και ο τύπος του πλέγματος, το πρότυπο με το οποίο τα κελιά συνθέτουν την επιφάνεια. Οι δυνατότητες επιλογής των κελιών είναι τρεις και εξαρτώνται, και από το σχήμα προτύπου πλέξης που θα εφαρμοστεί. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-1

Πίνακας 4-1 Πίνακας επιλογής κελιών

Επιλογή	Περιγραφή
Quad	Προσδιορίζει τετράπλευρη πλέξη των κελιών
Tri	Προσδιορίζει τριγωνοειδή πλέξη κελιών
Quad/Tri	Προσδιορίζει ότι το πλέγμα θα περιέχει πρωτίστως, τετράπλευρα κελιά αλλά οι γωνίες και οι οξείες κλίσεις των καμπύλων τις επιφανείας θα περιέχουν και τριγωνικά κελιά

Ο τύπος του πλέγματος που μπορεί να εφαρμοστεί κατά περίπτωση, στην πλέξη μιας επιφάνειας φαίνεται στον Πίνακα 4-2.

Πίνακας 4-2 Πίνακας επιλογής προτύπου πλέγματος

Επιλογή	Περιγραφή
Map	Δημιουργεί κανονικό δομημένο πλέγμα κελίων
Submap	Διασπά 'αχαιογραφητές' περιοχές σε μικρότερες κανονικές περιοχές και δημιουργεί δομημένο πλέγμα σε κάθε περιοχή
Pave	Δημιουργεί αδόμητο πλέγμα κελιών
Tri Primitive	Χωρίζει μια επιφάνεια τριών πλευρών σε τρεις τετράπλευρες περιοχές και δημιουργεί σε καθεμία από αυτές δομημένο πλέγμα
Wedge Primitive	Δημιουργεί τριγωνοειδή κελιά στην άκρη του σφηνοειδούς σχήματος και ακτινική πλέξη μακριά από τις άκρες.

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, κάθε μία από της δυνατές επιλογές των κελιών συνδέεται με έναν ή περισσότερους τύπους πλέξης. Στον Πίνακα 4-3, δίνονται οι πιθανοί συνδυασμοί σχήματος κελιών και προτύπου πλέξης.

Πίνακας 4-3 Πίνακας δυνατών συνδυασμών σχήματος κελιών-προτύπου πλέγματος

Πρότυπο Πλέγματος	Σχήμα κελιών		
	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	⊕	⊕	⊕
Submap	⊕		
Pave	⊕	⊕	⊕
Tri Primitive	⊕		
Wedge Primitive			⊕

Με την εφαρμογή του σχήματος πλέγματος Quad-Map σε μία επιφάνεια, δημιουργείται ένα κανονικό πλέγμα από κελιά τετράπλευρου σχήματος. Το σχήμα αυτό έχει εφαρμογές σε επιφάνειες που ορίζονται από (4) πλευρές, όχι απαραίτητα με περιεχόμενη γωνία 90°. Το πρότυπο πλέγματος Quad/Tri εφαρμόζεται μόνο σε γεωμετρίες που αποτελούνται από στενές τοξοειδείς επιφάνειες, καθώς διαγράφονται από δύο καμπύλες όπου η μία είναι ευθεία και η άλλη τεθλασμένη καμπύλη. Κατά την εφαρμογή του παραπάνω σχήματος, δημιουργούνται τριγωνοειδή κελιά στις οξείες γωνίες της επιφάνειας και τετράπλευρα στην υπόλοιπη επιφάνεια. Όταν εφαρμόζεται το σχήμα Submap σε μια επιφάνεια, αυτή διαιρείται σε δύο ή περισσότερες 'αχαιογραφημένες' περιοχές που μπορεί να διακριτοποιηθούν με δομημένο πλέγμα.

Όπως το σχήμα Map έτσι και το Submap, υπόκειται σε περιορισμούς που έχουν να κάνουν με την μορφή των γραμμών που περιβάλλουν την επιφάνεια αλλά και με τις διαστάσεις των κελιών. Το σχήμα πλέγματος Quad-Pave, δημιουργεί μη δομημένο πλέγμα, το οποίο αποτελείται από τετράπλευρα κελιά. Το σχήμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς περιορισμούς σε οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια. Παρομοίως, το σχήμα Quad-Tri δημιουργεί ακανόνιστα τριγωνικά κελιά σε όλη την έκταση της επιφανείας. Μίξη των δύο παραπάνω σχημάτων αποτελεί το σχήμα Quad/Tri Pave. Το σχήμα αυτό δημιουργεί ένα αδόμητο πλέγμα, που συνίσταται κυρίως από τετράπλευρα κελιά, στο εσωτερικό της επιφανείας και από τριγωνικά κελιά στις άκρες αυτών, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το περίγραμμα τους σχηματίζει οξείες γωνίες.

Το σχήμα Tri Primitive διαιρεί σε υποπεριοχές μια επιφάνεια τριών πλευρών. Αυτό γίνεται με την τοποθέτηση στο εσωτερικό (κέντρο) της επιφανείας ενός σημείου, που παίζει τον ρόλο του κεντρικού κόμβου. Από τα μέσα των τριών πλευρών και από το κεντρικό σημείο ορίζονται τα σύνορα των υποπεριοχών, μέσα στις οποίες εφαρμόζεται δομημένο πλέγμα. Τέλος το σχήμα Wedge Primitive επιτρέπει την εφαρμογή ακτινικού πλέγματος σε μία κυκλική επιφάνεια ή σε ένα μέρος αυτής, που ορίζεται από τρεις καμπύλες. Το πλέγμα που δημιουργείται είναι δομημένο και αποτελείται από τετράπλευρα και τριγωνικά κελιά. Τα τριγωνικά κελιά συναντώνται στο σημείο επαφής των δύο ευθειών (κέντρο του τόξου που περιγράφεται από την τρίτη καμπύλη).

Για την κατασκευή πλεγμάτων, η διαδικασία που ακολουθείται απαιτεί σε πρώτη φάση τον ορισμό του όγκου που θα γίνει το πλέγμα, το καθορισμό του σχήματος πλέξης και την επιλογή του διάκενου των κόμβων. Αμέσως μετά την επιλογή του όγκου, προσδιορίζεται όπως και για τις επιφάνειες το σχήμα των κελιών και το πρότυπο πλέξης. Με τον καθορισμό των κελιών, δηλώνεται το σχήμα των κελιών και το πρότυπο πλέξης ενεργοποιεί τον αλγόριθμο κατασκευής του πλέγματος. Οι δυνατότητες επιλογής σχήματος των κελιών για την σύνθεση του πλέγματος όγκου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-4 Πίνακας επιλογής κελιών

Επιλογή	Περιγραφή
Hex	Προσδιορίζει ότι το πλέγμα θα περιέχει μόνο εξαεδρικά κελιά
Hex/Wedge	Προσδιορίζει ότι το πλέγμα θα συντεθεί κυρίως από εξαεδρικά κελιά αλλά θα συμπεριλαμβάνει και σφηνοειδή κελιά όπου είναι απαραίτητο
Tet/Hybrid	Προσδιορίζει ότι το πλέγμα θα περιέχει πρωτίστως, τετράεδρικά κελιά αλλά μπορεί να αποτελείται και από πυραμιδικά εξαεδρικά και σφηνοειδή όπου είναι απαραίτητο.

Οι δυνατότητες επιλογής προτύπου πλέγματος δίνονται στο Πίνακα 4-5, που ακολουθεί.

Πίνακας 4-5 Πίνακας επιλογής προτύπου πλέγματος

Επιλογή	Περιγραφή
Map	Δημιουργεί κανονικό δομημένο πλέγμα εξαεδρικών κελιών
Submap	Διασπά 'μη χαρτογραφημένους' όγκους σε μικρότερες κανονικές περιοχές-όγκους και δημιουργεί δομημένο πλέγμα σε κάθε όγκο.
Tet Primitive	Χωρίζει έναν όγκο τεσσάρων πλευρών σε τέσσερις εξαεδρικές περιοχές και δημιουργεί σε καθμία από αυτές δομημένο πλέγμα
Cooper	Σαρώνει το επιλεγμένο όγκο τοποθετώντας κόμβους από προεπιλεγμένες πηγαίες επιφάνειες
TGrid	Δημιουργεί ένα πλέγμα το οποίο αποτελείται κυρίως από τετραεδρικά κελιά αλλά μπορεί να περιέχει και εξαεδρικά πυραμιδικά και σφηνοειδή κελιά.

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, κάθε μία από της δυνατές επιλογές των κελιών συνδέεται με έναν ή περισσότερους τύπους πλέξης. Στον Πίνακα 4-6, δίνονται οι πιθανοί συνδυασμοί σχήματος κελιών και προτύπου πλέξης.

Πίνακας 4-6 Πίνακας δυνατών συνδυασμών σχήματος κελιών-προτύπου πλέγματος

Πρότυπο Πλέγματος	Σχήμα κελιών		
	Hex	Hex/Wedge	Tet/Hybrid
Map	⊕		
Submap	⊕		
Tet Primitive	⊕		
Cooper	⊕	⊕	
Tgrid			⊕

Με την εφαρμογή του σχήματος πλέξης Map, ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας δημιουργεί κανονικό εξαεδρικό πλέγμα με κατάλληλη παράταξη των κόμβων εντός του όγκου. Κάθε κελί περιλαμβάνει τουλάχιστον (8) κόμβους που τοποθετούνται στις γωνίες του κάθε κελιού. Αυτό το πρότυπο πλέξης μπορεί να εφαρμοστεί σε όγκους όπου το φυσικό τους σχήμα είναι ή μοιάζει με κανονικό (λογικό) κύβο. Το πρότυπο σχήματος πλέγματος Submap υποδιαιρεί το βασικό όγκο επιλογής σε τμήματα λογικών κύβων, στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί το πρότυπο Map. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή αυτού του προτύπου πρέπει, σε κάθε μία επιφάνεια του να επιτρέπεται η εφαρμογή των σχημάτων πλέξης με το πρότυπο Map ή Submap, και οι αντίθετες επιφάνειες πρέπει να εμφανίζουν με συνέπεια τους ίδιους τύπους ακμών και κορυφών. Το πρότυπο πλέγματος όγκου Tet Primitive βρίσκει εφαρμογή μόνο σε όγκους που συνθέτουν λογικά τετράεδρα και απαιτούν τέσσερις επιφάνειες, όπου οι ακμές τους ορίζουν λογικά τρίγωνα. Κατά την εφαρμογή του Tet Primitive, δημιουργείται σε κάθε εξωτερική επιφάνεια του τετραέδρου, πλέγμα του τύπου Tri Primitive, και στην συνέχεια ο όγκος διασπάται σε (4) επιμέρους όγκους, στους οποίους παράγονται εξαεδρικά κελιά, παράγοντας κελιά δομημένου σχήματος Map, σε κάθε τμήμα.

Κατά την εφαρμογή του σχήματος πλέγματος Cooper, ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας θεωρεί ότι ο όγκος αποτελείται από έναν ή περισσότερους λογικούς κυλίνδρους που απαρτίζονται από δύο λογικές κυκλικές επιφάνειες και ένα λογικό κύλινδρο. Οι δύο λογικές κυλινδρικές επιφάνειες αποκαλούνται επιφάνειες πηγής, κάτι που δεν ισχύει για την επιφάνεια του κυλίνδρου. Κατά την εφαρμογή του σχήματος Cooper, λαμβάνουν χώρα οι λειτουργίες, που καταγράφονται βήμα προς βήμα στον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7 Βήμα προς βήμα εφαρμογή του σχήματος Cooper

Βήμα	Λειτουργία
1	Δημιουργία κανονικού δομημένου πλέγματος τύπου Map ή Submap σε κάθε μη πηγαία επιφάνεια
2	Προσδιορισμός-επιλογή των πηγαίων επιφανειών.
3	Δημιουργία πλέγματος των πηγαίων επιφανειών
4	Προβολή του προτύπου πλέγματος των πηγαίων επιφανειών σε όλον τον όγκο

Όταν εφαρμόζεται το πρότυπο πλέγματος TGrid σε έναν επιλεγμένο όγκο, ο προεπεξεργαστής γεωμετρίας δημιουργεί ένα πλέγμα που αποτελείται κατά κύριο λόγο από τετραεδρικά κελιά, αλλά μπορεί να συμπληρωθεί σε ορισμένες περιπτώσεις από κελιά που κατέχουν άλλο σχήμα. Εάν σε μία ή σε περισσότερες επιφάνειες του συγκεκριμένου όγκου εφαρμοστεί ένα από τα σχήματα Quad, Quad/Tri, τότε κατά την εφαρμογή του σχήματος TGrid θα δημιουργηθούν εξαεδρικά, πυραμιδικά ή και σφηνοειδή κελιά, ανάλογα με την διαθεσιμότητα του υπολειπόμενου όγκου. Ο αλγόριθμος κατασκευής πλέγματος του σχήματος TGrid συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα.

Πίνακας 4-8 Βήμα προς βήμα κατασκευή πλέγματος με το αλγόριθμο πλέξης TGrid

Βήμα	Λειτουργία
1	Κατασκευή πλέγματος σε όλες τις επιφάνειες με το σχήμα Tri-Pave
2	Εάν υφίσταται οριακό στρώμα σε κάποια από την επιφάνεια του όγκου, τότε παράγει εξαεδρικά ή πρισματικά κελιά σε περιοχές προσκείμενες σε οριακά στρώματα και σε επιφάνειες που περιέχουν τετράπλευρα ή τριγωνικά κελιά, αντίστοιχα.
3	Εάν υπάρχει μια τετράπλευρη επιφάνεια κελιών, που συγχρόνως είναι και οριακή, παράγονται πυραμιδικά κελιά για να δημιουργηθεί μια μεταβατική στρώση κελιών που θα συνδέει εξάπλευρα με τετράπλευρα κελιά.
4	Δημιουργία πλέγματος με τετραεδρικά κελιά στο υπόλοιπο το όγκο.

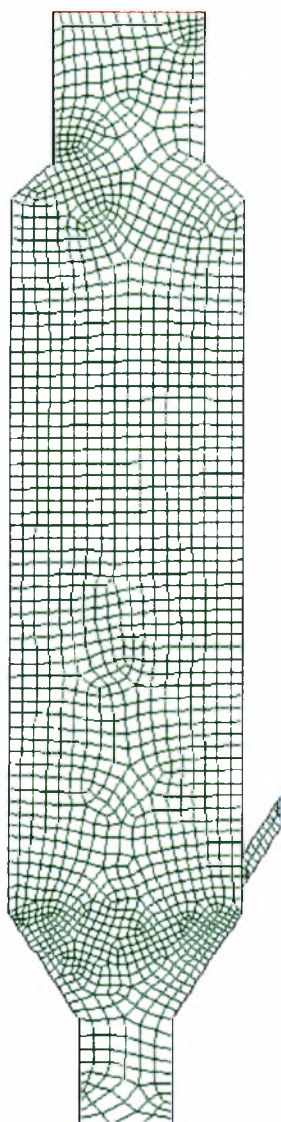
4.1.6 Πλέγματα προσομοιώσεων παρούσας εργασίας

Η ανάπτυξη της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου ασβεστοποίησης έγινε σταδιακά. Η κλιμάκωση των ενεργειών γινόταν μόνο εφόσον είχαν επιτευχθεί οι στόχοι του προηγούμενου επιπέδου. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μια διδιάστατη γεωμετρία, αραιού πλέγματος, στην συνέχεια μια πιο πυκνή και τέλος έγινε η μετάβαση στα τριδιάστατα

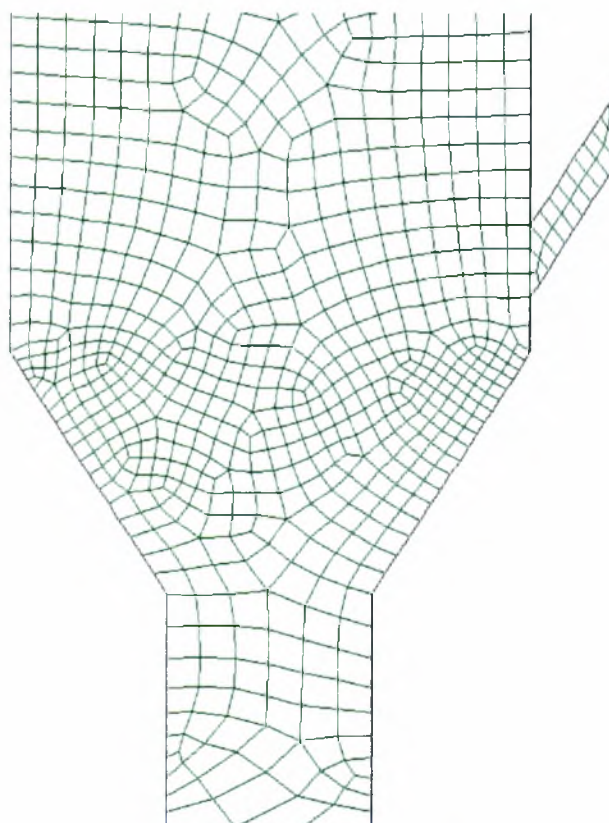
πλέγματα. Τα τρισδιάστατα υπολογιστικά πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσίαζαν αρκετές διαφοροποιήσεις, αλλά είχαν κοινή προέλευση.

Ως πρώτο είδος διδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιήθηκε ένα αραιό πλέγμα για να μελετηθεί η ροή της αέριας φάσης, στην συνέχεια το πλέγμα έγινε πιο πυκνό για να μελετηθεί και η συμπεριφορά των σωματιδίων και της χημείας αλλά και η συμπεριφορά του επιλυτή (solver) του κώδικα. Το τελευταίο διδιάστατο πλέγμα, ήταν αρκετά πυκνό και κάλυπτε μόνο το μισό υπολογιστικό πεδίο, λόγω της συμμετρίας.

Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζεται το πρώτο αραιό πλέγμα (1700 κελιά) που πρωτοδοκιμάστηκε μόνο για την αέρια φάση. Στο Σχήμα 4-12 παρουσιάζεται σε λεπτομέρεια το πλέγμα στην περιοχή εισόδου της φαρίνας.



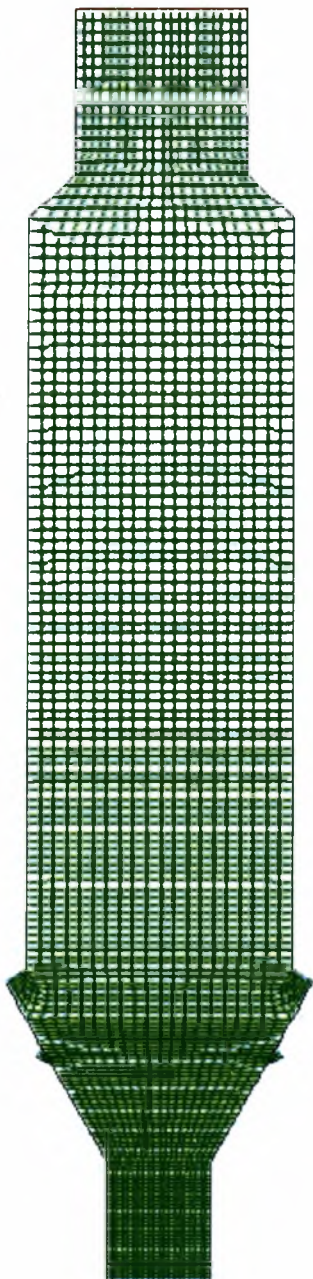
Σχήμα 4-11 Πρώτο είδος διδιάστατου αραιού πλέγματος



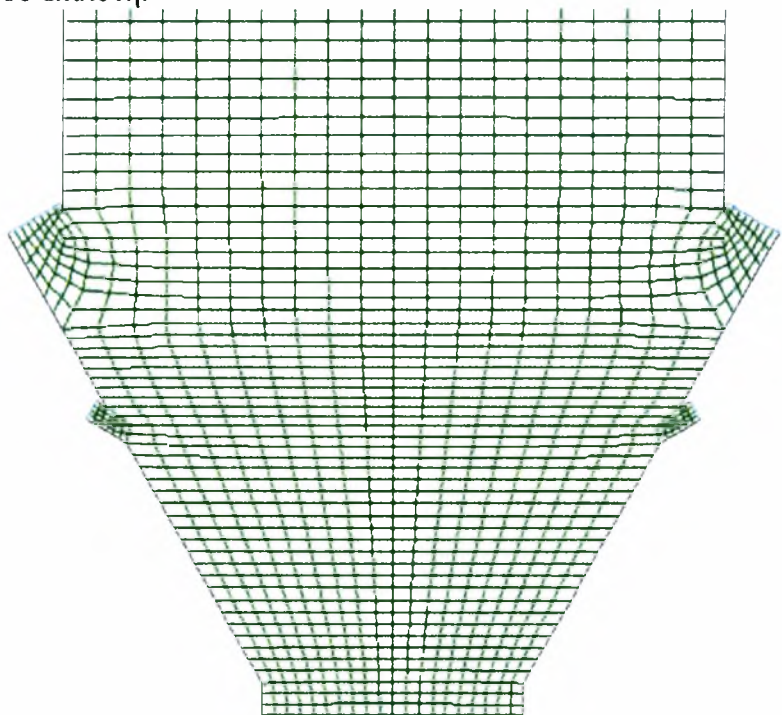
Σχήμα 4-12 Λεπτομέρεια πρώτου πλέγματος

Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του παραπάνω υπολογιστικού πλέγματος ήταν τύπου Pave με τετράπλευρα κελιά (Quad Cells), με αποτέλεσμα το συγκεκριμένο πλέγμα να κατατάσσεται στα αδόμητα πλέγματα. Το δεύτερο είδος πλεγμάτων παρουσιάζεται στα Σχήματα 4-13 και 4-14, όπου έγινε χρήση του πρότυπου πλέγματος Mar και Submar. Το πρότυπο Mar χρησιμοποιήθηκε για την κατάστρωση των κελιών στους κύριους όγκους (κάτω είσοδος, άνω και κάτω κωνική διαμόρφωση, κύριος όγκος και έξοδος), ενώ το πρότυπο Submar χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία πλέγματος στις εισόδους της διακριτής φάσης (είσοδοι φαρίνας και κάρβουνου). Όπως φαίνεται και στα σχήματα τα πρότυπα

πλέγματος Mar και Submar δημιουργούν δομημένα πλέγματα. Η πυκνωση του πλέγματος είναι εμφανής σε σχέση με το πλέγμα του πρώτου είδους. Επίσης, στην περιοχή εισόδου της φαρίνας και του κάρβουνου εφαρμόζεται πυκνότερο πλέγμα, γιατί εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες κλίσεις του θερμοκρασιακού πεδίου αλλά και αυτών των συγκεντρώσεων. Το συγκεκριμένο πλέγμα απαρτίζεται από (3455) κελιά διαφορετικών διαστάσεων. Η κατασκευή του παρόντος πλέγματος, έγινε για να μελετηθεί η ρευστοδυναμική και η χημική συμπεριφορά της διακριτής φάσης, για να εξαχθούν συμπεράσματα για την πορεία επίλυσης του μοντέλου, αλλά και του τρόπου ελέγχου του επιλυτή.



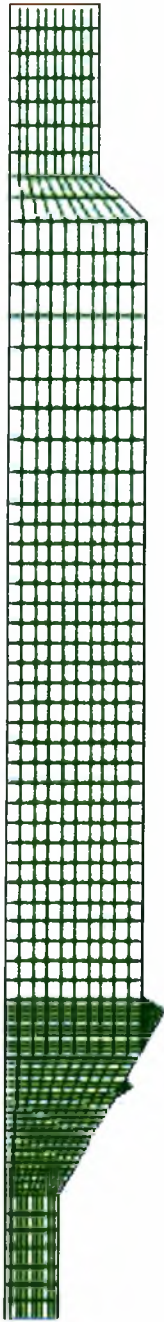
Σχήμα 4-13 Πλέγμα 2^ο είδους



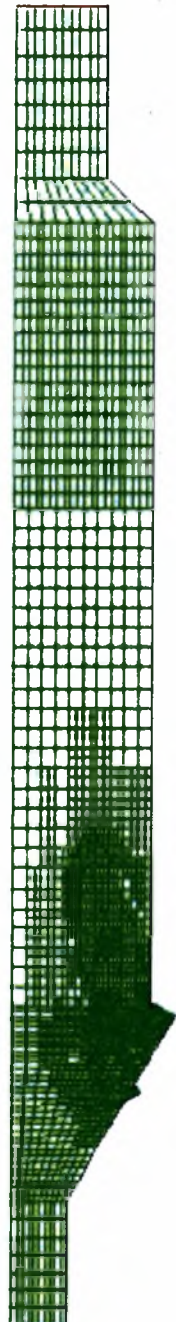
Σχήμα 4-14 Λεπτομέρεια 2^ο πλέγματος

Το τρίτο είδος διδιάστατου πλέγματος, ήταν ένα πυκνότερο πλέγμα που απεικόνιζε το μισό υπολογιστικό πεδίο, λόγω της συμμετρίας στην απλοποιημένη γεωμετρία των δύο διαστάσεων. Στο συγκεκριμένο πλέγμα, έγινε η επίλυση του πεδίου ταχυτήτων, της εξίσωσης ενέργειας, καύσης κάρβουνου, ασβεστοποίησης και ακτινοβολίας της συνεχούς και διακριτής φάσης. Το πλέγμα δημιουργήθηκε από τα πρότυπα Mar και Submar, όπως ακριβώς στην δεύτερη περίπτωση, με παρόμοια εφαρμογή των προτύπων στις αντίστοιχες περιοχές του υπολογιστικού πεδίου. Στα Σχήματα 4-15 και 4-16 παρουσιάζεται το πλέγμα της τρίτης περίπτωσης

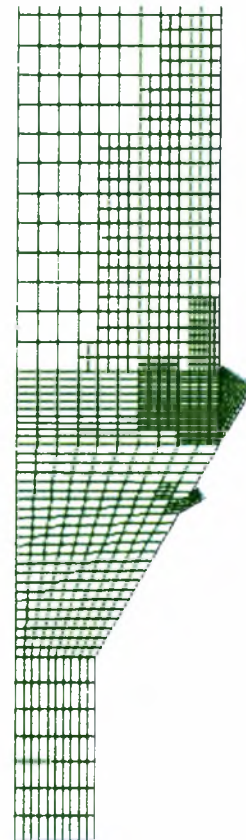
στην αρχή της εκτέλεσης και στο τέλος της εκτέλεσης, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί από τις συνεχείς σταδιακές προσαρμογές του πλέγματος. Στο Σχήμα 4-17 απεικονίζεται σε λεπτομέρεια το πλέγμα της τρίτης περίπτωσης στο ενδιάμεσο της εκτέλεσης.



Σχήμα 4-15 Τρίτο είδος Πλέγματος (973 κελιά)



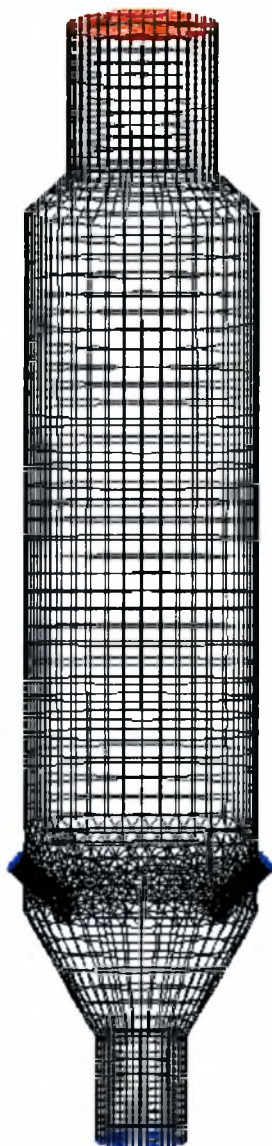
Σχήμα 4-16 Προσαρμοσμένο πλέγμα (5071 κελιά)



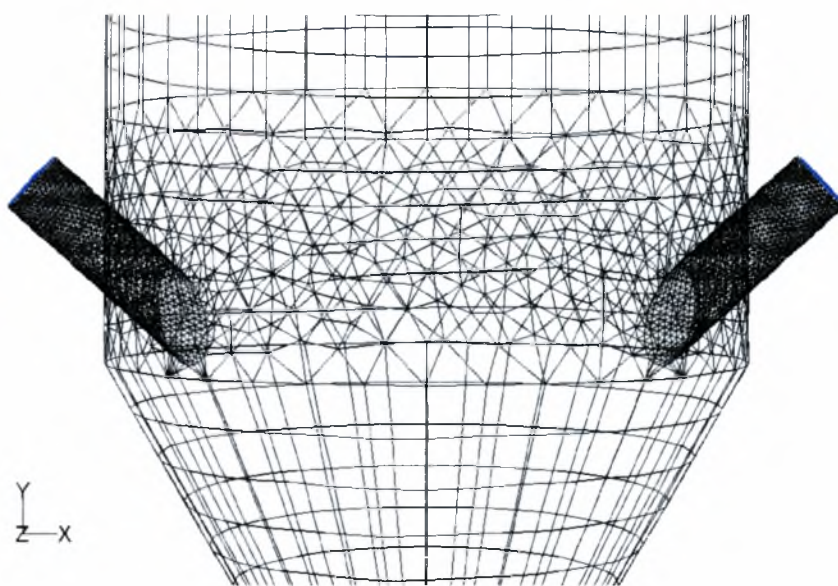
Σχήμα 4-17 Λεπτομέρεια 3^{ου} πλέγματος

Το επόμενο στάδιο κατά την εξέλιξη της παρούσας εργασίας ήταν η αντιμετώπιση της προσομοίωσης σε τρεις διαστάσεις. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μια σειρά από τρισδιάστατα πλέγματα που σε κάθε φάση ικανοποιούσαν τις ανάγκες της ροής, καθώς σε αυτή προσθέτονταν σταδιακά μοντέλα, όπως αρχικά, η αδρανής διακριτική φάση, στην συνέχεια η καύση και η ασβεστοποίηση και τέλος η ακτινοβολία της διακριτής φάσης. Τα πλέγματα που κατασκευάστηκαν, λήφθηκαν με τρόπο που περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου, για την επίτευξη γεωμετρικής συμβατότητας. Παράλληλα, με αυτά τα πλέγματα κατασκευάστηκαν και πλέγματα, που η γεωμετρία τους δημιουργήθηκε στον προεπεξεργαστή γεωμετρίας Gambit, για να παρακολουθηθεί ενδεχόμενη προβληματική συμπεριφορά του προεπεξεργαστή κατά την εφαρμογή πρότυπων σχημάτων πλέξης. Τα πλέγματα τριών διαστάσεων που δημιουργήθηκαν ουσιαστικά κατατάσσονται σε τρεις ομάδες. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα πλέγμα-

τα που δημιουργήθηκαν για να ελεγχθεί η συμπεριφορά της αέριας φάσης και των αδρανών σωματιδίων, όπου δεν λήφθηκαν υπόψη οι εισοδοί του κάρβουνου, καθώς δεν μελετήθηκε η χημική παρά μόνο η ρευστοδυναμική συμπεριφορά. Το συγκεκριμένο πλέγμα αποτελεί την σύνθεση (6) όγκων, όπου ανά περίπτωση έχει εφαρμοστεί διαφορετικό πρότυπο σχήμα πλέγματος. Ο πρώτος όγκος αποτελείται από την κάτω είσοδο και την κάτω κωνική διαμόρφωση, και το σχήμα πλέγματός του εφαρμόστηκε είναι το σχήμα Cooper. Ο δεύτερος όγκος περιλαμβάνεται από τις εισόδους της φαρίνας την κάτω κωνική δια-

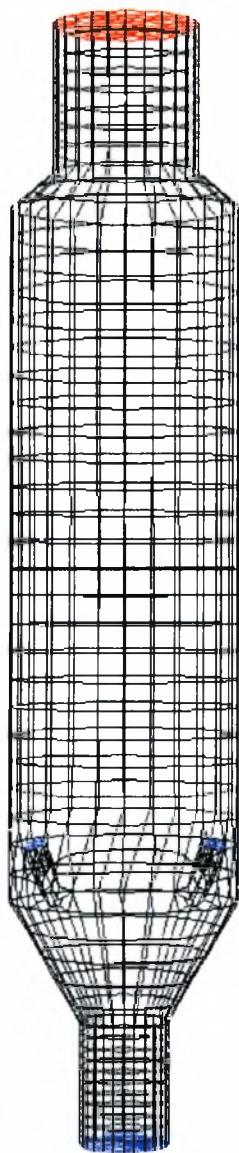


Σχήμα 4-19 Πλέγμα 1^{ης} περίπτωσης σε γεωμετρία Gambit

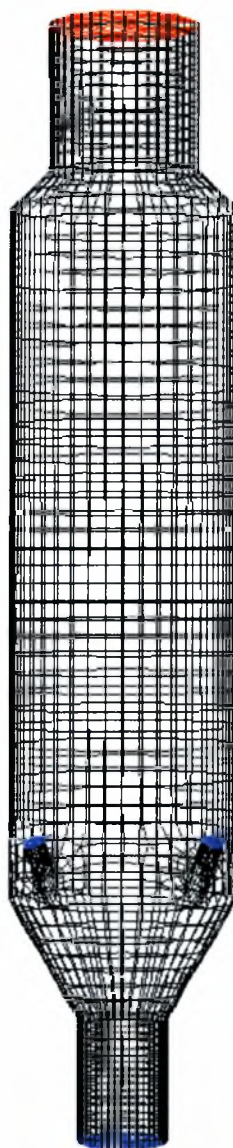


Σχήμα 4-18 Λεπτομέρεια της ένωσης των εισόδων φαρίνας στον κύριο κορμό της διάταξης

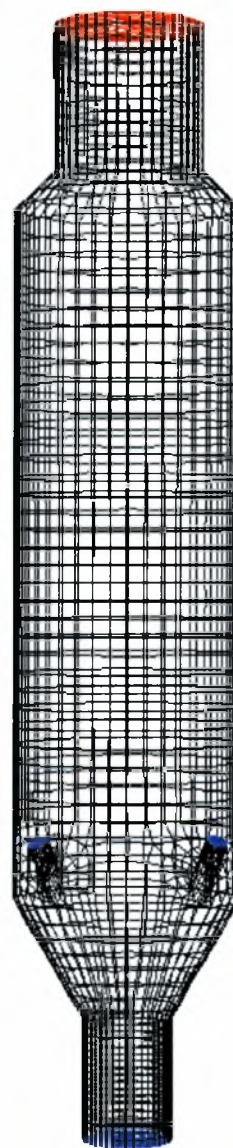
μόρφωση και το άνω μέρος του κυλινδρικού κορμού. Το σχήμα πλέγματος που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο όγκο είναι το Tgrid/Hybrid. Στο άνω μέρος του κυλινδρικού κορμού, στην άνω κωνική διάταξη και στον απαγωγό των αερίων το πλέγμα προκύπτει από την εφαρμογή του σχήματος Cooper. Το πλέγμα των δύο αγωγών της φαρίνας δημιουργείται από το σχήμα πλέξης TGrid/Hybrid. Το συγκεκριμένο πλέγμα σημειώνεται ότι δεν αποτελεί γεωμετρία που έχει εισαχθεί από το Autocad R14, αλλά έχει δημιουργηθεί στον Gambit, και παρουσιάζεται για να τονιστεί η διαφορά στην τοπολογία και στην σύνδεση των σωλήνων προσαγωγής της φαρίνας από την κατασκευή της γεωμετρίας στον προεπεξεργαστή Gambit και να επισημανθεί η αναγκαιότητα της δημιουργίας της στο σχεδιαστικό πακέτο Autocad R14. Στην πρώτη περίπτωση τρισδιάστατων πλεγμάτων ανήκουν και τα παρακάτω πλέγματα.



Σχήμα 4-20 Πλέγμα 1^{ης} περίπτωσης
(4784 κελιά)

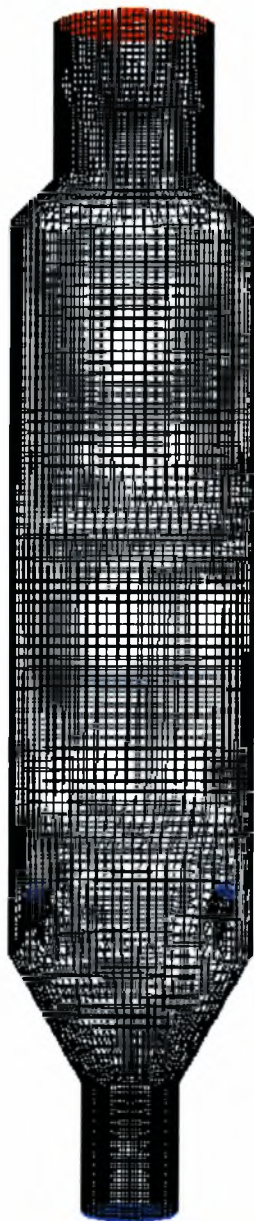


Σχήμα 4-21 Πλέγμα 1^{ης} περι-
πτωσης (23141 κελιά)

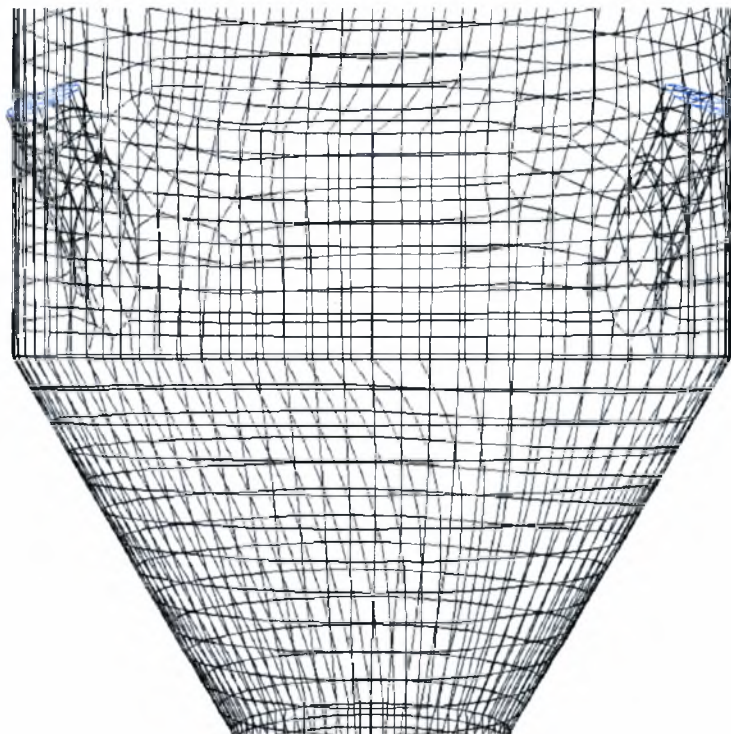


Σχήμα 4-22 Πλέγμα 1^{ης}
περίπτωσης (47003 κελιά)

Τα πλέγματα που εικονίζονται στα Σχήματα 4-20 έως 4-22 είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν τελικά στις προσομοιώσεις της πρώτης φάσης. Η διαφοροποίηση τους συνίσταται στη διαφορετική γεωμετρία των συνδέσεων των σωλήνων προσαγωγής της φαρίνας, στο πρότυπο σχήμα πλέγματος, που πλέον παράγεται από το σχήμα Cooper και στο σχήμα πλέγματος του κεντρικού συνδετικού όγκου που δημιουργείται από το πρότυπο TGrid/Quad. Η χρήση των πλεγμάτων αυτών, έγινε σταδιακά ξεκινώντας με αραιότερο πλέγμα και στη συνέχεια εφαρμόζοντας μεθόδους παρεμβολής, γίνονταν μεταβίβαση στο αμέσως επόμενο. Όταν η συνάρτηση προσαρμογής ελάμβανε αρκετά υψηλές τιμές (πχ. >150) τότε ικανοποιούνταν το κριτήριο μεταβίβασης σε πυκνότερο πλέγμα. Το τελικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη φάση παριστάνεται στα παρακάτω σχήματα.



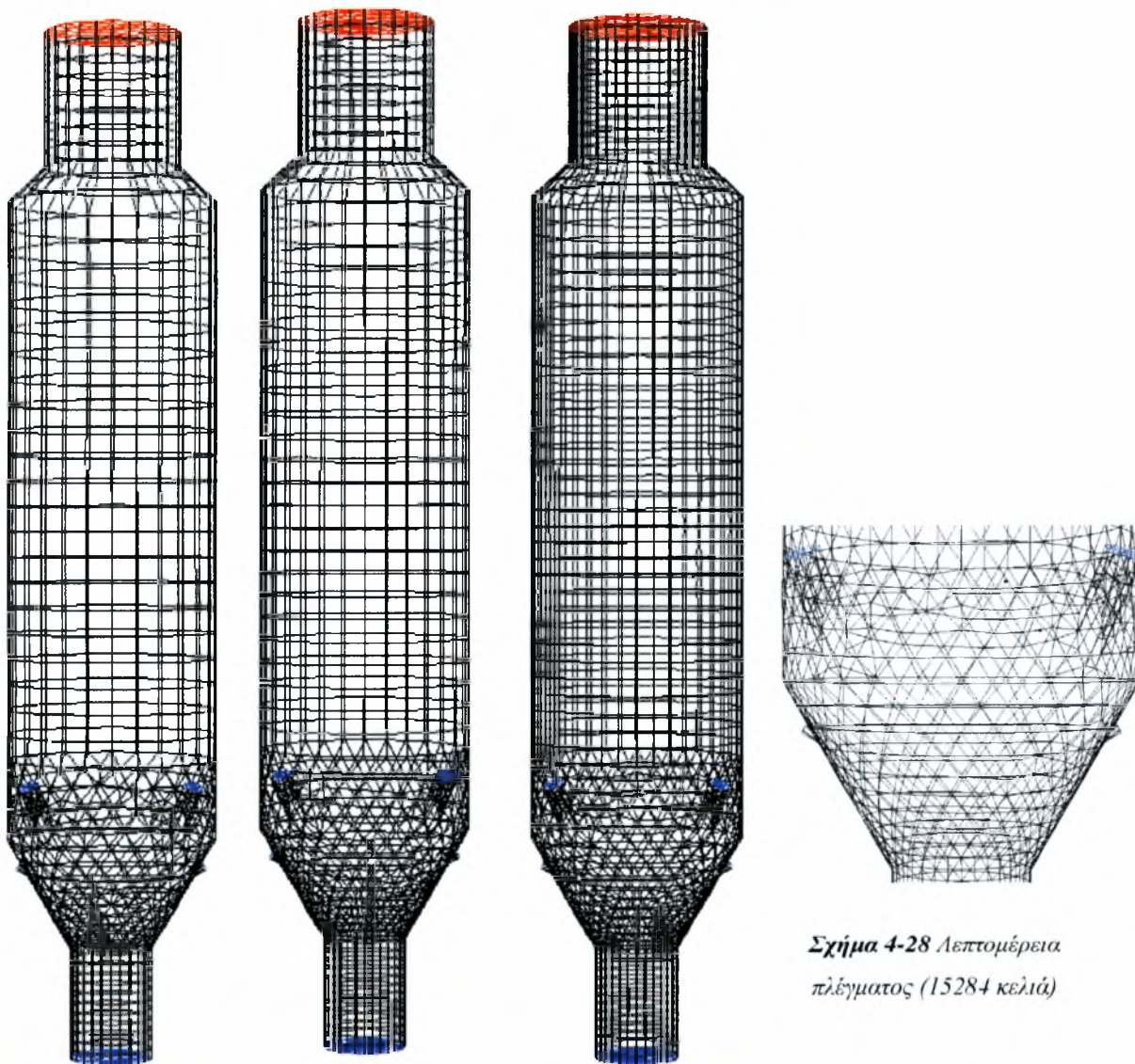
Σχήμα 4-24 Πλέγμα 1^{ης} περίπτωσης (69189 κελιά)



Σχήμα 4-23 Λεπτομέρεια πλέγματος

Στην δεύτερη φάση της ανάπτυξης του τρισδιάστατου μοντέλου, δημιουργήθηκαν τα πλέγματα που αποτέλεσαν την τελική γεωμετρία του μοντέλου. Συγκεκριμένα, προστέθηκαν και οι εισοδοί του κάρβουνου, στο μέσο ύψος του χαμηλότερου κώνου, και λόγω αυτής της διαφοροποίησης, τροποποιήθηκε το πρότυπο σχήμα πλέγματος του κάτω κώνου και ο αριθμός των όγκων. Ο κάτω κώνος διαχωρίστηκε από την είσοδο του τριτογενούς αέρα, που πλέον αποτελούσε αυτόνομο όγκο. Το πρότυπο σχήμα πλέγματος που εφαρμόστηκε, στο

αγωγό εισόδου και εξόδου του τριτογενούς αέρα και των καυσαερίων αντίστοιχα, στον άνω κυλινδρικό όγκο της διάταξης, και στις εισόδους της φαρίνας και του κάρβουνου, ήταν το σχήμα Cooper. Στους δύο ενδιάμεσους κεντρικούς όγκους εφαρμόστηκε το πρότυπο σχήμα πλέγματος TGrid /Hybrid. Στα Σχήματα 4-25 έως 4-28 εικονίζονται (από το αραιότερο προς το πυκνότερο) τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην φάση αυτή, όπου είχαν ενεργοποιηθεί όλα τα μοντέλα προσομοίωσης, ενώ στο Σχήμα 4-28 δίνονται λεπτομέρειες.



Σχήμα 4-25 Πλέγμα 2^{ης} περίπτωσης (7455 κελιά)

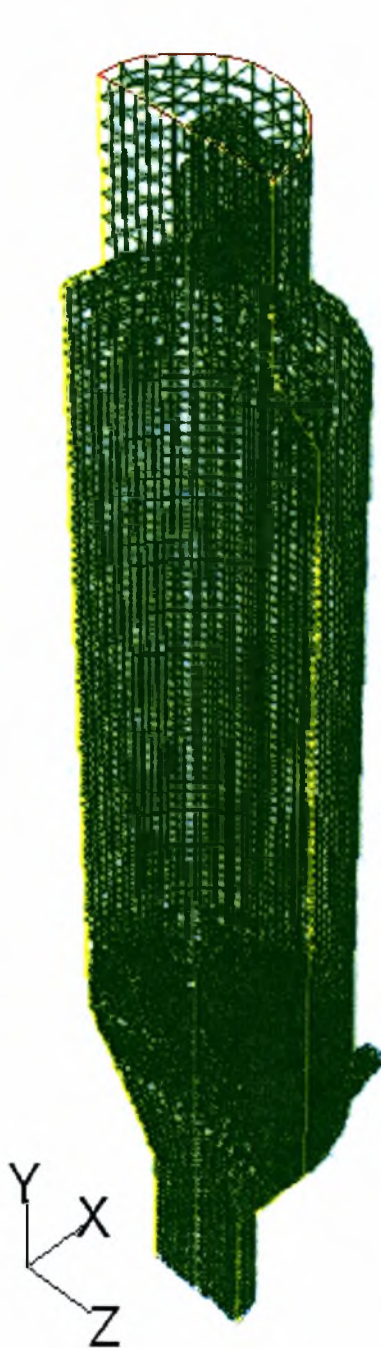
Σχήμα 4-26 Πλέγμα 2^{ης} περίπτωσης (10529 κελιά)

Σχήμα 4-27 Πλέγμα 2^{ης} περίπτωσης (15284 κελιά)

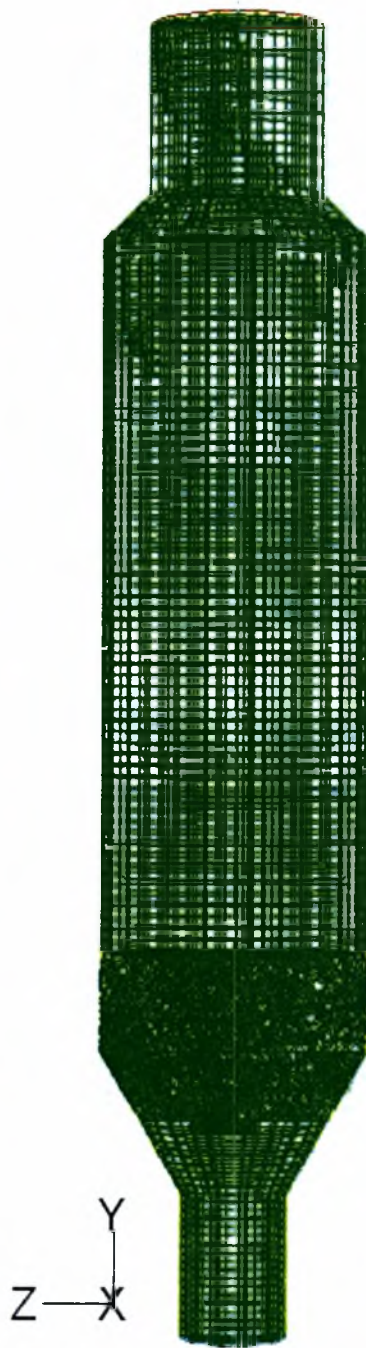
Σχήμα 4-28 Λεπτομέρεια πλέγματος (15284 κελιά)

Η επίλυση όλων των εξισώσεων στα παραπάνω πλέγματα, κατέστησε την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης ιδιαίτερα χρονοβόρα, διότι εκτός από την ενεργοποίηση όλων των εξισώσεων, έπρεπε συγχρόνως να υπολογιστούν οι τροχιές και οι αντίστοιχοι όροι πηγής για τα

πεδία συγκεντρώσεων και θερμοκρασίας με την παρουσία της ακτινοβολίας. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, δημιουργήθηκαν νέα πλέγματα (Σχήματα 4-29 έως 4-31) που αντιστοιχούσαν στο μισό υπολογιστικό πεδίο, κάνοντας χρήση της συμμετρίας του ασβεστοποιητή. Η λύση του μισού υπολογιστικού πεδίου δεν είχε επιλεγεί αρχικώς λόγω των διαφορετικών ογκομετρικών παροχών του αέρα προσαγωγής του κάρβουνου. Η εφαρμογή της συμμετρίας έκανε αναγκαστική την χρησιμοποίηση της μέσης τιμής για τα συγκεκριμένα δεδομένα.



Σχήμα 4-29 Πλέγμα 3^{ης} περίπτωσης (29583 κελιά-μισό υπολογιστικό πεδίο)

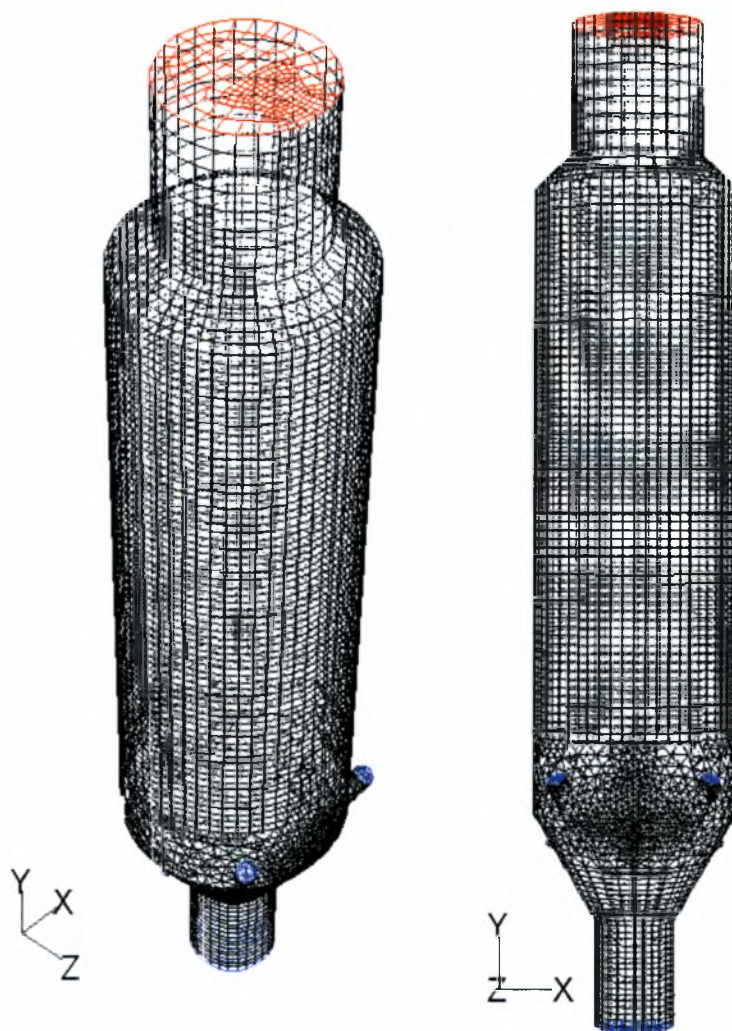


Σχήμα 4-30 Κύρια όψη πλέγματος



Σχήμα 4-31 Τρισδιάστατη άποψη ολόκληρου του υπολογιστικού πεδίου

Στο συγκεκριμένο υπολογιστικό πλέγμα, έγιναν όλες οι τελικές εκτελέσεις, κάνοντας χρήση και εφαρμογή όλων τεχνικών αλλά και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τα πλέγματα, που χρησιμοποιήθηκαν στα προηγούμενα στάδια. Κατά την διάρκεια των εκτελέσεων, το πλέγμα λόγω των σταδιακών προσαρμογών (Grid Adaptation), μεγάλωσε σε αριθμό κελιών. Η τελική μορφή του πλέγματος, φαίνεται στο Σχήμα 4-32, εμφανίζοντας και το αντεστραμμένο είδωλο του μισού υπολογιστικού πεδίου (το ίδιο εικονίζεται και στα Σχήματα 4-30 και 4-31).

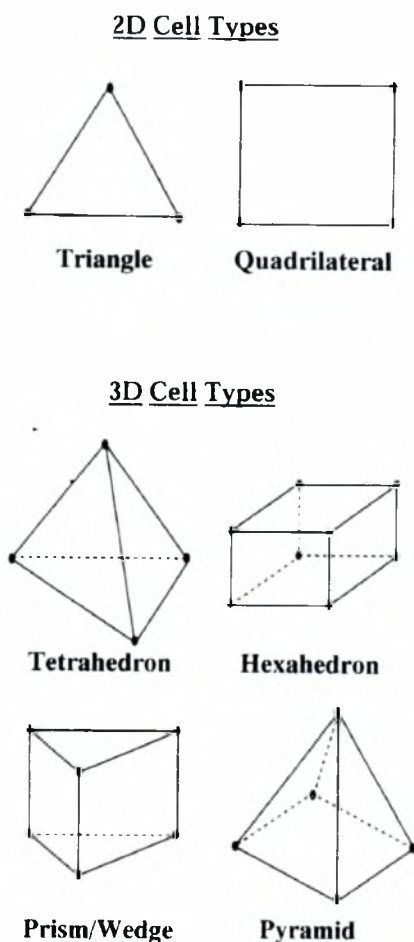


Σχήμα 4-31 Προοπτική άποψη και κύρια όψη πλέγματος (33552 κελιά-Μισό υπολογιστικό πεδίο)

Η κατασκευή των παραπάνω πλεγμάτων βασίστηκε στα πλέγματα που δημιουργήθηκαν στην δεύτερη φάση παρουσιάζοντας, μερικές τροποποιήσεις που αφορούσαν την κάτω κωνική διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, ο όγκος του κάτω κώνου χωρίστηκε σε δύο τμήματα, όπου στο άνω μέρος εφαρμόστηκε μη δομημένο πλέγμα με κελιά τύπου Quad/Tri. Το κάτω τμήμα συνδέθηκε με τον κύλινδρο προσαγωγής και το πλέγμα δημιουργήθηκε από το σχήμα Coo-

per. Επίσης, με το ίδιο σχήμα έγινε το πλέγμα και των υπολοίπων όγκων εκτός του κεντρικού όγκου, όπου εφαρμόστηκε το ίδιο πλέγμα με το άνω τμήμα του κώνου, αφού πρώτα προηγήθηκε η σύνδεση τους.

Στο Σχήμα 4-32, παρουσιάζονται οι τύποι των κελιών που δύναται να εμφανιστούν στα πρότυπα σχήματα πλέγματος, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των παραπάνω πλεγμάτων. Η επιλογή του σχήματος των κελιών καθορίζεται από την γεωμετρία του όγκου μοντελοποίησης, από τον αλγόριθμο πλέξης που επιλέγεται, από την πυκνότητα των κελιών σε μία συγκεκριμένη υποπεριοχή, από τον αδιάστατο αριθμό CFL¹ και τέλος από την έκδοση του επίλυτη (solver) και από το σχήμα διακριτοποίησης.



Σχήμα 4-32 Τύποι και είδη κελιών για την κατασκευή πλεγμάτων

¹ Αριθμός CFL (Courant-Friedrich-Lewy Number). Για διακριτοποιημένα προβλήματα μεταφοράς, ο αριθμός CFL καθορίζει πόσα κελιά, διανύει (περνάει) ένα στοιχείο ρευστού κατά την διάρκεια ενός χρονικού βήματος ή αντίστοιχα το κλάσμα χρόνου που απαιτείται για περάσει από ένα κελί. Για ρητά σχήματα, όπως το Runge-Kutta, ο αριθμός CFL πρέπει να είναι μικρότερος από το όριο ευστάθειας για επιτευχθεί σύγκλιση. Για πεπλεγμένα και ημι-πεπλεγμένα σχήματα ο αριθμός CFL δεν συνιστά όριο ευστάθειας της λύσης, αλλά το εύρος των παραμέτρων εντός των οποίων αυτά τα σχήματα συγκλίνουν χαρακτηρίζονται συχνά από τον αριθμό CFL

4.2 Χαρακτηριστικά ασβεστοποιητή της ΑΓΕΤ

Ο ασβεστοποιητής λειτουργεί ουσιαστικά ως ένας πρόσθετος κυκλώνας μέσα στην συστοιχία των ανακομιστών, όπου εισάγεται η προθερμασμένη πρώτη ύλη (CaCO_3), το καύσιμο (κάρβουνο) και ο θερμός τριτογενής αέρας. Η ενέργεια που παράγεται από την καύση προκαλεί την ασβεστοποίηση της φαρίνας, δηλαδή την διάσπαση του CaCO_3 σε CaO και CO_2 σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{1160\text{K}} \text{CaO} + \text{CO}_2 + 178\text{kJ/mol}$ [46-52]

Ο υψηλός διαμερισμός των υλικών και η καλή ανάμιξη που προκύπτει από το τυρβώδες ρεύμα του θερμού αέρα προκαλούν ομοιόμορφες και γρήγορες αντιδράσεις καύσης και ασβεστοποίησης. Τα προϊόντα αυτής της διεργασίας οδηγούνται, μέσω του ρεύματος απαερίων, από τον ασβεστοποιητή στον τελευταίο κυκλώνα τροφοδοσίας του ΠΚ.

Ο ασβεστοποιητής ουσιαστικά είναι ένας ξεχωριστός θάλαμος καύσης που λειτουργεί χρησιμοποιώντας περίπου το 60% της συνολικής ποσότητας καυσίμου, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις του καυστήρα του περιστροφικού κλιβάνου στο 40%, σε σύγκριση με το απλό σύστημα με ανακομιστές. Η αναλογία 60:40 αντιστρέφεται στην περίπτωση που εισάγεται ο αέρας καύσης απευθείας από τον περιστροφικό κλίβανο. Αυτή η μετατόπιση της θέσης καύσης προσφέρει πολύ καλά αποτελέσματα λόγω του ότι η ενδόθερμη διεργασία της ασβεστοποίησης απορροφά περίπου το 60% της συνολικής προσδιδόμενης ενέργειας, ενώ το 35% δαπανάται στην διαδικασία προθέρμανσης και το 5% αποδίδεται κατά την διεργασία κλινκεροποίησης [12].

Για την απλούστερη κατανόηση του ρόλου του ασβεστοποιητή στην διεργασία έψησης, αρκεί η παραπάνω διάταξη να θεωρηθεί σαν απλό σύστημα βραστήρα νερού. Για να εξατμιστεί το νερό πρέπει να δεχθεί ενέργεια ίση με την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, έτσι κατά παρόμοιο τρόπο πρέπει να προσφερθεί η θερμότητα της ενδόθερμης αντίδρασης ασβεστοποίησης. Η διαδικασία εξάτμισης προχωρά αργά όταν το νερό βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο, ενώ όταν σταγόνες νερού ψεκάζονται σε ρεύμα θερμού αέρος, επιταχύνεται η παραγωγή υδρατμών σε αρκετά μικρό όγκο. Η διαφορά του ρυθμού εξάτμισης του νερού μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων είναι εξαιρετικά μεγάλη. [1]

Η φαρίνα αποκτά, μόλις εισέλθει στον ασβεστοποιητή, την θερμοκρασία των αερίων, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των κόκκων της, αλλά και του υψηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της. Επιπλέον, η καύση του λεπτόκοκκου κάρβουνου γίνεται σχεδόν ακαριαία. Μέσα στον ασβεστοποιητή η καλή ανάμιξη του καυσίμου και του αέρα αλλά και της φαρίνας έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη έκβαση της ασβεστοποίησης με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία.

4.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ασβεστοποιητή

Τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης των διατάξεων ασβεστοποίησης είναι ουσιαστικά και πολλαπλά, έτσι ώστε να έχει καθιερωθεί ως απαραίτητη διάταξη της διεργασίας έψησης. Μερικά από αυτά συνοψίζονται παρακάτω: [11,12]

1. Η εισαγωγή καυστήρα στον ασβεστοποιητή, διπλασιάζει την μέγιστη δυναμικότητα του περιστροφικού κλιβάνου σε σχέση με το απλό σύστημα ανακομιστών.
2. Η μείωση του θερμικού φορτίου και η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας του κλιβάνου (για να επιτευχθεί καλύτερη ανάμιξη των υλικών λόγω αυξημένης δυναμικότητας) διπλασιάζει τον χρόνο ζωής της εσωτερικής επένδυσης (πυρότουβλα) του ΠΚ. Επίσης, έχει υπολογιστεί ότι η διάρκεια ζωής των πυρότουβλων τετραπλασιάζεται, παρά το γεγονός ότι διπλασιάζεται το φορτίο του ΠΚ.
3. Η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της εσωτερικής επένδυσης, αυξάνει τον χρόνο λειτουργίας του περιστροφικού κλιβάνου κατά 90%, διότι δεν απαιτούνται συχνές διακοπές λειτουργίας για συντήρηση. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος συντήρησης και μεγαλύτερη χρονική διάρκεια απόσβεσης.
4. Η μείωση της προσδιδόμενης ενέργειας και η εξ αντικειμένου απουσία της ασβεστοποίησης μέσα στον ΠΚ συντελεί στην ελάττωση του όγκου των καυσαερίων κατά το 1/3. Παράλληλα, μειώνονται σημαντικά και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον λόγω της υψηλής απορρόφησης ακτινοβολούσας ενέργειας των καυσαερίων.
5. Η καύση του 60% του συνολικού καυσίμου στον ασβεστοποιητή, σε μέσες χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 1400°C) μειώνει δραστικά την παραγωγή NO_x, που θα σχηματιζόνταν στον καυστήρα του κλιβάνου.
6. Οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις του ασβεστοποιητή επιτρέπουν την χρησιμοποίηση καυσίμων με σχετικά χαμηλή θερμογόνο δύναμη. Συνήθως, σε αντίστοιχες διατάξεις ασβεστοποίησης, η τροφοδοσία του καυσίμου αποτελείται από κάρβουνο πισσούχου άνθρακα.
7. Η ελάττωση του θερμικού φορτίου του κλιβάνου μειώνει κατά 50% την εναπόθεση των συμυκνούμενων ατμών SO₃, Na, K και Cl, στην ζώνη καύσης.
8. Η μετατόπιση της θέσης του μεγαλύτερου ποσοστού της ασβεστοποίησης από τον ΠΚ στον ασβεστοποιητή, μειώνει τις θερμικές απαιτήσεις και βελτιώνει την λειτουργική σταθερότητα του ΠΚ. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί ο καυστήρας του κλιβάνου χρησιμοποιείται μόνο για την κλινκεροποίηση, γεγονός που εξασφαλίζει σταθερότερες συνθήκες λειτουργίας για τον ΠΚ.
9. Η θερμική απόδοση των διατάξεων έψησης με ασβεστοποιητή είναι στην χειρότερη περίπτωση ίση με αυτή του απλού συστήματος με ανακομιστές.

Η λειτουργία του ασβεστοποιητή δεν εξασφαλίζει μόνο πλεονεκτήματα, καθώς σημειώνονται διάφορα προβλήματα κατά την λειτουργία του. Τα μειονεκτήματα αυτά, που όμως δεν μειώνουν την αποδοτικότητα της διάταξης. Μερικά από αυτά καταγράφονται παρακάτω:

- 1. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες των απαερίων στην έξοδο μπορεί να προκαλέσουν συμπύκνωση των πτητικών αλκαλίων στους απαγωγούς εξόδου του ΠΚ. Επίσης, η μεγαλύτερη περιστροφική ταχύτητα του κλιβάνου μπορεί να αυξήσει την ποσότητα της σκόνης μέσα στον κλίβανο*
- 2. Η μείωση των εκπομπών NO_x είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των συστημάτων με ασβεστοποιητή, δεν είναι όμως κοινή σε όλους τους τύπους ασβεστοποιητών. Αυτό οφείλεται σε γεωμετρικές και λειτουργικές διαφορές, καθώς επίσης και στην διαφορετική ποιότητα και ποσότητα των πρώτων υλών και των καυσίμων.*
- 3. Η δυνατότητα χρησιμοποίησης καυσίμου με χαμηλή ενεργειακή αξία, παρόλο που φαντάζει ως πλεονέκτημα, χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για να αποφευχθούν αφενός μεν προβλήματα ανεπιθύμητων εκπομπών ρυπογόνων αερίων, αφετέρου δε διαβρώσεις της διάταξης. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων επιβάλλεται η άμεση διενέργεια ποιοτικού ελέγχου.*

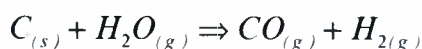
4.2.2 Καύση Κάρβουνου

Η καύση σωματιδίων κάρβουνου συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο διαρκούς βασικής έρευνας καθώς οι μηχανισμοί της καύσης δεν είναι πλήρως κατανοητοί, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα. Οι βασικές δυσκολίες κατά την σπουδή της καύσης κάρβουνου εντοπίζεται στο έλλειμμα γνώσης που υπάρχει στο ακριβή προσδιορισμό των χημικών κινητικών των αντιδράσεων αλλά και των φυσικοχημικών μηχανισμών μετατροπής του κάρβουνου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη μετρήσεων στο 'εχθρικό' περιβάλλον της ροής με χημική αντίδραση καύσης.

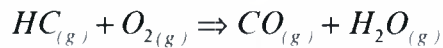
Κατά την θέρμανση του κάρβουνου, πραγματοποιούνται μια σειρά από φυσικές και χημικές μεταβολές, που εξαρτώνται κατά πρώτο λόγο από τύπο του κάρβουνου, και κατά δεύτερο από τις περιβάλλουσες συνθήκες, όπως την τοπική θερμοκρασία, τον ρυθμό θέρμανσης, την πίεση και την ποιότητα των αερίων. Επίσης, στα παραπάνω πρέπει να προστεθούν και οι παράγοντες που αναφέρονται στην αεροδυναμική κατάσταση αλλά και το μέγεθος κόκκων του κάρβουνου.

Οι πρώτες σημαντικές φυσικές και χημικές μεταβολές στο σωματίδιο του κάρβουνου είναι η θερμική διάσπαση (πυρόλυση), που πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά την φάση αυτή επέρχεται μια σημαντική απώλεια βάρους, εξ αιτίας της έκλυσης των πτητικών ουσιών (volatile matter), η ποσότητα και η σύνθεση τους των οποίων εξαρτώνται από την σύσταση του κάρβουνου, το μέγεθος των κόκκων του και τη θερμοκρασία καύσης. Κατά την έκλυση των πτητικών συμβαίνουν μια σειρά παράλληλες αντιδράσεις, με αντιδρώντα συστατικά χημικές ενώσεις ή και στοιχεία όπως το CH_4 , CHOH , C_2H_6 , H_2 , S_2 και άλλες ενώσεις βασικών στοιχείων. Μετά την έκλυση των πτητικών που οδηγούν στην παραγωγή H_2O , CO , CO_2 κλπ, ακολουθούν μια σειρά από σταδιακές αντιδράσεις με αντιδρώντα συστατικά το στερεό υπόλειμμα των κόκκων των σωματιδίων (char) και τα αέρια προϊόντα που προέκυψαν από την έκλυση των πτητικών. Οι κύριες αντιδράσεις που επισημαίνονται κατά την καύση είναι συνοπτικά οι εξής: [12,22-32]

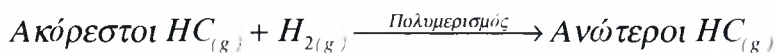
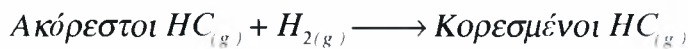
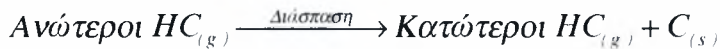
Ετερογενείς αντιδράσεις



Ομογενείς αντιδράσεις



Στις παραπάνω αντιδράσεις προστίθενται και οι αντιδράσεις διάσπασης και πολυμερισμού των ανώτερων και ακόρεστων υδρογονανθράκων:



4.2.2.1 Θερμική διάσπαση (Πυρόλυση)

Αρχικά με την αύξηση της θερμοκρασίας εκλύονται από τα σωματίδια τα εγκλεισμένα αέρια και η υγρασία. Το μεγαλύτερο ποσοστό του μη χημικά δεσμευμένου νερού εξατμίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 105°C, ενώ όταν αυτό είναι εγκλωβισμένο υπο την μορφή χημικών δεσμών εξατμίζεται ολοκληρωτικά όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 350°C. Ορισμένοι τύποι κάρβουνου, όταν βρεθούν σε περιβάλλοντα που επικρατούν θερμοκρασίες πυρόλυσεως, μαλακώνουν και σχηματίζουν ένα ενδιάμεσο προϊόν, τον μεταπλάστη (metaplast). Με την αύξηση της θερμοκρασίας ο μεταπλάστης διασπάται, σχηματίζοντας τα πρωταρχικά πτητικά προϊόντα και το ημικόκ (semicoke). Κατά την διάρκεια των παραπάνω διεργασιών τα σωματίδια του κάρβουνου υφίστανται διόγκωση, η οποία περιγράφεται από τον συντελεστή διόγκωσης (swelling factor) και εξαρτάται από το ποσοστό και την σύνθεση των πτητικών ουσιών και από τον ρυθμό θέρμανσης. Η αύξηση του όγκου του σωματιδίου δεν επηρεάζει την διεργασία πυρόλυσης, ενώ το ημικόκ που σχηματίζεται αρχικώς αποσυντίθενται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο ρυθμός θερμικής διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αρκετές επιστημονικές παρατηρήσεις θέλουν το πέρας της πυρόλυσης να σημειώνεται γύρω στους 850 με 1000°C, ενώ η διάρκεια της περιορίζεται σε μερικά δευτερόλεπτα ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Το στερεό υπόλειμμα των πτητικών συστατικών είναι το ο στερεός άνθρακας 'char', το οποίο συγκρατεί στην δομή του ένα μικρό ποσοστό πτητικών (γύρω στο 1,5%) όπως H₂ και N₂, που απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας κοντά στους 2000°C για να απομακρυνθεί [24, 26, 32].

Πειράματα έχουν δείξει ότι ο προσδιορισμός του ποσοστού των πτητικών είναι απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία. Αρκετές μετρήσεις πτητικών που γίνονται κατά το πρότυπο της ASTM, παρουσιάζουν διαφορές στο ποσοστό των πτητικών ανάλογα με τον ρυθμό αύξησης και ίσως την πειραματική μέθοδο, που πολλές φορές αγγίζουν το διπλάσιο. Το στερεό υπόλειμμα που σχηματίζεται από την θερμική διάσπαση είναι σε συντριπτικό ποσοστό άνθρακας, με σημαντικό πορώδες και μεγάλη εσωτερική επιφάνεια, ενώ το ανόργανο μέρος του σωματιδίου είναι η τέφρα (στάχτη-ash). Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν την τήξη της τέφρας. Το εύρος αυτών των θερμοκρασιών κυμαίνεται μεταξύ των 1200 και 1800 °C. Η σύνθεση και η φύση της τέφρας καθώς και οι ιδιότητες της, όπως σημείο τήξης, ιξώδες κλπ, καθορίζονται σε σημαντικό βαθμό από τις συνθήκες πυρόλυσης.

Σε μερικές περιπτώσεις όπου το αέριο περιβάλλον του σωματιδίου αποτελείται κυρίως από αέρα, η πυρόλυση και η καύση του στερεού υπολείμματος γίνονται ταυτόχρονα. Κατά κανόνα όμως, η καύση του char έπεται της πυρόλυσης, εμφανίζοντας μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό χρόνου αλληλοεπικάλυψης. Σε συνήθη σωματίδια τα πτητικά τείνουν να «εκλυθούν» σε συγκεντρωμένες αλλά τυχαία κατανεμημένες δέσμες (jets) επάνω στην επιφάνεια του σωματιδίου. Οι μεγαλύτερες σε όγκο δέσμες αποβάλλουν πτητικά σε όλη την διάρκεια της θερμικής διάσπασης, ενώ η «ζωή» των μικρότερων αρχίζει και τελειώνει μέσα στον χρόνο αυτό. Όταν το αέριο περιβάλλον είναι αρκετά θερμό και πλούσιο σε οξυγόνο οι δέσμες των πτητικών θα αναφλεγούν με αποτέλεσμα να μετασχηματιστούν σε δέσμες φλόγας. Στα σχετικά μεγάλα σωματίδια, η έκλυση και η καύση των πτητικών μπορεί να κρατήσει την επιφάνεια του char καθαρή από οξυγόνο.

Όταν η επιφάνεια του θερμού char προσπελαστεί από οξυγόνο, αρχίζει η ετερογενής αντίδραση καύσης του. Η αντίδραση καύσης του char έχει μεγαλύτερη διάρκεια που ανάλογα με την εξέλιξη της αλλά και τις συνθήκες καύσης μπορεί να διαρκέσει 15~20 φορές περισσότερο από ότι η θερμική διάσπαση των πτητικών[30-38].

Ο ρυθμός θέρμανσης των σωματιδίων του κάρβουνου εξαρτάται από το μέγεθος τους και από τον τρόπο επαφής τους με την θερμική πηγή. Οι ρυθμοί θέρμανσης των κονιορτοποιημένων σωματιδίων κάρβουνου από αντίστοιχη φλόγα είναι της τάξης των 1000°C/sec, ενώ όταν η φλόγα προκύπτει από κονιορτοποιημένα σωματίδια άνθρακα ο ρυθμός αυξάνεται στους 10000°C/sec. Η πυρόλυση παράγει ένα πλήθος προϊόντων με μεγάλη διαφορά μοριακών βαρών, από αέριο υδρογόνο μέχρι βαριές οργανικές ενώσεις (tar). Το μέγεθος των δεδομένων που παρέχονται από πειραματικές μεθόδους, για την ταχεία πυρόλυση δεν είναι αρκετό για να βοηθήσει στον προσδιορισμό των κατανομών και των συνθέσεων των ενδιάμεσων προϊόντων για τα φάρμακα κάρβουνα [40, 41, 43].



4.2.2.2 Κινητική πυρόλυσης

Τα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την έκλυση και την καύση των πτητικών βασίζονται σε θεωρήσεις που λαμβάνουν υπόψη τους την αρχική σύνθεση του σωματιδίου κάρβουνου. Αρκετοί ερευνητές, υποθέτουν ότι το κάρβουνο είναι σημαντικά ομογενές, έτσι ώστε θα ήταν δυνατόν να εξεταστεί σαν μια μάζα που μεταβάλλεται θερμικά και σταδιακά από το σύνολο πτητικών-char-τέφρα σε char-τέφρα για να καταλήξει σε τέφρα. Κατά την πυρόλυση του κάρβουνου, οι δυνατότητες παρακολούθησης της κινητικής έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3, όπως επίσης και την καύση του στερεού υπολείμματος. Από την βιβλιογραφία και με οδηγό την δεδομένη σύσταση των τύπων κάρβουνου προτείνεται η εφαρμογή του μοντέλου πυρόλυσης όπου ο ρυθμός της επιφανειακής αντίδρασης και έκλυσης των πτητικών περιγράφεται από σχέσεις τύπου Arrhenius [Kobayashi model]:

$$R_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (4-1) \quad \text{και} \quad R_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (4-2)$$

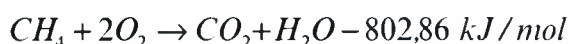
όπου $A_{1\&2}$ είναι ο προ-εκθετικοί συντελεστές (Frequency factor) $A_1=2.0e+07 \text{ s}^{-1}$, $A_2=1,3e+07$ και $E_1=1,046e+05 \text{ J/mol}$ και $E_2=1,674e+05 \text{ J/mol}$ οι ενέργειες ενεργοποίησης. Οι ρυθμοί R_1 και R_2 ελέγχουν την 'αποπτητικοποίηση' του κάρβουνου σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο συνδυασμός τους δίνει μια γενική έκφραση για την εξέλιξη της πυρόλυσης, η οποία είναι:

$$\frac{m_v(t)}{m_{po} - m_{ash}} = \int_0^t (a_1 R_1 + a_2 R_2) \exp\left(\int_0^t (R_1 + R_2) dt\right) dt \quad (4-3)$$

όπου, $m_v(t)$ είναι το ποσό των πτητικών που εξατμίστηκαν μέχρι τον χρόνο t , m_{po} η αρχική μάζα σωματιδίου, a_1, a_2 συντελεστές εξατμίστησης και m_{ash} το κλάσμα τέφρας στο σωματίδιο.

Για τους συντελεστές εξατμίστησης συστήνεται στην βιβλιογραφία, ότι η τιμή του a_1 (αργή αντίδραση) πρέπει να είναι ίση με το κλάσμα των πτητικών που προσδιορίζεται από την άμεση ανάλυση του, και η αντίστοιχη του a_2 ίση με 1.0 (γρήγορη αντίδραση). [9, 40]

Όπως προκύπτει και από πίνακες με απόλυτες αναλύσεις κάρβουνου και πέτρωκ, τα κύρια συστατικά των πτητικών ουσιών είναι CO , CH_4 , H_2O , H_2 . Με δεδομένο ότι η ατμόσφαιρα μέσα στον ασβεστοποιητή είναι οξειδωτική και με βασική παραδοχή ότι όλα τα παραπάνω συστατικά αντιδρούν με το οξυγόνο, οι μείζονες αντιδράσεις που κατά κύριο λόγο λαμβάνουν χώρα είναι:



4.2.2.3 Κινητική καύσης Char

Ο μηχανισμός της καύσης του Char, έχει διερευνηθεί κατά κύριο λόγο περισσότερο από την πυρόλυση, χωρίς βέβαια να έχουν απαντηθεί ορισμένα βασικά προβλήματα που αφορούν την ποσοτική προέλευση ορισμένων συστατικών μετά την πλήρη μετατροπή. Ποιοτικά, όμως η διεργασία έχει προσεγγιστεί αρκετά ικανοποιητικά από διάφορα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν την καύση στερεού άνθρακα αλλά βρίσκουν σημαντική εφαρμογή και σε αντιδράσεις οποιουδήποτε πορώδους στερεού με αέρια.

Υπάρχουν δύο βασικά απλά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την αντίδραση του κόκκου άνθρακα με το οξυγόνο. Το πρώτο είναι γνωστό ως μοντέλο του απλού φιλμ και το δεύτερο του διπλού φιλμ. Στο πρώτο μοντέλο, το οξυγόνο διαχέεται μέσω ενός σταθερού οριακού στρώματος στην επιφάνεια του σωματιδίου char, όπου αντιδρά για να σχηματίσει CO και CO₂. Το CO διαχέεται μέσα στο καλά αναμεμιγμένο περιβάλλον. Στο δεύτερο μοντέλο, το char αντιδρά με το CO₂, και όχι με το οξυγόνο, για να παράγει CO, που καίγεται σε ένα λεπτό μέτωπο φλόγας εντός του οριακού στρώματος. Το CO αντιδρά με το οξυγόνο εντός του οριακού στρώματος, και έτσι το οξυγόνο δεν πλησιάζει ποτέ την επιφάνεια του char. Με βάση τα παραπάνω, τα μικρά σωματίδια (<100μm) θεωρείται ότι καίγονται σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο και τα μεγαλύτερα (μέχρι >2mm) με το δεύτερο. Όμως, και τα δύο μοντέλα δεν αποτελούν παρά μόνο δύο ακραίες περιπτώσεις της καύσης char και κατά συνέπεια δεν μπορούν να εδραιώσουν μια γενική θεωρία [38-45].

Ο πραγματικός μηχανισμός της καύσης είναι περισσότερο πολύπλοκος, εξαιτίας πολλών και βασικών παραγόντων όπως το μέγεθος του σωματιδίου, η τοπική θερμοκρασία, η τοπική συγκέντρωση οξυγόνο και ο μηχανισμός ελέγχου της αντίδρασης. Γενικά, το οξυγόνο και το CO είναι σχετικά προσβάσιμα στην επιφάνεια του στερεού άνθρακα, οπότε μπορούν να αντιδράσουν συγχρόνως με το κάρβουνο αλλά και μεταξύ τους. Η κατάσταση εντείνεται ποιοτικά όταν ληφθεί υπόψη και το πορώδες που παρουσιάζει το char.

Η παραπάνω περίπτωση περιγράφεται από ένα πιο σύνθετο μοντέλο που προτάθηκε από τον Essenhigh, όπου οι κατανομές της θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων εκτείνονται ως το κέντρο του σωματιδίου. Σε συνθήκες ελέγχου της καύσης μέσω αμιγούς διάχυσης (που είναι και το συνηθέστερο), η καύση το CO μπορεί να είναι αρκετά γρήγορη ώστε να καταναλώνει όλη την τοπική ποσότητα οξυγόνου πριν φτάσει στην επιφάνεια του char, που αντιδρά μόνο με το CO₂. Σε συνθήκες έλεγχου της αντίδρασης από την χημική κινητική, το CO₂ και το O₂ διατηρούν ίσες πιθανότητες να αντιδράσουν με την επιφάνεια του char. Εξάλλου, πειραματικά δεδομένα των Field και Borghi έδειξαν ότι η αντίδραση char-CO₂ είναι πολύ αργή συγκρινόμενη με τη αντίδραση char-O₂, οπότε η τελευταία αντίδραση μπορεί να αναδειχθεί

και σε κύρια αντίδραση επάνω στην επιφάνεια του char όταν υφίσταται η απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου. Επειδή, όμως δεν μπορεί να αγνοηθούν οι τοπικές συγκεντρώσεις CO₂ υπάρχει η πιθανότητα παράλληλων αντιδράσεων [35, 36, 38, 40, 41].

Με βάση τα δεδομένα από την διεθνή βιβλιογραφία και με οδηγό την σύσταση και την κοκκομετρία των σωματιδίων (που για την περίπτωση του char, παρουσίασαν μέση διάμετρο πολύ μικρότερη των 100 μm), επιλέχθηκε ως μαθηματικό μοντέλο περιγραφής το μοντέλο περιορισμένου ρυθμού διάχυσης. Αυτό ήταν αποτέλεσμα συγκριτικής ανάλυσης των δεδομένων της βιβλιογραφίας για καύση κάρβουνου και όχι συμπέρασμα ειδικής πειραματικής διερεύνησης. Βέβαια, τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα ήταν σε πολύ μεγάλο ποσοστό αποτελέσματα πειραμάτων. Το παρόν μοντέλο της καύσης του char που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί μία πιο σύνθετη μορφή του πρώτου και του τρίτου μοντέλου (Essenhig). Το μοντέλο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με αυτό του σμικρυνόμενου μεγέθους σωματιδίου αντιδράσαντος πυρήνα προσαρμοσμένο στην γενική θεωρία επιφανειακής ετερογενούς χημικής αντίδρασης. Ο συντελεστής διάχυσης του οξειδωτικού D_{im} στο char που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή του μοντέλου ήταν ίσος με 5×10^{-05} m/sec.

4.3 Ανάλυση σύστασης κάρβουνου

Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά τριών τύπων κάρβουνου, που χρησιμοποιούνται ως βασικά καύσιμα για την λειτουργία του ασβεστοποιητή στο εργοστάσιο 'Όλυμπος' της ΑΓΕΤ-Ηρακλής. Το κάρβουνο που χρησιμοποιείται, δεν είναι εγχώριας προέλευσης, όποτε δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί άμεσα στην παραγωγική διαδικασία, εάν δεν υποστεί κατάλληλη προετοιμασία, για λόγους που έχουν να κάνουν με την μεταφορά από τα σημεία εξόρυξης. Παρότι το κάρβουνο ακόμα και κατά την παράδοση πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές, σε κάθε στάδιο της προετοιμασίας του υφίσταται συνεχή ποιοτικό έλεγχο. Οι διεργασίες και οι διατάξεις προετοιμασίας (άμεση αφύγρανση, ξήρανση, διαμερισμός, προθέρμανση) έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.

Η σύσταση και η κατάταξη των στερεών σωματιδίων κάρβουνου, γίνεται κύρια με δύο βασικές και τυπικές αναλύσεις. Η άμεση ανάλυση (proximate analysis) παρέχει πληροφορίες για την βασική κατά βάρος σύσταση των ειδών που αποτελούν τους κόκκους του κάρβουνου, ενώ η απόλυτη (ultimate analysis) περιγράφει την κατά βάρος σύνθεση του καυσίμου στα βασικά στοιχεία C, H, O, N και S.

Ο πρώτος τύπος κάρβουνου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει την εξής σύσταση:

Πίνακας 4-9 Άμεση ανάλυση (Proximate analysis) 1^{ης} ποιότητας κάρβουνου

Συστατικά	As used (%)	Dry Basis(%)	CaCO ₃ free	Ash free
Υγρασία	1,45	0,00	0,00	-
Πτητικά	23,70	24,05	24,80	29,16
Τέφρα	14,35	14,56	15,00	-
Fix Carbon	57,50	58,35	60,20	70,84
CaCO ₃	3,00	3,04	0,00	

Στην στήλη (as used) δηλώνεται η σύσταση του καυσίμου έτσι όπως εξέρχεται από το τελευταίο σφαιρόμυλο ξήρανσης για να οδηγηθεί στους θαλάμους πνευματικής μεταφοράς και να τροφοδοτήσει είτε τον ΠΚ είτε τον ασβεστοποιητή. Στην στήλη (dry basis) δίνεται η σύσταση επί ξηρού, ενώ στις δύο τελευταίες στήλες δηλώνονται οι συστάσεις των καθαρού καυσίμου χωρίς την υγρασία και τις προσμίξεις CaCO₃, που απομένει στους μύλους διαχωρισμού, οι οποίοι συγχρόνως χρησιμοποιούνται και για το κάρβουνο. Στον Πίνακα 4-10 που ακολουθεί, παρατίθεται η απόλυτη ανάλυση για την ίδια ποιότητα κάρβουνου. Στη 1^η στήλη παρουσιάζονται τα συστατικά, στην 2^η η σύσταση εισόδου, στην 3^η η αντίστοιχη επί ξηρού, στην 4^η δίνεται η σύσταση άνευ τέφρας, υγρασίας και CaCO₃ και στην 5^η το κλάσμα mole των συστατικών της 4^{ης} στήλης.

Πίνακας 4-10 Απόλυτη ανάλυση (Ultimate analysis) 1^{ης} ποιότητας κάρβουνου

Συστατικό	(As used %)	(Dry basis %)	(Daf %)	Κλάσμα mole
Υγρασία	1,450	-	-	
C	69,040	72,255	85,038	0,5998
H	3,280	3,433	4,040	0,3420
N	1,570	1,643	1,930	0,0117
O	6,990	7,316	8,610	0,0455
S	0,310	0,324	0,382	0,0010
CaCO ₃	3,000	-	-	
Τέφρα	14,360	15,029	-	

Αντίστοιχα, για την 2^η και 3^η ποιότητα καυσίμου οι άμεσες και απόλυτες αναλύσεις έχουν ως εξής:

Πίνακας 4-11 Άμεση ανάλυση (Proximate analysis) 2^{ης} ποιότητας κάρβουνου

Συστατικά	As used (%)	Dry Basis(%)	CaCO ₃ free	Ash free
Υγρασία	1,45	0,00	0,00	-
Πτητικά	27,70	28,11	28,99	33,17
Τέφρα	12,05	12,23	12,61	-
Fix Carbon	55,80	56,62	58,40	66,83
CaCO ₃	3,00	3,04	0,00	-

Πίνακας 4-12 Απόλυτη ανάλυση (Ultimate analysis) 2^{ης} ποιότητας κάρβουνου

Συστατικό	(As used %)	(Dry basis %)	(Daf %)	Κλάσμα mole
Υγρασία	1,450	-	-	
C	69,810	73,061	83,606	0,5726
H	3,720	3,893	4,455	0,3661
N	1,470	1,538	1,761	0,0103
O	8,060	8,435	9,651	0,0496
S	0,440	0,460	0,527	0,0014
CaCO ₃	3,000	-	-	
Τέφρα	12,050	12,611	-	

Πίνακας 4-13 Άμεση ανάλυση (Proximate analysis) 3^{ης} ποιότητας κάρβουνου (πέτκωκ)

Συστατικό	As used (%)	Dry Basis(%)	CaCO ₃ free	Ash free
Υγρασία	1,45	0,00	0,00	-
Πτητικά	13,21	13,40	13,90	13,92
Τεφρά	0,14	0,14	0,15	-
Fix Carbon	81,70	82,90	85,95	86,08
CaCO ₃	3,50	3,55	0,00	-

Πίνακας 4-14 Απόλυτη ανάλυση (Ultimate analysis) 3^{ης} ποιότητας κάρβουνου (πέτκωκ)

Συστατικό	(As used %)	(Dry basis %)	(Daf %)	Κλάσμα mole
Υγρασία	1,450	-	-	
C	85,970	90,447	90,582	0,6485
H	3,721	3,915	3,920	0,3367
N	-	-	-	-
O	0,009	0,009	0,009	0,0001
S	5,210	5,481	5,489	0,0147
CaCO ₃	3,500	-	-	
Τέφρα	0,140	0,147	-	

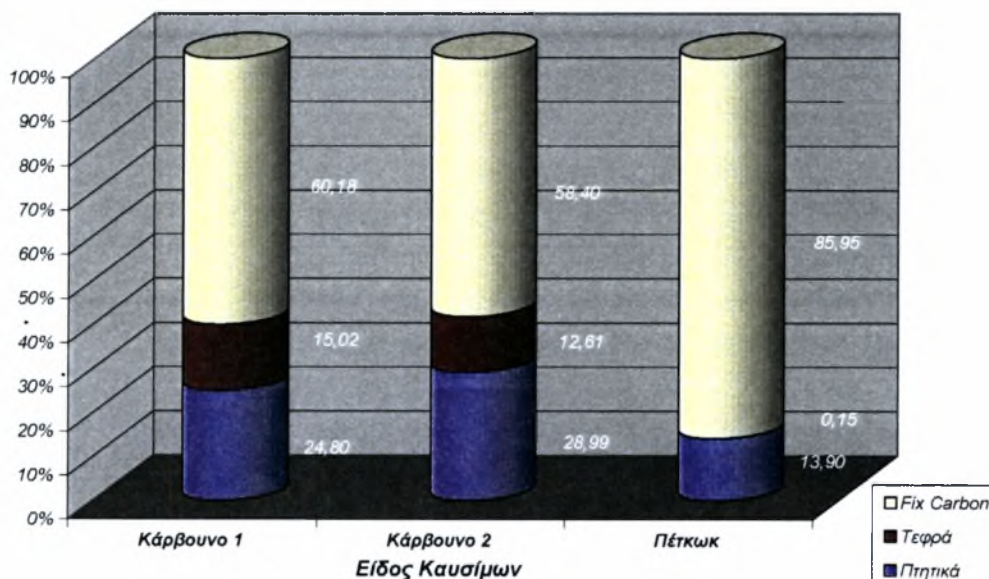
Η σύσταση των παραπάνω ποιοτήτων κάρβουνου καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ποσότητα του θεωρητικού αέρα καύσης αλλά και της απαιτήσης αέρα για την καύση. Ο υπολογισμός της απαιτήσης αέρα βασίζεται στον προσδιορισμό του θεωρητικού αέρα καύσης δεδομένης σύνθεσης καυσίμου, που προσαυξάνεται κατά το ποσοστό της περισσειας αέρος για την εξασφάλιση συνθηκών τέλει καύσης. Η ικανοποίηση αυτών των συνθηκών γίνεται με την ρύθμιση της μαζικής παροχής καυσίμου, κάτι που δεν είναι εφικτό να γίνει με την ρύθμιση της παροχής του τριτογενούς αέρα. Η αδυναμία ελέγχου οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες που δεν αφορούν την λειτουργία του ασβεστοποιητή, αλλά το σύνολο των διατάξεων της συστοιχίας των ανακομιστών προθέρμανσης. Και για τις τρεις ποιότητες καυσίμου ισχύουν οι ίδιες συνθήκες εισόδου στον θάλαμο ασβεστοποίησης, με μοναδική εξαίρεση την μαζική παροχή τους. Στον Πίνακα 4-15 παρέχονται στοιχεία για την θερμογόνο δύναμη των τριών ειδών, την θεωρητική και απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την μαζική παροχή εισόδου.

Πίνακας 4-15 Χαρακτηριστικά στοιχεία και πληροφορίες εισόδου ανάλογα με την ποιότητα καυσίμου

Χαρακτηριστικά στοιχεία	1 ^η ποιότητα	2 ^η ποιότητα	3 ^η ποιότητα (πέτρωκ)
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη [KJ/Kg]	26380	26995	32660
Ανώτερη θερμογόνος δύναμη [KJ/Kg]	27160	27880	33550
Θεωρητικός αέρας [Nm ³ /Kg coal]	6,863	7,01248	8,378
Απαιτούμενος αέρας [Nm ³ /Kg coal]	7,892	8,064352	9,634
Μαζική παραγωγή [Kg/s]	3,871	3,788966	3,171

Το ποσοστό περίσσειας αέρα που προσάγεται στην διάταξη από τα ακροφύσια εισόδου καυσίμου και την είσοδο του τριτογενούς αέρα αντιστοιχεί στο 15% του θεωρητικού αέρα.

Ποσοστιαία Σύσταση Καυσίμων



Σχήμα 4-33 Ποσοστιαία σύσταση τριών τύπων στερεού καυσίμου σε συγκριτικό διάγραμμα

4.4 Ασβεστοποίηση

Η ασβεστοποίηση των σωματιδίων ασβεστόλιθου περιλαμβάνει αρκετά στάδια, όπου το κάθε ένα από αυτά είναι ελεγχόμενο από τον ρυθμό της χημικής κινητικής. Τα στάδια αυτά είναι:

1. Μετάδοση θερμότητας από τα αέρια στην εξωτερική επιφάνεια του σωματιδίου και από την εξωτερική επιφάνεια στην διεπιφάνεια αντίδρασης.
2. Θερμική διάσπαση του $CaCO_3$ στην διεπιφάνεια αντίδρασης
3. Ροή CO_2 από την διεπιφάνεια αντίδρασης στο μίγμα αέρα-αερίων

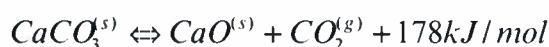
Οι εσωτερικοί και εξωτερικοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας και μάζας είναι σχετικά πολύ υψηλοί, για μικρά σωματίδια φαρίνας που διασπείρονται σε αέρια υψηλών θερμοκρασιών. Ειδικά, για σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 1 και 90 μm και θερμοκρασίες αερίων μεταξύ 748 ~ 1273K ο Borgwardt, αναφέρει ότι η ασβεστοποίηση ελέγχεται από την χημική κινητική (chemical kinetic control) και κατά συνέπεια ο ρυθμός ασβεστοποίησης είναι ανάλογος με το εμβαδόν επιφάνειας του σωματιδίου που προσδιορίζεται με την μέθοδο BET (με απορρόφηση αζώτου σε 77K). Επειδή, η μικροδομή του ασβεστόλιθου δεν είναι πλήρως κρυσταλλική και περιέχει ποικιλόμορφο πορώδες, η επιφάνεια που μετράται με την μέθοδο BET είναι το άθροισμα των επιφανειών από τα πορώδη που προσπελαύνονται από το άζωτο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η ασβεστοποίηση συμβαίνει «επάνω» στην συνολική διαθέσιμη επιφάνεια, δίνοντας στην αντίδραση ψευδό-ογκομετρικά χαρακτηριστικά.

Επίσης, από την ανάλυση των δεδομένων ασβεστοποίησης υψηλής διαμέρισης ασβεστόλιθου, που λήφθηκαν από ισοθερμικούς αντιδραστήρες, προέκυψε ότι για την καλύτερη περιγραφή της πορείας της αντίδρασης ισχύει το μοντέλο του συρικνούμενου πυρήνα, με το μέγεθος του υψωμένο στην 0.6. Η μικρή τιμή του εκθέτη (<1) εξηγείται από το γεγονός ότι η ασβεστοποίηση προχωρά ακτινικά προς το πυρήνα του σωματιδίου σε όλη την επιφάνεια του, χωρίς να υπάρχουν ανομοιογένειες στις διεπιφάνειες αντίδρασης.

Όταν τα σωματίδια της φαρίνας είναι μικρά, η διεπιφάνεια της αντίδρασης ασβεστοποίησης δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Οι εσωτερικές θερμοκρασιακές κλίσεις είναι επίσης δύσκολο να μετρηθούν, όπως και η μερική πίεση του CO_2 . Για τους λόγους αυτούς, τα περισσότερα μοντέλα ασβεστοποίησης σωματιδίων υψηλού διαμερισμού θεωρούν ότι η επιφανειακή θερμοκρασία του σωματιδίου είναι ίση με αυτή των αερίων, χωρίς την ύπαρξη εσωτερικών θερμοκρασιακών κλίσεων [52].

4.4.1 Θερμοδυναμική της Ασβεστοποίησης

Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) διασπάται κατά την θέρμανση σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σύμφωνα με την αντίδραση:



Αυτή η ετερογενής και αντιστρεπτή αντίδραση διασπάσεως είναι ιδιαίτερα ενδόθερμη. Ο θερμοδυναμικός χαρακτήρας της μπορεί να οριστεί με την βοήθεια της ενθαλπίας ΔH της αντίδρασης και της τάσης ισορροπίας $P_{\text{CO}_2,eq}$, των οποίων η σχέση εκφράζεται ως ακολούθως:

$$P_{\text{CO}_2,eq} = \exp\left[-\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}\right] \quad (4-4)$$

όπου R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (J/mol K), T η θερμοκρασία (K) και ΔS η μεταβολή της γραμμομοριακής εντροπίας (J/mol).

Τα μεγέθη αυτά είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και επηρεάζονται, μεταξύ των άλλων, από την φύση του ασβεστόλιθου, το βαθμό καθαρότητας του και κυρίως από την κατάσταση του δομικού πλέγματος του ασβεστίου, ούτως ώστε κάθε τύπος ασβεστόλιθου να έχει την δική του ενθαλπία αντίδρασης και την δική του συνάρτηση τάσης ισορροπίας θερμοκρασίας. Όσο μικραίνει ο βαθμός καθαρότητας, τόσο μικραίνει και η ενθαλπία αντίδρασης και η συνάρτηση τάσης ισορροπίας-θερμοκρασίας $P_{CO_2,eq} = f(T)$ εξελίσσεται προς χαμηλότερες θερμοκρασίες λόγω των χημικών κινητικών του προσφάτως δημιουργηθέντος CaO και των ακαθαρσιών. Οι τιμές που δίδονται από την ειδική διεθνή βιβλιογραφία για τις ενδόθερμες αντιδράσεις είναι αρκετά διαφοροποιημένες.

Όσο αφορά την ενθαλπία αντίδρασης, αυτές οι διαφορές είναι πιο μεγάλες από ότι η εξάρτηση του ΔH από την θερμοκρασία στην περιοχή των 800~1000°C που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Έτσι, για πρακτικούς υπολογισμούς ($\Delta H_{900} = 1660$ kJ/Kg CaCO₃ = 396 kcal/Kg CaCO₃) μπορεί να ληφθεί σαν σταθερή τιμή ίση για το συγκεκριμένο θερμοκρασιακό διάστημα [12, 46].

Κινητική

Η αντίδραση διάσπασης του ασβεστόλιθου συντελείται σ' ένα μέτωπο διάσπασης (ζώνη αντιδράσεως), όπου εφάπτονται ο πυρήνας από μη διασπώμενο CaCO₃ και ο φλοιός CaO που σχηματίστηκε. Αυτό το μέτωπο μετακινείται από την περιφέρεια προς το κέντρο με μια ορισμένη ταχύτητα, ενώ συγχρόνως γίνεται διάδοση θερμότητας από έξω προς τον πυρήνα και εκλύεται προς τα έξω CO₂. Αυτή η αντίδραση παρουσιάζει τα εξής στάδια:

- ⇒ *Διάδοση θερμότητας από το περιβάλλον στην επιφάνεια των σωματιδίων*
- ⇒ *Αγωγή θερμότητας με μέσα από το ήδη διασπασμένο στρώμα προς την ζώνη αντιδράσεως*
- ⇒ *Χημική αντίδραση στη ζώνη αντίδρασης με έκλυση CO₂, δημιουργία πυρήνων και ανακρυστάλωση του σχηματισθέντος CaO*
- ⇒ *Διάχυση του CO₂ μέσω του στρώματος CaO προς την επιφάνεια των σωματιδίων*
- ⇒ *Έκλυση των προϊόντων από την επιφάνεια των σωματιδίων προς το περιβάλλον*

Η τελική ταχύτητα των αντιδράσεων είναι συνάρτηση των ρυθμών των (5) παραπάνω σταδίων. Επειδή, οι ρυθμοί αυτοί είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, αποκαθίσταται μια ισορροπία μεταξύ τους, σε συνθήκες θερμοκρασίας και μερικής πίεσης του CO₂, στο μέτωπο διάσπασης, τέτοια που η συνολική ταχύτητα αντιδράσεως και η ταχύτητα των διαφόρων σταδίων

να αποκτούν την ίδια τιμή.

Εάν ένα στάδιο πραγματοποιείται ιδιαίτερα αργά, αυτό καθορίζει αρχικά την ταχύτητα του συνόλου της αντίδρασης. Για τις δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας και μερικής πίεσεως προκύπτουν ορισμένες οριακές τιμές. Η συνολική ταχύτητα καθορίζεται μόνο από την ταχύτητα αυτού του σταδίου. Το μέγεθος των κόκκων, η θερμοκρασία και η μερική πίεση του CO₂ του περιβάλλοντος που προσδιορίζουν το στάδιο που είναι υπεύθυνο για την ταχύτητα της αντίδρασης. Εάν υπάρχουν μεγάλα σωματίδια ασβεστόλιθου, η διάχυση και η αγωγή της θερμότητας κυριαρχούν αν και όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλή και οι μερικές πιέσεις είναι χαμηλές. Στην περίπτωση των χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλών μερικών πιέσεων του CO₂ κύριος παράγοντας είναι η διέλευση των υλικών και η διάχυση του CaO. Για μια λεπτή κοκκομετρία, πχ τον αλεσμένο ασβεστόλιθο η την φαρίνα τσιμέντου σε συνήθεις συνθήκες ασβεστοποίησης, τον καθοριστικό ρόλο παίζουν οι χημικές κινητικές [12].

Για τον υπολογισμό της χημικής κινητικής της ασβεστοποίησης έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα, αρκετά από τα οποία έχουν επαληθευτεί πειραματικά με καλή προσέγγιση, όπως περιγράφεται παρακάτω.

4.4.2 Μαθηματικό Μοντέλο Χημικής Κινητικής

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο, υπολογίζει τους ρυθμούς ασβεστοποίησης και μετάδοσης θερμότητας του σωματιδίου θεωρώντας: α) μετάδοση θερμότητας από τα περιβάλλοντα αέρια στην περιφέρεια του σωματιδίου και θερμική αγωγή στο εσωτερικό του σωματιδίου, β) επιφανειακή διάσπαση του CaCO₃ και γ) μεταφορά μάζας CO₂ από την διεπιφάνεια αντίδρασης μέσω του πορώδους στο μίγμα αερίων.

Θερμική διάσπαση

Η θερμική διάσπαση ασβεστοποίησης ως ετερογενής χημική αντίδραση, συμβαίνει επάνω στην επιφάνεια του στερεού CaCO₃ όταν οι τοπικές συνθήκες υπερβούν το κριτήριο της χημικής ισορροπίας διάσπασης, που από την εργασία των Hils και Baker [50] ορίζεται από την

σχέση:

$$P_c = 1,826 \times 10^7 \exp\left(-\frac{19680}{T}\right) \quad (4-5)$$

Ο ρυθμός αντίδρασης στην διεπιφάνεια εκφράζεται ως εξής:

$$Rate = -k_s A_{CaCO_3} \quad (4-6)$$

όπου, k_s είναι ο επιφανειακός ρυθμός πραγματοποίησης της αντίδρασης διατυπωμένος σε

μορφή τύπου Arrhenius: $k_s = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right)$, όπου A είναι ο προ-εκθετικός συντελεστής ή

συντελεστής συχνότητας (frequency factor) $A = 6.078 \times 10^7$ και E_a η ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης, R η παγκόσμια σταθερά και T η τοπική θερμοκρασία της συνεχούς φάσης.

Οι τιμές που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία για την ενέργεια ενεργοποίησης της παρούσας αντίδρασης διάσπασης κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 165 έως 205 KJ/mol. Η μαθηματική μορφή του ρυθμού της ασβεστοποίησης δόθηκε από Borgwardt κατά την μελέτη ασβεστοποίησης μικρών σωματιδίων ασβεστόλιθου που διαχέονται σε αέρια περιβάλλοντα με μέγιστες τιμές θερμοκρασίας μέχρι 1600°C. Η επίδραση της μερικής πίεσης του CO₂, στον ρυθμό διάσπασης ενσωματώνεται στην έκφραση του ρυθμού, τροποποιώντας την ως εξής:

$$k'_s = k_s \quad \text{για } P < 10^{-2} P_e \quad (4-7)$$

$$k'_s = k_s (P_e - P) / P_e \quad \text{για } 10^{-2} P_e < P < P_e \quad (4-8)$$

Τα παραπάνω δεδομένα βασίζονται στην εργασία των Dargoundi και Searcy, οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση της μερικής πίεσης σε δύο περιοχές-στρώματα γύρω από το σωματίδιο του CaCO₃. Στην περιοχή όπου η μερική πίεση του CO₂ λαμβάνει τιμές μέχρι $10^{-2} P_e$ (P_e μερική πίεση του CO₂ στην χημική ισορροπία), ο ρυθμός διάσπασης παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστος. Για μεγαλύτερες τιμές της μερικής πίεσης του CO₂, ο ρυθμός αποκτά μικρή παραβολική εξάρτηση, έως ότου αυτή εξισωθεί με την P_e και η εξάρτηση του ρυθμού από την πίεση γίνει γραμμική, πρακτική που ακολουθείται ευρέως από τους μελετητές κινητικής σωματιδίων.

Μετάδοση θερμότητας

Για μικρά σφαιρικά σωματίδια, η εξίσωση ενέργειας λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{2k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q_{rxn} \quad (4-9)$$

Με τις παρακάτω αρχικές συνθήκες:

$$\begin{aligned} T(r,0) &= T_0 & \text{για } t = 0 \\ k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) &= h(T_g - T_s) & \text{για } r = r_0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

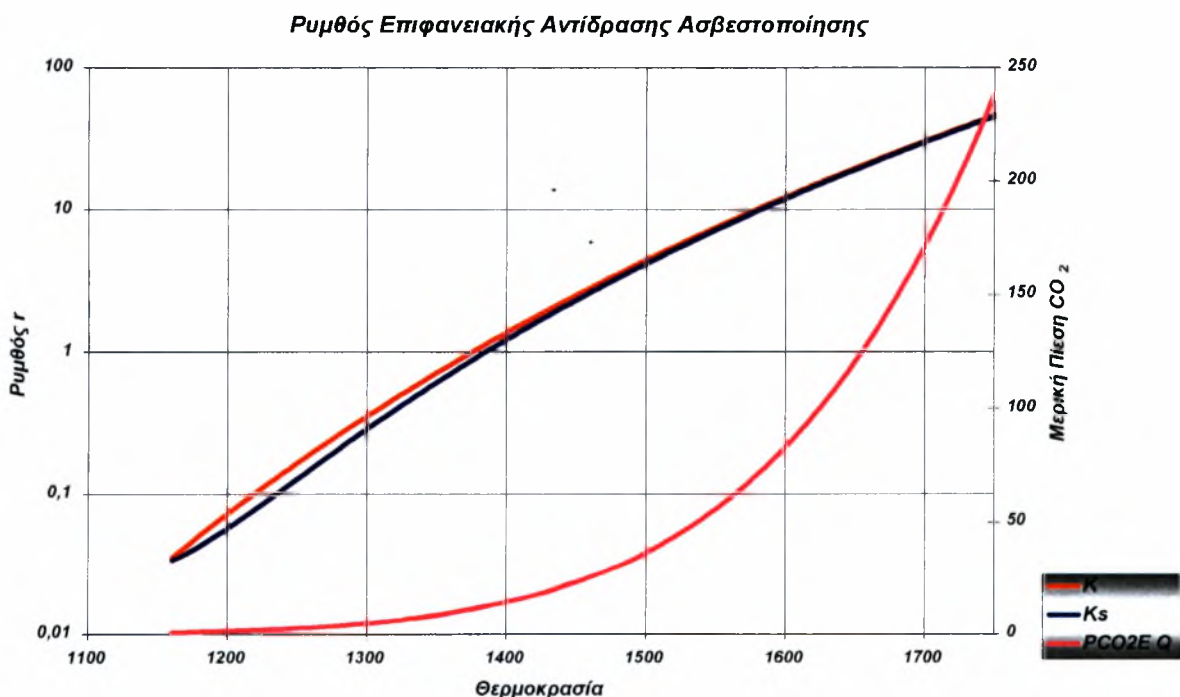
Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής υπολογίζεται από την συσχέτιση του αριθμού Nusselt, ως εξής: $h = \frac{Nu \cdot k}{d_p}$, όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ενώ ο αριθμός Nu υπολογίζεται από την σχέση:

$$Nu = 2.0 + 0.69 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (4-11)$$

Για μικρά σωματίδια ασβεστόλιθου, ο όρος της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία είναι μικρός συγκρινόμενος με τον αντίστοιχο της συναγωγής και σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να παραμεληθεί. Ο όρος της καταλανισκόμενης ποσότητας ενέργειας Q_{rxn} είναι μηδενικός κατά την περίοδο έναρξης, ενώ στην συνέχεια υπολογίζεται από την κινητική της διάσπασης κατά την ασβεστοποίηση.

Κατά την ασβεστοποίηση, η θερμική αγωγιμότητα k εξαρτάται από την κατάσταση του στερεού υλικού και διαφέρει σημαντικά μεταξύ των μη ασβεστοποιημένων, των μερικώς ασβεστοποιημένων και των πλήρως ασβεστοποιημένων σωματιδίων. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην διαφορετική δομή του προϊόντος, αλλά και στην αλλαγή του ειδικού εμβαδού επιφάνειας. Στην μεταβατική περιοχή, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του σωματιδίου είναι γραμμική συνάρτηση του A (ειδικό εμβαδόν επιφάνειας) και της θερμοκρασίας T .

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για το CaCO_3 είναι ίσος με $1.64 \text{ W}/(\text{m K})$, ενώ για το είναι CaO $0.86 \text{ W}/(\text{m K})$.



Σχήμα 4-34 Μεταβολή της χημικής κινητικής της ασβεστοποίησης με σχέση με την θερμοκρασία

Μεταφορά Μάζας

Η εξίσωση διάχυσης του CO₂ λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(D_e \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{2D_e}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\partial P}{\partial t} - RTG_c \quad (4-12)$$

με αρχικές και συνοριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} P(r,0) &= 0 & \text{για } t &= 0 \\ -D_e(\partial P / \partial r)_{r_a} &= h_a(P - P_b) & \text{για } r &= r_0 \end{aligned} \quad (4-13)$$

Ο όρος παραγωγής G_C για το CO₂ είναι μηδενικός κατά την έναρξη της αντίδρασης, ενώ κατά την διάρκειά της, υπολογίζεται από τον ρυθμό της διάσπασης. Ο ενεργός συντελεστής διάχυσης D_e, κατά τον οποίο λαμβάνονται υπόψη η συνήθης διάχυση αλλά και αυτή κατά Knudsen, είναι ίσος με 6.5e-05 kg/(m²s) [53].

Οι όροι Q_{rxn} και G_C εξαρτώνται από τον ρυθμό της κινητικής, όπως επίσης και οι ρυθμοί μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Μέσω αυτής της εξάρτησης συνδυάζονται η χημική αντίδραση και οι εξισώσεις μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

4.5 Ποσοτική περιγραφή εισόδων του ασβεστοποιητή

Ο ασβεστοποιητής έχει τρία είδη εισόδων και μια έξοδο. Οι εισοδοί αφορούν την προσαγωγή της φαρίνας, του κάρβουνου και του τριτογενή αέρα, ενώ η έξοδος την απαγωγή των καυσαερίων και της ασβεστοποιημένης φαρίνας. Ο τριτογενής αέρας εισέρχεται στον ασβεστοποιητή από τη βάση του, το κάρβουνο διαμέσου δυο σωλήνων με βόρειο και νότιο προσανατολισμό, ενώ τέλος η φαρίνα εισάγεται στην αρχή των δύο κλάδων της συστοιχίας ανακομιστών και ένα μεγάλο ποσοστό ή το σύνολο αυτής εισέρχεται στον ασβεστοποιητή.

Η ποσοτική περιγραφή των εισόδων του ασβεστοποιητή βασίζεται σε ανηγμένες τιμές κανονικών συνθηκών. Συγκεκριμένα παράμετροι όπως η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η παροχή για κάθε είσοδο που ορίζουν τις παραμέτρους εισόδου του προβλήματος υπολογίζονται εκ νέου για να αντιστοιχηθούν στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, διότι τα δεδομένα εισόδου δίνονται σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Οι σχέσεις μετατροπής στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, περιγράφονται από τους παρακάτω τύπους:

$$P_R = \frac{P_N + P_F}{10333} [Atm] \quad (\text{σχέση μετατροπής σε Atm από mmH}_2\text{O}) \quad (4-14)$$

$$\frac{P_N V_N}{T_N} = \frac{P_R V_R}{T_R} \Rightarrow V_R = \frac{P_N V_N T_R}{T_N P_R} [m^3] \quad (4-15)$$

όπου P_R είναι η πραγματική πίεση λειτουργίας [σε Atm], P_N η ατμοσφαιρική πίεση [σε mmH₂O], P_F η υποπίεση εισόδου [σε mmH₂O].

Για τις μεταβλητές στη Σχέση 4-15 ισχύει, V_N , T_N είναι ο όγκος εισόδου σε κανονικές συνθήκες και η θερμοκρασία εισόδου σε κανονικές συνθήκες (0°C) και V_R , T_R ο πραγματικός όγκος και η πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας, αντίστοιχα.

1) Τριτογενής αέρας

Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά την είσοδο του τριτογενούς αέρα στον ασβεστοποιητή είναι: $P = -74 \text{ mmH}_2\text{O}$ και $T = 863 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ η ογκομετρική παροχή του είναι ίση με $Q = 109453 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ (σε κανονικές συνθήκες $P_N = 1 \text{ Atm} = 10333 \text{ mmH}_2\text{O}$, $T_N = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Με βάση τις Σχέσεις 4-14 και 4-15, υπολογίζονται η πραγματική πίεση P_R και ο πραγματικός όγκος V_R . Στον Πίνακα 4-16 δίνονται συνοπτικά αποτελέσματα για την ογκομετρική παροχή σε κανονικές και σε πραγματικές συνθήκες, αντίστοιχα.

Πίνακας 4-16 Δεδομένα εισόδου τριτογενούς αέρα σε κανονικές και συνθήκες λειτουργίας

Συνθήκες εισόδου	Σύμβολο	Τιμή
Κανονικές Συνθήκες		
Πίεση	P_N	1 Atm (10333 mmH ₂ O)
Θερμοκρασία	T_N	273,15 K
Ογκομετρική Παροχή	Q_N	109453 Nm ³ / hr
Πυκνότητα	ρ_N	1,29 kg / m ³
Συνθήκες Λειτουργίας		
Πίεση	P_R	0,992 Atm
Θερμοκρασία	T_R	1136,15 K
Ογκομετρική παροχή	Q_R	458546,7 m ³ / hr
Μαζική Παροχή	m_R	141713,3 kg / hr
Πυκνότητα	ρ_R	0,309 kg / m ³

Από το εμβαδόν της διατομής εισόδου του τριτογενούς αέρα, που είναι $A = 5,3066 \text{ m}^2$ υπολογίζεται η ταχύτητα εισόδου ίση με $V = 24 \text{ m/s}$.

2) Κάρβουνο

Το κάρβουνο εισάγεται στον ασβεστοποιητή πνευματικά με τη βοήθεια αέρα διαμέσου δυο σωλήνων με νότιο και βόρειο προσανατολισμό. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι : $P = 2333 \text{ mmH}_2\text{O}$ και $T = 332,15 \text{ K}$, ενώ η μαζική παροχή του κάρβουνου υπολογίζεται από την στοιχειομετρική αναλογία σε σχέση με τον τριτογενή αέρα. Η ογκομετρική παροχή του αέρα Q είναι $1289 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ για την νότια είσοδο και $Q = 1415 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ για την βόρεια είσοδο (σε κανονικές συνθήκες για $P_N = 1 \text{ Atm} = 10333 \text{ mmH}_2\text{O}$ και $T_N = 273,15\text{K}$). Η πυκνότητα του κάρβουνου είναι ίση με 1250 kg/m^3 .

Με βάση τις Σχέσεις 4-14 και 4-15, υπολογίζονται η πραγματική πίεση P_R και ο όγκος V_R . Στους Πίνακες 4-17, 4-18 και 4-19 δίνονται συνοπτικά αποτελέσματα για την ογκομετρική παροχή σε κανονικές και πραγματικές συνθήκες για την νότια και βόρεια είσοδο, αντίστοιχα.

Πίνακας 4-17 Δεδομένα εισόδου για νότια προσαγωγή κάρβουνου

Συνθήκες εισόδου	Σύμβολο	Τιμή	
Κανονικές Συνθήκες			
Πίεση	P_N	1 Atm (10333 mmH ₂ O)	
Θερμοκρασία	T_N	273,15K (0 °C)	
Παροχή	Q_N	1289 Nm ³ / hr	
Πυκνότητα κάρβουνου	ρ_{coal}	1250 kg / m ³	
Παροχή Κάρβουνου	Περίπτωση 1	m	1.93 kg/s
	Περίπτωση 2	m	1.89 kg/s
	Περίπτωση 3	m	1.585 kg/s

Πίνακας 4-18 Δεδομένα εισόδου για νότια προσαγωγή κάρβουνου σε συνθήκες λειτουργίας

Συνθήκες εισόδου		Σύμβολο	Τιμή
Συνθήκες Λειτουργίας			
Πίεση		P_R	1,225 Atm
Θερμοκρασία		T_R	332,15 K
Ογκομετρική Παροχή		Q_R	1278,713 m ³ / hr
Μαζική Παροχή		m_R	1668,72 kg / hr
Πυκνότητα αέρα		ρ_R	1,305 kg / m ³
Συντελεστής Φορτίου	Περίπτωση 1	f_{11}	80,63%
	Περίπτωση 2	f_{12}	80,30%
	Περίπτωση 3	f_{13}	77,37%

Πίνακας 4-19 Δεδομένα εισόδου για την βόρεια προσαγωγή καυσίμου

Συνθήκες εισόδου		Σύμβολο	Τιμή
Κανονικές Συνθήκες			
Πίεση		P_N	1 Atm (10333 mmH ₂ O)
Θερμοκρασία		T_N	273,15K (0 °C)
Παροχή		Q_N	1415 Nm ³ / hr
Πυκνότητα κάρβουνου		ρ_{coal}	1350 kg / m ³
Συνθήκες Λειτουργίας			
Πίεση		P_R	1,225781 Atm
Θερμοκρασία		T_R	332,15 K
Ογκομετρική Παροχή		Q_R	1403,707 m ³ / hr
Μαζική Παροχή		m_R	1831,838 kg / hr
Πυκνότητα αέρα		ρ_R	1,305 kg / m ³
Συντελεστής Φορτίου	Περίπτωση 1	f_{11}	79,13%
	Περίπτωση 2	f_{12}	78,78%
	Περίπτωση 3	f_{13}	75,69%

Από το εμβαδόν διατομής των σωλήνων προσαγωγής του κάρβουνου (0,0314m²), υπολογίζονται οι ταχύτητες εισόδου του καυσίμου στον θάλαμο ασβεστοποίησης, που είναι ίσες με $V = 11,31$ m/s και $V = 12,42$ m/s για τη νότια και βόρεια είσοδο, αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται το μισό υπολογιστικό πεδίο, λόγω της γεωμετρικής συμμετρίας που εμφανίζει η διάταξη, τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιούνται είναι ο μέσος όρος τιμών των δύο εισόδων κάρβουνου.

3) Φαρίνα

Η φαρίνα εισάγεται στον πρώτο κυκλώνα κάθε κλάδου της συστοιχίας ανακομιστών με μαζική παροχή σε κάθε κλάδο ίση με 173tn/hr ή $\dot{m} = 48,06$ kg/s και πυκνότητα 2720 kg/m³. Το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου στην φαρίνα είναι 78%. Λόγω του τρόπου λειτουργίας του συστήματος έψησης ένα ποσοστό της φαρίνας παρακάμπει τον ασβεστοποιητή, με

αποτέλεσμα η ποσότητα που καταλήγει στον ασβεστοποιητή να είναι ίση με το 70–80% της ποσότητας τροφοδοσίας του κλάδου συστοιχίας. Αυτό γίνεται γιατί μέρος της φαρίνας κατευθύνεται στον ΠΚ για να επιτευχθεί έλεγχος της θερμοκρασίας. Έτσι επιτυγχάνεται προστασία των τοιχωμάτων του ΠΚ και αξιοποίηση της υψηλής θερμοκρασίας για την πραγματοποίηση μέρους της ασβεστοποίησης μέσα στον ΠΚ. Επομένως, το ποσό του ανθρακικού ασβεστίου που εισάγεται τελικά στον ασβεστοποιητή καθορίζεται από το ποσοστό χρησιμοποίησης της φαρίνας. Στον Πίνακα 4-19 δίνονται συνοπτικά οι πληροφορίες που αφορούν την είσοδο της φαρίνας.

Πίνακας 4-20 Στοιχεία εισόδου φαρίνας

Παροχή Φαρίνας ανά κλάδο συστοιχίας	173 tn / hr		48,05 kg/s	
Ποσοστό CaCO₃	78 %		37.48 kg/s	
Ποσοστό χρησιμοποίησης	72%	77%	26.8 kg/s	28.6 kg/s
Ογκομετρική Παροχή	35,47 m ³ / hr	37.83 m ³ / hr	9.853x10 ⁻³ m ³ /s	1.051x10 ⁻² m ³ /s

4.5.1 Σύνοψη εισόδων

Στην διάταξη ασβεστοποίησης συναντώνται τρία είδη εισόδων, που συνεισφέρουν με προσαγωγή μάζας συνολικής παροχής γύρω στα 100 kg/s για κάθε σχεδόν περίπτωση καυσίμου. Το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας που εισέρχεται μέσα στον ασβεστοποιητή είναι αυτό του CaCO₃, στην συνέχεια ακολουθεί η μαζική παροχή του τριτογενούς αέρα, έπειτα η παροχή του κάρβουνου και τέλος η αντίστοιχη του αέρα μεταφοράς του κάρβουνου. Η διαφοροποίηση των παροχών του τριτογενούς αέρα και του αέρα μεταφοράς του κάρβουνου, γίνεται γιατί εμφανίζουν διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου και συνεπώς διαφορετική πυκνότητα.

Πίνακας 4-21 Συνοπτική περιγραφή ποσοτικών εισόδων

Παροχή	Περίπτωση 1 [kg/s]	Περίπτωση 2 [kg/s]	Περίπτωση 3 [kg/s]
m_{CaCO3}	53.600	57.200	57.200
m_{Coal}	3.860	3.780	3.170
m_{tertiary}	39.364	39.364	39.364
m_{Air Coal}	0.972	0.972	0.972
Σύνολο	97.796	101.316	100.706

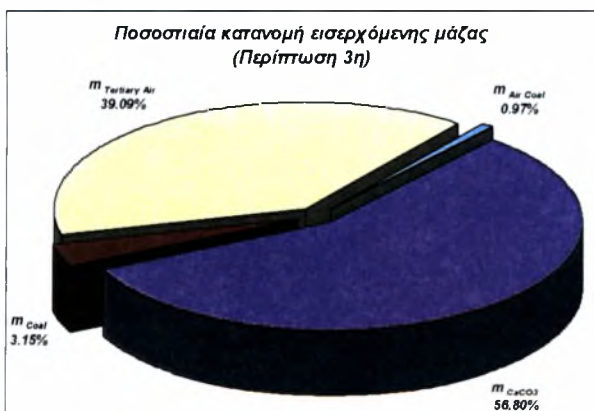
Στους Πίνακες 4-22 και 4-23 δίνονται τα ποσοστά των μαζικών και ογκομετρικών παροχών που υλικών που εισέρχονται εντός της διάταξης. Ειδικά, για τον Πίνακα των ογκομετρικών παροχών έχει χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα που παρουσιάζουν οι εισοδοί κατά την εισροή τους στην διάταξη.

Πίνακας 4-22 Ποσοτική και ποσοστιαία σύνοψη μαζικών παροχών εισόδου

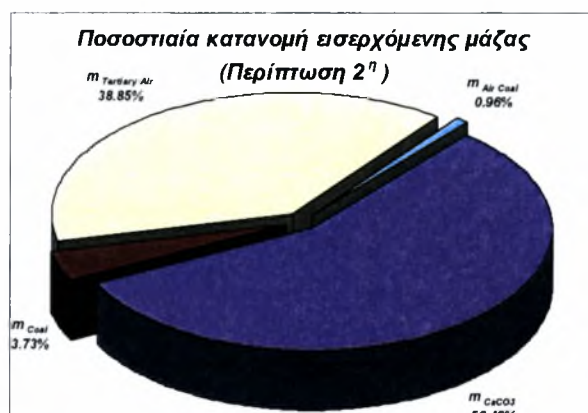
Είδος Μαζικής Παροχής	Περίπτωση 1		Περίπτωση 2		Περίπτωση 3	
	Ποσότητα [Kg/s]	Ποσοστό	Ποσότητα [Kg/s]	Ποσοστό	Ποσότητα [Kg/s]	Ποσοστό
m_{CaCO_3}	53.600	54.81%	57.200	56.46%	57.200	56.80%
m_{Coal}	3.860	3.95%	3.780	3.73%	3.170	3.15%
$m_{Tertiary Air}$	39.364	40.25%	39.364	38.85%	39.364	39.09%
$m_{Air Coal}$	0.972	0.99%	0.972	0.96%	0.972	0.97%
Σύνολο	97.796	100.00%	101.316	100.00%	100.706	100.00%



Σχήμα 4-36 Γράφημα κατανομών μαζικής παροχής για την 2^η περίπτωση



Σχήμα 4-35 Γράφημα κατανομών μαζικής παροχής για την 1^η περίπτωση



Σχήμα 4-37 Γράφημα κατανομών μαζικής παροχής για την 3^η περίπτωση

Πίνακας 4-23 Σύνοψη ογκομετρικών παροχών εισόδου

Είδος Ογκομετρικής Παροχής	Περίπτωση 1		Περίπτωση 2		Περίπτωση 3	
	Παροχή [m ³ /s]	Ποσοστό	Παροχή [m ³ /s]	Ποσοστό	Παροχή [m ³ /s]	Ποσοστό
Q_{CaCO_3}	0.020	0.015%	0.021	0.016%	0.021	0.016%
Q_{Coal}	0.003	0.002%	0.003	0.002%	0.003	0.002%
$Q_{Tertiary Air}$	127.371	99.401%	127.371	99.400%	127.371	99.400%
$Q_{Air Coal}$	0.745	0.581%	0.745	0.581%	0.745	0.581%
Σύνολο	128.139	100.000%	128.140	100.000%	128.140	100.000%

Από τους Πίνακες 4-22 και 4-23 δίνονται στοιχεία για την σύνθεση των εισόδων στην διάταξη. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ροές όπου η σωματιδιακή (διακριτή) φάση μπορεί να καταβάλει μέχρι και 13% του συνολικού όγκου, ενώ η αντίστοιχη μάζα δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 2/3 της συνολικής. Από τους παραπάνω πίνακες αυτούς προκύπτει ότι το μοντέλο της ασβεστοποίησης προσομοιώνεται οριακά από την άποψη της σύνθεσης μαζών, ενώ αντίθετα η σύνθεση των όγκων βρίσκεται στον αντίποδα των ορίων.

4.6 Κατανομή μεγεθών κόκκων

Όπως ήδη έχει περιγραφεί το κάρβουνο και η φαρίνα εισάγονται στον ασβεστοποιητή αλεσμένα και σε υψηλή διαμέριση. Η συνηθισμένη κατανομή διαμέτρων που ακολουθούν τα σωματίδια που υφίστανται άλεση σε βιομηχανικούς μύλους, περιγράφεται από την κατανομή Rosin - Rammler. Πρακτικά, ο τυπικός προσδιορισμός της κατανομής γίνεται με την χρήση κόσκινων με διαφορετικό διάμετρο όπών. Έτσι ορίζεται σε εκατοστιαία βάση η μάζα D , που διαπερνά το κόσκινο συγκεκριμένης διαμέτρου dp και R ορίζεται το υπόλειμμα. Η κατανομή τότε εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$R = \exp\left[-\frac{dp}{L_0}\right]^N \quad (4-16)$$

όπου, R είναι η αθροιστική κατανομή μεγέθους σωματιδίων με μεγαλύτερη διάμετρο από την dp (υπολειμματική ποσότητα σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από dp), D είναι η ποσότητα $1-R$, που εκφράζει το ποσότητα σωματιδίων που διαπερνούν το κόσκινο (σωματίδια με διάμετρο μικρότερη ή ίση της dp), L_0 είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος, και ισούται με τη διάμετρο dp (θεωρείται ως η μέση τιμή διαμέτρου της κατανομής), όταν το ποσοστό της ποσότητας R είναι ίσο 36,8% ($L_0=dp$ όταν $R = \exp(-1)$) και N είναι ο βαθμός ομοιομορφίας των σωματιδίων που εκφράζει το εύρος μεγεθών της κατανομής.

Οι τιμές που μπορεί να λάβει η μεταβλητή N είναι μεταξύ του 1 και 4. Υψηλές τιμές του N δίνουν πιο ομοιόμορφη κατανομή μεγεθών. Η αναλυτική μαθηματική έκφραση των παραπάνω μεγεθών είναι:

$$D = \int_0^{dp} f(dp) d(dp) \quad (4-17)$$

$$R = \int_{dp}^{\infty} f(dp) d(dp) \quad (4-18)$$

Με διαφορίση της Σχέσης (4-16) ως προς dp , λαμβάνεται το κλάσμα μάζας των σωματιδίων, που η διάμετρος των ισούται με dp .

$$f(dp) = \frac{dR}{d(dp)} = \frac{N}{L_0} \left(\frac{dp}{L_0}\right)^{N-1} \exp\left[-\left(\frac{dp}{L_0}\right)\right]^N \quad (4-19)$$

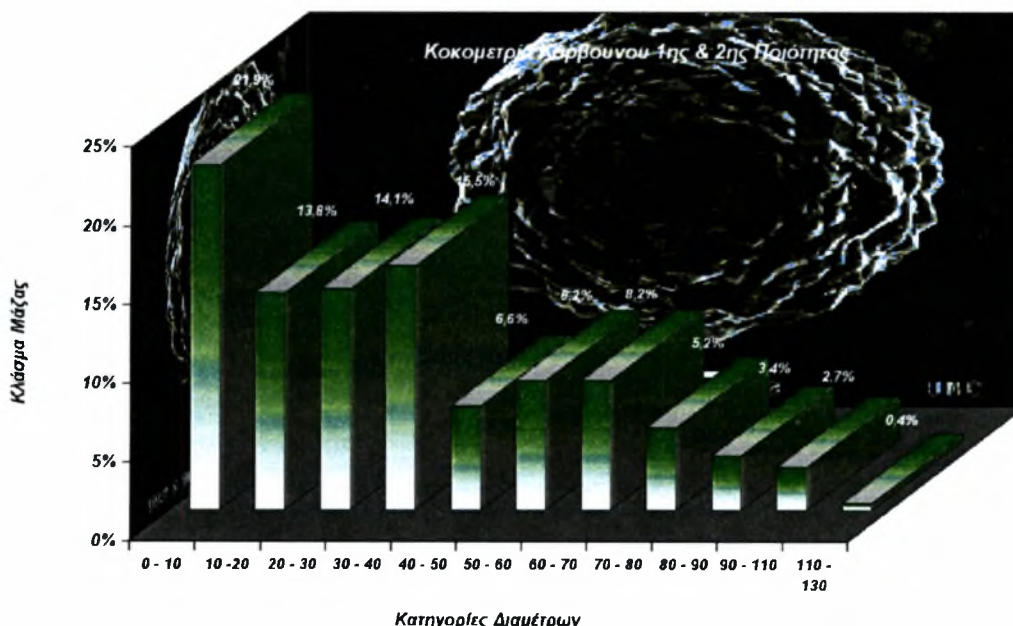
Με διπλή λογαρίθμηση της (4-16) προκύπτει ότι :

$$\ln(-\ln(R)) = N \ln\left(\frac{dp}{L_0}\right) \Rightarrow N = \frac{\ln(-\ln(R))}{\ln\left(\frac{dp}{L_0}\right)} \quad (4-20)$$

Η ανάλυση των στοιχείων κοκκομετρίας για τα σωματίδια του κάρβουνου και της φαρίνας, έγινε με βάση τις παραπάνω σχέσεις. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της κατανομής για όλα τα είδη καυσίμου και φυσικά για την φαρίνα. Η πηγή των δεδομένων κοκκομετρίας όλων των ειδών σωματιδίων, ήταν το τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου του εργοστασίου 'Όλυμπος' της ΑΓΕΤ 'Ηρακλής' στην Αγριά Βόλου.

Πίνακας 4-24 Στοιχεία κοκκομετρικής ανάλυσης σωματιδίων κάρβουνου 1^{ης} και 2^{ης} ποιότητας

Κατηγορία Διαμέτρων σε μm	Κλάσμα Μάζας [%]	R (Πέρασμα) [%]
0 - 5	31,70	68,30
5 - 10	16,90	51,40
10 - 15	11,80	39,60
15 - 20	8,40	31,20
20 - 25	9,44	21,76
25 - 30	4,26	17,50
30 - 40	5,40	12,10
40 - 50	5,20	6,90
50 - 60	3,90	3,00
60 - 70	2,00	1,00
70 - 90	1,00	0,00

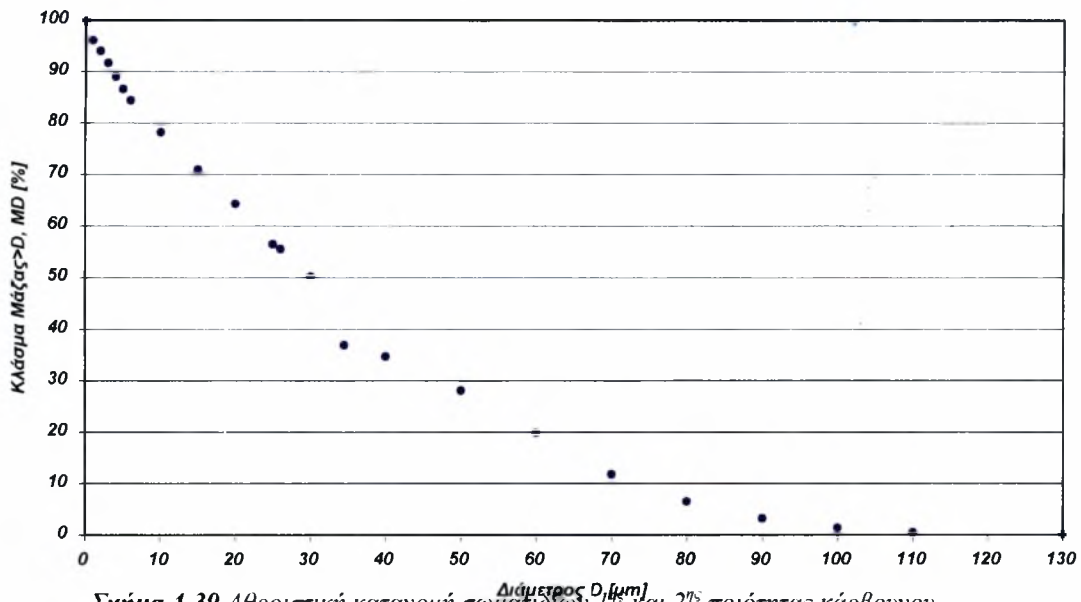


Σχήμα 4-38 Κοκκομετρική κατανομή σωματιδίων 1^{ης} και 2^{ης} ποιότητας κάρβουνου

Η πρώτη στήλη του Πίνακα 4-24, δίνει πληροφορίες για την διάκριση των κατηγοριών, η δεύτερη αναφέρει το κλάσμα μάζας που ανήκει στην αντίστοιχη κατηγορία και η τρίτη, το ποσοστό της συνολικής μάζας σωματιδίων που διαθέτει μεγαλύτερη διάμετρο από την μέγιστη της κατηγορίας. Στο Σχήμα 4-38, παρατίθενται στοιχεία σχετικά την κατανομή της μάζας

των σωματιδίων στις αντίστοιχες κατηγορίες διαμέτρων, ενώ σε αυτό που ακολουθεί, εικονίζεται η αθροιστική κατανομή μεγεθών των σωματιδίων κάρβουνου 1^{ης} και 2^{ης} ποιότητας.

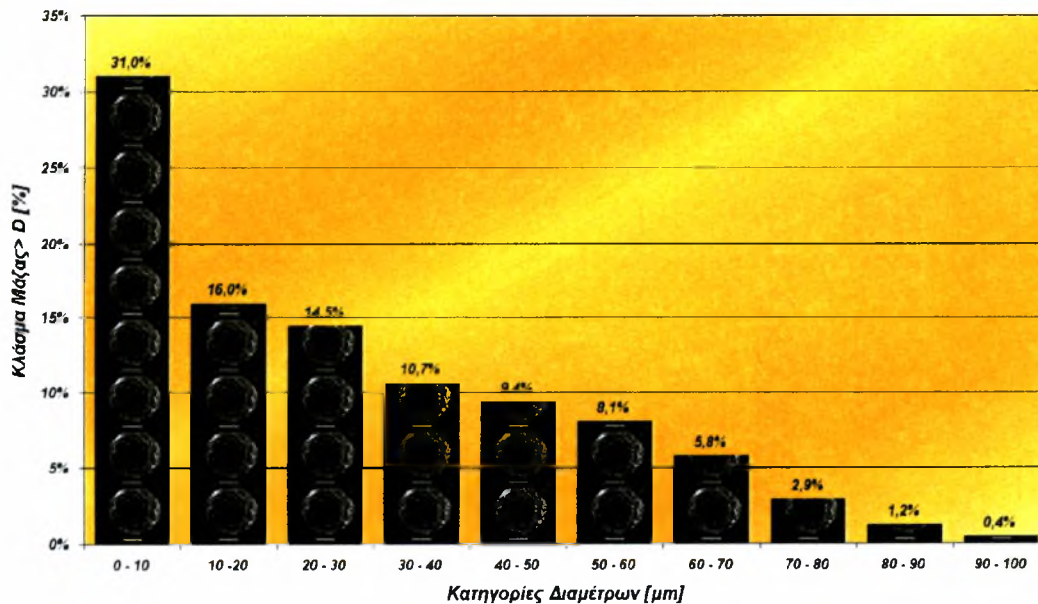
Αθροιστική Κατανομή Μεγεθών Σωματιδίων Κάρβουνου 1ης & 2ης Ποιότητας



Σχήμα 4-39 Αθροιστική κατανομή σωματιδίων 1^{ης} και 2^{ης} ποιότητας κάρβουνου

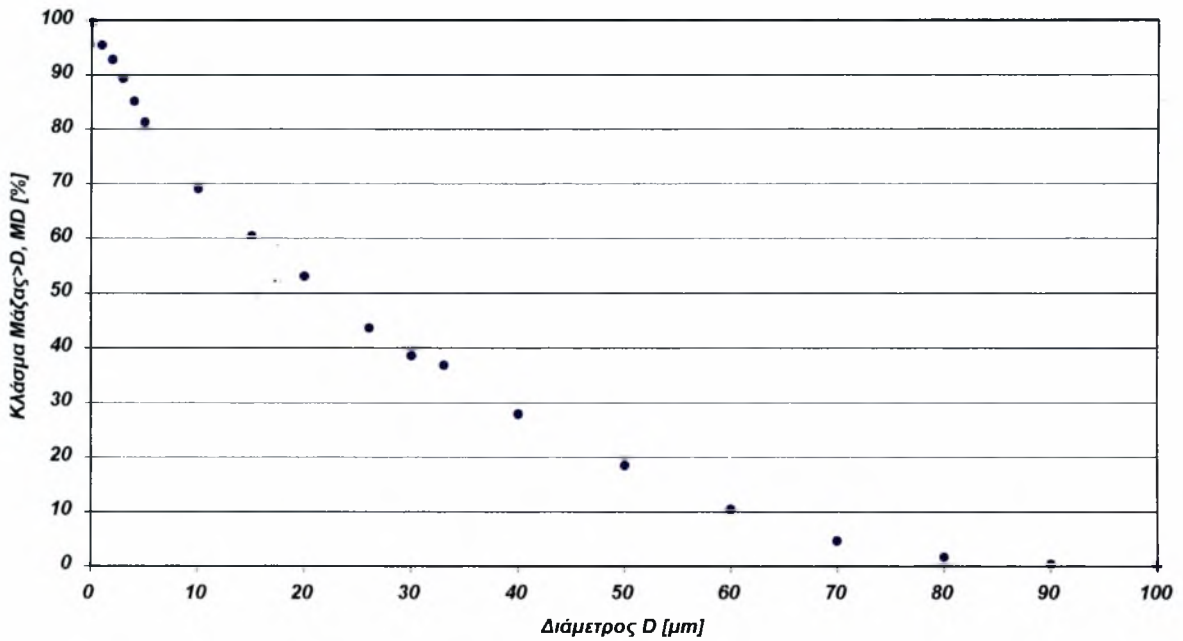
Αντίστοιχα, στα Σχήματα 4-40 έως 4-43 δίνονται διαγράμματα ομοίου περιεχομένου με τα προηγούμενα για την περιγραφή της κοκκομετρίας του πέτκωκ και της φαρίνας.

Κοκκομετρία Σωματιδίων Πέτκωκ

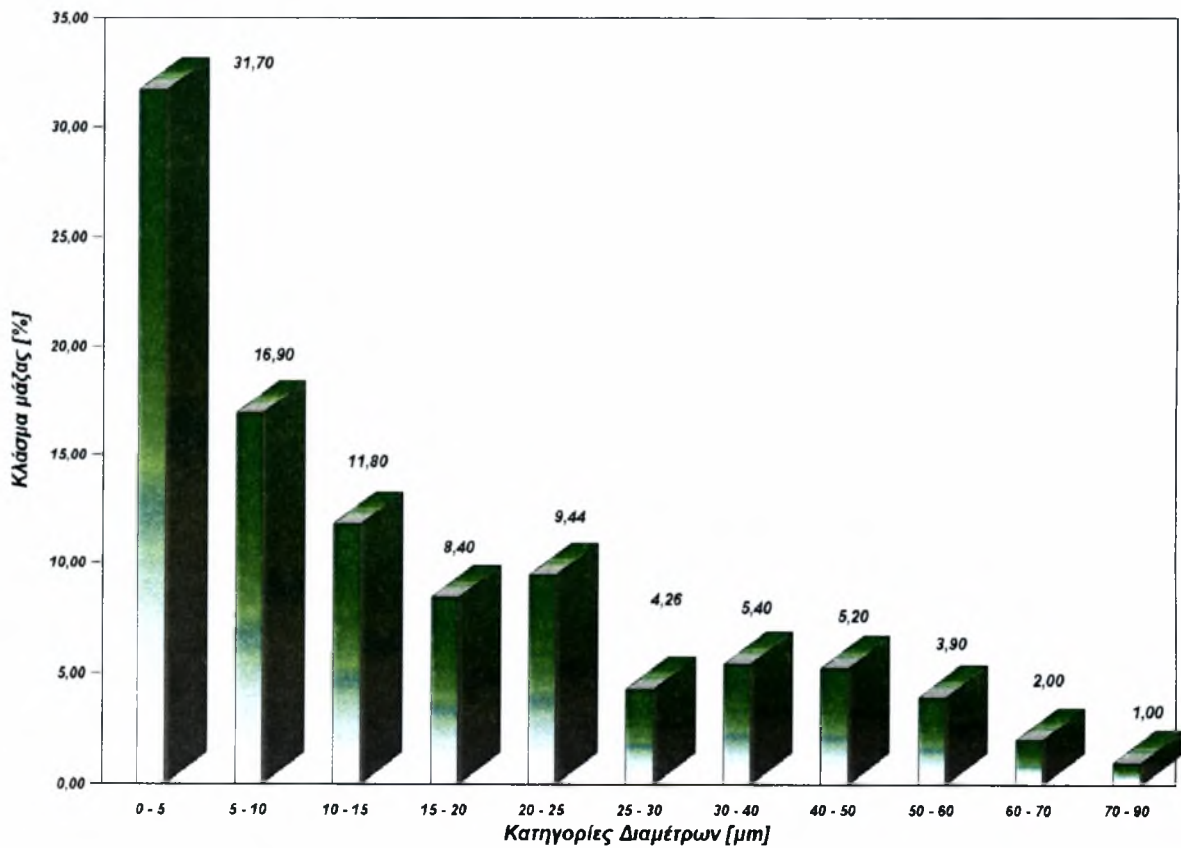


Σχήμα 4-40 Κοκκομετρική κατανομή σωματιδίων πέτκωκ

Αθροιστική Κατανομή Μεγέθων Σωματιδίων Πέτκωκ

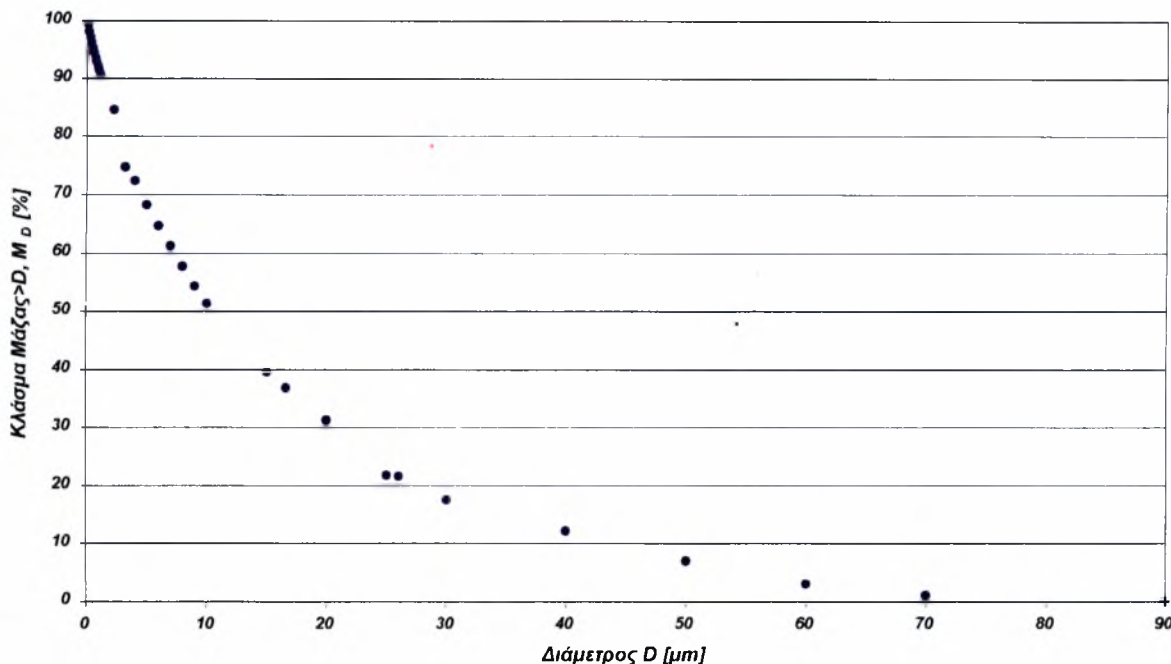


Σχήμα 4-41 Αθροιστική κατανομή σωματιδίων πέτκωκ



Σχήμα 4-42 Κοκκομετρική κατανομή σωματιδίων φαρίνας

Αθροιστική Κατανομή Μεγέθων Σωματιδίων Φαρίνας



Σχήμα 4-43 Αθροιστική κατανομή σωματιδίων φαρίνας

Η ανάλυση των στοιχείων κοκκομετρίας για τα σωματίδια του κάρβουνου, του πέτκωκ και της φαρίνας έκανε δυνατό τον προσδιορισμό ορισμένων βασικών παραμέτρων, όπως είναι η μέση τιμή \bar{D} και ο βαθμός ομοιομορφίας N της κατανομής Rosin-Rammler. Στον Πίνακα 4-25 συνοψίζονται τα παραπάνω μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τον ορισμό των αρχικών συνθηκών της σωματιδιακής φάσης.

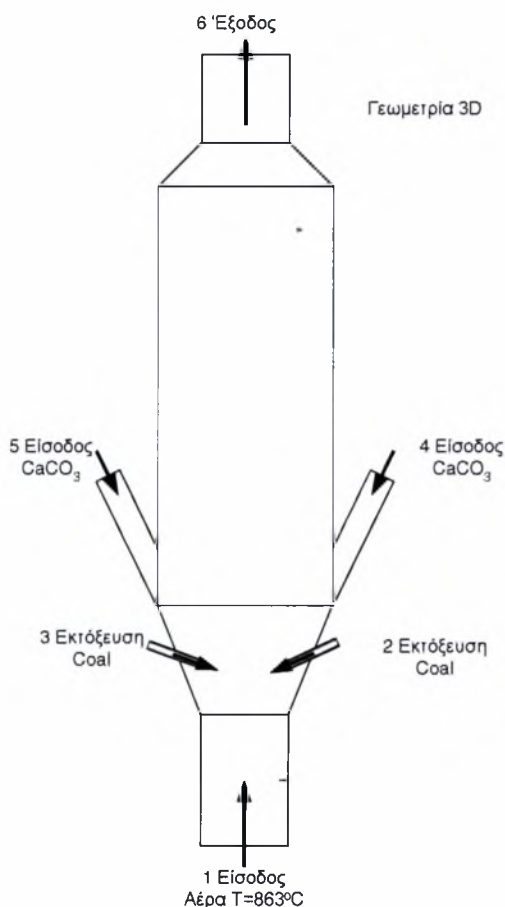
Πίνακας 4-25 Συνοπτικός πίνακας δεδομένων ανάλυσης κοκκομετρικών κατανομών

Είδος Σωματιδίων	Μέση Τιμή [μm]	Βαθμός Ομοιομορφίας	Μέγιστη Τιμή [μm]	Ελάχιστη Τιμή [μm]
Κάρβουνο	34,5	1,248	130	0,10
Πέτκωκ	33,0	1,006	100	0,10
Φαρίνα	16,6	0,822	100	0,60

Από την ανάλυση των κοκκομετρικών κατανομών, η μεγαλύτερη ανομοιομορφία εντοπίζεται στα σωματίδια της φαρίνας, ενώ τα σωματίδια του πέτκωκ και του κάρβουνου εμφανίζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία, με καλύτερη αυτή του πέτκωκ. Όμως, και οι τρεις δείκτες ομοιομορφίας παραμένουν αρκετά χαμηλοί, γεγονός που δηλώνει έντονη ασυμμετρία στις κατανομές.

4.7 Συνοριακές Συνθήκες της Προσομοίωσης

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος διακρίνονται σε δύο είδη συνθηκών. Σε αυτές που συνθέτουν τις συνθήκες της συνεχούς φάσης και σε αυτές της διακριτής φάσης. Όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 4-44, η είσοδος (1) είναι αμιγώς μονοφασική ενώ οι εισοδοί (3,2) και (5,4) συμπεριλαμβάνουν συνεχή και διακριτή φάση. Η έξοδος των καυσαερίων, της τέφρας και της αβεστοποιημένης φαρίνας γίνεται από την έξοδο (6) του σχήματος. Τα τοιχώματα της διάταξης είναι μονωμένα από εσωτερική στρώση πυρότουβλων πάχους 23,5cm, ενώ εξωτερικά επικαλύπτονται από χαλύβδινη λαμαρίνα πάχους 2,5 mm. Οι συνθήκες εισόδου των βασικών υλικών ελέγχονται και προσδιορίζονται ποσοτικά και ποιοτικά πριν την είσοδο τους στον αβεστοποιητή από μετρητικές διατάξεις, που βρίσκονται είτε πριν την είσοδο είτε στην έξοδο της προηγούμενης διάταξης.



Σχήμα 4-44 Βασική σχηματική περιγραφή είδους των συνθηκών εισόδου-εξόδου της προσομοίωσης

Για την είσοδο του τριτογενούς αέρα, όπως και για τις υπόλοιπες εισόδους χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που λήφθηκαν από ανάλογες μετρήσεις, όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Τα δεδομένα που διαμορφώθηκαν για τις συνοριακές συνθήκες εισόδου του τριτογενούς αέρα εμφανίζονται στον Πίνακα 4-26.

Πίνακας 4-26 Συνθήκες εισόδου τριτογενούς αέρα

Ταχύτητα εισόδου	24 m/sec
Θερμοκρασία εισόδου	1136,15 K
Κινητική ενέργεια τύρβης $k [m^2/sec^2]$	2,592
Ρυθμός σκέδασης κινητικής $\epsilon [m^2/sec^3]$	2,930

Η σύσταση του αέρα θεωρήθηκε ιδανική (21% O₂, 79% N₂) με μηδενικές συγκεντρώσεις όλων των άλλων συστατικών. Η συνοριακή τιμή της κινητικής ενέργειας της τύρβης υπολογίζεται από την σχέση:

$$k = 0,25 U_{in}^2 C_{Fr} \quad (4-21)$$

όπου, C_{Fr} ο συντελεστής τριβής και U_{in} η ταχύτητα εισόδου.

Η σκέδαση της κινητικής ενέργειας της τύρβης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\varepsilon = 0,1643 \frac{k^{3/2}}{L_{mix}} \quad (4-23)$$

$$L_{mix} = 0.09 L \quad (4-24)$$

όπου, L_{mix} είναι το μήκος ανάμιξης δίνης, L το χαρακτηριστικό μήκος (εδώ η διάμετρος εισόδου). Αντίστοιχα, για την είσοδο του κάρβουνου τα δεδομένα εισόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-27.

Πίνακας 4-27 Συνθήκες εισόδου αέρα προσαγωγής κάρβουνου

Ταχύτητα εισόδου	11,8 m/sec
Θερμοκρασία εισόδου	333,15 K
Κινητική ενέργεια τύρβης k [m ² /sec ²]	0,626
Ρυθμός σκέδασης κινητικής ε [m ² /sec ³]	4,527

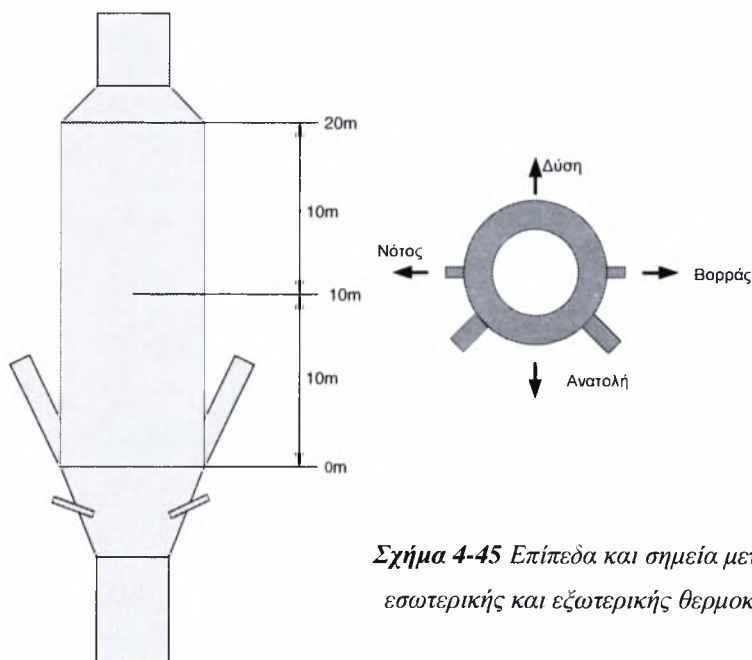
Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις που το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχούσε στο μισό υπολογιστικό πεδίο, λόγω της γεωμετρικής συμμετρίας, για τα δεδομένα παροχής αέρα και κάρβουνου χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των δύο εισόδων όπως αναγράφονται στον Πίνακα 4-27. Και σε αυτό το είδος εισόδου έχουν χρησιμοποιηθεί τα ίδια δεδομένα για την σύσταση του αέρα και τις συγκεντρώσεις αερίων.

Η είσοδος της φαρίνας, αποτελεί μια ιδιαίτερη είσοδο από την πλευρά της συνεχούς φάσης, διότι ο συντελεστής φορτίου φαρίνας στους αντίστοιχους προσαγωγούς αντιστοιχεί στο 99%, γεγονός που περιορίζει την αέρια μάζα. Τα δεδομένα εισόδου για την συνεχή αέρια φάση προκύπτουν με αναγωγές από τα στοιχεία της διακριτής φάσης και δίνονται στον Πίνακα 4-28.

Πίνακας 4-28 Συνθήκες εισόδου αέρα προσαγωγής φαρίνας

Ταχύτητα εισόδου	1,5 m/sec
Θερμοκρασία εισόδου	1023,15 K
Κινητική ενέργεια τύρβης k [m ² /sec ²]	4,5e-03
Ρυθμός σκέδασης κινητικής ε [m ² /sec ³]	9,18e-04

Η σύσταση του αέρα και οι συγκεντρώσεις του αερίων αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στα προηγούμενα είδη εισόδων. Η έξοδος της συνολικής μάζας γίνεται από την διατομή (6) του Σχήματος 4-43 υπό σταθερή πίεση. Τα τοιχώματα της διάταξης παρουσιάζουν θερμικές απώλειες που αγγίζουν τοπικές τιμές 5500W/m^2 , ιδιαίτερα λίγο πιο πάνω από την περιοχή εισαγωγής του καυσίμου. Η μέση απώλεια θερμορροής λόγω συναγωγής, αγωγής και ακτινοβολίας εκτιμήθηκε περίπου στα 4500W/m^2 . Η εκτίμηση βασίστηκε σε μετρήσεις θερμοκρασιών που έγιναν στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια του κυλινδρικού σώματος της διάταξης. Οι μετρήσεις έγιναν σε (3) διαφορετικές τομές του κυλινδρικού κορμού και σε (4) διαφορετικά σημεία της περιμέτρου. Τα επίπεδα μετρήσεων αντιστοιχούσαν στο κατώτερο, στο μέσο και ανώτερο επίπεδο του κυλινδρικού κορμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-45. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν, αναγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 4-29.



Σχήμα 4-45 Επίπεδα και σημεία μετρήσεων εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας

Πίνακας 4-29 Θερμοκρασίες εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας τοιχωμάτων

Εξωτερική Θερμοκρασία σε [°C]				
Ύψη [m]	Ανατολή	Δύση	Βορράς	Νότος
20	83	85	62	63
10	78	73	68	62
0	115	91	100	110
Εσωτερική θερμοκρασία σε [°C]				
20	865	870	890	895
10	910	920	865	865
0	900	890	865	860

Για τα τοιχώματα ισχύουν, επίσης συνθήκες μη προσρόφησης και μηδενικές αρχικές συγκεντρώσεις για αέρια αντιδρώντα και προϊόντα των χημικών διεργασιών. Στο μοντέλο ακτινοβολίας τα τοιχώματα προσομοιώνονται ως γκρι σώματα. Επίσης για την διακριτή φάση, τα τοιχώματα συμπεριφέρονται ως τοίχοι πρόσκρουσης, όπου τα σωματίδια εκτελούν ελαστική κρούση επάνω τους, εμφανίζοντας την ίδια αριθμητική τιμή της γωνίας προσπτώσεως και ανακλάσεως [53].

4.7.1 Αρχικές Συνθήκες Διακριτής Φάσης

Για τους υπολογισμούς της διακριτής φάσης, οι αρχικές συνθήκες παρέχουν τις αρχικές τιμές για όλες τις εξαρτημένες μεταβλητές της σωματιδιακής φάσης, ως εξής:

- Θέση σωματιδίου (x, y, z συντεταγμένες)
- Ταχύτητες (v, u, w) του σωματιδίου. (Γωνίες κώνου και διαβαθμίσεις ταχυτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον καθαρισμό των αρχικών ταχυτήτων)
- Διάμετρος του σωματιδίου, D_p .
- Θερμοκρασία του σωματιδίου, T_p .
- Μαζική παροχή \dot{m}_p του ρεύματος σωματιδίων που θα ακολουθήσει την τροχιά που θα διαγραφεί από το υπολογιστικό σωματίδιο διαμέτρου, D_p .

4.7.2 Συνοριακές συνθήκες σωματιδιακής φάσης

Όταν ένα σωματίδιο πλησιάσει ένα φυσικό σύνορο, τότε το μοντέλο εφαρμόζει μια από τις τρεις συνοριακές συνθήκες, για να καθορισθεί η έκβαση της τροχιάς επί του συνόρου.

⇒ Η πρώτη συνθήκη είναι η αυτή της ανάκλασης, όπου το σωματίδιο αναπηδά στο σύνορο, προκαλώντας μεταβολή στην ορμή του. Η μεταβολή της ορμής του μπορεί να είναι ελαστική ή ανελαστική, σύμφωνα με ένα συντελεστή απόδοσης.

⇒ Η δεύτερη συνθήκη είναι αυτή της παγίδευσης, όπου τερματίζονται οι υπολογισμοί της τροχιάς του σωματιδίου, και το υπολειπόμενο πτητικό μέρος του σωματιδίου αποδίδεται στην συνεχή φάση, ενώ συγχρόνως ο παρακείμενος όγκος του κελιού, που ισούται με τον όγκο του σωματιδίου, αποκτά ιδιότητες συνόρου.

⇒ Η τρίτη είναι συνθήκη διαφυγής, όπου κατά την οποία τερματίζονται οι υπολογισμοί της τροχιάς, μόλις το σωματίδιο διαπεράσει την συνοριακή γραμμή ή επίπεδο.

Με βάση τα παραπάνω, για τα τοιχώματα χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες ανάκλασης των σωματιδίων με συντελεστή απόδοσης της μεταβολής της ορμής που ικανοποιούσε την πλήρη ελαστική κρούση, ενώ για τις επιφάνειες που είχαν χαρακτηριστεί ως είσοδοι και έξοδοι χρη-

σιμοποιήθηκε συνοριακή συνθήκη διαφυγής. Στον Πίνακα 4-30 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες της διακριτής φάσης των σωματιδίων του κάρβουνου και της φαρίνας.

Πίνακας 4-30 Αρχικές συνθήκες διακριτής φάσης

Αρχικές συνθήκες	Δέσμη καυσίμου	Δέσμη φαρίνας
Αρχική θέση	Επιφάνειες 2,3 ²	Επιφάνειες 4,5
Ταχύτητα V	-10,219 m/sec ³	-0,578
Ταχύτητα U	-5,960 m/sec	-1,299
Ταχύτητα W	0 m/sec	-0,477
Θερμοκρασία	332,15 K	1023,15 K
Αρχική μέση διάμετρος	34,5 μm	16.6 μm
	34,5 μm	
	33 μm	
Μαζική παροχή	1,930 Kg/s	26.8 Kg/s
	1,890 Kg/s	28.6 Kg/s
	1,585 Kg/s	

Η εφαρμογή του μοντέλου ακτινοβολίας για την διακριτή φάση επέβαλε την χρησιμοποίηση δυο ανηγμένων συντελεστών για την δημιουργία του αντιστοίχου όρου πηγής στην εξίσωση της ενέργειας. Οι συντελεστές αυτοί αφορούσαν την ικανότητα εκπομπής και σκέδασης της ακτινοβολίας των σωματιδίων. Ο συντελεστής εκπομπής για τα σωματίδια κάρβουνου ορίστηκε ίσος με 0.9 [54,55] και για το CaCO₃ ίσος με 0.6 [55], ενώ ο συντελεστής σκέδασης για το κάρβουνο και το CaCO₃ καθορίστηκε σε 0.6 και 0.4, αντίστοιχα [55].

² Η αρίθμηση των επιφανειών βασίζεται στο Σχήμα 4-44

³ Οι τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε ως πλέγμα το μισό υπολογιστικό πεδίο, με αποτέλεσμα οι τιμές αυτές να αντιστοιχούν στις βορειοανατολικές εισόδους κάρβουνου και φαρίνας. Επίσης, οι τιμές αυτές έχουν διαφοροποιηθεί έτσι ώστε να ικανοποιούν τις συνολικές εισροές μάζας (αέρα, κάρβουνου και CaCO₃) στον ασβεστοποιητή.

5. Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η επίλυση των τριών περιπτώσεων προσομοίωσης, με αναφορά στον αλγόριθμο επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε, και παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η επίλυση των μοντέλων που περιγράφηκαν στα έγινε με την χρήση του πακέτου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής FLUENT.

Η εκτέλεση των τριών περιπτώσεων ανέδειξε μεταξύ των άλλων, μερικά βασικά σημεία που δεν θα πρέπει να αγνοηθούν στο μέλλον. Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού και κατ' επέκταση ενός υπολογιστικού μοντέλου είναι μια διαδικασία συνεχούς ανάδρασης με τα προηγούμενα βήματα, απαιτεί μια πολύ καλή έγκυρη και έγκαιρη ροή πληροφόρησης, μια αρκετά καλή γνώση του υπολογιστικού εργαλείου και οπωσδήποτε πέρα από την απαραίτητη γνώση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, είναι απαραίτητη η φυσική διαίσθηση του προσομοιούμενου φυσικού προβλήματος. Τα παραπάνω σημεία είχαν έντονη θετική ή αρνητική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

Η επίλυση των τριών μοντέλων απαιτήσε την μεγαλύτερη χρονική δαπάνη στο διάστημα εκπόνησης της παρούσας εργασίας και συγχρόνως απέδειξε ότι η διαδικασία αυτή δεν ήταν μια αυτοματοποιημένη λειτουργία, που θα την έφερνε απλά εις πέρας ο υπολογιστής.

Η δυνατότητα επιλογής και δοκιμών αρκετών σχημάτων διακριτοποίησης και αλγορίθμων επίλυσης του προβλήματος, έδωσε την ευκαιρία για σύγκριση και αποτίμηση της συμπεριφοράς τους κατά την διάρκεια ανάπτυξης του μοντέλου. Επειδή, όμως είναι έξω από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας η σύγκριση των αλγορίθμων και των σχημάτων, κρίθηκε αναγκαία η σύντομη περιγραφή του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης.

Η τρισδιάστατη φύση του προβλήματος απαιτεί και την ανάλογη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Όμως, η προβολή των αποτελεσμάτων περιορίζεται εκ των πραγμάτων σε σύνολα διδιάστατων διαγραμμάτων ή και σε συνθέσεις τους. Η επιλογή να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με τις λιγότερες δυνατές παραδοχές και να γίνει η επίλυση του με σχεδόν όλα τα επιμέρους μοντέλα ενεργοποιημένα, εκτός από τα μειονεκτήματα που παρουσίασε, έδωσε παράλληλα και ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών. Αυτός ο όγκος, ανέδειξε ένα «ευχάριστο» πρόβλημα που ποτέ δεν αντιμετωπίζεται στις διδιάστατες μοντελοποιήσεις, την σωστή επιλογή και προβολή της κατάλληλης τομής και όψης και την εκλογή των πιο αντιπροσωπευτικών γραφικών. Αυτό όμως, υποδηλώνει πως όσο και επιλεκτική να είναι η επιλογή των παραπάνω όψεων και τομών δεν είναι δυνατό να περιοριστεί η προβολή τους σε μία και μόνο σελίδα ή εικόνα.

5.1 Πορεία Επίλυσης

Η επίτευξη της τελικής λύσης, ιδίως για το πρώτο μοντέλο, ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Δοκιμάστηκαν αρκετά πλέγματα σε δύο και τρεις διαστάσεις κάνοντας χρήση αρχικά μόνο των βασικών υπομοντέλων και ενσωματώνοντας σταδιακά την χρήση των υπολοίπων. Η αντιμετώπιση αυτή βοήθησε στο να διαμορφωθεί μια στρατηγική για την επίτευξη του τελικού στόχου. Παράλληλα, έγιναν ορισμένες κινήσεις για να δοκιμαστεί η συμπεριφορά του επιλυτή (solver) και για να εξαχθούν συμπεράσματα για την χρήση των αριθμητικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στις τελικές εκτελέσεις. Πριν, την έναρξη των εκτελέσεων του προβλήματος, έγινε εκτέλεση παρόμοιας μερικής φύσης προβλημάτων (καύση και ακτινοβολία), όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δημοσιευμένες εργασίες (*κατάλογος δημοσιεύσεων παρατίθεται στην Βιβλιογραφία*), για να εξεταστεί η συμφωνία των αποτελεσμάτων.

Οι διδιάστατες προσομοιώσεις έγιναν με στόχο την ανάπτυξη της μεθόδου αντιμετώπισης του προβλήματος. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη της μεθόδου αφορούσε την σύμπλεξη της διακριτής φάσης με την αέρια, την εφαρμογή του μοντέλου PDF για τις χημικές αντιδράσεις, την σύνθεση του μοντέλου διακριτής φάσης και χημείας και την εφαρμογή της ακτινοβολίας στις δύο φάσεις. Αυτό βοήθησε να δημιουργηθεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την τελική σύνθεση του ολοκληρωμένου μοντέλου.

Η κυρία προσπάθεια έγινε στις προσομοιώσεις τριών διαστάσεων, όπου πέρα από τις δυσκολίες που συναντήθηκαν στην ποιοτική σύνθεση του τελικού προβλήματος, αντιμετωπίστηκαν και προβλήματα ποσοτικής φύσεως. Από την αρχή διαπιστώθηκε πως η πολύ μεγάλη μάζα της διακριτής φάσης, θα επέφερε προβλήματα στην σύγκλιση της εξίσωσης της συνέχειας και στο πεδίο των συγκεντρώσεων και των θερμοκρασιών. Έτσι, αρχικά το μοντέλο επιλύθηκε μόνο για την αέρια φάση και την εξίσωση ενέργειας και έπειτα έγινε η σύμπλεξη της αδρανούς σωματιδιακής φάσης. Στην συνέχεια, ενεργοποιήθηκε για τα αδρανή σωματίδια η ανταλλαγή θερμότητας με την αέρια φάση και αργότερα ενεργοποιήθηκε το μοντέλο χημικών αντιδράσεων, όπου επιτρέπει η ανταλλαγή μάζας και θερμότητας με την αέρια φάση.

Η εφαρμογή του μοντέλου των χημικών αντιδράσεων δημιούργησε αρκετά προβλήματα, που επιμήκυναν τον χρόνο σύγκλισης, διότι η μεγάλη μάζα των σωματιδίων δημιουργούσε αντίστοιχα μεγάλους όρους πηγής στην εξίσωση της ενέργειας και στις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και συγκεντρώσεων). Συγχρόνως, η φύση της χημείας (αποπτητικοποίηση κάρβουνου, καύση στερεού υπολείμματος και ασβεστοποίηση) επέτεινε το πρόβλημα. Η μικρή τιμή του συντελεστή υπο-χαλάρωσης στις παραπάνω εξισώσεις άμβλυνε σημαντικά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Το πρόβλημα αυτό, ξεπεράστηκε με την χρήση υψηλών ρυθμών αντί-

δρασης, μέχρι να υπάρξει η σταθεροποίηση της φλόγας του κάρβουνου και να επιτευχθεί ομαλό πεδίο συγκεντρώσεων για όλες τις αντιδράσεις. Αυτό έγινε, γιατί η κινητική της ασβεστοποίησης είναι πιο γρήγορη από την κινητική του κάρβουνου, και παράλληλα η έναρξη της γίνεται αργότερα από την καύση ($T > 1160K$), ενώ απορροφά σημαντικό ποσό ενέργειας για την πραγματοποίησή της. Επίσης, η έκλυση του CO_2 που οφείλεται στην καύση του κάρβουνου, αρχικά μεταθέτει χωρικά την ασβεστοποίηση κάτι που δεν θα φαινόταν εάν η καύση γινόταν αργότερα από την ασβεστοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες.

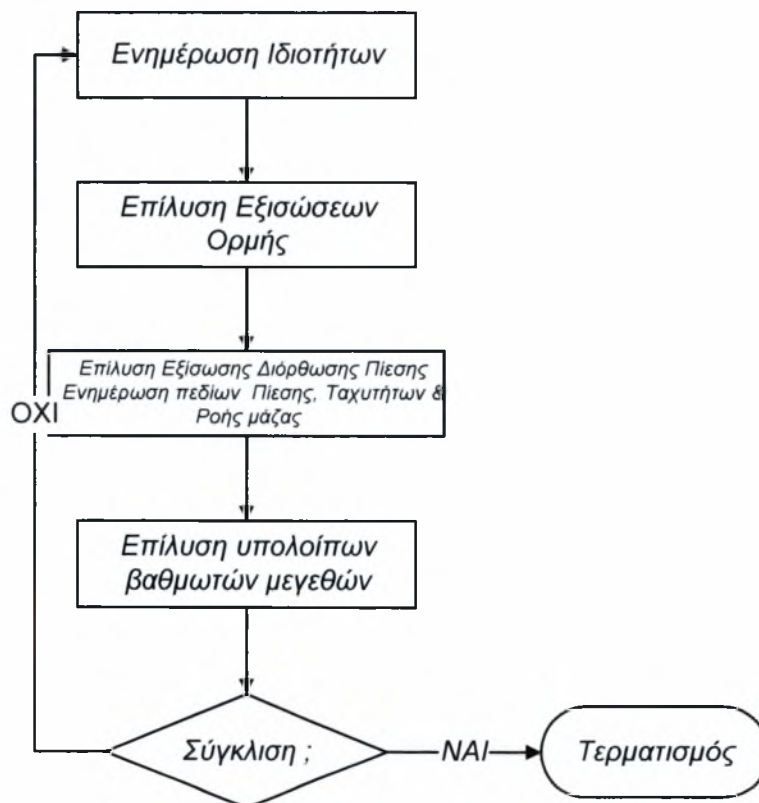
Μόλις, δημιουργήθηκε ένα σταθερό πεδίο, τότε επιχειρήθηκε η σταδιακή μείωση των ρυθμών αντίδρασης μέχρι την πραγματική τους τιμή. Επίσης, η σταθεροποίηση των πεδίων συγκεντρώσεων, δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ενεργοποίηση των υπολογισμών της ακτινοβολίας. Με δεδομένο, ότι το CO_2 και οι υδρατμοί είναι ισχυρά απορροφητικά αέρια, τα διαμορφωμένα πεδία συγκεντρώσεων βοήθησαν τους υπολογισμούς ακτινοβολίας, και συγχρόνως εξοικονομήθηκε σημαντικός υπολογιστικός χρόνος. Η ενεργοποίηση του μοντέλου ακτινοβολίας, αρχικά διατάραξε την πορεία σύγκλισης της εξίσωσης ενέργειας, αλλά στην συνέχεια όταν ομαλοποιήθηκε, ενεργοποιήθηκε και η συνεισφορά της διακριτής φάσης στους υπολογισμούς της ακτινοβολίας.

Τα σχήματα διακριτοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν διαφορετικά, ανάλογα με τον χρόνο, την σύμπλεξη των μοντέλων και τον αντικειμενικό σκοπό εφαρμογής τους. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα πρώτης τάξης, για την δημιουργία αρχικών πεδίων υπολογισμών. Στην συνέχεια, η ακρίβεια των υπολογισμών σε όλες τις εξισώσεις εκτός αυτών των συγκεντρώσεων αυξήθηκε σε δεύτερης τάξης για να περιοριστεί η αριθμητική διάχυση, και προς το τέλος των εκτελέσεων χρησιμοποιήθηκαν σχήματα ανώτερης τάξης, (σχήμα QUICK), σε εξισώσεις όπως της ενέργειας και των χημικών αντιδράσεων. Ο αλγόριθμος επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο SIMPLE, ο οποίος υλοποιήθηκε από την αποσυζευκτική μέθοδο επίλυσης (*Segregated Solution Method*).

5.1.1 Αριθμητικά Σχήματα

Η αποσυζευκτική μέθοδος επίλυσης είναι ο βασικός αλγόριθμος επίλυσης, που χρησιμοποιείται εξ' ορισμού από τον κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent, όταν στους υπολογισμούς εμπλέκεται το μοντέλο χημικών αντιδράσεων PDF. Σε αυτή την μέθοδο, οι θεμελιώδεις εξισώσεις επιλύονται διαδοχικά και ξεχωριστά η μία από την άλλη. Επειδή, οι θεμελιώδεις εξισώσεις είναι μη γραμμικές, πρέπει να γίνουν αρκετές επαναλήψεις του βρόγχου επίλυσης, για να επιτευχθεί η σύγκλιση. Έτσι σε κάθε επανάληψη εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

- 1) Ενημερώνονται οι ιδιότητες των ρευστών, από την τρέχουσα λύση, ενώ εάν οι υπολογισμοί έχουν μόλις αρχίσει, οι ιδιότητες ενημερώνονται από τις αρχικές τιμές.
- 2) Επιλύονται οι x, y, z εξισώσεις ορμής κατά σειρά χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές για την πίεση και για την ροή μαζών, με αντικειμενικό σκοπό την νέα λύση του πεδίου ταχυτήτων.
- 3) Εάν οι τιμές που προκύπτουν από το βήμα 2 δεν ικανοποιούν την εξίσωση της συνέχειας τοπικά, τότε μια εξίσωση τύπου Poisson (εξίσωση διόρθωσης πίεσης) παράγεται από την εξίσωση της συνέχειας και τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις ορμής. Αυτή η εξίσωση διόρθωσης πίεσης επιλύεται για να διορθώσει τα πεδία πιέσεων, ταχυτήτων ώστε να ικανοποιούν την τοπική συνέχεια της μάζας.
- 4) Επιλύονται οι εξισώσεις των υπολοίπων βαθμωτών μεγεθών (τύρβη, ενέργεια, συγκεντρώσεις και ακτινοβολία) χρησιμοποιώντας τις τιμές των προηγούμενων βημάτων για τα υπόλοιπα μεγέθη.
- 5) Όταν στους υπολογισμούς εμπλέκονται και υπολογισμοί διακριτής φάσης, ενημερώνονται οι όροι πηγής των αντιστοίχων εξισώσεων της συνεχούς φάσης
- 6) Τα βήματα 1 έως 5 επαναλαμβάνονται, μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα σύγκλισης [6-10].



Σχήμα 5-1 Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου αποσυνζευγμένης επίλυσης

5.1.2 Γραμμικοποίηση

Ανεξάρτητα από την μέθοδο επίλυσης, οι διακριτές, μη γραμμικές θεμελιώδεις εξισώσεις γραμμικοποιούνται για να παραχθεί ένα σύστημα εξισώσεων εξαρτημένων μεταβλητών σε κάθε υπολογιστικό κελί. Το τελικό γραμμικό σύστημα λύνεται για να δώσει μια ενημερωμένη λύση του πεδίου τιμών.

Ο τρόπος με τον οποίο γραμμικοποιούνται οι θεμελιώδεις εξισώσεις μπορεί να της δίνουν ρητή ή πεπλεγμένη μορφή, ως εξής:

- ⇒ Πεπλεγμένη (Implicit): Για μια συγκεκριμένη μεταβλητή, η άγνωστη τιμή κάθε κελιού υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας μια σχέση που συνδέει τις υπάρχουσες (γνώστες και άγνωστες) τιμές των γειτονικών κελιών. Επομένως, κάθε άγνωστη τιμή θα εμφανίζεται σε περισσότερες από μια εξισώσεις του συστήματος, οι οποίες πρέπει να λυθούν όλες μαζί.
- ⇒ Ρητή (Explicit): Για μια συγκεκριμένη μεταβλητή, η άγνωστη τιμή κάθε κελιού υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας μια σχέση που περιλαμβάνει μόνο τις υπάρχουσες γνωστές τιμές. Συνεπώς, κάθε άγνωστη τιμή θα εμφανίζεται σε μία μόνο εξίσωση του συστήματος και οι εξισώσεις των άγνωστων τιμών μπορούν να λυθούν ξεχωριστά για δώσουν τις άγνωστες τιμές [6-10].

Στην μέθοδο αποσυζευγμένης επίλυσης, κάθε διακριτοποιημένη θεμελιώδης εξίσωση γραμμικοποιείται πεπλεγμένα για την εξαρτημένη μεταβλητή της εξίσωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με μία εξίσωση για κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου. Επειδή, υπάρχει μια εξίσωση ανά κελί, το σύστημα καλείται και βαθμωτό. Για την λύση του τελικού βαθμωτού συστήματος εξισώσεων εξαρτημένων μεταβλητών, χρησιμοποιείται ένας επιλυτής (*solver*) σημείου γραμμικών εξισώσεων (*Gauss-Seidel*) σε συνδυασμό με μία αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο επίλυσης (*AMG method*). Για παράδειγμα, η εξίσωση της x -ορμής γραμμικοποιείται και παράγεται ένα σύστημα εξισώσεων, όπου η u -συνιστώσα της ταχύτητας είναι άγνωστη, και από την λύση του συστήματος προκύπτει μια ενημερωμένη τιμή για την u ταχύτητα.

5.1.3 Διακριτοποίηση

Ο κώδικας FLUENT χρησιμοποιεί μια τεχνική που βασίζεται σε όγκους ελέγχου για να μετατρέψει τις θεμελιώδεις εξισώσεις σε αλγεβρικές, έτσι ώστε αυτές να λυθούν αριθμητικά. Η τεχνική των όγκων ελέγχου βασίζεται στην ολοκλήρωση των θεμελιωδών εξισώσεων για κάθε όγκο ελέγχου, παράγοντας την διακριτή εξίσωση διατήρησης κάθε ποσότητας.

Η διακριτοποίηση των θεμελιωδών εξισώσεων μπορεί να απεικονιστεί ευκολότερα από την εξίσωση μεταφοράς ενός βαθμωτού μεγέθους ϕ σε μόνιμη ροή, που δίνεται παρακάτω για ένα αυθαίρετο όγκο ελέγχου V :

$$\oint \rho \phi U \cdot dA = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (5.1)$$

όπου, ρ είναι η πυκνότητα, U το διάνυσμα ταχύτητας, A η επιφάνεια κάθετη στο διάνυσμα, Γ_ϕ ο συντελεστής μεταφοράς για το μέγεθος ϕ , $\nabla \phi$ η απόκλιση του μεγέθους ϕ και S_ϕ ο όρος πηγής του ϕ ανά μονάδα όγκου.

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου και η διακριτοποιημένη εξίσωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} u_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S\phi V \quad (5.2)$$

όπου, N_{faces} είναι ο αριθμός των επιφανειών που περικλείουν το υπολογιστικό κελί, ϕ_f η τιμή ϕ που μεταφέρεται μέσω της επιφανείας f , u_f η ροή μάζας που διαπερνά την επιφάνεια f , A_f το εμβαδόν επιφανείας f , $(\nabla \phi)_n$ το μέγεθος του $\nabla \phi$ κάθετο στην επιφάνεια f και V ο όγκος του κελιού.

5.1.4 Σχήματα διαφορίσης

Ανάντη σχήμα πρώτης τάξης

Όταν επιλέγεται το σχήμα πρώτης τάξης, οι ποσότητες στις επιφάνειες των κελιών καθορίζονται, θεωρώντας ότι οι κεντρικές τιμές οποιουδήποτε πεδίου μεταβλητών, αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές των κελιών που θεωρούνται κοινές σε όλο το κελί. Οι ποσότητες των επιφανειών είναι οι ίδιες με αυτές του κελιού. Κατά συνέπεια, όταν επιλέγεται το ανάντη σχήμα πρώτης τάξης, η τιμή επιφανείας ϕ_f είναι ίση με την κεντρική τιμή ϕ του ανάντη κελιού.

Ανάντη σχήμα δεύτερης τάξης

Όταν επιλέγεται το σχήμα δεύτερης τάξης, οι ποσότητες στις επιφάνειες των κελιών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια πολυδιάστατη γραμμική προσέγγιση ανασύνθεσης. Σε αυτή την προσέγγιση επιτυγχάνεται μια υψηλότερης τάξης ακρίβεια στις επιφάνειες των κελιών. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη σειρών Taylor της λύσης των κεντρικών τιμών των κελιών γύρω από αυτό (κέντρο μάζας, cell centroid). Έτσι, όταν επιλέγεται το ανάντη σχήμα δεύτερης τάξης, η τιμή επιφανείας υπολογίζεται από την σχέση:

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \Delta a \quad (5.3)$$

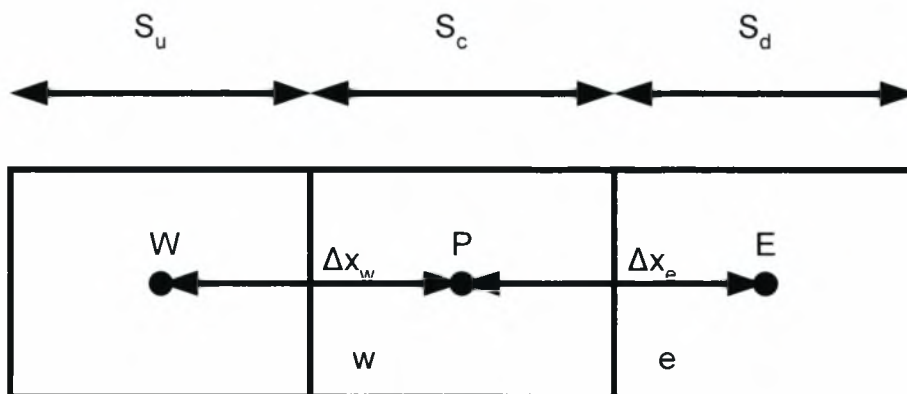
Όπου, ϕ και $\nabla\phi$ είναι οι κεντρικές τιμές ϕ των κελιών και οι βαθμίδες τους, και Δa είναι το διάνυσμα μετατόπισης από το κέντρο μάζας του ανάντη κελιού προς την επιφάνεια του κέντρου. Αυτό το σχήμα απαιτεί τον καθορισμό της βαθμίδας $\nabla\phi$ σε κάθε κελί, που υπολογίζεται από το θεώρημα της απόκλισης, που στην διακριτή του μορφή εκφράζεται ως εξής:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \bar{\phi}_f A \quad (5.4)$$

Οι τιμές $\bar{\phi}_f$ υπολογίζονται από τις μέσες τιμές ϕ των δύο κελιών. [10]

Σχήμα Quick (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics)

Σε τετραεδρικά και εξαεδρικά πλέγματα, όπου μπορούν να αναγνωριστούν ανάντη και κατάντη επιφάνειες (έδρες), υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του σχήματος Quick για τον υπολογισμό μιας υψηλότερης τάξης ακρίβειας των όρων συναγωγής για την μεταβλητή ϕ . Τα σχήματα τύπου Quick βασίζονται στη σταθμική μέση τιμή των τιμών από το σχήμα δεύτερης τάξης και των κεντρικών παρεμβολών της μεταβλητής ϕ . Για μια επιφάνεια e του Σχήματος 5-2 και για μια ροή από τα αριστερά προς τα δεξιά, είναι:



Σχήμα 5-2 Μονοδιάστατος όγκος ελέγχου

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (5.5)$$

Όταν το θ λαμβάνει την τιμή 1 τότε η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται σε ένα σχήμα δευτέρας τάξεως, ενώ όταν το θ γίνεται ίσο με 0 δίνει μια ανάντη δευτέρας τάξης σχήμα. Το παραδοσιακό σχήμα Quick λαμβάνεται θέτοντας την τιμή θ ίση με 1/8. Η εφαρμογή στον κώδικα χρησιμοποιεί μια μεταβλητή τιμή του θ που εξαρτά την λύση, και επιλέγεται έτσι ώστε να αποφεύγονται νέα προβλήματα λύσης [6,10].

Το σχήμα Quick είναι τυπικά πιο ακριβές σε δομημένα επιμήκη πλέγματα προς την κύρια διεύθυνση της ροής. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σχήμα Quick μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη δομημένα ή και σε υβριδικά πλέγματα με την ίδια επιτυχία με τα δομημένα. Σε αυ-

τές τις περιπτώσεις το δευτέρας τάξης ανάντη σχήμα διακριτοποίησης χρησιμοποιείται στις επιφάνειες των μη εξαεδρικών κελιών.

5.1.5 Γραμμικοποιημένη μορφή των διακριτοποιημένων εξισώσεων

Η διακριτοποιημένη εξίσωση μεταφοράς ενός βαθμωτού μεγέθους περιέχει τις άγνωστες τιμές της μεταβλητής ϕ στο κέντρο του κελιού και στα γειτονικά κελιά. Αυτή είναι, γενικά μη γραμμική μορφή ως προς τις μεταβλητές αυτές, ενώ η εξίσωση λαμβάνει την παρακάτω γραμμική μορφή:

$$a_p \cdot \phi = \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b \quad (5.6)$$

όπου, ο δείκτης nb αναφέρεται στα γειτονικά κελιά και a_p και a_{nb} είναι οι γραμμικοποιημένοι συντελεστές για τις τιμές ϕ και ϕ_{nb} .

Ο αριθμός των γειτονικών κελιών για κάθε κελί εξαρτάται από την τοπολογία του πλέγματος, αλλά τυπικά ισούται με τον αριθμό των επιφανειών που συνθέτουν το κελί, με εξαίρεση τα συνοριακά κελιά. Παρόμοιες εξισώσεις μπορεί να σχηματιστούν για κάθε κελί και κάθε μεταβλητή που επιλύεται.

5.1.6 Συντελεστές Υπο-χαλάρωσης

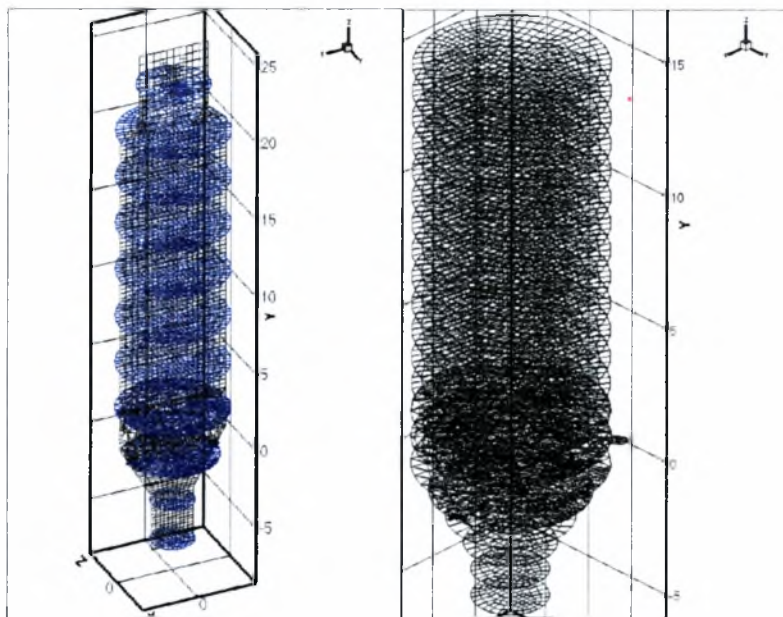
Λόγω της μη γραμμικότητας των εξισώσεων που επιλύονται, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η νέα τιμή της μεταβλητής ϕ . Αυτό επιτυγχάνεται τυπικά με την υπο-χαλάρωση (under relaxation), η οποία μειώνει την μεταβολή της ϕ που προκύπτει από κάθε επανάληψη. Σε απλή μορφή, η νέα τιμή της ϕ σε ένα κελί εξαρτάται από την παλιά τιμή ϕ_{old} , και την μεταβολή της ϕ . $\Delta\phi$ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\phi = \phi_{old} + a \cdot \Delta\phi \quad (5.7)$$

5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

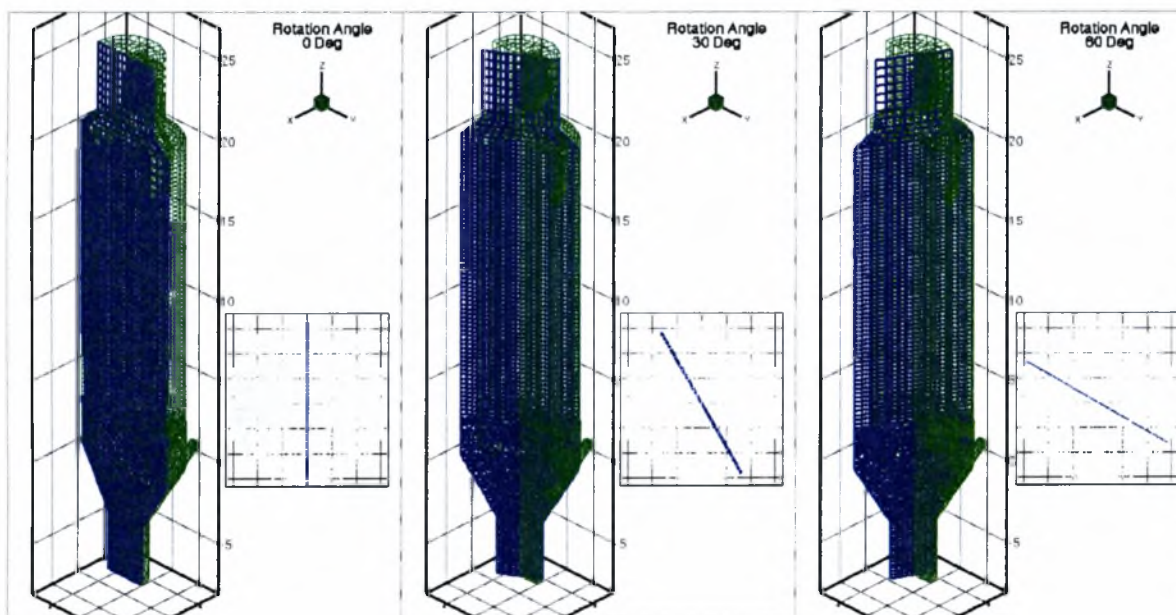
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων χωρίζεται σε τρεις ενότητες, όπου η κάθε μια αναφέρεται στο μοντέλο μίας από τρεις περιπτώσεις προσομοίωσης, αντίστοιχα. Σε κάθε ενότητα ακολουθεί η ίδια σειρά παρουσίασης για την καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αρχικά δίνονται βοηθητικά στοιχεία για την θέση των τομών, που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται θεματικά σε (5) ομάδες σχημάτων, ξεκινώντας από το πεδία ταχυτήτων, και συνεχίζοντας με τα σχήματα των θερμοκρασιών και των συγκεντρώσεων των κυριότερων αντιδρώντων και προϊόντων, τις τροχιές των σωματιδίων και τα διαγράμματα των βασικότερων χαρακτηριστικών μεγεθών (πχ. γραμμομοριακά κλά-

σματα O_2 και CO_2 , την εξέλιξη της ταχύτητας της αέριας φάσης και της θερμοκρασίας καθ' ύψος του κεντρικού άξονα του αβεστοποιητή).

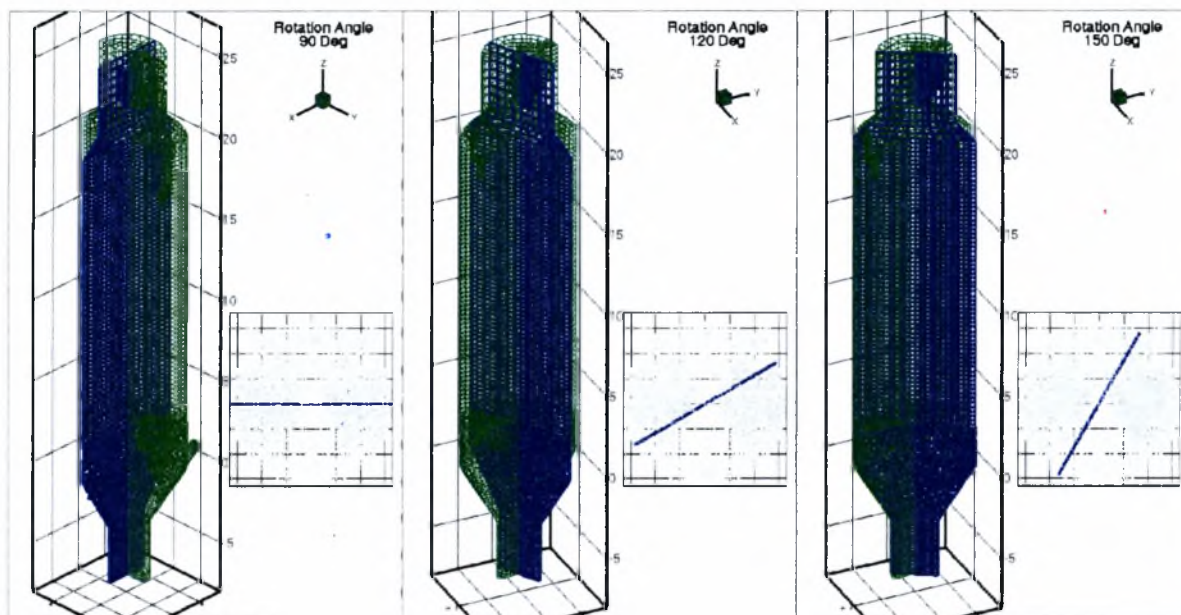


Σχήμα 5-3 Τομές τρισδιάστατων γραφικών

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές σε διάφορα ύψη του αβεστοποιητή σε αραιή και πυκνή διάταξη. Στα Σχήματα 5-4 και 5-5 παρουσιάζονται οι τομές των επιπέδων που σχηματίζουν γωνίες 0, 30, 60, 90, 120 και 150 μοιρών με το επίπεδο συμμετρίας. Η θέση των τομών εμφανίζεται σε αξονοσυμμετρική όψη και στην διπλανή επισυναπτόμενη κάτοψη.



Σχήμα 5-4 Επίπεδα τομών για γωνίες 0, 30 και 60 μοιρών από το επίπεδο συμμετρίας

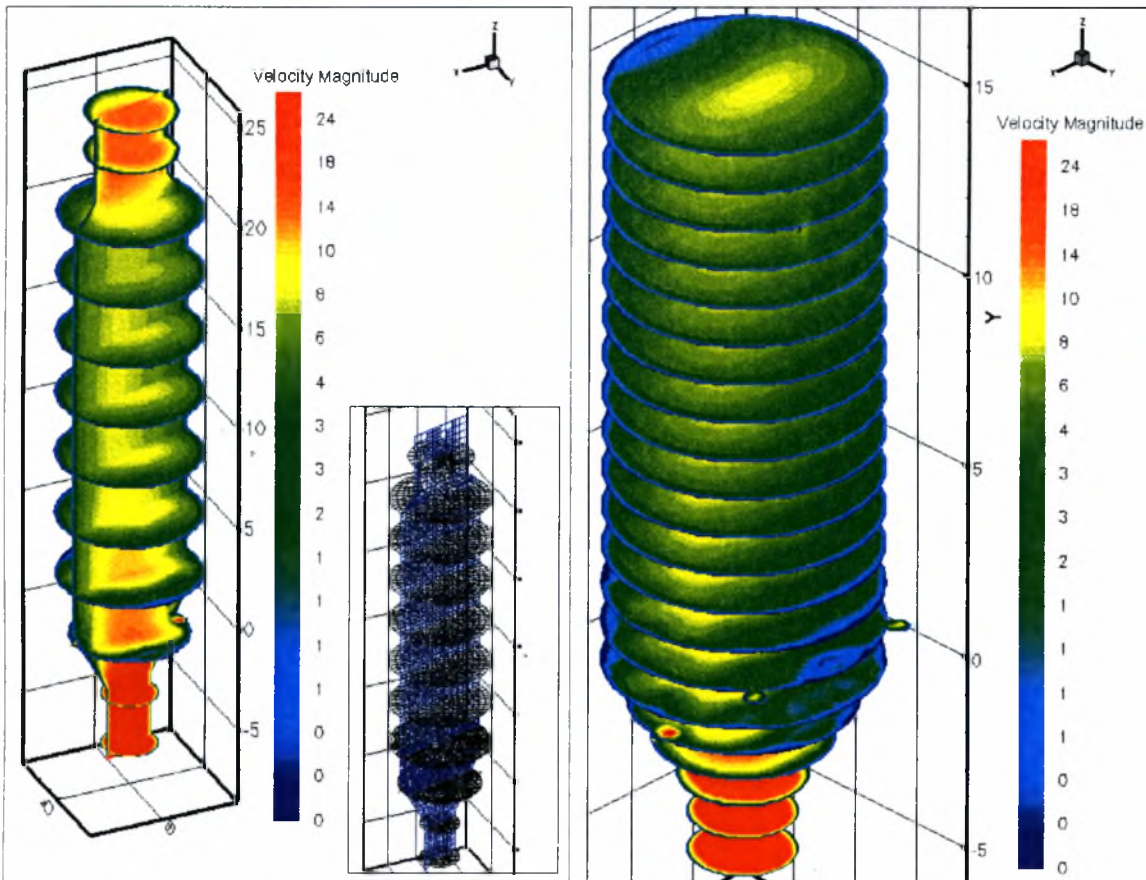


Σχήμα 5-5 Επίπεδα τομών για γωνίες 90, 120 και 150 μοιρών από το επίπεδο συμμετρίας

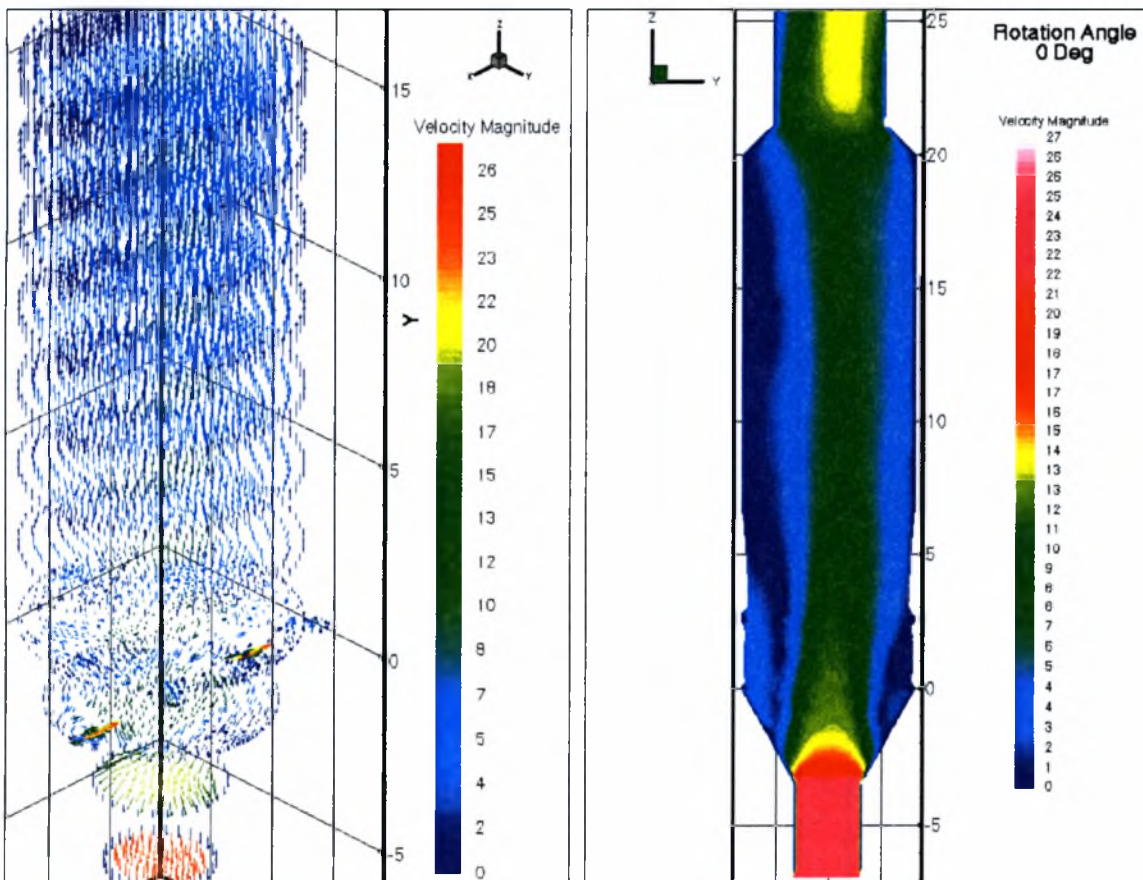
Η σειρά των αποτελεσμάτων όπως παρουσιάζονται είναι η εξής. Πρώτα παρατίθενται τα συνοπτικά τρισδιάστατα γραφικά σε πυκνή και αραιή διάταξη των οριζόντιων τομών και στην συνέχεια ακολουθούν οι κάθετες τομές της διάταξης. Όλες οι παραστάσεις εμφανίζουν και το συμμετρικό είδωλο του μοντέλου για την εποπτικότερη αντίληψη των φαινομένων. Η επιλογή των γωνιών έγινε με γνώμονα την αντιπροσωπευτικότερη παρουσίαση των βασικών διεργασιών της καύσης και της ασβεστοποίησης, αλλά και της κωδικοποίησης των αποτελεσμάτων για την αξιολόγησή τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι κάθετες τομές στις συγκεκριμένες γωνιακές θέσεις χρησιμοποιούνται για να παρουσιάσουν τα πεδία ταχυτήτων, των θερμοκρασιών και των συγκεντρώσεων.

Τα πεδία συγκεντρώσεων που παρουσιάζονται, αφορούν τις συγκεντρώσεις CO_2 , H_2O και O_2 . Το CO_2 επιλέχθηκε γιατί αποτελεί το κύριο αέριο προϊόν της ασβεστοποίησης και οι συγκεντρώσεις του συνιστούν μέτρο για την εξέλιξη της θερμικής διάσπασης αλλά και για την απόδοση της διεργασίας. Το H_2O επιλέχθηκε γιατί οι ατμοί του παίζουν σημαντικό ρόλο στην πυρόλυση του κάρβουνου αλλά και στην μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία λόγω της υψηλής απορροφητικότητας (το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του CO_2) και τέλος, οι συγκεντρώσεις του O_2 δεικνύουν σε σημαντικό βαθμό την πορεία και την ένταση της καύσης του κάρβουνου.

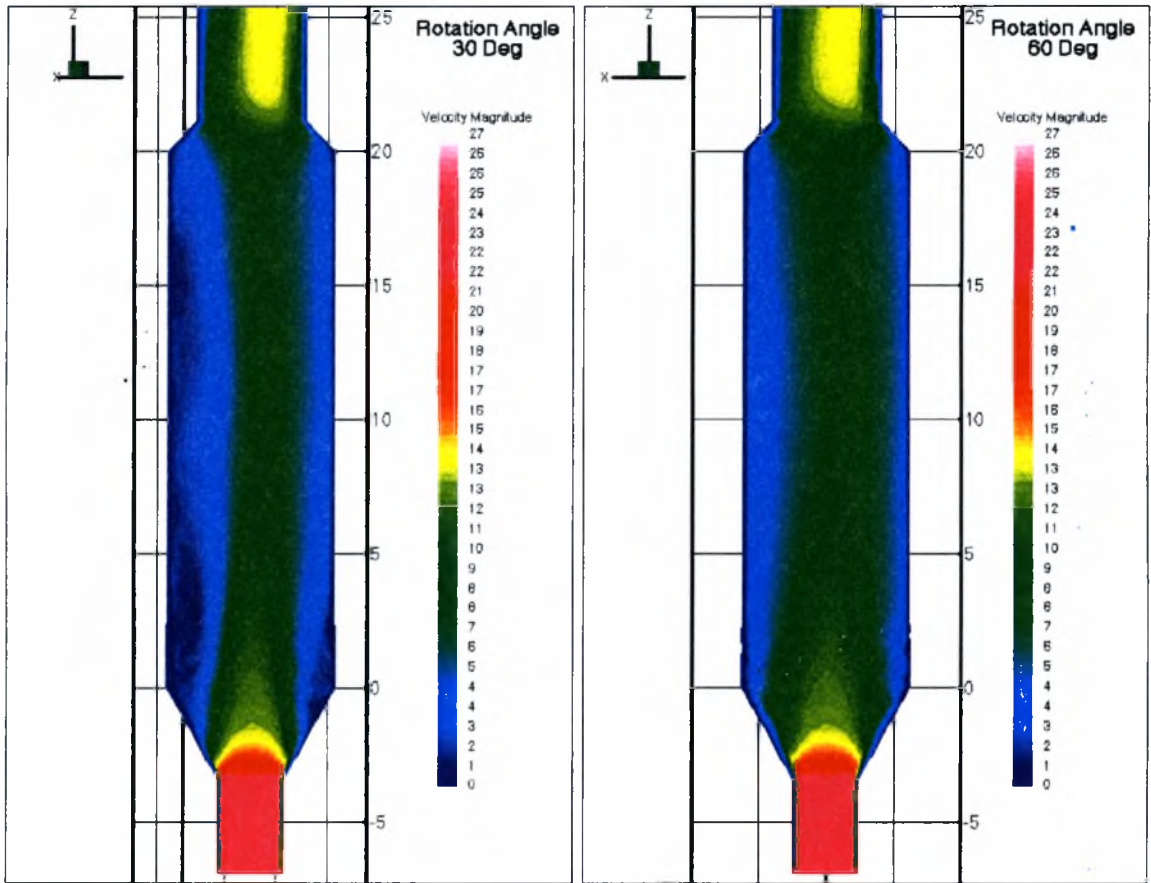
Στην επόμενη ομάδα γραφικών παρουσιάζονται οι τροχιές των σωματιδίων στο σύνολο τους, αλλά και ξεχωριστά ανάλογα με το είδος τους. Στο τέλος, παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις η καθ' ύψος εξέλιξη ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών των διεργασιών ασβεστοποίησης.



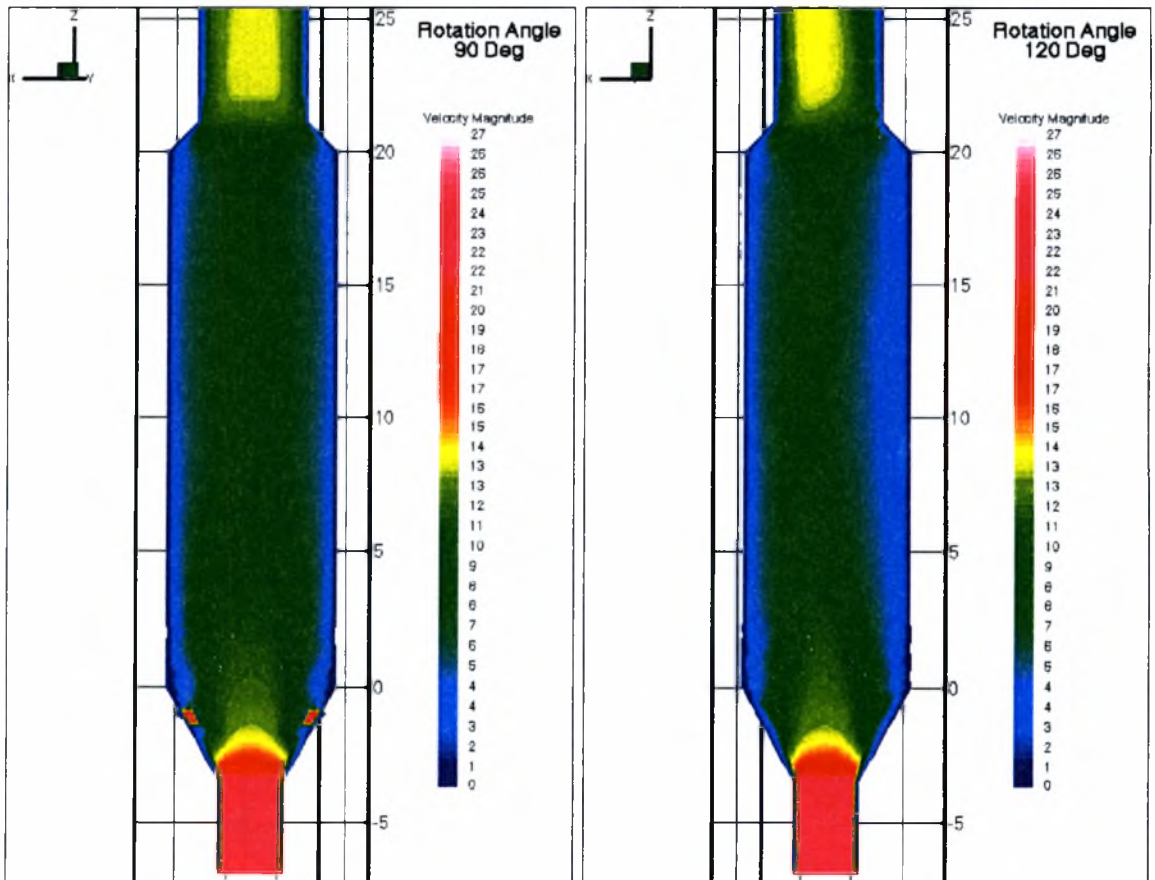
Σχήμα 5-6 Οριζόντιες τομές σε πυκνή και αραιή διάταξη σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 1)



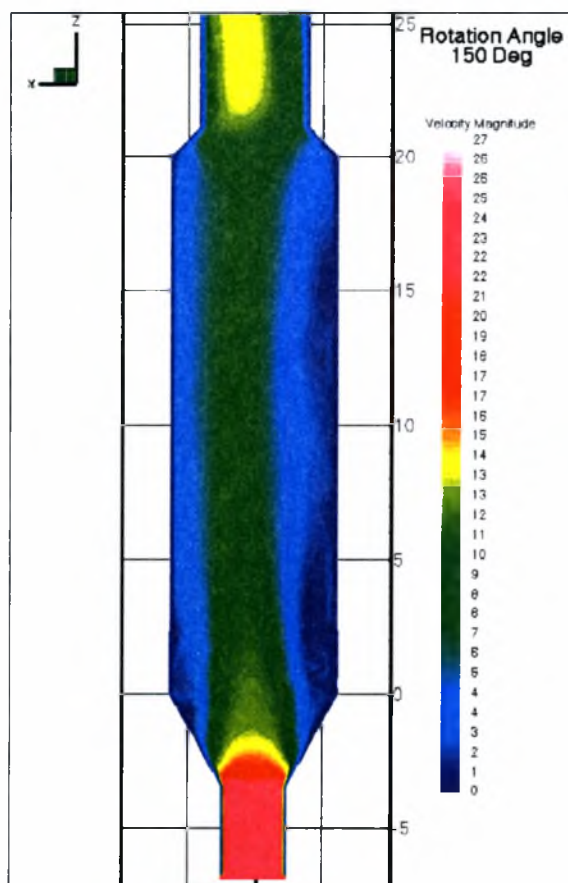
Σχήμα 5-7 Διανύσματα ταχυτήτων και κατανομή ταχυτήτων στο συμμετρικό επίπεδο (Περίπτωση 1)



Σχήμα 5-10 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με περιεχόμενες γωνίες 30 και 60 μοίρες (Περίπτωση 1)

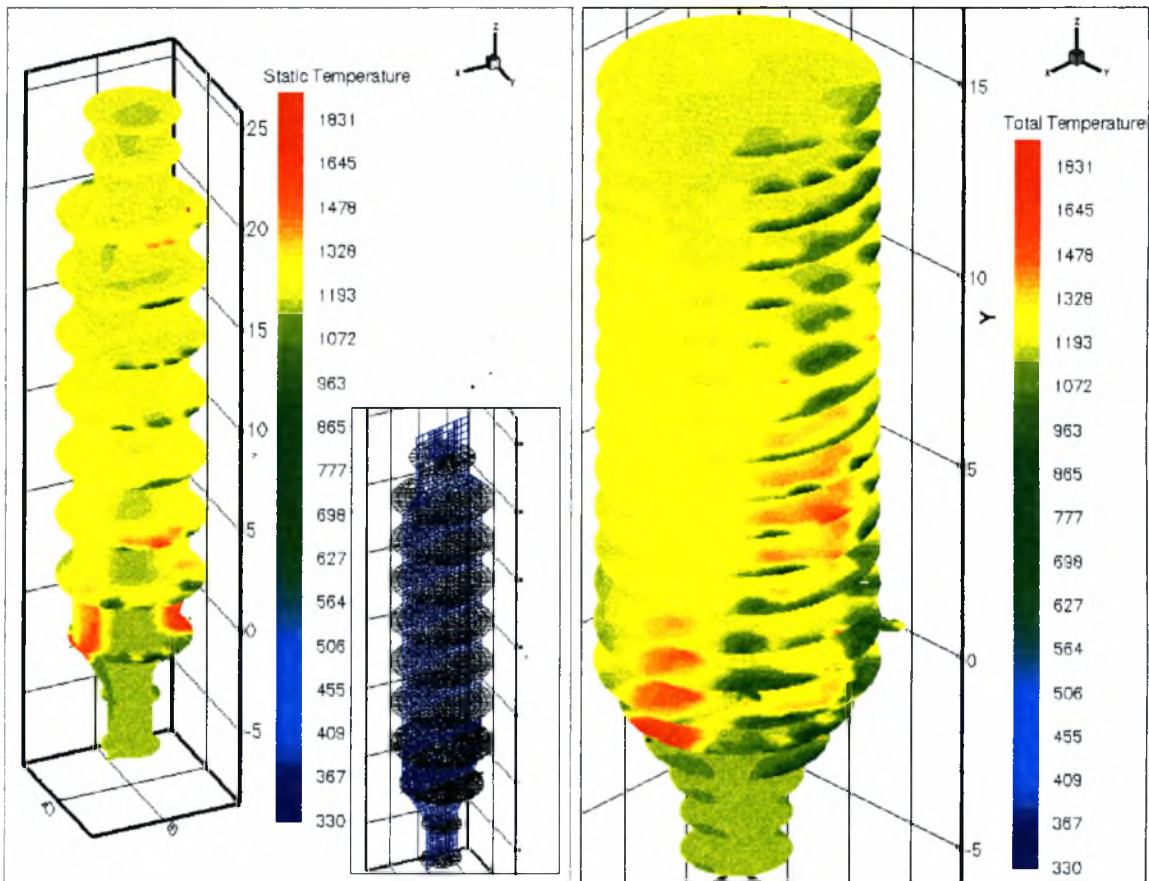


Σχήμα 5-9 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με περιεχόμενες γωνίες 90 και 120 μοίρες (Περίπτωση 1)

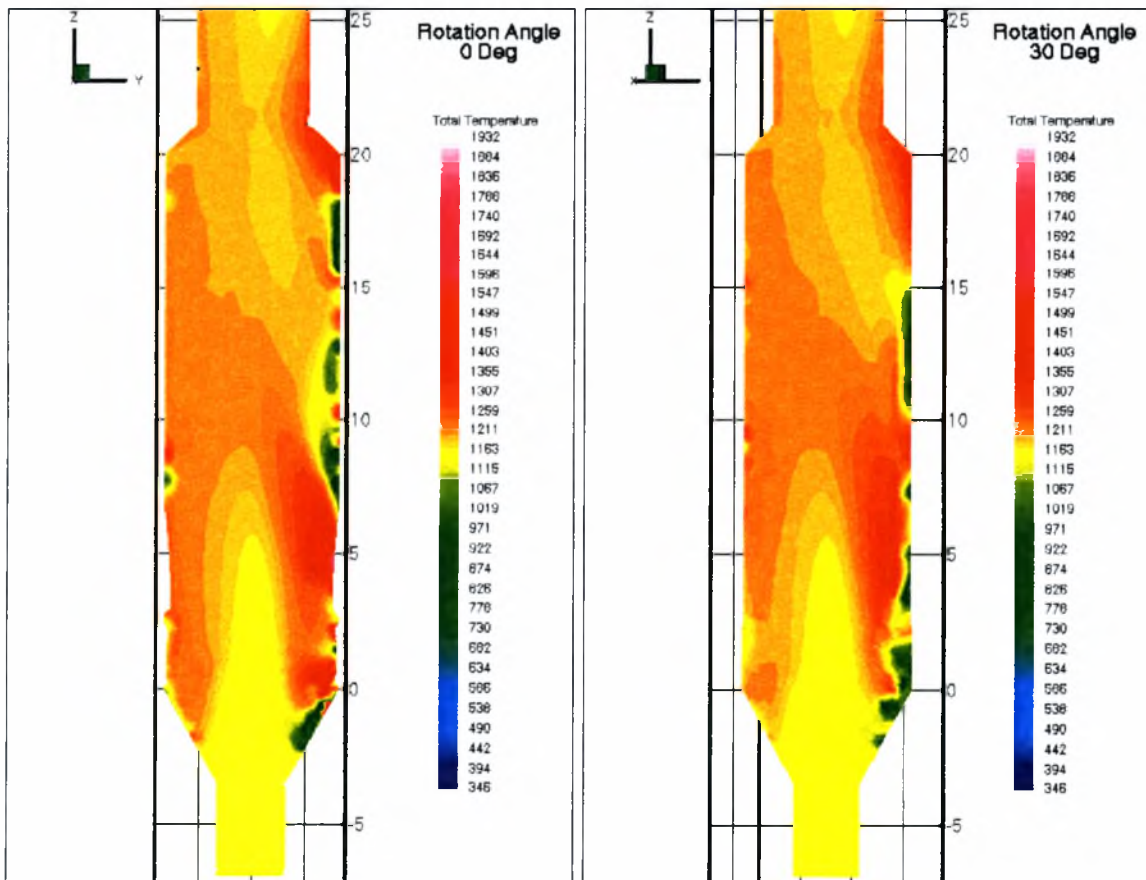


Σχήμα 5-10 Κατανομή ταχυτήτων στο επίπεδο των 150 μοιρών (Περίπτωση 1)

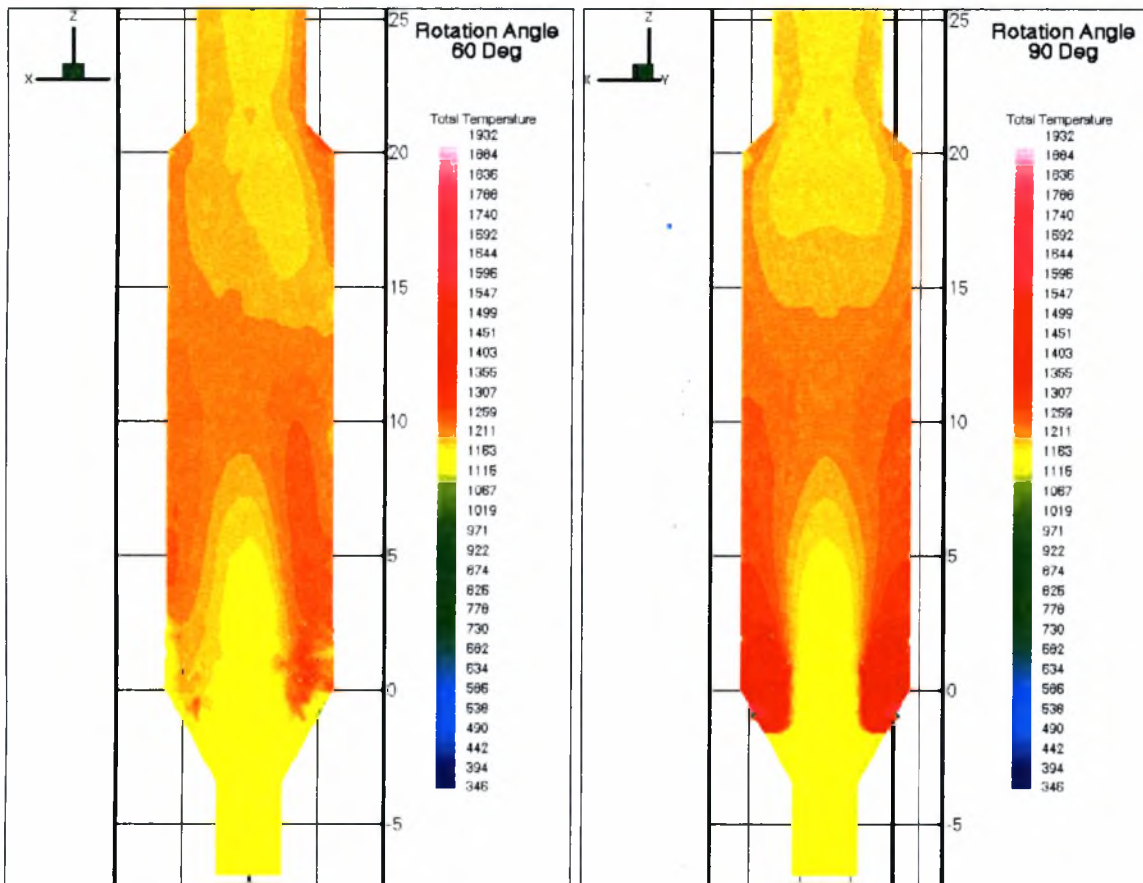
Τα Σχήματα 5-6 έως 5-10 παρουσιάζουν την εξέλιξη της ταχύτητας της συνεχούς αέρας φάσης μέσα στην διάταξη για την Περίπτωση 1. Η είσοδος του τριτογενούς αέρα γίνεται με ταχύτητα 24 m/sec, όπου στην αρχή της κωνικής διάταξης το σύνολο των αερίων υφίσταται μια απότομη μείωση της ταχύτητας γεγονός που οφείλεται στην είσοδο πρώτα του κάρβουνο και έπειτα της φαρίνας. Στο κύριο κυλινδρικό κορμό της διάταξης διατηρείται η ταχύτητα σταθερή στα 6~7 m/sec, εμφανίζοντας περιοχές με ακόμη μικρότερες ταχύτητες ανάμεσα στις δύο εισόδους της φαρίνας και στην αντιδιαμετρική από αυτές άνω περιοχή (στην συμβολή με την άνω κωνική διαμόρφωση). Αυτό είναι απόρροια της αλληλεπίδρασης του συνολικού σωματιδιακού φορτίου που ξεπερνά το 58% του συνολικής μάζας και αντίστοιχα επηρεάζει την ταχύτητα της συνεχούς φάσης στην έξοδο. Στην έξοδο παρουσιάζεται μια περιοχή με υψηλότερες ταχύτητες, γεγονός που οφείλεται επίσης στις τροχιές που διαγράφουν τα σωματίδια. Στην συγκεκριμένη περιοχή οι τροχιές εμφανίζουν μικρότερη συγκέντρωση, με αποτέλεσμα ο χώρος αυτός να προσφέρεται για ταχύτερη και λιγότερο ανεμπόδιστη διαφυγή προς τον τελευταίο κυκλώνα -ανακομιστή της πολυβάθμιας συστοιχίας. Οι μικρότερες ταχύτητες που σημειώνονται γύρω από τον κορμό, οφείλονται στις συννοριακές συνθήκες μηδενικής ταχύτητας ή και στην υψηλή συγκέντρωση σωματιδιακού φορτίου. Επίσης, η είσοδος του καυσίμου δεν εμποδίζει αλλά επιταχύνει σχετικά την άνοδο των αερίων.



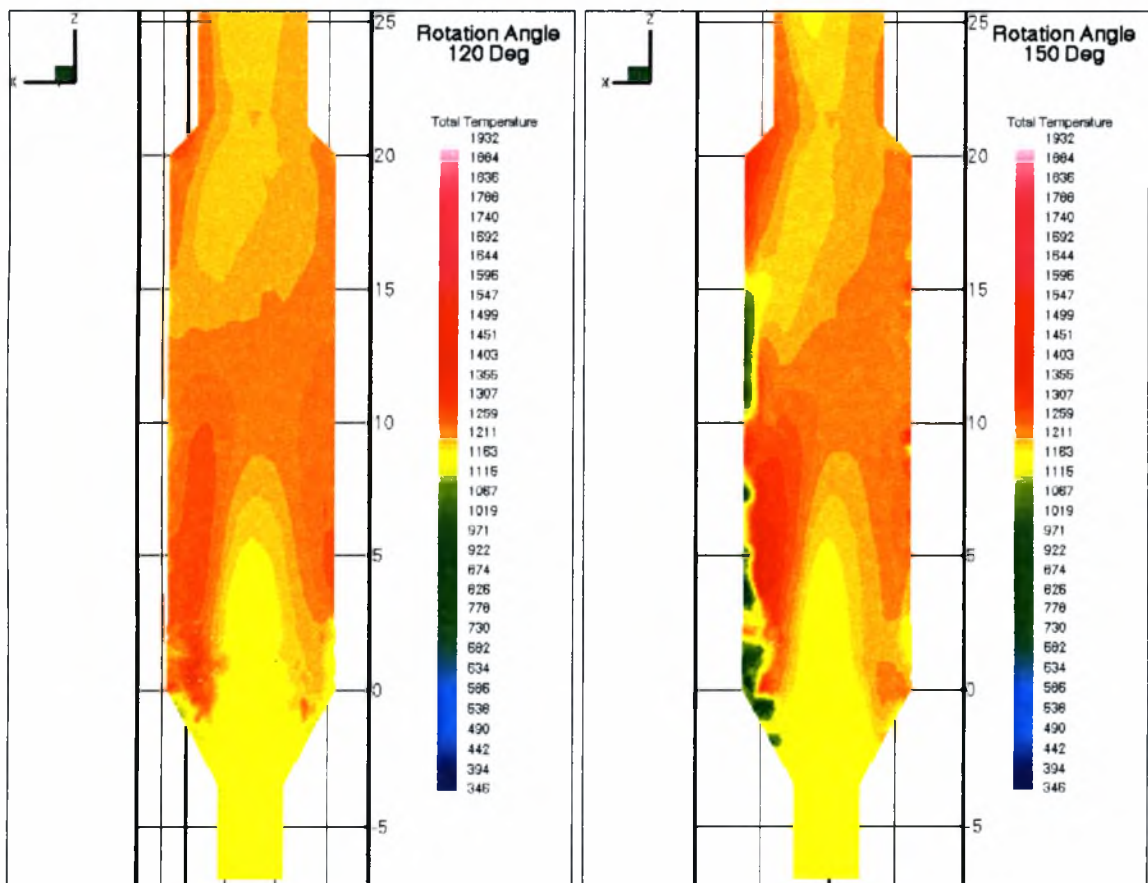
Σχήμα 5-11 Οριζόντιες τομές θερμοκρασιακού πεδίου σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 1)



Σχήμα 5-12 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 0 και 30 μοίρες (Περίπτωση 1)

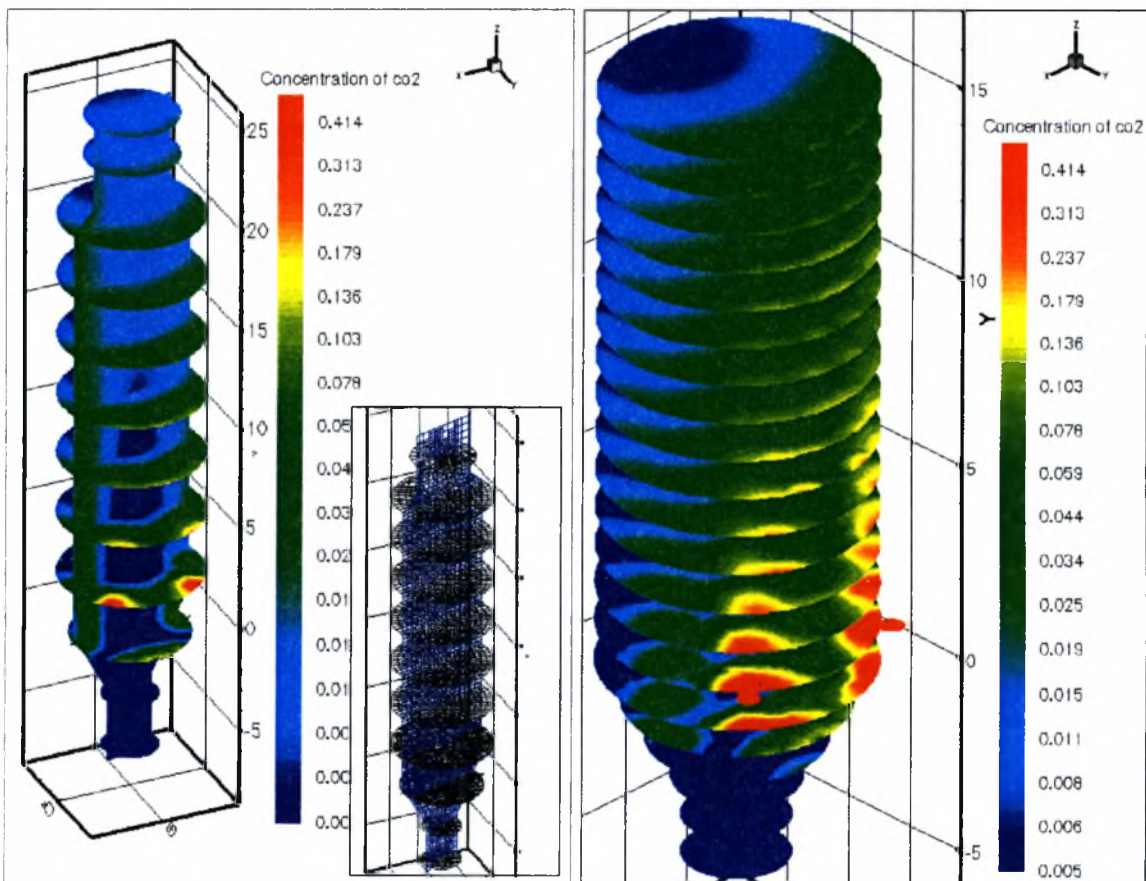


Σχήμα 5-15 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 60 και 90 μοίρες (Περίπτωση 1)

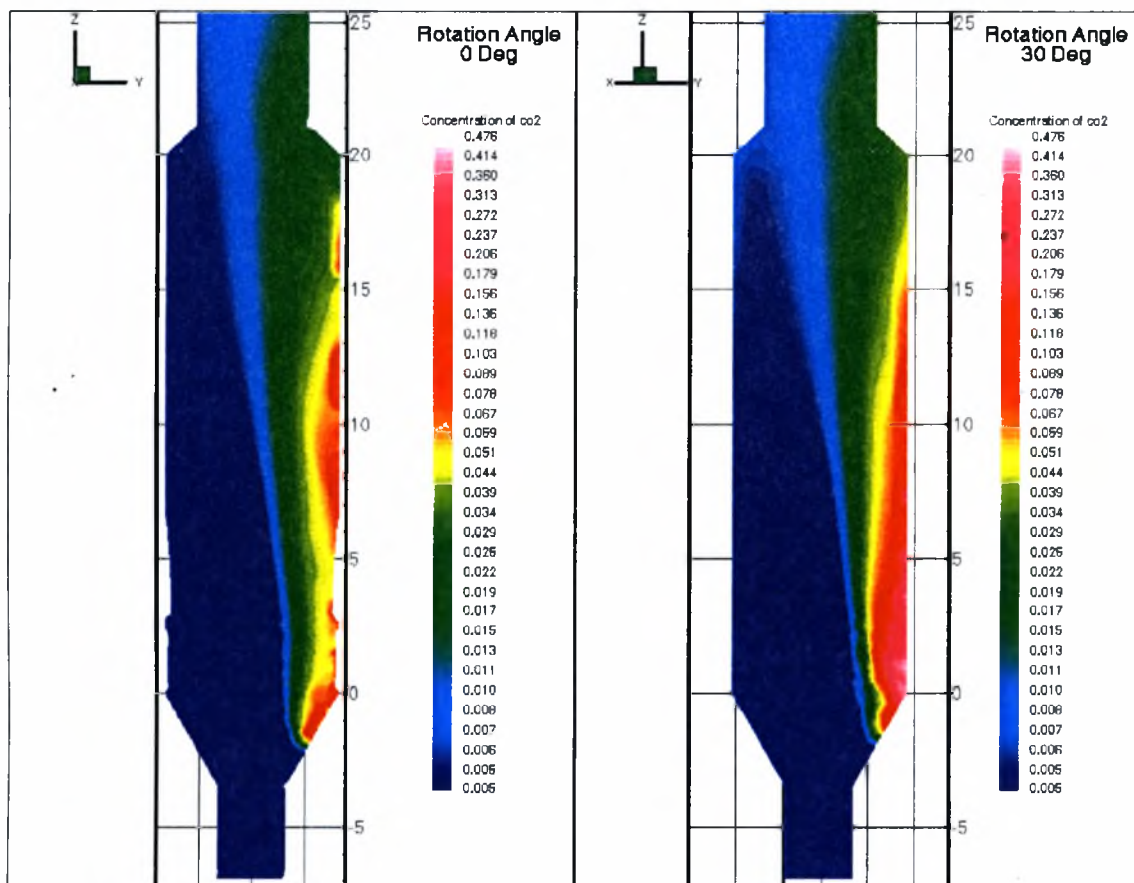


Σχήμα 5-14 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 120 και 150 μοίρες (Περίπτωση 1)

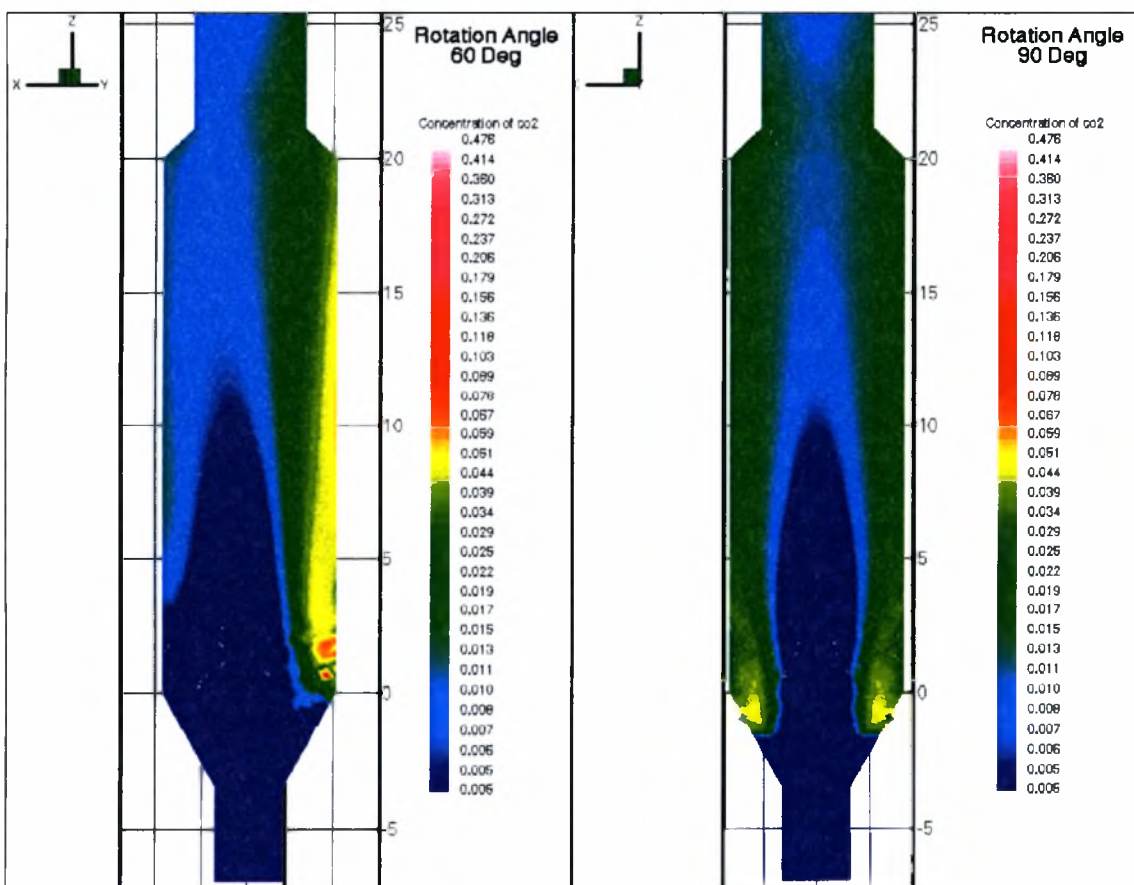
Στα Σχήματα 5-11~5-14 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο που υπολογίζεται για την Περίπτωση 1. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται λίγο μετά την είσοδο του καυσίμου στη περιοχή καύσης των πτητικών ουσιών του κάρβουνου. Οι υψηλές θερμοκρασίες διατηρούνται και σε περιοχές κοντά στα σημεία εισόδου του καυσίμου, γεγονός που υποβοηθείται και από την περιορισμένη ασβεστοποίηση. Ο κύριος κορμός διατηρείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών γύρω από την θερμοκρασία εκκίνησης της ασβεστοποίησης, με αποτέλεσμα η ασβεστοποίηση να συντελείται αργά κατά το ύψος της διάταξης. Οι κηλίδες υψηλών θερμοκρασιών οφείλονται σε σωματίδια κάρβουνου που αιωρούνται σε περιοχές με πολύ μικρή ή μηδενική συγκέντρωση σωματιδίων φαρίνας με αποτέλεσμα η εκλυόμενη θερμότητα να εγκλωβίζεται προσωρινά στα κενά που εμφανίζει το σωματιδιακό φορτίο. Οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται σε περιοχές όπου επικρατούν μικρές ταχύτητες οφείλονται στην μικρή συναγωγή, στις υψηλές συγκεντρώσεις απορροφητικών αερίων και ειδικότερα του CO_2 , που δρα επιβραδυντικά στην αντίδραση ασβεστοποίησης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου επιβεβαιώνουν τις μετρήσεις θερμοκρασιών που έχουν γίνει στην έξοδο και στα τοιχώματα της διάταξης για καύσιμο παρόμοιας σύστασης και θερμογόνου δύναμης.



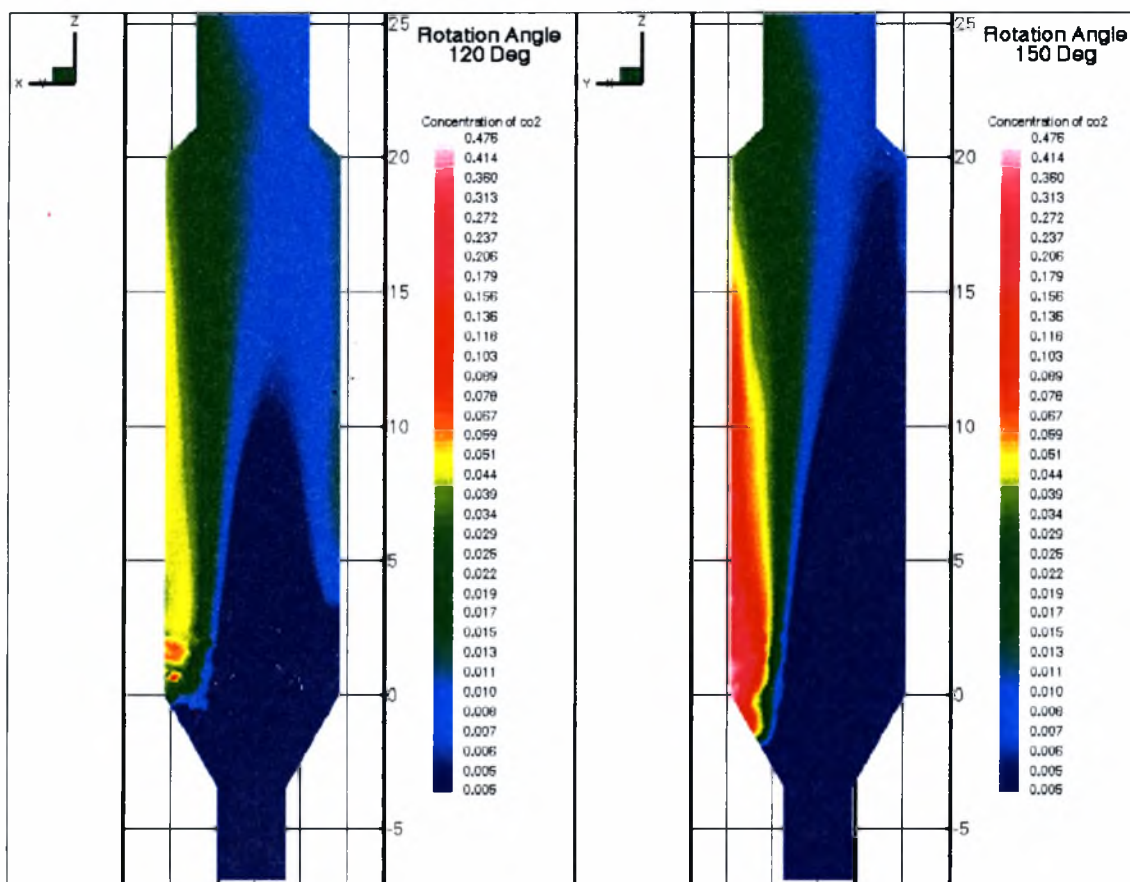
Σχήμα 5-15 Κατανομή πεδίου συγκεντρώσεων CO_2 σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 1)



Σχήμα 5-16 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές με περιεχόμενη γωνία 0 και 30 μοίρες (Περίπτωση 1)

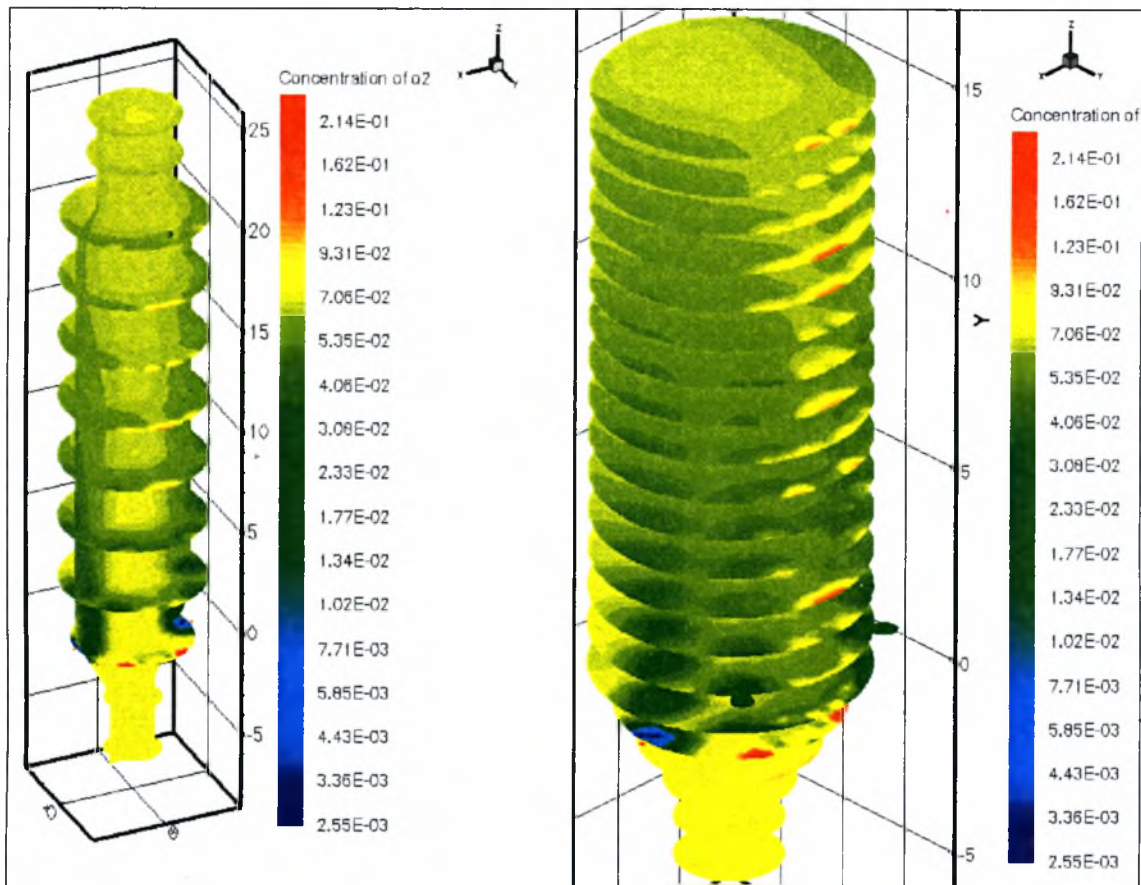


Σχήμα 5-17 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές με περιεχόμενη γωνία 60 και 90 μοίρες (Περίπτωση 1)

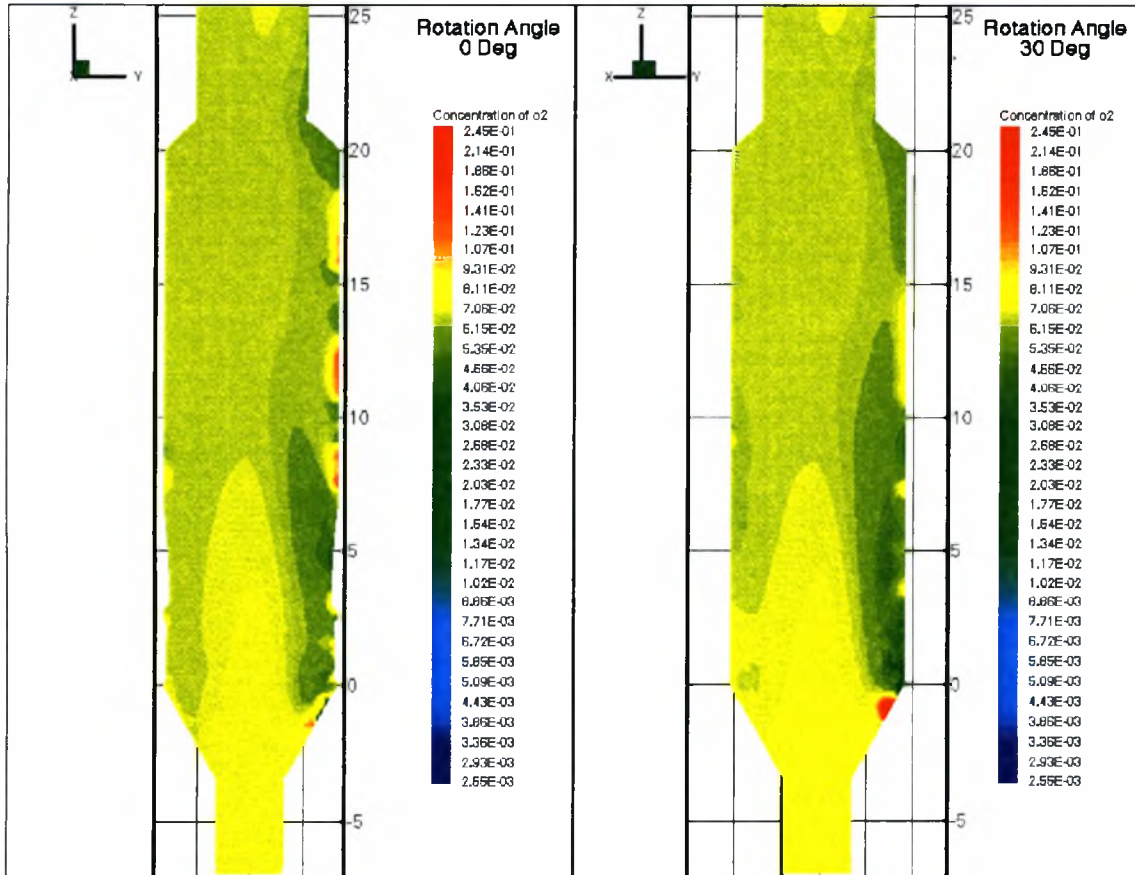


Σχήμα 5-18 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές με περιεχόμενη γωνία 120 και 150 μοίρες (Περίπτωση 1)

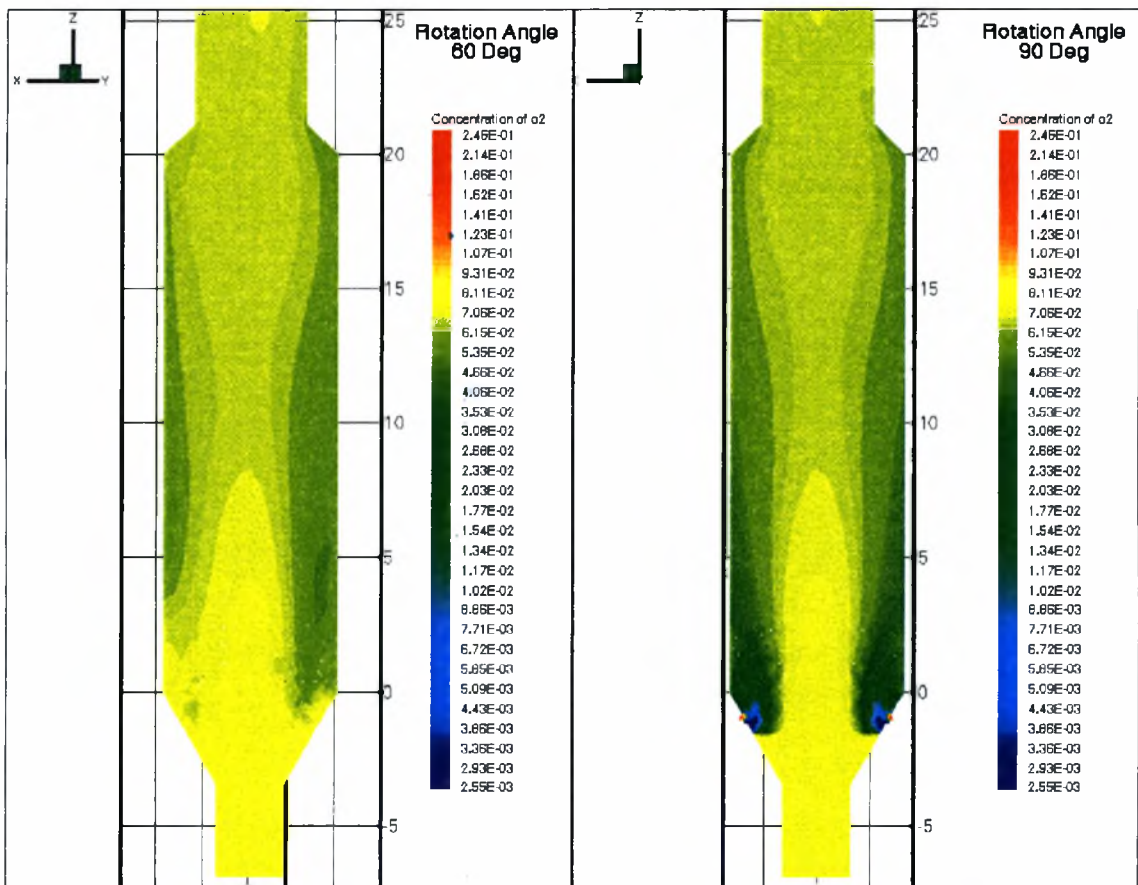
Στα Σχήματα 5-15 έως 5-18 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων του CO₂. Οι υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις εμποδίζουν τον ρυθμό επιφανειακής αντίδρασης να λάβει υψηλές τιμές (καθώς αυτός εξαρτάται ισχυρά από την μερική πίεση του CO₂) με αποτέλεσμα το στρώμα του CO₂ που δημιουργείται να περιορίζει την διάσπαση του CaCO₃. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης CO₂ σημειώνεται, εκεί όπου πραγματοποιείται η εντονότερη ασβεστοποίηση, λίγο μετά την είσοδο της φαρίνας στην διάταξη. Οι συγκεντρώσεις του CO₂ μειώνονται προοδευτικά μέχρι την έξοδο, γιατί μειώνεται και η διαθέσιμη ποσότητα CaCO₃ κατά την εξέλιξη της αντίδρασης. Οι συγκεντρώσεις του CO₂ που προκαλούνται από την καύση του κάρβουνου είναι συγκριτικά μικρότερες από αυτές που οφείλονται στην ασβεστοποίηση, σε αναλογία 1:5. Από το σύνολο των παραπάνω Σχημάτων διαπιστώνεται ότι η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται κατά μείζονα λόγο στον ημικόλινδρο που οριοθετούν τα ακροφύσια εισόδου του καυσίμου και οι προσαγωγοί της φαρίνας.



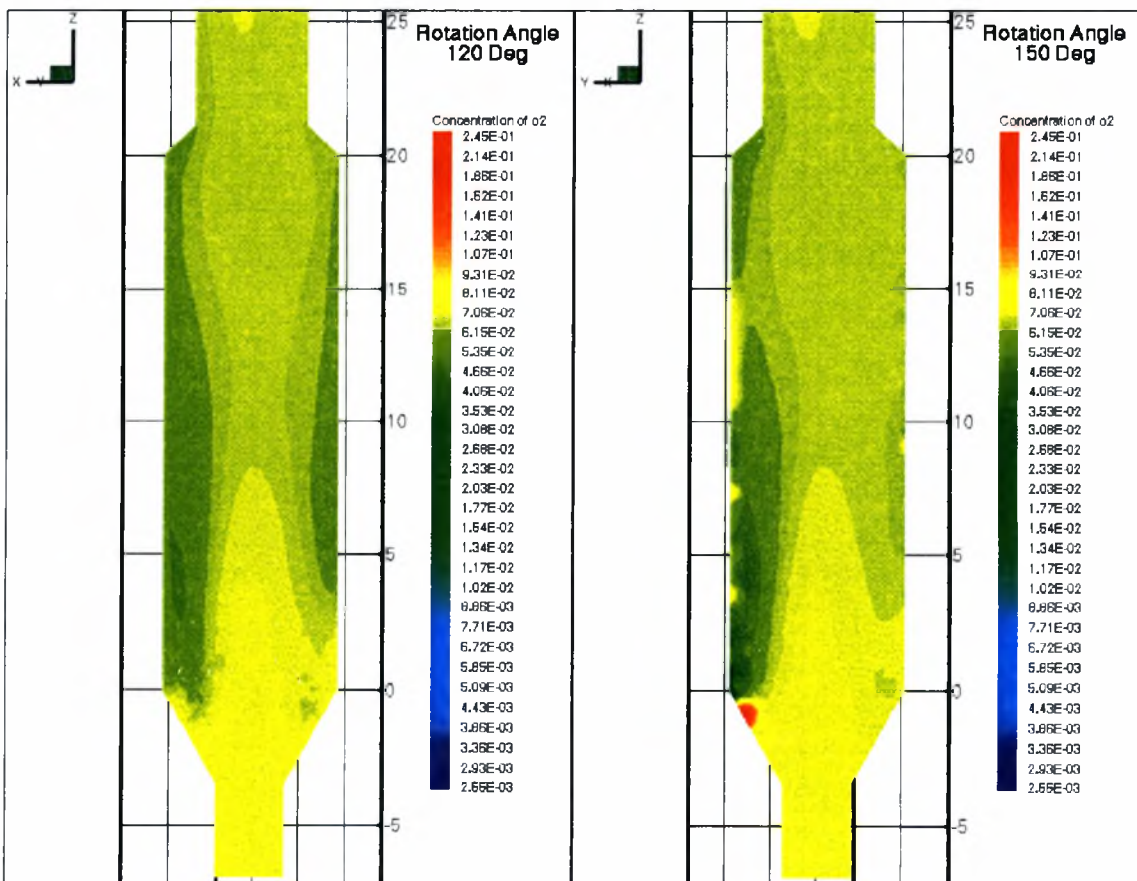
Σχήμα 5-19 Κατανομή συγκεντρώσεων O_2 σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 1)



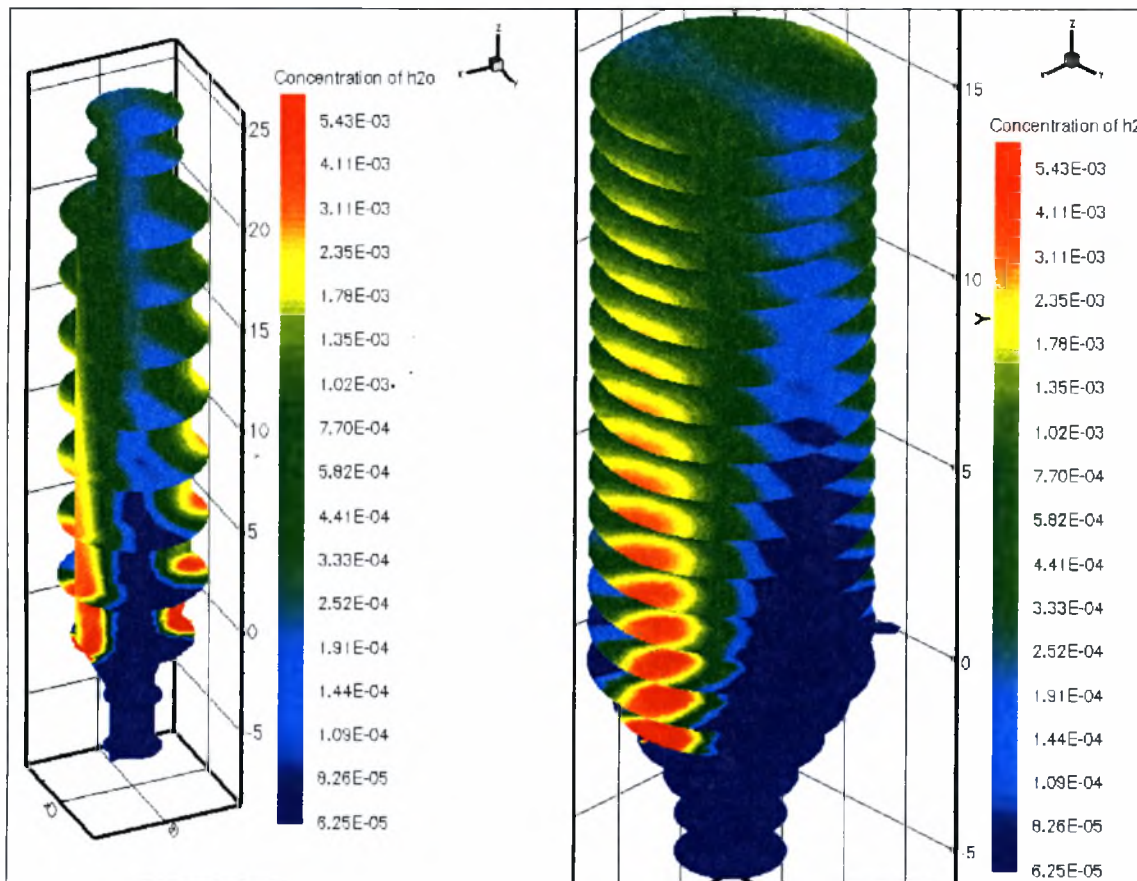
Σχήμα 5-20 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές γωνιών 0 και 30° (Περίπτωση 1)



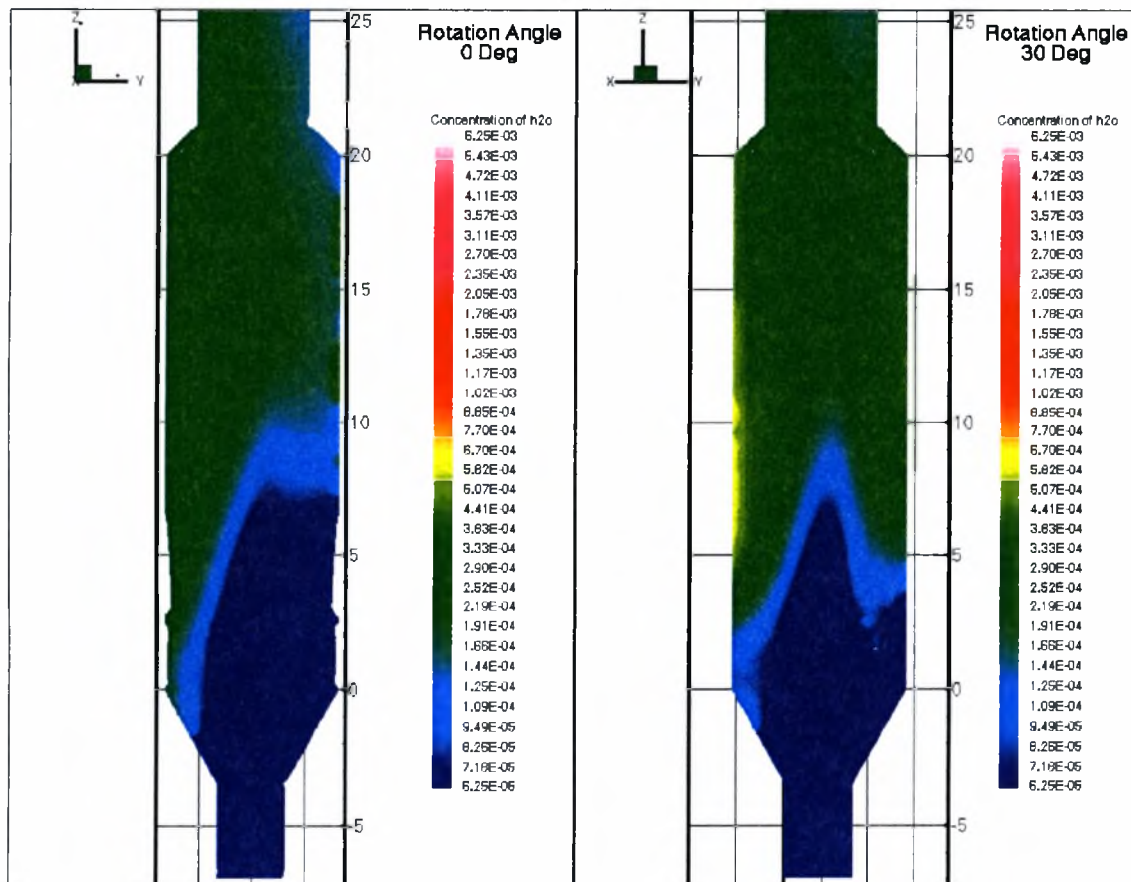
Σχήμα 5-21 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές γωνιών 60 και 90° (Περίπτωση 1)



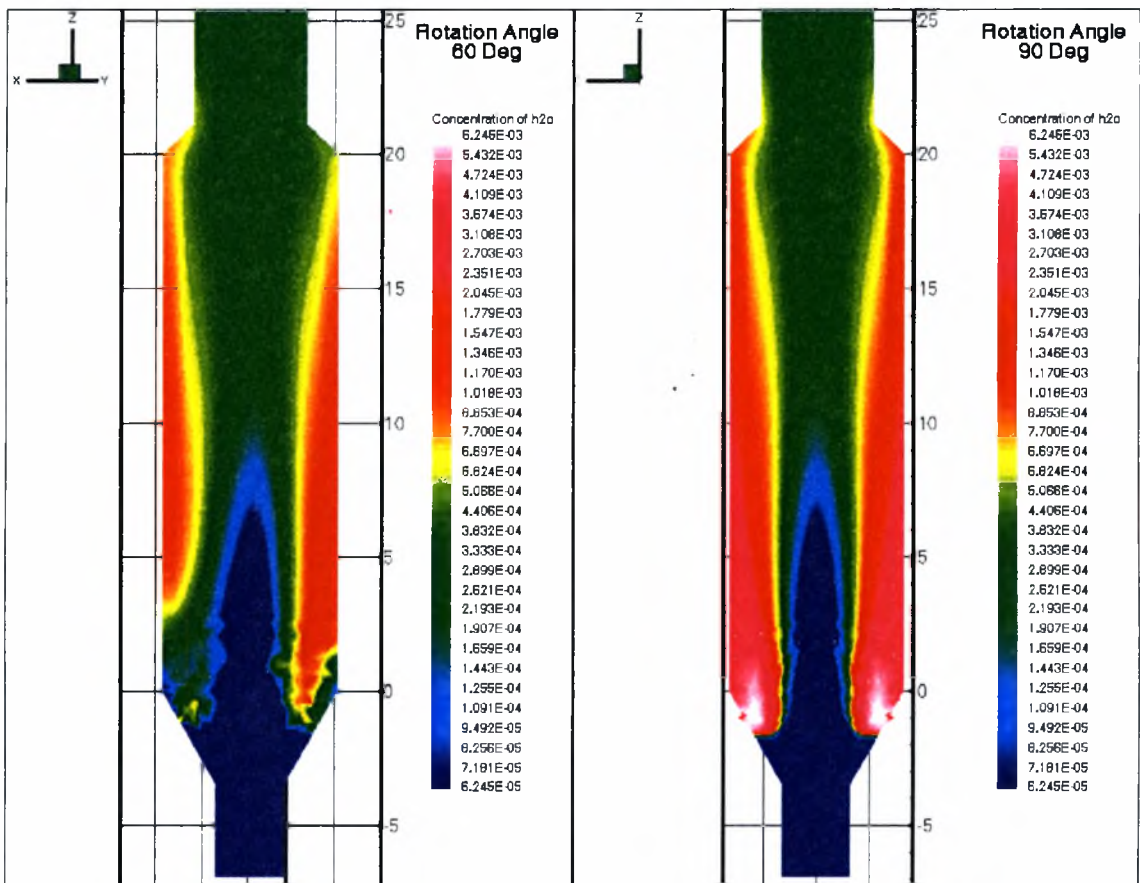
Σχήμα 5-22 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές με περιεχόμενη γωνία 120 και 150 μοίρες (Περίπτωση 1)



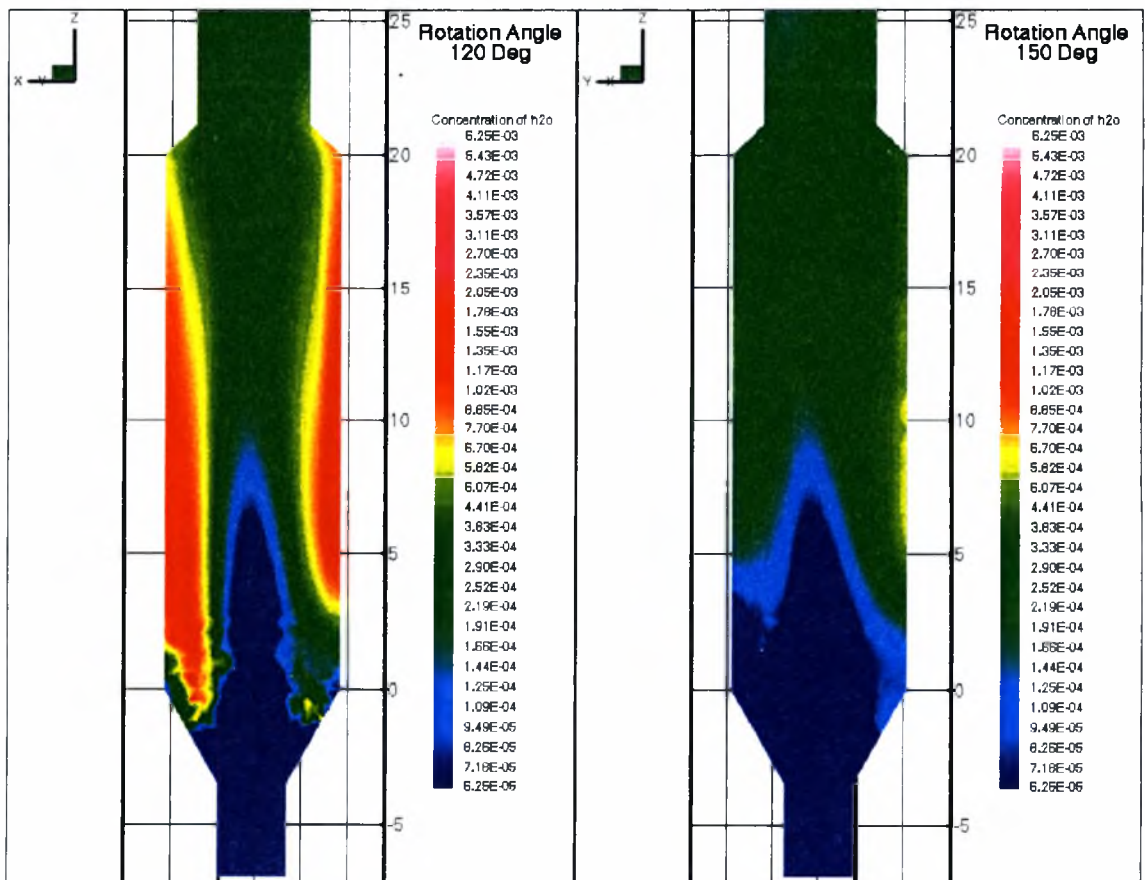
Σχήμα 5-23 Κατανομή συγκεντρώσεων H_2O σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 1)



Σχήμα 5-24 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με γωνία 0 και 30 μοίρες (Περίπτωση 1)

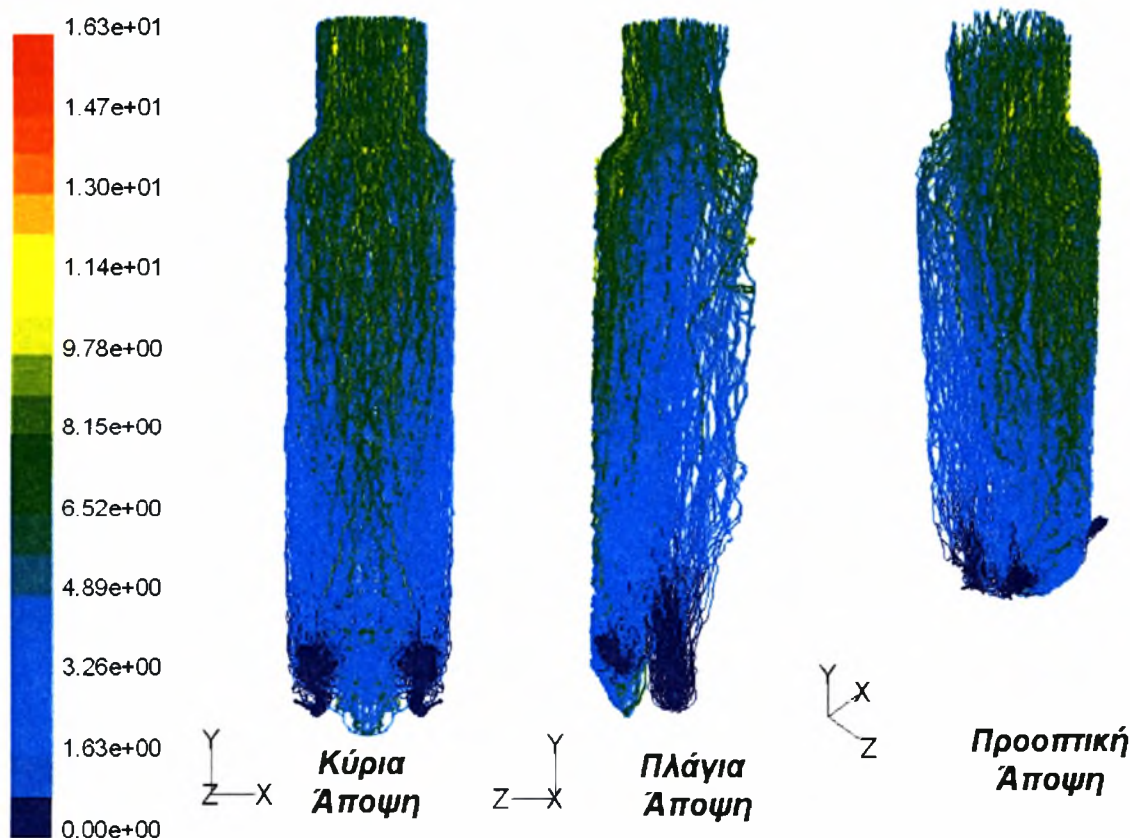


Σχήμα 5-25 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με περιεχόμενη γωνία 60 και 90 μοίρες (Περίπτωση 1)

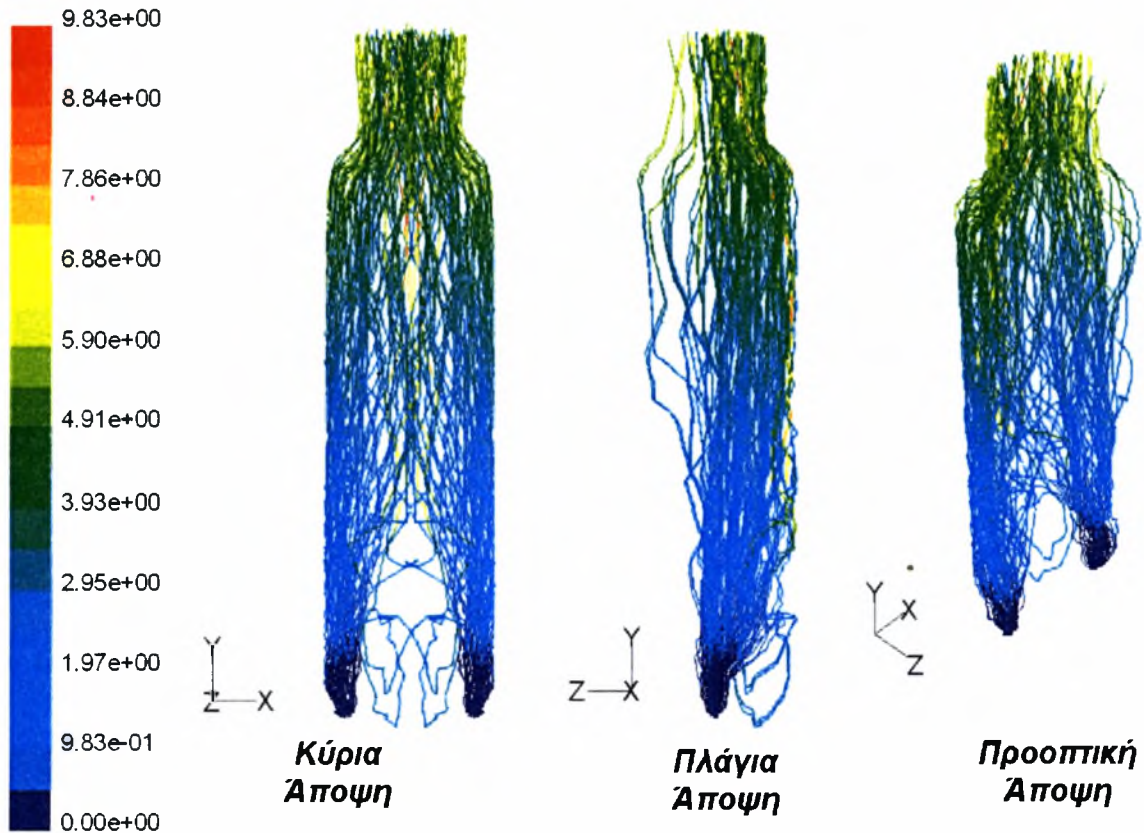


Σχήμα 5-26 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με γωνία 120 και 150° (Περίπτωση 1)

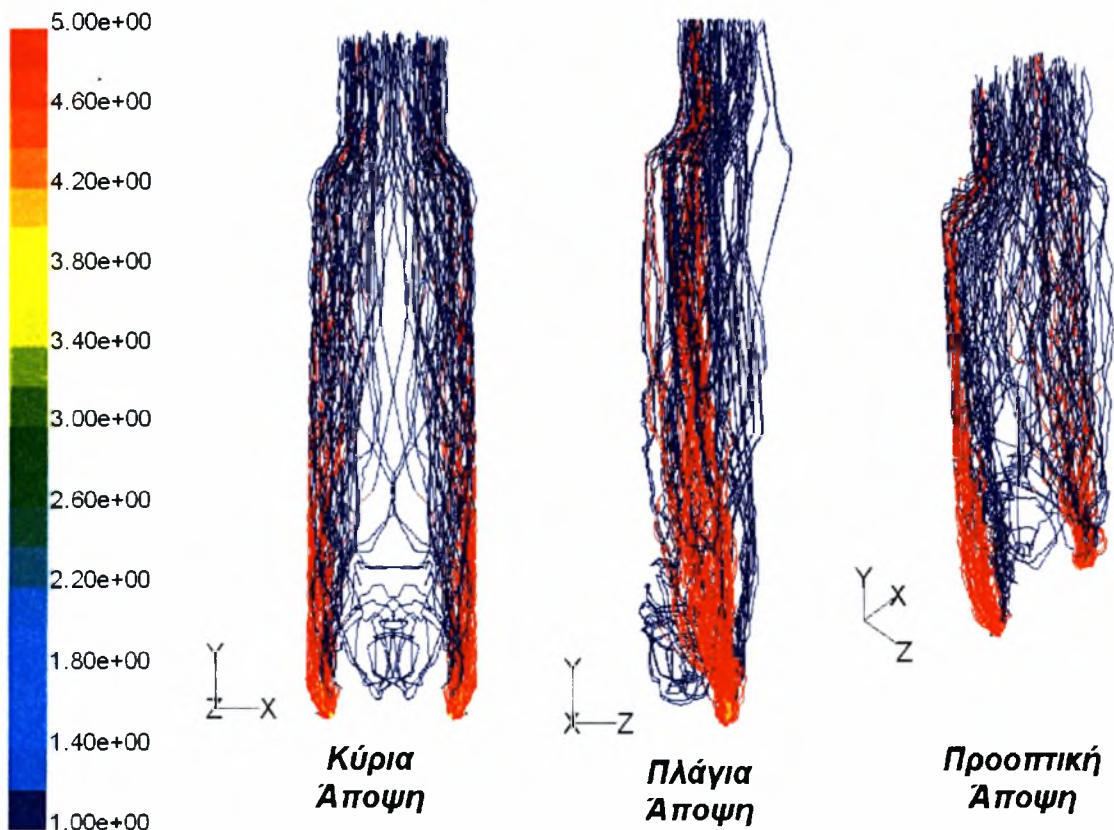
Στα Σχήματα 5-19 έως 5-26 εμφανίζονται οι συγκεντρώσεις του O_2 και του H_2O . Οι συγκεντρώσεις αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιολόγηση της καύσης, διότι η παρουσία του O_2 αντανακλά την ένταση και την ποιότητα της καύσης ιδίως όταν αυτή ελέγχεται από μηχανισμούς επιφανειακής διάχυσης. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις O_2 παρατηρούνται στις περιοχές όπου η φλόγα είναι έντονη και δυνατή δηλαδή στις περιοχές πυρόλυσης και έναρξης της καύσης του στερεού υπολείμματος άνθρακα. Επίσης, στο τμήμα του ημικυλίνδρου που συντελείται έντονη ασβεστοποίηση, παρατηρούνται κηλίδες με χαμηλή τοπική συγκέντρωση O_2 , που αντιστοιχούν σε περιοχές που έχουν εγκλωβιστεί σωματίδια κάρβουνου και συγχρόνως εμφανίζουν μικρό φορτίο σωματιδίων φαρίνας και υψηλή συγκέντρωση CO_2 . Η διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων O_2 κατά το ύψος του κύριου κορμού της διάταξης, οφείλεται στην μείωση του ρυθμού καύσης αλλά και στην παραγωγή CO_2 που δεσμεύει ανάλογο όγκο. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις H_2O κάνουν την εμφάνιση τους λίγο μετά την είσοδο του καυσίμου από τα ακροφύσια. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται με την θέρμανση του καυσίμου και ακριβώς κατά την έναυση της πυρόλυσης του κάρβουνου. Οι συγκεντρώσεις αυτές ελαττώνονται κατά το ύψος της διάταξης.



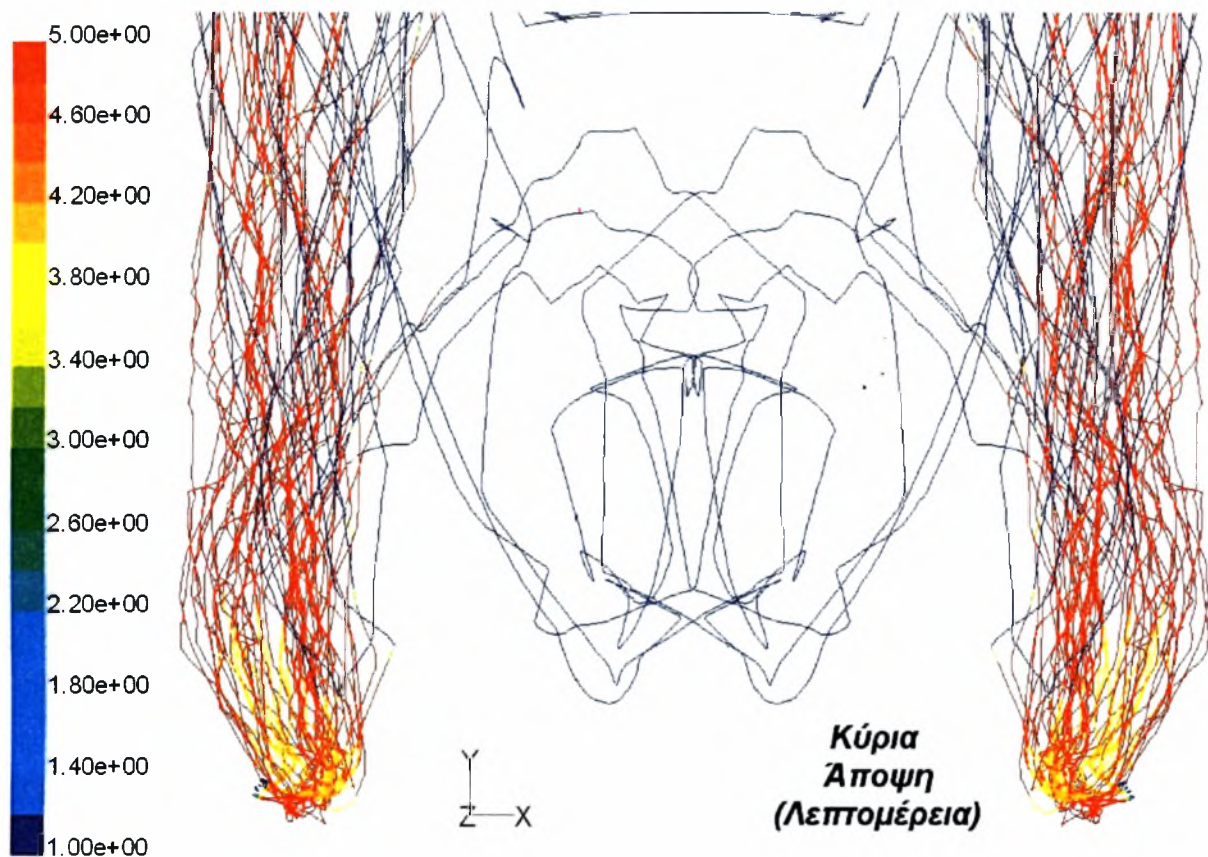
Σχήμα 5-27 Τροχιές που διαγράφονται μέσα στον ασβεστοποιητή και από τα δύο είδη σωματιδίων (Περίπτωση 1)



Σχήμα 5-28 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων κάρβουνου [σε sec] (Περίπτωση 1)

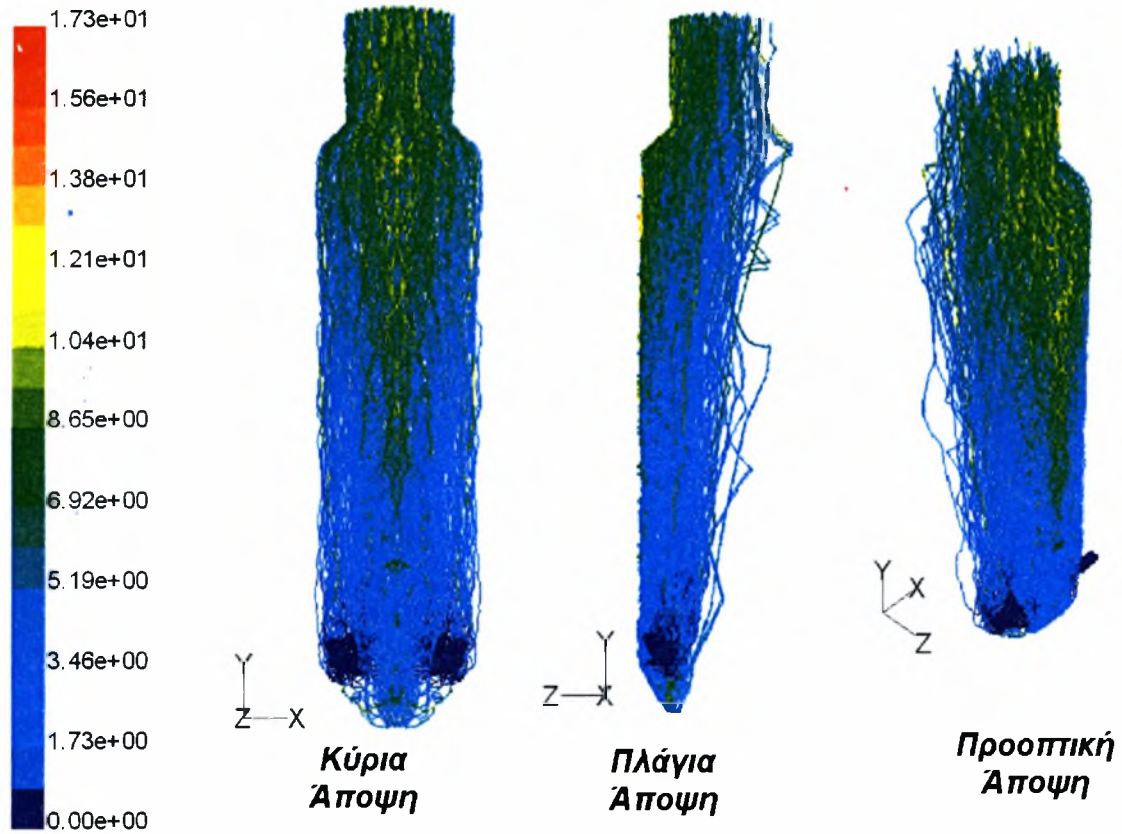


Σχήμα 5-29 Εξάτμιση και καύση πτητικών, καύση char και ψύξη σωματιδίων κάρβουνου (Περίπτωση 1)

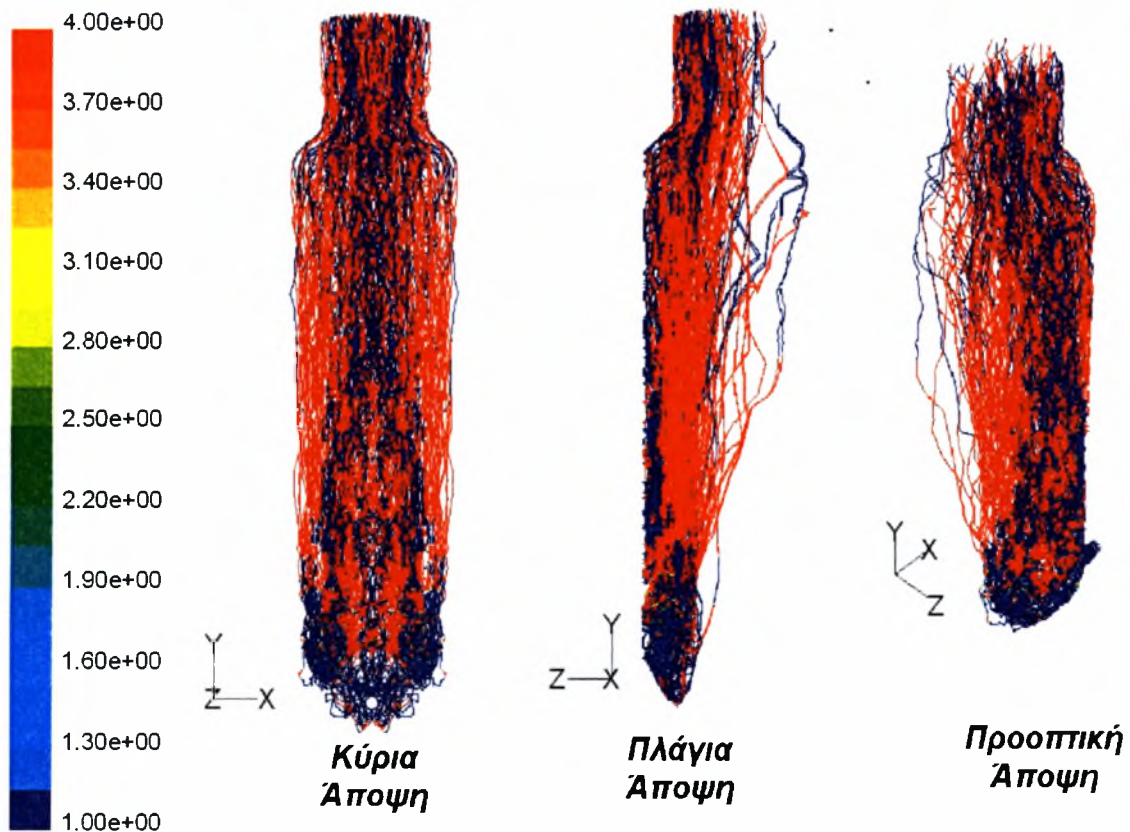


Σχήμα 5-30 Προθέρμανση, εξάτμιση και καύση πτητικών ουσιών σωματιδίων κάρβουνου (Λεπτομέρεια)

Στα Σχήματα 5-27 έως 5-30 παρουσιάζονται οι τροχιές που διαγράφουν και τα δύο είδη σωματιδίων (κάρβουνο και φαρίνα) μαζί και ξεχωριστά. Στο Σχήμα 5-27 δίνονται όλες οι τροχιές που διαγράφονται μέσα στον ασβεστοποιητή (περίπου 8000 τροχιές) με διαβάθμιση που δηλώνει τον χρόνο παραμονής του σωματιδίου μέσα στη διάταξη. Οι χρόνοι που σημειώνονται στην συντριπτική τους πλειοψηφία δεν ξεπερνούν τα 10 sec ενώ το μέσο μήκος διαδρομής των σωματιδίων είναι περίπου 48m και το μέγιστο περίπου 70m. Από το Σχήμα 5-29 προκύπτει ότι ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων κάρβουνου είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο συνολικό, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα ανόδου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των σωματιδίων φαρίνας, κάτι που είναι προφανές μόνο από την θεώρηση των φυσικών ιδιοτήτων και χωρίς να ληφθούν υπόψη αεροδυναμικά δεδομένα. Στα Σχήματα 5-29 και 5-30 διακρίνονται τα τμήματα των τροχιών επί των οποίων ενεργοποιούνται οι "νόμοι" θερμοχημικής συμπεριφοράς των σωματιδίων, που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Κατά συνέπεια, το μπλε χρώμα στην αρχή της τροχιάς αντιστοιχεί στην προθέρμανση του κάρβουνου, το πράσινο και το κίτρινο στην εξάτμιση και την καύση των πτητικών και το κόκκινο στην καύση του στερεού υπολείμματος άνθρακα του κάρβουνου. Τέλος, το μπλε χρώμα στην απόληξη της τροχιάς υποδηλώνει την ψύξη των σωματιδίων που εξισώνουν την θερμοκρασία τους με την αέρια συνεχή φάση. Το μέσο μήκος διαδρομής αυτών των σωματιδίων είναι 35m ενώ το μέγιστο 48m.

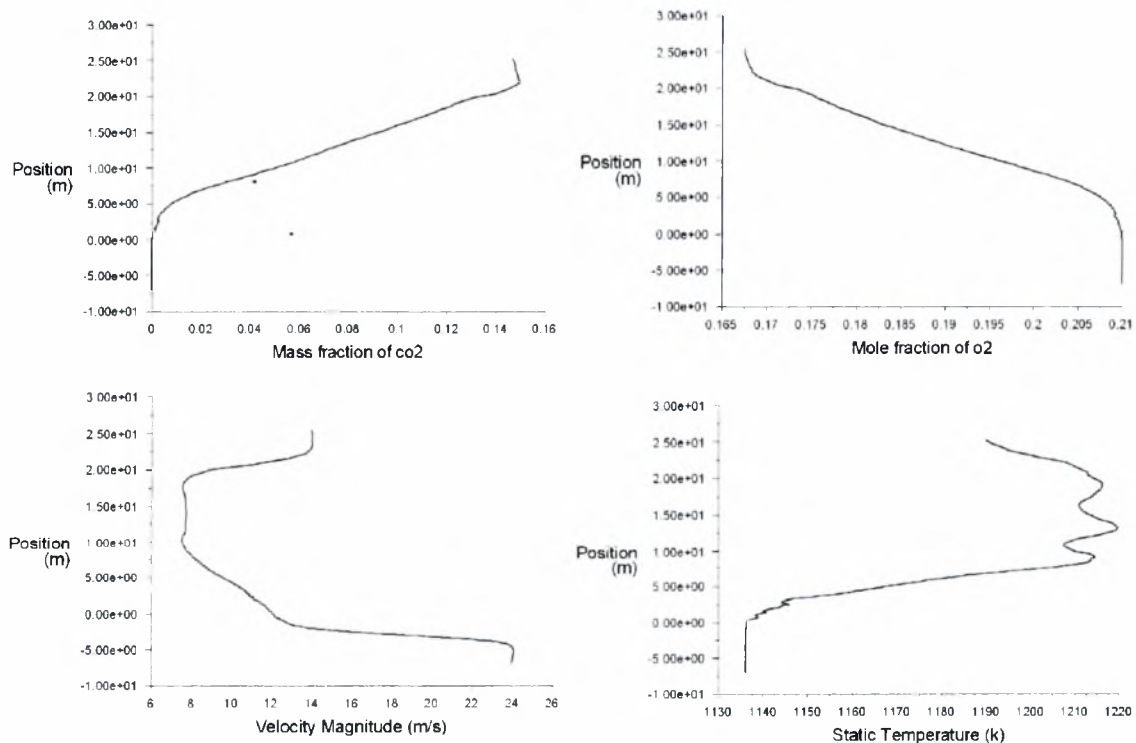


Σχήμα 5-31 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων CaCO_3 [σε sec] (Περίπτωση 1)



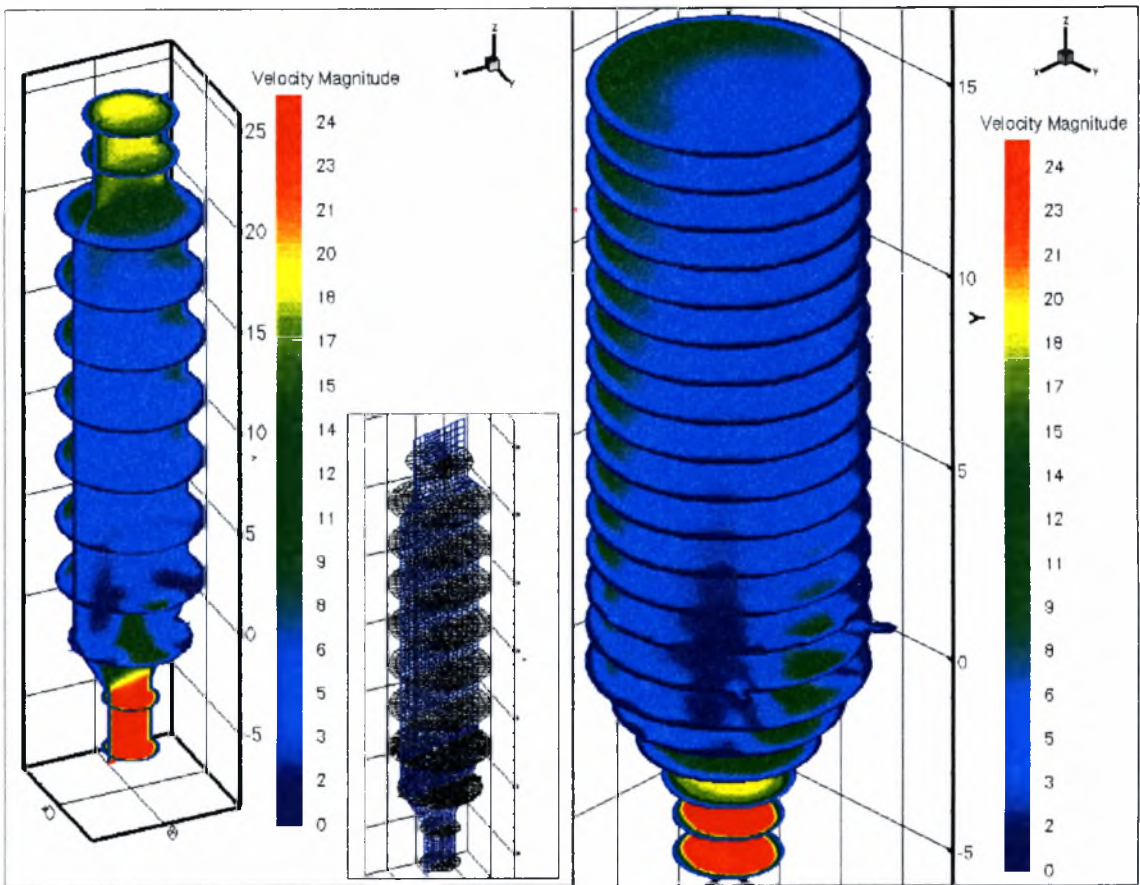
Σχήμα 5-32 Προθέρμανση, ασβεστοποίηση και ψύξη σωματιδίων CaCO_3 (Περίπτωση 1)

Στα Σχήματα 5-31 και 5-32 παρουσιάζονται οι τροχιές των σωματιδίων CaCO_3 . Στο πρώτο από τα δύο σχήματα παρουσιάζονται οι τροχιές σε σχέση με τον χρόνο παραμονής των συγκεκριμένων σωματιδίων μέσα στον ασβεστοποιητή. Ο μέσος χρόνος παραμονής αυτών δεν ξεπερνά τα 10 sec ενώ ο μεγαλύτερος είναι 17,3 sec. Από τον μέσο χρόνο παραμονής συνάγεται ότι η ταχύτητα ανόδου των σωματιδίων είναι μικρότερη από αυτή των σωματιδίων του κάρβουνου. Αυτό συμβαίνει ενάντια στην αεροδυναμική κατάσταση των σωματιδίων CaCO_3 που εμφανίζει ευνοϊκότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά δυσμενέστερες τιμές φυσικών ιδιοτήτων. Στο Σχήμα 5-33 καταγράφεται η κάθε μια τροχιά με την φυσικοχημική κατάσταση στην οποία εμπίπτει στο κάθε σημείο. Έτσι, με μπλε χρώμα δηλώνεται η προθέρμανση του σωματιδίου, με κόκκινο σημειώνεται το τμήμα της τροχιάς που υφίσταται η ασβεστοποίηση και τέλος πάλι με μπλε χρώμα συμβολίζεται η ανταλλαγή θερμότητας με την αέρια φάση. Το ποσοστό ασβεστοποίησης για την συγκεκριμένη περίπτωση καυσίμου (1^η ποιότητα) αγγίζει το 91,9%, και πραγματοποιείται σε όλο το διαθέσιμο ενεργό ύψος μέσα στον ασβεστοποιητή.

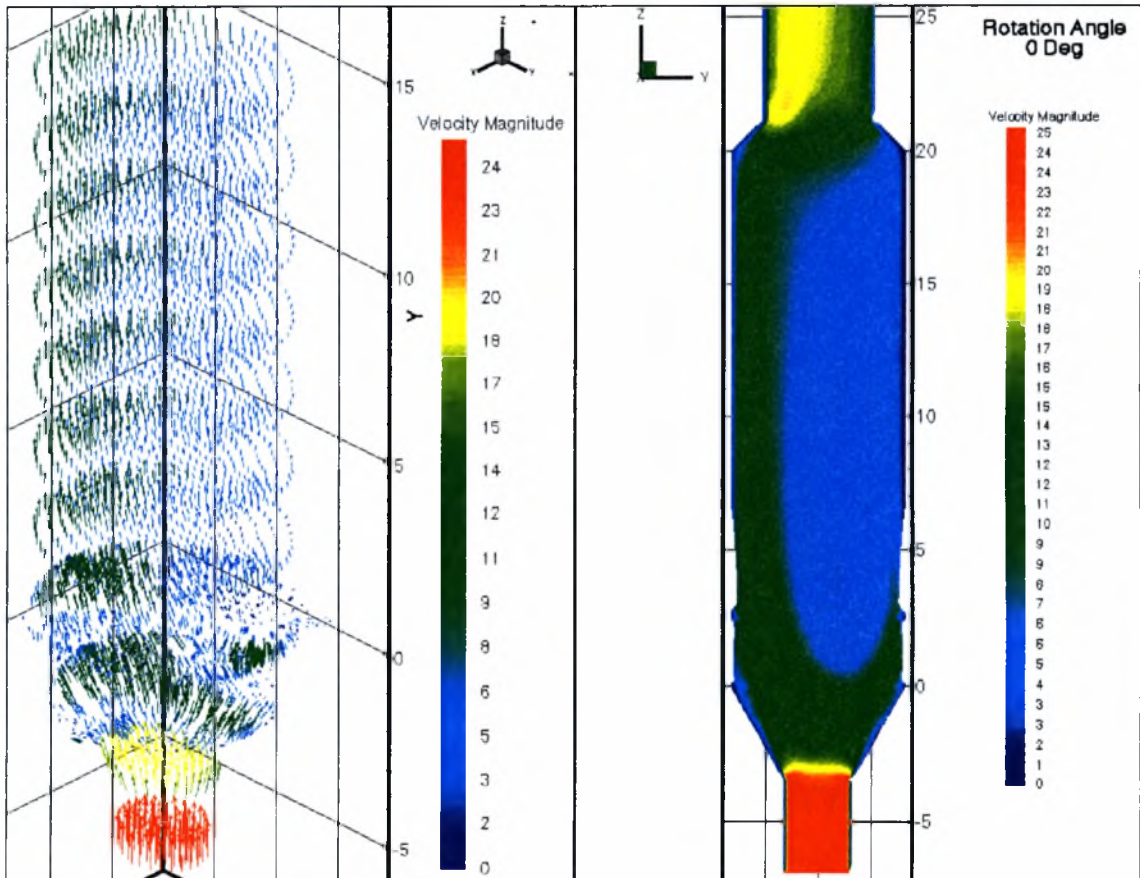


Σχήμα 5-33 Εξέλιξη βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών καθ' ύψος του ασβεστοποιητή (Περίπτωση 1)

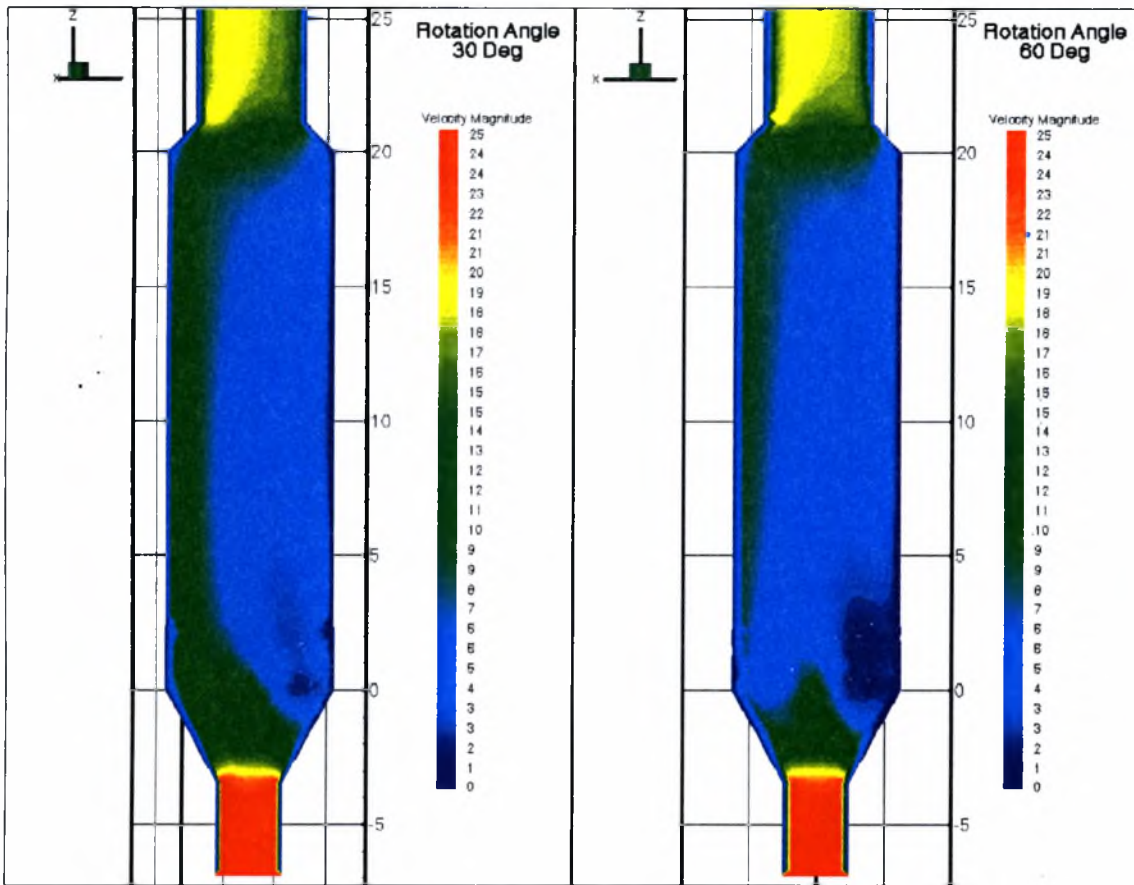
Στο Σχήμα 5-33 δίνονται διαγράμματα που περιγράφουν την εξέλιξη ορισμένων βασικών μεταβλητών καθ' ύψος της διάταξης. Οι καμπύλες αυτές καταγράφουν την μεταβολή της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και του κλάσματος μάζας και γραμμομορίων του CO_2 και O_2 αντίστοιχα, καθ' ύψος του ασβεστοποιητή, δίνοντας μια χαρακτηριστική εικόνα των έντονων μεταβολών που συντελούνται στο εσωτερικό της διάταξης.



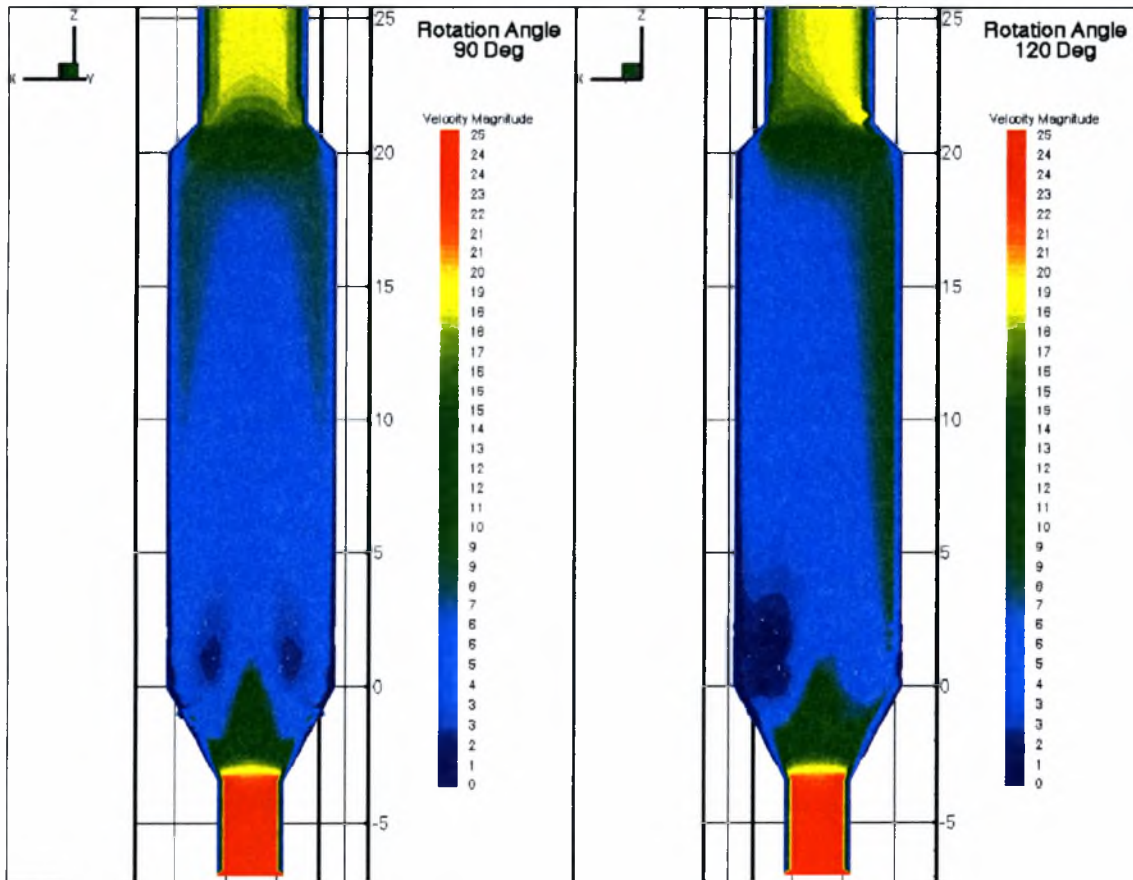
Σχήμα 5-34 Οριζόντιες τομές σε πυκνή και αραιή διάταξη σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 2)



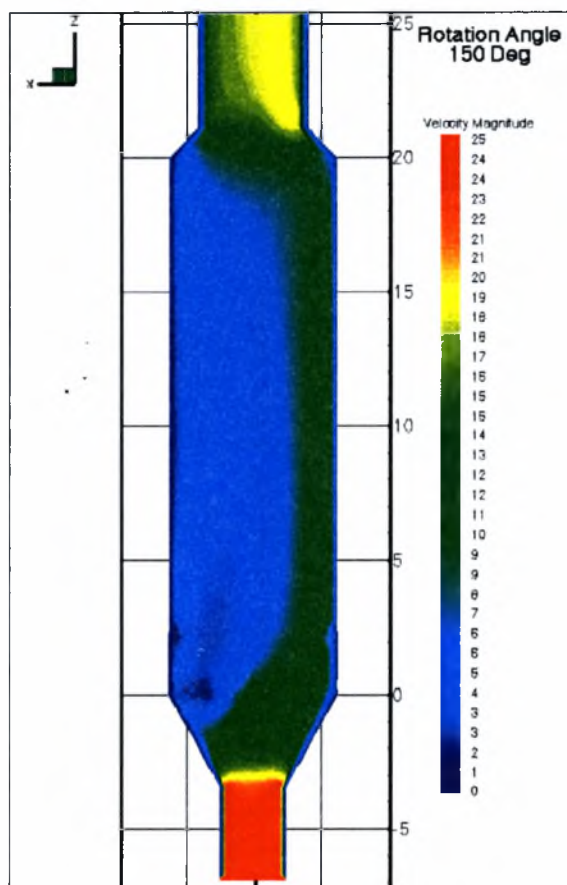
Σχήμα 5-35 Διανύσματα ταχυτήτων και η κατανομή ταχυτήτων στο συμμετρικό επίπεδο (Περίπτωση 2)



Σχήμα 5-36 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με περιεχόμενες γωνίες 30 και 60 μοίρες (Περίπτωση 2)

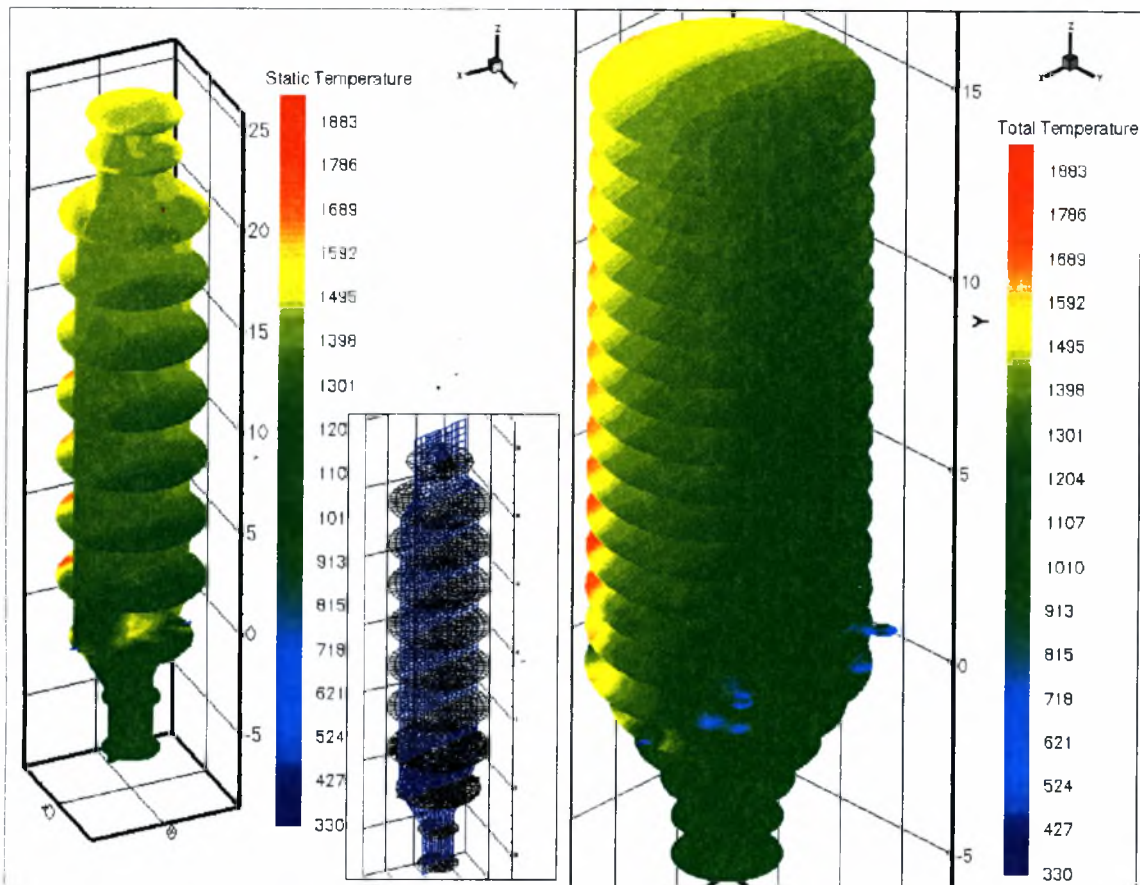


Σχήμα 5-37 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με περιεχόμενες γωνίες 90 και 120 μοίρες (Περίπτωση 2)

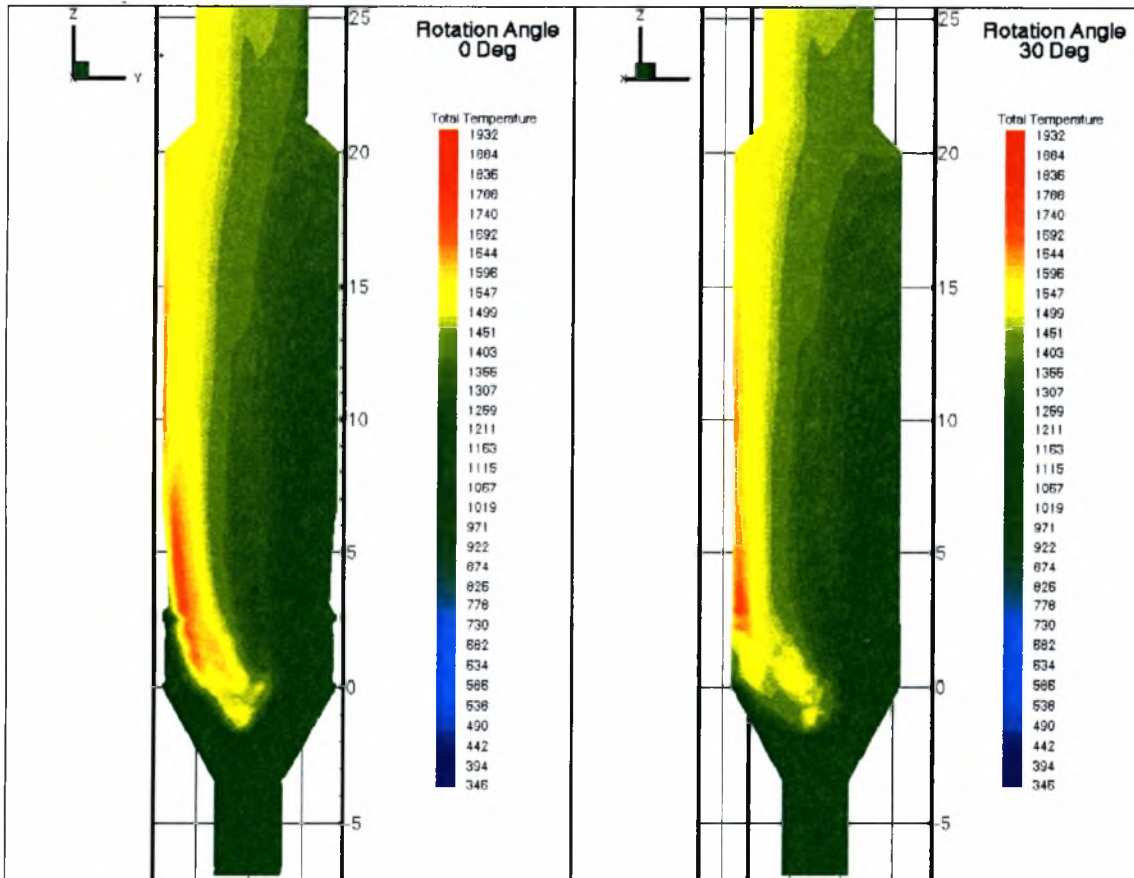


Σχήμα 5-38 Πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο των 150 μοιρών (Περίπτωση 2)

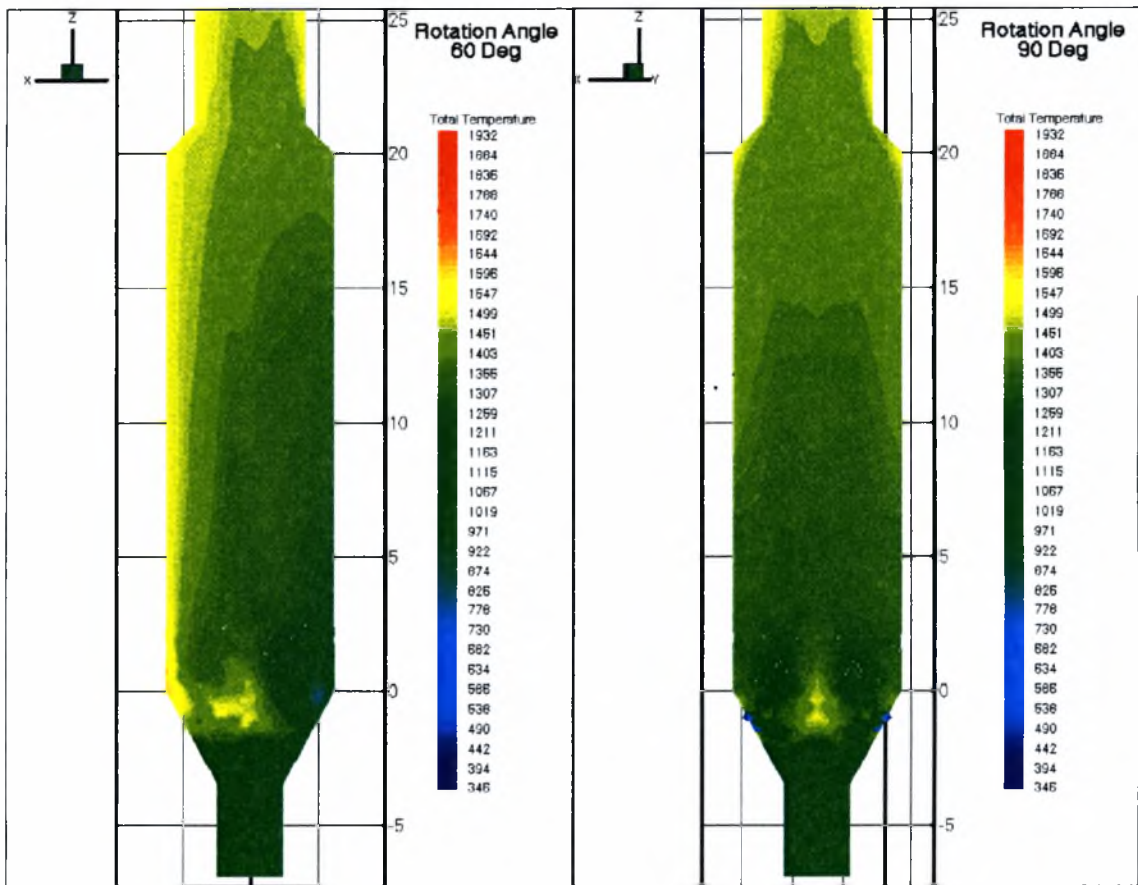
Τα Σχήματα 5-34 έως 5-38 παρουσιάζουν την εξέλιξη της ταχύτητας της συνεχούς αέριας φάσης μέσα στην διάταξη για την Περίπτωση 2 (2^η ποιότητα καύσιμου). Η είσοδος του τριτογενούς αέρα γίνεται και εδώ με ταχύτητα 24 m/sec, και στην αρχή της κωνικής διάταξης το σύνολο των αερίων υφίσταται μια απότομη μείωση της ταχύτητας γεγονός που οφείλεται στην είσοδο πρώτα του κάρβουνου και έπειτα της φαρίνας. Στο κύριο κυλινδρικό κορμό της διάταξης διατηρείται η ταχύτητα σταθερή στα 7-8 m/sec, εμφανίζοντας περιοχές με μεγαλύτερες ταχύτητες απέναντι από τις δύο εισόδους της φαρίνας και στην άνω περιοχή (στην συμβολή με την άνω κωνική διαμόρφωση). Αυτό είναι απόρροια της αλληλεπίδρασης του συνολικού σωματιδιακού φορτίου που ξεπερνά το 60% του συνολικής μάζας και αντίστοιχα επηρεάζει την ταχύτητα της συνεχούς φάσης στην έξοδο λόγω της στένωσης που εμφανίζει εκεί η γεωμετρία. Στην έξοδο παρουσιάζεται μια περιοχή με υψηλότερες ταχύτητες, γεγονός που οφείλεται στο κενό που εμφανίζουν οι τροχιές των σωματιδίων. Στην συγκεκριμένη περιοχή το σωματιδιακό φορτίο είναι αραιότερο, με αποτέλεσμα ο χώρος αυτός να προσφέρεται για ταχύτερη και λιγότερο ανεμπόδιστη διαφυγή προς τον τελευταίο κυκλώνα. Επίσης, η είσοδος του καυσίμου δεν εμποδίζει αλλά επιταχύνει και εδώ ελαφρώς την άνοδο των αερίων.



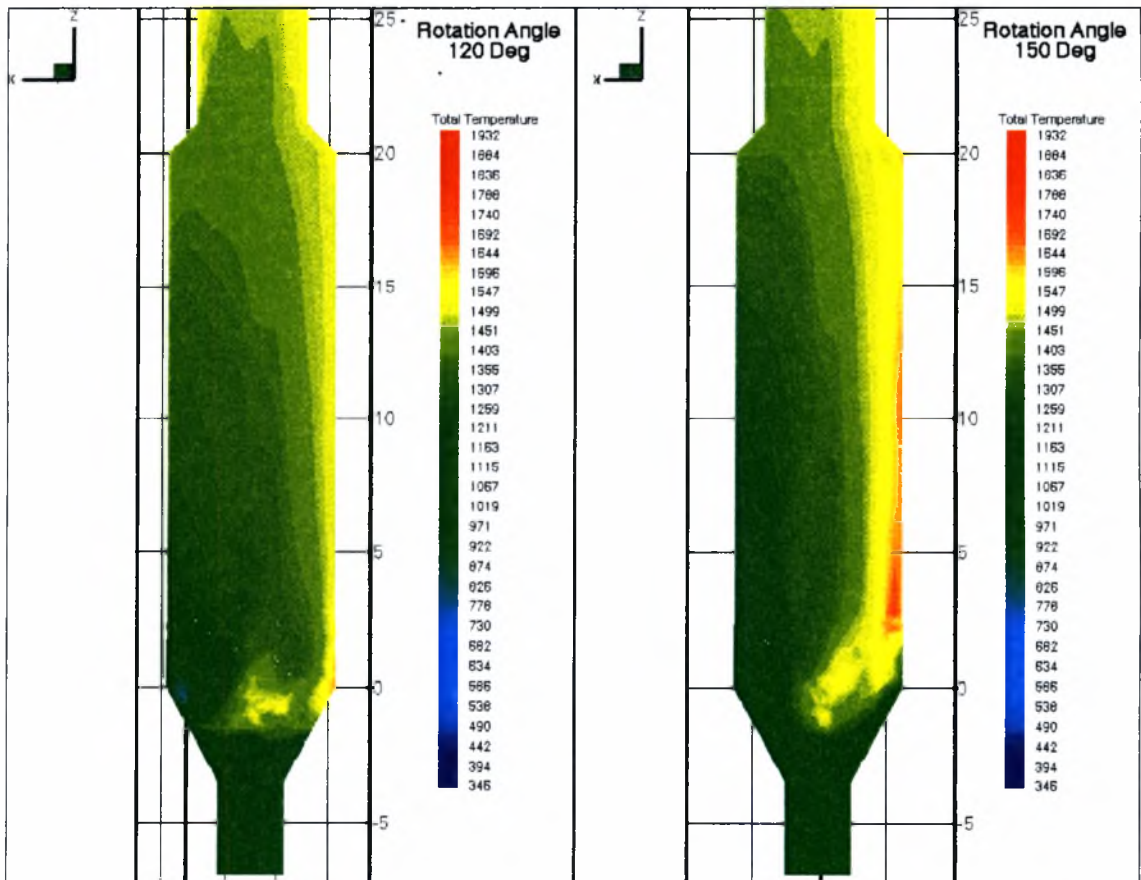
Σχήμα 5-39 Οριζόντιες τομές θερμοκρασιακού πεδίου σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 2)



Σχήμα 5-40 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 0 και 30 μοίρες (Περίπτωση 2)

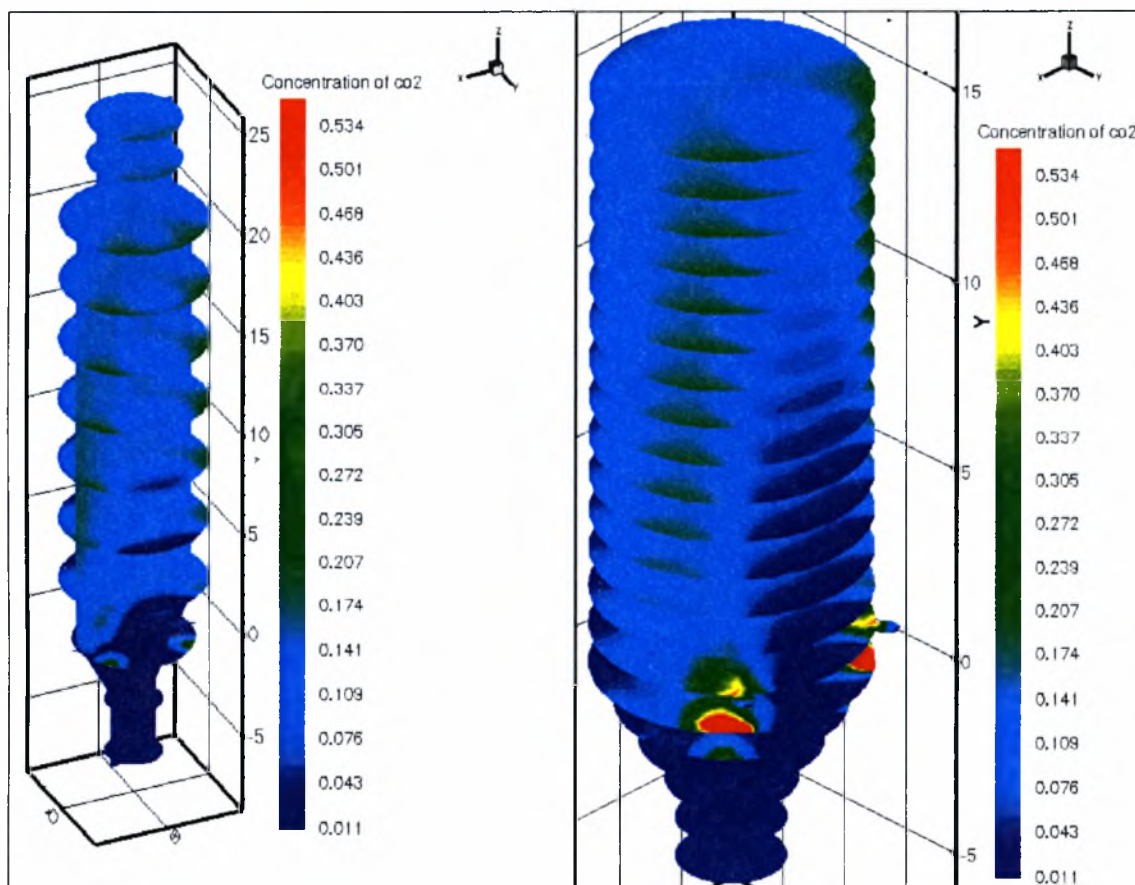


Σχήμα 5-41 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 60 και 90 μοίρες (Περίπτωση 2)

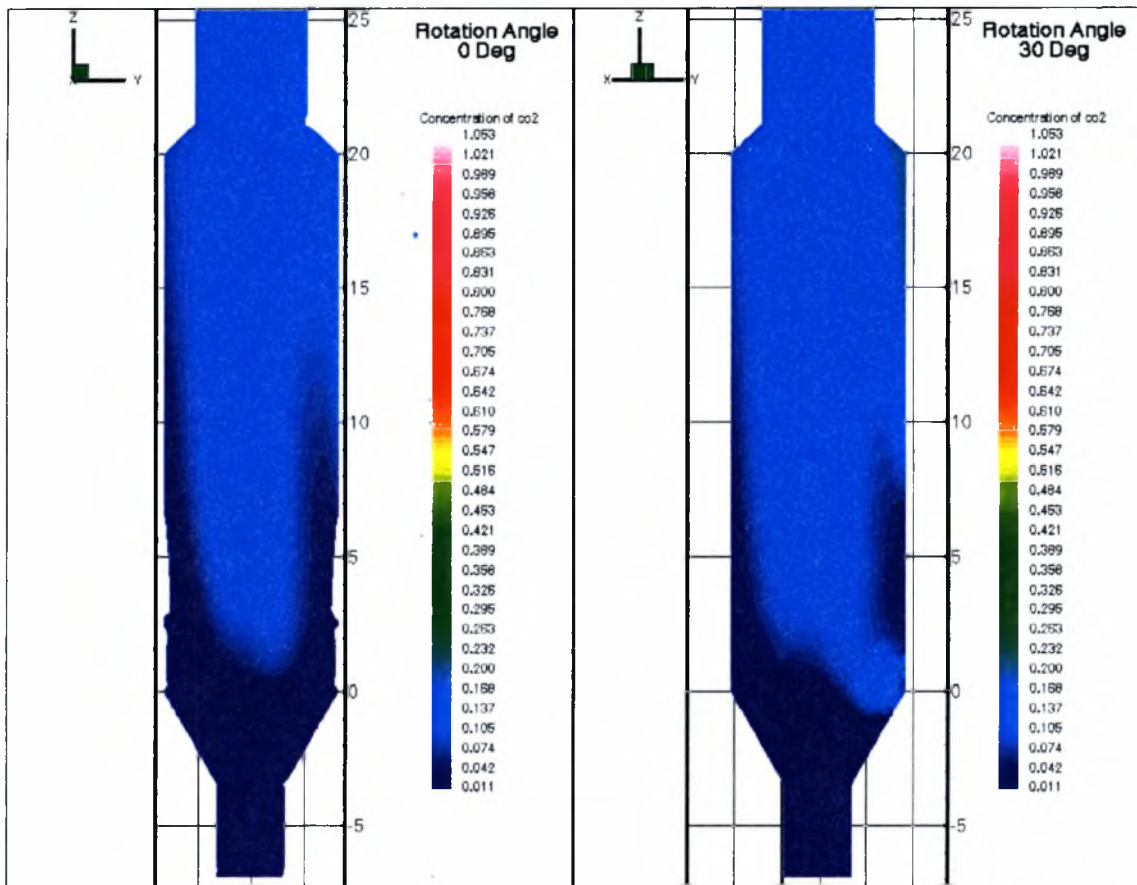


Σχήμα 5-42 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές με περιεχόμενη γωνία 120 και 150 μοίρες (Περίπτωση 2)

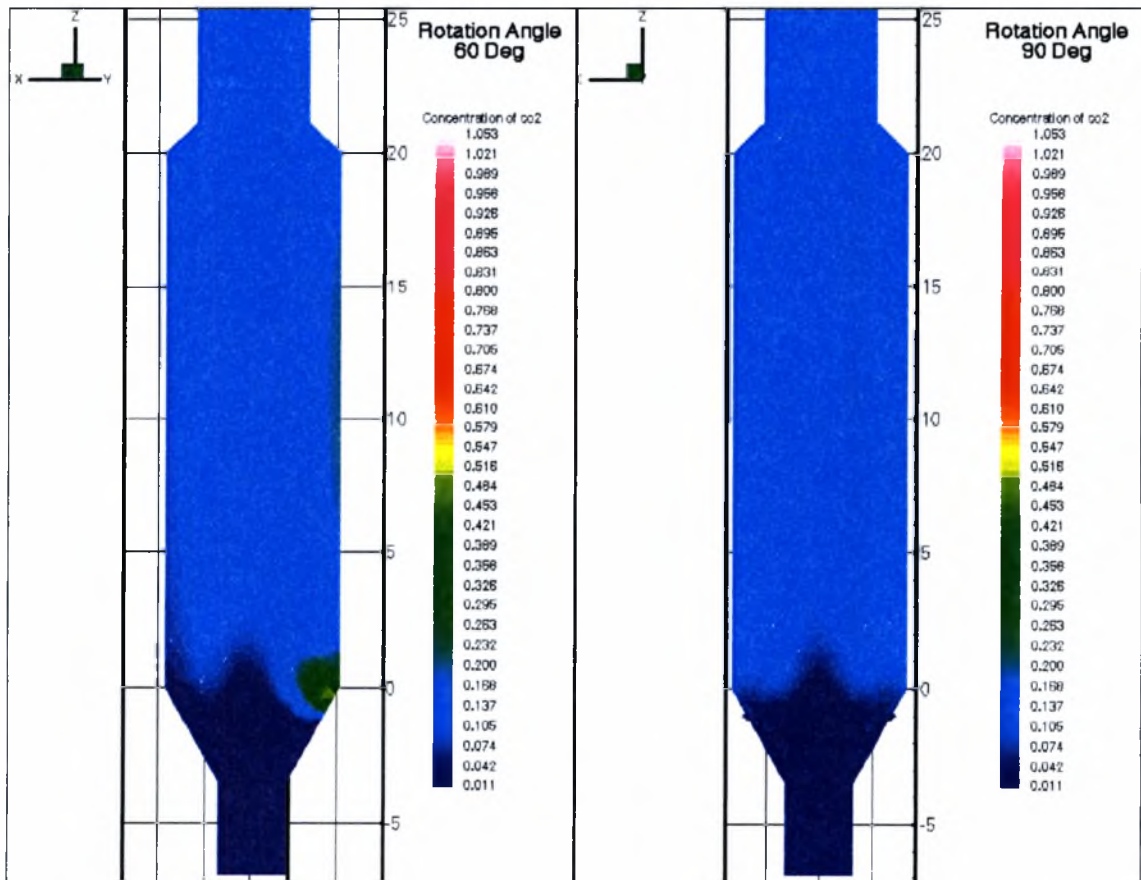
Στα Σχήματα 5-39 έως 5-42 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο για την Περίπτωση 2. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην απέναντι πλευρά από τις εισόδους της φαρίνας. Οι υψηλές θερμοκρασίες που σημειώνονται εκεί οφείλονται στο εγκλωβισμό που υφίστανται τα σωματίδια κάρβουνου μικρής διαμέτρου ενώ συγχρόνως η παρουσία σωματιδίων CaCO_3 είναι εξαιρετικά μικρή. Ο κύριος κορμός διατηρείται σε εύρος θερμοκρασιών λίγο πάνω από την θερμοκρασία εκκίνησης της ασβεστοποίησης, με αποτέλεσμα η ασβεστοποίηση να συντελείται ικανοποιητικά καθ' ύψος της διάταξης. Κηλίδες υψηλών θερμοκρασιών δεν παρατηρούνται αλλά εμφανίζονται περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της έντονης ασβεστοποίησης που συνεπάγεται υψηλούς ρυθμούς απορρόφησης θερμότητας. Οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται σε περιοχές όπου επικρατούν μεγαλύτερες ταχύτητες οφείλονται στην υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων κάρβουνου και στην απουσία σωματιδίων CaCO_3 . Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπήρχαν πειραματικά δεδομένα για την ακριβή μαθηματική περιγραφή της κινητικής της εξάτμισης και καύσης των πτητικών και του στερεού υπολείμματος άνθρακα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από την βιβλιογραφία για παρόμοια σύσταση καυσίμου. Τέλος, για την περίπτωση αυτή δεν υπήρξαν μετρήσεις θερμοκρασιών σε κανένα σημείο της διάταξης



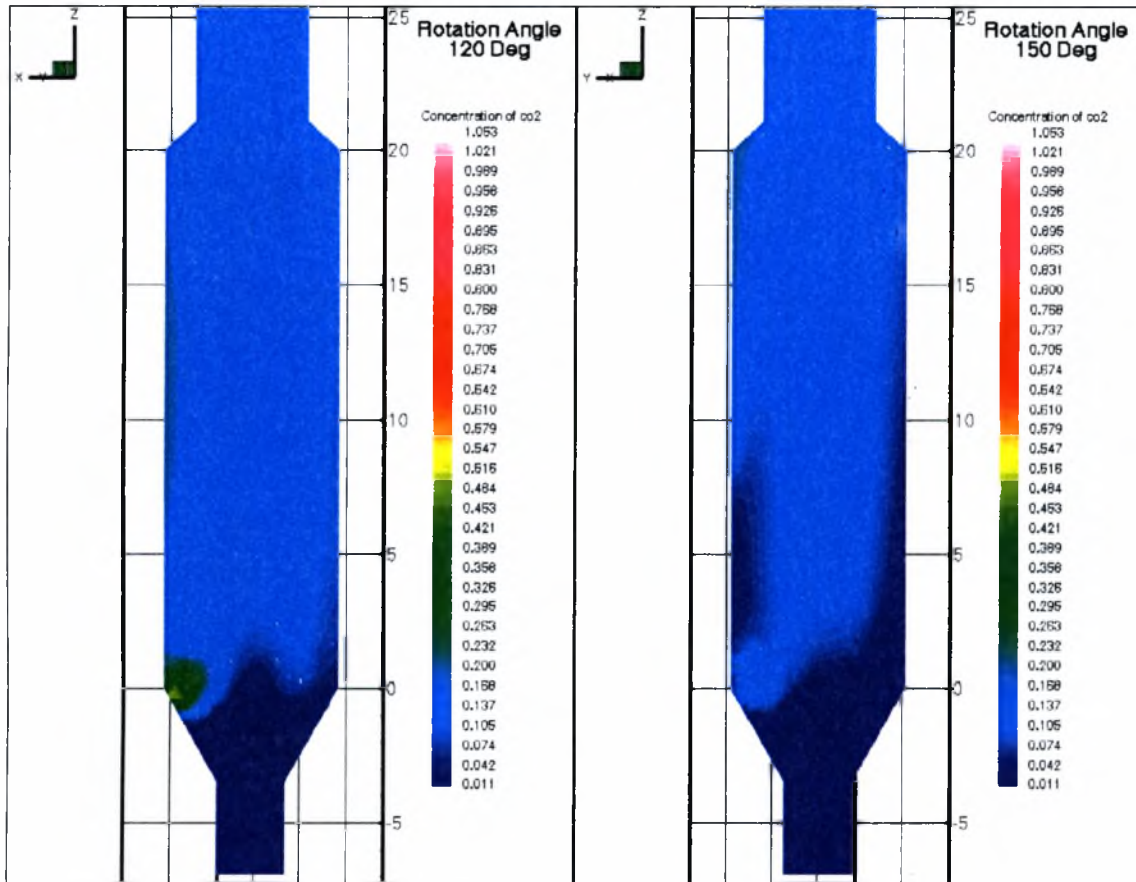
Σχήμα 5-43 Κατανομή συγκεντρώσεων CO_2 σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 2)



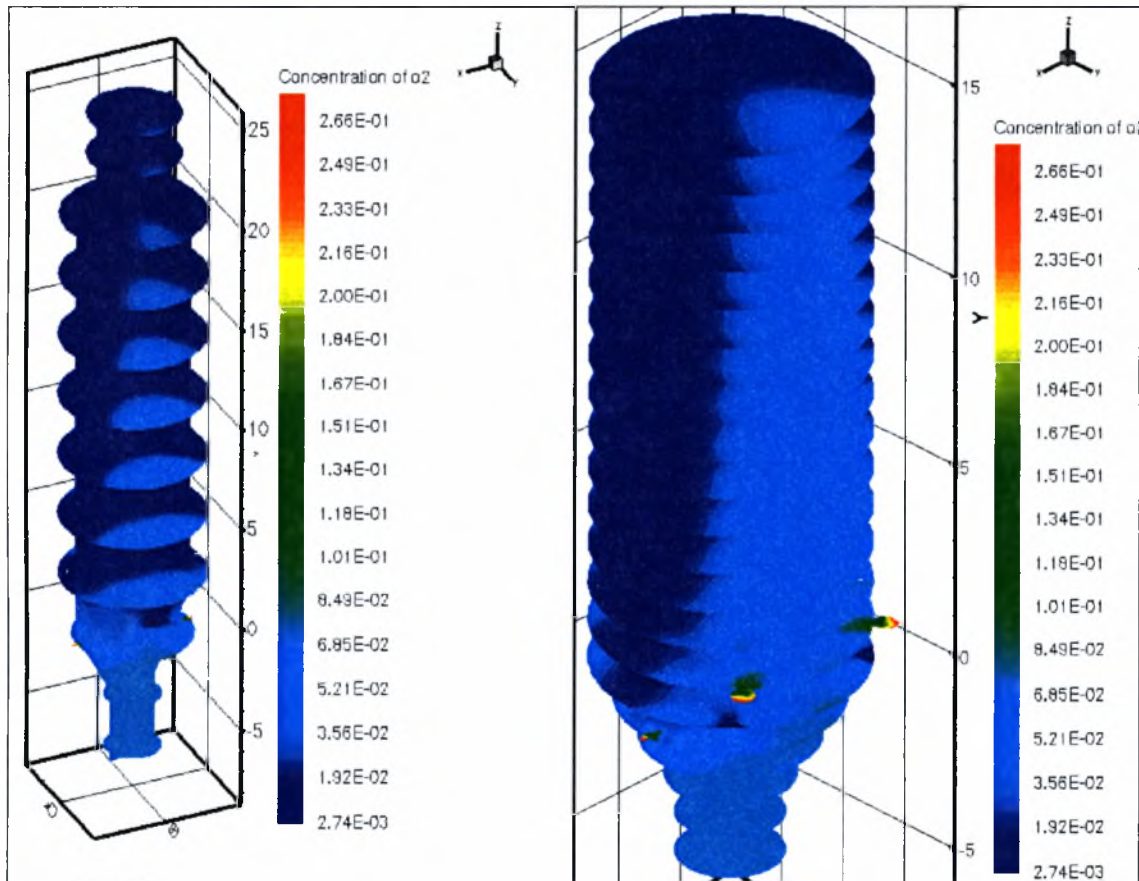
Σχήμα 5-44 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές σε γωνία 0 και 30° (Περίπτωση 2)



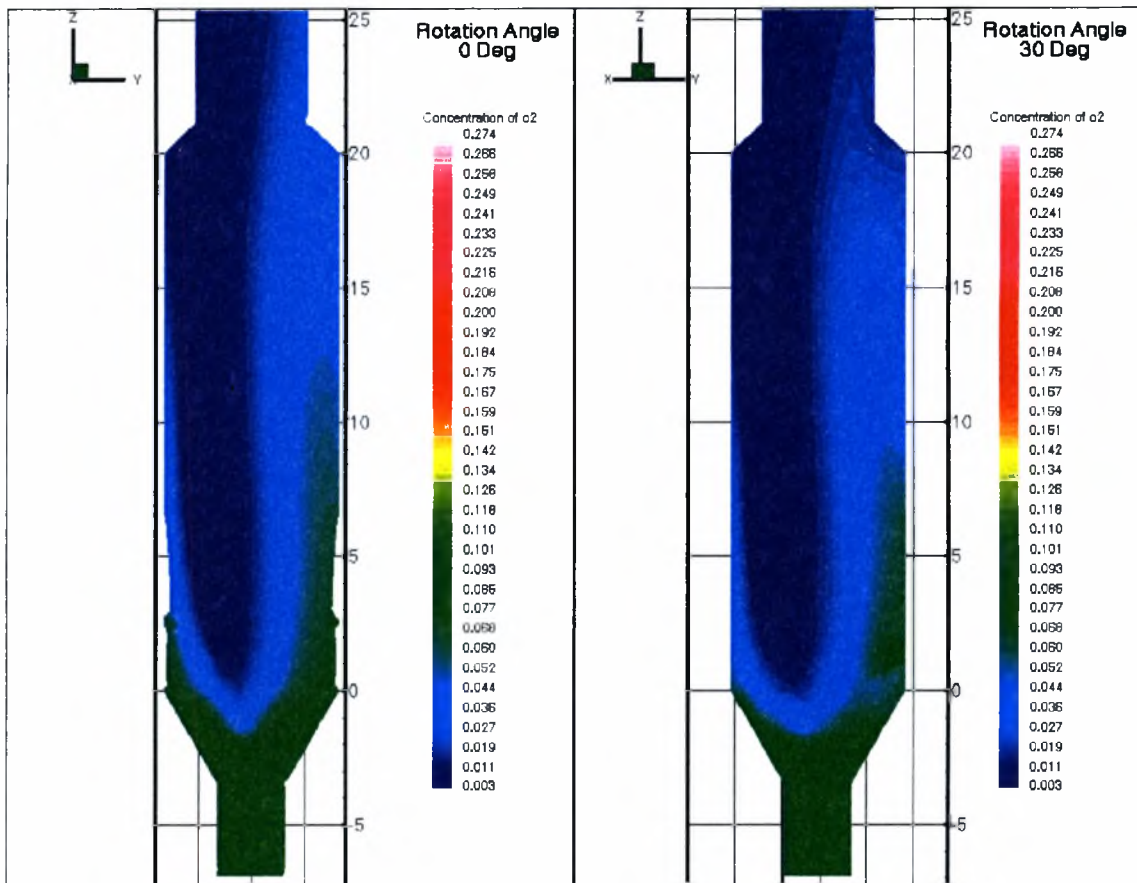
Σχήμα 5-45 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές σε γωνία 60 και 90° (Περίπτωση 2)



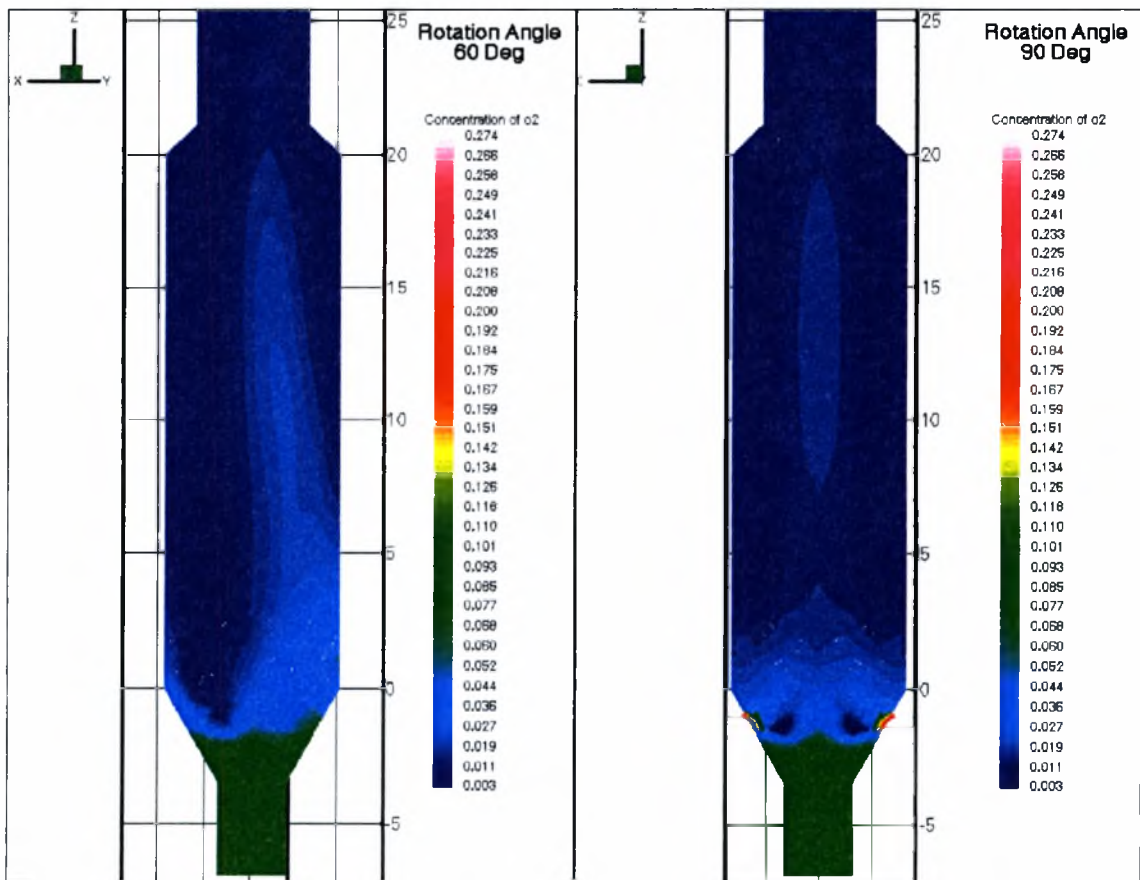
Σχήμα 5-46 Κατανομές συγκεντρώσεων CO_2 για τομές σε γωνία 120 και 150° (Περίπτωση 2)



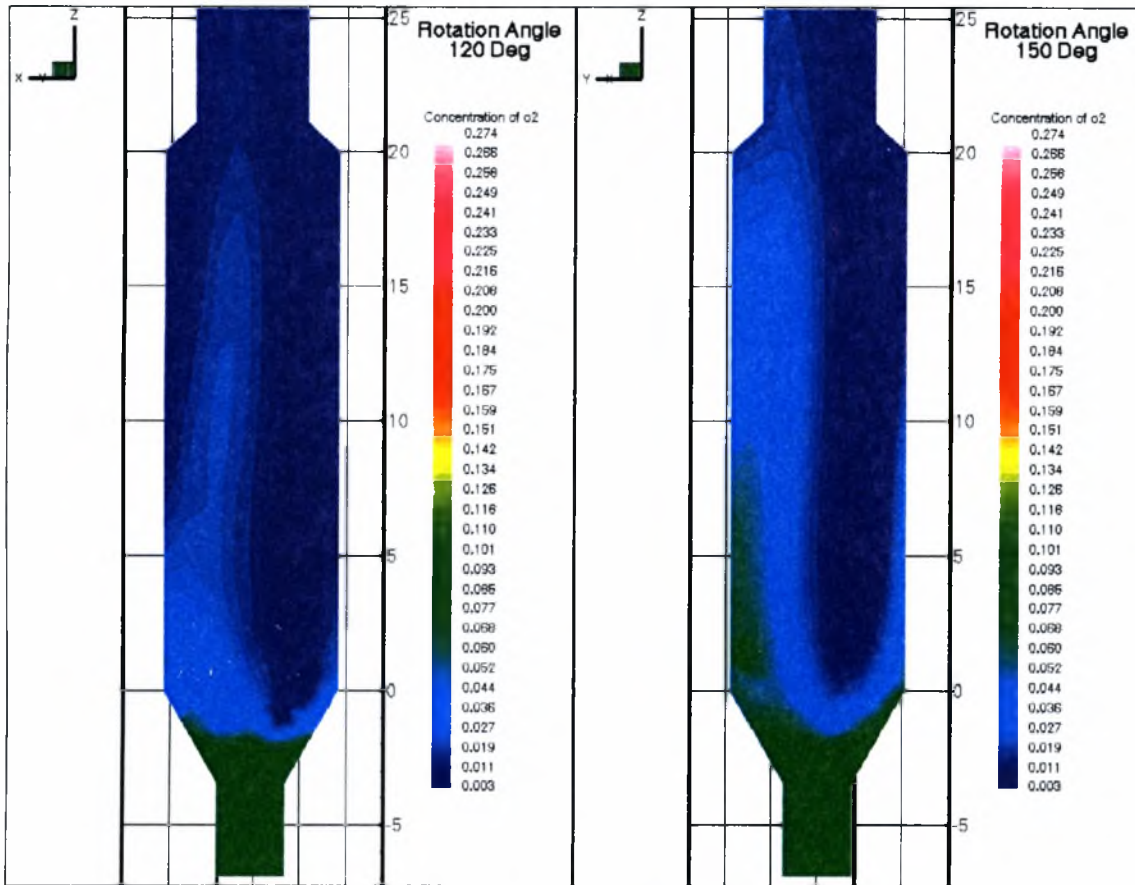
Σχήμα 5-47 Κατανομή συγκεντρώσεων O_2 σε αξονοσυμμετρική όψη



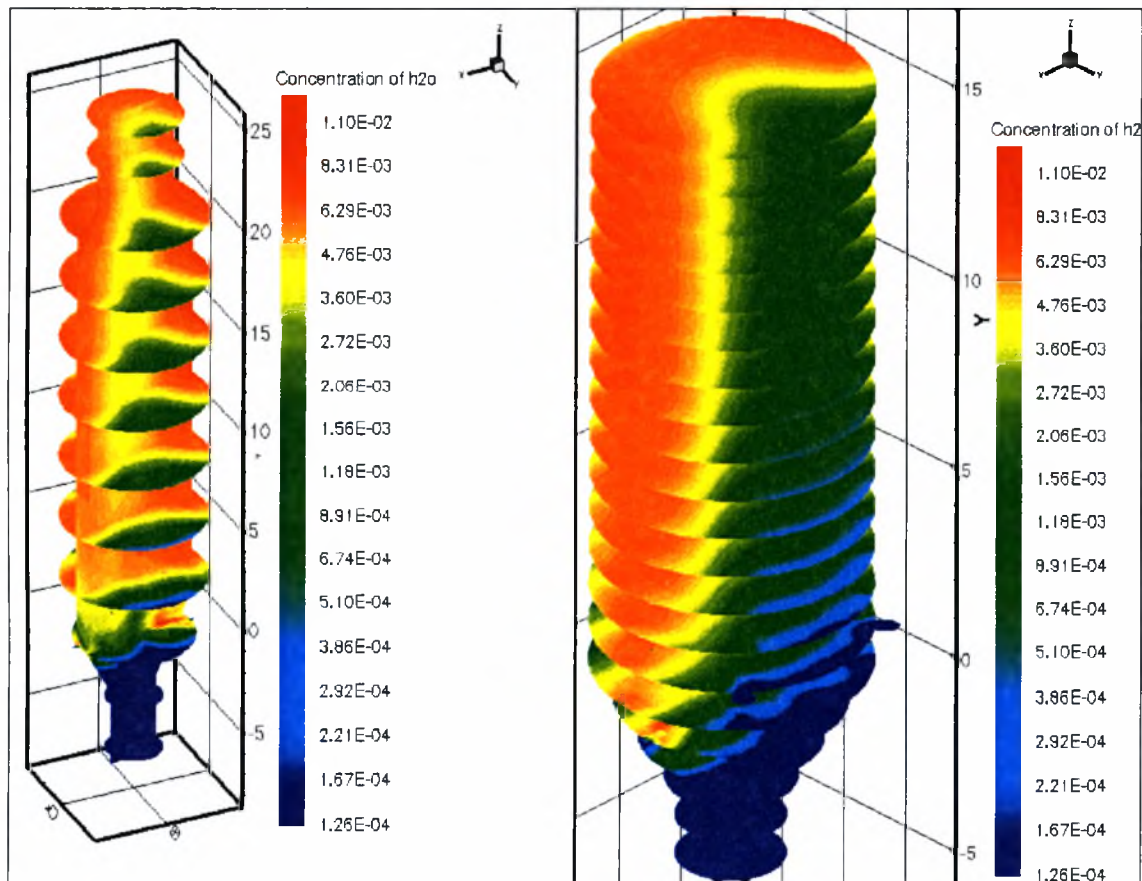
Σχήμα 5-48 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές σε γωνία 0 και 30° (Περίπτωση 2)



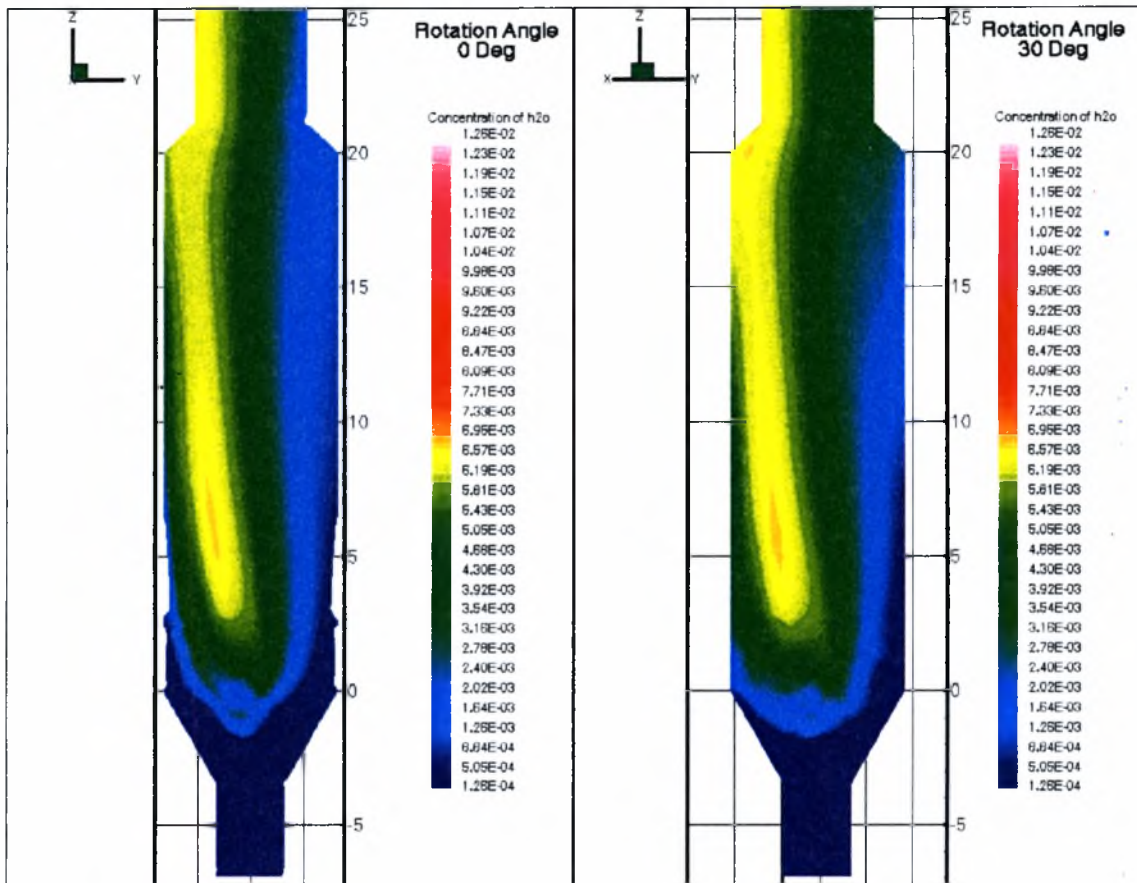
Σχήμα 5-49 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές με γωνία 60 και 90° (Περίπτωση 2)



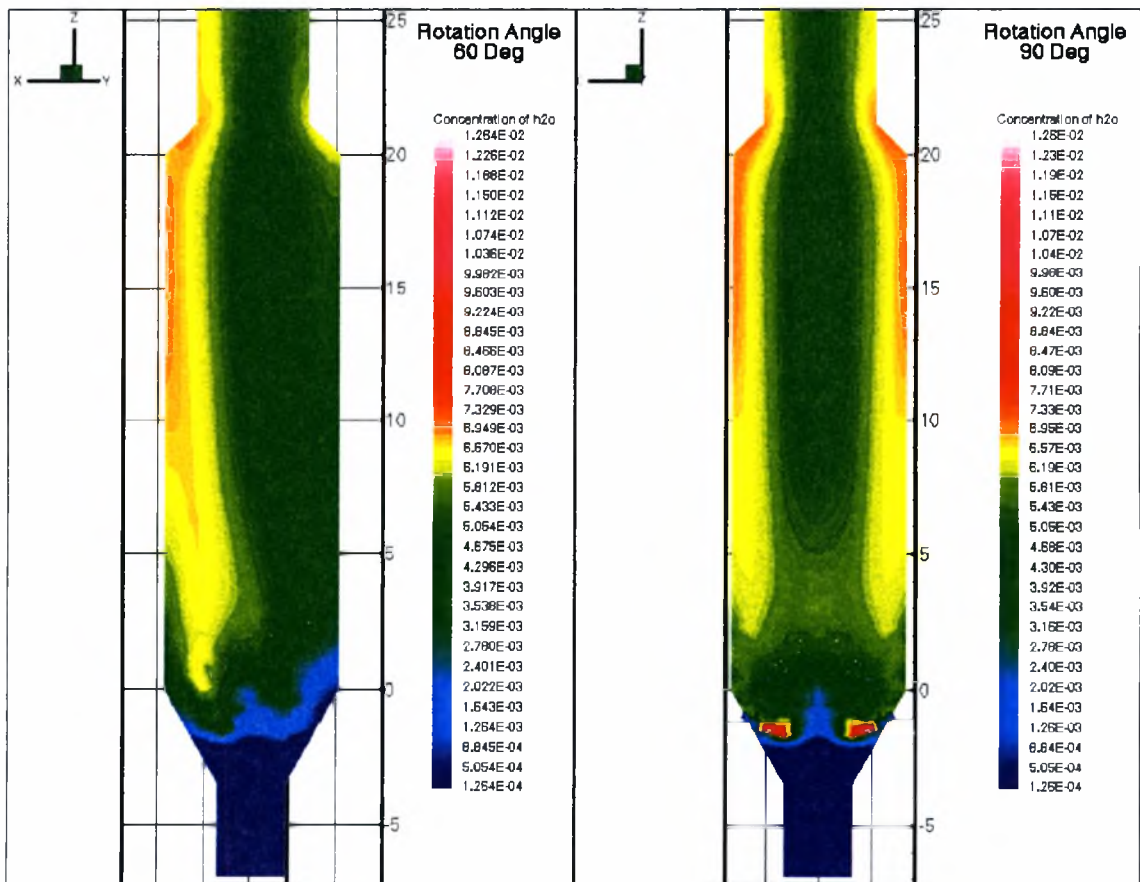
Σχήμα 5-50 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές με γωνία 120 και 150° (Περίπτωση 2)



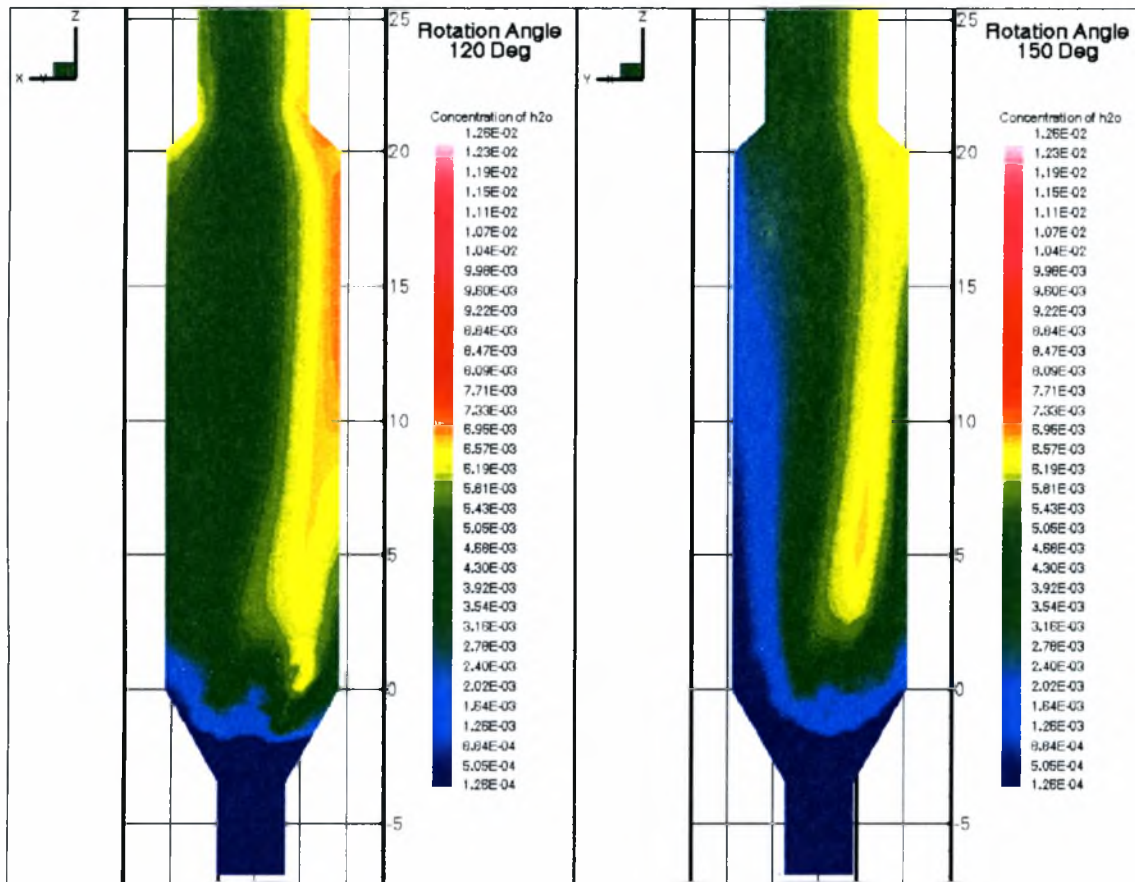
Σχήμα 5-51 Κατανομή συγκεντρώσεων H_2O σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 2)



Σχήμα 5-52 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με περιεχόμενη γωνία 0 και 30 μοίρες (Περίπτωση 2)

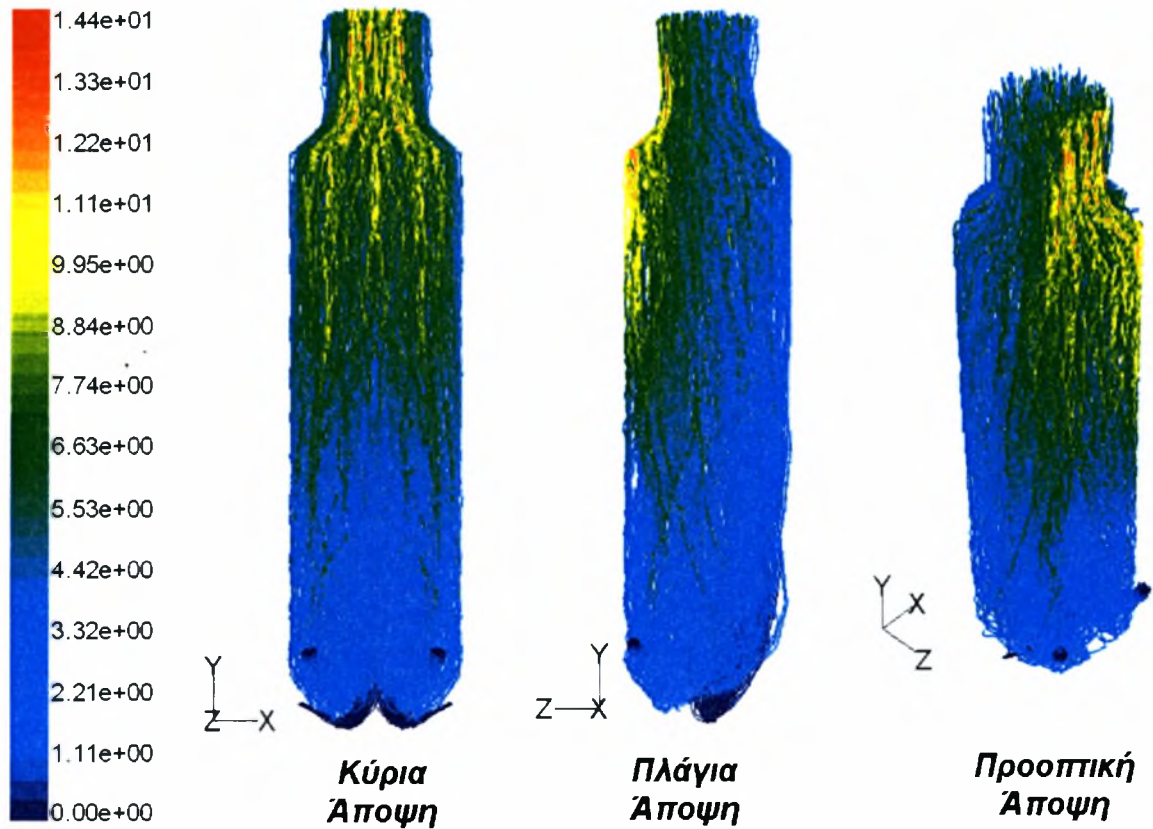


Σχήμα 5-53 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με περιεχόμενη γωνία 60 και 90 μοίρες (Περίπτωση 2)

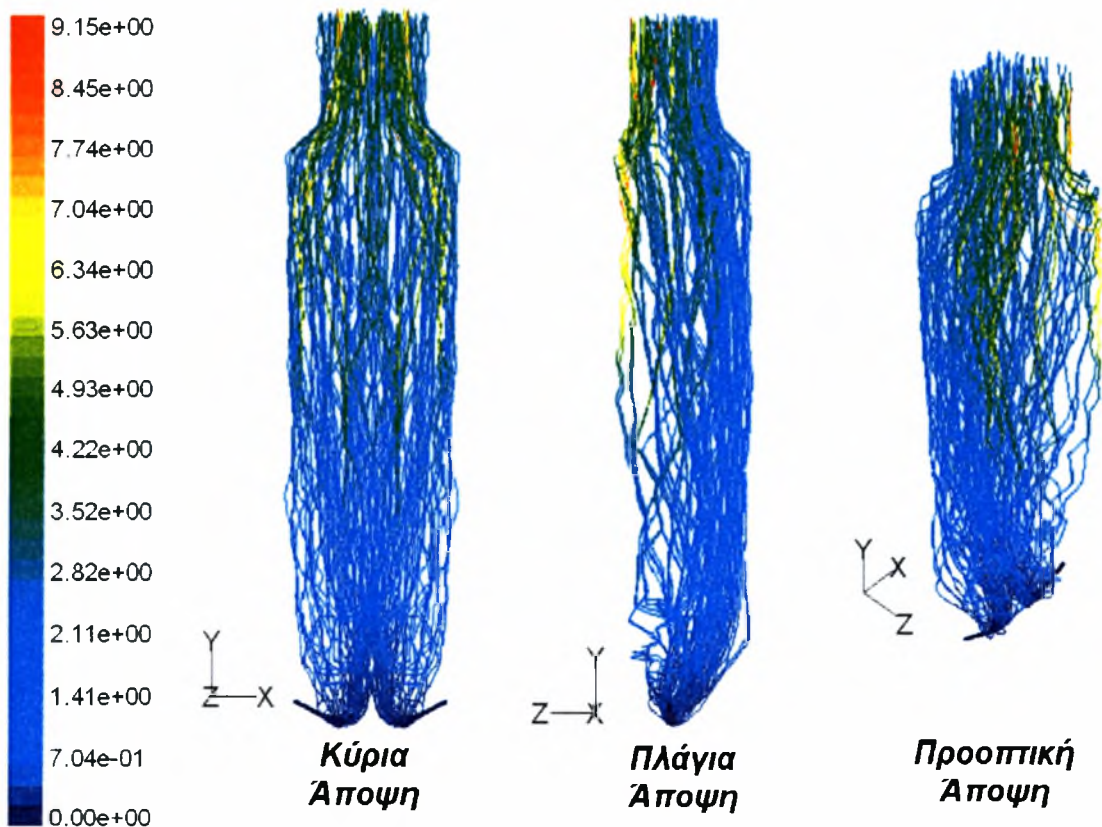


Σχήμα 5-54 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με γωνία 120 και 150° (Περίπτωση 2)

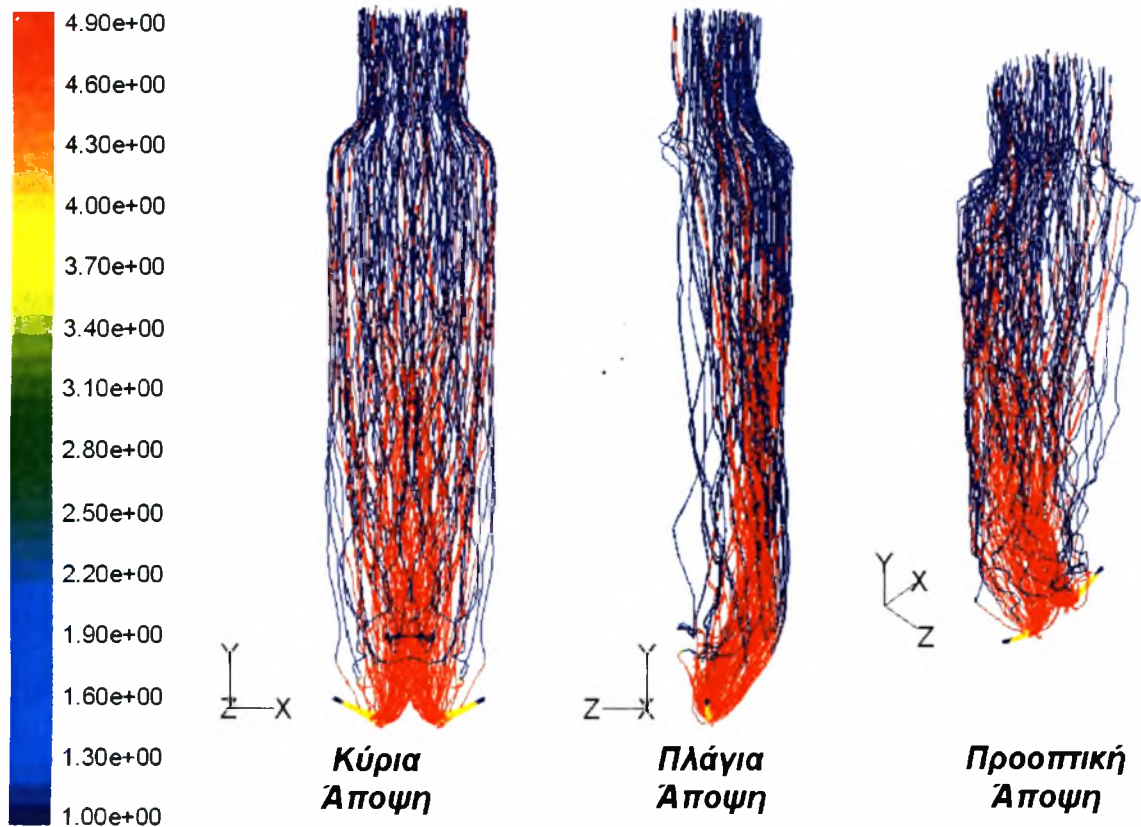
Στα Σχήματα 5-42 έως 5-46 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων CO_2 . Οι υψηλότερες τοπικές συγκεντρώσεις εμφανίζονται λίγο μετά την είσοδο της φαρίνας. Οι συγκεντρώσεις αυτές μπορεί να θεωρηθούν ως μέγιστες δυνατές συγκεντρώσεις καθώς παρατηρείται η μέγιστη απορρόφηση θερμότητας ενώ η ίδια παραγωγή CO_2 περιορίζει την ασβεστοποίηση, μεταθέτοντας την σε ανώτερες περιοχές. Οι συγκεντρώσεις του CO_2 μειώνονται προοδευτικά μέχρι την έξοδο, γιατί μειώνεται και η διαθέσιμη ποσότητα $CaCO_3$, ενώ οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του CO_2 που προκαλούνται από την καύση του κάρβουνου είναι συγκριτικά μικρότερες από αυτές που οφείλονται στην ασβεστοποίηση, με αναλογία 1:6. Στα Σχήματα 5-47 έως 5-50 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων O_2 . Οι μικρότερες συγκεντρώσεις O_2 σημειώνονται στις περιοχές, όπου η φλόγα είναι έντονη (πυρόλυση και έναρξη της καύσης του στερεού υπολείμματος άνθρακα). Επίσης, στο τμήμα του ημικυλίνδρου που συντελείται έντονη ασβεστοποίηση, η συγκέντρωση O_2 παραμένει σταθερή σε χαμηλά επίπεδα λόγω της πυκνότητας των σωματιδίων φαρίνας και των υψηλών σχετικά συγκεντρώσεων CO_2 , ενώ σε περιοχές που έχουν εγκλωβιστεί σωματίδια κάρβουνου παρατηρούνται ακόμα πιο χαμηλές συγκεντρώσεις. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις H_2O σημειώνονται λίγο μετά την είσοδο του καυσίμου και συγκεκριμένα κατά την πυρόλυση και την καύση του κάρβουνου. Οι συγκεντρώσεις αυτές ελαττώνονται καθ' ύψος της διάταξης απουσία φλόγας.



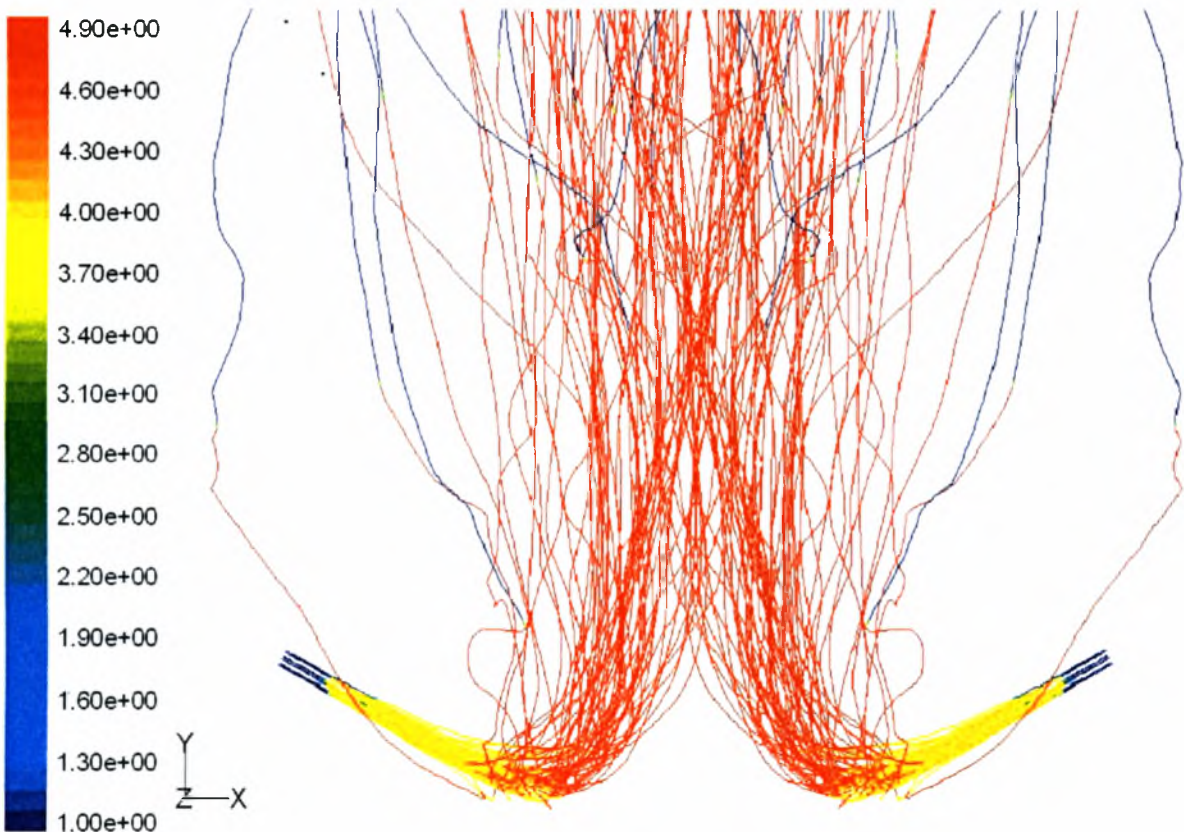
Σχήμα 5-55 Τροχιές μέσα στον ασβεστοποιητή και των δύο είδη σωματιδίων (Περίπτωση 2)



Σχήμα 5-56 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων κάρβουνου [σε sec] (Περίπτωση 2)

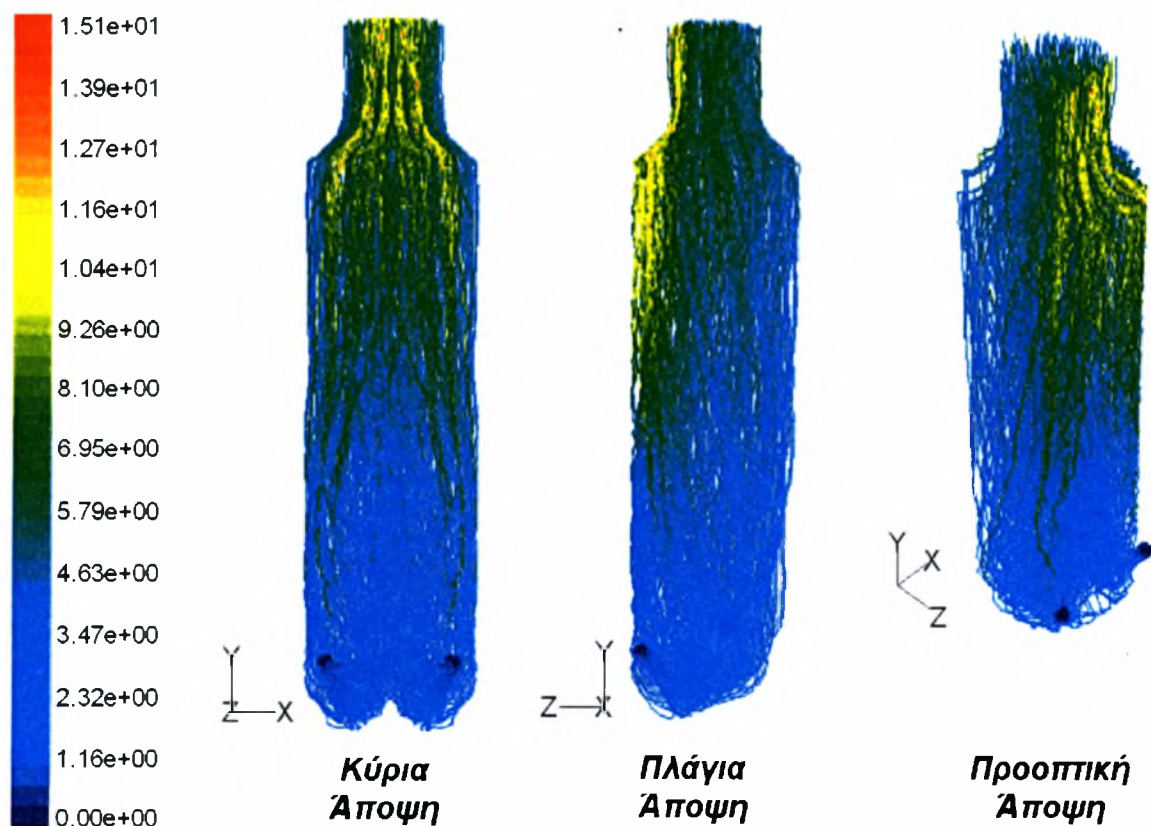


Σχήμα 5-57 Εξάτμιση και καύση πτητικών, καύση char και ψύξη σωματιδίων κάρβουνου (Περίπτωση 2)

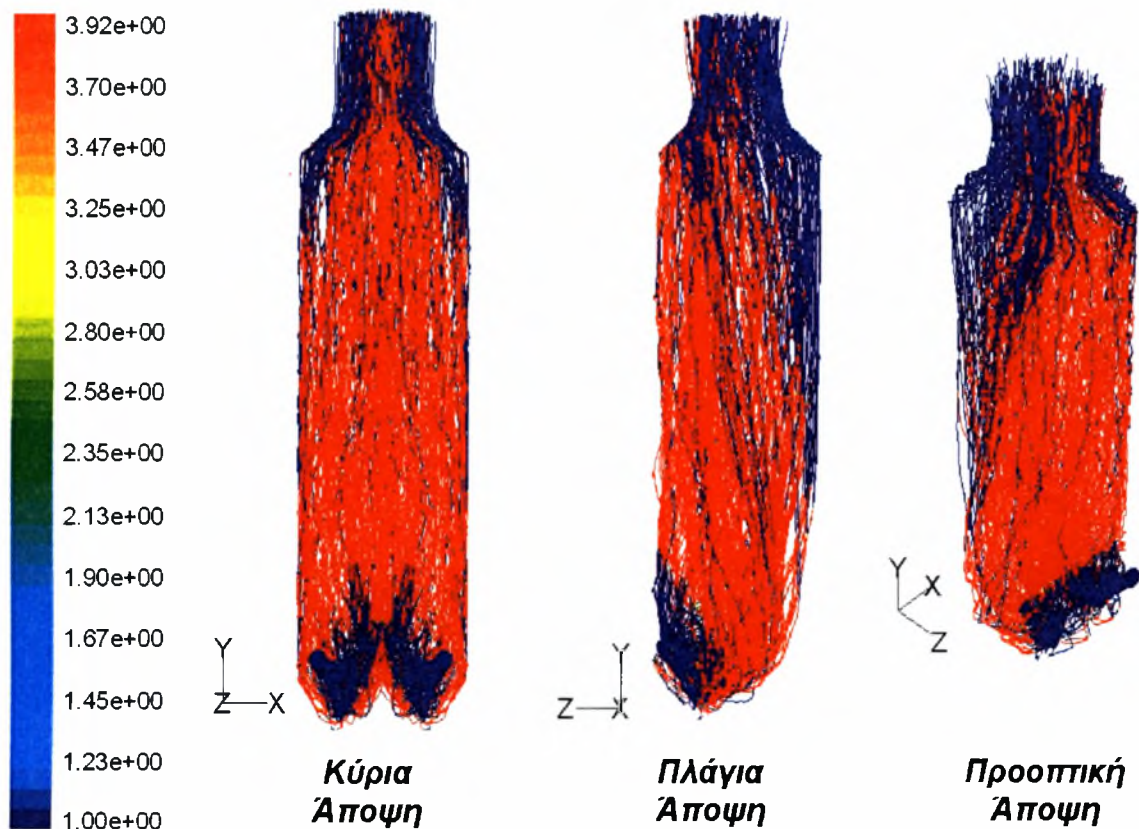


Σχήμα 5-58 Προθέρμανση, εξάτμιση και καύση πτητικών ουσιών κάρβουνου (Λεπτομέρεια)

Στα Σχήματα 5-55 έως 5-58 παρουσιάζονται οι τροχιές που διαγράφουν και τα δύο είδη σωματιδίων (κάρβουνο και φαρίνα) μαζί και ξεχωριστά. Στο Σχήμα 5-55 δίνονται όλες οι τροχιές που διαγράφονται μέσα στον ασβεστοποιητή (περίπου 9000 τροχιές). Οι χρόνοι που σημειώνονται διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ο μέσος χρόνος είναι περίπου 5,5 sec και στην δεύτερη περίπου 9 sec. Το μέσο μήκος διαδρομής που διανύεται από τα σωματίδια είναι περίπου 54m ενώ το μέγιστο περίπου 75m. Από το Σχήμα 5-58 προκύπτει ότι ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων κάρβουνου είναι και εδώ μικρότερος (5sec), γεγονός που οφείλεται στο 'κανάλι' αέρα που κινείται ταχύτερα και συμπαρασύρει τα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια κάρβουνου. Στα Σχήματα 5-59 και 5-60 διακρίνονται τα τμήματα των τροχιών επί των οποίων ενεργοποιούνται οι "νόμοι" θερμοχημικής συμπεριφοράς των σωματιδίων, που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Κατά συνέπεια, το μπλε χρώμα στην αρχή της τροχιάς αντιστοιχεί στην προθέρμανση του κάρβουνου, το πράσινο και το κίτρινο στην εξάτμιση και την καύση των πτητικών και το κόκκινο στην καύση του στερεού υπολείμματος άνθρακα του κάρβουνου. Τέλος, το μπλε χρώμα στην απόληξη της τροχιάς υποδηλώνει την ψύξη των σωματιδίων που εξισώνουν την θερμοκρασία τους με την αέρια συνεχή φάση. Το μέσο μήκος διαδρομής αυτών των σωματιδίων είναι 32m ενώ το μέγιστο 45m.

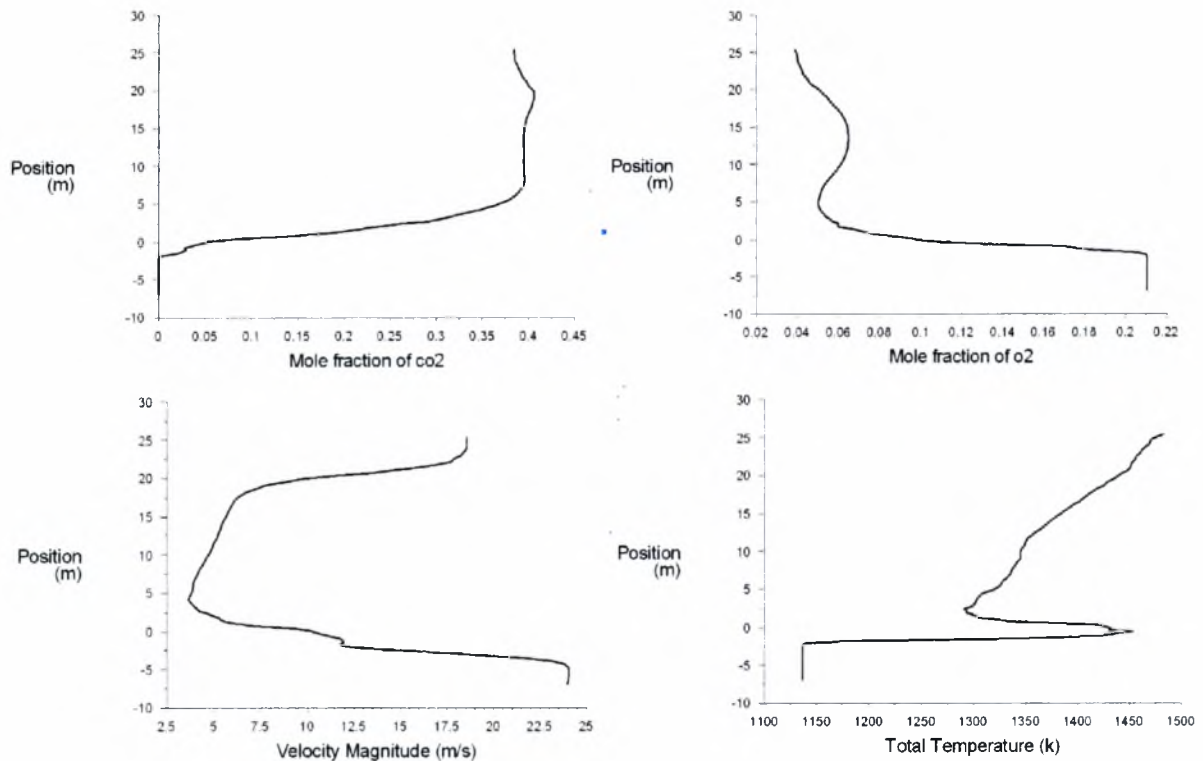


Σχήμα 5-59 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων CaCO_3 [σε sec] (Περίπτωση 2)



Σχήμα 5-60 Προθέρμανση, ασβεστοποίηση και ψύξη σωματιδίων CaCO_3 (Περίπτωση 2)

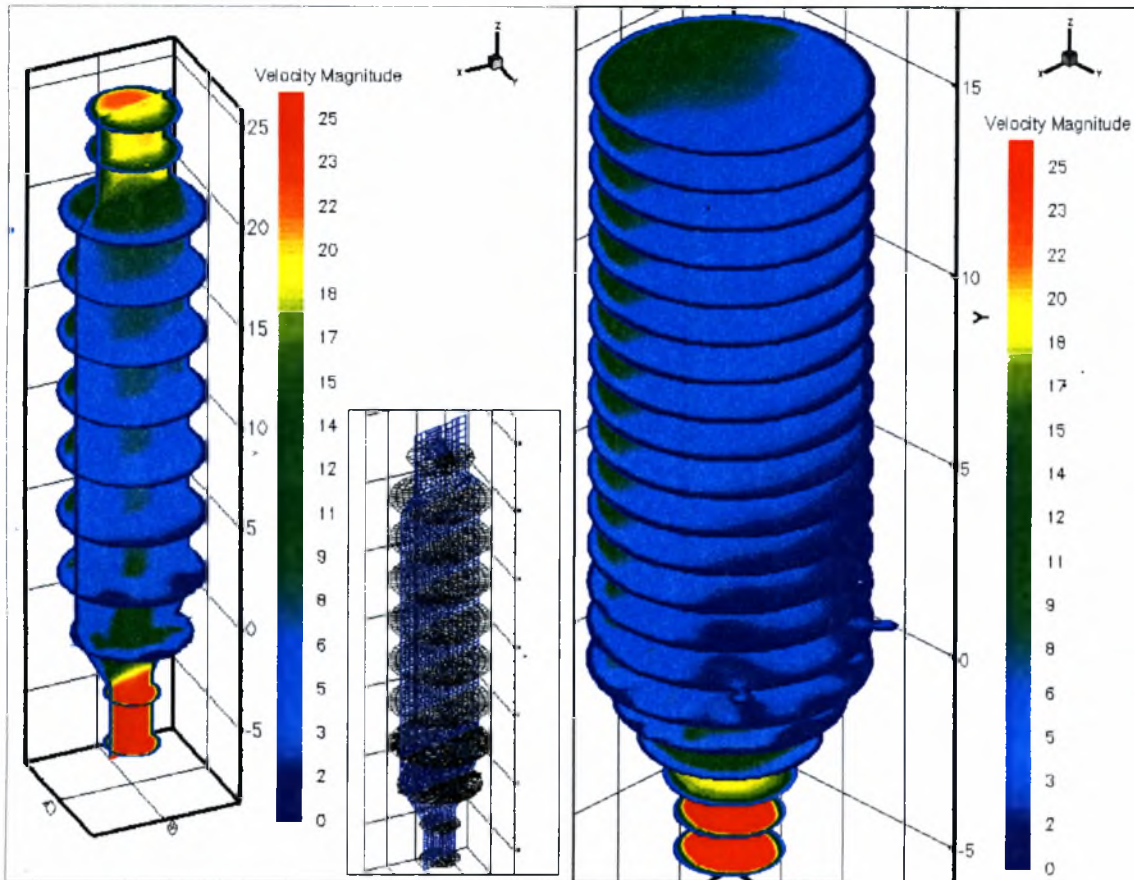
Στα Σχήματα 5-59 και 5-60 παρουσιάζονται οι τροχιές των σωματιδίων CaCO_3 . Στο πρώτο παρουσιάζονται οι τροχιές σε σχέση με τον χρόνο παραμονής των συγκεκριμένων σωματιδίων μέσα στον ασβεστοποιητή. Η παραμονή των σωματιδίων διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, όπου στην πρώτη δεν ξεπερνά τα 6 sec, στην δεύτερη αγγίζει τα 10 sec ενώ ο μεγαλύτερος χρόνος που σημειώνεται είναι 15,1 sec. Από τον μέσο χρόνο παραμονής συνάγεται ότι η ταχύτητα ανόδου των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από αυτή των σωματιδίων του κάρβουνου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο 'κανάλι' αέρα με μεγαλύτερη ταχύτητα που ουσιαστικά δημιουργείται από την χαμηλή πυκνότητα σωματιδιακού φορτίου, με αποτέλεσμα αυτό με την σειρά του να συμπαρασύρει τα ελαφρότερα σωματίδια της φαρίνας και ένα πολύ μεγάλο μέρος από τα αντίστοιχα του κάρβουνου. Στο Σχήμα 5-62 καταγράφεται η κάθε μια τροχιά με την φυσικοχημική κατάσταση στην οποία εμπίπτει στο κάθε σημείο. Η ασβεστοποίηση σημειώνεται στον ημικύλινδρο που ορίζεται από τους προσαγωγούς της φαρίνας και τα ακροφύσια του καυσίμου, γεγονός που συμφωνεί και με το θερμοκρασιακό πεδίο, αλλά και αυτό των συγκεντρώσεων CO_2 . Το ποσοστό ασβεστοποίησης για την συγκεκριμένη περίπτωση καυσίμου αγγίζει το 96,5%, και πραγματοποιείται σε όλο το διαθέσιμο ενεργό ύψος μέσα στην διάταξη.



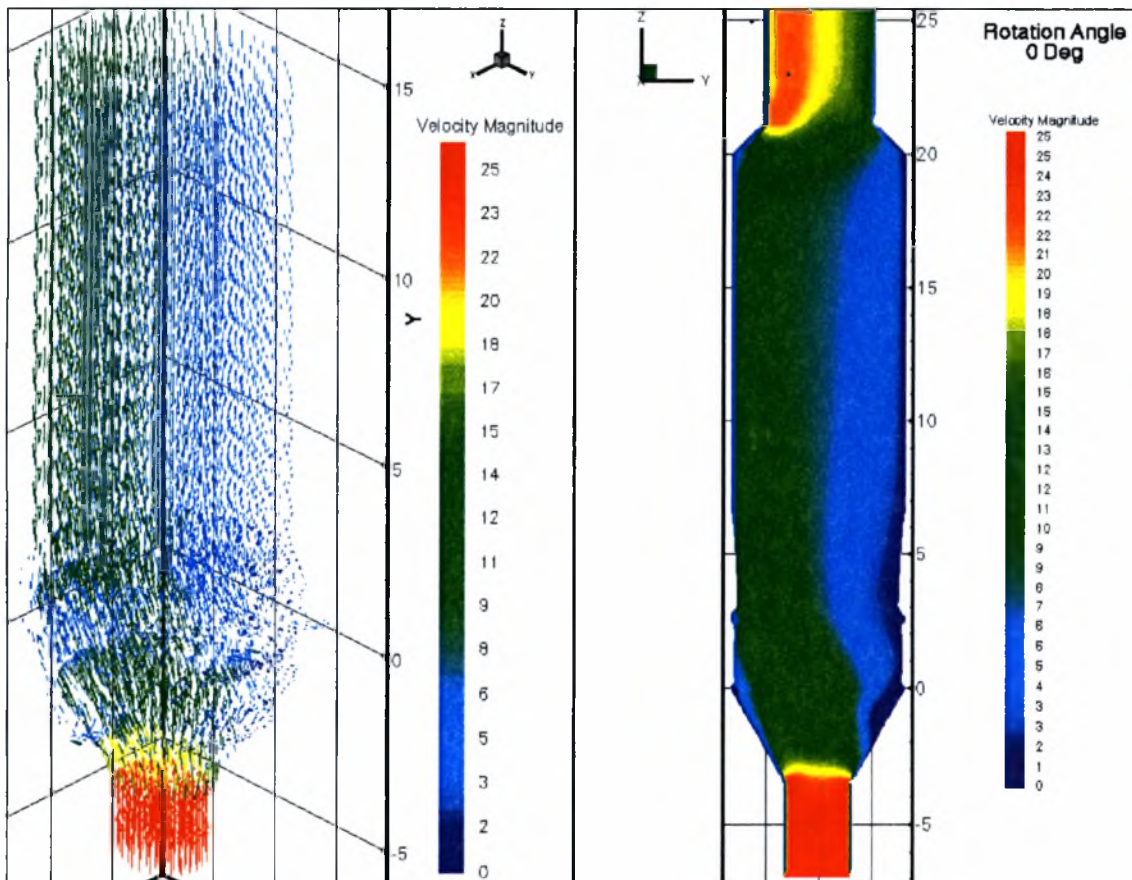
Σχήμα 5-61 Εξέλιξη βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών σε σχέση με το ύψος του ασβεστοποιητή

Στο Σχήμα 5-61 δίνονται διαγράμματα που περιγράφουν την εξέλιξη ορισμένων βασικών μεταβλητών σε σχέση με το ύψος της διάταξης. Οι παραπάνω καμπύλες καταγράφουν την μεταβολή της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και του κλάσματος γραμμομορίων του CO_2 και O_2 αντίστοιχα, καθ' ύψος του κεντρικού άξονα του ασβεστοποιητή, δίνοντας μια χαρακτηριστική εικόνα των έντονων μεταβολών που συντελούνται στο εξωτερικό της διάταξης.

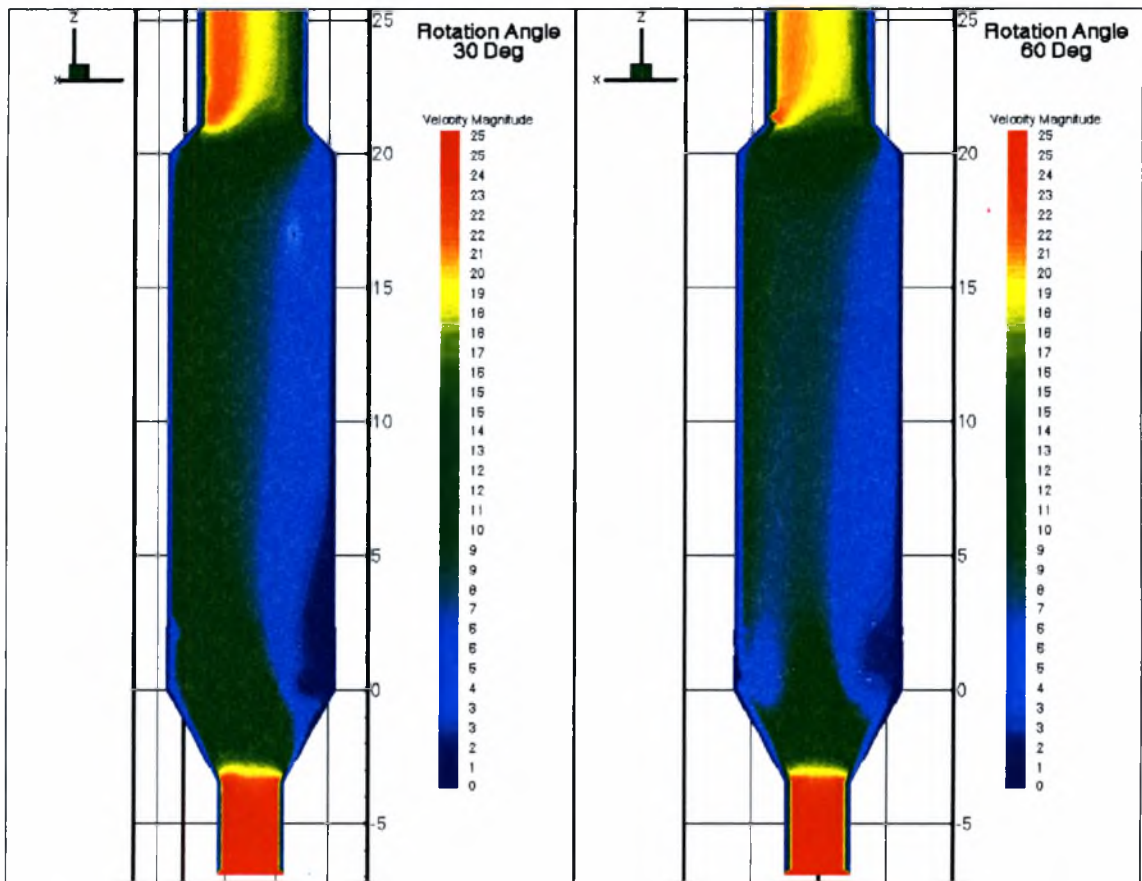
Σε σχέση με τη προηγούμενη περίπτωση 1 διακρίνονται σημαντικές διαφορές. Το κλάσμα mole του CO_2 λαμβάνει γρηγορότερα οριακές τιμές για τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και διατηρείται στα ίδια επίπεδα για ύψος περίπου 22m. Περίπου αντίθετη συμπεριφορά εμφανίζει το γραμμομοριακό κλάσμα του O_2 , που λόγω της πυρόλυσης και της ισχυρής φλόγας που δημιουργείται, υφίσταται ταχεία μείωση για να σταθεροποιηθεί σε χαμηλά επίπεδα λόγω της παρουσίας των αερίων προϊόντων της ασβεστοποίησης και της καύσης. Η ταχύτητα εμφανίζει όμοια εξέλιξη με αυτή της περίπτωσης 1 με πιο έντονα χαρακτηριστικά λόγω του διαχωρισμού των σωματιδίων φαρίνας από ένα μεγάλο τμήμα των σωματιδίων κάρβουνου. Όμοια με το πρώτο μοντέλο και εδώ παρατηρείται η επιτάχυνση των αερίων μαζών κατά την έξοδο τους από τον ασβεστοποιητή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα εξόδου εμφανίζεται μεγαλύτερη κατά 2.5m/sec την περίπτωση 1 κάτι που αποδίδεται στην διαφοροποιημένη παροχή του CaCO_3 και του κάρβουνου. Συγκεκριμένα, η παροχή του CaCO_3 έχει αυξηθεί κατά 10%, ενώ του κάρβουνου εμφανίζεται μειωμένη κατά 20% σε σχέση με την περίπτωση.



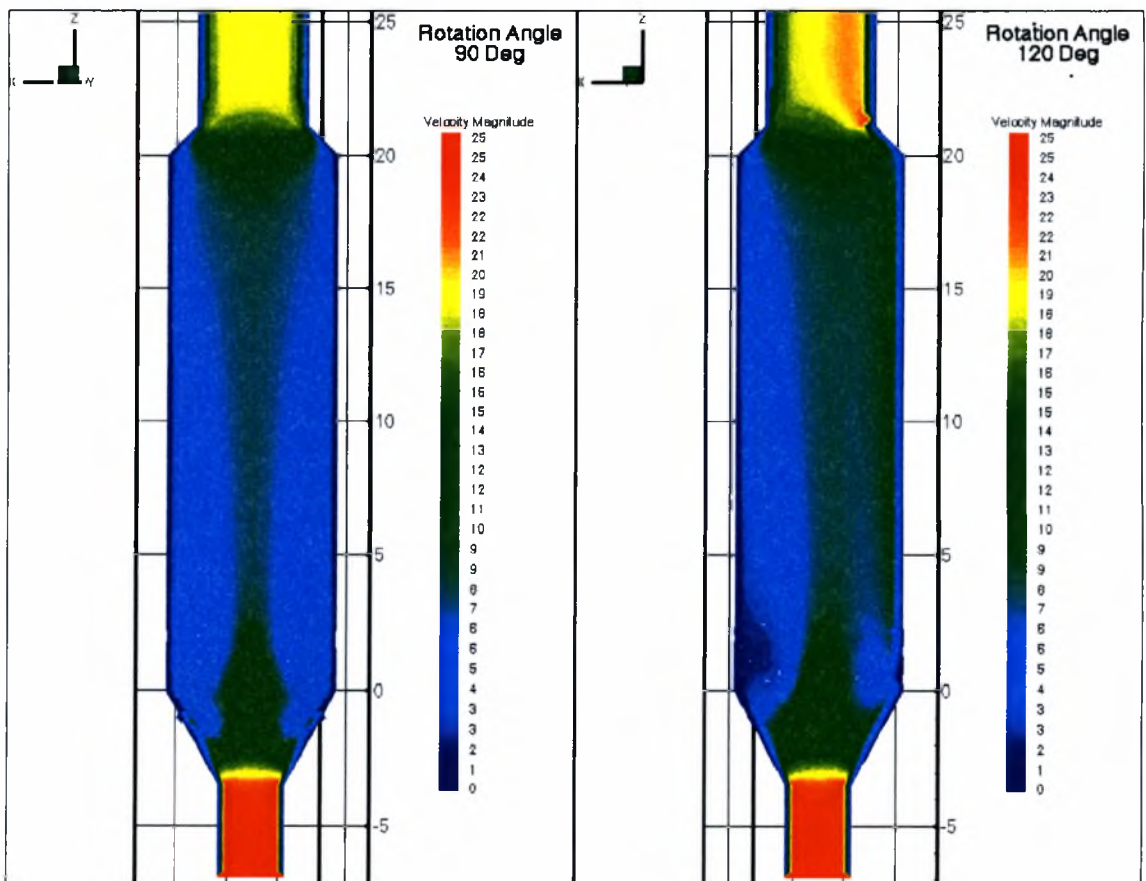
Σχήμα 5-62 Οριζόντιες τομές σε πυκνή και αραιή διάταξη σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 3)



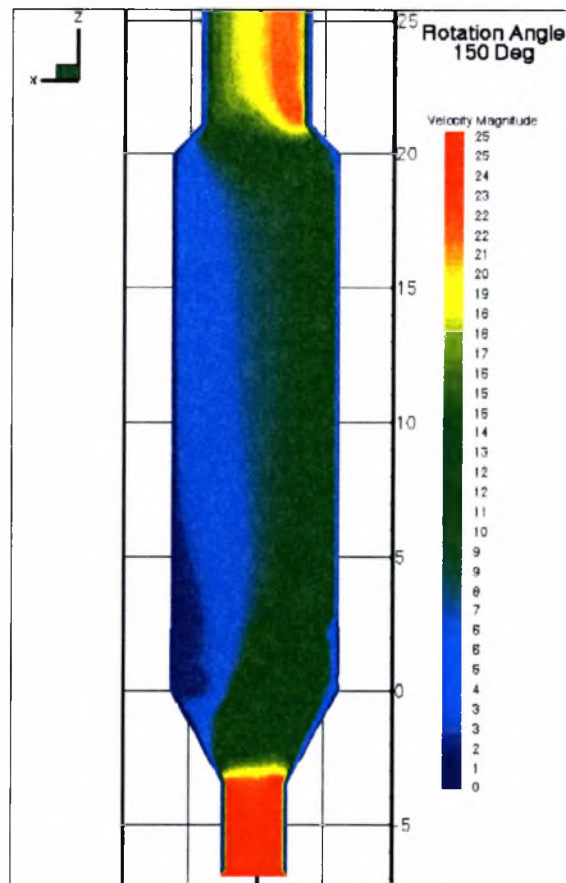
Σχήμα 5-63 Διανύσματα ταχυτήτων και η κατανομή ταχυτήτων στο συμμετρικό επίπεδο (Περίπτωση 3)



Σχήμα 5-64 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με γωνίες 30° και 60° (Περίπτωση 3)

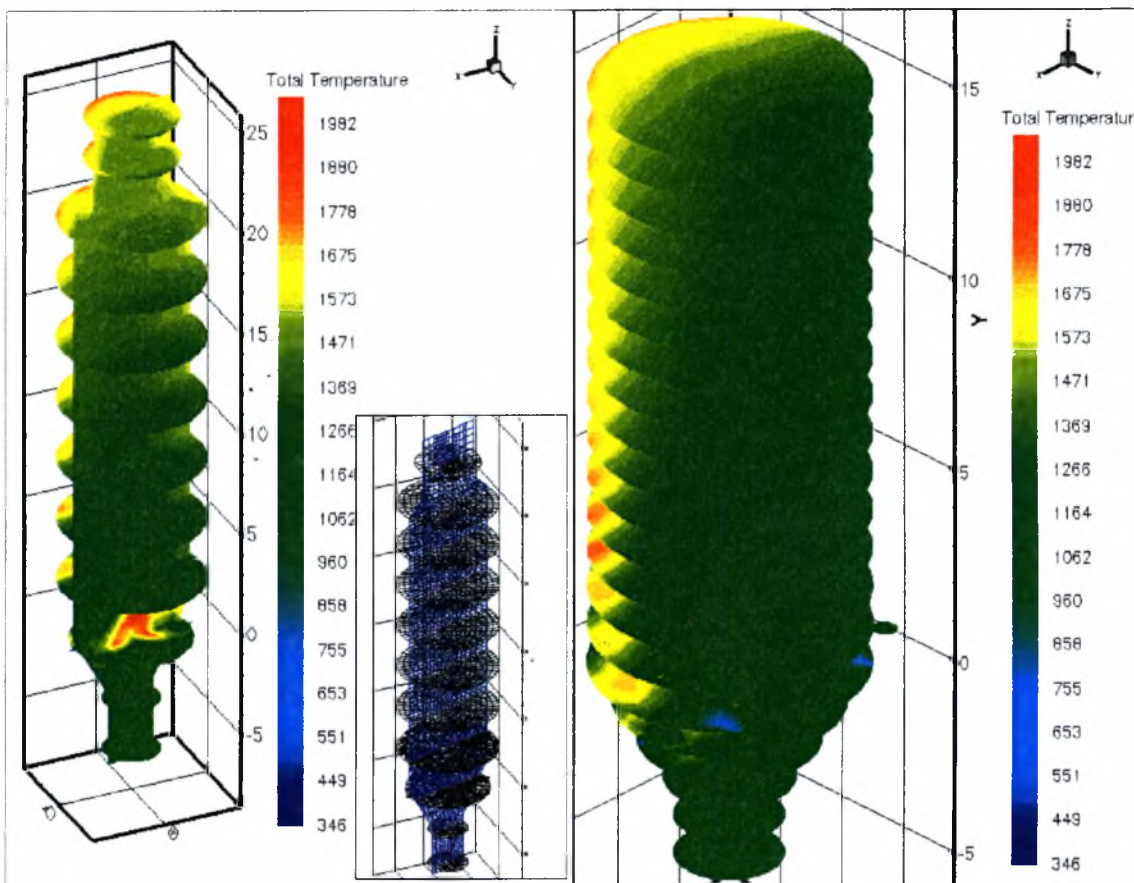


Σχήμα 5-65 Κατανομή ταχυτήτων για επίπεδα με γωνίες 90° και 120° (Περίπτωση 3)

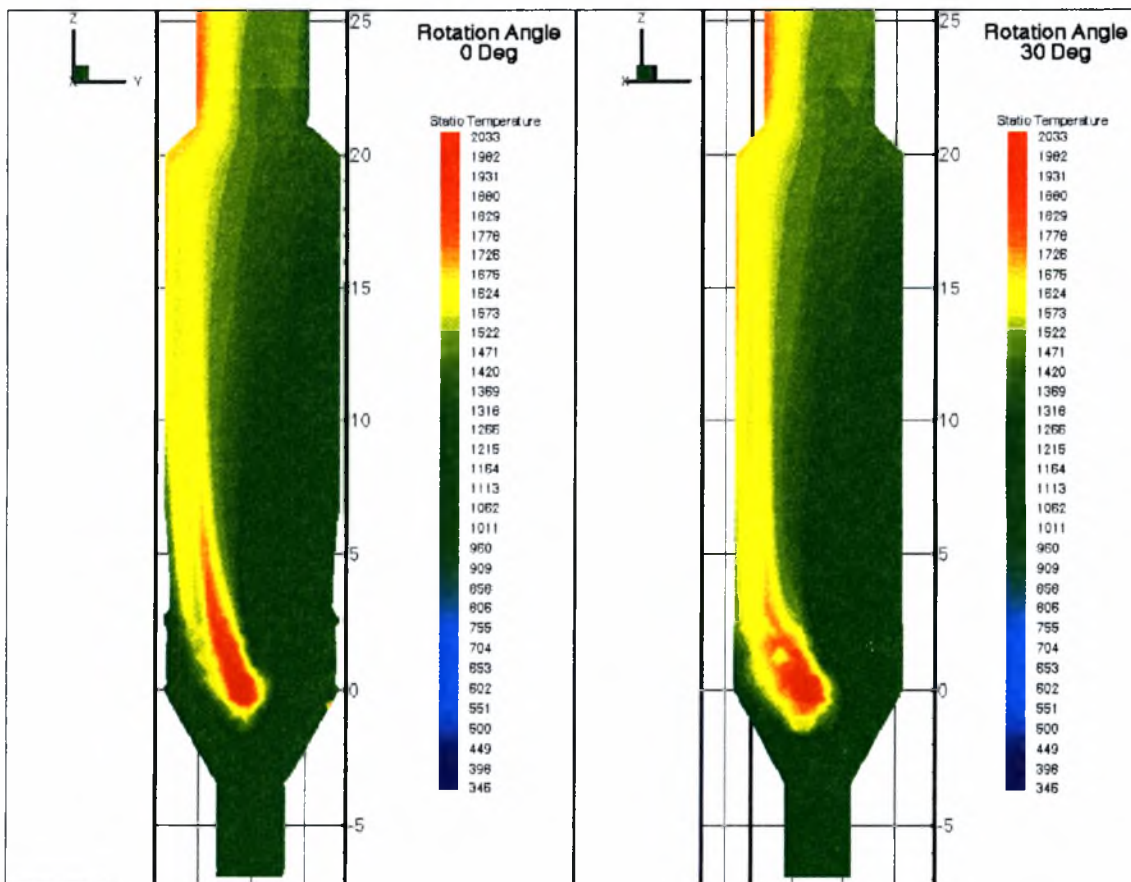


Σχήμα 5-66 Κατανομή ταχυτήτων στο επίπεδο των 150° μοιρών (Περίπτωση 3)

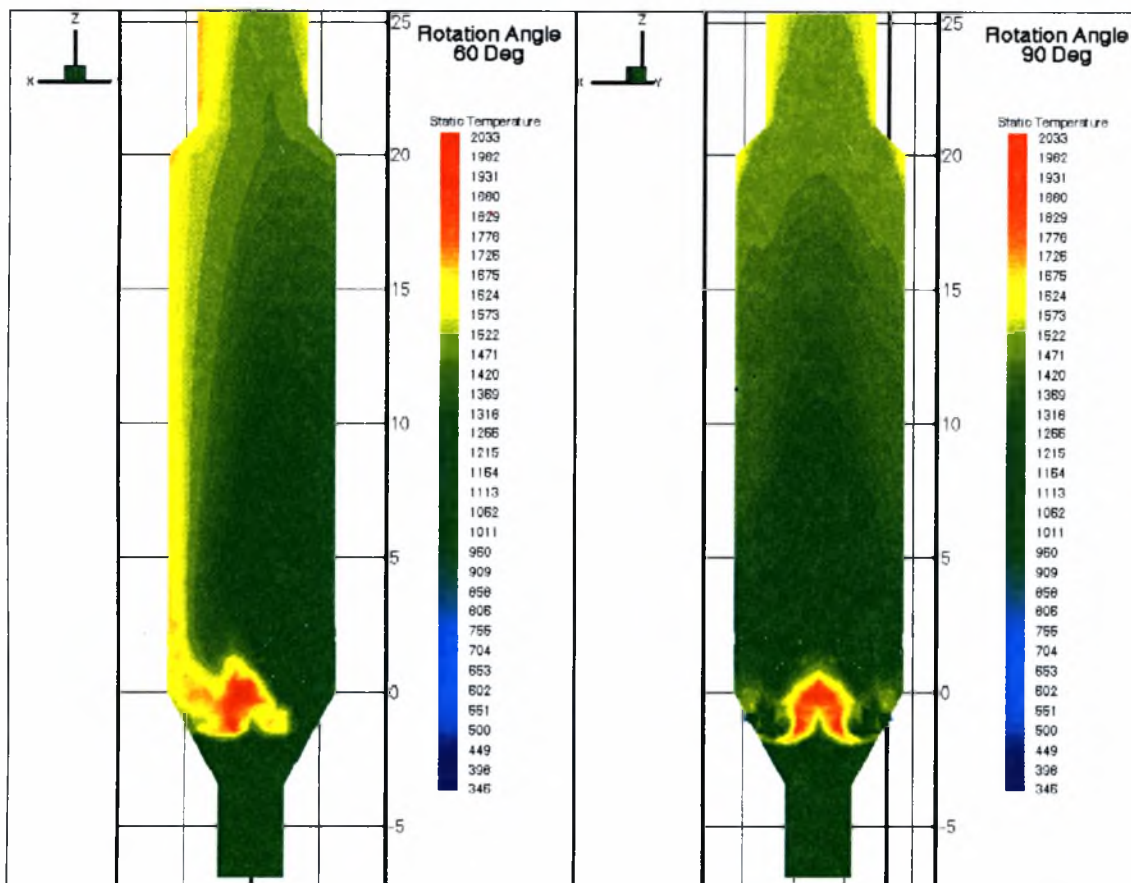
Τα Σχήματα 5-62 έως 5-66 παρουσιάζουν την εξέλιξη της ταχύτητας της συνεχούς αέριας φάσης μέσα στην διάταξη για την περίπτωση καύσιμου πέτρωκ (Περίπτωση 3). Η είσοδος του τριτογενούς αέρα γίνεται και εδώ με ταχύτητα 24 m/sec, και στην αρχή της κωνικής διάταξης το σύνολο των αερίων υφίσταται και εδώ μια απότομη μείωση της ταχύτητας γεγονός που οφείλεται στην είσοδο πρώτα του κάρβουνου και έπειτα της φαρίνας. Στον κύριο κυλινδρικό κορμό της διάταξης παρατηρείται μια διαδρομή με μεγαλύτερες ταχύτητες απέναντι από τις δύο εισόδους της φαρίνας και στην άνω περιοχή (στην συμβολή με την άνω κωνική διαμόρφωση). Εκεί η επικρατούσες ταχύτητες φθάνουν τα 8.5m/sec, καθώς ευνοούνται από την σχετικά μικρή ύπαρξη σωματιδιακών φορτίων, ενώ αντίθετα στο υπόλοιπο τμήμα οι ταχύτητες εμφανίζονται μειωμένες κατά 5 με 6 m/sec Αυτό είναι απόρροια της συγκέντρωσης του περισσότερου σωματιδιακού φορτίου (που ξεπερνά το 60% του συνολικής μάζας) σ' αυτό το τμήμα και συγχρόνως επηρεάζει και την ταχύτητα εξόδου της συνεχούς φάσης. Στην έξοδο παρουσιάζεται μια περιοχή με υψηλότερες ταχύτητες, γεγονός που οφείλεται στο κενό που εμφανίζουν οι τροχιές των σωματιδίων και στην στένωση της εξόδου. Επίσης, η είσοδος του καυσίμου δεν εμποδίζει σημαντικά αλλά επιταχύνει και εδώ ελαφρώς την άνοδο αερίων στον κεντρικό άξονα.



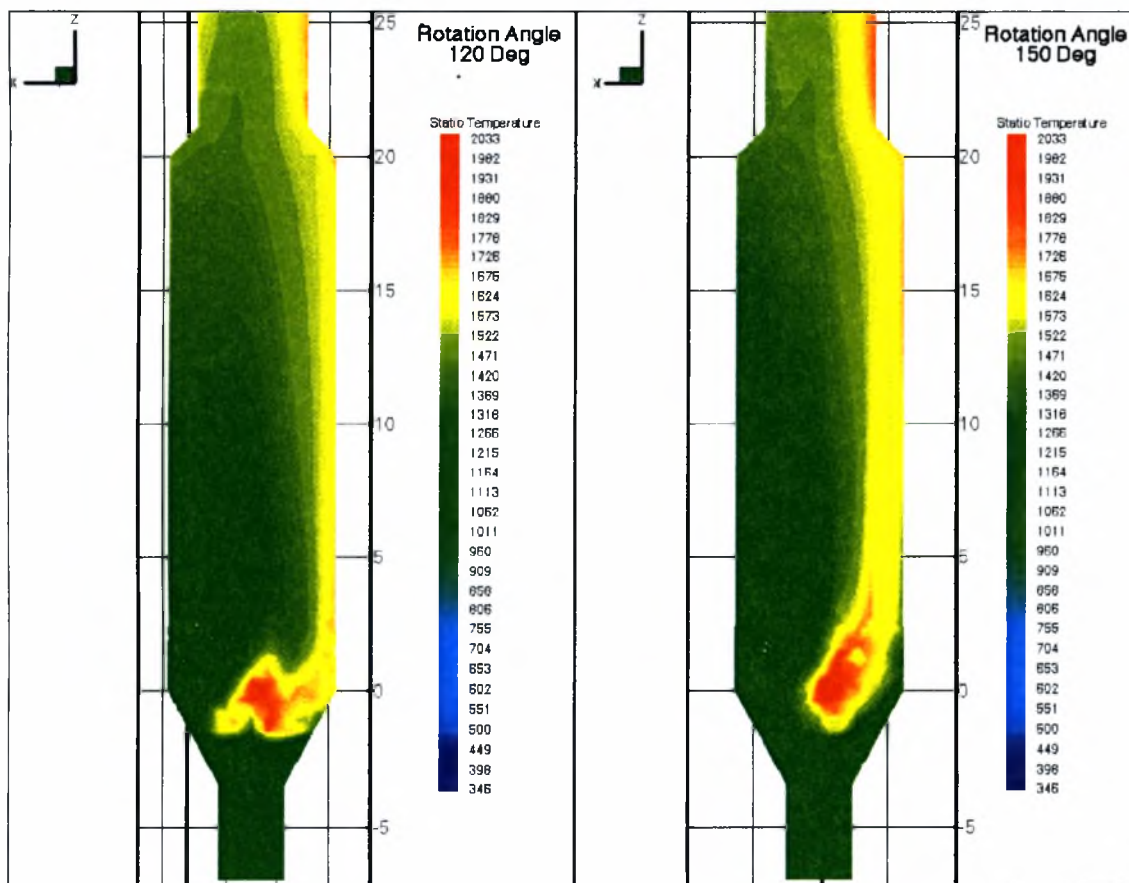
Σχήμα 5-67 Οριζόντιες τομές θερμοκρασιακού πεδίου σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 3)



Σχήμα 5-68 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές σε γωνία 0° και 30° (Περίπτωση 3)

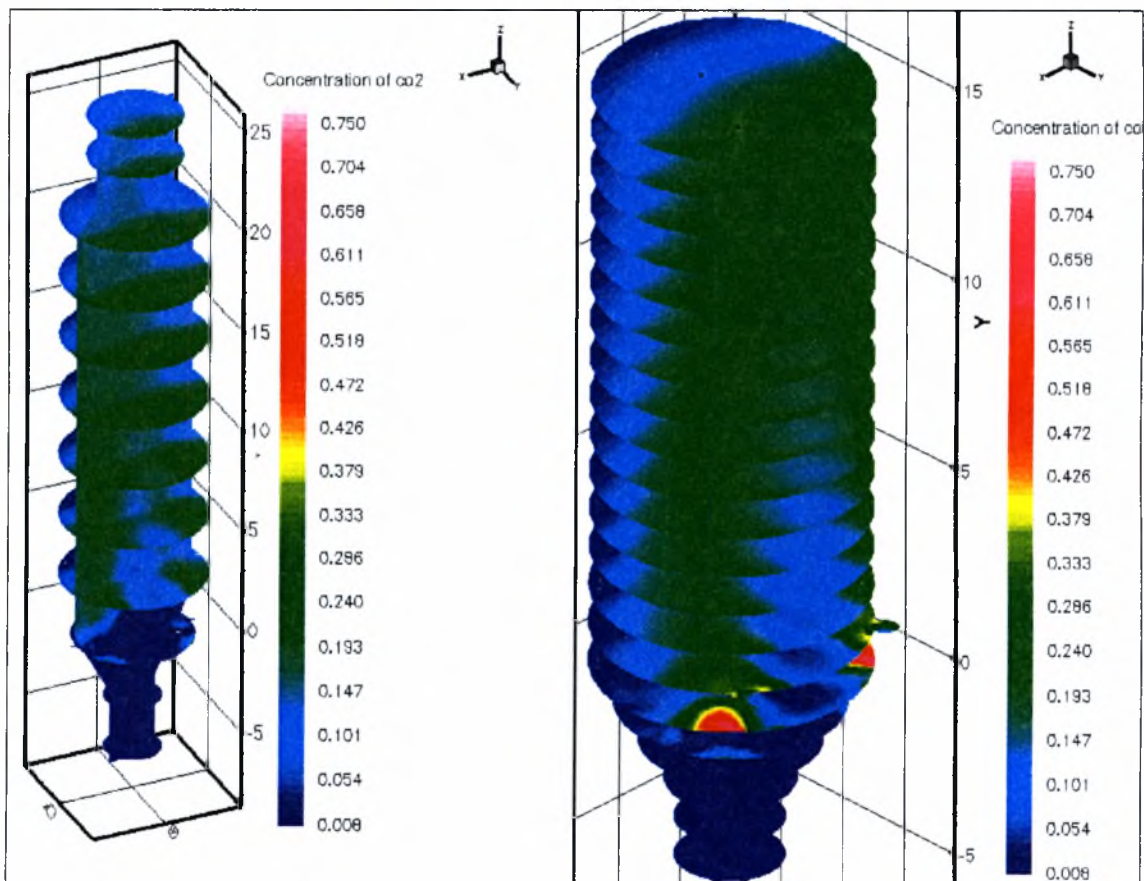


Σχήμα 5-69 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές σε γωνία 60° και 90° (Περίπτωση 3)

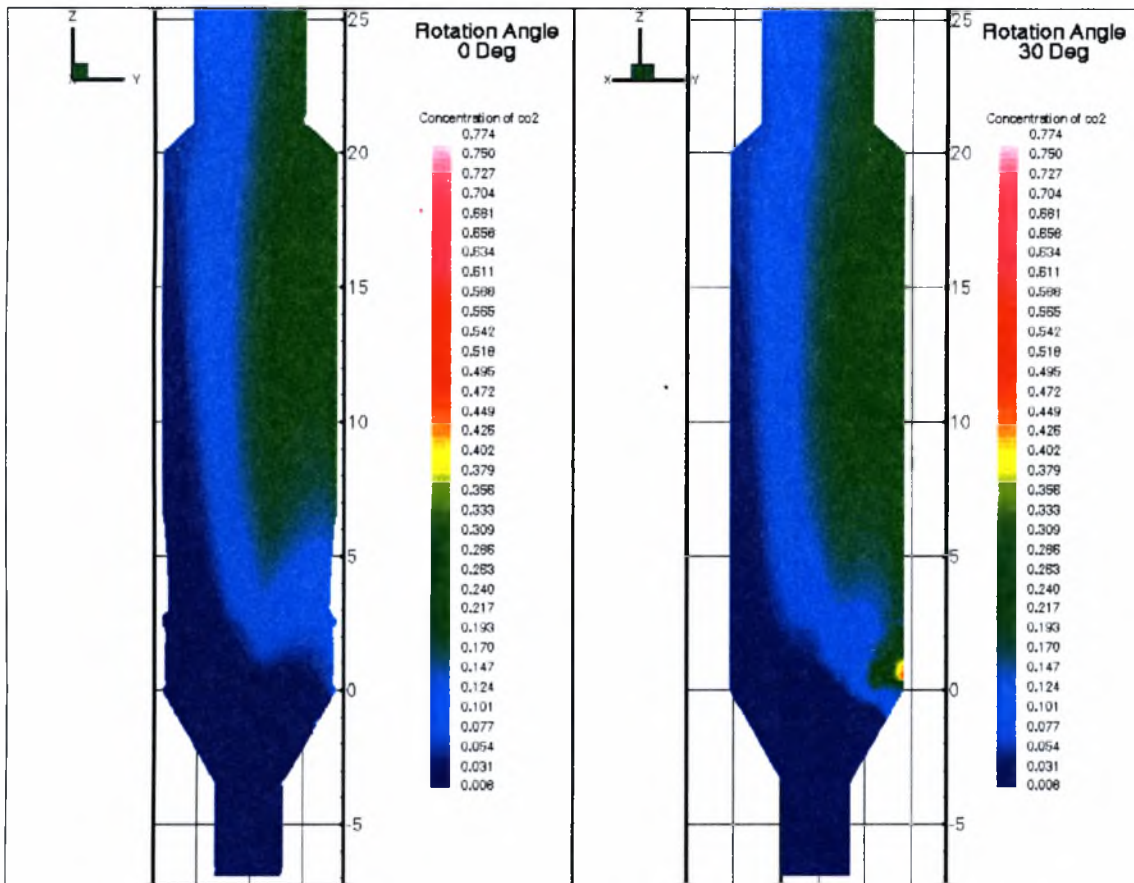


Σχήμα 5-70 Κατανομές θερμοκρασιών για τομές σε γωνία 120° και 150° (Περίπτωση 3)

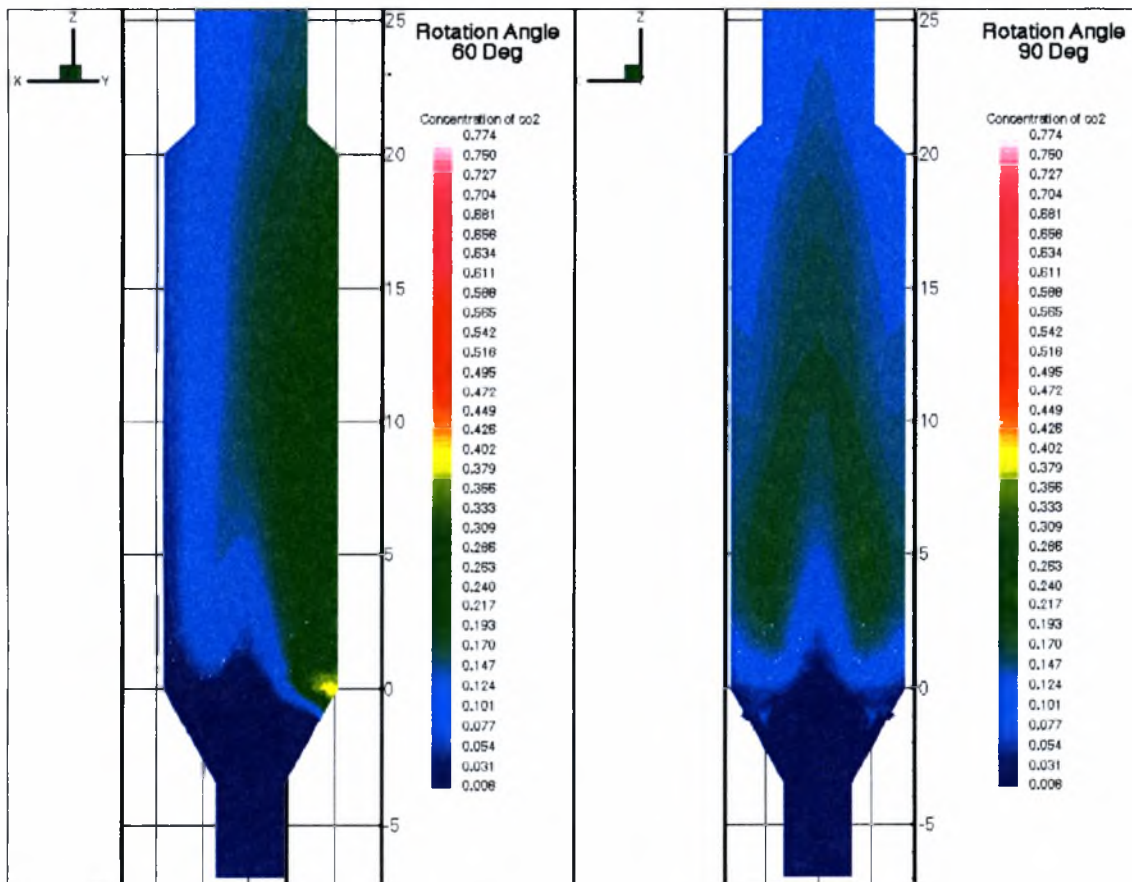
Στα Σχήματα 5-67 έως 5-70 παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό πεδίο που υπολογίζεται για την περίπτωση 3, όπου παρατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις αντίστοιχες προηγούμενες. Αυτό αποδίδεται στην καλύτερη ποιότητα καυσίμου και στο γεγονός ότι αυτό αξιοποιείται σχεδόν σε απόλυτο βαθμό από την διάταξη. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην απέναντι πλευρά από τις εισόδους της φαρίνας και οφείλονται στο εγκλωβισμό που υφίστανται τα σωματίδια κάρβουνου μικρής διαμέτρου ενώ συγχρόνως η παρουσία σωματιδίων CaCO_3 είναι εξαιρετικά μικρή. Ο κύριος κορμός διατηρείται σε εύρος θερμοκρασιών αρκετά πάνω από την θερμοκρασία εκκίνησης της ασβεστοποίησης, με αποτέλεσμα να ασβεστοποιείται σημαντική ποσότητα CaCO_3 σε σύντομο διάστημα. Οι υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται σε περιοχές όπου επικρατούν μεγαλύτερες ταχύτητες αποδίδονται στην απουσία σωματιδίων CaCO_3 που δεν δεσμεύουν την περίσσεια ενέργειας που εκλύεται. Επίσης, στην έξοδο εμφανίζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες διότι η ασβεστοποίηση που σημειώνεται εκεί είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Εδώ, πρέπει να επισημανθεί ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο όπως και στο προηγούμενο δεν υπήρχαν πειραματικά δεδομένα για την μαθηματική περιγραφή της κινητικής της εξάτμισης και καύσης των πτητικών και του στερεού υπολείμματος άνθρακα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την διεθνή βιβλιογραφία.



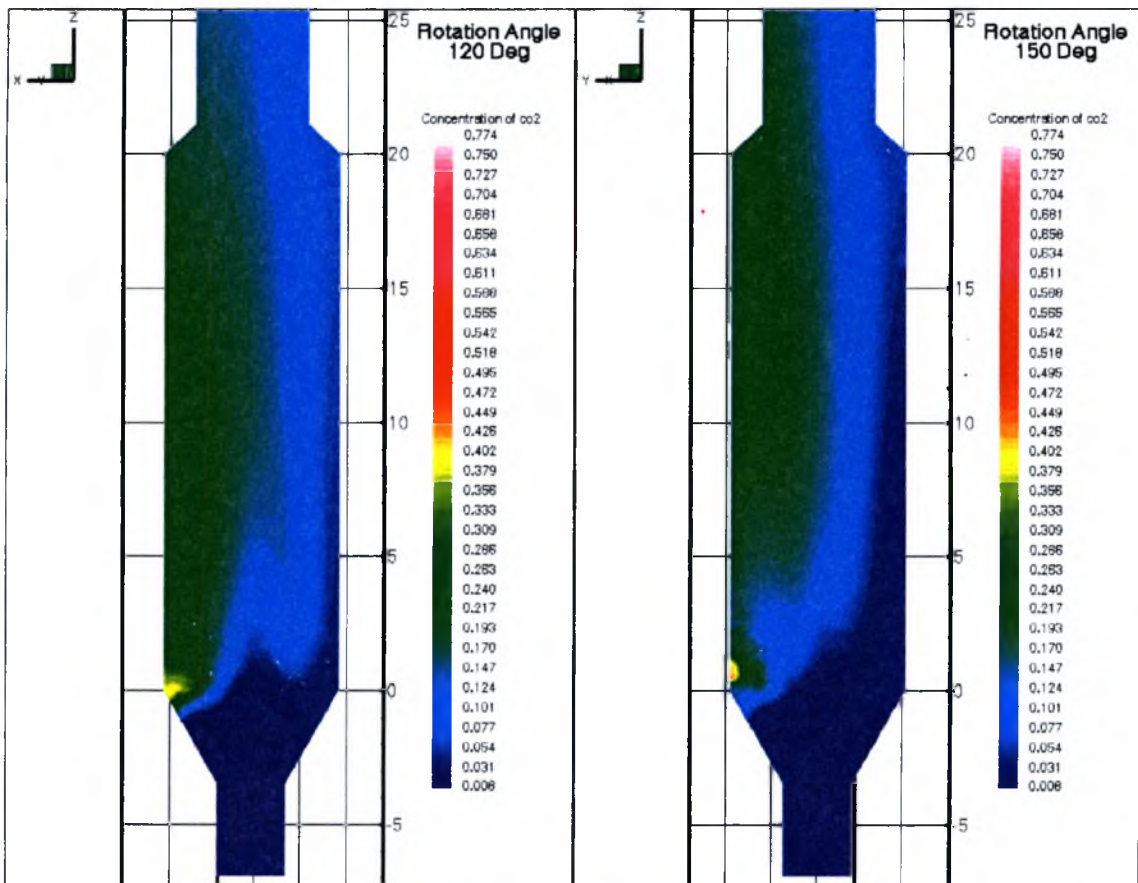
Σχήμα 5-71 Κατανομή συγκεντρώσεων CO_2 σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 3)



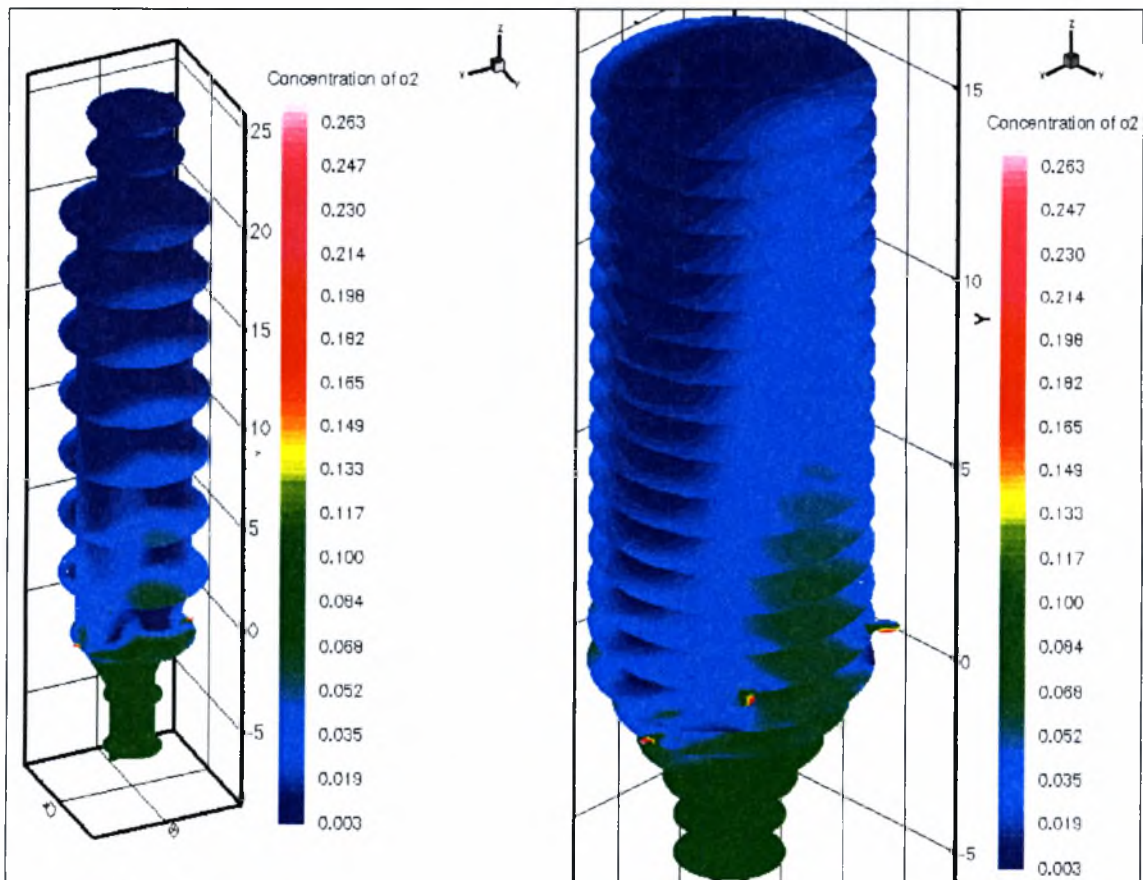
Σχήμα 5-72 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές σε γωνία 0° και 30° (Περίπτωση 3)



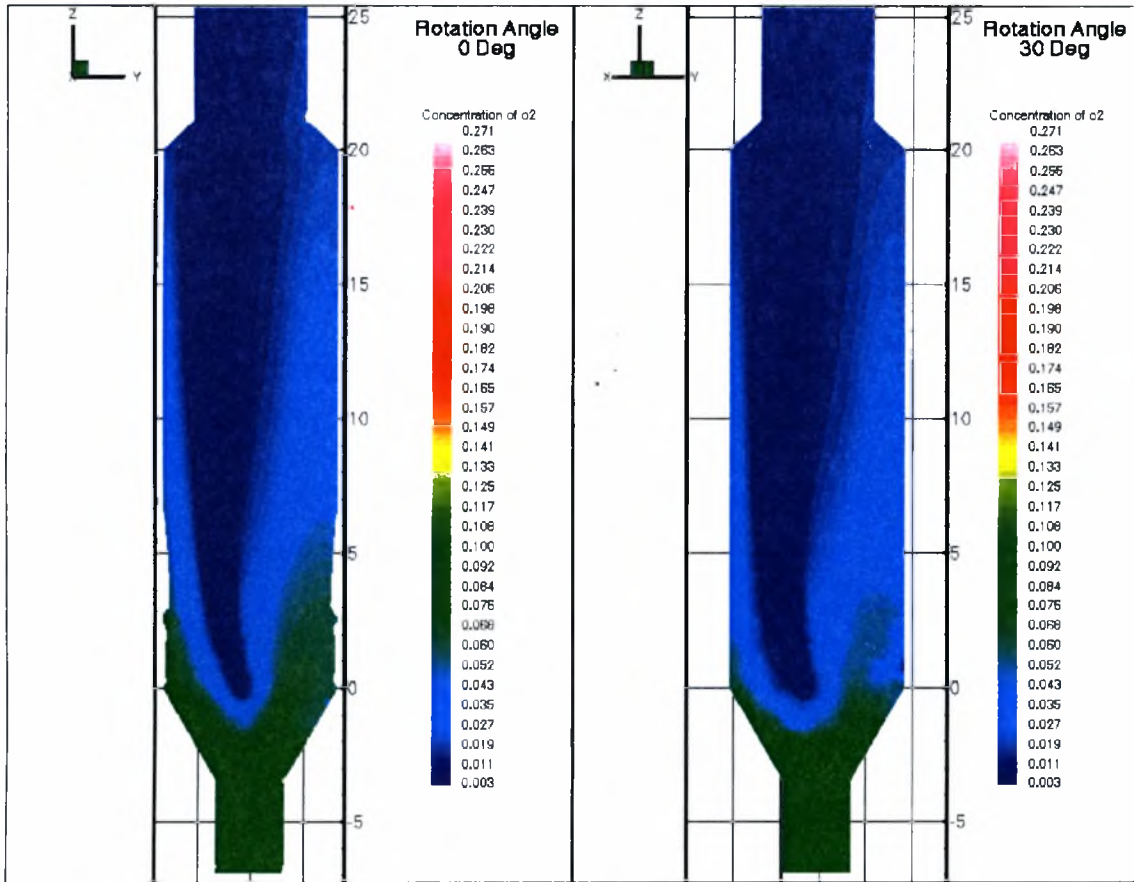
Σχήμα 5-73 Κατανομές συγκεντρώσεων CO₂ για τομές σε γωνία 60° και 90° (Περίπτωση 3)



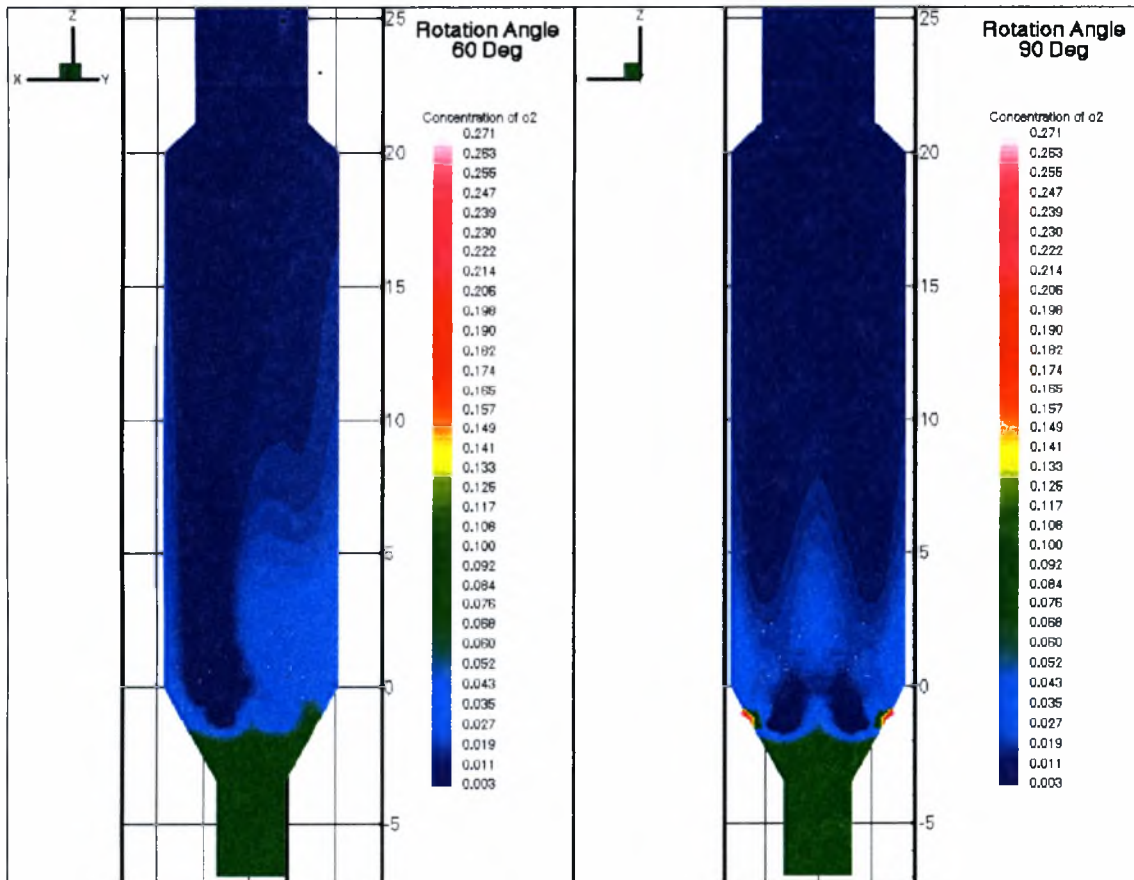
Σχήμα 5-74 Κατανομές συγκεντρώσεων CO_2 για τομές σε γωνία 120° και 150° (Περίπτωση 3)



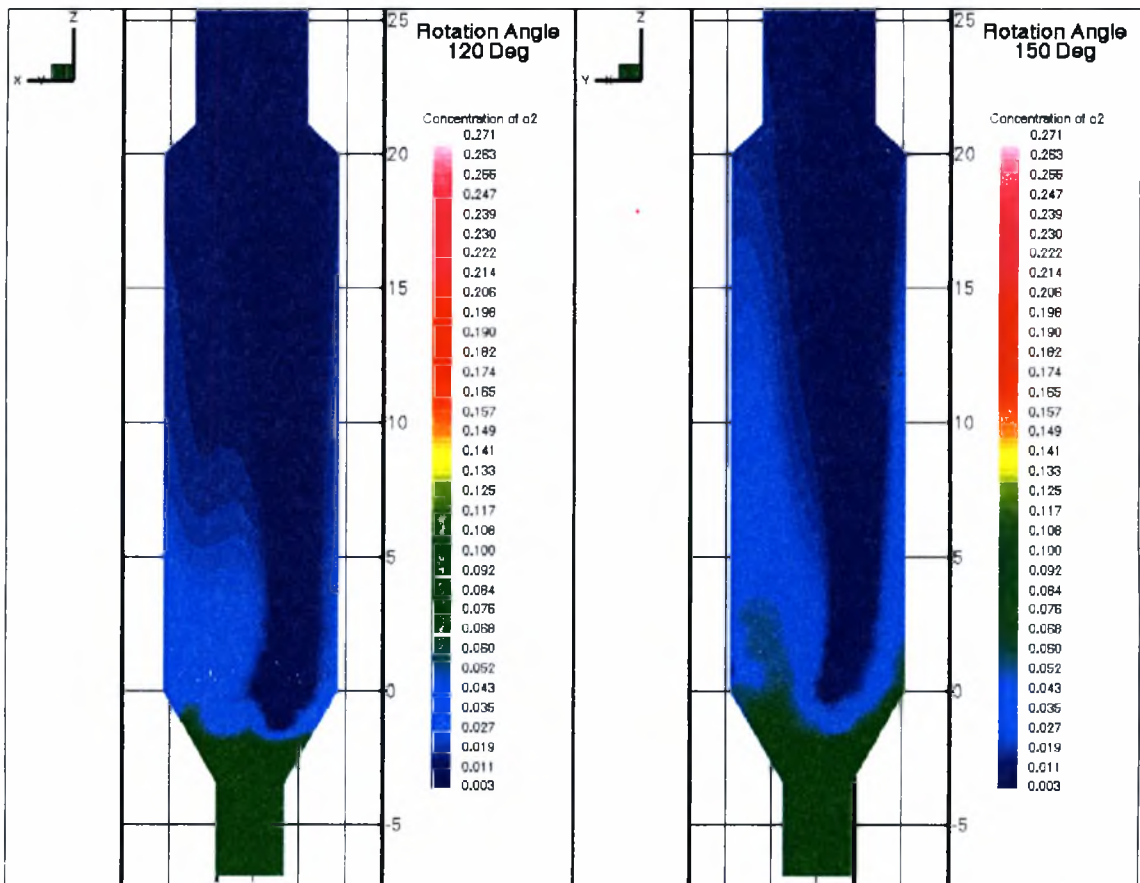
Σχήμα 5-75 Κατανομή συγκεντρώσεων O_2 σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 3)



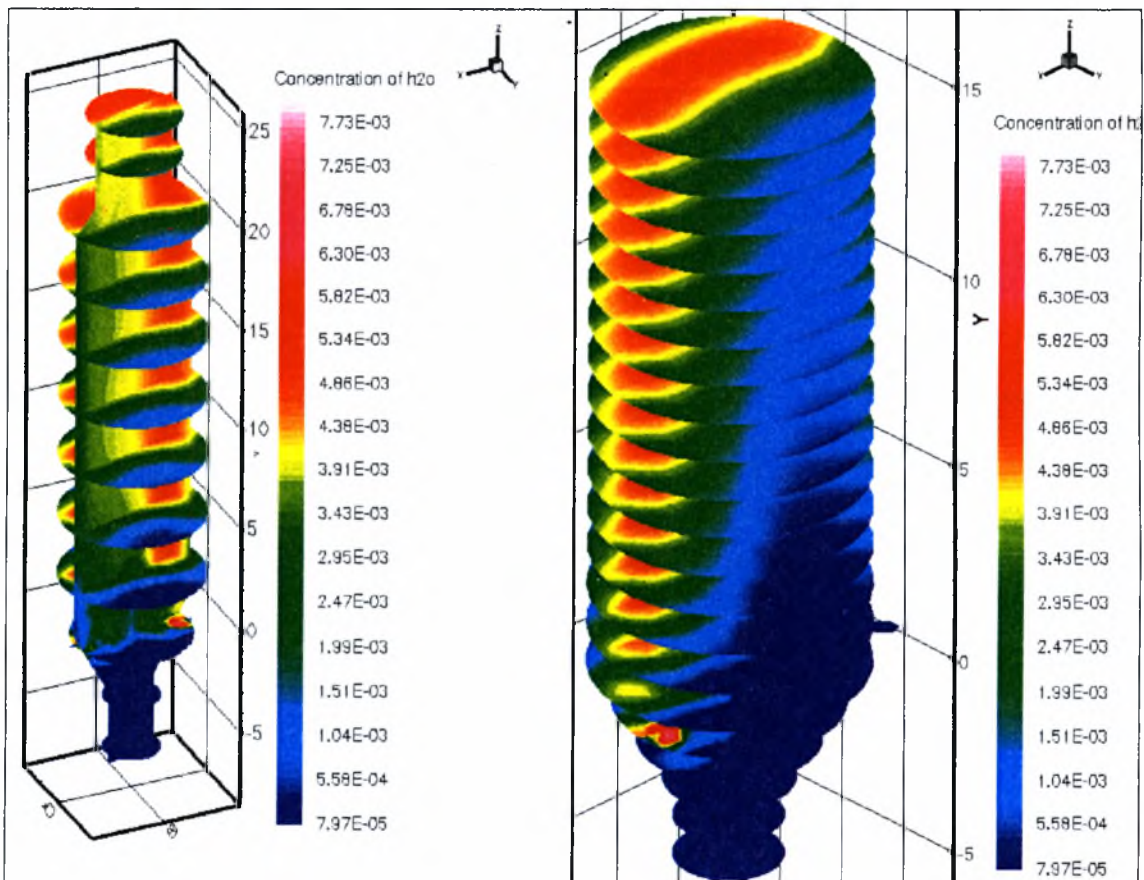
Σχήμα 5-76 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές σε γωνία 0° και 30° (Περίπτωση 3)



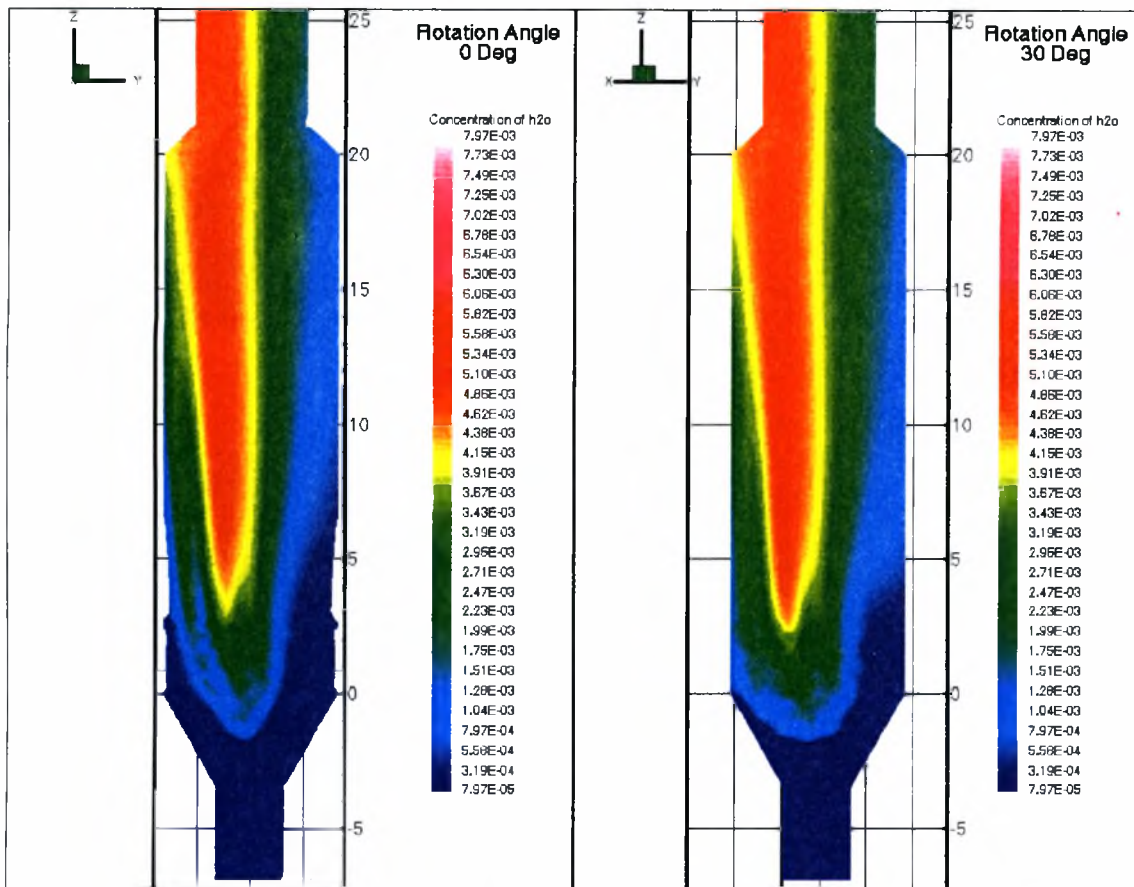
Σχήμα 5-77 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές με γωνία 60° και 90° μοίρες (Περίπτωση 3)



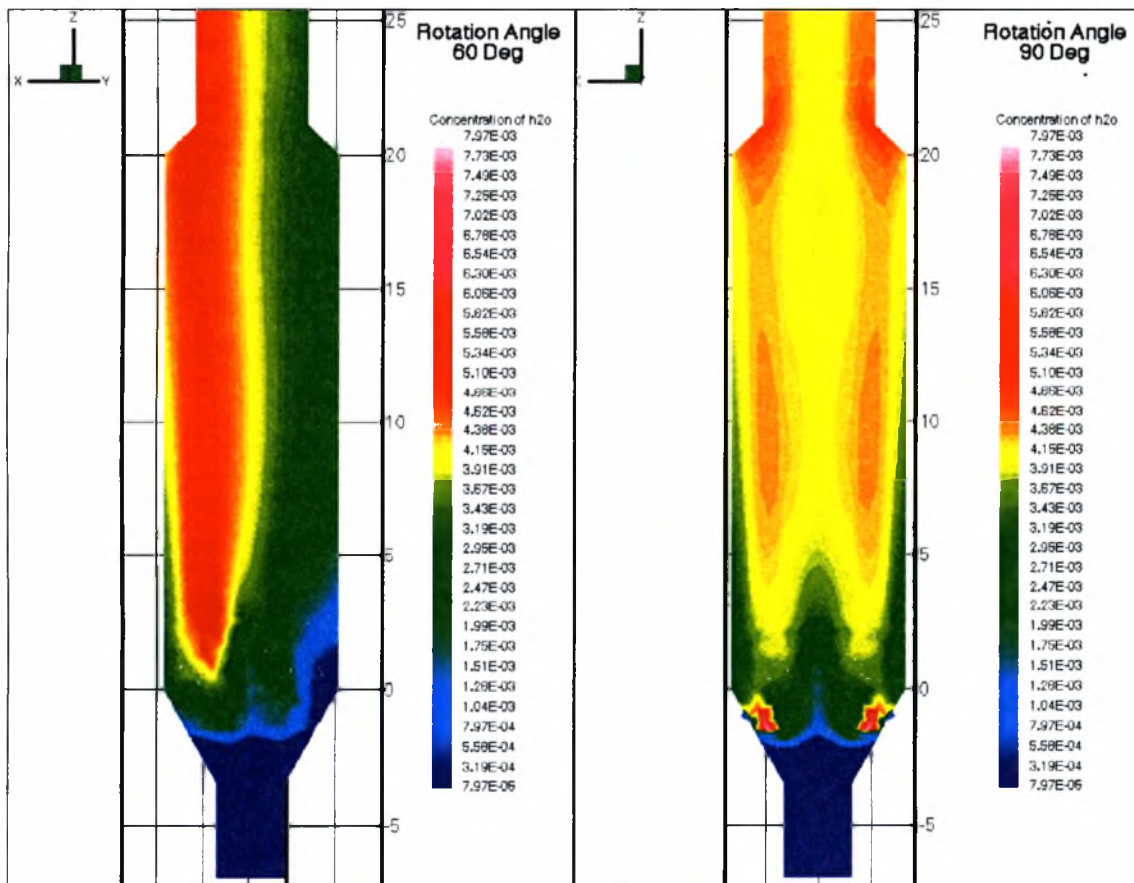
Σχήμα 5-78 Κατανομές συγκεντρώσεων O_2 για τομές με γωνία 120° και 150° (Περίπτωση 3)



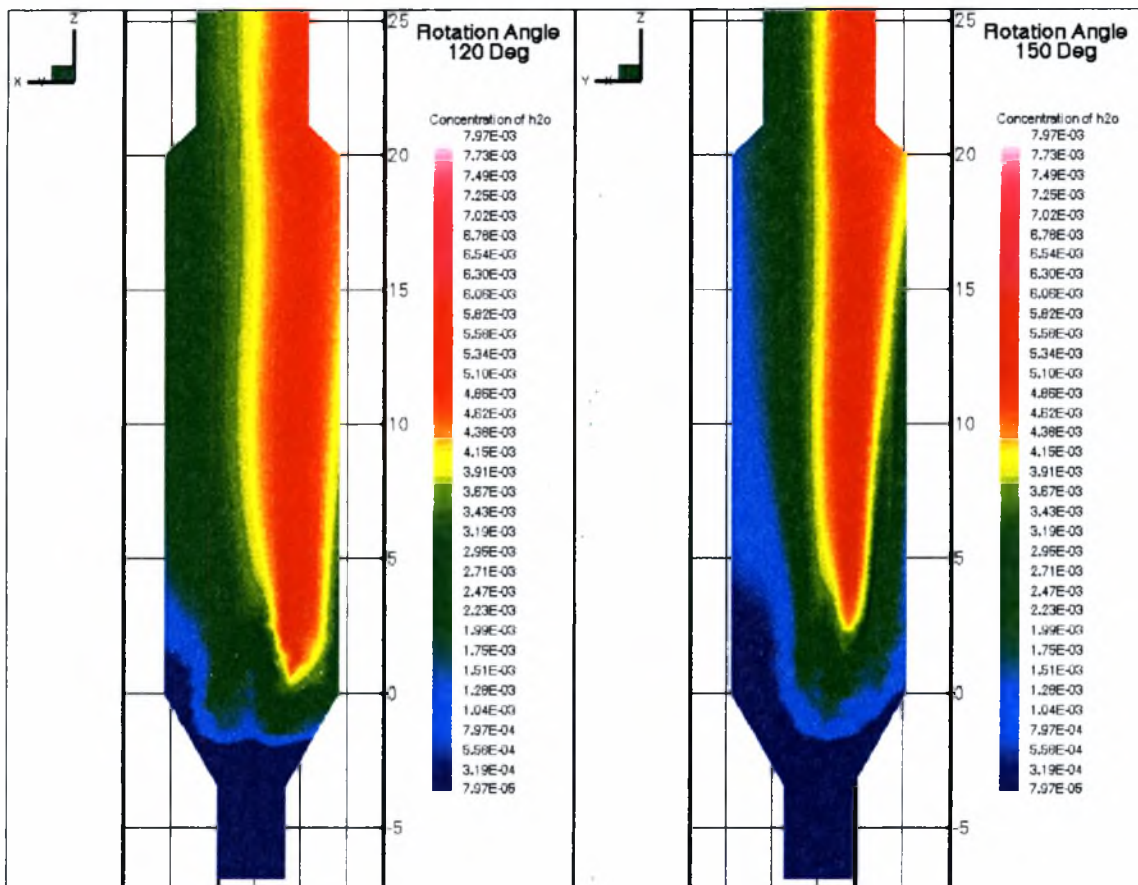
Σχήμα 5-79 Κατανομή συγκεντρώσεων H_2O σε αξονοσυμμετρική όψη (Περίπτωση 3)



Σχήμα 5-80 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές με γωνία 0° και 30° (Περίπτωση 3)

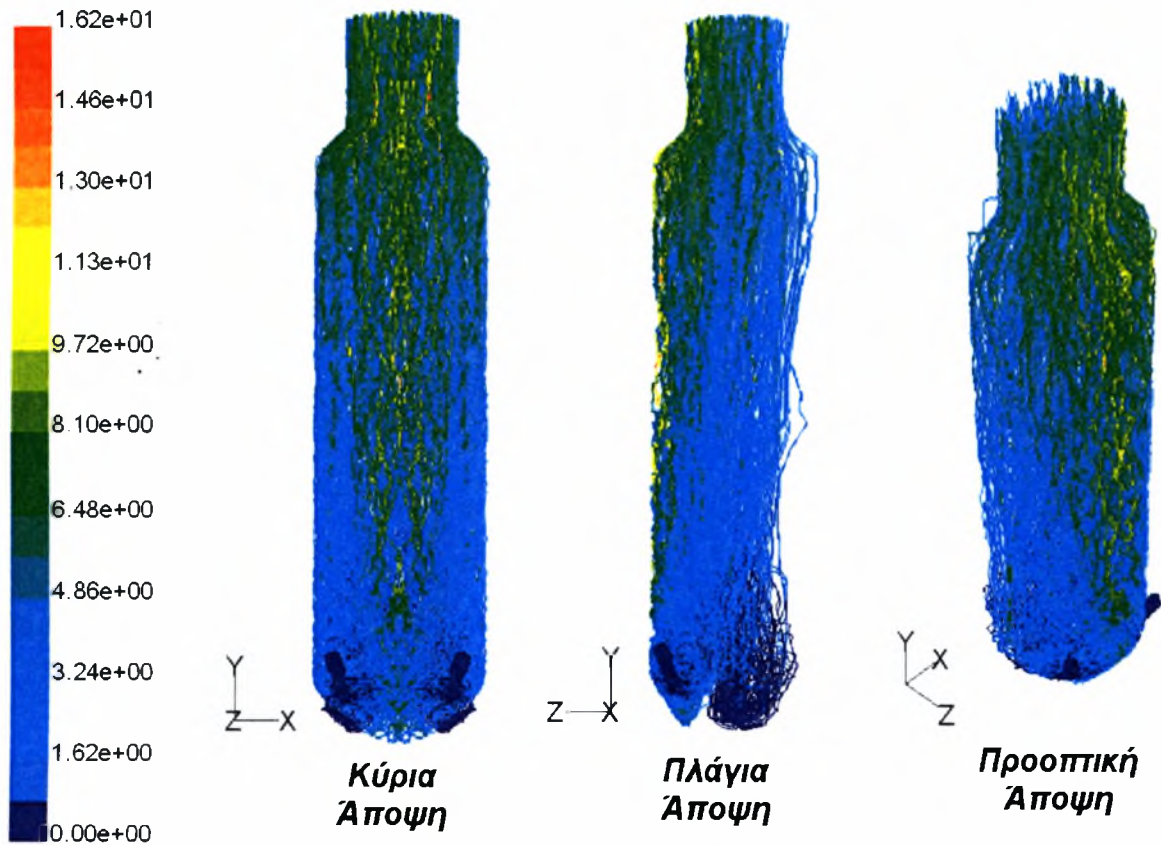


Σχήμα 5-81 Κατανομές συγκεντρώσεων H_2O για τομές σε περιεχόμενη γωνία 60° και 90° (Περίπτωση 3)

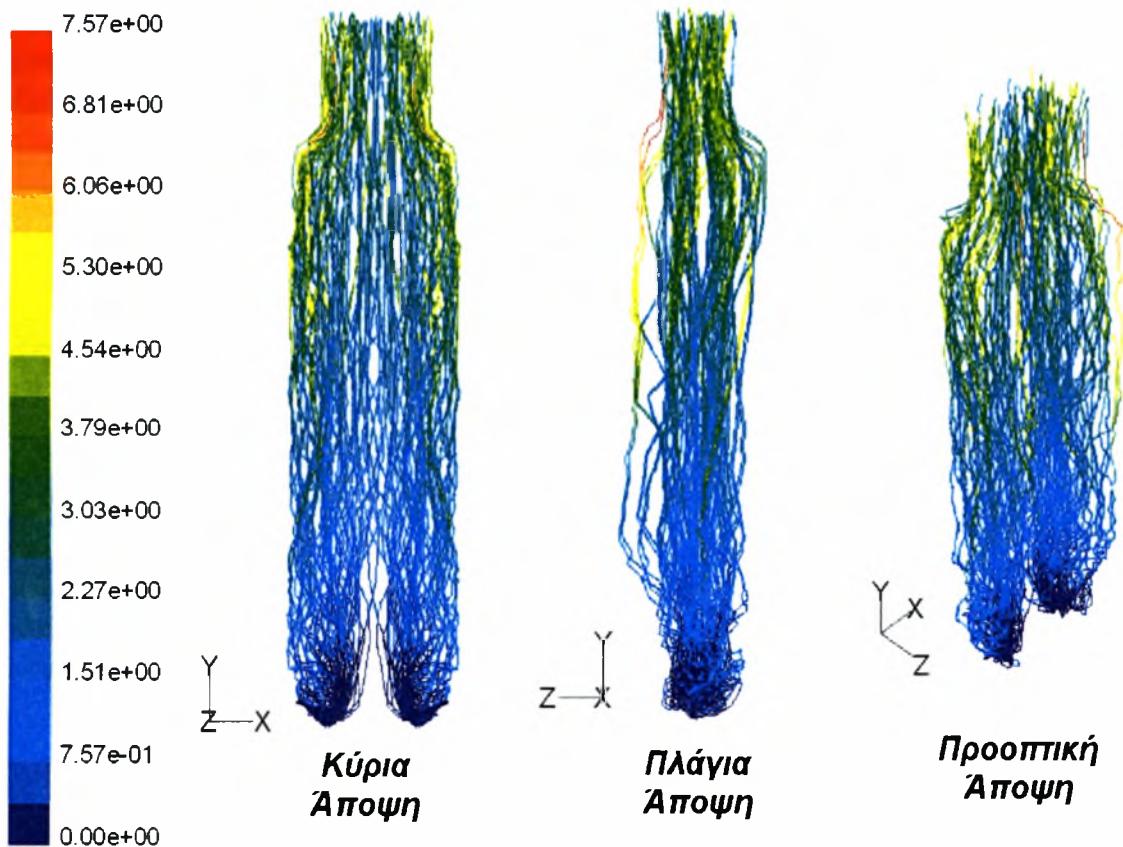


Σχήμα 5-82 Κατανομές συγκεντρώσεων H₂O για τομές με περιεχόμενη γωνία 120 και 150 μοίρες

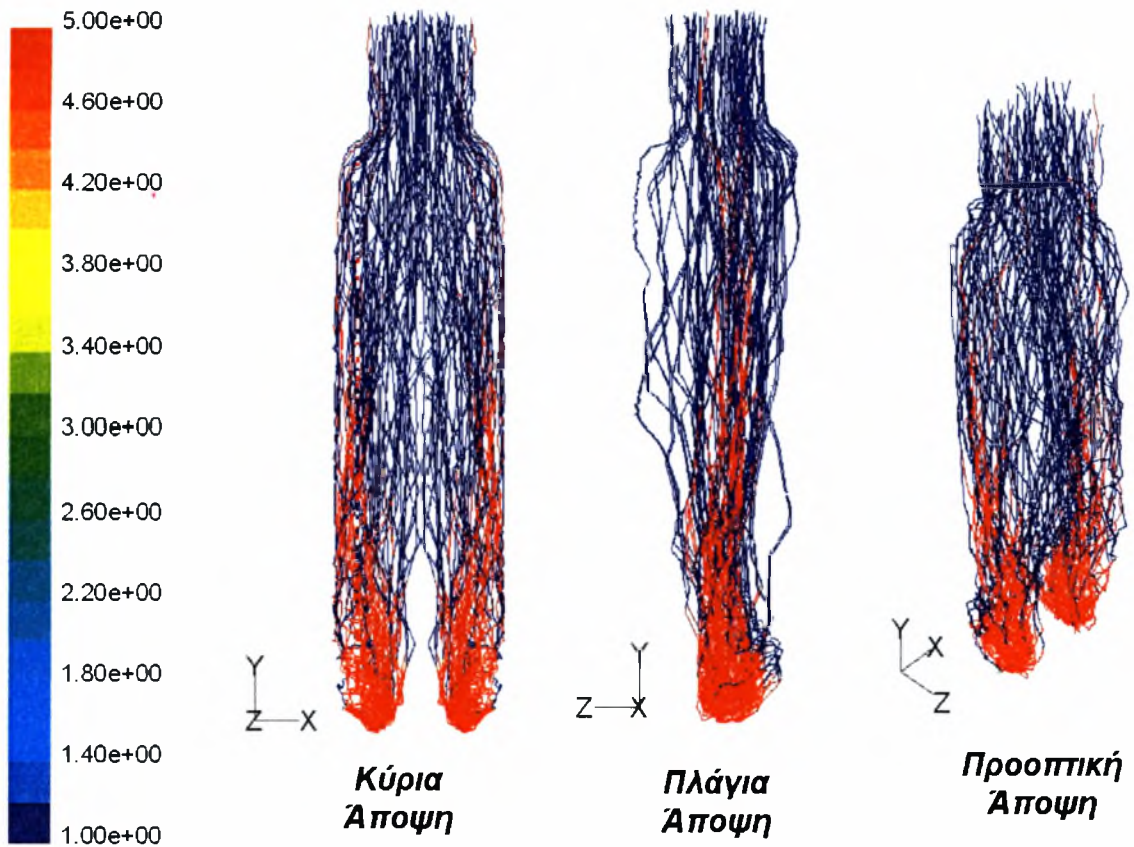
Στα Σχήματα 5-71 έως 5-74, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων CO₂, οι υψηλότερες τοπικές συγκεντρώσεις εμφανίζονται λίγο μετά την είσοδο της φαρίνας. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι οι μέγιστες δυνατές συγκεντρώσεις καθώς παρατηρείται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση θερμότητας, ενώ το παραγόμενο CO₂ περιορίζει την ασβεστοποίηση, μεταθέτοντας την σε ανώτερες περιοχές. Οι συγκεντρώσεις του CO₂ διατηρούνται σε σταθερά επίπεδα, για να μειωθούν προοδευτικά από το ύψος των 16.5m μέχρι την έξοδο, όπου μειώνεται και η διαθέσιμη ποσότητα CaCO₃. Η αναλογία του παραγόμενου CO₂ που προκύπτει από την καύση του κάρβουνου και την ασβεστοποίηση, είναι περίπου 1 προς 6. Στα Σχήματα 5-75 έως 5-78 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων O₂. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις O₂ σημειώνονται στις περιοχές, όπου η φλόγα είναι έντονη και δυνατή (πυρόλυση και έναρξη της καύσης του στερεού υπολείμματος άνθρακα). Επίσης, στο τμήμα του ημικυλίνδρου που συντελείται έντονη ασβεστοποίηση, η συγκέντρωση O₂ παραμένει σταθερά σε χαμηλά επίπεδα λόγω της πυκνότητας των σωματιδίων φαρίνας και των υψηλών σχετικά συγκεντρώσεων CO₂, ενώ σε περιοχές που έχουν εγκλωβιστεί σωματίδια κάρβουνου παρατηρούνται ακόμα πιο χαμηλές συγκεντρώσεις. Τέλος, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις H₂O, Σχήματα 5-79 έως 5-82 σημειώνονται λίγο μετά την είσοδο του καυσίμου από τα ακροφύσια και συγκεκριμένα, στην πυρόλυση και την καύση του κάρβουνου. Οι συγκεντρώσεις αυτές ελαττώνονται σε σχέση με ύψος της διάταξης απουσία φλόγας.



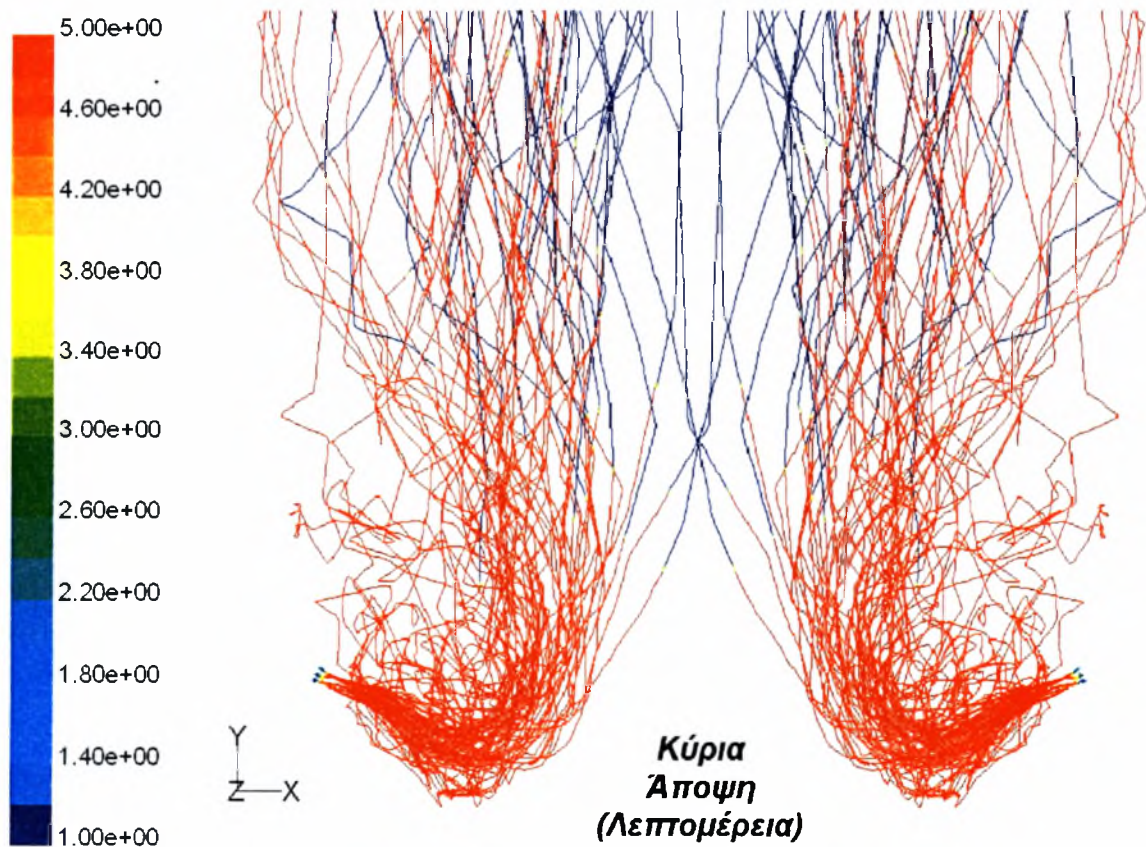
Σχήμα 5-83 Τροχιές και των δύο ειδών σωματιδίων μέσα στον ασβεστοποιητή (Περίπτωση 3)



Σχήμα 5-84 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων κάρβουνου [σε sec] (Περίπτωση 3)

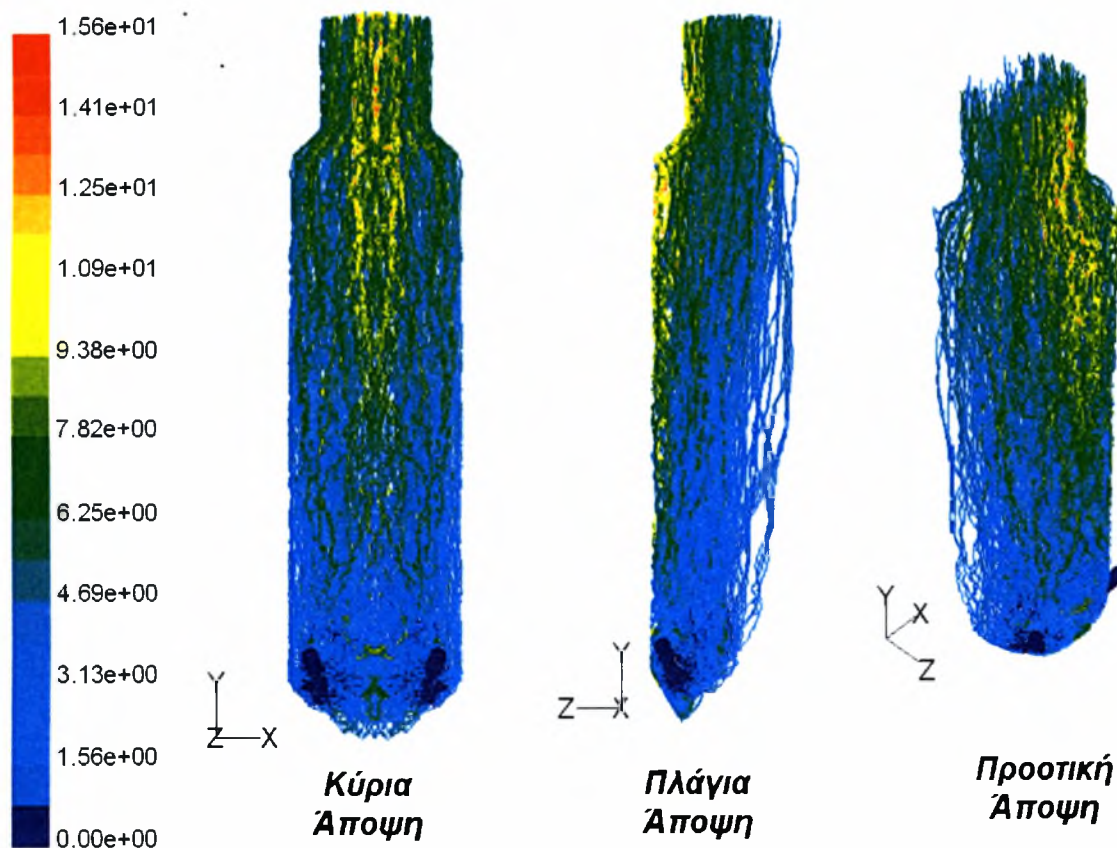


Σχήμα 5-85 Εξάτμιση και καύση πτητικών, καύση char και ψύξη σωματιδίων κάρβουνου (Περίπτωση 3)

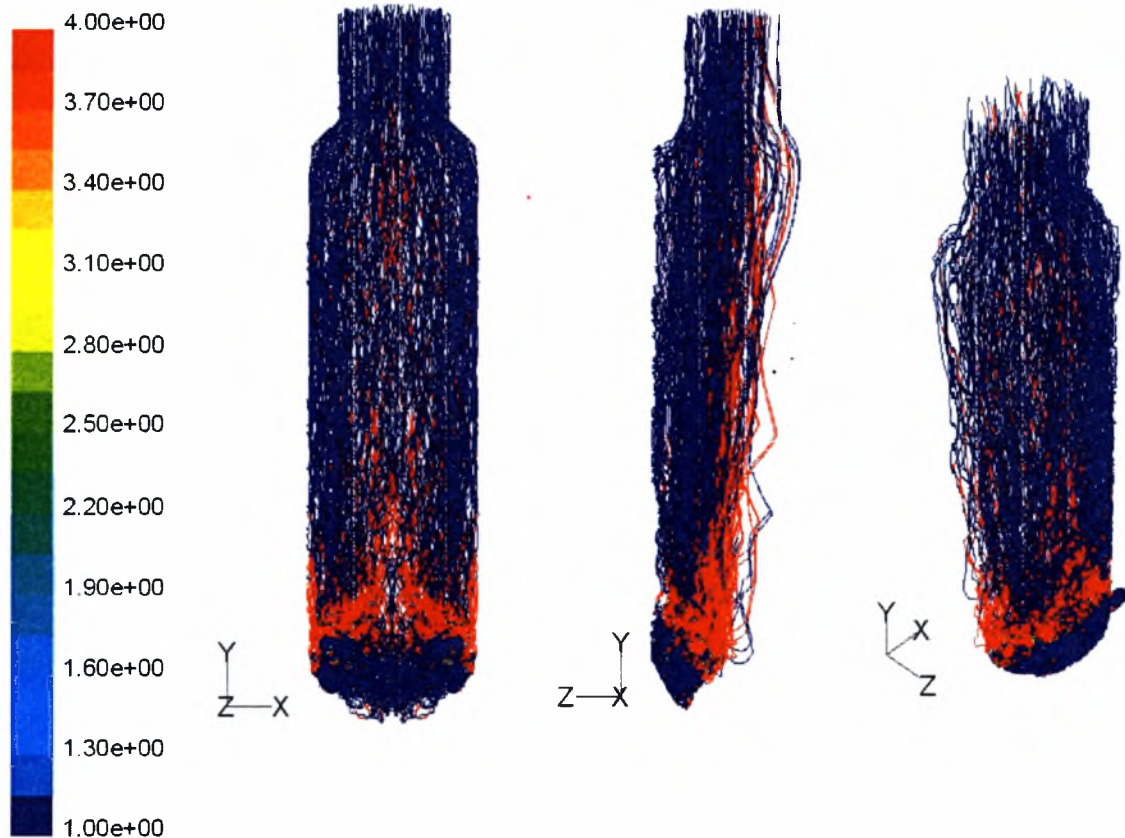


Σχήμα 5-86 Προθέρμανση, εξάτμιση και καύση πτητικών ουσιών σωματιδίων κάρβουνου (Λεπτομέρεια)

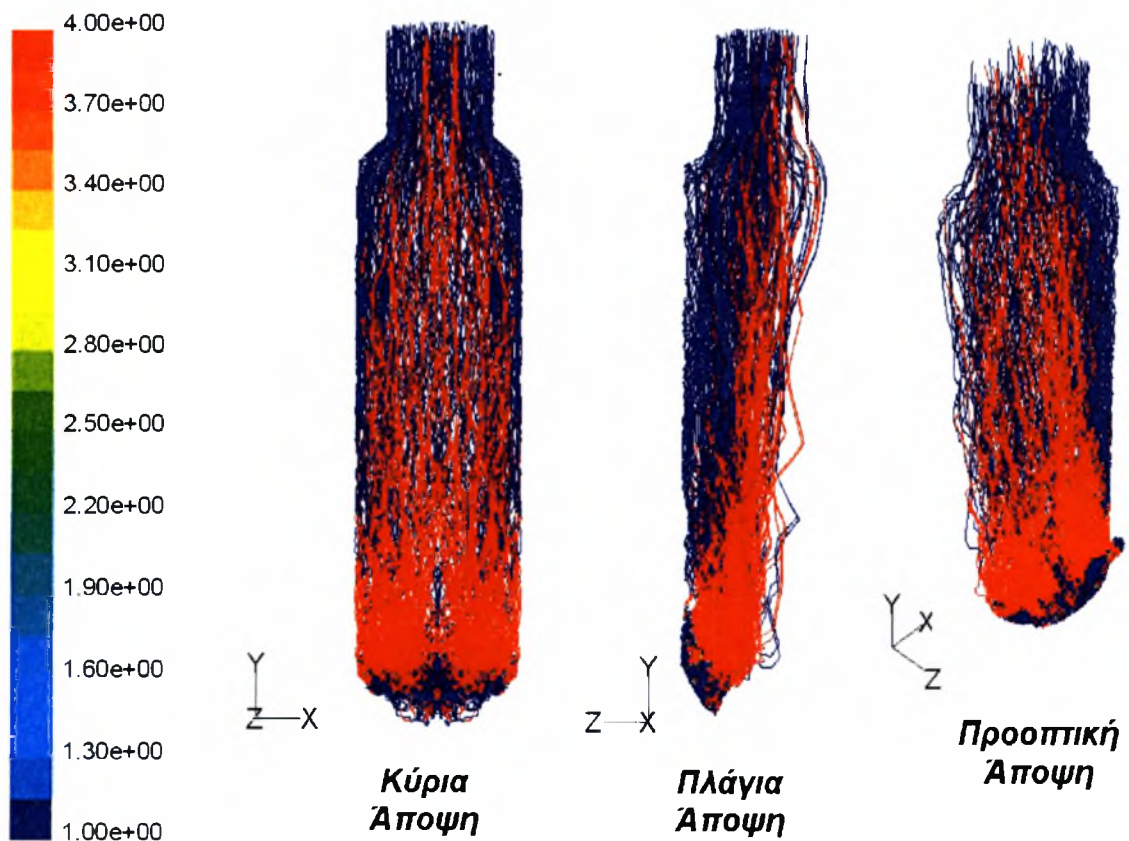
Στα Σχήματα 5-83~5-86 παρουσιάζονται το σύνολο των τροχιών και για τα δύο είδη σωματιδίων. Στο Σχήμα 5-85 δίνονται όλες οι τροχιές που διαγράφονται μέσα στον ασβεστοποιητή (περίπου 9000 τροχιές). Οι περισσότεροι χρόνοι που σημειώνονται δεν ξεπερνούν τα 10 sec, η μεγαλύτερη σε διάρκεια τροχιά αγγίζει τα 16.2 sec. Το μέσο μήκος διαδρομής που διανύεται από τα σωματίδια είναι περίπου 52m ενώ το μέγιστο περίπου 73m. Από το Σχήμα 5-86 προκύπτει ότι ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων κάρβουνου είναι και εδώ μικρότερος (4.5sec), γεγονός που οφείλεται στο 'κανάλι' αέρα που κινείται ταχύτερα και συμπαρασύρει τα μικρότερης διαμέτρου σωματίδια κάρβουνου. Στα Σχήματα 5-87 έως 5-88 διακρίνονται τα τμήματα των τροχιών στα οποία επενεργούν οι "νόμοι" θερμοχημικής συμπεριφοράς των σωματιδίων. Το μέσο μήκος διαδρομής αυτών των σωματιδίων είναι 30m ενώ το μέγιστο 42m. Εδώ αξίζει να σημειωθεί η καύση των σωματιδίων κάρβουνου ολοκληρώνεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, μέσα στην διάταξη. Η υψηλότερες θερμοκρασίες, σημειώνονται από την έντονη και γρήγορη καύση του "char" γεγονός που συνοδεύεται από την απότομη μείωση της συγκέντρωσης του O_2 και τα υψηλότερα επίπεδα των υδρατμών που προκύπτουν από τα πτητικά αλλά και από τις προσμίξεις του H_2 που ενσωματώνεται μέσα στο στερεό υπόλειμμα του άνθρακα. Η γρήγορη καύση του κάρβουνου αναγκάζει την τέφρα να εγκαταλείπει ταχύτερα τον ασβεστοποιητή.



Σχήμα 5-87 Μέσος χρόνος παραμονής σωματιδίων $CaCO_3$ [σε sec] (Περίπτωση 3)

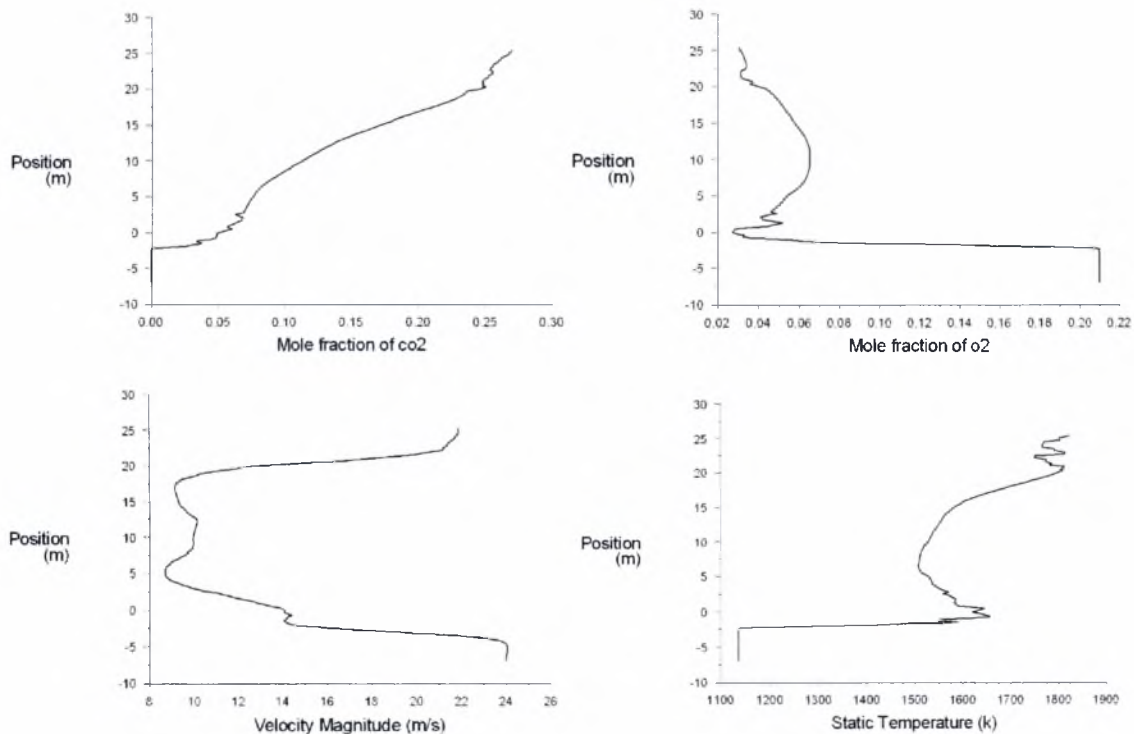


Σχήμα 5-88 Προθέρμανση, ασβεστοποίηση και ψύξη σωματιδίων CaCO_3 (Περίπτωση 3)



Σχήμα 5-89 Προθέρμανση, ασβεστοποίηση και ψύξη σωματιδίων CaCO_3 [Εσωτερικές τροχιές] (Περίπτωση 3)

Στα Σχήματα 5-87 έως 5-89 παρουσιάζονται οι τροχιές των σωματιδίων CaCO_3 . Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζονται οι τροχιές σε σχέση με τον χρόνο παραμονής των συγκεκριμένων σωματιδίων μέσα στον ασβεστοποιητή. Η παραμονή των σωματιδίων αγγίζει μέχρι και τα 10 sec ενώ ο μεγαλύτερος χρόνος που σημειώνεται είναι 15,6 sec. Από τον μέσο χρόνο παραμονής προκύπτει ότι η ταχύτητα ανόδου των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από αυτή των σωματιδίων του κάρβουνου. Οι μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής σημειώνονται από τα σωματίδια που συγκρούονται στη άνω κωνική διαμόρφωση πριν την έξοδο και παγιδεύονται από τα σωματίδια που ανέρχονται από τον κεντρικό άξονα του ασβεστοποιητή. Στα Σχήματα 5-87 και 5-88 καταγράφεται η κάθε μια τροχιά με την φυσικοχημική κατάσταση στην οποία εμπίπτει στο κάθε σημείο. Η ασβεστοποίηση πραγματοποιείται γρήγορα και σε μικρή ακτίνα γύρω από τον κεντρικό άξονα της διάταξης, με αποτέλεσμα να μην φαίνεται στο βασικό Σχήμα 5-88, καθώς οι τροχιές των ήδη ασβεστοποιημένων σωματιδίων υπερκαλύπτουν τις τροχιές των σωματιδίων που κινούνται στο εσωτερικό της διάταξης. Έτσι στο Σχήμα 5-89 δίνονται οι τροχιές που διαγράφουν εσωτερικά τα σωματίδια CaCO_3 . Το ποσοστό ασβεστοποίησης για την συγκεκριμένη περίπτωση καυσίμου αγγίζει το 98,7%, χωρίς να εξαντλείται το συνολικό ενεργό ύψος για την πλειονότητα των σωματιδίων CaCO_3 . Οι λόγοι που δεν ασβεστοποιείται μία μικρή ποσότητα φαρίνας οφείλονται στην μεγάλη διάμετρο αυτών σωματιδίων και στην απότομη επιτάχυνση που υφίσταται κατά την έξοδο τους από τον ασβεστοποιητή.



Σχήμα 5-90 Εξέλιξη βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών σε σχέση με το ύψος του ασβεστοποιητή

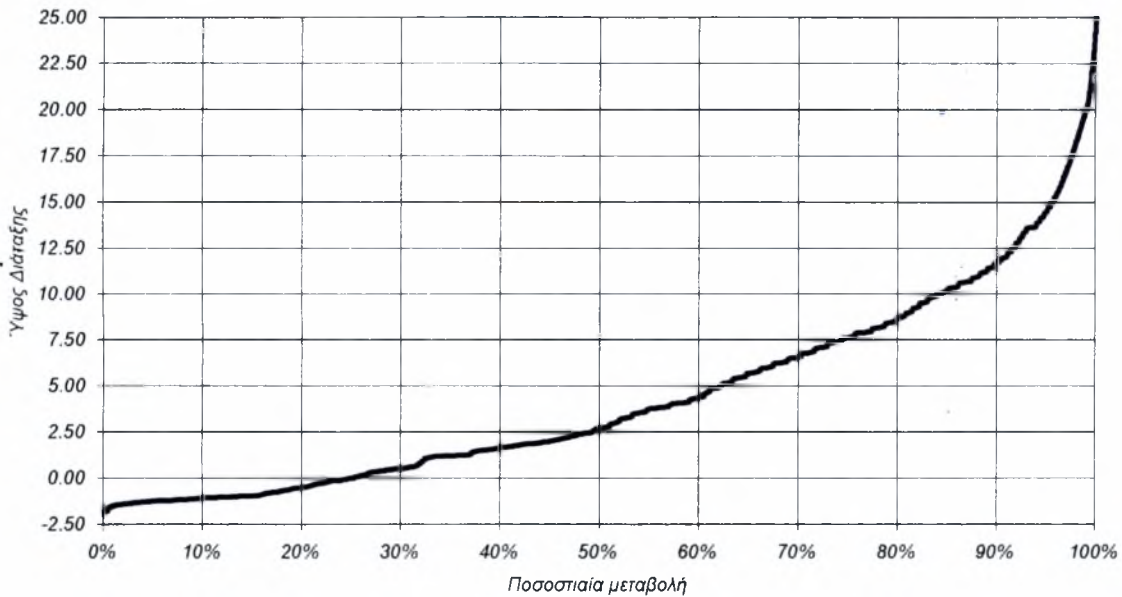
Στο Σχήμα 5-90 δίνονται διαγράμματα που περιγράφουν την εξέλιξη ορισμένων βασικών μεταβλητών σε σχέση με το ύψος της διάταξης. Οι παραπάνω καμπύλες καταγράφουν την μεταβολή της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και του κλάσματος γραμμομορίων του CO₂ και O₂ αντίστοιχα, καθ' ύψος του κεντρικού άξονα του ασβεστοποιητή, δίνοντας πληροφορίες για τις έντονες μεταβολές που συντελούνται στο εσωτερικό της διάταξης. Η εξέλιξη του CO₂ παρουσιάζει ομοιότητα με την Περίπτωση 1 ενώ εμφανίζει διαφορές με την Περίπτωση 2. Ο γραμμομοριακός λόγος εξελίσσεται σχεδόν γραμμικά με το ύψος με εξαίρεση την περιοχή εισόδου της φαρίνας, γεγονός που συναινεί στην διαπίστωση ότι η ασβεστοποίηση διεξάγεται στον νοητό όγκο που καταλαμβάνει ένας κεντρικός άξονας μέσα στην διάταξη. Οι διαφορές που προκύπτουν με την αντίστοιχη καμπύλη της Περιπτώσεως 2 οφείλονται στην διαφορετική θέση του κύριου όγκου ασβεστοποίησης, ενώ αντίστοιχα στην Περίπτωση 1 η ομοιότητα των καμπύλων περιορίζεται μόνο στην κοινή μονοτονία τους. Το γραμμομοριακό κλάσμα του O₂ λόγω της πυρόλυσης και της ισχυρής φλόγας που δημιουργείται, υφίσταται ταχεία μείωση για να αποκτήσει μετά, πρόσκαιρα μια αυξητική πορεία λόγω της μείωσης της έντασης της φλόγας και στο τέλος να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα λόγω της παρουσίας των αερίων προϊόντων της ασβεστοποίησης. Η ταχύτητα εμφανίζει όμοια περίπου εξέλιξη με τα προηγούμενα μοντέλα (Περιπτώσεις 1 και 2), εμφανίζοντας όμως μικρές τιμές ταχύτητας από χαμηλότερα ύψη. Όμοια με τα πρώτα μοντέλα παρατηρείται η επιτάχυνση των αερίων μαζών κατά την έξοδο τους από τον ασβεστοποιητή.

Στα παραπάνω τρία μοντέλα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το αποτέλεσμα της ασβεστοποίησης των σωματιδίων CaCO₃ και για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις καυσίμου (Πίνακας 5-1). Οι διαφορές συνίστανται στα διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα που αναπτύσσονται, στην διαφορετική αεροδυναμική των ροών (πυκνότητα σωματιδιακού φορτίου) και στις παραγόμενες συγκεντρώσεις CO₂ που δρουν κατασταλτικά στην πορεία ασβεστοποίησης. Η εξέλιξη της ασβεστοποίησης στα τρία μοντέλα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5-91 έως 5-93. Η εξέλιξη της ασβεστοποίησης στα συγκεκριμένα σχήματα εμφανίζει την πορεία που ακολουθεί η χημική αντίδραση διάσπασης του CaCO₃ σε σχέση με το ύψος της διάταξης από το σημείο που πρωτοεμφανίζεται η ασβεστοποίηση μέχρι την έξοδο από την διάταξη που αποτελεί το σύνορο για το υπολογιστικό πεδίο.

Πίνακας 5-1 Μεταβολή ποσότητας CaCO₃ μέσα στον ασβεστοποιητή (Μισό υπολογιστικό πεδίο)

	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3
Αρχική Ποσότητα CaCO ₃ [Kg/s]	26.800	28.600	28.600
Ποσότητα CaO [Kg/s]	13.792	15.455	15.664
Ασβεστοποιημένο CaCO ₃ [Kg/s]	10.837	12.144	12.307
Μη Ασβεστοποιημένο CaCO ₃ [Kg/s]	2.171	1.001	0.629

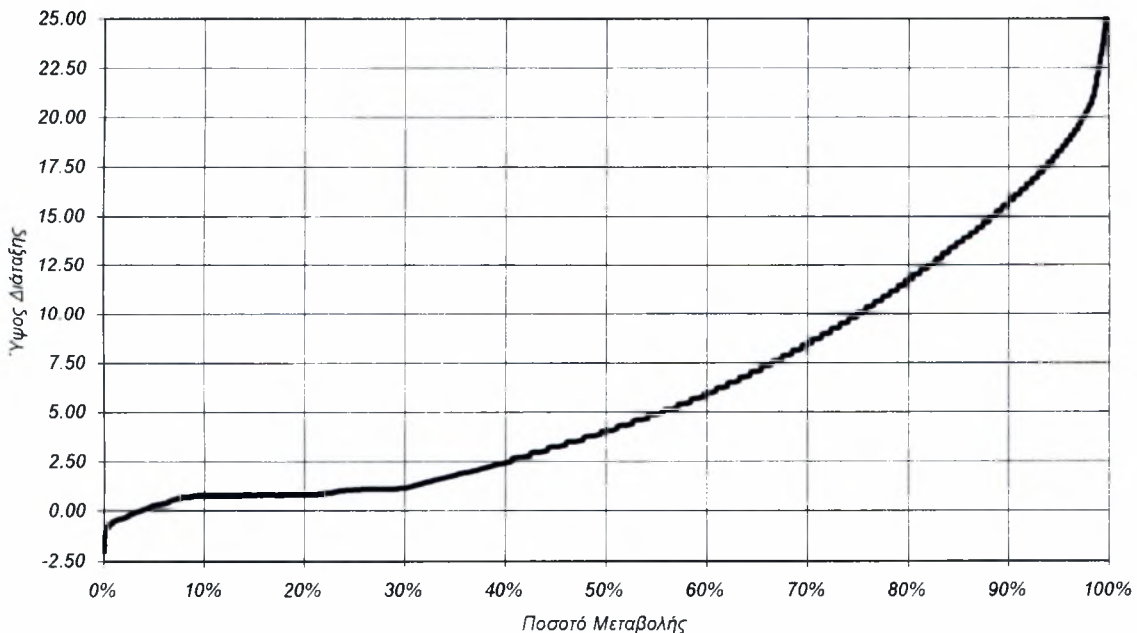
Εξέλιξη Ασβεστοποίησης
Περίπτωση 1η



Σχήμα 5-91 Πορεία ασβεστοποίησης για την Περίπτωση 1

Το ενεργό ύψος ασβεστοποίησης μέσα στην διάταξη αγγίζει τα 27m και σε πολύ μικρή απόσταση (5m) έχει ασβεστοποιηθεί το 50% της ποσότητας του CaCO_3 . Η ταχύτητα της αντίδρασης μειώνεται σημαντικά στο δεύτερο μισό του ενεργής διαδρομής.

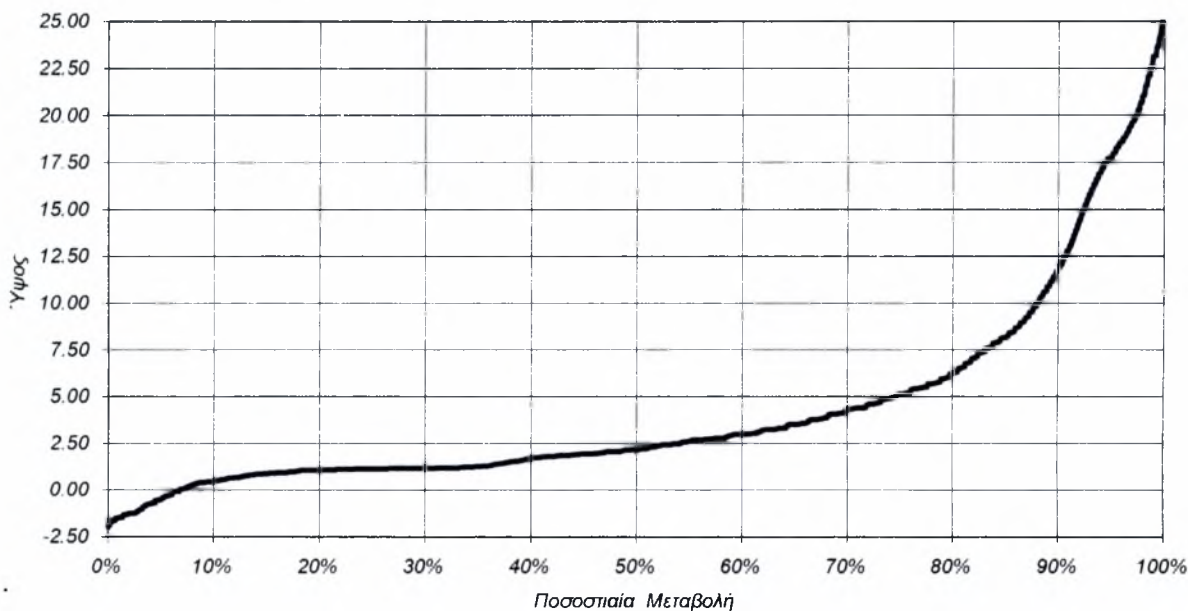
Εξέλιξη Ασβεστοποίησης
Περίπτωση 2



Σχήμα 5-92 Πορεία ασβεστοποίησης για την Περίπτωση 2

Το ενεργό ύψος για την δεύτερη περίπτωση, προκύπτει μεγαλύτερο κατά 0,5m. Επίσης, διαφορές παρατηρούνται και στην ταχύτητα ολοκλήρωσης της αντίδρασης. Το 50% της ποσότητας CaCO_3 που ασβεστοποιείται, λαμβάνεται από τα πρώτα 6m, ενώ ο ρυθμός ασβεστοποίησης σταθεροποιείται σε χαμηλότερες τιμές για τα επόμενα 16m για να επιβραδυνθεί στα τελευταία μέτρα της εξόδου, εκεί που παρατηρείται η επιτάχυνση της αέριας φάσης.

Εξέλιξη Ασβεστοποίησης Περίπτωση 3

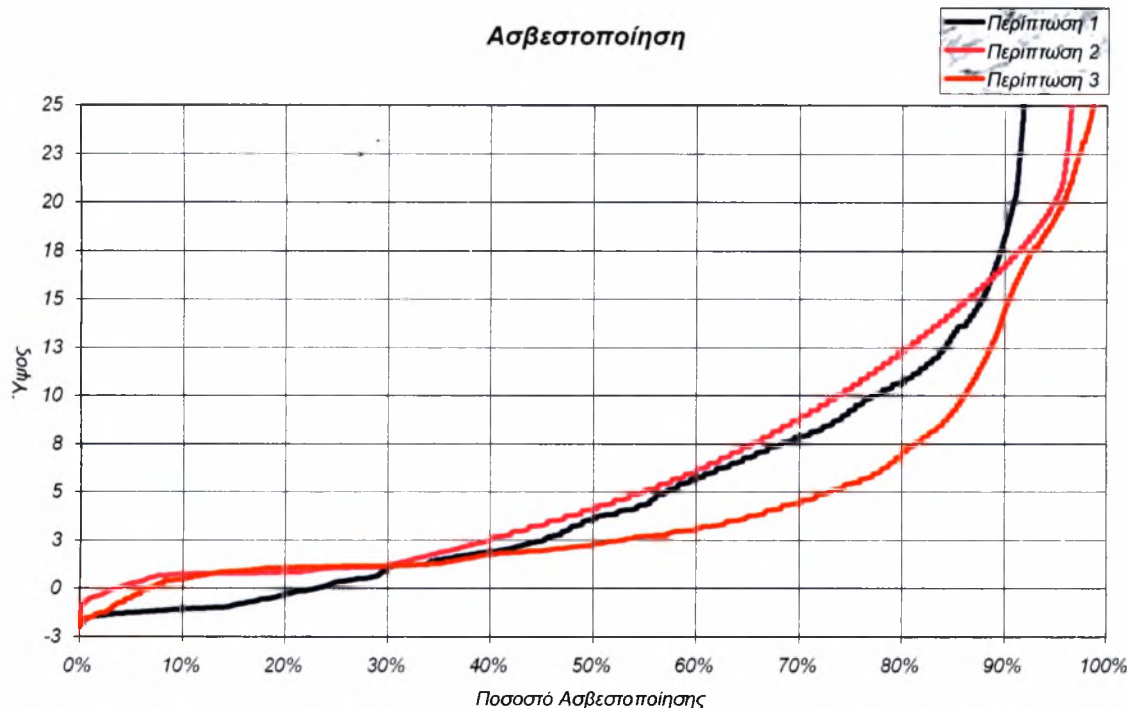


Σχήμα 5-93 Πορεία ασβεστοποίησης για την Περίπτωση 3

Το ενεργό ύψος για την τρίτη περίπτωση είναι και εδώ 27,5m, ενώ διαφορές που παρατηρούνται σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα εστιάζονται στην ταχύτητα ολοκλήρωσης της αντίδρασης. Το 70% της ποσότητας CaCO_3 που ασβεστοποιείται, λαμβάνεται από τα πρώτα 7,5m, ενώ ο ρυθμός ασβεστοποίησης υφίσταται μια προοδευτική μείωση εκθετικού χαρακτήρα έως το τέλος της διαδρομής. Ιδιαίτερα, στα τελευταία 5m, ο ρυθμός ασβεστοποίησης υφίσταται περαιτέρω μείωση που οφείλεται στην αύξηση της ταχύτητας των αερίων μαζών παρότι ικανοποιείται στο έπακρο η βασική προϋπόθεση ενεργειακών φορτίων, δηλαδή θερμοκρασίες πάνω από το σημείο εκκίνησης της ασβεστοποίησης.

Προκειμένου να γίνει σύγκριση, στο Σχήμα 5-96 παρουσιάζεται η πορεία ασβεστοποίησης των αρχικά διαθέσιμων ποσοτήτων CaCO_3 για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Από το διάγραμμα μπορεί να χαρακτηριστεί η ποιότητα της διεργασίας, και να φανεί ο ανασταλτικός ρόλος της αυξημένης τοπικής συγκέντρωσης CO_2 στο περιβάλλον των σωματιδίων φαρίνας. Αυτό έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης στην

περιοχή που ορίζεται από την κάτω κωνική διαμόρφωση και τις εισόδους των σωματιδίων, διότι πρέπει να διατηρηθεί η θερμοκρασία σε επίπεδα θερμοκρασιών που να μην επιτρέπουν τοπικά υψηλή παραγωγή CO₂ ή οποία συνδέεται ευθέως ανάλογα με την μερική πίεση του CO₂ και αποτελεί βασική παράμετρο του ρυθμού ασβεστοποίησης.



Σχήμα 5-94 Εξέλιξη ασβεστοποίησης διαθέσιμης ποσότητας CaCO₃ σε σχέση με το ύψος της διάταξης

Από το Σχήμα 5-94 προκύπτει ότι η πρώτη περίπτωση (1) καυσίμου συμπεριφέρεται με ικανοποιητικότερο τρόπο στα μικρότερα ύψη, ενώ μετά τα πρώτα 7m ενεργής διαδρομής εμφανίζει σχεδόν όμοια συμπεριφορά με αυτή του δεύτερου μοντέλου (Περίπτωση 2) μέχρι και το 20 m, εκεί δηλαδή που πλέον η θερμοκρασία δεν επαρκεί πλήρως για να συνεχίσει η ασβεστοποίηση. Για τις επόμενες δύο περιπτώσεις, η ασβεστοποίηση προχωρά αρχικά με τους ίδιους περίπου ρυθμούς. Μετά τα πρώτα 6m, διακρίνεται σαφέστατα η διαφοροποίηση στην δυναμικότητα ασβεστοποίησης που παρουσιάζει η τρίτη περίπτωση (3), καθώς το 85% της ασβεστοποίησης πραγματοποιείται στα πρώτα 13m της ενεργής διαδρομής. Η δεύτερη περίπτωση (2) εμφανίζει πολύ καλή συμπεριφορά μετά το 19^ο μέτρο της διαδρομής, γεγονός που οφείλεται στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες που επικρατούν στο δεύτερο μισό της διαδρομής σε σχέση με το πρώτο μοντέλο. Η παρόμοια συμπεριφορά των δύο τελευταίων περιπτώσεων στα τελευταία 5-6m υπαγορεύεται περισσότερο από την επιτάχυνση που υφίστανται οι αέριες μάζες στην συγκεκριμένη περιοχή, παρά από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την πραγμάτωση της αντίδρασης.

6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό εξάγονται γενικά συμπεράσματα που αφορούν το σύνολο των ενεργειών που έγιναν για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Συγχρόνως, γίνονται ορισμένες προτάσεις που μπορούν να αυξήσουν ή να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της συγκεκριμένης διάταξης του ασβεστοποιητή.

6.1 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα και την συζήτηση που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορούν να διατυπωθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή των φαινομένων μεταφοράς και των φυσικοχημικών διεργασιών σε υφιστάμενη βιομηχανική διάταξη ασβεστοποιητή για την παραγωγή τσιμέντου. Το μοντέλο αυτό περιλάμβανε υπομοντέλα ακτινοβολίας, σύνθετων χημικών αντιδράσεων και τύρβης που λαμβάνουν υπόψη την παρουσία και την επίδραση των σωματιδίων σε καμπυλόγραμμη γεωμετρία. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των πεδίων ροής, θερμοκρασιών, συγκεντρώσεων για την συνεχή αέρια φάση αλλά και την διακριτή σωματιδιακή φάση
- 2) Το σύνολο των υπολογισμών βασίστηκε σε τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο Euler-Langrange που αναπτύχθηκε στον εμπορικό κώδικα Fluent.
- 3) Το παρόν αριθμητικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματικό εργαλείο για την μελέτη και κατανόηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στον ασβεστοποιητή και την βελτιστοποίηση τους στην συγκεκριμένη διάταξη
- 4) Η μικρή ανακυκλοφορία που σημειώνεται στην περιοχή εισόδου της φαρίνας στο αποκλίον μέρος του αγωγού εισόδου του τριτογενούς αέρα προκαλεί αύξηση της ενεργής διαδρομής, διότι αυξάνει τον χρόνο συμμετοχής των σωματιδίων στις φυσικοχημικές διεργασίες.
- 5) Η ταχεία ασβεστοποίηση που προκαλείται στην είσοδο της φαρίνας παράγει υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις CO₂, με αποτέλεσμα η ασβεστοποίηση να λαμβάνει οριακές τιμές και να μετατίθεται χωρικά προς τα πάνω ή προς την περίμετρο της διάταξης.
- 6) Οι υψηλότερες θερμοκρασίες σημειώνονται λίγο μετά την είσοδο του καυσίμου κατά την εξάτμιση και καύση των πτητικών που αποβάλλουν γρήγορα το θερμικό περιεχόμενό τους.

- 7) Οι υψηλές θερμοκρασιακές 'λωρίδες' που εμφανίζονται καθ' ύψος του ασβεστοποιητή οφείλονται σε σωματίδια κάρβουνου που οι τροχιές τους δεν εμπλέκονται με αυτές της φαρίνας. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρήζει μεγαλύτερης προσοχής η ποιότητα της ανάμειξης των σωματιδίων κάρβουνου-φαρίνας από ότι η ποιότητα του καυσίμου
- 8) Η μεγάλη ανομοιομορφία της κατανομής διαμέτρου των σωματιδίων (Rosin-Rammler) ευθύνεται σε σημαντικό βαθμό για το μικρό ποσοστό του μη ασβεστοποιημένου CaCO_3 κυρίως στις Περιπτώσεις 2 και 3 και σε μικρότερο βαθμό για την Περίπτωση 1.
- 9) Το ενεργειακό πλεόνασμα που παρατηρείται, λιγότερο στο μοντέλο της Περίπτωσης 2 και περισσότερο στο αντίστοιχο της Περίπτωσης 3, δεν βοηθούν στο να επιτευχθεί πλήρης ασβεστοποίηση. Αντ' αυτού, οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν προβλήματα θερμικών καταπονήσεων και εμφάνισης διαβρωτικών παραπροϊόντων από την χημική ενεργοποίηση του SiO_2 και από τον σχηματισμό NO_x .
- 10) Η άνω κωνική διαμόρφωση επιταχύνει την συνολική μάζα αερίων και σωματιδίων κατά ανεπιθύμητο τρόπο σε βαθμό που να επηρεάζει αρνητικά την ασβεστοποίηση.
- 11) Η ίδια διαμόρφωση, λόγω της απότομης κλίσης που εμφανίζει με τις κάθετες επιφάνειες του κύριου κυλινδρικού κορμού, προκαλεί μικρές ανακυκλοφορίες ή λειτουργεί ως τοίχος πρόσπτωσης καιγόμενων σωματιδίων, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τοπικά επιφανειακές υψηλές θερμοκρασίες που δεν αξιοποιούνται στην ασβεστοποίηση και συγχρόνως δρουν καταστροφικά για το υλικό της εσωτερικής επένδυσης.

6.2 Προτάσεις

Κατά την ανάπτυξη του παρόντος μαθηματικού μοντέλου αντιμετωπίστηκαν αρκετά προβλήματα και ξεπεράστηκαν αρκετές δυσκολίες που αφορούσαν την συγκρότηση, τη τεκμηρίωση και την υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου. Έτσι, οι επικείμενες προτάσεις μπορούν να διατυπωθούν σε δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την βελτίωση και την επέκταση του παρόντος αριθμητικού μοντέλου και η δεύτερη αναφέρεται στις ενδεχόμενες παρεμβάσεις που μπορεί να γίνουν για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση της διάταξης. Τα φαινόμενα μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στον ασβεστοποιητή μπορεί να αξιοποιηθούν με επαρκέστερο, αποδοτικότερο και φιλικότερο τρόπο για την ίδια την διάταξη αλλά και για το περιβάλλον.

Οι προτάσεις που αφορούν το μαθηματικό μοντέλο είναι:

- 1) Εφαρμογή πυκνότερου πλέγματος με κελιά πρισματικής γεωμετρίας και ειδικότερα στον όγκο που ορίζουν η κάτω κωνική διαμόρφωση, το κάτω τμήμα του κυλινδρικού κορμού

και των εισόδων της φαρίνας, για να δοκιμαστούν χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα περιπτώσεις με καλύτερη κοκκομετρία των σωματιδίων.

- 2) Να εξεταστεί το ίδιο πρόβλημα με μεταβατικές συνθήκες πρώτα σε διδιάστατη γεωμετρία και έπειτα σε τρισδιάστατη γεωμετρία, ώστε να ολοκληρωθεί το εύρος της διαγνωστικής ικανότητας του μαθηματικού μοντέλου.
- 3) Να εξεταστεί και η χημική συμπεριφορά των NO_x σε περιπτώσεις όπου το καύσιμο προκαλεί αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Να σημειωθεί πως η αντιμετώπιση κινητικών NO_x απαιτεί συνολική αναθεώρηση του μοντέλου χημείας καθώς οι κινητικές πεπερασμένων ρυθμών για NO_x εξελίσσονται αργά γεγονός που έρχεται σε πλήρη αντιδιαστολή με τις βασικές παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου PDF.
- 4) Να γίνει η μεταφορά του κώδικα σε λειτουργικό σύστημα LINUX έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των δυνατοτήτων του επεξεργαστή από τον επιλυτή (solver) καθώς το συγκεκριμένο λειτουργικό σύστημα δεν δεσμεύει σημαντικό ποσοστό πόρων του επεξεργαστή. Η εξέταση της ροής και των φαινομένων μεταφοράς σε χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες του ασβεστοποιητή ξεπερνά τις πεπερασμένες δυνατότητες ισχυρών υπολογιστών λογικού κόστους (PC) και η αντιμετώπιση της απαιτεί λύσεις με τεχνικές παράλληλων εκτελέσεων (parallel processing) και διάσπασης του υπολογιστικού πεδίου (domain decomposition).

Οι προτάσεις που δύναται να διατυπωθούν για την λειτουργία του ασβεστοποιητή είναι:

- 1) Να γίνουν μετρήσεις με διαπιστευμένες πειραματικές μεθόδους, των κινητικών της καύσης και εξάτμισης των πτητικών ουσιών του κάρβουνου και του στερεού υπολείμματος άνθρακα.
- 2) Να γίνουν μετρήσεις της κινητικής της διάσπασης του CaCO_3 για την εξαγωγή ακριβών μαθηματικών περιγραφών τύπου Arrhenius, που θα εξετάζουν κάθε περίπτωση τάξης της παραπάνω χημικής αντίδρασης.
- 3) Να εξεταστεί η περίπτωση τροφοδότησης της φαρίνας από τρίτο προσαγωγό, εάν αυτό είναι εφικτό χωροταξικά και γεωμετρικά, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που το καύσιμο παρουσιάζει υψηλό θερμικό περιεχόμενο.
- 4) Να μελετηθεί η περίπτωση δέσμευσης και απαγωγής του CO_2 από τα κάτω τμήματα του κυρίου κυλινδρικού κορμού.

- 5) Να ελαττωθεί το εύρος της κοκκομετρικής κατανομής, ώστε να καταστεί δυνατή η ολοκλήρωση της ασβεστοποίησης μέσα στην διάταξη ή και η αύξηση του σωματιδιακού φορτίου.
- 6) Με την βελτίωση της κοκκομετρικής κατανομής της φαρίνας είναι δυνατή και η πρόσθηκη ακόμα μίας εισόδου φαρίνας σε μεγαλύτερο ύψος, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί στο έπακρο το θερμικό (ενεργειακό) πλεόνασμα που εμφανίζεται σε περιπτώσεις καυσίμου με σχετικά υψηλή θερμογόνο δύναμη.
- 7) Και τέλος να εξεταστεί η αλλαγή του προσανατολισμού των ακροφυσίων εισόδου του καυσίμου, έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη διασπορά και ανάμιξη των σωματιδίων κάρβουνου μέσα στο σύνολο της διάταξης, και ειδικότερα μεταξύ των σωματιδίων φαρίνας.

7. Βιβλιογραφία

1. R.B. Bird, Stewart & Lightfoot, 'Transport Phenomena', Wiley, London, 1960
2. Αγγ. Παπαϊωάννου, 'Μηχανική Ρευστών', 2^η Έκδοση, Εκδ. Γκελμπέσης, Αθήνα 1999
3. Lixing Zhou, 'Theory and numerical modeling of turbulent gas particle flows and combustion', Science Press, 1995
4. Αν. Τσιαντής, 'Μαθηματικό μοντέλο καύσης σωματιδίων άνθρακα σε περιστροφικό κλίβανο παραγωγής τσιμέντου', Διπλωματική Εργασία, ΤΜΜΒ-Παν. Θεσσαλίας, Σεπτ. 1998
5. Οδ. Γιαννόπουλος, 'Προσομοίωση ροής σε περιστροφικό κλίβανο τσιμέντου' Διπλωματική Εργασία, ΤΜΜΒ-Παν. Θεσσαλίας, Ιούν.1998
6. J.H. Ferziger & M. Peric, 'Computational Methods for Fluid Dynamics', 2nd Edition, Berlin, Springer 1999
7. Φεΐδαρος Δ., Γιαννόπουλος Ο., Σαρρής Ι. & Βλάχος Ν. Σπ., 'Ο Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής DIAN3D: Εγχειρίδιο Χρήσης', Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, ΤΜΜΒ-Παν. Θεσσαλίας, Ιούλιος 1998
8. Φεΐδαρος Δ. 'Μαθηματική Προσομοίωση Διασποράς & Εναπόθεσης Ρύπων', Διπλωματική Εργασία, ΤΜΜΒ-Παν. Θεσσαλίας, 1997
9. 'Gambit I Modeling Guide', Fluent Inc, Chapter 3, May 1998
10. 'Fluent 5 User's Guide Volume 1-3', Fluent Inc, July 1998
11. 'Walter H. Duda: Cement Data Book Volume 1-International Process Engineering in the Cement Industry', Bauverlag Gmbh, 1985
12. Ευσ. Κολυφέτης, 'Προσομοίωση λειτουργίας του προασβεστοποιητή', Διπλωματική Εργασία, ΤΜΧ ΕΜΠ, Αθήνα 1986
13. C. Belot, D. Goffe, D. Grouset, C. Bertrand, B. Homassel & J.L. Philippe, 'Optimization of a cement plant preheating tower, equipped with a precalciner, burning pulverized coal', Combustion Science & Technology, Vol. 93, pp. 9-25, 1994
14. H. Schrama, M. Blumenthal & C.E. Weatherhead, 'Survey of the tire burning technology for the cement industry', IEEE Cement Industry Technical Conference, pp. 283-306, 1995
15. L. Baeyens, P. Cuvelier & D. Geldart, 'The development, design and operation of a fluidized bed limestone calciner', Zemnt-Kalk-Gips, No 12, pp. 620-627, 1989
16. D. Kupper & P. Tiggesbaumker, 'The calcination behavior of cement raw meals', Zemnt-Kalk-Gips No 7, pp. 169-174, 1983
17. T. Fujisawa, K. Doi, N. Yatagai, S. Arai & M. Kuhara, 'New cement burning technology - Two-stage calcining system', Zemnt-Kalk-Gips No 12, pp. 303-305, 1989
18. S. Hundebol & P. Rosholm, 'High efficiency calciner', World Cement, pp. 83-94, October 1998
19. A. Muller & J. Stark, 'Calcination of limestone powders in suspension', Zemnt-Kalk-Gips No 4, pp. 97-98, 1989
20. W.S. Kim & J.L. Lee, 'Collection Efficiency Model Based on Boundary-Layer Characteristics for Cyclones', AIChE Journal, Vol. 43, No.10, pp. 2446-2455, October 1997
21. C. H. Luo, K. Aoki, S. Uemiyu & T. Kojima, 'Numerical modeling of a jetting fluidized bed gasifier and the comparison with the experimental data', Fuel Processing Technology, pp. 193-218, 1998

22. R. A. Srinivasan, S. Sriramulu, S. Kulasekaran & P. K. Agarwal, 'Mathematical modeling of fluidized bed combustion - 2 : combustion of gases', *Fuel*, Vol. 77, pp. 1033-1049, 1998
23. R. I. Backreedy, R. Habib, J. M. Jones, M. Pourkashanian, A. Williams, 'An extended coal combustion model', *Fuel*, Vol. 78, pp. 1745-1754, 1999
24. F. Winter, M. E. Prah & H. Hofbauer, 'Temperatures in a fuel particle burning in a fluidized bed : the effect of drying, devolatilization and char combustion', *Combustion & Flame*, Vol. 108, pp. 302-314, 1997
25. A. S. Hull & P. K. Agarwal, 'Estimation of kinetic rate parameters for coal combustion from measurements of the ignition temperature', Vol. 77, pp. 1051-1058, 1998
26. L. D. Smoot, 'International research centers' activities in coal combustion', *Prog. Energy Combustion Science*, Vol. 24, pp. 409-501, 1998
27. 'A coal combustion model for fluidized bed boilers', L. Huilin, Z. Guangbo, C. Rushan, C. Yongjin & D. Gidaspow, *Fuel*, Vol. 79, pp. 165-172, 1999
28. L. Huilin, Z. Gungbo, B. Rushan, Y. Lidan & Q. Yukun, 'Modeling of coal combustion in a 25-MW FBC power plant', *Energy*, Vol. 24, pp. 199-208, 1999
29. H. H. Liakos, K. N. Theologos, A. G. Boudouvis, N. C. Markatos, 'Pulverized coal char combustion: the effect of particle size on burner performance', *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, pp. 981-989, 1998
30. W. Sujanti & D. Zhang, 'A laboratory study of spontaneous combustion of coal : the influence of inorganic matter and reactor size', *Fuel*, Vol. 78, pp. 549-556, 1999
31. C. N. Eastwick, S. J. Pickering & A. Aroussi, 'Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modeling pulverized coal combustion for a 2,5 MW burner', *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 23, pp. 437-446, 1999
32. L. Armesto & J. L. Merino, 'Characterization of some coal combustion solid residues', *Fuel*, Vol. 78, pp. 613-618, 1999
33. M. S. Khan, S. M. Zubair, M. O. Budair, A. K. Sheikh & A. Quddus, 'Fouling resistance model for prediction of CaCO₃ scaling in AISI 316 tubes', *International Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 73-79, 1996
34. J. R. Fan, X. H. Liang, Q. S. Xu, X. Y. Zhang & K. F. Cen, 'Numerical simulation of the flow and combustion processes in a three-dimensional, W-shaped boiler furnace', *Energy*, Vol. 22, pp. 847-857, 1997
35. J. K. Fink, 'Pyrolysis and combustion of polymer wastes in combination with metallurgical processes and the cement industry', *Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 51, pp. 239-252, 1999
36. P. Basu, 'Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review', *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, pp. 5547-5557, 1999
37. F. C. Lockwood, T. Mahmud & M. A. Yehia, 'Simulation of pulverized coal test furnace performance', *Fuel*, Vol. 77, pp. 1329-1337, 1998
38. R. G. Bautista-Margulis, R. G. Siddall & L.Y. Manzanares-Papayanopoulos, 'Combustion modeling of coal volatiles in the freeboard of a calorimetric bed combustor', *Fuel*, Vol. 75, pp. 1737-1742, 1996
39. J. Zhang & S. Nieh, 'Comprehensive modeling of pulverized coal combustion in a vortex combustor', *Fuel*, Vol. 76, pp. 123-131, 1997

40. C. A. Gurgel, J. Saastamoinen, J. A. Carvalho & M. Aho, 'Overlapping of the devolatilization and char combustion stages in the burning of the coal particles', *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 567-579, 1999
41. W. B. Fu, B. L. Zhang & S. M. Zheng, 'A relationship between the kinetic parameters of char combustion and the coal's properties', *Combustion and Flame*, Vol. 109, pp. 587-598, 1997
42. L. Reh, 'Challenges of circulating fluid-bed reactors in energy and raw materials industries', *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, pp. 5359-5368, 1999
43. T. Gentzis, F. Goodarzi, C. N. Koykoyzas & A. E. Foscolos, 'Petrology, mineralogy and geochemistry of lignites from Crete, Greece', *Coal Geology*, Vol. 30, pp. 131-150, 1996
44. H. Wang & J. N. Harb, 'Modeling of ash deposition in large-scale combustion facilities burning pulverized coal', *Prog. Energy Combustion Science*, Vol. 23, pp. 267-282, 1997
45. I. E. Sarris, O. Giannopoulos, D. Feidaros & N. S. Vlachos, 'Modeling coal combustion in a rotary cement kiln', 3rd National Congress on Computational Mechanics, Volos, 24-26 June 1999
46. V. L. Boris, 'Mechanism of thermal decomposition of alkaline-earth carbonates', *Thermochimica acta*, Vol. 303, pp. 161-170, 1997
47. A. K. Galwey, M. E. Brown, 'Arrhenius parameters and compensation behavior in solid-state decompositions', *Thermochimica Acta*, Vol. 300, pp. 107-115, 1997
48. F. Acke & I. Panas, 'Activation energy of calcination by means of a temperature programmed reaction technique', *Thermochimica Acta*, Vol. 306, pp. 73-76, 1997
49. J. Khinast, G. F. Krammer, C. Brunner & G. Staudinger, 'Decomposition of limestone : the influence of CO₂ particle size on the reaction rate', *Chemical Engineering Science*, Vol. 51, pp. 623-634, 1996
50. N. Hu & A. W. Scaroni, 'Calcination of pulverized limestone particles under furnace injection conditions', *Fuel*, Vol. 75, pp. 177-186, 1996
51. A.K. Galwey & M.E. Brown, 'Arrhenius parameters and compensation behavior in solid state decompositions', *Thermochimica Acta*, Vol. 300, pp. 107-115, 1997
52. F. Acke & I. Panay, 'Activation energy of calcination by means of a temperature programmed reaction technique', *Thermochimica Acta*, Vol. 300, pp.73-76, 1997
53. S.V. Krishnan & S.V. Sotirchos, 'Effective diffusivity changes during calcination, carbonation, recalcination and sulfation of limestones', *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No 8, pp. 1195-1208, 1991
54. S.S. Sazhin, E.M. Sazhina, O. Faltsi-Saravelou & P. Wild, 'The P-1 model for thermal radiation transfer advantages and limitations', *Fuel*, Vol. 75 No. 3, pp. 289-294, 1996
55. M.Q. Brewster & T.Kunitomo, 'The Optical Constants of Coal', Char, and Limestone', *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 678-683,1984

