

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

Αριθ. Εισ.: 1973/1

Ημερ. Εισ.: 20-07-1998

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

1998

ΓΙΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Τομέας Ενέργειας, Βιομηχανικών Διεργασιών & Τεχνολογίας Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‘Προσομοίωση Ροής σε Περιστροφικό Κλίβανο Τσιμέντου’

Οδυσσέας Χ. Γιαννόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Σπ. Βλάχος

Βόλος-Ιούνιος 1998

αρ. εισ 104/Π.Α.



Αφιερώνεται στους Γονείς μου

Ονοματολογία

a_i	Συντελεστής στους αλγόριθμους TDMA και CTMA
A	Εμβαδόν επιφάνειας κελιού ή συντελεστής εξίσωσης σωματιδίων
A_i	Συντελεστές των εξισώσεων πεπερασμένων όγκων ή αλγόριθμων TDMA και CTDMA
A_T	Χρονικά εξαρτώμενος συντελεστής εξίσωσης πεπερασμένων όγκων
\bar{B}	Διάνυσμα δύναμης βάρους
B_i, b_i	Συντελεστές στους αλγόριθμους TDMA και CTDMA
c	Συγκέντρωση (κλάσμα μάζας) ειδών
C_1, C_2	Σταθερές του $k - \epsilon$ μοντέλου τύρβης
C_D	Σταθερά του $k - \epsilon$ μοντέλου τύρβης ή σταθερά οπισθέλκουσας
C_i	Ρυθμός συναγωγής στην επιφάνεια των κελιών
C_i, c_i	Συντελεστές στους αλγόριθμους επίλυσης TDMA και CTDMA
C_p	Θερμοχωρητικότητα του αερίου μίγματος
\bar{D}	Δύναμη της αντίστασης του αέρα
D_d	Διάμετρος σωματιδίου ή σωματιδίου
D_i	Ρυθμός διάχυσης στην επιφάνεια των κελιών ή συντελεστές στους αλγόριθμους TDMA και CTDMA
Du_i	Συντελεστές στην εξίσωση διόρθωση της πίεσης
Dv_i	Συντελεστές στην εξίσωση διόρθωση της πίεσης
DW_i	Συντελεστές στην εξίσωση διόρθωση της πίεσης
D_w	Διάχυση μάζας του σωματιδίου
f	Συντελεστής εξαρτώμενος από τις ιδιότητες του ρευστού ή του σωματιδίου
\bar{F}	Εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο ή στο σωματίδιο
F_i	Συντελεστές στον αλγόριθμο επίλυσης CTDMA
G	Παραγωγή τύρβης
G_i	Συντελεστές στον αλγόριθμο επίλυσης CTDMA
g_x	Συνιστώσα του διανύσματος βαρύτητας στην x κατεύθυνση
g_y	Συνιστώσα του διανύσματος βαρύτητας στην y κατεύθυνση
g_z	Συνιστώσα του διανύσματος βαρύτητας στην z κατεύθυνση
h	Ενθαλπία αερίου μίγματος ή συντελεστής μετάδοσης θερμότητας
H_i	Συντελεστές στον αλγόριθμο επίλυσης CTDMA
I	Δείκτης του αριθμού του υπολογιστικού κελιού στην x κατεύθυνση
I_ϕ	Αδρανειακός όρος χαλάρωσης στις εξισώσεις πεπερασμένων όγκων
J	Δείκτης του αριθμού του υπολογιστικού κελιού στην y κατεύθυνση
K	Δείκτης του αριθμού του υπολογιστικού κελιού στην z κατεύθυνση

Ελληνικά σύμβολα

ΠΚ	Περιτροφικός Κλίβανος
α	Συντελεστής χαλάρωσης
Γ_{Φ}	Συντελεστής μεταφοράς για την ιδιότητα Φ
Δt	Βήμα χρόνου
Δt_F	Λανθασμένο χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στην αδρανειακή χαλάρωση
Δx_i	Απόσταση ανάμεσα στο κέντρο του κελιού P και στα γειτονικά σημεία
ϵ	Ρυθμός σκέδασης (dissipation) της κινητικής ενέργειας τύρβης
ϵ_w	Ρυθμός σκέδασης κοντά σε τοίχωμα
ϵ_{Φ}	Υπόλοιπο λάθους της Φ στην εξίσωση των πεπερασμένων όγκων
θ	Γωνία του κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων (v, θ, z)
κ	Σταθερά του Von Karman
μ	Δυναμικό ιξώδες αερίου
μ_e	Ενεργό δυναμικό ιξώδες
μ_i	Τυρβώδες δυναμικό ιξώδες
ρ, ρ_g	Πυκνότητα αερίου
ρ_d	Πυκνότητα σωματιδίου ή σωματιδίου
σ_e	Αριθμός Prandtl για τον ρυθμό σκέδασης τύρβης
σ_k	Αριθμός Prandtl για την κινητική ενέργεια τύρβης
τ_w	Διατμητική τάση στο τοίχωμα
Φ	Μεταφερόμενη ιδιότητα του ρευστού (ορμή, μάζα, ενθαλπία, κλπ)

Δείκτες

d	Αναφέρεται στις ιδιότητες των σωματιδίων
e	Υποδηλώνει την ανατολική επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού
E	Υποδηλώνει το ανατολικό γειτονικό σημείο
g	Αναφέρεται στις ιδιότητες του αερίου
h	Υποδηλώνει την μπροστά επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού
H	Υποδηλώνει το μπροστά γειτονικό σημείο
l	Υποδηλώνει την πίσω επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού
L	Υποδηλώνει το πίσω γειτονικό σημείο
n	Υποδηλώνει το βόρεια επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού
N	Υποδηλώνει το βόριο γειτονικό σημείο
P	Υποδηλώνει το κέντρο του υπολογιστικού κελιού
s	Υποδηλώνει την νότια επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού
S	Υποδηλώνει το νότιο γειτονικό σημείο
w	Υποδηλώνει την δυτική επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού

W Υποδηλώνει το δυτικό γειτονικό σημείο

Εκθέτες

- ο Υποδηλώνει το προηγούμενο βήμα χρόνου
- * Δηλώνει την τιμή της προηγούμενης επανάληψης ή του προηγούμενου χρονικού βήματος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής εργασίας	9
1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	10
2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	12
2.1 Επιλογή Πρώτων Υλών	12
2.2 Χημικές και Φυσικές Διεργασίες	12
2.2.1 Έψηση	14
2.2.2 Κλινκεροποίηση	16
2.2.3 Σχηματισμός Τζίρας στην Ζώνη Έψησης	19
2.3 Καύσιμα για ΠΚ	22
2.4 Καύση	25
2.4.1 Καυστήρας	26
2.5 Περιστροφικός Κλίβανος Τσιμέντου	35
2.5.1 Ιστορική Αναδρομή	36
2.5.2 Τύποι των Περιστροφικών Κλιβάνων	37
2.5.3 Προασβεστοποιητής	41
2.5.4 Ψυγείο	44
2.6 Μετάδοση Θερμότητας	46
2.6.1 Απώλειες θερμότητας	47
2.7 Ατμοσφαιρική Ρύπανση	48
2.7.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Βιομηχανία	49
2.7.2 Ανάλυση των Κυριότερων Ρύπων	50
2.7.3 Ρύπανση από Βιομηχανία Τσιμέντου	60
3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	62
3.1 Εξισώσεις Ορμής	62
3.1.1 Αέρια Φάση	62
3.1.2 Εξισώσεις Δυναμικής Σωματιδίων	65
3.2 Μεταφορά Θερμότητας	67
3.2.1 Μεταφορά Θερμότητας Αέριας Φάσης	68
3.2.2 Μεταφορά θερμότητας σωματιδίων	69
3.3 Μεταφορά Θερμότητας δια Ακτινοβολίας	70
3.3.1 Μέθοδοι Υπολογισμού Θερμικής Ακτινοβολίας	73
3.4 Μοντέλα Τυρβώδους μεταφοράς	81
3.4.1 Επιμερισμός Reynolds	81
3.4.2 Φάσμα ενέργειας τυρβώδους ροής	83
3.4.3 Μοντέλα προσομοίωσης τύρβης	84
3.4.4 Το k-ε μοντέλο τύρβης	86
3.4.5 Ροές με μικρό αριθμό Reynolds	88
4. ΑΡΙΘΜΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	89
4.1 Μέθοδοι Αριθμητοποίησης	89
4.1.1 Υπολογιστικό Πλέγμα	89
4.1.2 Εξισώσεις πεπερασμένων όγκων	91
4.1.3 Εξίσωση διόρθωσης της πίεσης	93

4.2 Περιγραφή Αριθμητικού Μοντέλου	95
4.2.1 Έλεγχος σύγκλισης	96
4.2.2 Εξισώσεις Σωματιδίων κατά Lagrange	98
4.2.3 Παρουσία Τοιχωμάτων	99
4.3 Περιγραφή Υπολογιστικού Αλγόριθμου	101
4.3.1 Αρχικές Ενέργειες	101
4.3.2 Υπολογισμοί της Αέριας Φάσης	102
4.3.3 Υπολογισμοί Σωματιδίων	104
4.4 Επεμβάσεις στον Κώδικα	106
5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	118
5.1 Αρχικές και Συνοριακές Συνθήκες	118
5.1.1 Ισοζύγιο Ενέργειας του ΠΚ	121
5.1.2 Περιγραφή του αρχείου 'Kamino.in'	130
5.1.3 Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης	135
5.2 Αρχικό Μοντέλο Καύσης	137
5.3 Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων	143
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	149
6.1 Συμπεράσματα	149
6.2 Προτάσεις	150
Παράρτημα	151
Βιβλιογραφία	259

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη σημερινή εποχή της ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξης, η βιομηχανία είναι αναγκασμένη να ακολουθεί τις εξελίξεις για να παραμένει ανταγωνιστική. Οι μεγάλοι ρυθμοί οικονομικής ανάπτυξης επιβάλλουν τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας στην παραγωγική διαδικασία με στόχο την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, την ελαχιστοποίηση του κόστους και την μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος. Τα ανώτατα εκπαιδευτικά ιδρύματα από την άλλη πλευρά πέρα από το εκπαιδευτικό τους έργο, ασχολούνται με την έρευνα και συμβάλουν στην ανάπτυξη νέας τεχνολογία.

Είναι φανερό ότι πρέπει να υπάρχει συνεργασία μεταξύ των πανεπιστημίων και της παραγωγής για αμοιβαίο όφελος. Τα πανεπιστήμια πρέπει να προσαρμόζουν την σύγχρονη τεχνολογία στις ανάγκες της βιομηχανίας και να εφευρίσκουν λύσεις για τα προβλήματα που αντιμετωπίζει.

Πάνω σε αυτό το σκεπτικό ανέλαβα την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου σε Η/Υ για την προσομοίωση του περιστροφικού κλιβάνου της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ. Προβλήματα αντιμετωπίστηκαν στην συλλογή δεδομένων και βιβλιογραφίας καθώς και στην ανάπτυξη του μοντέλου με τον κώδικα DIAN3D του Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών. Φυσικά ένα τόσο πολύπλοκο πρόβλημα δεν μπορούσε να καλυφθεί πλήρως από μια Διπλωματική εργασία. Έγιναν κάποιες παραδοχές και η προσομοίωση στράφηκε περισσότερο προς τα ροϊκά φαινόμενα του περιστροφικού κλιβάνου. Έτσι αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο της ροής και των φαινομένων μεταφοράς στον κλίβανο, έγινε μια παραμετρική μελέτη και εξήχθησαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν, συνέβαλαν και ενθάρρυναν το έργο μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Νικόλαο Βλάχο για την εμπιστοσύνη, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου και ιδιαίτερα τον μεταπτυχιακό φοιτητή Γιάννη Σαρρή όπως επίσης και τους Γιώργο Κούτλα και Νίκο Κατσαβό για την μεγάλη βοήθειά τους σε όλη την χρονική διάρκεια της Διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να τονίσω την μεγάλη βοήθεια του φίλου Μεταπτυχιακού και τέως συμφοιτητή μου, Δημήτρη Φείδαρου, καθώς και

την ηθική συμπαράσταση των γονιών μου και των φίλων μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ε. Σιγανό, Δ/ντη του εργοστασίου 'ΟΛΥΜΠΟΣ' της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, τον Γ. Σταμπόρη της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ και Ι. Μαρίνο του ΕΚΕΤ/ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ για την συμβολή τους στην συλλογή δεδομένων και τις πληροφορίες που μου έδωσαν σχετικά με την πολύπλοκα φαινόμενα ροής και μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στον περιστροφικό κλίβανο παραγωγής τσιμέντου.

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση των φαινομένων ροής σε ένα περιστροφικό κλίβανο τσιμέντου. Ο περιστροφικός κλίβανος αποτελεί μια καλή επιλογή για την παραγωγή τσιμέντου καθώς τα πλεονεκτήματά του όσον αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις, την ποιότητα και την ομοιομορφία του προϊόντος σε σχέση με του κάθετους κλιβάνους είναι μεγάλα. Παράλληλα, η ραγδαία αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου και του φυσικού αερίου ανάγκασαν πολλές βιομηχανίες να στραφούν προς το κάρβουνο ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε εντονότερα στην βιομηχανία τσιμέντου, δεδομένου ότι η παραγωγή 'κλίνκερ' είναι μια διεργασία με ιδιαίτερα μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, το κόστος του καυσίμου αποτελεί το 40 -50 % του κόστους παραγωγής κλίνκερ σε ξηρή μέθοδο. Από το 1900 περίπου, που άρχισε να χρησιμοποιείται ο περιστροφικός κλίβανος έχουν γίνει τεράστια βήματα για την βελτιστοποίησή του. Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για την αποδοτικότερη καύση του κάρβουνου, με την εκμετάλλευση της ενέργειας των θερμών αερίων της εξόδου και με την ασβεστοποίηση της φαρίνας σε προασβεστοποιητές πριν από την εισαγωγή της στον περιστροφικό κλίβανο. Για την αποδοτικότερη καύση του κάρβουνου έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι, όπως η παροχή θερμού δευτερογενούς αέρα για την καύση που αυξάνει την θερμοκρασία της φλόγας, οι εξελιγμένοι καυστήρες (π.χ. Rytojet, Rotaflam) και η επεξεργασία του κάρβουνου ώστε να έχει την μέγιστη δυνατή θερμική απόδοση.

Στα πλαίσια της προσπάθειας βελτιστοποίησης της καύσης του κάρβουνου αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει κυρίως τα φαινόμενα ροής και μεταφοράς του αέρα και των σωματιδίων του κάρβουνου στον περιστροφικό κλίβανο τσιμέντου. Παράλληλα, έγινε μια παραμετρική μελέτη σε μια προσπάθεια βελτίωσης του στροβιλισμού του μίγματος αέρα - κάρβουνου.

Για τις ανάγκες της αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας DIAN3D του Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών. Ο κώδικας αυτός αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77 και έχει την δυνατότητα υπολογισμού ελλειπτικών και παραβολικών ροών με ή χωρίς τύρβη κατά Euler και προσομοίωσης της δυναμικής σωματιδίων κατά Lagrange. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στον κώδικα (Κεφάλαιο 4.4) αφορούν κυρίως την προσθήκη υπορουτίνων για την διαχείριση των αποτελεσμάτων και την

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

γραφική απεικόνιση αυτών σε υπάρχοντα πακέτα γραφικών, όπως PHOTON του PHOENICS, TECPLOT και EXCEL. Παράλληλα με την εγκατάσταση του κώδικα DIAN3D στους υπολογιστές του Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, μεταφράστηκε το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα στα ελληνικά.

1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο επόμενο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στις διεργασίες παραγωγής τσιμέντου. Αρχικά αναφέρονται οι πρώτες ύλες για την παραγωγή του τσιμέντου. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις φυσικές και χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον περιστροφικό κλίβανο όπως η έψηση του υλικού, η δημιουργία κλίνκερ και ο σχηματισμός τζίρας. Κατόπιν περιγράφονται τα είδη των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με μια ιδιαίτερη βαρύτητα βεβαίως στο κάρβουνο που είναι και το επικρατέστερο για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην καύση σε περιστροφικούς κλιβάνους και δίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των καυστήρων και του σχήματος της φλόγας. Ακολουθεί μια περιγραφή της διάταξης του περιστροφικού κλιβάνου και γίνεται μια ιστορική αναδρομή, περιγράφονται οι τύποι των κλιβάνων και γίνεται μια σύντομη αναφορά στο ψυγείο και στον προασβεστοποιητή που αποτελεί και την τελευταία εξέλιξη της διάταξης. Ακολουθεί η περιγραφή των φαινομένων μετάδοσης και μεταφοράς θερμότητας μέσα στον κλίβανο καθώς και οι επικρατούσες απώλειες. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση όπου περιγράφονται οι κυριότεροι ρύποι και δίνονται κάποια στοιχεία ρύπανσης από βιομηχανίες τσιμέντου.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή τσιμέντου. Δίνονται οι εξισώσεις ορμής για την αέρια φάση σε ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler και για την σωματιδιακή φάση σε ένα σύστημα αναφοράς κατά Lagrange. Στη συνέχεια, δίνονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την μεταφορά θερμότητας στην αέρια και στη σωματιδιακή φάση. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και περιγράφονται μερικές μέθοδοι υπολογισμού της. Τέλος, περιγράφονται τα μοντέλα τυρβώδους μεταφοράς ορμής και θερμότητας και γίνεται ιδιαίτερη μνεία στο k-ε μοντέλο.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι αλγεβρικές εξισώσεις των πεπερασμένων όγκων από τις θεμελιώδεις μερικές Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

διαφορικές εξισώσεις διατήρησης που διέπουν τα φαινόμενα ροής και μεταφοράς. Στη συνέχεια περιγράφεται ο υπολογιστικός αλγόριθμος με μια σύντομη αναφορά των ρουτινών του, δίνεται η βασική αρχιτεκτονική του κώδικα και γίνεται επεξήγηση της μεθόδου ελέγχου της σύγκλισης της αριθμητικής λύσης. Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά σε όλες τις επεμβάσεις που έγιναν στον κώδικα DIAN3D.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται το ισοζύγιο ενέργειας του περιστροφικού κλιβάνου και περιγράφεται το αρχείο εισαγωγής δεδομένων με τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες 'Kamino.in'. Κατόπιν, περιγράφεται η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιούμε και παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 διατυπώνονται τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την παρούσα Διπλωματική εργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη του περιστροφικού κλιβάνου και την εξέλιξη του παρόντος μαθηματικού μοντέλου.

2. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

2.1 Επιλογή Πρώτων Υλών

Τα απαραίτητα συστατικά των πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμέντου είναι τα ασβεστώδη και τα αργιλώδη.

- Για τα ασβεστώδη υλικά οι πρώτες ύλες παίρνονται από τον ασβεστόλιθο, τα θαλάσσια όστρακα και την κιμωλία.
- Για τα αργιλώδη συστατικά οι πρώτες ύλες παίρνονται από τον άργιλο, τον αργλικό σχιστόλιθο, τη στυπτηριακή σχιστόλιθο και την άμμο (για το πυρίτιο και το αλουμίνιο)

Η αναλογία των πρώτων υλών εξαρτάται από τη χημική σύνθεση αυτών των υλικών και τον τύπο του παραγόμενου τσιμέντου. Ως εκ τούτου απαιτείται συνεχής ανάλυση και δοκιμή των πρώτων υλών. Για την κατεργασία των πρώτων υλών ακολουθείται η εξής διαδικασία:

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

2.2 Χημικές και Φυσικές Διεργασίες

Μια τυπική ανάλυση συστατικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1 :

Πίνακας 2-1 : Τυπική ανάλυση συστατικών

Συστατικό	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Α.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

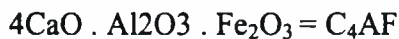
Οι πρώτες ύλες περιέχουν και ένα μικρό ποσοστό από προσμίξεις.

- Το MgO επειδή είναι εύτηκτο στις θερμοκρασίες κλινκεροποίησης βοηθάει στην έψηση. Επίσης, βοηθάει στην σφαιροποίηση του κλίνκερ αλλά το επιτυγχανόμενο πλέγμα είναι ανεπιθύμητο διότι μεγάλη συγκέντρωσή του στο τσιμέντο το κάνει 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 σπουδαίο και επιβλαβή ρόλο στον ΠΚ διότι αυτά είναι η 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 , 3 % Fe₂O₃

Τα κύρια συστατικά του κλίνκερ είναι οι κάτωθι σύμπλοκες ενώσεις :



- Το C₃S είναι σπουδαίος παράγων για τη μηχανική αντοχή του τσιμέντου. Το κοινό τσιμέντο Portland έχει αναλογία C₃S 52 - 62 %. Όταν στον ΠΚ υπάρχει στο κλίνκερ αναλογία C₃S μεγαλύτερη από 65 % η έψηση είναι πολύ δύσκολη και δίνει πολύ πτωχή χαρακτηριστική τζίρα (κεφ 2.2.3).
- Το C₂S βρίσκεται σε αναλογία 22 %. Οι τελικές συγκεντρώσεις των C₃S και C₂S εμφανίζονται όταν το κλίνκερ έχει ψηθεί στους 1470 °C. Οι θερμοκρασίες στη ζώνη έψησης μερικές φορές ποικίλουν σε ακραία όρια και αυτό επιδρά στις αναλογίες των C₃S και C₂S. Επειδή απαιτείται ψηλότερη θερμοκρασία για τον σχηματισμό του C₃S από ότι του C₂S, χαμηλότερη έψηση οδηγεί σε ψηλότερη αναλογία του C₂S και χαμηλότερη σε C₃S.
- Το C₃A είναι υπεύθυνο για την κατεργασιμότητα του τσιμέντου. Η κανονική αναλογία του στο κλίνκερ είναι 6-8%. Υψηλότερο C₃A δίνει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Τσιμέντο με υψηλό C₃A δεν αντέχει στην προσβολή των θεικών ενώσεων του νερού.

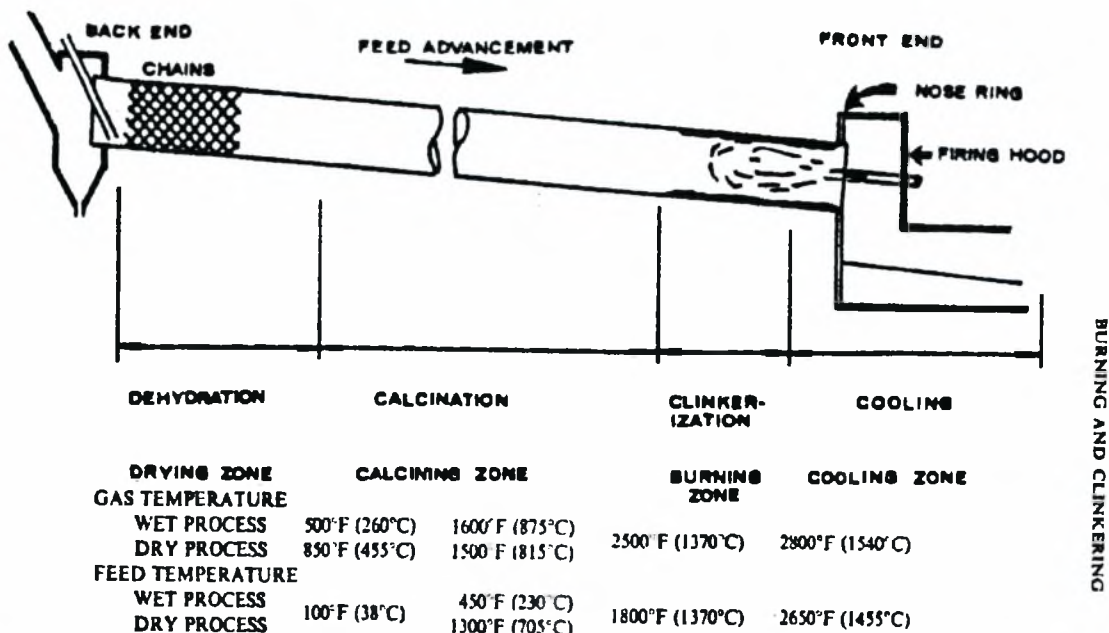
- Το C_4AF προσδίδει το χρώμα στο τσιμέντο. Υψηλή αναλογία στο κλίνκερ δίνει σκουρόχρωμο τσιμέντο. Ο σίδηρος Fe επειδή είναι εύτηκτος σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές της κλινκεροποίησης, διευκολύνει τον σχηματισμό των άλλων συστατικών του κλίνκερ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Γενικά, είναι αναγκαίο 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
- Απώλεια Πύρας: Κατά τη διέλευσή της από τις διάφορες ζώνες έψησης η αρχική τροφοδοσία χάνει ένα μέρος από το αρχικό της βάρος, που οφείλεται στο H_2O και CO_2 τα οποία φεύγουν με τα καυσαέρια. Πρέπει να τονιστεί ότι η σύνθεση της φαρίνας δεν είναι αναλογική προς το τσιμέντο που παράγεται από αυτή λόγω των διαφόρων άλλων υλικών που προστίθενται στην τελική άλεση του τσιμέντου (γύψος, πρόσθετα κ.τ.λ.). Η απώλεια πύρας της φαρίνας είναι 30-35% ενώ του τσιμέντου είναι μικρότερη του 2%. Μέρος των αλκαλίων κατά την κλινκεροποίησης εξατμίζεται και επιστρέφει στην είσοδο του ΠΚ. Για αυτό το λόγο η περιεκτικότητα της φαρίνας σε αλκάλια εμφανίζεται ψηλότερη από ότι στο τσιμέντο.
- Άσβεστος (CaO): Παρότι η άσβεστος είναι 100 % ελεύθερη στην τροφοδοσία της καμίνου, λόγω της δέσμευσής της από τα άλλα οξείδια κατά την έψηση, η αναλογία της στο κλίνκερ είναι πολύ μικρή με ποσοστό 0,5 - 1 %.

2.2.1 Έψηση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα κύρια συστατικά της φαρίνας CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 αντιδρούν για να δώσουν τα κύρια συστατικά του τσιμέντου C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF

Τροφοδοσία και Ξήρανση

Οι διεργασίες για τη δημιουργία κλίνκερ πραγματοποιούνται σε τέσσερις ζώνες μέσα στο φούρνο και είναι: Ξήρανση, ασβεστοποίηση, κλινκεροποίηση και ψύξη, (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-1: Η διεργασία της έψησης σε τέσσερις βασικές ζώνες μέσα στον ΠΚ

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση της τροφοδοσίας δια μέσω του ΠΚ φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2 : Θερμοκρασίες Αντιδράσεων Μέσα στον ΠΚ

Θερμοκρασία (°C)	Αντίδραση
100	Εξάτμιση ελευθέρου ύδατος από την φαρίνα
500	Εξάτμιση του συνδεδεμένου ύδατος από την άργιλο
500	Διάσπαση CaCO ₃ (έναρξη της ασβεστοποίησης)
800 - 900	Σχηματισμός του C ₂ S
1095 - 1205	Σχηματισμός του C ₃ A και C ₄ AF
1260 - 1455	Σχηματισμός C ₃ S με προοδευτική εξάλειψη της ελεύθερης άσβεστου (CaOελ)

Ασβεστοποίηση

Ασβεστοποίηση ονομάζεται η διάσπαση του CaCO_3



Αρχίζει στους $500\text{ }^\circ\text{C}$ και τελειώνει στους $920\text{ }^\circ\text{C}$ λίγα μέτρα πριν από την ζώνη κλινκεροποίησης. Όταν η τροφοδοσία δεν έχει ασβεστοποιηθεί πλήρως πριν εισέλθει στην ζώνη έψησης ψήνεται δύσκολα.

Κλινκεροποίηση

Στη ζώνη έψησης το μίγμα CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 και μικρό ποσοστό άλλων οξειδίων θερμαίνεται στην θερμοκρασία τήξεως και ρευστοποιείται. Αυτό καλείται κλινκεροποίηση και εκδηλώνεται με την ρευστοποίηση των συστατικών του κλίνκερ. Ο σχηματισμός του C_3S δεν αρχίζει πριν η τροφοδοσία φτάσει στην θερμοκρασία των $1260\text{ }^\circ\text{C}$ και ολοκληρώνεται στους $1370 - 1450\text{ }^\circ\text{C}$ ενώ ολόκληρη η ποσότητα του CaO έχει αντιδράσει.

Ψύξη

Στους $1370\text{ }^\circ\text{C}$ ένα μέρος των συστατικών του κλίνκερ είναι σε υγρή κατάσταση ενώ το υπόλοιπο σε στερεή. Η ταχύτητα της ψύξης, η οποία είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να στερεοποιηθεί η υγρή φάση είναι πολύ σπουδαία. Είναι γεγονός ότι η ταχεία ψύξη καλυτερεύει την ποιότητα του κλίνκερ και γίνεται καλύτερη άλεση.

2.2.2 Κλινκεροποίηση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η κλινκεροποίηση αρχίζει στους $1260\text{ }^\circ\text{C}$ και τελειώνει στους $1450\text{ }^\circ\text{C}$ περίπου. Παράλληλα εκτός από τη μέγιστη θερμοκρασία μεγάλη σημασία έχει και ο χρόνος παραμονής του κλίνκερ σε αυτή τη θερμοκρασία. Η σωστή ποιότητα κλίνκερ είναι βασική απαίτηση. Καλή ποιότητα κλίνκερ σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος του CaO έχει αντιδράσει με τα Si , Al , Fe και έχει παραμείνει ελάχιστο μετά την κλινκεροποίηση. Η ανάλυση του CaO λοιπόν δίνει μια καλή ένδειξη του πόσο καλά έχει ψηθεί το κλίνκερ.

Φαινομενικό βάρος

Μια καλή μέθοδος ποιοτικού ελέγχου είναι η περιοδική ζύγιση δειγμάτων κλίνκερ από την έξοδο του ψυγείου. Κατά τη μέθοδο αυτή το δείγμα περνά πρώτα από κόσκινο 10 mm και κατόπιν από κόσκινο 5 mm. Το κλίνκερ που συγκρατείται στο κόσκινο των 5 mm ρίχνεται μέσα σε δοχείο 1000 ml σχήματος κώνου με το λαιμό προς τα επάνω και ζυγίζεται. Το βάρος του κλίνκερ αυτού καλείται φαινόμενο βάρος και δείχνει πόσο καλά έχει ψηθεί το κλίνκερ. Ένα καλοψημένο κλίνκερ πρέπει να έχει φαινόμενο βάρος μεταξύ 1250 και 1350 γραμμαρίων. Το φαινόμενο βάρος του κλίνκερ μπορεί να κυμαίνεται ανάλογα και με τη σύνθεση της τροφοδοσίας. Εάν η σύνθεση των πρώτων υλών παραμένει σταθερή το καλύτερο κλίνκερ θα έχει το ιδανικό φαινόμενο βάρος και το χαμηλότερο ποσοστό CaO. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το δείγμα λαμβάνεται από την έξοδο του ψυγείου 30 λεπτά μετά την έψησή του.

Εμφάνιση του κλίνκερ

Το χρώμα και το μέγεθός του κλίνκερ είναι ο καλύτερος και ο φθηνότερος τρόπος ελέγχου του. Μόνο το μέγεθός δεν δίνει ένδειξη για την ποιότητα του κλίνκερ διότι εξαρτάται από τις πρώτες ύλες και τις στροφές του ΠΚ. Γενικά, το καλοψημένο κλίνκερ είναι σκοτεινού (μαύρου) χρώματος και σε όσο υψηλότερη θερμοκρασία έχει ψηθεί τόσο καλύτερα σφαιροποιείται.

Εάν το κλίνκερ είναι ψημένο παραπάνω από ότι πρέπει το ποσοστό του CaO πέφτει, το φαινόμενο βάρος μεγαλώνει, το κλίνκερ γίνεται μεγαλύτερο σε μέγεθος και σκοτεινότερο σε χρώμα. Τα παραπάνω βέβαια ισχύουν για κλίνκερ που έχει ψυχθεί.

Όταν το υλικό φτάσει στη θερμοκρασία κλινκεροποίησης υφίσταται δραστικές μεταβολές στα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά. Όσο ταχύτερα σχηματίζεται η υγρή φάση των συστατικών (C_2S , C_3S , C_4AF , C_3A), το υλικό γίνεται μαλακό και ρευστό. Σχηματίζονται σφαίρες κλίνκερ και τα υλικά ανυψώνονται περισσότερο στο εσωτερικό του ΠΚ βραδύνοντας περισσότερο την κίνησή τους όσο πλησιάζουν τη φλόγα. Συνοψίζοντας, όταν όλες οι μεταβλητές παραμένουν σταθερές, σχηματίζονται μεγαλύτερες σφαίρες κλίνκερ στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

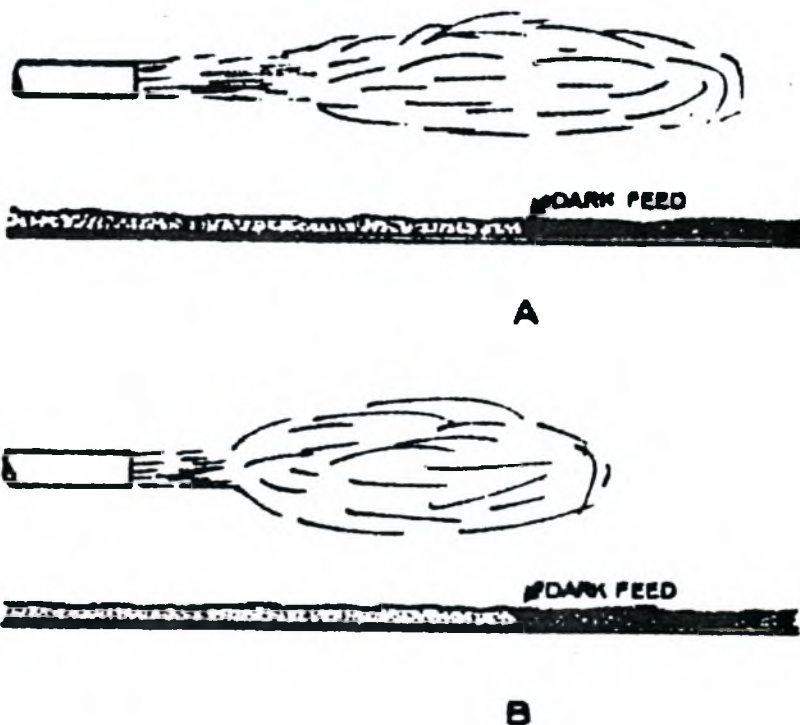
Το χρώμα του κλίνκερ στη ζώνη έψησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία που επικρατεί. Σε γενικές γραμμές από το παρατηρούμενο χρώμα έχουμε :

Σκούρο κόκκινο	Κερασί Κόκκινο - Πορτοκαλί - κίτρινο	Λευκό
Ψυχρό	Κανονικό	Θερμό

Επίδραση της θέσης της φλόγας στο κλίνκερ

Μέσα στη ζώνη έψησης μπορεί να παρατηρηθεί μια απότομη μεταβολή στο χρώμα του υλικού από σκοτεινό σε λευκό (Σχήμα 2-2). Αυτό το σημείο της ζώνης έψησης είναι πολύ σημαντικό, διότι δίνει τις πλέον γρήγορες πληροφορίες όταν η ζώνη έψησης πρόκειται να θερμανθεί ή να ψυχθεί.

ROTARY CEMENT KILN



Σχήμα 2-2 : Θέση της φλόγας στην ΠΚ

Κάτω από κανονικές και σταθερές συνθήκες το σημείο αυτό παραμένει σταθερό και ευρίσκεται κατά ένα τέταρτο μέσα στη φλόγα. Εάν το σημείο αυτό μετακινηθεί πιο μέσα στη φλόγα η ζώνη έψησης ψύχεται. Εάν μετακινηθεί προς την έξοδο της ΠΚ η ζώνη έψησης θερμαίνεται. Κάθε αλλαγή στα χαρακτηριστικά της φλόγας θα επιφέρει αλλαγή και στη

θέση του σημείου, π.χ. όταν η φλόγα βραχύνεται, το σημείο θα μετακινηθεί προς την αρχή του ΠΚ.

Γενικά το σημείο πλησιάζει προς την αρχή της ΠΚ όταν :

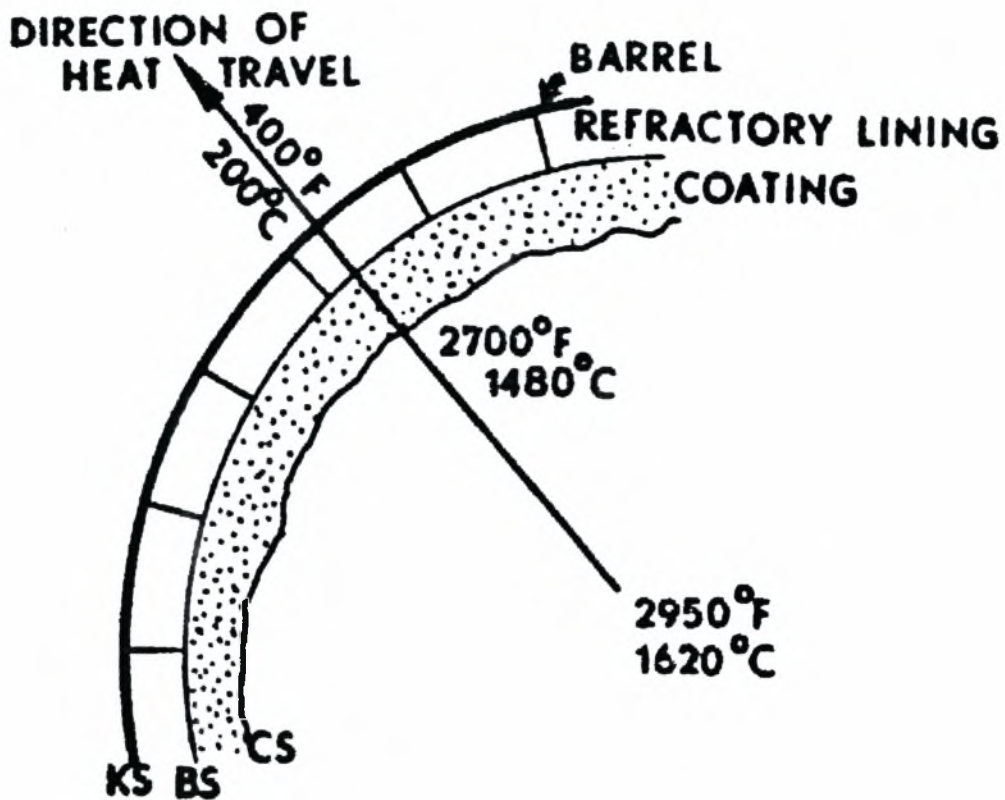
- Η φλόγα βραχύνεται
- Το υλικό είναι πολύ σκληρό για την έψηση
- Η ζώνη έψησης ψύχεται

2.2.3 Σχηματισμός Τζίρας στην Ζώνη Έψησης

Φύση της τζίρας

Η τζίρα (Coating) είναι μια μάζα κλίνκερ ή σκόνης η οποία προσκολλάται στα τοιχώματα του κλιβάνου, αλλάζοντας τη ρευστή ή ημίρρευστη κατάσταση σε στερεή. Μια καλή προστατευτική τζίρα στην ζώνη έψησης αυξάνει το χρόνο ζωής της επένδυσης (πυρότουβλα) και μειώνει το κόστος συντήρησης της ΠΚ.

Τα ρευστοποιημένα τεμαχίδια προσκολλώνται πάνω στην επιφάνεια της παλιάς τζίρας ή στην επιφάνεια των πυρότουβλων όταν δεν υπάρχει τζίρα, τόσο περισσότερο όσο η θερμοκρασία της επιφάνειας της τζίρας είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία στερεοποίησης του κλίνκερ. Όταν η θερμοκρασία επιφάνειας της τζίρας μεγαλώσει πάνω από την θερμοκρασία στερεοποίησής της, αρχίζει να πέφτει αλλάζοντας την κατάσταση του μίγματος από στερεό σε υγρό. Μεταξύ της τζίρας και του ελάσματος της καμίνου υπάρχει μια πτώση θερμοκρασίας (Σχήμα 2-3). Η ροή θερμότητας προς τα έξω, εξαρτάται από την θερμική αγωγιμότητα της τζίρας και των πυρότουβλων.



Σχήμα 2-3 : Θερμοκρασιακή συνθήκη ισορροπίας σχηματισμού τζίρας στην ΠΚ

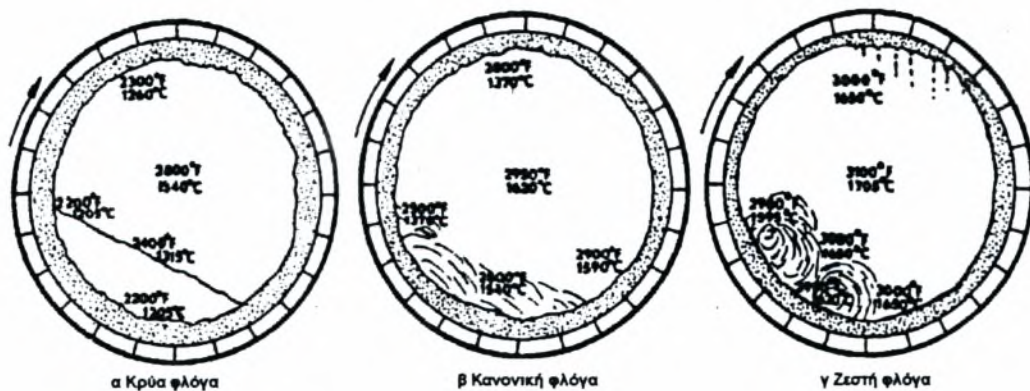
Επειδή η τζίρα απαρτίζεται από κλίνκερ που ρευστοποιήθηκε, τροφοδοσία με υψηλή ρευστή φάση στην θερμοκρασία κλινκεροποίησης είναι πολύ ευνοϊκή για τον σχηματισμό τζίρας, σε σχέση με την τροφοδοσία με χαμηλή ρευστή φάση. Επίσης, τα αλκάλια στην αέρια φάση ευνοούν τον σχηματισμό τζίρας αλλά και ανεπιθύμητων δακτυλιδιών λόγω των υψηλών χαρακτηριστικών των τηγμάτων.

Εφόσον η θερμοκρασία της επιφάνειας της τζίρας παίζει τον σπουδαιότερο ρόλο στο σχηματισμό της, είναι εμφανές ότι η φλόγα έχει μεγάλη επίδραση στο σχηματισμό της τζίρας. Φλόγα κοντή, πλατειά και ζωηρή καταστρέφει την τζίρα, ενώ η μακριά φλόγα ευνοεί τον σχηματισμό της.

Καταστάσεις λειτουργίας

Παράλληλα με τους άλλους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω για τον σχηματισμό της τζίρας, εξίσου σημαντικές είναι και η κατάσταση λειτουργίας του ΠΚ.

- **Κρύος Κλίβανος:** Η θερμοκρασία επιφάνειας της τζίρας και της τροφοδοσίας είναι χαμηλές για να δημιουργήσουν το αναγκαίο ποσό των ρευστών συστατικών τα οποία θα σχηματίσουν τη τζίρα Σχήμα 2-4α.
- **Κανονικός Κλίβανος:** Το αναγκαίο ποσοστό της ρευστής μάζας για τον σχηματισμό της τζίρας υπάρχει και είναι ~24%. Η θερμοκρασία της τζίρας πριν και μετά την επαφή της με το υλικό, είναι λίγο κάτω από την θερμοκρασία ρευστοποίησης ($1315\text{ }^{\circ}\text{C}$). Τζίρα σχηματίζεται όπου η θερμοκρασία της επιφάνειας της τζίρας παραμένει χαμηλότερα από την θερμοκρασία στερεοποίησης Σχήμα 2-4β.
- **Θερμός Κλίβανος:** Εξ αιτίας της υψηλής θερμοκρασίας της τζίρας και του υλικού, σχηματίζεται περισσότερη ρευστή φάση. Όλες οι θερμοκρασίες είναι πάνω από τις θερμοκρασίες στερεοποίησης και η τζίρα αλλάζει από στερεή σε υγρή κατάσταση και πέφτει Σχήμα 2-4γ. Η τροφοδοσία λόγω της υψηλής ρευστότητας αρχίζει και σφαιροποιείται. Μια τέτοια κατάσταση λειτουργίας είναι άκρως επικίνδυνη για τον κλίβανο και την επένδυση.



- α : Κλίβανος όχι αρκετά θερμός για τον σχηματισμό τζίρας
 β : Κλίβανος με ιδανική θερμοκρασία για σχηματισμό τζίρας
 γ : Κλίβανος πολύ θερμός, με μεγάλη υγρή φάση, και απώλεια τζίρας

Σχήμα 2-4: Συνθήκες σχηματισμού τζίρας

2.3 Καύσιμα για ΠΚ

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους ΠΚ τσιμέντου μπορούν να κατανεμηθούν σε στερεά υγρά και αέρια. Τα υγρά και αέρια καύσιμα έχουν πιο σταθερή ποιότητα από τα στερεά, η ανάλυση των οποίων δείχνει ένα ευρύτερο ποιοτικό φάσμα. Επίσης, η επίτευξη ομοιογένειας στα φορτία στερεών καυσίμων που προορίζονται για καύση είναι σαφώς δυσχερέστερη από την αντίστοιχη υγρών και αερίων καυσίμων, καθόσον το μέγεθος των κόκκων εμφανίζεται ως ένας νέος παράγοντας επίδρασης της θερμικής απόδοσης.

Στερεά καύσιμα

Από όλους τους τύπους καυσίμου που χρησιμοποιούνται στην τσιμεντοβιομηχανία ο άνθρακας απαιτεί την μεγαλύτερη προετοιμασία πριν χρησιμοποιηθεί για την καύση. Ο άνθρακας αλέθεται και ξηραίνεται σε ειδικούς μύλους. Απαιτείται στενός έλεγχος της λεπτότητας των κόκκων, διότι κάθε αλλαγή σ' αυτή μπορεί να μεταβάλει τις συνθήκες καύσης στον κλίβανο. Παράλληλα, απαιτείται έλεγχος της περιεχόμενης υγρασίας διότι η άνοδος της επηρεάζει τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες της καύσης. Ένα από τα χαρακτηριστικά της φλόγας του άνθρακα είναι το μαύρο χρώμα μεταξύ του σωλήνα εκτόξευσης και του σημείου ανάφλεξης του κάρβουνου, το οποίο με ρύθμιση του πρωτογενούς αέρα μπορεί να γίνει πιο μακρύ ή πιο κοντό.

Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά του κάρβουνου που επηρεάζουν τόσο την απόδοση της καύσης όσο και το σχήμα της φλόγας, είναι τα εξής :

- Ποσοστό πτητικών: Θεωρητικά το ποσοστό αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 2% έως 60% Έτσι, δεν είναι σταθερός ο συντελεστής που έχει σχέση με την θερμοκρασία έναυσης και τη χημική δραστηριότητα του καυσίμου. Κατά κανόνα όμως χρησιμοποιούνται καύσιμα από 18 - 35% πτητικών ουσιών.
- Θερμογόνος δύναμη: Η διακύμανση της θερμογόνου δύναμης γύρω από την μέση τιμή ανέρχεται σε $\pm 2-3\%$, ακόμα και αν έχουμε την ίδια πηγή προμήθειας.
- Ποσοστό τέφρας: Το ποσοστό τέφρας θεωρητικά μπορεί να κυμαίνεται από 1% έως 60% ή ακόμα και περισσότερο. Πρακτικά όμως χρησιμοποιούνται καύσιμα με 10 - 20% τέφρα Η σύστασή της επιδρά στην εψησιμότητα της φαρίνας και στις τελικές ιδιότητες του κλίνκερ, καθώς αυτή ενσωματώνεται εντελώς στην μάζα του κλίνκερ.

- Ποσοστό υγρασίας: Το ποσοστό υγρασίας επιδρά στην θερμική ακτινοβολία και στην ζώνη καύσης. Η αύξησή της μειώνει την θερμική απόδοση του περιστροφικού κλιβάνου.
- Λεπτότητα άλεσης: Η λεπτότητα άλεσης επιδρά στο χρόνο καύσης του καυσίμου και ειδικότερα τα μεγαλύτερα σωματίδια επιδρούν αρνητικά στην φλόγα. Για να θεωρείται ικανοποιητική, πρέπει το ποσοστό υπολείμματος στα 4900 mesh να είναι μικρότερο του 20%.
- Άλλα χαρακτηριστικά του κάρβουνου που επηρεάζουν την καύση είναι: η ορυκτολογία του (λεπτινίτης, βιτρινίτης, πυρίτες κλπ), η ειδική επιφάνεια, η ικανότητα ροής, η σύσταση και η ποσότητα των καυσαερίων, η παρουσία ιχνοστοιχείων καθώς και οι ιδιότητες εκτριβής (προκαλούν φθορές στον καυστήρα).

Οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν κριτήρια επιλογής καυσίμων (κάρβουνου) καθώς και ρυθμιστικοί παράγοντες λειτουργίας τον περιστροφικού κλιβάνου, προκειμένου να αποφεύγεται η υπερκατανάλωση ή η ατελής καύση τους.

Αέρια καύσιμα

Τα κυριότερα αέρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε ΠΚ είναι τα αέρια του υγρού πετρελαίου, το H_2 και το φυσικό αέριο. Συνήθως χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο διότι είναι πιο φτηνό έναντι των υπολοίπων αερίων.

Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου που επηρεάζουν τόσο την απόδοση της καύσης όσο και το σχήμα της φλόγας, είναι τα εξής :

- Ποσοστό μεθανίου: Το ποσοστό του μεθανίου στο φυσικό αέριο κυμαίνεται μεταξύ 75 - 85 %.
- Ποσοστό αιθανίου: Το ποσοστό του αιθανίου στο φυσικό αέριο κυμαίνεται μεταξύ 12 - 17 %.
- Ποσοστό αζώτου: Το ποσοστό του αζώτου στο φυσικό αέριο κυμαίνεται μεταξύ 0,8 - 1,2 %.
- Λοιπά αέρια: Το ποσοστό των λοιπών αερίων στο φυσικό αέριο κυμαίνονται μεταξύ 2 - 12 %.

Τα πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου είναι τα εξής:

- Δεν απαιτεί προπαρασκευή (ξήρανση, άλεση, προθέρμανση)
- Γίνεται άμεση καύση μόλις έλθει σε επαφή με τον αέρα
- Η ατμόσφαιρα της ζώνης έψησης είναι πολύ καθαρή
- Η ζώνη έψησης είναι 'θερμότερη'
- Χρειάζεται πολύ λίγος ή καθόλου πρωτογενής αέρας για την καύση και έτσι χρησιμοποιείται περισσότερος ζεστός δευτερογενής αέρας.

Υγρά Καύσιμα

Ο κυριότερος τύπος υγρών καυσίμων που χρησιμοποιείται είναι το βαρύ πετρέλαιο το οποίο παρασκευάζεται από τη διύλιση του κατάλοιπου του πετρελαίου. Το βαρύ πετρέλαιο απαιτεί προθέρμανση (με ατμό ή καυσαέριο) πριν την άντληση και την εκνέφωση. Για να υπάρχουν οι απαραίτητες συνθήκες καλής καύσης, το βαρύ πετρέλαιο πρέπει να εκνεφωθεί. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της 'δεκάρας' του καυστήρα, το μέγεθος της οποίας ρυθμίζει την πίεση του καυσίμου (μικρή δεκάρα - υψηλή πίεση) η οποία επιδρά στο σχήμα της φλόγας. Επειδή δεν υπάρχουν όρια πίεσεως για κάθε μέγεθος δεκάρας, απαιτείται αλλαγή της όταν γίνεται μεγάλη αλλαγή της παροχής του καυσίμου. Σε μεγάλη πίεση καυσίμου, δεν γίνεται τέλεια καύση με αποτέλεσμα το καύσιμο να επικάθεται στα πυρότουβλα και την τζίρα.

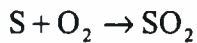
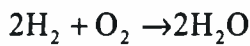
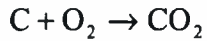
Τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου που επηρεάζουν τόσο την απόδοση της καύσης όσο και το σχήμα της φλόγας, είναι τα εξής :

- Ποσοστό άνθρακα: Το ποσοστό του άνθρακα στο βαρύ πετρέλαιο κυμαίνεται μεταξύ 78 - 82 %
- Ποσοστό υδρογόνου: Το ποσοστό του υδρογόνου στο βαρύ πετρέλαιο κυμαίνεται μεταξύ 10 - 14 %
- Ποσοστό οξυγόνου: Το ποσοστό του οξυγόνου στο βαρύ πετρέλαιο κυμαίνεται μεταξύ 0,8 - 1,2 %
- Ποσοστό αζώτου: Το ποσοστό του αζώτου στο βαρύ πετρέλαιο κυμαίνεται μεταξύ 0,9 - 1,1 %
- Λοιπές ενώσεις: Το ποσοστό των λοιπών ενώσεων στο βαρύ πετρέλαιο κυμαίνεται μεταξύ 4-6 %

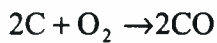
2.4 Καύση

Για να επιτευχθεί τέλεια καύση χρειάζεται ικανή ποσότητα οξυγόνου να αναμιχθεί με το καύσιμο και η απαιτούμενη θερμοκρασία αναφλέξεως μίγματος καυσίμου - οξυγόνου.

Σε τέλεια καύση έχουμε :



Σε ατελή καύση έχουμε παραγωγή και μονοξειδίου του άνθρακα :



Το απαιτούμενο οξυγόνο για την καύση προέρχεται από τον αέρα που εισέρχεται στον κλίβανο.

Επίδραση του αέρα καύσης

Ο έλεγχος του απαιτούμενου αέρα είναι εξίσου σημαντικός με τον έλεγχο του απαιτούμενου καυσίμου για την καύση. Περίσσεια ή έλλειψη αέρα είναι εξίσου επιβλαβής στην οικονομική λειτουργία του καυσίμου.

Συγκεκριμένα όταν έχουμε ατελή καύση (εμφάνιση CO), με την καύση 1 kg άνθρακα παράγονται 2048 kcal. Αντίστοιχα στην τέλεια καύση (εμφάνιση CO₂) με την καύση 1 kg άνθρακα παράγονται 6600 kcal. Δηλαδή υπάρχει μια διαφορά 4552 kcal που χάνονται στην ατελή καύση, πράγμα αντικοινωνικό. Εκτός αυτού για λόγους ασφαλείας ο ΠΚ δεν πρέπει να λειτουργεί υπό συνθήκες ατελούς καύσης.

- Όταν υπάρχει ανεπάρκεια αέρα, αύξηση του καυσίμου οδηγεί στη πτώση της θερμοκρασίας στη ζώνη καύσης.
- Μεγάλη περίσσεια αέρα αυξάνει την θερμική απώλεια στην έξοδο του ΠΚ και κρυώνει την φλόγα.

Σε θερμοδυναμικό υπολογισμό του ΠΚ έχει υπολογιστεί ότι για κάθε 1% O₂ στα εξερχόμενα αέρια του ΠΚ υπάρχει απώλεια 0,449 τόνων καυσίμου σε κάθε 100 τόνους

καυγόμενου άνθρακα, το οποίο σημαίνει ότι 0,4 % της παραγόμενης θερμότητας από την καύση θα χαθεί για κάθε 1 % ελεύθερο οξυγόνο στα εξερχόμενα από τον ΠΚ αέρια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την παραγωγή 1,193 τόνους κλίνκερ / ημέρα απαιτείται 1120 kcal / kg κλίνκερ για 1,5% περίσσεια O₂. Αντίστοιχα για την ίδια παραγωγή κλίνκερ αλλά με 4,5% περίσσεια O₂ έχουμε απώλεια 16128 kcal / ημέρα.

Συνοπτικά, τέλεια καύση έχουμε όταν στα εξερχόμενα αέρια τα ποσοστά του O₂ είναι 0 % , του CO είναι 0 % και του CO₂ μέγιστο. Ατελή καύση έχουμε όταν στα αέρια εξόδου το ποσοστό του O₂ είναι μεγαλύτερο του 0,7 %. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ΠΚ λειτουργεί καλύτερα όταν στα εξερχόμενα αέρια το ποσοστό του O₂ κυμαίνεται από 0,7 - 3,5 % με ιδανικό 1 - 1,5 %.

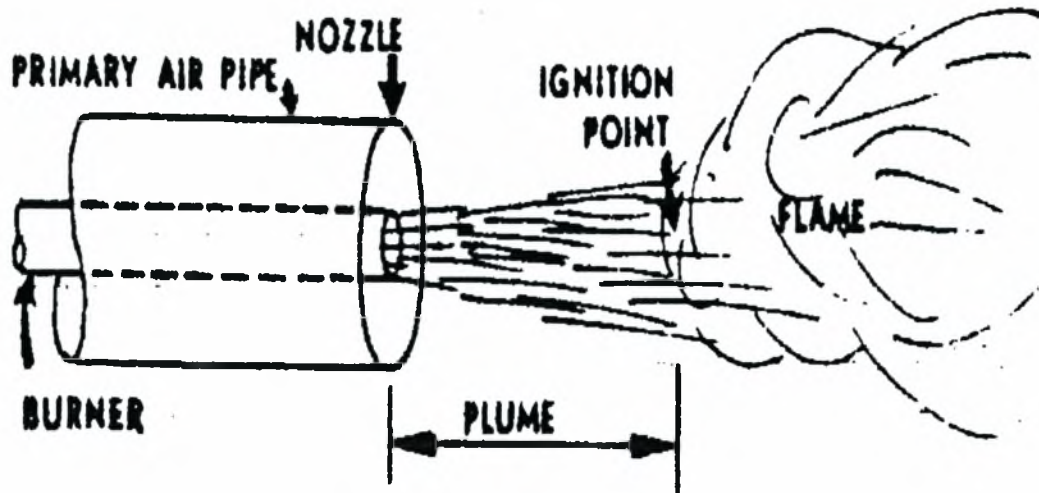
Από τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής για καλή καύση:

- Το ποσοστό του O₂ στα εξερχόμενα αέρια του ΠΚ να βρίσκεται μεταξύ 0,7 και 3,5 % κάτω από σταθερές συνθήκες λειτουργίας
- Τα εξερχόμενα αέρια να μη περιέχουν CO
- Τα εξερχόμενα αέρια να περιέχουν το μέγιστο δυνατό ποσοστό CO₂

2.4.1 Καυστήρας

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός καυστήρα (Σχήμα 2-5) είναι:

- Ο σωλήνας του πρωτογενούς αέρα
- Ο σωλήνας του αέρα μεταφοράς (αέρας και κάρβουνο)
- Το ακροφύσιο του καυστήρα
- Το σημείο έναυσης της φλόγας
- Η απόσταση από το ακροφύσιο έως το σημείο έναυσης (PLUME)
- Η φλόγα



Σχήμα 2-5 : Κύρια χαρακτηριστικά καυστήρα

Σχεδιασμός και λειτουργία του καυστήρα

Ο καυστήρας εισάγει το καύσιμο με ορισμένη και σταθερή παροχή και το αναμιγνύει με τον δευτερογενή αέρα. Πρέπει επίσης να παρέχει την δυνατότητα εύκολης ρύθμισης της προσδιδόμενης στο σύστημα ενέργειας, ανάλογα με τις κατά περίπτωση επικρατούσες συνθήκες έψησης. Επομένως, ο σχεδιασμός του καυστήρα έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση της παραγωγής, στην ποιότητα του προϊόντος καθώς και σε άλλους λειτουργικούς παράγοντες της έψησης. Η επιλογή επομένως του κατάλληλου καυστήρα αποτελεί ένα από τα πλέον σοβαρά τεχνικά-οικονομικά προβλήματα της παραγωγής παρά το σχετικά χαμηλό κόστος του. Για ένα κλίβανο δυναμικότητας 4000 tn/ημέρα το κόστος του καυστήρα αντιστοιχεί περίπου με το κόστος πενταήμερης κατανάλωσης καυσίμου.

Συγκεκριμένα ο καυστήρας του περιστροφικού κλιβάνου πρέπει:

- Να εξασφαλίζει την σταθερότητα της προσδιδόμενης ενέργειας, η οποία εξαρτάται από την θερμογόνο δύναμη και την παροχή του καυσίμου. Η χρήση καυσίμων με διαφορετική θερμογόνο δύναμη καθιστά αναγκαία την διεξαγωγή μετρήσεων σε κανονικά διαστήματα, ώστε να γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις στην παροχή του καυσίμου.
- Να διατηρεί σταθερό το πεδίο ροής της φλόγας και τις ταχύτητες εξόδου του αέρα και του κάρβουνου, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του ΠΚ

- Να έχει απλότητα κατασκευής και δυνατότητα εύκολης ρύθμισης των λειτουργικών του παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη φλόγα και να προσδίνεται ανά πάσα στιγμή η απαιτούμενη ενέργεια στο σύστημα.
- Να εξασφαλίζει μέσω ρύθμισης της επιτυγχανόμενης φλόγας την δυνατότητα ελέγχου των επικαθίσεων (τζίρα) στα εσωτερικά τοιχώματα του κλίβανου οι οποίες είναι απαραίτητες για την προστασία του ελάσματος τον κλιβάνου στην ζώνη της υψηλής θερμοκρασίας.
- Να επιδρά στην ελαχιστοποίηση της ειδικής θερμικής κατανάλωσης της έψησης.
- Να μεγιστοποιεί την διάρκεια ζωής των πυρότουβλων της εσωτερικής επένδυσης του κλίβανου και να ελαχιστοποιεί την θερμική καταπόνηση των κυλίνδρων κίνησης του κλιβάνου και των στελεχών της κεφαλής του καυστήρα, με κατάλληλη ρύθμιση του σχήματος και μήκους της φλόγας.
- Να διατηρεί σταθερές τις συνθήκες καύσης (παροχή καυσίμου και αέρα, σχήμα φλόγας κλπ). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η περίσσεια αέρα επιδρά σημαντικά στην φλόγα του κάρβουνου. Μια αύξηση κατά 10% του στοιχειομετρικά απαιτούμενου αέρα μειώνει περίπου κατά 4% την θερμοκρασία της φλόγας, ενώ αν αυξηθεί κατά 100 °C η θερμοκρασία της φλόγας έχουμε αύξηση της παραγωγής κατά 12% και ελάττωση της θερμικής κατανάλωσης περίπου κατά 10%.
- Ο καυστήρας πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να εξασφαλίζεται η εγγυημένη διάρκεια ζωής του

Αν και ο καυστήρας είναι από τα πιο σημαντικά τμήματα του συστήματος του περιστροφικού κλιβάνου, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ήταν απλά ένας επιμήκης αγωγός και μόλις τα τελευταία χρόνια αναγνωρίστηκε η σημασία του σχεδιασμού του.

Η γεωμετρία των εμπορικών καυστήρων για φλόγες κονιοποιημένου κάρβουνου μπορεί να διαφέρει σημαντικά, εξαρτώμενη από το σύστημα καύσης (άμεσο ή έμμεσο). Σ' ένα άμεσο σύστημα καύσης, το κάρβουνο μεταφέρεται στον καυστήρα κατευθείαν από τον μύλο. Σ' ένα έμμεσο σύστημα καύσης, τοποθετείται ένα ενδιάμεσο σιλό μεταξύ του συστήματος άλεσης και του συστήματος τροφοδοσίας του καυστήρα.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι φλόγας που συσχετίζονται με δύο τύπους καυστήρων. Αξονικές φλόγες δημιουργούνται από καυστήρες μη περιδινόμενης ροής και αντιστοιχούν στα άμεσα συστήματα καύσης κάρβουνου, ενώ αποκλίνουσες φλόγες δημιουργούνται από καυστήρες που σχηματίζουν μια ζώνη περιδίνησης, με ανάστροφη ροή αέρα.

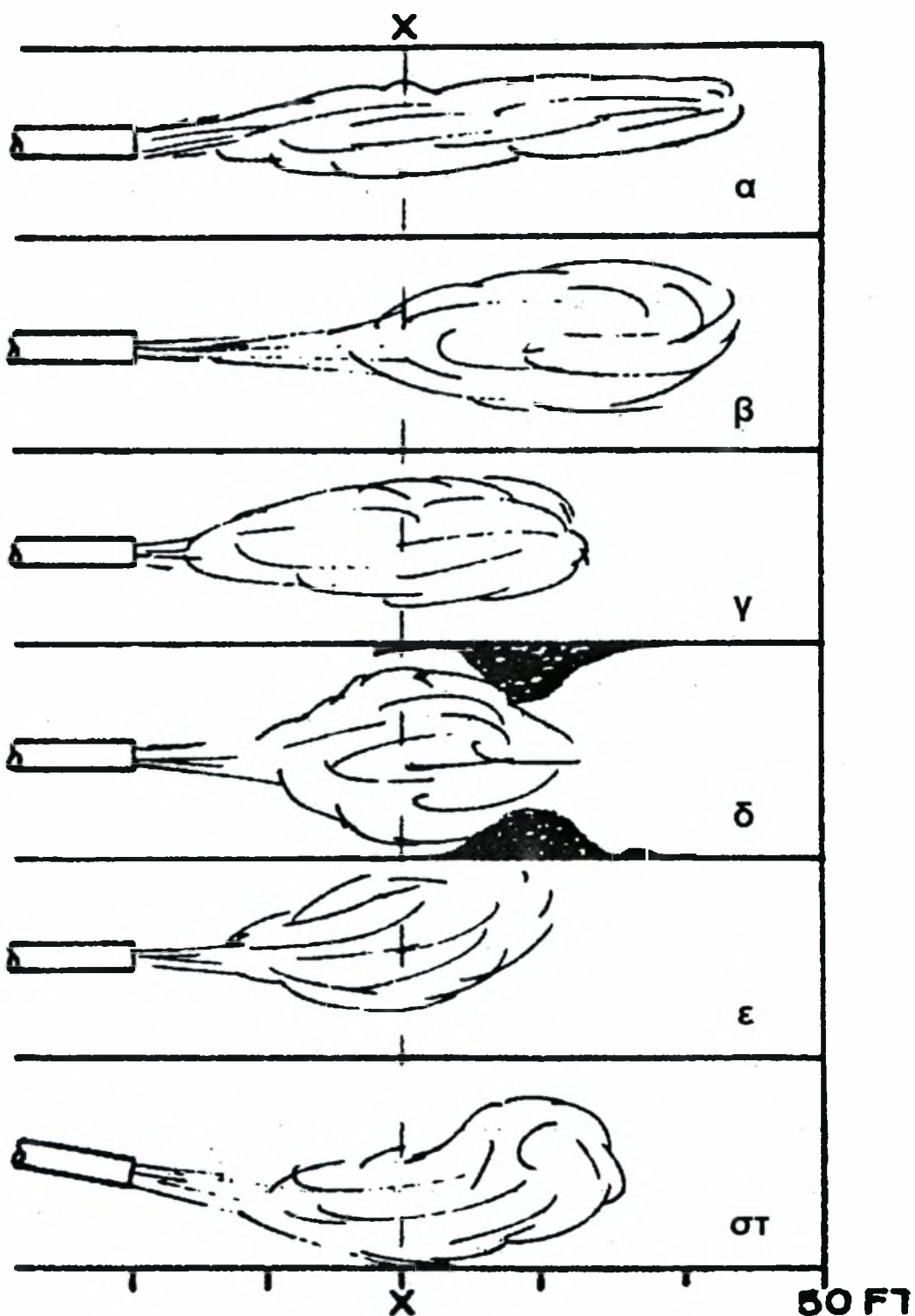
Άλλοι τύποι καυστήρων περιλαμβάνουν σύστημα ομοκεντρικών σωλήνων, όπως ο καυστήρας τριών καναλιών ή Pyrojet (Vollan and Klingbeil 1988) και ο Rotaflam (Jacques and Gillouin 1990, Pillard 1990) που συνδυάζουν τις επιδράσεις αξονικής και περιδινούμενης ροής.

Χαρακτηριστικά της φλόγας

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της φλόγας είναι :

- Διάμετρος ΠΚ
- Τύπος καυστήρα
- Θέση καυστήρα
- Διάμετρος ακροφύσιου πρωτογενούς αέρα
- Μέγεθος 'δεκάρας'
- Θερμική αξία του καυσίμου
- Λεπτότητα καυσίμου (για άνθρακα)
- Θερμοκρασία πρωτογενούς αέρα
- Θερμοκρασία δευτερογενούς αέρα
- Παροχή πρωτογενούς αέρα
- Παροχή δευτερογενούς αέρα
- Παροχή καυσίμου
- Θερμοκρασία τοιχωμάτων στην ζώνη έψησης
- Βαθμός καθαρότητας του εισερχόμενου αέρα στον ΠΚ (συγκέντρωση κόνεως)
- Βαθμός πληρώσεως της καμίνου

Τα χαρακτηριστικά της φλόγας ποικίλουν διότι εξαρτώνται κάθε φορά από τις επικρατούσες συνθήκες ποιότητας κλίνκερ, επένδυσης, εμφάνισης δακτυλιδιών, τζίρας κτλ. Στο παρακάτω Σχήμα 2-6 παρουσιάζονται διάφορα είδη φλόγας :



Σχήμα 2-6 : Βασικές διαφορές μεταξύ φλογών

Μήκος φλόγας

Το μήκος της φλόγας μπορεί να μετρηθεί από το ακροφύσιο (μπεκ) μέχρι το πέρας της φλόγας ή από το σημείο έναυσης μέχρι το πέρας της φλόγας. Η μεταβλητή που έχει την μεγαλύτερη επίδραση στο μήκος της φλόγας είναι η % αναλογία αέρος στην ζώνη έψησης. Έλλειψη επαρκούς αέρα καύσης κάνει τη φλόγα μακριά, καθ' όσον το καύσιμο αναγκάζεται να προσροφήσει οξυγόνο πιο πίσω στον ΠΚ. Η ολική ποσότητα του αέρα καύσης είναι το σύνολο του πρωτογενούς του δευτερογενούς. Το μήκος της φλόγας εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την παροχή του πρωτογενούς αέρα. Έτσι από τον αναλυτή O_2 και CO μπορεί κανείς να αντιληφθεί εάν η φλόγα είναι κοντύτερη ή μακρύτερη.

- Με αύξηση του πρωτογενούς αέρα (ποσοστό οξυγόνου από 2 σε 4 %) η φλόγα επιμηκύνεται ενώ με ελάττωση του πρωτογενούς αέρα (ποσοστό οξυγόνου από 2 σε 0,7 %) η φλόγα βραχύνεται.
- Με ελάττωση του πρωτογενούς αέρα (ποσοστό οξυγόνου από 0,7 σε 0,1 %) εμφανίζεται ένα μικρό ποσοστό CO , και η φλόγα επιμηκύνεται ενώ με αύξηση του πρωτογενούς αέρα (ποσοστό οξυγόνου από 0,1 σε 0,7 %) το CO δεν εμφανίζεται πλέον και η φλόγα βραχύνεται.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι δεν είναι δυνατόν να θεωρηθεί με βεβαιότητα ότι μια αύξηση στην ροή του αέρα οδηγεί σε επιμήκυνση της φλόγας ή μια μείωση στον αέρα θα την κοντύνει.

Μια δεύτερη μεταβλητή από την οποία επηρεάζεται το μήκος της φλόγας είναι ο τύπος του καυστήρα, ιδιαίτερα από τη διάμετρο του ακροφύσιου. Μείωση της διαμέτρου του ακροφύσιου θα κοντύνει τη φλόγα αλλά περαιτέρω μείωση θα τη μακρύνει. Στην περίπτωση όμως που η αναλογία του ολικού αέρα καύσης και του καυσίμου είναι σταθερά δεν θα λάβει χώρα καμιά μεταβολή στο μήκος της φλόγας. Από αυτό μπορούμε να πούμε ότι το μήκος της φλόγας δεν αλλάζει αν το ποσοστό του O_2 παραμένει σταθερό.

Σημείο ανάφλεξης καυσίμου

Η έναυση του καυσίμου εξαρτάται από την επάρκεια θερμότητας ανάφλεξης του καυσίμου, από την επάρκεια αέρα καύσης και από την ποιότητα του καυσίμου

Κατά την έναρξη λειτουργίας του ΠΚ η έναυση είναι δύσκολη λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών του κλιβάνου. Για αυτό το λόγω η αρχική έναυση γίνεται με βοηθητικό τρόπο

Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

και αφού ο ΠΚ λάβει κανονική πορεία, το σημείο έναυσης μπορεί να ρυθμιστεί από τις παρακάτω μεταβλητές :

- Θερμοκρασία πρωτογενούς και δευτερογενούς αέρα. Μια μείωση αυτών μετακινεί το σημείο έναυσης πιο βαθιά στον κλίβανο.
- Το σχεδιασμό του ψυγείου και του καυστήρα που επιδρά στην ταχεία ή μη επαφή του καυστήρα με τον αέρα, οπότε το καύσιμο ανάβει πλησιέστερα ή μακρύτερα από το μπέκ.

Δεν υπάρχει συγκεκριμένη απάντηση στην ερώτηση, που πρέπει να τοποθετηθεί το σημείο έναυσης, γιατί εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου καύσιμου και τις λοιπές μεταβλητές.

Γενικά, είναι καλύτερα να βρίσκεται το σημείο έναυσης πλησιέστερα στο ακροφύσιο. Στην περίπτωση όμως αυτή μπορεί να υπάρξουν υπερθερμάνσεις του ψυγείου και του άκρου του καυστήρα. Πρέπει λοιπόν το σημείο έναυσης να βρίσκεται κοντά στο ακροφύσιο χωρίς όμως να έχουμε τους προαναφερθέντες κινδύνους.

Το πλούμιο (Plume) (Σχήμα 2-5) με καύσιμο άνθρακα φαίνεται σαν μαύρο σύννεφο. Κοντότερο πλούμιο έχουμε όταν ο άνθρακας είναι λεπτότερα αλεσμένος. Η εσωτερική θερμοκρασία του κλιβάνου, η θερμοκρασία του πρωτογενούς και δευτερογενούς αέρα είναι τρεις παράγοντες που επιδρούν στο μήκος του πλούμιου.

Σημεία άξια προσοχής για λόγους ασφάλειας είναι τα παρακάτω :

- Όταν θερμαίνεται ο πρωτογενής αέρας πρέπει να διατηρείται κάτω από τους 425°C για λόγους ασφαλείας, ιδιαίτερα όταν το καύσιμο είναι άνθρακας όπου υπάρχει κίνδυνος έκρηξης μέσα στον καυστήρα
- Πλέον επικίνδυνες συνθήκες επικρατούν όταν σβήνει η φλόγα για μικρό διάστημα και πρόκειται να ανάψει με τη θερμοκρασία της ζώνης έψησης ανεβασμένη. Για το λόγο αυτό πρέπει οι αγωγοί που τροφοδοτούν τον καυστήρα να μην περιέχουν άνθρακα και κατά το ξεκίνημα να υπάρχει περίσσεια αέρα.
- Πρόσκρουση της φλόγας στο κλίνκερ ή στην επένδυση του ΠΚ (Σχήμα 2-6δ,ε,στ) πρέπει να αποφεύγεται για λόγους ασφαλείας, αλλά και γιατί αυτό έχει κακή επίδραση στην καύση και στη σταθερότητα λειτουργίας του ΠΚ.

Σχήμα φλόγας

Είναι επιθυμητό να λειτουργεί ο ΠΚ με συνολικό μήκος φλόγας όσο το δυνατόν μικρότερο, διότι μικρό μήκος φλόγας επεκτείνει το μήκος της ζώνης ασβεστοποίησης με αποτέλεσμα αυξημένη παραγωγική ικανότητα.

- Στο Σχήμα 2-6α η θερμότητά της φλόγας απελευθερώνεται μακριά από τη ζώνη έψησης. Οι φλόγες αυτές συνήθως έχουν ασταθή διαμόρφωση μέσα στον ΠΚ και επηρεάζεται πολύ από τις μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία των αερίων.
- Στο Σχήμα 2-6γ η θερμότητά της φλόγας απελευθερώνεται κοντά στη ζώνη έψησης. Αυτή είναι η πλέον ευνοϊκή φλόγα για εύκολο έλεγχο του ΠΚ, της ποιότητας του κλίνκερ και της ικανότητας του καυσίμου για καύση. Η καύση γίνεται ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις και έχει το σωστό μέγεθος ως προς το μήκος της.

Η σταθερότητα της φλόγας πρέπει πάντα να επιδιώκεται διότι έτσι έχουμε κέρδος στη ζωή της επένδυσης του ΠΚ και στον εύκολο έλεγχο της λειτουργίας της.

Κατεύθυνση της φλόγας

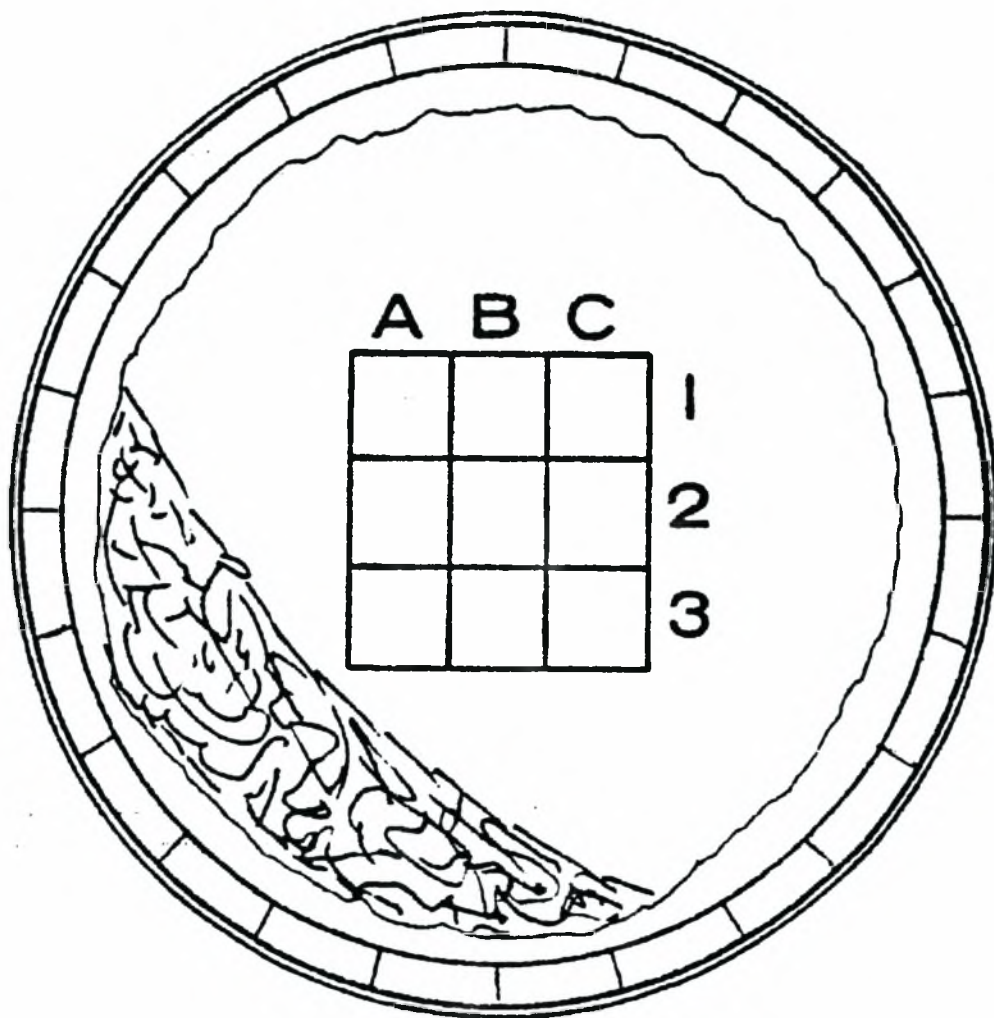
Σε μερικούς ΠΚ ο καυστήρας στερεώνεται στο κέντρο του ΠΚ, ενώ σε άλλους υπάρχει δυνατότητα ρυθμίσεως έτσι ώστε να μπορεί να αλλάζει διεύθυνση και σχήμα η φλόγα. Κάθε αλλαγή στον καυστήρα επιδρά στα χαρακτηριστικά της φλόγας άρα και στην έψηση.

- Στο Σχήμα 2-6ε ο καυστήρας είναι τοποθετημένος στον άξονα του ΠΚ.
- Στο Σχήμα 2-6στ ο καυστήρα έχει μια κλίση προς τα κάτω ως προς τον άξονα του ΠΚ.

Επειδή ένα πλήθος παραγόντων επιδρά στην κατεύθυνση της φλόγας είναι αναγκαίο να σταθεροποιείται η θέση του καυστήρα ανάλογα με τις λειτουργικές ανάγκες του κάθε ΠΚ, αλλά και να δίνεται προσοχή στη θέση 'X' Σχήμα 2-6.

Στο Σχήμα 2-7 φαίνεται η κατακόρυφη τομή του ΠΚ στην θέση 'X'. Ο άξονας της φλόγας είναι ρυθμισμένος στις διάφορες θέσεις των τετραγώνων.

Οι θέσεις 2A ή 2B είναι οι πλέον ευνοϊκές για την κατεύθυνση της φλόγας. Η 3A προκαλεί ανεπιθύμητη εισροή άκαυστου καυσίμου στο κλίνκερ. Οι θέσεις 1C, 2C, 1B είναι ανεπιθύμητες λόγω πρόσκρουσης της φλόγας πάνω στη τζίρα (μείωση της ζωής των πυρότουβλων).



Σχήμα 2-7 : Τομή που δείχνει κατάλληλες και ακατάλληλες περιοχές γύρω από τις οποίες κατευθύνεται η φλόγα

Αν και δεν υπάρχει κατεύθυνση της φλόγας που να είναι η κατάλληλη για όλους τους ΠΚ, εν τούτοις η κατεύθυνση της φλόγας εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες:

- Στρεβλώσεις στον σωλήνα του καυστήρα
- Η φλόγα δεν πρέπει να προσκρούει για μεγάλο χρόνο στη τζίρα ή στην επένδυση
- Η φλόγα δεν πρέπει ποτέ να βρίσκεται πολύ κοντά στο κλίνκερ
- Η κατεύθυνση της φλόγας πρέπει να ρυθμίζεται μόνο όταν ο ΠΚ λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες
- Είναι καλύτερο να γίνονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις σταδιακά ούτως ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργική σταθερότητα του ΠΚ.

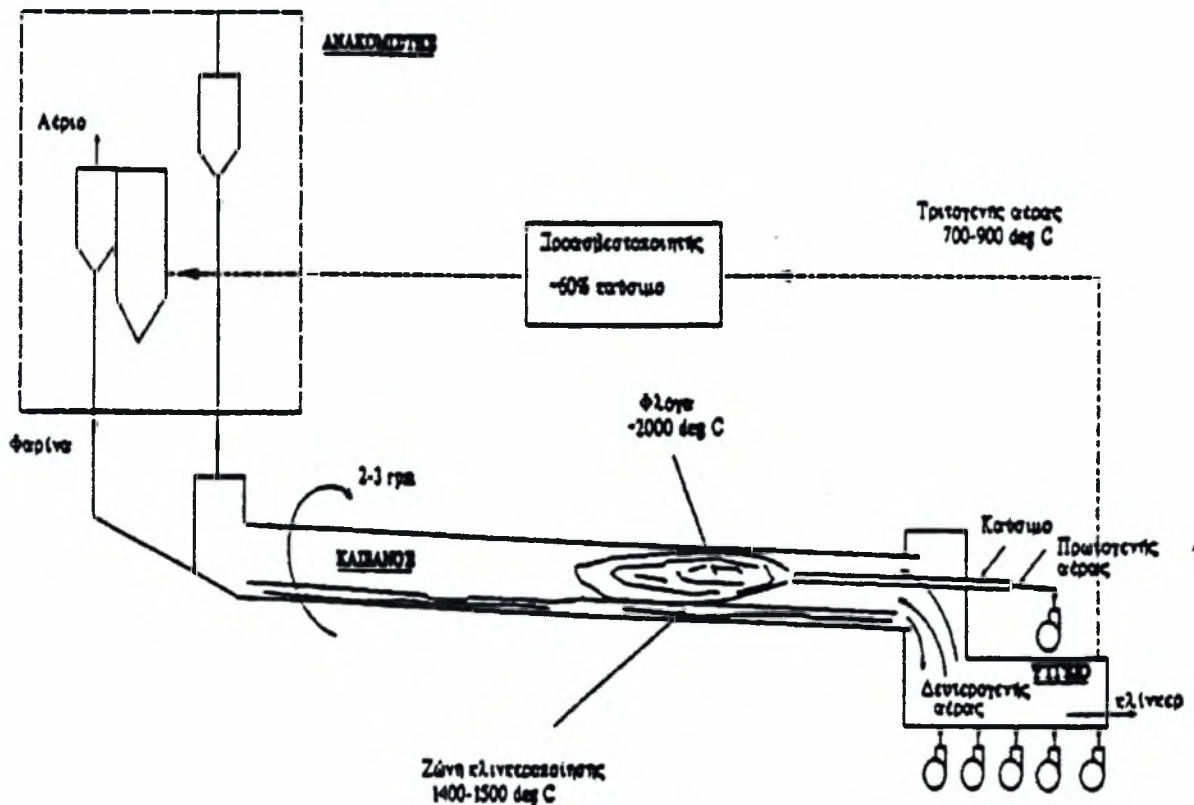
2.5 Περιστροφικός Κλίβανος Τσιμέντου

Ο περιστροφικός κλίβανος τσιμέντου είναι ένας χαλύβδινος σωλήνας με εσωτερική επένδυση από πυρότουβλα, ο οποίος περιστρέφεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικά κινούμενων ζευγών κυλίνδρων. Το μήκος του κυμαίνεται μεταξύ 50 και 150 μέτρων και η διάμετρός του μεταξύ 3 και 6 μέτρων, ανάλογα με την ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος (κλίνκερ). Είναι οριζόντιος με μικρή κλίση (3° - 5°), η οποία και επηρεάζει την ανάμιξη των υλικών και την εναλλαγή θερμότητας.

Η τροφοδοσία (ασβεστοποιημένη φαρίνα) γίνεται από την κορυφή, κατά αντιρροή του περιστροφικού κλιβάνου, Σχήμα 2-8. Το υλικό ρέει αργά προς την περιοχή της φλόγας, στο κάτω άκρο του κλιβάνου, ενώ παράλληλα θερμαίνεται στη αναγκαία θερμοκρασία ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις κλινκεροποίησης.

Το κάρβουνο εισάγεται στον κλίβανο μέσω ενός αξονικά τοποθετημένου καυστήρα, με την βοήθεια αέρα μεταφοράς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μέσω ξεχωριστών καναλιών του καυστήρα, διαβιβάζεται ταυτόχρονα επιπλέον ποσότητα αέρα για την επίτευξη καλύτερων συνθηκών καύσης και ανάμιξης. Η συνολική ποσότητα του αέρα που διέρχεται από τον καυστήρα ονομάζεται πρωτογενής αέρας.

Τελικά, το κλίνκερ οδηγείται προς ένα 'ψυγείο', όπου μέρος της επαγόμενης θερμότητας χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα καύσης.



Σχήμα 2-8: Περιστροφικός κλίβανος τσιμέντου

2.5.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι κάθετοι κλίβανοι και οι απλοί τύποι των αξονικών κλιβάνων, χρησιμοποιούνταν για το ψήσιμο της ασβεστόπετρας πριν 2000 χρόνια. Η ιστορία αναφέρει ότι οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν ένα κάθετο φούρνο στον οποίο έψηναν μια πουζολανική πέτρα. Κοντά στο Riverside στη Καλιφόρνια υπάρχουν τα ερείπια των υπόγειων φούρνων στους οποίους οι πρώτοι Ισπανοί μετανάστες έψηναν ασβεστόπετρα για να κάνουν άβεστο κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους του 19^{ου} αιώνα. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν ο καλούμενος 'μποτίλια' και ο 'αξονικός' φούρνος. Κάθετοι φούρνοι κατασκευάστηκαν στη νότια Καλιφόρνια με την αρχή του 20^{ου} αιώνα.

Η ανάπτυξη του περιστροφικού κλιβάνου άρχισε περί το 1877 στην Αγγλία και ο Φρειδερίκος Ransome χρεώνεται με τον πρώτο επιτυχή ΠΚ τον οποίο εισήγαγε στην Αγγλία το 1885. Αν και οι πρώτοι κλίβανοι RANSOME ήταν μια μεγάλη ώθηση για την

τσιμεντοβιομηχανία, πέρασαν πολλά χρόνια πριν ο ΠΚ χρησιμοποιηθεί ευρέως στην παραγωγή.

Ο πρώτος οικονομικός ΠΚ στην Αμερική, αναπτύχθηκε από τους HURRY και SEAMAN της εταιρίας τσιμέντου "ΑΤΛΑΣ" που μπήκε στην παραγωγή το 1895. Οι αξονικοί κλίβανοι με συνεχή τροφοδότηση χρησιμοποιούνται ακόμη στην Ευρώπη, ενώ οι ΠΚ είναι επικρατέστεροι στην Αμερικανική ήπειρο. Οι ΠΚ προτιμούνται γιατί απαιτούν χαμηλότερη ισχύ για να λειτουργήσουν, έχουν υψηλότερη παραγωγή κλίνκερ, ενώ παράλληλα παράγουν ομοιόμορφο υλικό. Σε αντιπαραβολή αυτών των πλεονεκτημάτων των ΠΚ, οι αξονικοί κλίβανοι έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε θερμική και μηχανική ενέργεια ανά τόνο παραγόμενου κλίνκερ.

2.5.2 Τύποι των Περιτροφικών Κλιβάνων

Οι κύριες μέθοδοι παραγωγής κλίνκερ σε ΠΚ είναι η υγρή , η ημίξηρη και η ξηρή μέθοδος.

- Υγρή μέθοδος

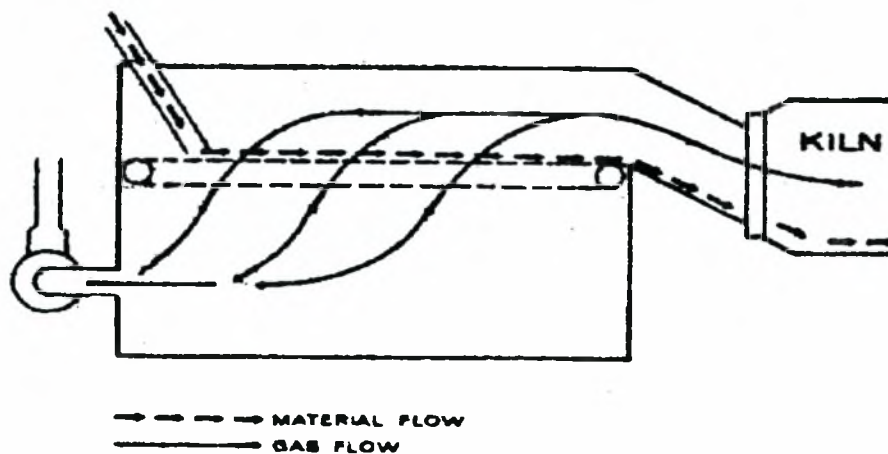
Σε αυτή τη μέθοδο το τροφοδοτούμενο υλικό εισέρχεται στον κλίβανο υπό την μορφή μιας ένωσης με περιεχόμενη υγρασία 30 - 40 %. Σε σύγκριση με την ξηρή μέθοδο, για την ίδια διάμετρο, η υγρή μέθοδος χρειάζεται μια πρόσθετη ζώνη (ζώνη υδρολύσεως) για να οδηγήσει το νερό εκτός της καμίνου από την τροφοδότηση και για αυτό το λόγο το σύστημα πρέπει να είναι μακρύτερο για την ίδια ποσότητα κλίνκερ. Ο κλίβανος υγρής μεθόδου απαιτεί θεωρητικά περισσότερο καύσιμο από ότι η ξηρή μέθοδος, διότι απαιτείται επί πλέον θερμότητα για την εξάτμιση του νερού.

Τα πλεονεκτήματα της υγρής μεθόδου είναι :

- η τροφοδότηση υπό μορφή μίγματος είναι περισσότερο ομοιόμορφη απ' ότι στην ξηρή μέθοδο.
- η απώλεια πρώτων υλών είναι συνήθως μικρότερη
- σε χώρες με υγρό κλίμα, η υγρή μέθοδος είναι περισσότερο κατάλληλη από ότι η ξηρή , διότι η υγρασία υπάρχει στο μίγμα των πρώτων υλών

- Ημίξηρη μέθοδος

Αυτή η μέθοδος είναι ευρέως γνωστή με την ονομασία κλίβανος μεθόδου εσχάρας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κλίβανοι POLYSIUS και LEPOR. Είναι η πλέον οικονομική όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα κλίνκερ. Στη μέθοδο της εσχάρας, η κονιοποιημένη ξηρή πρώτη ύλη πρώτα σφαιροποιείται σε μικρά κουφέτα με προσθήκη νερού σε αναλογία 10 έως 15 % , κατόπιν τα κουφέτα τροφοδοτούνται πάνω σε μια κινούμενη εσχάρα όπου ασβεστοποιούνται μερικώς πριν εισέλθουν στον ΠΚ. Η θέρμανση των κουφέτων επιτελείται με τα αέρια εξόδου από τον ΠΚ, τα οποία διέρχονται διαμέσου του στρώματος του υλικού από πάνω προς τα κάτω, ελκυόμενα από τον ανεμιστήρα εσχάρας. Το ασβεστοποιημένο υλικό πέφτει μέσω μιας κεκλιμένης σκάφης στον ΠΚ όπου τελικά λαμβάνει χώρα η κλινκεροποίηση. Επειδή η τροφοδότηση έχει ασβεστοποιηθεί μερικώς, πριν εισέλθει στον κλίβανο, ο ΠΚ είναι μόνο το 1/3 του συνολικού μήκους της διάταξης. Το Σχήμα 2-9 είναι ένα σχηματικό διάγραμμα της ροής των αερίων και του υλικού δια μέσου μιας εσχάρας LEPOL. Ένα πλεονέκτημα του κλιβάνου μέσω εσχάρας είναι το ομοιόμορφο μέγεθος του κλίνκερ που παράγει. Οπωσδήποτε χρειάζεται μεγάλη προσοχή στην παραγωγή 'κουφέτου' και στον έλεγχο πάχους στρώματος τροφοδοσίας πάνω στην εσχάρα.



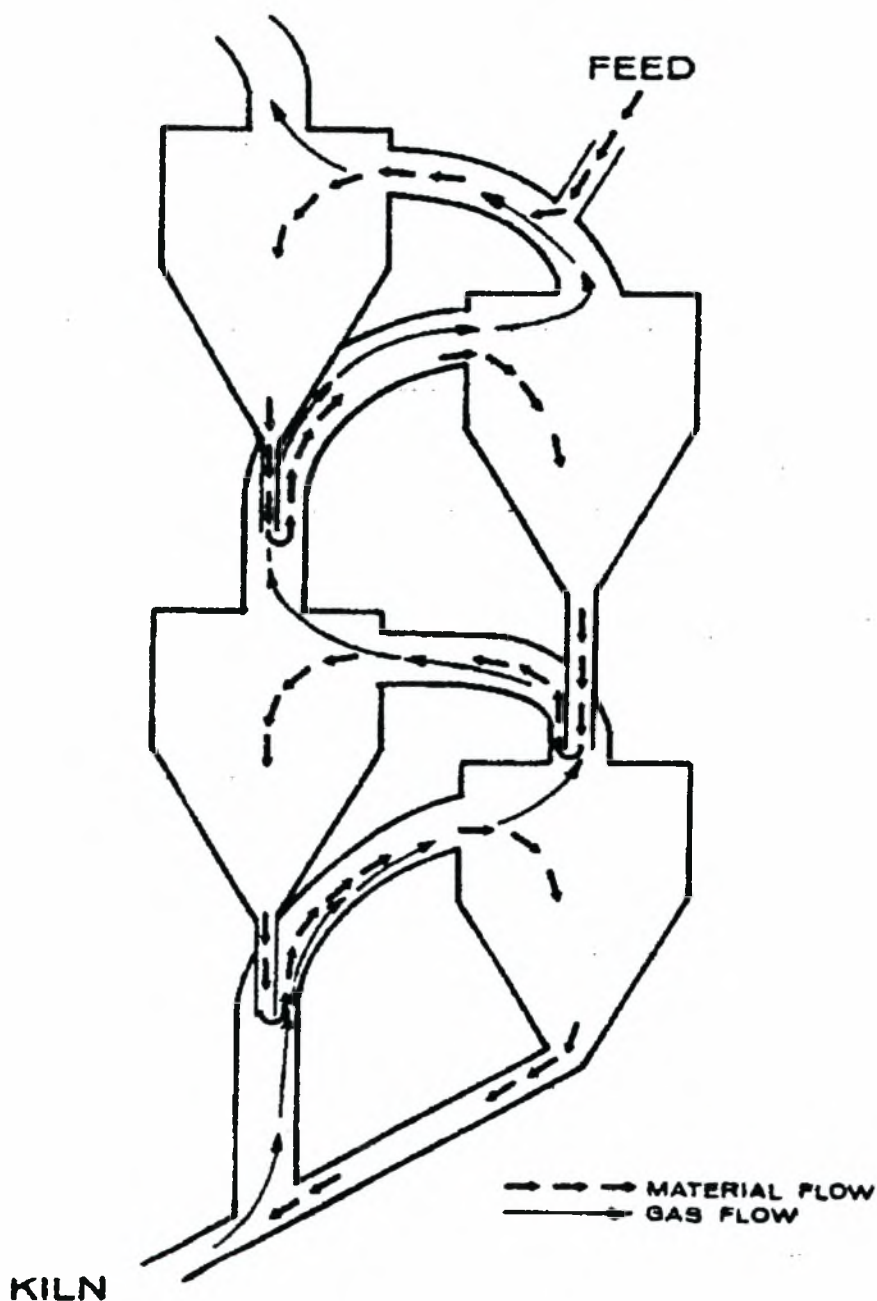
Σχήμα 2-9 : Διάγραμμα ροής εσχάρας Lepol

- Ξηρή Μέθοδος

Όπως συμπεραίνει κανείς από την ονομασία της μεθόδου, η ασβεστοποιημένη φαρίνα εισέρχεται στον κλίβανο σε μορφή ξηρής κόνεως. Σήμερα χρησιμοποιείται ένα πλήθος κλιβάνων ξηρής μεθόδου. Οι περισσότερες από αυτές διαφοροποιούνται στον τρόπο ανάκτησης μέρους της θερμότητας των αερίων, στην έξοδο της καμίνου. Γενικώς οι κλίβανοι ξηρής μεθόδου κατατάσσονται στις παρακάτω ομάδες :

- Κλίβανος προθέρμανσης αερίου με αιώρηση (SP)
- Κλίβανος με εσωτερική ανταλλαγή θερμότητας
- Κλίβανος με μονάδες ανακτήσεως θερμότητας για παραγωγή ισχύος

Στον κλίβανο προθέρμανσης με αιώρηση του υλικού, το αρχικό μίγμα προθερμαίνεται και μερικώς ασβεστοποιείται σε μια συστοιχία κυκλώνων εναλλαγής θερμότητας πριν εισέλθει στον ΠΚ. Ένας ευρέως διαδεδομένος ΠΚ του τύπου αυτού είναι του HUMBOLDT, Σχήμα 2-10.



Σχήμα 2-10 : Διάγραμμα ροής ανακομιστή θερμότητας Humbolt

Ένα άλλο σύστημα ανάκτησης μέρους της θερμότητας των αερίων στην έξοδο, είναι η χρησιμοποίηση καδενών, σχεδόν ίδιες με τις καδένες που χρησιμοποιούνται στους κλιβάνους υγρής μεθόδου. Αν και οι κυκλώνες υπερέχουν, οι καδένες είναι αρκετά

αποτελεσματικές και χρησιμοποιούνται από το 1950. Τα αέρια εισάγονται στις καδένες με θερμοκρασία 815 °C και εξέρχονται με θερμοκρασία 450 °C. Κατά αντirroή, το αρχικό μίγμα εισάγεται με μια θερμοκρασία 50 °C, και εξέρχεται από το τμήμα των καδενών σε θερμοκρασία 730 °C.

Τελευταία ομάδα είναι τα συστήματα ξηρής μεθόδου στην οποία οι υψηλές θερμοκρασίες των αερίων στην έξοδο χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού. Επειδή το κόστος λειτουργίας αυτών των συστημάτων είναι μεγάλο, έχουν αντικατασταθεί με οικονομικότερους κλιβάνους ανταλλαγής θερμότητας ή κλιβάνους εσωτερικής ανταλλαγής.

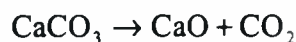
Στο σύντομο χρόνο λειτουργίας τους, οι ΠΚ έχουν υποστεί απεριόριστες αλλαγές. Στον τομέα του καυσίμου έγιναν μεγάλες βελτιώσεις όταν διατέθηκαν νέα βελτιωμένα καύσιμα. Τα σχέδια των καυστήρων έχουν μεταβληθεί αξιοσημείωτα και τα μέσα ελέγχου του ΠΚ έχουν ακολουθήσει την εξέλιξη της τεχνολογίας. Τα τελευταία χρόνια η χρήση και ο έλεγχος του ΠΚ είναι πλήρως αυτοματοποιημένος.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν τομείς στο σύστημα της καμίνου που απαιτούν περαιτέρω βελτίωση, με κυριότερη την ελάττωση της χαμένης θερμότητας, καθώς οι απώλειες θερμότητας αγγίζουν ποσοστό 50%.

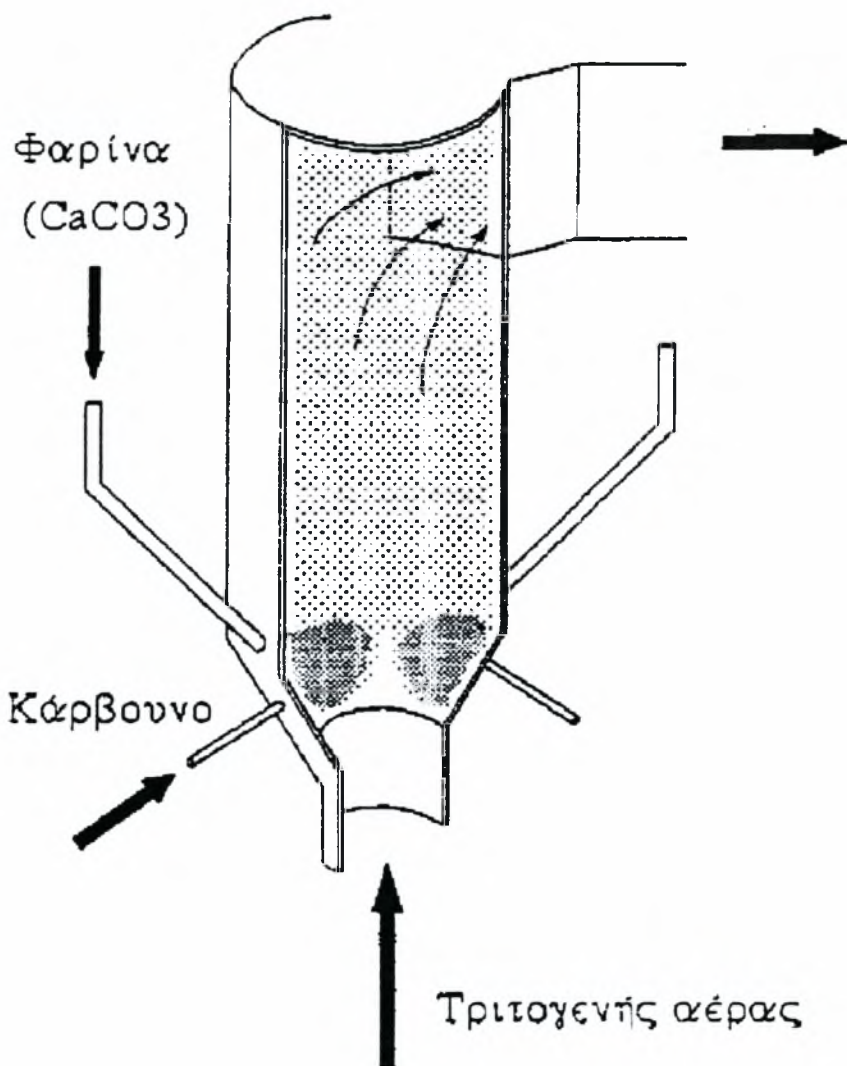
2.5.3 Προασβεστοποιητής

Η εισαγωγή του προασβεστοποιητή στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου είναι μια πρόσφατη καινοτομία και αποτελεί εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας με ανακομιστές, δηλαδή προθέρμανση των πρώτων υλών σε κατακόρυφη σειρά κυκλώνων, Σχήμα 2-12.

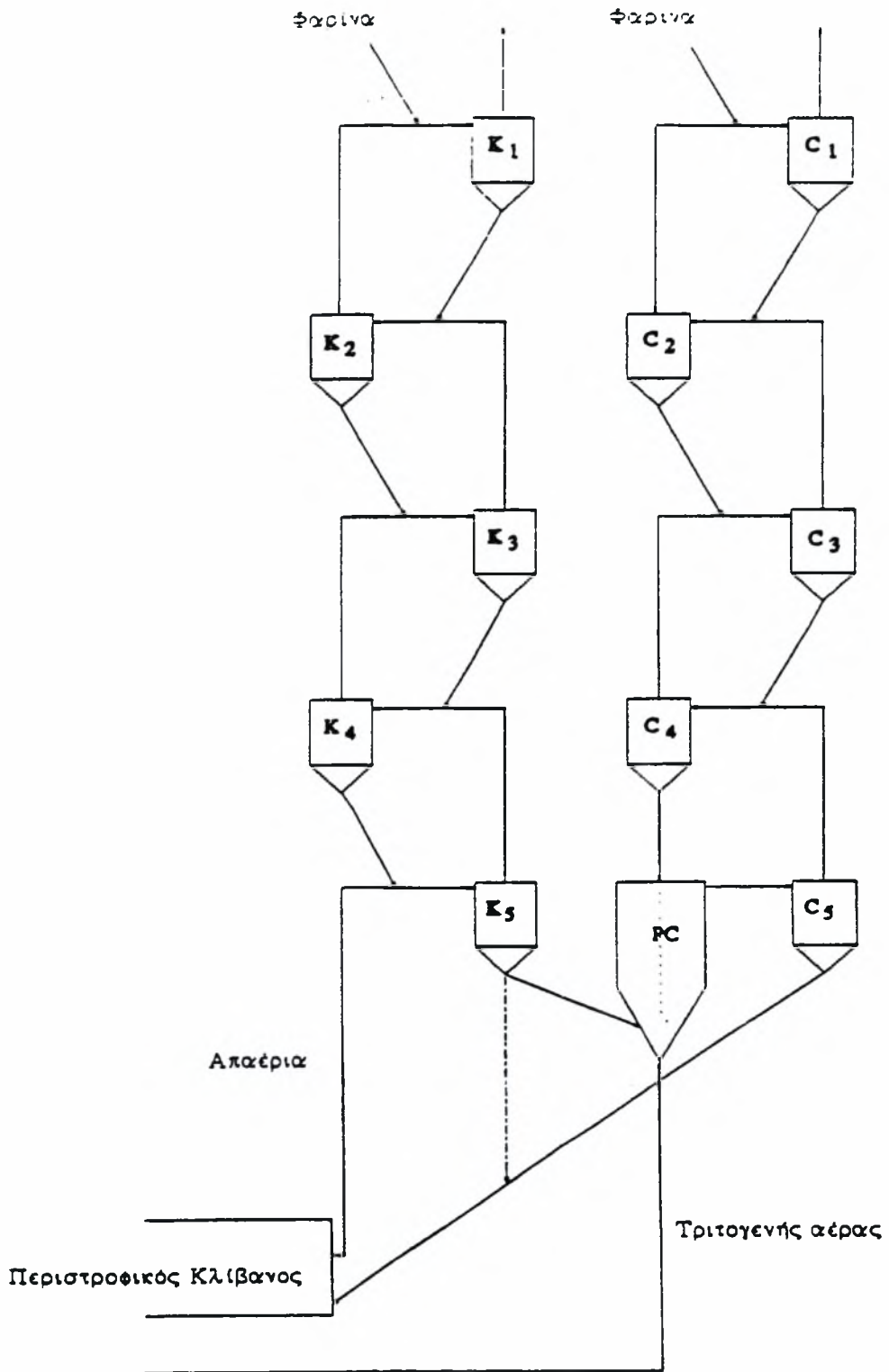
Ο προασβεστοποιητής είναι ένας κατακόρυφος κυλινδρικός θάλαμος, στον οποίο εισάγονται η προθερμασμένη πρώτη ύλη (φαρίνα), το καύσιμο (κονιοποιημένο κάρβουνο) και θερμός αέρας, σε πίεση περίπου ίση με την ατμοσφαιρική. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση του κονιοποιημένου κάρβουνου προκαλεί ασβεστοποίηση της φαρίνας, δηλαδή μετατροπή του CaCO_3 σε CaO σύμφωνα με την αντίδραση.



Η σχηματική αναπαράσταση του προασβεστοποιητή δίνεται στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11 : Σχηματική αναπαράσταση προασβεστοποιητή



Σχήμα 2-12 : Παραγωγή κλίνκερ με δύο σειρές προθερμαντών

Λόγω του λεπτού διαμερισμού των υλικών και της καλής ανάμιξής τους από το ρεύμα του αέρα, επιτυγχάνεται ομοιόμορφη και γρήγορη αντίδραση, τόσο κατά την καύση όσο και κατά την ασβεστοποίηση, με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ μικρούς χρόνους παραμονής στον θάλαμο. Μετά το τέλος της διεργασίας αυτής, η ασβεστοποιημένη πλέον φαρίνα οδηγείται με τη βοήθεια του ρεύματος των αερίων, στον τελευταίο κυκλώνα που τροφοδοτεί τον ΠΚ.

Ο προασβεστοποιητής καταναλώνει περίπου το 60% της συνολικής ποσότητας καυσίμου, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις του καυστήρα του ΠΚ στο 40% σε σύγκριση με το απλό σύστημα με ανακομιστές. Το γεγονός ότι η ασβεστοποίηση γίνεται πλέον έξω από τον ΠΚ προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

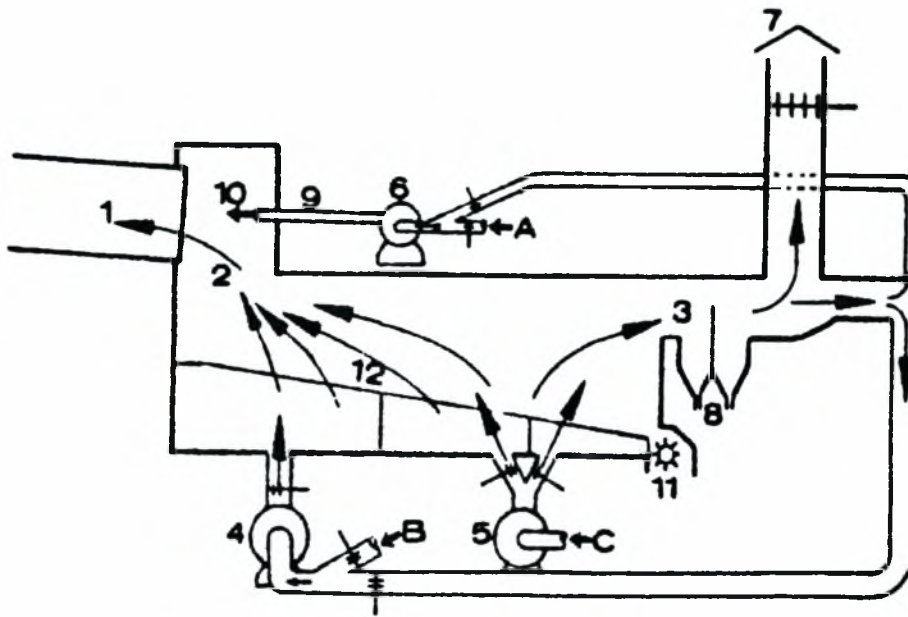
- Διπλασιάζεται η μέγιστη δυναμικότητα του περιστροφικού κλιβάνου
- Η κατανάλωση πυρότουβλων ανά τόνο κλίνκερ μειώνεται κατά τέσσερις φορές
- Λόγω της αύξησης του χρόνου ζωής των πυρότουβλων, αυξάνεται η διαθεσιμότητα του ΠΚ μέχρι και 90%.
- Η καύση του 60 % του συνολικού καυσίμου σε θερμοκρασίες κάτω των 1100 °C μειώνει την ποσότητα των NO_x κατά 50%.
- Οι χαμηλές απαιτήσεις θερμοκρασίας στον προασβεστοποιητή επιτρέπουν τη χρήση καυσίμων χαμηλού θερμικού περιεχομένου.
- Ελαττώνονται οι ποσότητες των πτητικών θεικών και αλκαλικών ενώσεων με αποτέλεσμα η εναπόθεσή τους στους αγωγούς να μειώνεται κατά 50%.
- Η ασβεστοποίηση ελέγχεται ευκολότερα απ' ό τι προηγουμένως και έτσι εξασφαλίζεται μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητας στο σύστημα έψησης.

2.5.4 Ψυγείο

Το κλίνκερ οδηγείται μετά τον ΠΚ προς ένα εναλλάκτη θερμότητας, όπου μέρος της επαγόμενης θερμότητας χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα καύσης (δευτερογενής αέρας).

Το ψυγείο (Σχήμα 2-13) στην διάταξη του ΠΚ εξυπηρετεί δύο σκοπούς :

- Ψύχει το κλίνκερ
- Τροφοδοτεί τον ΠΚ με τον απαραίτητο αέρα καύσης.



Σχήμα 2-13 : Κατά μήκος τομή ενός ψυγείου με κινητή εσχάρα

Ο φυσητήρας ψυχρής ζώνης στέλνει κρύο αέρα στο κλίνκερ με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να ανέλθει στους $\sim 250^{\circ}\text{C}$. Ένα μέρος από αυτόν τον αέρα ενώνεται με τον δευτερογενή και ένα μέρος οδεύει στον αποκονιωτή του ψυγείου όπου μετά την κατακράτηση της σκόνης ένα μέρος χρησιμοποιείται σαν πρωτογενής αέρας, ένα μέρος εισέρχεται στο φυσητήρα θερμής ζώνης και ο πλεονάζων φεύγει στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο ποσό αέρα εισάγεται με τον φυσητήρα δευτερογενούς ο οποίος διερχόμενος μέσα από το κλίνκερ θερμαίνεται στους $\sim 925^{\circ}\text{C}$ και εισέρχεται στον ΠΚ σαν δευτερογενής αέρας.

Κάθε ένα σύστημα ψύξης πρέπει να έχει μια ισορροπία ώστε να επιτυγχάνεται άριστη ψύξη του κλίνκερ και άριστη καύση στον ΠΚ. Πολύς ή λίγος αέρας επιδρά δυσμενώς στο σύστημα. Ικανοποιητική λειτουργία του ψυγείου είναι εκείνη κατά την οποία ελάχιστη ποσότητα αέρα με τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία εξέρχεται στην ατμόσφαιρα, ενώ στον ίδιο χρόνο το κλίνκερ ψύχεται στην επιθυμητή θερμοκρασία. Τα 'Dampers' των φυσητήρων πρέπει να ρυθμίζονται έτσι ώστε να μην υπερθερμαίνονται τα εξαρτήματα του ψυγείου και ο δευτερογενής αέρας να αναμιγνύεται στην σωστή αναλογία με τον πρωτογενή.

Παράλληλα, η θερμοκρασία του δευτερογενή αέρα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ψηλότερη έτσι ώστε να μην υπερθερμαίνεται το ψυγείο.

Η ψύξη του κλίνκερ, εξαιρέσει ελαχίστων περιπτώσεων, συντελείται σε ψυγεία τύπου κινούμενων εσχάρων. Προτιμάται αυτός ο τύπος ψυγείου λόγω της ικανότητας του να απάγει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας του κλίνκερ και ταυτόχρονα να προμηθεύει τον ΠΚ με τον απαιτούμενο αέρα καύσης.

Για τη σωστή λειτουργία του ψυγείου πρέπει :

- Η θερμοκρασία του εξερχόμενου από το ψυγείο κλίνκερ να είναι όσο το δυνατόν χαμηλή, ώστε να έχουμε μικρή απώλεια θερμότητας και να διακινείται το κλίνκερ χωρίς φόβο καταστροφής των εξαρτημάτων.
- Η θερμοκρασία του δευτερογενούς αέρα να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή και υψηλή διότι αυτή προσδίδει στον ΠΚ σταθερότητα και οικονομία καυσίμου.
- Τα εξερχόμενα αέρια να έχουν όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία και όγκο ώστε το ποσοστό απωλειών θερμότητας στην ατμόσφαιρα να είναι το μικρότερο δυνατόν.
- Το ύψος του κλίνκερ στο ψυγείο να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η ελεύθερη δίοδος του αέρα.

2.6 Μετάδοση Θερμότητας

Η θερμότητα στον περιστροφικό κλίβανο μπορεί να μεταδίδεται με ακτινοβολία, με αγωγή και με συναγωγή. Στη ζώνη κλινκεροποίησης, η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως με ακτινοβολία από τη φλόγα. Παράλληλα, η θερμότητα μεταδίδεται με συναγωγή από τον αέρα και με αγωγή από τα τοιχώματα του ΠΚ και την τζίρα. Στη ζώνη ασβεστοποίησης, η θερμότητα μεταδίδεται με συναγωγή από τα θερμά αέρια και με αγωγή από τα τοιχώματα και την τζίρα.

Η ακτινοβολία από τα θερμά αέρια στο υλικό λαμβάνει χώρα στην επιφάνειά του. Έτσι, η θερμοκρασία του υλικού είναι μεγαλύτερη στην επιφάνειά του και μειώνεται προς το βάθος. Στη ζώνη έψησης επικρατούν δραστικότερες συνθήκες καθώς το κλίνκερ (που βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση) έρχεται σε επαφή με την ανώμαλη επιφάνεια της τζίρας σε αυτήν την περιοχή, παρασέρνεται, ανυψώνεται και στη συνέχεια πέφτει. Λόγω αυτής της αναδίπλωσης, τα θερμότερα μέρη του υλικού προσδίδουν θερμότητα με αγωγή στα ψυχρότερα, σε μια διαδικασία συνεχώς επαναλαμβανόμενη. Αυτό βέβαια συμβαίνει μόνο

στη ζώνη έψησης γιατί στη ζώνη ασβεστοποίησης, όπου η επένδυση είναι πιο λεία (ελάχιστη τζίρα) και το υλικό είναι ακόμη σε στερεή κατάσταση, υπάρχει ελάχιστη αναδίπλωση του υλικού. Παράλληλα, το υλικό ιδίως στη ζώνη έψησης παίρνει θερμότητα και από την τζίρα καθώς ακτινοβολείται και σε αυτήν θερμότητα από τη φλόγα.

2.6.1 Απώλειες θερμότητας

Ο ΠΚ είναι ένας μη αποδοτικός εναλλάκτης θερμότητας καθώς ένα μεγάλο ποσό θερμότητας που εισέρχεται χάνεται. Στον παρακάτω Πίνακα 2-3 φαίνεται ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό της συνολικής εισερχόμενης θερμότητας στον ΠΚ χρησιμοποιείται για την έψηση του κλίνκερ.

Πίνακας 2-3 : Απώλειες Θερμότητας

Είδος	Θερμότητα %
Εξάτμιση νερού	9
Απώλειες από ακτινοβολία	25
Απώλειες από την εκφόρτωση του κλίνκερ στο ψυγείο	3
Απώλειες από την ασβεστοποίηση και την υπερθέρμανση	3
Απώλεια εξερχόμενου αερίου	25
Θεωρητική θερμότητα κλινκεροποίησης	35
Σύνολο	100

Έχουν εφαρμοστεί ποικίλες μέθοδοι για την μείωση των απωλειών θερμότητας στους ΠΚ Κάποιες από αυτές είναι οι ανακομιστές θερμότητας καθώς και οι ΠΚ τύπου LEPOL. Σε αυτές τις μεθόδους τα θερμά αέρια χρησιμοποιούνται για προθέρμανση και μερική ασβεστοποίηση του υλικού πριν αυτό εισέλθει στον ΠΚ. Επίσης χρησιμοποιούνται αλυσίδες για καλύτερη εναλλαγή θερμότητας στον ΠΚ, παραγωγή ατμού για γεννήτριες ηλεκτρισμού, ξήρανση σχιστού είναι μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της ενέργειας που αλλιώς θα χάνονταν.

Η θερμότητα του ψυγείου μπορεί να ανακτηθεί για την θέρμανση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς αέρα. Παράλληλα η χρήση μονωτικών πυρότουβλων στα τοιχώματα του ΠΚ μπορεί να μειώσει τις απώλειες θερμότητας από την ακτινοβολία στο έλασμα του ΠΚ.

Αν εξαιρεθεί το πρόβλημα του σχεδιαστικού μέρους που επηρεάζει τις απώλειες θερμότητας, για τη μείωση των απωλειών θερμότητας πρέπει να ισχύουν τα εξής :

- Λειτουργία με θερμοκρασία δευτερογενούς όσο το δυνατόν υψηλότερη
- Διατήρηση της θερμοκρασίας των εξερχόμενων αερίων από το ψυγείο όσο το δυνατόν χαμηλότερη
- Προσπάθεια για διατήρηση σταθερών καταστάσεων λειτουργίας στον ΠΚ
- Λειτουργία του ΠΚ στη μέγιστη παραγωγή
- Προσπάθεια για διατήρηση κοντής φλόγας διότι δίνει καλύτερη εναλλαγή θερμότητας και καλύτερη ζώνη έψησης
- Ύπαρξη καλής καύσης (έλλειψη CO)

2.7 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ατμοσφαιρική ρύπανση ονομάζουμε τις αλλαγές στην σύνθεση της ατμόσφαιρας οι οποίες είναι ικανές να επιφέρουν βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα αλλαγές στην οικολογική ισορροπία των διαφόρων μορφών ζωής στη γη και επίσης να επηρεάσουν σημαντικά τις κλιματολογικές συνθήκες στην υδρόσφαιρα.

Γενικά, ότι εκλύεται ως αέριο ή αιωρούμενο σωματίδιο και καταλήγει στον αέρα θεωρείται ατμοσφαιρικός ρύπος. Ένα μέρος αυτών των ρύπων (NO_x, SO_x, CO, δραστικά σωματίδια και διάφορες ανόργανες ενώσεις από τη χρήση καυσίμων) μεταφέρεται από αέρια ρεύματα, ενώνεται με τη βροχή και μέρος αυτών (NO_x, SO_x) σχηματίζει την όξινη βροχή η οποία επηρεάζει τη χημική σύσταση του εδάφους, μειώνει το ΡΗ των λιμνών και καταστρέφει φυτικά οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα να προκαλεί έντονα προβλήματα σε αρκετές περιοχές του πλανήτη. Ένα άλλο μέρος (χλωροφθοράνθρακες από 'σπρέι', ψυγεία, κλιματιστικά και βιομηχανικές εκπομπές) μεταφέρεται στην άνω ατμόσφαιρα και εκεί μέσω πολύπλοκων αλυσιδωτών φυσικοχημικών αντιδράσεων μειώνει το όζον της ατμόσφαιρας. Η μείωση αυτή είναι σημαντικότερη στους πόλους (μέχρι και 10%), λόγω της ευκολότερης επικράτησης των αναγκαίων προς μείωση του όζοντος αλυσιδωτών αντιδράσεων στις Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

παγιδευμένες μάζες των πόλων κατά τους χειμερινούς μήνες. Τέλος, το CO₂ από τη χρήση καυσίμων και το CH₄ από το υπέδαφος και την λήψη οργανικών ουσιών μεταφέρεται στη άνω ατμόσφαιρα και συσσωρεύεται με αποτέλεσμα να συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τις ανθρώπινες δραστηριότητες στον 21^ο αιώνα. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου δημιουργείται όταν λόγω συσσώρευσης ορισμένων αερίων (CO₂, CH₄, NH₃, N₂O) στην άνω ατμόσφαιρα, καταστρέφεται η ισορροπία στο ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ πρωτογενούς προσπίπτουσας από τον ήλιο ενέργειας και της ενέργειας που ακτινοβολεί πίσω στο διάστημα η Γη κατά τις νυχτερινές κυρίως ώρες.

Το μεγαλύτερο μέρος των αερίων ρύπων, είτε μεταποιημένο μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων, είτε αμεταποίητο (οργανικές και ανόργανες ενώσεις, σωματίδια ραδιενεργά στοιχεία κλπ) μεταφέρεται πολύ γρήγορα σε μεγάλες αποστάσεις και μέσω της βροχής μεταφέρεται στην επιφάνεια του πλανήτη.

2.7.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Βιομηχανία

Η βιομηχανία είναι υπεύθυνη για ένα μεγάλο μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του πλανήτη. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των εργοστασίων είναι πολύ μεγάλη, ενώ οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτά στις περισσότερες των περιπτώσεων έχουν ως συνέπεια την μεγάλη εκπομπή ρύπων.

Οι πέντε βασικοί ρύποι που εκπέμπει η βιομηχανία είναι :

- Θειούχες ενώσεις (SO_x, κυρίως SO₂ και H₂S)
- Αζωτούχες ενώσεις (NO_x, N₂O)
- Οξείδια του άνθρακα (CO_x)
- Υδρογονάνθρακες (HC)
- Αιωρούμενα σωματίδια (TSP)

Εκτός από αυτούς από τη βιομηχανία συχνά εκπέμπονται οι παρακάτω ρύποι :

- Μόλυβδος (καύση άνθρακα, χρώματα)
- Φθορίδια (καύση άνθρακα)
- Βανάδιο (καύση άνθρακα, πετρελαίου)

- Μαγγάνιο (καύση άνθρακα , πετρελαίου)
- Αρσενικό
- Νικέλιο (καύση άνθρακα)
- Αμίαντος
- Κάδμιο
- Υδράργυρος (καύση πετρελαίου)
- Βηρύλλιο (καύση πετρελαίου)
- Σελήνιο (καύση άνθρακα , μεταλλουργία)

Στον παρακάτω Πίνακα 2-4 παρουσιάζονται οι ποσότητες των ρύπων (mg ρύπου / Mj εισαγόμενης θερμότητας καυσίμου) που εκπέμπονται κατά την καύση των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

Πίνακας 2-4 : Ποσότητες των ρύπων που εκπέμπονται

Τύπος Καυσίμου	Σωματίδια	NOx	SOx	CO	HC
Κάρβουνο	1092	387	2450	13	2
Μαζούτ	96	170	1400	14	3
Ντίζελ	6	100	220	16	3
Φυσικό αέριο	4	100	0,3	7	1

Κατά καιρούς έχουν γίνει προσπάθειες για την μείωση των εκπομπών αυτών με διάφορα μέσα (καλύτερη καύση, διαφόρων ειδών φίλτρα, σωστή επιλογή τοποθεσίας εργοστασίου κλπ), αλλά παρόλες τις προσπάθειες το πρόβλημα παραμένει, ενώ το κόστος συχνά είναι ο μεγαλύτερος αντίπαλος.

2.7.2 Ανάλυση των Κυριότερων Ρύπων

Θείο - S

Οι κυριότερες μορφές με τις οποίες συναντάται το θείο στην ατμόσφαιρα είναι το SO₂, H₂S και τα θειικά άλατα. Επίσης, λόγω του δισθενούς, τετρασθενούς και εξασθενούς χαρακτήρα του, σχηματίζει πολλές και ποικίλες ενώσεις οι οποίες είναι βέβαια σε πολύ μικρή

αναλογία. Μερικές από αυτές είναι (SO_3 , SO_4 , S_2O_3 , S_2O_7). Στον Πίνακα 2-5 αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του θείου στο περιβάλλον. Είναι φανερό ότι το SO_2 και τα θειικά άλατα, που προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του θείου που μεταφέρεται στην Γη (περίπου 10^8 τόνοι / χρόνο). Οι υπολογισμοί του 1975 καθορίζουν την αναλογία του θείου από ανθρώπινες δραστηριότητες και φυσικών εκπομπών σε περίπου 1:2. Είναι σίγουρο ότι, αν γίνουν σήμερα υπολογισμοί, η αναλογία αυτή θα έχει αυξηθεί κατά πολύ, λόγω της αύξησης των καυσίμων που καίγονται. Από τις κυριότερες μορφές θείου που συναντώνται στην ατμόσφαιρα (SO_2 , H_2S , Θειικά άλατα), τα SO_2 και H_2S είναι σε αέρια μορφή ενώ τα άλατα σε στερεά κατάσταση.

Όπως γίνεται κατανοητό, η ανάμιξη με τον ατμοσφαιρικό αέρα και η μεταφορά των ενώσεων αυτών με την βοήθεια του ανέμου σε διάφορες διευθύνσεις, καθιστά την μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τους αέριους ρύπους δυσκολότερη. Κατά μέσο όρο, η ζωή του ατμοσφαιρικού θείου υπολογίζεται σε περίπου 3~7 μέρες. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης του είναι συνάρτηση του βαθμού οξείδωσης των ενώσεων του καθώς, καθιζάνουν ως H_2SO_4 ή ως Θειικά άλατα.

Πίνακας 2-5 : Χαρακτηριστικά του Θείου στο περιβάλλον

Ένωση στο Περιβάλλον	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
SO_3 , SO_4^{2-} και H_2SO_4	Προέρχονται από μηχανισμούς (χημικούς και βιοχημικούς) οξείδωσης
SO_2 και H_2SO_3	Προέρχονται κυρίως από καύσεις και μετατρέπονται σε SO_3 με οξείδωση (καταλυτική ή με το O_2 της ατμόσφαιρας)
S	Προέρχεται από την οξείδωση των H_2S , $\text{RR}'\text{S}$ (κυρίως από αερόβια βακτήρια)
Μεταλλικά σουλφίδια και πρωτεΐνες	Οξειδώνονται σε SO_4^{2-} υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες $\text{S}_2^{2-} \Rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$
H_2S	Προέρχεται από αποσύνθεση οργανικών υλικών και μετατρέπεται σε S, SO_4^{2-} από αερόβια βακτήρια ή οξειδωτικούς μηχανισμούς στο περιβάλλον
Μεταλλικά σουλφίδια S^{2-}	Οξειδώνονται σε SO_4^{2-} υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες

Σήμερα, το SO₂ μετράται συστηματικά από την πολιτεία η οποία είναι υπεύθυνη για την δημόσια υγεία. Τα φαινόμενα που προκαλούνται από τον μολυσμένο αέρα με SO₂ μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Τα οξέα φαινόμενα που παρατηρούνται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγων ημερών).
- Τα χρόνια τα οποία παρατηρούνται μακροπρόθεσμα.

Η συγκέντρωση του SO₂ μεταβάλλεται χρονικά, καθώς αυτό είναι συνάρτηση παραγόντων όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ύπαρξη σωματιδίων και η θερμοκρασία. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να διαφοροποιηθούν πολλές φορές ακόμα και στο διάστημα μιας ημέρας. Αυτό απαιτεί συνεχείς μετρήσεις της συγκέντρωσης του SO₂ για μεγάλο χρονικό διάστημα ακόμη και ετών. Αυτό το χρονικό διάστημα εξαρτάται από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα στη συνέχεια επιδέχονται στατιστικής επεξεργασίας ούτως ώστε να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα. Έτσι έχουν τοποθετηθεί σταθμοί μέτρησης της συγκέντρωσης του SO₂ σε διάφορες περιοχές. Τέτοιες είναι κυρίως τα αστικοβιομηχανικά κέντρα, όπου οι πηγές εκπομπών είναι μεγαλύτερες αλλά και η ανθρώπινη παρουσία είναι πιο έντονη. Η μεταφορά του ρύπου όμως έχει επιπτώσεις σε πολλά είδη της φύσης, όπως φυτά, ζώα, υλικά, λίμνες και καθιστά την εξέταση τους αναγκαία, καθώς αποτελούν μία έμμεση απειλή για την ανθρώπινη υγεία.

Αζωτο - N₂

Γενικά, το άζωτο σχηματίζει πολλές ενώσεις (αμμωνία, οξείδια του αζώτου) που παράγονται από μικροβιολογικούς μηχανισμούς. Οι ενώσεις αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και διαγράφουν το δικό τους κύκλο μετατροπής. Για παράδειγμα, η αμμωνία (NH₃) επιστρέφει στη Γη (έδαφος ή νερό) είτε λόγω της διαλυτότητας της στο νερό είτε υπό μορφή αλάτων (συνήθως νιτρικά) λόγω της ευκολίας με την οποία σχηματίζει ενώσεις. Στον Πίνακα 2-6 που ακολουθεί, αναφέρονται ενώσεις του αζώτου με έμφαση στα οξείδια του, γιατί συμμετέχουν σε σημαντικούς μηχανισμούς ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες εκλύουν τις λιγότερες ποσότητες NO_x και αζωτούχων ενώσεων στην ατμόσφαιρα αστικοβιομηχανικών κέντρων. Κύριες πηγές των οξειδίων του αζώτου είναι η καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Τα οξείδια του αζώτου θεωρούνται τοξικές ενώσεις, με τοξικότερο το NO₂ από το NO. Οι οργανισμοί (κυρίως ζώα) που εκτίθενται σε μεγάλες συγκεντρώσεις NO, παρουσιάζουν παράλυση και σπασμούς του νευρικού συστήματος. Παρόλα αυτά, θάνατοι

από το NO δεν είναι γνωστοί. Το NO₂ ερεθίζει τα μάτια και τους πνεύμονες, αντιδρά με τους υδρατμούς των βρόγχων των κυψελίδων και προκαλεί ερεθισμούς ακόμη και πνευμονικό οίδημα. Όταν η συγκέντρωση NO₂ υπερβεί τα 150 ppm μπορεί να προκαλέσει θάνατο, ενώ σε συγκέντρωση 240 μg/m³ (0,12 ppm) γίνεται αισθητό από την ανθρώπινη όσφρηση. Γενικά, τα οξείδια του αζώτου έχουν δυσμενείς επιπτώσεις και στα φυτά, επιφέροντας νέκρωση στον περίγυρο των φύλλων και ελαττώνουν την ανάπτυξη των φυτών.

Πίνακας 2-6 : Ενώσεις του αζώτου στην ατμόσφαιρα

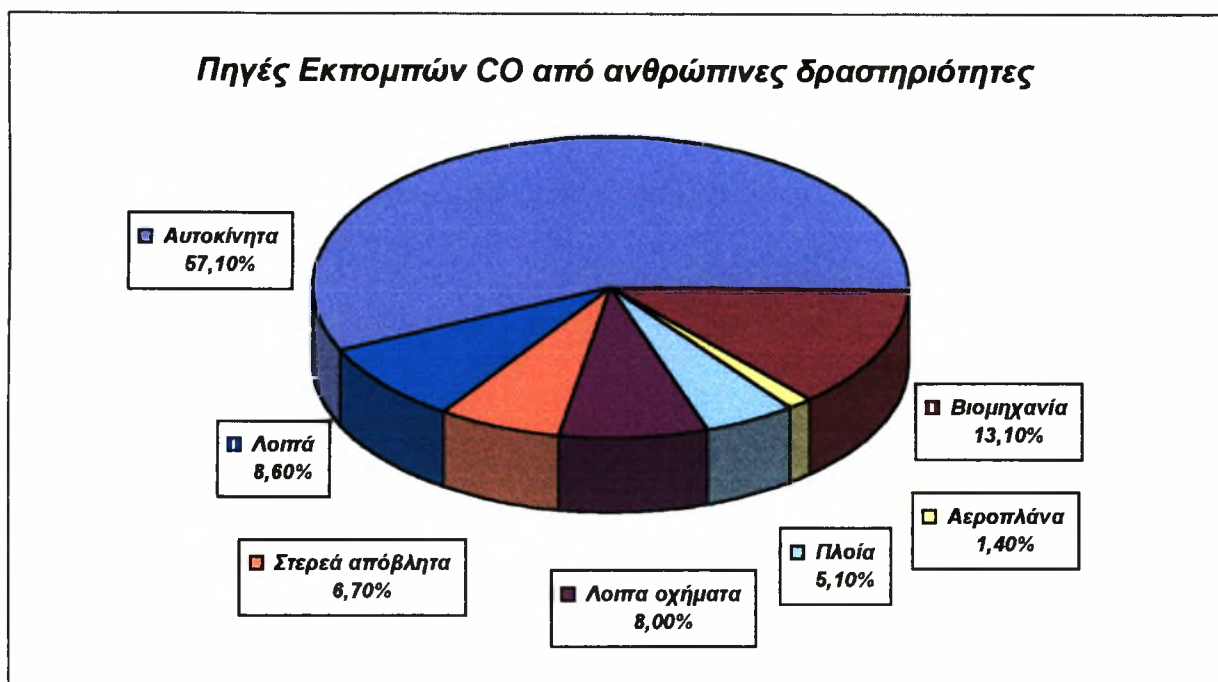
Ένωση	Τύπος	Παρατηρήσεις
Διαζωτοξείδιο	N ₂ O	Βιολογικές δραστηριότητες
Αζωτοξείδιο	NO	Βιολογικές δραστηριότητες
Διαζωτοτριοξείδιο	N ₂ O ₃	
Διοξείδιο του Αζώτου	NO ₂	Καύση άνθρακα, μαζούτ, πετρελαίου, φυσικού αερίου. Διωλιστήρια πετρελαίου.
Τετροξείδιο του Αζώτου	N ₂ O ₄	
Πεντοξείδιο του Αζώτου	N ₂ O ₅	
Νιτρικό οξύ	HNO ₃	
Νιτρικό Ιόν	NO ₃ ⁻	
Νιτρώδες οξύ	HNO ₂	
Αμμωνία	NH ₃	Βιολογικές δραστηριότητες
Αμμώνιο	NH ₄ ⁺	
Υδραζίνη	N ₂ H ₄	

Μονοξείδιο του άνθρακα - CO

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και ελάχιστα διαλυτό στο νερό, αναφλέγεται όταν καίγεται και παράγει μπλε φλόγα. Η παραγωγή του CO γίνεται από την ατελή καύση των ανθρακούχων καυσίμων. Οι μεγαλύτερες πηγές ατελών καύσεων CO είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, η βιομηχανία και οι αστικές δραστηριότητες. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις του CO εντοπίζονται, στους πολυσύχναστους δρόμους των μεγάλων πόλεων, ξεπερνώντας τα 100 mg/kg και σε σήραγγες διέλευσης

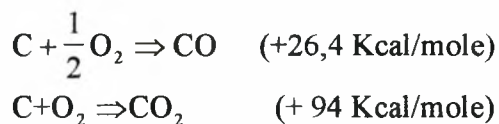
τροχοφόρων φθάνουν τα 300 mg/kg. Παρόλα αυτά πρόσφατες έρευνες αποδεικνύουν ότι μόνο το 10% της συνολικής παραγωγής CO προέρχεται από καύση. Οι πηγές εκπομπής του CO είναι η καύση, η οξείδωση CH₄, η βιοσύνθεση και καταστροφή χλωροφύλλης, οι ωκεανοί και οι ανθρώπινες δραστηριότητες.

Στο παρακάτω Σχήμα 2-14 φαίνονται τα ποσοστά εκπομπής CO από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.



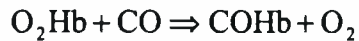
Σχήμα 2-14 : Πηγές εκπομπών CO από ανθρώπινες δραστηριότητες

Ο άνθρακας καίγεται σχηματίζοντας μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, σύμφωνα με τις εξής χημικές αντιδράσεις:



Όπως προκύπτει από τις ανωτέρω αντιδράσεις, κατά την ατελή καύση του άνθρακα και τον σχηματισμό του CO παρατηρούνται μεγάλες απώλειες ενέργειας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή των συνθηκών καύσης τόσο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας ή θέρμανσης όσο και στα οχήματα. Η αύξηση της αναλογίας αέρα καυσίμου περιορίζει σημαντικά τον σχηματισμό CO.

Το CO σε μεγάλες ποσότητες (>100 ppm) είναι θανατηφόρο. Η τοξική του δράση οφείλεται στην μεγάλη χημική συγγένεια που έχει με την αιμογλοβίνη (Hb) του αίματος η οποία δρα ως μεταφορέας του οξυγόνου από τους πνεύμονες στα κύτταρα του σώματος. Έτσι το CO που εισπνέεται από τον αέρα περιορίζει την οξυγόνωση των κυττάρων, διότι αντικαθιστά το οξυγόνο στην οξυαιμογλοβίνη (O₂Hb) και σχηματίζει την καρβοξυαιμογλοβίνη .



Η ανοξαιμία, η οποία προκαλείται από την COHb, εκδηλώνεται με συμπτώματα κεφαλαλγιών και ναυτιών. Με τη συνεχή έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις CO, παρατηρείται ξαφνική απώλεια της συνείδησης χωρίς αναπνευστικές διαταραχές και σε παρατεταμένα χρονικά διαστήματα προκαλεί το θάνατο.

Υδρογονάνθρακες - HC

Εκπομπές υδρογονανθράκων προκαλούνται είτε από φυσικές πηγές είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν κυρίως την εκπομπή CH₄, το οποίο παράγεται από την αναερόβια αποσύνθεση οργανικής ύλης και σε πολύ μικρότερα ποσά από ρωγμές του εδάφους και τα δίκτυα διανομής φυσικού αερίου. Έχει εκτιμηθεί ότι η παραγωγή μεθανίου από αναερόβιες διαδικασίες ανέρχεται παγκοσμίως σε 1,6x10⁸ τόνους / έτος.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες ελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα 0,8x10⁸ τόνους/έτος υδρογονάνθρακες. Από την ποσότητα αυτή το 55% προέρχεται από τα πετρέλαια, το 28% από διάφορες αποτεφρώσεις, το 11% από εξατμίσεις διαλυτικών και το 6% από την καύση ξύλων και ανθράκων. Από τους υδρογονάνθρακες αυτούς το κύριο συστατικό είναι το CH₄ (90%) ενώ, το υπόλοιπο 10% περιλαμβάνει διάφορα άλλα είδη.

Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν ρυπογόνες ενώσεις οι οποίες βοηθούν στην ανάπτυξη της φωτοχημικής καπνομίχλης. Ιδιαίτερη όμως σημασία παρουσιάζουν οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ) που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, λόγω του ότι προκαλούν ή συμβάλλουν στην ανάπτυξη του καρκίνου των πνευμόνων, όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά στα ζώα εδώ και 30 χρόνια. Οι υδρογονάνθρακες ΠΑΥ προέρχονται από πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως από αντιδράσεις πυρολύσεως οργανικών ενώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες (700°C). Στη βιομηχανία, ΠΑΥ σχηματίζονται από τις παρακάτω διεργασίες :

- Παραγωγή κωκ
- Καταλυτική διάσπαση στις διάφορες βιομηχανίες πετρελαίου
- Παραγωγή ζωικού άνθρακα
- Καύση μαζούτ σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς
- Καύση οργανικών ενώσεων σε ανοικτούς χώρους
- Καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η συγκέντρωση των ΠΑΥ στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση του τόπου, από την εποχή του έτους και από τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν. Π.χ. έχει βρεθεί ότι οι συγκεντρώσεις τους είναι περίπου 100 φορές περισσότερες το χειμώνα από ότι το καλοκαίρι. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ΠΑΥ με τη βοήθεια της βροχής εναποτίθεται στο έδαφος και στο υδάτινο περιβάλλον. Οι υδρογονάνθρακες ΠΑΥ λόγω της δυσδιαλυτότητας τους στο νερό απορροφούνται από οργανικές και ανόργανες ενώσεις και συσσωρεύονται στον πυθμένα των λιμνών, των ποταμών και των θαλασσών υπό τη μορφή ιζήματος σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Επομένως η επιβάρυνση του περιβάλλοντος με αυτού του είδους τις ενώσεις θα έχει κάποια στιγμή ανεπανόρθωτα αποτελέσματα.

Σωματίδια

Ως σωματίδιο θεωρείται οτιδήποτε υγρό ή στερεό με μέγεθος από 10^{-7} μm έως 10^2 μm . Η προέλευση των σωματιδίων μπορεί να είναι η εξής:

- Αιωρήματα που προέρχονται από τις ακάλυπτες από βλάστηση περιοχές.
- Μικροκρυσταλλικές μορφές αλάτων της θάλασσας που προέρχονται από την εξάτμιση του θαλασσίου νερού. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 1~10 μm και συναντώνται μέχρι και σε ύψος 500 m από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Οργανικά αιωρήματα όπως γύρη, μικρόβια κλπ. Αυτά τα σωματίδια έχουν διάμετρο από 10^{-5} ~ 10^{-2} μm .
- Καπνοί και στάχτη (τέφρα) προέρχονται από φυσικές καύσεις δέντρων, θάμνων κ.α. οι οποίες γίνονται τυχαία ή προγραμματισμένα στη φύση. Τα σωματίδια αυτά έχουν διάμετρο 10^{-2} mm περίπου και περιέχουν στο μεγαλύτερο μέρος υδρογονάνθρακες και ρητίνες. Τα σωματίδια του καπνού έχουν μεγάλη κολλητική δύναμη και εναποτίθενται σε

επιφάνειες. Το στερεό υλικό που παραμένει όταν ένα καύσιμο οξειδώνεται πλήρως ονομάζεται τέφρα.

- Σωματίδια από ανθρώπινες δραστηριότητες. Αποτελούν προϊόντα από καύσεις και συγκρίνονται ποσοτικά με τον όγκο όλων των παραπάνω κατηγοριών.

Από χημική σκοπιά τα σωματίδια ταξινομούνται σε :

- Σωματίδια χημικώς ενεργά
- Σωματίδια χημικώς αδρανή

Το μέγεθος των σωματιδίων που εκλύονται από βιομηχανικές εκπομπές εξαρτάται από την ταχύτητα των καυσαερίων και από την κατασκευή της καμινάδας. Τυπικές ταχύτητες εξόδου καυσαερίων από καμινάδες είναι από 12~20 m/sec. Με αυτές τις ταχύτητες μπορούν να μεταφερθούν σωματίδια μέσης διαμέτρου 400 μm. Τα μεγαλύτερα σε διάμετρο σωματίδια παραμένουν στην καμινάδα ενώ τα πολύ μικρότερα εξέρχονται από την καμινάδα.

Γενικά, η ιπτάμενη τέφρα που αναδύεται από τις καμινάδες αναλύεται σε άνθρακα, θειικά άλατα και σε οξειδία του πυριτίου, του σιδήρου, του νικελίου, του ασβεστίου, του αργιλίου και του φωσφόρου. Τα διάφορα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από καύση ταξινομούνται σύμφωνα με τον τύπο και τις ιδιότητες τους. Τα λεπτά υγρά σωματίδια ονομάζονται "νέφος", ενώ τα στερεά σωματίδια "σκόνη ή καπνός". Η ομίχλη αποτελείται από μεγάλη συγκέντρωση μικρών σταγόνων ύδατος, ενώ ο συνδυασμός καπνού και ομίχλης σχηματίζει την "καπνομίχλη".

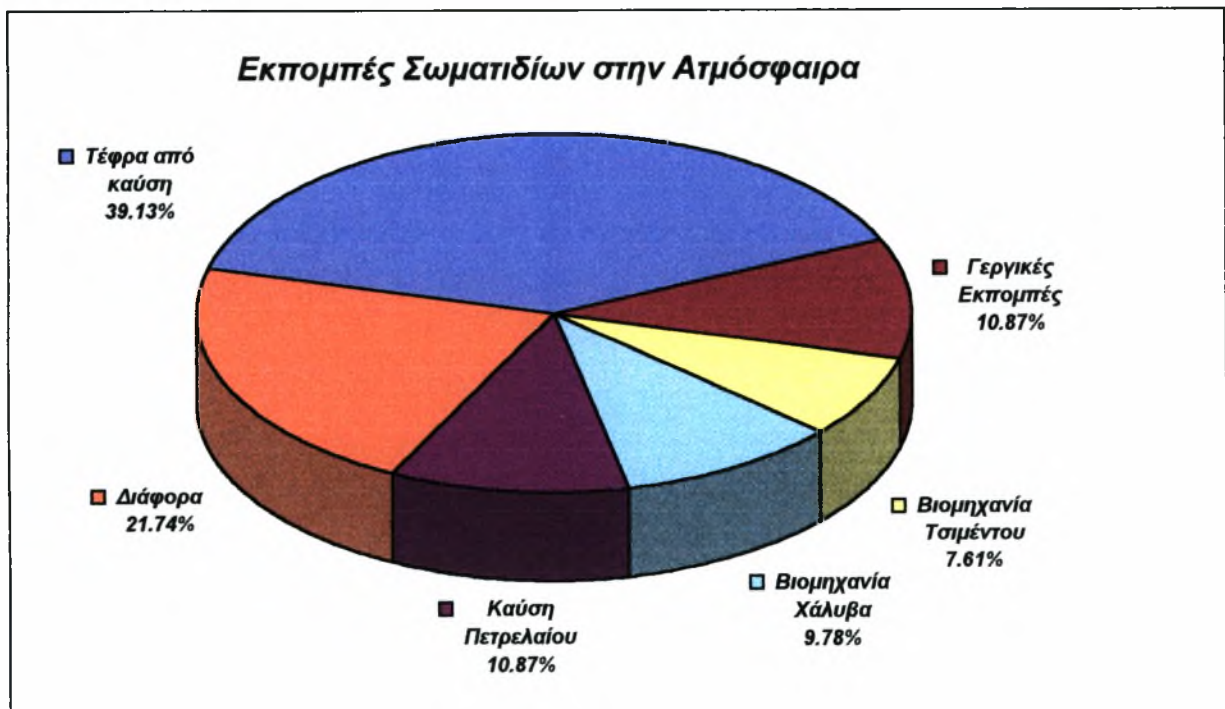
Στον Πίνακα 2-7 παρουσιάζονται τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Με την βοήθεια της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διαπιστώθηκε ότι το σχήμα των σωματιδίων δεν είναι πάντα σφαιρικό αλλά παρουσιάζει ποικίλες μορφές. Για παράδειγμα, το σχήμα του τυπικού σωματιδίου καπνού είναι σφαιρικό ενώ τα σωματίδια σκόνης έχουν ακανόνιστο σχήμα.

Πίνακας 2-7 : Είδη σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Σωματίδια	Προσδιορισμός
Σωματίδια Aitken	Ακτίνα μεγέθους κάτω από 0,1 μm
Μεγάλα σωματίδια	Ακτίνα μεγέθους μεταξύ 0,1~1 μm
Γιγαντιαία σωματίδια	Ακτίνα μεγέθους πάνω από 1 μm
Σκόνη	Στερεά σωματίδια προερχόμενα από στερεά σώματα και διασκορπισμένα από αέρια ρεύματα
Ατμός	Στερεά ή υγρά σωματίδια από συμπύκνωση στη αέρια φάση
Καπνός	Αποτέλεσμα καύσης

Η συμβατική μέθοδος προσομοίωσης του μεγέθους σωματιδίου είναι η μέθοδος Stokes. Η διάμετρος Stokes ορίζεται ως η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα πτώσης και πυκνότητα με το υπό μελέτη σωματίδιο.

Στο παρακάτω Σχήμα 2-15 παρουσιάζονται τα ποσοστά εκπομπής σωματιδίων από διάφορες πηγές.



Σχήμα 2-15 : Ποσοστά εκπομπής σωματιδίων

Το μέγεθος των σωματιδίων επιδρά στην συμπεριφορά της ατμόσφαιρας ή ορισμένων παραμέτρων της ως εξής:

- **Καταλυτική συμπεριφορά:** Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του σωματιδίου τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια του. Αυτό έχει ως συνέπεια να καταλύονται καλύτερα οι χημικές αντιδράσεις, διότι διάφορα αέρια ή υγρά (οργανικές ενώσεις, ΠΑΥ, κλπ) απορροφούνται από τις μεγάλες επιφάνειες των σωματιδίων. Αυτή η διεργασία σχετίζεται με την σχηματισμό φωτοχημικής καπνομίχλης, γεγονός που έχει δυσμενείς συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία. Η μεγάλη επιφάνεια των σωματιδίων οφείλεται σε μικροπόρους, που στην συντριπτική τους πλειονότητα έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση με 20 nm. Στο εσωτερικό των πόρων απορροφούνται και συμπυκνώνονται ατμοσφαιρικά αέρια, όπως CO₂ (150~300 μgr/gr), CO (10~30 μgr/gr), CH₄ (15~60 μgr/gr) και NH₃ (30~100 μgr/gr).
- **Φαινόμενα ανακλάσεως:** Το μέγεθος των σωματιδίων είναι σημαντικός παράγοντας στη ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα μεγαλύτερα ποσοστά (περίπου 10%) ανακλάσεως προκαλούνται από τα σωματίδια μεγέθους 0,1~1 μm, γιατί η διάμετρος τους είναι συγκρίσιμη με τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας. Στον παρακάτω Πίνακα 2-8 φαίνεται η επίδραση των σωματιδίων στην ορατότητα.

Πίνακας 2-8 : Επίδραση σωματιδίων στην ορατότητα

Συγκέντρωση (μgr/m ³)	Ορατότητα (Km)	Περιοχή
30	40	Εκτός κατοικημένης περιοχής
100	10	Σε κατοικημένη περιοχή
200	5	Σε κατοικημένη περιοχή
750	1,5	Σε κατοικημένη περιοχή

Γενικά, τα σωματίδια μειώνουν την ορατότητα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι αυτή να φθάσει στην επιφάνεια της Γης. Η παρουσία των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα βοηθάει στην πτώση της επιφανειακής θερμοκρασίας και βοηθάει στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

- Επίδραση στο κλίμα: Σωματίδια με τάξη μεγέθους 0,1~1 μm αποτελούν πυρήνες για το σχηματισμό σταγόνων βροχής, και συνεπώς συντελούν στην αύξηση των σύννεφων και τη βροχόπτωση. Με αυτόν τον τρόπο τα σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα ενός αστικού κέντρου, αυξάνοντας τις βροχοπτώσεις, τις χαλαζοπτώσεις και τις καταιγίδες. Αν τα σωματίδια είναι μικρότερου μεγέθους τότε οι σταγόνες της βροχής είναι και αυτές μικρότερες και δεν πέφτουν με αποτέλεσμα την μείωση των βροχοπτώσεων και την αύξηση της συννεφιάς.
- Βιολογική επίδραση: Όταν τα σωματίδια επικάθονται στα φυτά εμποδίζουν την κυκλοφορία του CO₂ και του O₂ που απαιτούνται για τη φωτοσύνθεση. Στην περίπτωση των ζώων, τα σωματίδια προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό τους σύστημα. Τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 10 μm παγιδεύονται στη μύτη ή στο φάρυγγα και στη συνέχεια απομακρύνονται ή καταπίνονται χωρίς να παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα. Σωματίδια όμως, με μέγεθος μικρότερο από 0,1 μm εναποτίθενται στους πνεύμονες και προκαλούν βλάβες, γιατί είναι δύσκολη η απομάκρυνση τους.

2.7.3 Ρύπανση από Βιομηχανία Τσιμέντου

Στη βιομηχανία τσιμέντου η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα πολύ μεγάλο πρόβλημα καθώς οι μεγάλες θερμοκρασίες στους περιστροφικούς κλιβάνους απαιτούν την καύση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμων ενώ τα σωματίδια του τσιμέντου είναι πολύ δύσκολο να κατακρατηθούν. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στους ατμοσφαιρικούς ρύπους που εκπέμπονται από το εργοστάσιο της τσιμεντοβιομηχανίας ΑΓΕΤ Ηρακλής στην Αγριά-Βόλου [18]. Το εργοστάσιο αυτό παράγει τσιμέντο και χρησιμοποιεί για καύσιμο μαζούτ και κάρβουνο. Οι ποσότητες καυσίμου που καταναλώνονται είναι 8000 τόνους / έτος μαζούτ και 56000 τόνους / έτος κάρβουνο.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εκπομπές ρύπων της τσιμεντοβιομηχανίας αυτής σε τόνους / έτος :

Πίνακας 2-9 : Εκπομπές ρύπων εργοστασίου 'ΟΛΥΜΠΟΣ' της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ

Καύσιμο	SO _x	NO _x	CO	HC	Σωματίδια
Μαζούτ	445	54	4	9	30
Κάρβουνο	37332	5896	198	30	16639
Σύνολο	37777	5951	202	40	16670

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει λεπτομέρειες των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην υπολογιστική προσομοίωση των παρακάτω φαινομένων:

- Αεροδυναμική του περιστροφικού κλιβάνου
- Δυναμική των σωματιδίων
- Μεταφορά θερμότητας και μάζας

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις της αέριας φάσης χρησιμοποιούν ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler ενώ οι εξισώσεις της δυναμικής των σωματιδίων κατά Lagrange. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τα φυσικά φαινόμενα ροής και μεταφοράς που λαμβάνουν χώρα στον ΠΚ και παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια. Γίνεται αναφορά στο οριακό στρώμα του ΠΚ που συνδέεται με το φαινόμενο της τύρβης. Τέλος, με βάση την φύση και τις ιδιότητες της τύρβης εισάγονται και διευκρινίζονται οι έννοιες της διασποράς και της διάχυσης των ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα.

3.1 Εξισώσεις Ορμής

3.1.1 Αέρια Φάση

Οι μέσης χρονικής τιμής (time-averaged) θεμελιώδεις εξισώσεις των Navier-Stokes, για την μεταφορά της ορμής, της θερμότητας και μάζας του ρευστού μπορούν να εκφραστούν στην παρακάτω γενική μορφή σε ένα σύστημα αναφοράς κατά Euler και σε κυλινδρικές συντεταγμένες:

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

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.

Επίσης στον ίδιο πίνακα, δίνονται οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιούνται για την k-ε προσέγγιση της ατμοσφαιρικής τύρβης. Όταν το σύστημα αναφοράς είναι καρτεσιανό, το r γίνεται 1, το dr γίνεται dy, το dθ γίνεται dz και οι αρχικοί όροι του Πίνακα 3-1 απλοποιούνται με την απαλοιφή της δύναμης Coriolis, των όρων της φυγοκέντρου δύναμης (οι όροι στις αγκύλες { }) και του πολικού μέρους των όρων του ιξώδους (οι όροι στις []).

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις δίνονται στην ελλειπτική τους μορφή ώστε να επιτρέπεται η προσομοίωση ροών με περιοχές διάτμησης ή ανακυκλοφορίας. Το ενεργό ιξώδες υπολογίζεται από την σχέση :

$$\mu_e = \mu + \mu_i \quad (2)$$

Το τυρβώδες ιξώδες, μ_i , μπορεί κατά την προσομοίωση να είναι μια σταθερή τιμή ή να υπολογίζεται από το k-ε μοντέλο τύρβης ως εξής:

$$\mu_i = C_D \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

Όπου, C_D = σταθερά του μοντέλου τύρβης

ρ = πυκνότητα αερίου

k = κινητική ενέργεια τύρβης

ε = ρυθμός σκέδασης της κινητικής ενέργειας της τύρβης

Η τυρβώδης ροή προσομοιώνεται με το k-ε μοντέλο τύρβης, ενώ για τη στρωτή ροή χρησιμοποιείται μόνο το μοριακό ιξώδες μ .

Πίνακας 3-1 :Εξισώσεις μεταφοράς τυρβώδους ροής

Καρτεσιανό Σύστημα Συντεταγμένων			
Ιδιότητα	Φ	Γ_ϕ	S^ϕ
Συνέχεια	1	0	0
Ορμή στην x-κατεύθυνση	U	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 y-κατεύθυνση	V	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 στην z-κατεύθυνση	W	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial z})$
Πολικό Σύστημα Συντεταγμένων			
Ορμή στην x-κατεύθυνση	U	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	V	μ_e	$-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_e r \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial r})$ $[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e W) - \frac{2\mu_e}{r^2} \frac{\partial W}{\partial \theta} - 2\frac{\mu_e V}{r^2}] + \{\rho \frac{W^2}{r}\}$
Ορμή στην θ -κατεύθυνση	W	μ_e	$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial U}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_e \frac{\partial V}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e \frac{\partial W}{\partial \theta})$ $[\frac{2}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e V) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu_e W) + \frac{\mu_e}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\mu_e}{r} \frac{\partial W}{\partial r} -$ $\frac{\mu_e W}{r^2}] - \{\rho \frac{WV}{r}\}$
Κινητική ενέργεια τύρβης	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	G - $\rho \epsilon$
Ρυθμός σκέδασης τύρβης	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

όπου, G, μ_e , μ_t , C_D , C_1 , C_2 , σ_k και σ_ϵ είναι οι εξής ποσότητες:

$$G = \mu_e \{ 2 [(\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial r})^2 + (\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{V}{r})^2] + [\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x}]^2 + [\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}]^2 + [\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W}{r}]^2 \}$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \mu_t = C_D \rho \frac{k^2}{\epsilon}, C_D = 0,09, C_1 = 1,44, C_2 = 1,92, \sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,314$$

3.1.2 Εξισώσεις Δυναμικής Σωματιδίων

Για την προσομοίωση της δυναμικής των σωματιδίων χρησιμοποιείται η προσέγγιση Lagrange. Στη προσέγγιση αυτή τα σωματίδια παρουσιάζονται ως ξεχωριστές οντότητες. Το υπολογιστικό "σωματίδιο" μπορεί να απεικονίζει ένα φυσικό σωματίδιο ή έναν αριθμό από ισομεγέθη σωματίδια. Στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας αυτής η φράση "υπολογιστικό σωματίδιο" θα σημαίνει σωματίδια ενός μεγέθους. Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να είναι κανονική, λογαριθμική ή να καθορίζεται από τον χρήστη.

Στο σύστημα αναφοράς κατά Lagrange, οι εξισώσεις της κίνησης κάθε υπολογιστικού σωματιδίου δίνονται από μια συνήθη διαφορική εξίσωση (ΣΔΕ) :

χ-κατεύθυνση

$$\frac{dU_d}{dt} = f C_D \left| \vec{U}_g - \vec{U}_d \right| (U_g - U_d) + g_x \quad (4)$$

γ,γ-κατεύθυνση

$$\frac{dV_d}{dt} = f C_D \left| \vec{U}_g - \vec{U}_d \right| (V_g - V_d) + g_y + \left\{ \frac{W_d^2}{r} \right\} \quad (5)$$

z,θ-κατεύθυνση

$$\frac{dW_d}{dt} = f C_D \left| \vec{U}_g - \vec{U}_d \right| (W_g - W_d) + g_z + \left\{ \frac{V_d W_d}{r} \right\} \quad (6)$$

όπου,

\vec{U}_g, \vec{U}_d = διάνυσμα ταχύτητας αερίου και σωματιδίου, αντίστοιχα

U_g, V_g, W_g = συνιστώσες ταχύτητας αερίου

U_d, V_d, W_d = συνιστώσες ταχύτητας σωματιδίου

g_x, g_y, g_z = συνιστώσες επιτάχυνσης βαρύτητας

C_D = συντελεστής οπισθέλκουσας του σωματιδίου

f = συντελεστής εξαρτώμενος από τις ιδιότητες του ρευστού και του σωματιδίου

Για καρτεσιανές συντεταγμένες οι όροι στις αγκύλες {} μηδενίζονται. Για σφαιρικά σωματίδια ο συντελεστής, f , δίνεται από τη σχέση:

$$f = \frac{3}{4} \frac{\rho g}{\rho_d D_d} \quad (7)$$

όπου ρ_g, ρ_d = πυκνότητα αερίου και σωματιδίου, αντίστοιχα

D_d = διάμετρος σωματιδίου

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας εκτιμάται από κατάλληλη σχέση, βασισμένη στον αριθμό Reynolds των σωματιδίων :

$$Re = \frac{\rho_g D_d V_{slip}}{\mu_g} \quad (8a)$$

όπου, μ_g = το μοριακό ιξώδες του ρευστού

V_{slip} = ταχύτητα διολίσθησης των σωματιδίων

$$V_{slip} = [(U_g - U_d)^2 + (V_g - V_d)^2 + (W_g - W_d)^2]^{1/2} \quad (8b)$$

Για σφαιρικά σωματίδια ο συντελεστής οπισθέλκουσας υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_D = \frac{24}{Re} \begin{cases} 1+0,15Re & \text{για } Re \leq 1 \\ 1+0,15Re^{0,687} & \text{για } Re > 1 \end{cases} \quad (9a)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις βασικές εξισώσεις κίνησης κατά Lagrange για σωματίδια που διατηρούν σταθερή την μάζα τους, δηλαδή δεν μετέχουν σε φυσικοχημικές διεργασίες. Οι εξισώσεις κίνησης των σωματιδίων (Εξ. 4 εως 6) μπορούν να διατυπωθούν με μια απλή διανυσματική εξίσωση:

$$m_d \frac{d\vec{U}_d}{dt} = \Sigma \vec{F} \quad (10)$$

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο, δίνονται στον παρακάτω τύπο :

$$\Sigma \vec{F} = \vec{D} + \vec{B} \quad (11)$$

Η δύναμη της αντίστασης του αέρα \vec{D} υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\vec{D} = f(\vec{U}_g - \vec{U}_d) \quad (12)$$

$$\text{Όπου, } f = 3\pi\mu_g D_d C_D \frac{Re}{24} \quad (13)$$

Το βάρος του σωματιδίου \vec{B} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = (\rho_d - \rho_g) \cdot Vol \cdot \vec{g} = (m_d - m_g) \cdot \vec{g} \quad (14)$$

όπου, $Vol = \pi/6 D_d^3$ (για σφαιρικά σωματίδια)

m_g = μάζα του εκτοπιζόμενου αερίου

\vec{g} = διάνυσμα βαρύτητας

Καμιά άλλη δύναμη δεν μελετάται εδώ, μολονότι και άλλες μπορούν να προσαρμοστούν στην παραπάνω διατύπωση (μαγνητικές δυνάμεις, κτλ.). Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις στην θεμελιώδη εξίσωση (10) προκύπτει:

$$m_d \frac{d\bar{U}_d}{dt} = f(\bar{U}_g - \bar{U}_d) + (m_d - m_g) \bar{g} \quad (15)$$

και τελικά

$$\frac{d\bar{U}_d}{dt} = -f \frac{\bar{U}_d}{m_d} + \frac{f \bar{U}_g + (m_d - m_g) \bar{g}}{m_d} \quad (16)$$

Υποθέτοντας ότι το f είναι σταθερό σε μικρά χρονικά διαστήματα η Εξ. (16) γίνεται μια συνήθης γραμμική διαφορική εξίσωση, πρώτης τάξης, της μορφής :

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{y}} + P\bar{x} = \bar{Q} \quad (17)$$

Η τελική λύση είναι :

$$\bar{x} = \bar{x}_0 e^{-P\Delta t} + \frac{\bar{Q}}{P} (1 - e^{-P\Delta t}) \quad \Delta t = t - t_0 \quad (18)$$

Οι τιμές P και \bar{Q} στην εξίσωση της ορμής των σωματιδίων (Εξ. 16) είναι:

$$P = \frac{f}{m_d} \quad (19a)$$

$$\bar{Q} = \frac{f \bar{U}_g + (m_d - m_g) \bar{g}}{m_d} \quad (19b)$$

Παράλληλα, για μικρά χρονικά διαστήματα, η ταχύτητα των σωματιδίων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\bar{U} (t_0 + \Delta t) = \bar{U}_0 e^{-P\Delta t} + \frac{\bar{Q}}{P} (1 - e^{-P\Delta t}) \quad (20)$$

Οι συντελεστές P και \bar{Q} της παραπάνω συνάρτησης υπολογίζονται στον αρχικό χρόνο t_0 .

3.2 Μεταφορά Θερμότητας

Στη μαθηματική μοντελοποίηση της ροής και των αντιδράσεων στους κλιβάνους και στους θαλάμους καύσης, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιγραφούν επαρκώς τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας. Δεδομένου ότι κατά την διεργασία της καύσης

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. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την μεταφορά θερμότητας στην αέρια φάση και τα σωματίδια περιγράφονται σε συντομία παρακάτω.

3.2.1 Μεταφορά Θερμότητας Αέριας Φάσης

Η θεμελιώδης εξίσωση για την μετάδοση θερμότητας στην αέρια φάση είναι παρόμοια με την γενική εξίσωση μεταφοράς που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1. Ειδικότερα, η ενθαλπία (h) υπολογίζεται από την σχέση διατήρησης της ενέργειας:

- Για καρτεσιανές συντεταγμένες

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V h) + \frac{\partial}{\partial z}\left(W \frac{\partial h}{\partial z}\right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial z}\right) + S^h \end{aligned} \quad (21a)$$

- Για πολικές συντεταγμένες

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U h) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V h) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\rho \frac{W}{r} \frac{\partial h}{\partial \theta}\right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(\Gamma_h r \frac{\partial h}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\Gamma_h \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial \theta}\right) + S^h \end{aligned} \quad (21b)$$

Ο συντελεστής διάχυσης της ενθαλπίας καθορίζεται ως εξής:

$$\Gamma_h = \frac{\mu_e}{\sigma_e} \quad (21c)$$

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

Ο πηγαίος όρος, S^h , περιλαμβάνει την διαφασική μεταφορά ενέργειας αλλά όχι την ιξώδη σκέδαση και την κινητική ενέργεια καθώς οι ροές έχουν μικρή ταχύτητα.

3.2.2 Μεταφορά θερμότητας σωματιδίων

Η μεταφορά θερμότητας των σφαιρικών σωματιδίων βασίζεται στην ακόλουθη συσχέτιση:

$$Nu = 2.0 + 0.6 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (22a)$$

όπου, ο αριθμός Nusselt καθορίζεται ως:

$$Nu = \frac{h \cdot D_d}{k_g} \quad (22b)$$

όπου, h = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

k_g = θερμική αγωγιμότητα αερίου.

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

- Πυκνότητα μίγματος

Η πυκνότητα του αέρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{M P}{R T} \quad (23)$$

όπου

P = Απόλυτη πίεση

R = Παγκόσμια σταθερά των αερίων

M = Μοριακό βάρος του αέρα

T = Απόλυτη θερμοκρασία

- Ενεργό ιξώδες

Το ενεργό ιξώδες του αερίου μίγματος υπολογίζεται από την έκφραση:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_i \quad (24)$$

όπου, μ = δυναμικό μοριακό ιξώδες,

μ_i το τυρβώδες ιξώδες

Το τυρβώδες ιζώδες μπορεί να είναι μια σταθερή τιμή ή να υπολογίζεται από το μοντέλο k-ε από τον παρακάτω τύπο :

$$\mu_t = C_D \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

όπου:

C_D = μια εμπειρική σταθερά

ρ = πυκνότητα του ρευστού

k = κινητική ενέργεια της τύρβης

ε = ρυθμός σκέδασης της τύρβης

- Ειδική θερμότητα του αέρα

Η ειδική θερμότητα του αέρα υπολογίζεται από :

$$C_p = A_i + B_i + C_i T^2 + D_i T^3 \quad (26a)$$

όπου, A_i , B_i , C_i , D_i = σταθεροί συντελεστές

- Θερμοκρασία αέρα

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

$$T = \frac{H}{\bar{C}_p} \quad (26b)$$

όπου, H = ενθαλπία του αέρα,

\bar{C}_p = μέση τιμή της θερμοχωρητικότητας.

3.3 Μεταφορά Θερμότητας δια Ακτινοβολίας

Στους πραγματικούς κλιβάνους και θαλάμους καύσης βιομηχανικού μεγέθους, η μεταφορά θερμότητας γίνεται με ακτινοβολία και με συναγωγή, με κυρίαρχη την πρώτη. Το πρόβλημα του προσδιορισμού της θερμικής ακτινοβολίας σε ένα σημείο του κλιβάνου, που βρίσκεται είτε πάνω στο τοίχωμα είτε μέσα στην αέρια φάση, είναι εξαιρετικά πολύπλοκο, ιδιαίτερα εάν υπάρχουν περισσότερες από μία φάσεις (π.χ. αέρια και σωματίδια) [6].

Για να μελετήσουμε τη μεταφορά θερμικής ακτινοβολίας θεωρούμε, ένα στοιχειώδη όγκο αερίου και σωματιδίων στο εσωτερικό του κλιβάνου, από τον οποίο εκπέμπεται ενέργεια. Όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή του κύματος της ακτινοβολίας είναι πολύ μεγάλη και η θερμοκρασία του τοιχώματος είναι ομοιόμορφη, η επίδραση της θερμότητας που Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

μεταφέρεται με ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί μ' έναν όρο πηγής ανάλογο με την τέταρτη δύναμη της τοπικής θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στην υπόθεση ότι η ποσότητα της απορροφούμενης και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας μέσα στο μέσο είναι αμελητέα. Η επίδρασή τους στην θερμοκρασιακή κατανομή εντός του μέσου προκύπτει με απευθείας επίλυση των κανονικών διαφορικών εξισώσεων για την ενθαλία στασιμότητας.

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της Θερμικής ακτινοβολίας, όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή του κύματος της ακτινοβολίας είναι μικρή, συγκρινόμενη με τις διαστάσεις του κλίβανου. Είναι η "προσέγγιση με αγωγή", σύμφωνα με την οποία η επίδραση της ακτινοβολίας υπολογίζεται μέσω ενός επιπλέον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ανάλογο με την τρίτη δύναμη της τοπικής θερμοκρασίας.

Δυστυχώς όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη, η μέση ελεύθερη διαδρομή του κύματος της ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την θέση μέσα στον κλίβανο και δεν είναι ούτε αρκετά μεγάλη ούτε αρκετά μικρή ώστε να χρησιμοποιηθεί μία από τις δύο παραπάνω προσεγγίσεις. Προκειμένου να υπολογιστεί η θερμική ακτινοβολία μέσα σ' ένα χώρο καύσης αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Η εξίσωση μεταφοράς της θερμικής ακτινοβολίας εκφράζεται με όρους μιας ιδιότητας μεταφοράς, γνωστή σαν πυκνότητα ακτινοβολίας I_λ , η οποία ορίζεται σαν η ποσότητα ενέργειας της μονοχρωματικής ακτινοβολίας Q_λ που μεταφέρεται προς μία δεδομένη κατεύθυνση, ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη σ' αυτήν την κατεύθυνση, ανά μονάδα στερεής γωνίας και ανά μονάδα χρόνου :

$$I_\lambda = \lim \left(\frac{dQ_\lambda}{d\lambda, dA, d\omega, dt} \right) \quad (27)$$

$(d\lambda, dA, d\omega, dt) \rightarrow 0$

Όπου το λ αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας, dA το στοιχείο της επιφάνειας που είναι κάθετο στην καθορισμένη κατεύθυνση $\underline{\Omega}$ και $d\omega$ ένα στοιχείο στερεής γωνίας γύρω απ' αυτήν την κατεύθυνση. Το ισοζύγιο της μεταφοράς της ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια καθορισμένη κατεύθυνση $\underline{\Omega}$, διαμέσου ενός στοιχειώδους όγκου ενός μέσου που εκπέμπει, απορροφά και σκεδαρίζει, όταν εφαρμοστεί κατά μήκος μιας δέσμης ακτινών στο εσωτερικό μιας στοιχειώδους στερεάς γωνίας $d\omega$,

μπορεί να γραφτεί :

$$(\underline{\Omega}\nabla)I_\lambda = - (a_\lambda + s_\lambda) I_\lambda + a_\lambda I_{b\lambda} + \frac{s_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} P_\lambda(\underline{\Omega}, \underline{\Omega}') I_\lambda(\underline{\Omega}') d\omega' \quad (28)$$

(I) (II) (III) (IV)

Όπου

a_λ = συντελεστής μονοχρωματικής απορρόφησης

s_λ = συντελεστές μονοχρωματικής σκέδασης

$I_{b\lambda}$ = ένταση ακτινοβολίας ενός μαύρου σώματος σε μήκος κύματος λ

$P_\lambda(\underline{\Omega}, \underline{\Omega}') =$ πιθανότητα που υπάρχει ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία, μήκους κύματος λ στην κατεύθυνση $\underline{\Omega}$ στο εσωτερικό μιας στοιχειώδους στερεάς γωνίας $d\omega'$, να σκεδαστεί στο τμήμα που αντιστοιχεί στην αύξηση της στερεάς γωνίας $d\omega$ στην κατεύθυνση $\underline{\Omega}$.

Στην εξίσωση (28) :

- Ο όρος (I) αντιπροσωπεύει την κλίση της έκτασης ακτινοβολίας στην κατεύθυνση $\underline{\Omega}$.
- Ο όρος (II) αντιπροσωπεύει την εξασθένιση της έντασης, λόγω απορρόφησης μέσα στον θεωρούμενο όγκο και λόγω σκέδασης σε άλλες κατευθύνσεις.
- Ο όρος (III) αντιπροσωπεύει την αύξηση της έντασης λόγω εκπομπής από τον όγκο.
- Ο όρος (IV) αντιπροσωπεύει την αύξηση της έντασης λόγω σκέδασης στην θεωρούμενη κατεύθυνση $\underline{\Omega}$ από όλες τις άλλες κατευθύνσεις.

Η εξίσωση (28) μπορεί να ολοκληρωθεί για όλα τα δυνατά μήκη κύματος και για ολόκληρη την στερεά γωνία των 4π , ώστε να εξαχθεί η καθαρή ροή θερμικής ακτινοβολίας ανά μονάδα χρόνου. Η ολοκλήρωση της εξίσωσης (28) δίνει :

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{4\pi} (\underline{\Omega}\nabla)I_\lambda d\omega d\lambda = - \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{4\pi} (a_\lambda + s_\lambda) I_\lambda d\omega d\lambda + \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{4\pi} a_\lambda I_{b\lambda} d\omega d\lambda + \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{4\pi} \frac{s_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} P_\lambda(\underline{\Omega}, \underline{\Omega}') I_\lambda(\underline{\Omega}') d\omega' d\omega d\lambda \quad (29)$$

Εξισώσεις της παραπάνω μορφής μπορούν να γραφτούν και για επιφάνειες, και έτσι προκύπτουν οι απαραίτητες οριακές συνθήκες για την επίλυση της εξίσωσης (29). Η ολοκλήρωση μπορεί να γίνει πάνω στην επιφάνεια για μια στερεή γωνία 2π . Το αποτέλεσμα αντιπροσωπεύει την ροή ακτινοβολίας που εγκαταλείπει (q^-) ή προσεγγίζει (q^+) την θεωρούμενη επιφάνεια.

$$q^- = \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{2\pi} (\underline{\Omega\nabla}) I_{\lambda}^- d\omega d\lambda \quad (30)$$

$$q^+ = \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\omega=0}^{2\pi} (\underline{\Omega\nabla}) I_{\lambda}^+ d\omega d\lambda \quad (31)$$

Όπου I_{λ}^- και I_{λ}^+ είναι η ένταση της ακτινοβολίας που εγκαταλείπει ή προσεγγίζει την επιφάνεια, αντίστοιχα. Επειδή η επιφάνεια είναι ένα τοίχωμα, ένα τμήμα της προσπίπτουσα ακτινοβολίας απορροφάται ενώ η υπόλοιπη ανακλάται. Η διαφεύγουσα ροή q^- είναι το σύνολο της ανακλώμενης ροής και της ροής που εκπέμπεται από την επιφάνεια, έτσι ώστε :

$$q^- = (1 - \epsilon_w) q^+ + \sigma \epsilon_w (T_w)^4 \quad (32)$$

Όπου ϵ_w και T_w είναι ο συντελεστής εκπομπής και η θερμοκρασία του τοιχώματος αντίστοιχα και σ είναι η σταθερά Stefan - Boltzmann. Εδώ η επιφάνεια θεωρείται ότι είναι αδιαφανής στην θερμική ακτινοβολία και συνεπώς η μεταφερόμενη συνιστώσα του q^+ είναι μηδέν ενώ η ανακλώμενη ροή είναι ίση με $(1-\epsilon_w)$ φορές την προσπίπτουσα ροή q^+ .

Θεωρητικά, η εξίσωση (29) πρέπει να λυθεί για κάθε σημείο μέσα στον χώρο καύσης, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (30) και (31) για κάθε σημείο των τοιχωμάτων του χώρου καύσης σαν οριακές συνθήκες. Η αναλυτική επίλυση του συστήματος των ολοκληρο - διαφορικών αυτών εξισώσεων είναι αρκετά πολύπλοκη ακόμα και για απλές γεωμετρίες.

3.3.1 Μέθοδοι Υπολογισμού Θερμικής Ακτινοβολίας

Η πολυπλοκότητα του υπολογισμού της μεταφοράς της θερμότητας δια ακτινοβολία, είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων προσεγγίσεων και τεχνικών επίλυσης. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι είτε διαφορικού είτε ολοκληρωμένου τύπου. Για μια υψηλή διακεκριμενοποίηση, όλες καταλήγουν σε ακριβείς λύσεις και επομένως είναι

ικανοποιητικές. Για πραγματικούς όμως κλιβάνους πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες πρόσθετες απαιτήσεις. Οι δύο πιο σημαντικές απ' αυτές είναι η ευελιξία ως προς την γεωμετρία και η οικονομία υπολογισμών κατά την επίλυση της εξίσωσης ακτινοβολίας.

Η Μέθοδος των Ζωνών

Στην μέθοδο των ζωνών, τα τοιχώματα και το εσωτερικό του χώρου καύσης διαιρούνται σε ζώνες (επιφάνειες και όγκους) πεπερασμένου μεγέθους. Οι ζώνες αυτές είναι αρκετά μικρές, ώστε η τοπική θερμοκρασία καθώς και οι άλλες φυσικές ιδιότητες να θεωρούνται σταθερές μέσα σε κάθε μια από αυτές. Ο υπολογισμός της εναλλασσόμενης ακτινοβολίας στο εσωτερικό τον χώρου καύσης, επιτυγχάνεται με καθορισμό συντελεστών εναλλαγής ακτινοβολίας για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ζωνών ανά δύο, λαμβάνοντας υπόψη την εξασθένηση της ακτινοβολίας λόγω των παρεμβαινόντων αερίων, και συμπεριλαμβάνοντας τις επιδράσεις της ανάκλασης στο εσωτερικό του χώρου καύσης. Αυτοί οι συντελεστές "ολικών περιοχών εναλλαγής", είναι οι σταθερές αναλογίας των εξισώσεων που συσχετίζουν την εναλλαγή της ακτινοβολούμενης ενέργειας με την διαφορά στην τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας, για κάθε ζεύγος ζωνών, και έτσι προκύπτει μια λύση για την εναλλαγή της ακτινοβολίας μέσα στον κλίβανο.

Η εκτίμηση των ολικών περιοχών εναλλαγής αποτελεί ένα βασικό κομμάτι, της ανάλυσης της μεθόδου των ζωνών. Κατασκευάζονται σύμφωνα με τους νόμους γεωμετρίας της ακτινοβολίας, λαμβάνοντας υπόψη της φυσικο-χημικές ιδιότητες (εκπομπής και απορρόφησης) των μέσων που ακτινοβολούν, και περιγράφοντας τον τρόπο με τον οποίο η ακτινοβολία εναλλάσσεται μεταξύ των διαφόρων συνδυασμών των όγκων και των επιφανειών που εκπέμπουν, απορροφούν και ανακλούν. Για απλές γεωμετρίες οι όγκοι αυτοί έχουν καταχωρηθεί. Η τεχνική αυτή δίνει πλήρη λύση για το γκρίζο σύστημα αερίου, δηλαδή για εκείνο το σύστημα στο οποίο ο συντελεστής απορρόφησης του αερίου, a_g , είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε πραγματικά αέρια, όπως υδρατμοί και CO₂, που όμως δεν συμπεριφέρονται σαν γκρίζα αέρια, εξαιτίας της διακριτής απορρόφησης του προσπίπτοντος φάσματος. Αυτό επιτυγχάνεται εκφράζοντας την εκπομπή του πραγματικά γκρίζου αερίου, σαν το σταθμισμένο άθροισμα των συντελεστών εκπομπής από ένα πλήθος γκρίζων αερίων, σύμφωνα με την σχέση :

$$\varepsilon_g = \sum_n \alpha_{g,n} (1 - e^{-a_n n^{PL}}) \quad (33)$$

Όπου

$\alpha_{g,n}$ = ποσοστό της ενέργειας που βρίσκεται στην φασματική περιοχή στην οποία ο συντελεστής απορρόφησης του γρίζου αερίου είναι a_n

L = μήκος της μέσης ελεύθερης διαδρομής του μήκους κύματος της ακτινοβολίας

P = μερική πίεση του αερίου που απορροφά και n είναι το πλήθος των αερίων.

Η εναλλασσόμενη ακτινοβολία ανάμεσα σε κάθε ζεύγος ζωνών υπολογίζεται από την ολοκληρωμένη μορφή της εξίσωσης μεταφοράς.

$$\frac{dI}{dz} = \underbrace{-aI}_{\text{απορροφηση}} + \underbrace{\frac{a\sigma T^4}{\pi}}_{\text{εκπομπη}} \quad (34)$$

Όπου, I είναι η ένταση της ακτινοβολούμενης ενέργειας, και a ο συντελεστής απορρόφησης.

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και επιτυχώς για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία. Επειδή όμως η μέθοδος των ζωνών βασίζεται στην ολοκληρωμένη μορφή της εξίσωσης μεταφοράς θερμικής ακτινοβολίας, δεν συνδυάζεται εύκολα με την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων ροής και χημικών αντιδράσεων. Επιπλέον, δεδομένου ότι απαιτεί μεγάλο χρόνο υπολογισμών και μεγάλο αποθηκευτικό χώρο, είναι ασύμφορη η εφαρμογή της σε ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό κώδικα για λύση γενικών τρισδιάστατων προβλημάτων.

Η Μέθοδος Monte Carlo

Η μέθοδος Monte Carlo, χρησιμοποιεί μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών για τον καθορισμό κατευθύνσεων, ενώ η εκπομπή, απορρόφηση, σκέδαση και ανάκλαση της ακτινοβολίας εκφράζονται σαν πιθανά ενδεχόμενα. Αντιπροσωπευτικές ακτίνες, συνήθως για λόγους οικονομίας όχι περισσότερες από 9, "πυροδοτούνται" σε τυχαίες κατευθύνσεις. Οι απαιτούμενες ποσότητες υπολογίζονται, καθώς η κάθε ακτίνα διαπερνά το χώρο καύσης. Εάν ληφθεί αρκετά μεγάλος αριθμός ακτίνων μπορεί να επιτευχθεί υψηλός βαθμός ακρίβειας, αλλά και πάλι θα υπάρχει ένα στατιστικό σφάλμα επειδή υπεισέρχεται παραγωγή τυχαίων αριθμών, ενώ επιπλέον θα απαιτείται σημαντικός υπολογιστικός χρόνος.

Η Μέθοδος των Ανηγμένων Ροών

Η μέθοδος των ανηγμένων ροών παρέχει μια απλούστερη εναλλακτική λύση για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία, χωρίς να ελαττωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή εισάγει διαφορικές εξισώσεις, τύπου διάχυσης, για τις ανηγμένες ροές της ακτινοβολίας και έτσι είναι συμβατή με τις εξισώσεις ροής και με τις διαθέσιμες τεχνικές επίλυσης.

Την βάση της μεθόδου ανηγμένων ροών, αποτελεί ένα ισοζύγιο για την ροή ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια καθορισμένη κατεύθυνση, διαμέσου ενός στοιχειώδους όγκου, και στηρίζεται στην υπόθεση ότι το υλικό μέσα στον όγκο αυτό είναι οπτικά γκριζο (μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί αν αφαιρέσουμε αυτόν τον περιορισμό). Η κύρια φυσική γενίκευση που εισάγεται με τη μέθοδο ανηγμένων ροών είναι η διαίρεση της στερεάς γωνίας που περιβάλλει ένα σημείο, σ' έναν αριθμό (2N) στερεών γωνιών, στις οποίες η ένταση της ακτινοβολίας δίνεται από μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Οι 2N διαφορικές εξισώσεις, που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό, μπορούν να λυθούν σχετικά εύκολα, με τις τυποποιημένες τεχνικές πεπερασμένων διαφορών.

Πολύ απλουστευτικές παραδοχές για την κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας, οδήγησαν σε μεθόδους μονοδιάστατης μετάδοσης της ακτινοβολίας, που χρησιμοποιούνται στην αστροφυσική.

Η Μέθοδος Διακριτικής Μεταφοράς

Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τεχνικές των μεθόδων ζωνών, Montecarlo και ανηγμένων ροών για την επίλυση προβλημάτων ακτινοβολίας σε κλιβάνους. Βασίζεται στην επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς της ακτινοβολίας, για αντιπροσωπευτικές διευθύνσεις δεσμών ακτίνων, με γνωστές οριακές συνθήκες, και στον μεταγενέστερο υπολογισμό των πηγών ακτινοβολίας στους πεπερασμένους όγκους ελέγχου, λόγω της διέλευσης των δεσμών αυτών. Η μέθοδος αυτή είναι ακριβής και εφαρμόζεται σε σύνθετες γεωμετρίες, αλλά απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους.

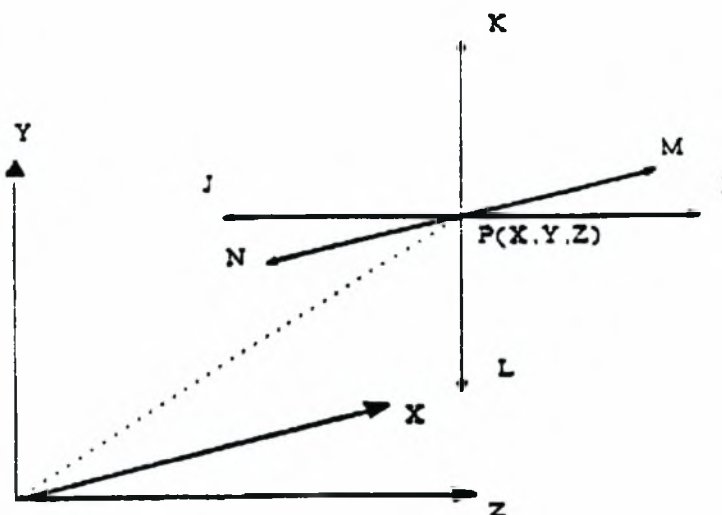
Η Μέθοδος Διάχυσης σε Συνθήκες μη Ισορροπίας

Το μοντέλο αυτό είναι απλό μοντέλο ακτινοβολίας και με ελάχιστες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, που ενσωματώνει την εφαρμογή της θεωρίας της διάχυσης σε συνθήκες μη ισορροπίας, για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κλιβάνους. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μετατροπή της ολοκληρωτικής εξίσωσης από ένα πρόβλημα μη τοπικού

πεδίου σε ένα πρόβλημα τοπικού πεδίου, και έτσι αυτή μετατρέπεται σε μία δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση τύπου διάχυσης. Αν και η μέθοδος αυτή είναι προσεγγιστική, οδηγεί τελικά σε ικανοποιητικές λύσεις. Το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου έχει διευρυνθεί καθώς έχει εισαχθεί η απορρόφηση - η εκπομπή - η σκέδαση για διφασικό μέσο (σωματίδια και αέρια), για υπολογισμούς ακτινοβολίας σε χώρους καύσης που χρησιμοποιούν κονιοποιημένο κάρβουνο.

Το Μονοφασικό Μοντέλο Ακτινοβολίας Έξι Ανηγμένων Ροών

Το μοντέλο αποτελείται από τρεις δευτεροβάθμιες διαφορικές εξισώσεις για τις έξι ανηγμένες μεταβλητές της ακτινοβολίας, σ' ένα ημιπερατό μέσο. Σ' αυτό το μοντέλο μελετώνται οι ανηγμένες ροές I+J , K+L , M+N (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1 : Ανηγμένες ροές ακτινοβολίας σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Στο παραπάνω Σχήμα, I και J είναι η ανηγμένη ροή ακτινοβολίας στη θετική και αρνητική z διεύθυνση αντίστοιχα, ενώ K και L, M και N οι αντίστοιχες ανηγμένες ροές στην y και x διεύθυνση.

Το μονοφασικό μοντέλο έξι ανηγμένων ροών περιγράφεται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις :

$$\bullet \frac{dM}{dx} = -(a + s)M + aE + \frac{s}{6}(I + J + K + L + M + N) \quad (35a)$$

$$\bullet \frac{dN}{dx} = (a + s)N - aE - \frac{s}{6}(I + J + K + L + M + N) \quad (35b)$$

$$\bullet \frac{dK}{dx} = -(a+s)K + aE + \frac{s}{6}(I+J+K+L+M+N) \quad (35c)$$

$$\bullet \frac{dL}{dx} = (a+s)L - aE - \frac{s}{6}(I+J+K+L+M+N) \quad (35d)$$

$$\bullet \frac{dI}{dx} = -(a+s)I + aE + \frac{s}{6}(I+J+K+L+M+N) \quad (35e)$$

$$\bullet \frac{dJ}{dx} = (a+s)M - aE - \frac{s}{6}(I+J+K+L+M+N) \quad (35f)$$

Όπου:

a = συντελεστής απορρόφησης

s = συντελεστής σκέδασης

$E = \sigma(T_1)^4$ ισχύ εκπομπής του μέλανος σώματος.

Με συνδυασμό των εξισώσεων (35a) έως (35f) εξάγονται οι παρακάτω δευτεροβάθμιες εξισώσεις :

$$\bullet \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{a+s} \frac{d}{dx} (M+N) \right] = -2aE + \left(a + \frac{2s}{3} \right) (M+N) - \frac{s}{3} (I+J+K+L) \quad (36)$$

$$\bullet \frac{d}{dy} \left[\frac{1}{a+s} \frac{d}{dy} (K+L) \right] = -2aE + \left(a + \frac{2s}{3} \right) (K+L) - \frac{s}{3} (I+J+K+L) \quad (37)$$

$$\bullet \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{a+s} \frac{d}{dz} (I+J) \right] = -2aE + \left(a + \frac{2s}{3} \right) (I+J) - \frac{s}{3} (I+J+K+L) \quad (38)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε μονοφασικά προβλήματα , δηλαδή μόνο για αέρια ή μόνο για σωματίδια είναι δυνατόν να εκφραστούν με τη γενικευμένη μορφή της εξίσωσης διατήρησης για μόνιμη κατάσταση, θέτοντας όλους τους όρους συναγωγής και διάχυσης στις διευθύνσεις πέραν εκείνης για την οποία λύνεται, ίσους με μηδέν. Δηλαδή για την διεύθυνση x_1 έχουμε :

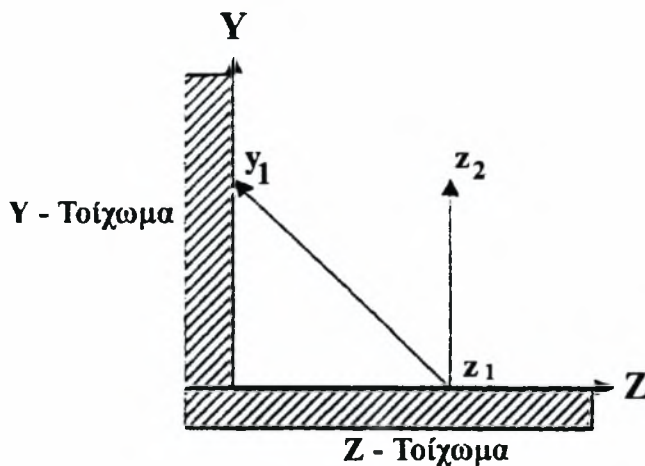
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_{ij} \rho_i u_{ij} \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_1} (\Gamma_{\Phi, \text{eff}} \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}) - \frac{\partial}{\partial x_2} (\Gamma_{\Phi, \text{eff}} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2}) - \frac{\partial}{\partial x_3} (\Gamma_{\Phi, \text{eff}} \frac{\partial \Phi}{\partial x_3}) = S_{\Phi} \quad (39)$$

Αν θέσουμε $R_x = M + N$, $R_y = K + L$, $R_z = I + J$, τότε ο ενεργός συντελεστής μεταφοράς $\Gamma_{\Phi, \text{eff}}$ και η πηγή S_{Φ} , για τις ανηγμένες ροές ακτινοβολίας ($\Phi = R_{x1}$), δίνονται από τις σχέσεις
 Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

$$\Gamma_{R_{x1,eff}} = -\frac{1}{a+s} \quad (40)$$

$$S_{R_{x1}} = -2aE + (a + \frac{2s}{3})R_{x1} - \frac{s}{3}(R_x + R_y + R_z - R_{x1}) \quad (41)$$

Το μοντέλο των έξι ανηγμένων ροών, όπως και αυτά των τεσσάρων και των δύο ανηγμένων ροών, εφαρμόζεται μόνο όταν το μέσο (αέρια φάση, σωματίδια) είναι μη διαπερατό. Με απουσία σκέδασης και απορρόφησης, η ακτινοβολία μεταδίδεται από το σημείο z_1 μόνο στο σημείο z_2 και όχι στο y_1 , λόγω της μονοδιάστατης διατύπωσης των παραπάνω εξισώσεων (Σχήμα 3-2). Ο μόνος τρόπος για να προσπέσει η ακτινοβολία από το y -τοίχωμα στο z -τοίχωμα είναι με απορρόφηση και σκέδαση μέσω του αερίου.



Σχήμα 3-2: Μονοδιάστατη μορφή του μοντέλου ακτινοβολίας έξι ανηγμένων ροών.

Η επίδραση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία στον χώρο καύσης, εκφράζεται στην εξίσωση διατήρησης με έναν όρο πηγής ανάλογο προς την τέταρτη δύναμη της τοπικής θερμοκρασίας. Η επίδραση των ανηγμένων ροών ακτινοβολίας στην ενθαλπία στασιμότητας δίνεται από την σχέση :

$$Q_r = a (R_x + R_y + R_z) - 6aE \quad (42)$$

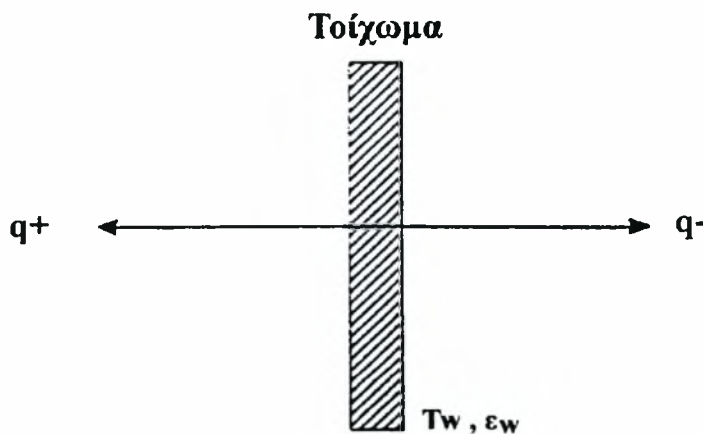
Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ακτινοβολίας έξι ανηγμένων ροών, προκύπτει από τις ακόλουθες παραδοχές :

- Το όριο (π.χ. τοίχωμα) είναι μη διαπερατό στην ακτινοβολία,
- Το όριο είναι γκριζο
- Η επιφάνεια διαχέει, εκπέμπει και ανακλά.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ανηγμένη θερμική ροή, q^- στο Σχήμα 3-3, που εγκαταλείπει την επιφάνεια του ορίου οφείλεται στην εκπομπή ή και την ανάκλαση της ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$q^- = (1 - \epsilon_w) q^+ + \sigma \epsilon_w (T_w)^4 \quad (43)$$

Όπου, ϵ_w , ο συντελεστής εκπομπής του ορίου και T_w , η θερμοκρασία του ορίου.



Σχήμα 3-3 : Ροές ακτινοβολίας στο τοίχωμα

Αν θεωρήσουμε τις ανηγμένες ροές ακτινοβολίας κατά την z διεύθυνση ισχύει $q^- = J_w$, και $q^+ = I_w$. Η εξίσωση (47) γίνεται : $J_w = \epsilon_w \sigma T_w^4 + (1 - \epsilon_w) I_w$ και αφού $R_{z,w} = I_w + J_w$

προκύπτει :

$$I_w = \frac{R_{z,w} - \varepsilon_w \sigma T_w^4}{2 - \varepsilon_w} \quad (44)$$

$$J_w = \frac{R_{z,w}(1 - \varepsilon_w) + \varepsilon_w \sigma T_w^4}{2 - \varepsilon_w} \quad (45)$$

Εισάγοντας τις σχέσεις (44) και (45) στις εξισώσεις (35e) και (35f), εξάγεται η κλίση της ανηγμένης ροής R_z στο όριο (τοίχωμα) :

$$\left. \frac{dR_z}{dz} \right|_{\text{οριο}} = (2\sigma T_w^4 - R_{z,w}) \frac{\varepsilon_w}{2 - \varepsilon_w} \quad (46\alpha)$$

Παρόμοια εξάγονται και οι υπόλοιπες οριακές συνθήκες για τις ανηγμένες ροές R_y, R_x (τοίχωμα, είσοδος ή έξοδος) και έχουμε :

$$\left. \frac{dR_y}{dy} \right|_{\text{οριο}} = (2\sigma T_w^4 - R_{y,w}) \frac{\varepsilon_w}{2 - \varepsilon_w} \quad (46\beta)$$

$$\left. \frac{dR_x}{dx} \right|_{\text{οριο}} = (2\sigma T_w^4 - R_{x,w}) \frac{\varepsilon_w}{2 - \varepsilon_w} \quad (46\gamma)$$

3.4 Μοντέλα Τυρβώδους μεταφοράς

3.4.1 Επιμερισμός Reynolds

Η στατιστική θεωρία για την περιγραφή των τυρβωδών ροών βασίζεται στον επιμερισμό Reynolds κατά τον οποίον η στιγμιαία μεταβολή μίας μεταβλητής της ροής επιμερίζεται ως εξής:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \varphi' \quad (47)$$

όπου, $\bar{\Phi}$ = μέση χρονική τιμή, και

φ' = η απόκλιση από την μέση τιμή

Εάν εφαρμοστεί ο επιμερισμός Reynolds στις εξισώσεις μεταφοράς (Navier-Stokes) διατηρώντας σταθερή την πυκνότητα, προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{\Phi}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{U}\Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r\bar{V}\Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho \frac{\bar{W}}{r} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \theta}) = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x} - \overline{\rho u' \phi'}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma_{\phi} r \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial r} - \overline{\rho v' \phi'}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \theta} - \overline{\rho w' \phi'}) + S^{\phi} \end{aligned} \quad (48)$$

Οι όροι που εμφανίζονται είναι ίδιοι με αυτούς της εξίσωσης (1) με εξαίρεση την εμφάνιση νέων όρων που απορρέουν από τους όρους συναγωγής ως αποτέλεσμα της μη γραμμικότητάς των. Οι όροι αυτοί αποτελούν τον τανυστή συσχέτισης των τυρβωδών διαταράξεων και εκφράζουν την πρόσθετη μεταφορά της ιδιότητας της ροής, Φ , λόγω της τύρβης. Ο τανυστής $\underline{\underline{R}} = \overline{\rho \bar{v}' \otimes \bar{v}'}$ ονομάζεται τανυστής τάσεων Reynolds και η πλήρης ανάπτυξη έχει την παρακάτω μορφή:

$$\underline{\underline{R}} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{v'u'} & \overline{w'u'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{w'v'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (49)$$

Η κλίση του τανυστή Reynolds αντιστοιχεί σε πρόσθετη μεταφορά της ιδιότητας Φ και οφείλεται στις διαταραχές της τύρβης. Στο τυρβώδες οριακό στρώμα η μοριακή διάχυση είναι αμελητέα σε σύγκριση με την κλίση του τανυστή Reynolds με αποτέλεσμα η μεταφορά λόγω τύρβης να είναι μεγαλύτερη από την μοριακή διάχυση. Οι τάσεις διακρίνονται σε ορθές και διατμητικές.

Η κινητική ενέργεια της τύρβης δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (50)$$

Η μορφή ενός συνοπτικού ισοζυγίου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι:

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\overline{u_i E}] - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} + \nu \cdot \Delta E - \nu \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \right] \quad (51)$$

Ο πρώτος όρος αποτελεί την τυρβώδη διάχυση, ο δεύτερος την παραγωγή τύρβης, ο τρίτος εκφράζει την μοριακή διάχυση και ο τελευταίος την σκέδαση της κινητικής ενέργειας της τύρβης. Από την παρατήρηση του ισοζυγίου τύρβης προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις:

- Το ολοκλήρωμα του όρου της τυρβώδους διάχυσης περιγράφει την μεταφορά τυρβώδους κινητικής ενέργειας στο πεδίο ροής ως συνέπεια των τυρβωδών

διαταράξεων. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια απορρέει από την κινητική ενέργεια της μέσης ροής.

- Η μοριακή διάχυση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι κατά κανόνα αμελητέα.
- Το γινόμενο του αθροίσματος των αυτοσυσχετίσεων και του κινηματικού ιξώδους αντιπροσωπεύει την τυρβώδη σκέδαση ϵ , που είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Σε περίπτωση μόνιμης ομοιογενούς τυρβώδους ροής παρατηρείται ισορροπία μεταξύ παραγωγής και σκέδασης.

Ισοζύγια όπως το παραπάνω περιέχουν μεγάλο αριθμό πολύπλοκων τριπλών συσχετίσεων, που εισάγουν νέους αγνώστους διευρύνοντας το πρόβλημα της επίλυσης του συστήματος εξισώσεων. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η εφαρμογή κάποιου "μοντέλου τύρβης"

3.4.2 Φάσμα ενέργειας τυρβώδους ροής

Βασικό μειονέκτημα της στατιστικής περιγραφής των τυρβωδών ροών με επιμερισμό Reynolds είναι ότι αγνοεί τις φασματικές ιδιότητες της τύρβης. Η κινητική ενέργεια της τύρβης αποθηκεύεται σε δίνες, των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από το χαρακτηριστικό μήκος ροής, L (Με την βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης μπορεί να υπολογιστεί κατά

προσέγγιση ότι $L = \frac{E^{3/2}}{\epsilon}$, $\eta = \sqrt[4]{\left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)}$. Ο λόγος των χαρακτηριστικών μεγεθών L και η

συνδέεται με τον αριθμό Reynolds $\frac{L}{\eta} \approx Re^{3/4}$).

Το μήκος αυτό χαρακτηριστικό μέγεθος των δινών της τύρβης το μέγεθος των οποίων εκτείνεται μέχρι το μήκος η , μετά το οποίο επέρχεται σκέδαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω μοριακών φαινομένων εσωτερικής τριβής.

Γενικά, η τυρβώδης κινητική ενέργεια που προκύπτει από την κινητική ενέργεια της μέσης ροής διατρέχει το σύνολο του φάσματος της ενέργειας με δεδομένο τον καταμερισμό των δινών σε μικρότερες. Η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ως προς το μέγεθος των δινών, δηλαδή το φάσμα ενέργειας της τυρβώδους κινητικής ενέργειας συνήθως δίνεται

ως συνάρτηση του αντιστρόφου του μεγέθους των δινών, του λεγόμενου κυματαριθμού K . Οπότε, η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι ίση με το ολοκλήρωμα της φασματικής κατανομής:

$$E = \int_0^{\infty} F(K) dK \quad (52)$$

3.4.3 Μοντέλα προσομοίωσης τύρβης

Οι προσομοιώσεις με μοντέλα τύρβης που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι πρακτικά ανέφικτο να εφαρμοστούν για την περιγραφή τυρβωδών ροών μεταφοράς, γιατί απαιτούνται υπέρογκα υπολογιστικά πλέγματα, που σημαίνουν τεράστια υπολογιστική μνήμη και ισχύ καθώς και μεγάλους χρόνους εκτέλεσης.

Τα φασματικά μοντέλα τύρβης παρά τα σαφή πλεονεκτήματα που έχουν, δεν απέκτησαν την ανάλογη προσοχή. Αυτά τα μοντέλα επιχειρούν την περιγραφή της τύρβης με βάση την φασματική κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Όμως είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν μια σειρά πληροφοριών σχετικά με την εξάρτηση των τυρβωδών ιδιοτήτων από τον κυματαριθμό, που δεν είναι διαθέσιμες για κάθε περίπτωση.

Επομένως, οι περισσότερες περιπτώσεις των τυρβωδών ροών περιγράφονται με την βοήθεια των στατιστικών μοντέλων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η φασματική φύση της τύρβης. Τα στατιστικά μοντέλα διακρίνονται ως προς το επίπεδο μοντελοποίησης δηλαδή ως προς το είδος και τον αριθμό των συσχετίσεων που υπολογίζονται με την βοήθεια των πρόσθετων διαφορικών εξισώσεων.

Τα μοντέλα δεύτερης τάξης (που ονομάζονται και μοντέλα τάσεων Reynolds) περιλαμβάνουν πρόσθετα ισοζύγια για κάθε τάση Reynolds. Πλεονέκτημα των μοντέλων δεύτερης τάξης είναι ότι σ' αυτά περιγράφονται ικανοποιητικά πολλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της τύρβης όπως, η ανακατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και οι διαφορές στον ρυθμό παραγωγής κινητικής ενέργειας στις τρεις διευθύνσεις. Οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη καθώς και η χρονική διάρκεια εκτέλεσης αντίστοιχου μοντέλου περιορίζουν την εφαρμογή του. Άλλος ανασταλτικός παράγοντας στην εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου είναι η περιορισμένη γενικότητα της ισχύος του.

Στα στατιστικά μοντέλα πρώτης τάξης ο υπολογισμός των τάσεων Reynolds γίνεται με βάση την θεωρία των βαθμίδων. Οι τυρβώδεις ροές θεωρούνται ανάλογες των βαθμίδων

των μέσων τιμών των μεταφερόμενων μεγεθών, π.χ. στην περίπτωση της ορμής της τυρβώδους ροής, δηλ. της τυρβώδους τάσης είναι:

$$\overline{u_i u_j} = -K_{ij} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{3} \delta_{ij} E \quad (53)$$

(δ_{ij} = Δέλτα Kronecker, $\delta_{ij}=1$ όταν $i=j$ αλλιώς $\delta_{ij}=0$)

Η παραπάνω παραδοχή για τις διατμητικές τάσεις είναι πλήρως ανάλογη του νόμου του Νεύτωνα, ενώ για τις ορθές προϋποθέτει ισοτροπία. Το μέγεθος K_{ij} ονομάζεται συντελεστής τυρβώδους μεταφοράς ορμής ή τυρβώδες ιξώδες, που λαμβάνει στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα χαρακτηριστικές τιμές μεταξύ 0,1 και 100 m^2/s . Το τυρβώδες ιξώδες είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το μοριακό ιξώδες. Σε αντίθεση με αυτό, το τυρβώδες ιξώδες δεν αντιπροσωπεύει ιδιότητα του ρευστού, αλλά χαρακτηρίζει την τοπική ένταση της τύρβης και κατά συνέπεια υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές στο χώρο που έχει η τυρβώδες ροή.

Τα μοντέλα τύρβης πρώτης τάξης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον αριθμό των πρόσθετων διαφορικών εξισώσεων που επιλύονται για τον υπολογισμό του τυρβώδους ιξώδους. Ένα από τα μοντέλα αυτά είναι και μοντέλο μηδέν εξισώσεων όπου το τυρβώδες ιξώδες υπολογίζεται από την αλγεβρική παραμετροποίηση. Δηλαδή το ιξώδες υπολογίζεται αποκλειστικά και μόνο από αλγεβρικές εξισώσεις ως συνάρτηση υφισταμένων μεταβλητών. Το μειονέκτημα της μεγάλης απλούστευσης αντισταθμίζεται από την ευελιξία και την απλότητα εφαρμογής των μηδέν εξισώσεων.

Άλλο μοντέλο είναι το μοντέλο της μιας εξίσωσης, όπου επιλύεται το ισοζύγιο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας με κατάλληλη παραμετροποίηση των όρων τυρβώδους διάχυσης και σκέδασης. Ο πρώτος όρος διαμορφώνεται με την βοήθεια της θεωρίας των βαθμίδων και ο δεύτερος από την σχέση που ακολουθεί:

$$\epsilon = \frac{E^2}{l} \quad (54)$$

Το τυρβώδες ιξώδες συνήθως υπολογίζεται από την έκφραση:

$$K_m = C_\mu \sqrt{E} \cdot l \quad (C_\mu = 0,09) \quad (55)$$

Στις δύο παραπάνω σχέσεις το μέγεθος l αποτελεί μια χαρακτηριστική κλίμακα μήκους τύρβης, που για τον προσδιορισμό της γίνεται χρήση καθαρά εμπειρικών σχέσεων.

Στα μοντέλα δύο εξισώσεων αποφεύγεται η δυσκολία του καθορισμού της κλίμακας μήκους με την επίλυση μιας πρόσθετης διαφορικής εξίσωσης. Παρότι η πρόσθετη εξίσωση μπορεί να εκφραστεί ως προς την ίδια κλίμακα μήκους, συνήθως διατυπώνεται ως προς την μεταβλητή $E^m I^n$. Αν $m = 3/2$ και $n = -1$, τότε η μεταβλητή αυτή είναι ίδια με την σκέδαση και σημειώνεται η περίπτωση του γνωστού μοντέλου $k-\epsilon$.

Οι μέχρι τώρα παρατηρήσεις με μοντέλα μιας ή και δύο εξισώσεων δείχνουν ότι δικαιολογούν την επιπλέον δαπάνη χρόνου και μνήμης H/Y που απαιτούν σε σχέση με τα μοντέλα μηδέν εξισώσεων καθώς η βελτίωση της περιγραφής των ατμοσφαιρικών τυρβωδών ροών είναι σημαντική.

3.4.4 Το $k-\epsilon$ μοντέλο τύρβης

Σε ροές με υψηλό αριθμό Reynolds η εξίσωση μεταφοράς για την κινητική ενέργεια της τύρβης λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\underbrace{\frac{\partial \overline{rk}}{\partial t}}_{\text{Ρυθμός Μεταβολής}} + \underbrace{\frac{\partial \overline{\rho u_i k}}{\partial x_i}}_{\text{'Advection'}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j k'} + \overline{\rho' u_j k})}_{\text{Διάχυση}} - \underbrace{\overline{\rho u_i u_j'}}_{\text{Παραγωγή}} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \underbrace{\mu \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j}}_{\text{Σκέδαση}} \quad (56)$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής, ο δεύτερος την 'advection', 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 βαθμίδα (gradient) της μέσης κινητικής ενέργειας της τύρβης.

$$- (\overline{\rho u_j k'} + \overline{\rho' u_j k}) = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (57)$$

όπου, σ_k είναι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl για την διάχυση την τυρβώδους ενέργειας..

- Παραγωγή: Οι τάσεις Reynolds προσομοιώνονται με τη γενική έννοια του τυρβώδους ιξώδους.

$$- \overline{\rho u_i u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (58)$$

Οι όροι σκέδασης γίνονται:

$$\mu \frac{\overline{\partial u_i'}}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} = \rho \epsilon \quad (59)$$

Η μοντελοποιημένη εξίσωση μεταφοράς της κινητικής ενέργειας της τύρβης, k , παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{3}{2} k \delta_{ij} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (60)$$

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

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής}} + \underbrace{\frac{\partial \rho \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j}}_{\text{Advection}} = \underbrace{-2\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_1} \frac{\partial u_j'}{\partial x_1} + \frac{\partial u_i'}{\partial x_i} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)}_{\text{Παραγωγή}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_1} \frac{\partial u_j'}{\partial x_1}}_{\text{Επίδραση Τύρβης}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j' \epsilon' + 2\nu \frac{\partial \rho}{\partial x_1} \frac{\partial u_j'}{\partial x_1} \right)}_{\text{Διάχυση}} - \underbrace{2\mu \left(\nu \frac{\partial^2 u_i'}{\partial x_j \partial x_i} \right)^2}_{\text{Σκέδαση}} \quad (61)$$

όπου ϵ' είναι η στιγμιαία σκέδαση της κινητικής ενέργειας της τύρβης.

Οι όροι μοντελοποιούνται ακολούθως :

- Παραγωγή: Οι όροι παραγωγής σχετίζονται με τις τάσεις Reynolds

$$c_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \rho \bar{u}_i' u_j' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (62)$$

- Επίδραση και Σκέδαση: Οι όροι της επίδρασης και της σκέδασης της τύρβης μοντελοποιούνται μαζί

$$\rho c_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (63)$$

- Διάχυση: Ο όρος της διάχυσης σχετίζεται με την βαθμίδα της σκέδασης

$$\rho \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \quad (64)$$

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

Η εξίσωση μεταφοράς που προσομοιώνεται, γίνεται:

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho c_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (65)$$

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

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (66)$$

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

$$\frac{\partial \rho \bar{\Phi}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{\Phi}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_j} \right) + F_\Phi \quad (67)$$

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

3.4.5 Ροές με μικρό αριθμό Reynolds

Οι παρακάτω όροι προστίθενται στο δεξιό μέρος αυτών των εξισώσεων για ροές με μικρό αριθμό Reynolds.

k-Εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - 2\mu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_j} \right)^2 \quad (68)$$

ε-Εξίσωση

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - 2\mu \mu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_l} \right)^2 \quad (69)$$

Σταθερές Μοντέλου

$$C_\mu=0,09 \quad C_1=1,44 \quad C_2=1,92 \quad \sigma_\kappa=1,0 \quad \sigma_\epsilon=1,3$$

4. ΑΡΙΘΜΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αυτό το Κεφάλαιο περιγράφει τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να εξαχθούν οι εξισώσεις των πεπερασμένων όγκων από τις θεμελιώδεις εξισώσεις της διατήρησης. Παράλληλα, περιγράφεται η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων αυτών που ακολουθείται στον κώδικα υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής DIAN3D που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

4.1 Μέθοδοι Αριθμητοποίησης

Το πεδίο λύσης χωρίζεται σε πεπερασμένους όγκους ελέγχου, το σύνολο των οποίων συνθέτουν το υπολογιστικό πλέγμα. Οι αλγεβρικές εξισώσεις των πεπερασμένων όγκων που αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις μερικές διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς λαμβάνονται με ολοκλήρωση στους όγκους ελέγχου.

4.1.1 Υπολογιστικό Πλέγμα

Το υπολογιστικό πλέγμα του κώδικα DIAN3D αντιστοιχεί σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές πολικές συντεταγμένες. Τα δύο αυτά πλέγματα είναι βασικά ορθογωνικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1.

Κάθε υπολογιστικό πλέγμα έχει :

- L κελιά στη x κατεύθυνση (I - κατεύθυνση)
- M κελιά στη y κατεύθυνση (J - κατεύθυνση)
- N κελιά στη z κατεύθυνση (K - κατεύθυνση)

Για καρτεσιανά πλέγματα, οι διευθύνσεις (x,y,z) είναι ανεξάρτητες και μπορούν να πάρουν όποια γεωμετρική κατεύθυνση επιλεγεί από το χρήστη. Για κυλινδρικά, πολικά πλέγματα, ακολουθείται η παρακάτω συνθήκη:

Κατεύθυνση Πλέγματος	Γεωμετρική Κατεύθυνση
x - I	Αξονική
y - J	Ακτινική
z - K	Περιφερειακή

Για δισδιάστατα προβλήματα, η λύση λαμβάνεται στο (x, y) επίπεδο ενώ το πλέγμα επεκτείνεται μόνο σε μια σειρά κελιών στη κατεύθυνση z. Ο κώδικας DIAN3D ελέγχει για αυτή την περίπτωση και αυτόματα αλλάζει το πλέγμα από τρισδιάστατο σε δισδιάστατο.

Κάθε πεπερασμένος όγκος αποτελεί ένα "υπολογιστικό κύτταρο" το οποίο χρησιμοποιείται στην ολοκλήρωση των θεμελιωδών εξισώσεων. Οι ιδιότητες του ρευστού και οι βαθμωτές ιδιότητες της ροής αναφέρονται (αποθηκεύονται) στο κέντρο των κελιών. Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας αναφέρονται στις πλευρές των κελιών και σχηματίζουν ένα ανισοκατανομημένο 'straggered' πλέγμα. Ένα τμήμα του πλέγματος με τα υπολογιστικά κελιά στο επίπεδο (x,y) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-2 και στο (x,z) επίπεδο στο Σχήμα 4-3. Πρέπει να τονιστεί ότι η ανισοκατανομή του πλέγματος, έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικά υπολογιστικά κελιά για τις βαθμωτές εξισώσεις μεταφοράς από ότι για τις διανυσματικές εξισώσεις της ορμής.

Το κεντρικό σημείο P για κάθε υπολογιστικό κελί έχει έξι γειτονικά σημεία για τρισδιάστατο και τέσσερα για δισδιάστατο πλέγμα. Οι συμβολισμοί που εισάγονται για να καθορίσουμε τα γειτονικά σημεία δίνονται παρακάτω :

Συμβολισμός	Έννοια	Κατεύθυνση	Τοποθεσία
W	West - Δυτικό	x-	x-Δx
E	East - Ανατολικό	x+	x+Δx
S	South - Νότιο	y-	y-Δy
N	North - Βόρειο	y+	y+Δy
L	Low - Χαμηλό	z-	z-Δz
H	High - Ψηλό	z+	z+Δz

Οι όψεις των κελιών συμβολίζονται παρόμοια αλλά με πεζά γράμματα : w , e , s , n , l , h

4.1.2 Εξισώσεις πεπερασμένων όγκων

Οι εξισώσεις πεπερασμένων όγκων σχηματίζονται με ολοκλήρωση μέσω των υπολογιστικών κυττάρων (κελιών) όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-2 & 4-3. Στην παρούσα αριθμητική ολοκλήρωση υιοθετείται ένα "implicit upwind" πλήρως συντηρητικό αριθμητικό σχήμα.. Η διαδικασία ολοκλήρωσης καταλήγει στην παρακάτω αλγεβρική εξίσωση για κάθε μεταβλητή της ροής σε κάθε υπολογιστικό κύτταρο :

$$A_p \Phi_p = A_w \Phi_w + A_E \Phi_E + A_S \Phi_S + A_N \Phi_N + A_L \Phi_L + A_H \Phi_H + S_\Phi + A_T^0 \Phi^0 \quad (73)$$

όπου:

A_i = Συντελεστής που συνδυάζει τις επιδράσεις συναγωγής και διάχυσης της ροής

Φ_i = Τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής για τα γειτονικά σημεία

S_Φ = Πηγαίος όρος για τη συγκεκριμένη εξίσωση μεταφοράς

A_T^0 = Χρονικά εξαρτώμενος συντελεστής

Φ^0 = Η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο προηγούμενο χρονικό βήμα

Ο πηγαίος όρος, S_Φ , υπολογίζεται από τη γραμμική σχέση, ως εξής:

$$S_\Phi = SU + SP\Phi_p \quad (74)$$

Ο κεντρικός συντελεστής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_p = A_w + A_E + A_S + A_N + A_L + A_H + A_T - SP \quad (75)$$

Ο χρονικά εξαρτώμενος συντελεστής, A_T , είναι μηδέν για σταθερές ροές ενώ για χρονικά μεταβαλλόμενες ροές υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$A_T = \rho \text{VOL} / \Delta_t \quad (76)$$

όπου: ρ = πυκνότητα του ρευστού

VOL = όγκος του κελιού

Δ_t = χρονικό βήμα ολοκλήρωσης

Οι ρυθμοί ροής C_i διαμέσου της επιφάνειας των κελιών υπολογίζονται ως εξής:

$$C_w = (\rho UA)_w \quad (77a)$$

$$C_e = (\rho UA)_e \quad (77b)$$

$$C_s = (\rho VA)_s \quad (77c)$$

$$C_n = (\rho VA)_n \quad (77d)$$

$$C_l = (\rho WA)_l \quad (77e)$$

$$C_h = (\rho WA)_h \quad (77f)$$

όπου: A = επιφάνεια του κελιού

ρ = ενεργή ανάντη (upwinded) πυκνότητα

$$\rho_w = \rho_w \text{ εάν } U_w > 0 \text{ ή } \rho_w = \rho_p \text{ εάν } U_w < 0 \quad (78)$$

$$\rho_e = \rho_p \text{ εάν } U_e > 0 \text{ ή } \rho_e = \rho_E \text{ εάν } U_e < 0 \quad (79)$$

Οι ρυθμοί διάχυσης, D_i , διαμέσου της επιφάνειας των κελιών υπολογίζονται από τον τύπο :

$$D_i = \left(\frac{A \Gamma_\Phi}{\Delta x_i} \right)_i \quad (80)$$

όπου: A = εμβαδόν της επιφάνειας του κελιού

Δx_i = απόσταση του σημείου P από τα γειτονικά του

Γ_Φ = συντελεστής μεταφοράς για την μεταβλητή Φ

Επειδή τα υπολογιστικά κελιά είναι διαφορετικά για τις βαθμωτές εξισώσεις και τις εξισώσεις της ορμής, οι αντίστοιχοι συντελεστές είναι διαφορετικοί. Η ολοκλήρωση των βαθμωτών εξισώσεων μεταφοράς (όπως ενθαλπία, συγκεντρώσεις, ενέργεια τύρβης, ρυθμός σκέδασης κτλ.) γίνεται με τα Φ κελιά όπως υποδεικνύεται στα Σχήματα 4-2 & 4-3. Η ολοκλήρωση των διανυσματικών εξισώσεων ορμής (x, y, z και ορμή) γίνεται με τα U, V, W κελιά όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-2 & 4-3. Οι συντελεστές A_i υπολογίζονται με το "upwind" ή με το "hybrid" σχήμα διακριτοποίησης όπως, φαίνεται παρακάτω :

Σχήμα ανάντη "Upwind" διαφορών

$$A_w = [0, D_w, D_w + C_w] \quad (81a)$$

$$A_e = [0, D_e, D_e - C_e] \quad (81b)$$

$$A_s = [0, D_s, D_s + C_s] \quad (81c)$$

$$A_N = [0, D_n, D_n - C_n] \quad (81d)$$

$$A_L = [0, D_l, D_l + C_l] \quad (81e)$$

$$A_H = [0, D_h, D_h - C_h] \quad (81f)$$

Όπου τα σύμβολα $[X, Y, Z]$ δηλώνει τα μέγιστα μεταξύ των τιμών X, Y, Z .

Σχήμα υβριδικών "Hybrid" διαφορών

$$A_W = [0, C_w, D_w + C_w/2] \quad (82a)$$

$$A_E = [0, -C_e, D_e - C_e/2] \quad (82b)$$

$$A_S = [0, C_s, D_s + C_s/2] \quad (82c)$$

$$A_N = [0, -C_n, D_n - C_n/2] \quad (82d)$$

$$A_L = [0, C_l, D_l + C_l/2] \quad (82e)$$

$$A_H = [0, -C_h, D_h - C_h/2] \quad (82f)$$

4.1.3 Εξίσωση διόρθωσης της πίεσης

Η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης προκύπτει από την αρχή διατήρησης της μάζας για κάθε υπολογιστικό κελί. Το πεδίο ταχυτήτων που προκύπτει από τη λύση των αντίστοιχων εξισώσεων της ορμής ικανοποιεί τη διατήρηση της ορμής για κάθε υπολογιστικό κελί ενώ δεν ικανοποιεί απαραίτητα τη συνέχεια της μάζας. Επομένως, αναζητούνται διορθώσεις του πεδίου της πίεσης που θα φέρουν αλλαγές στο πεδίο ταχυτήτων έτσι ώστε να ικανοποιηθεί η διατήρηση της μάζας σε κάθε υπολογιστικό κελί. Η εφαρμογή της αρχής της διατήρησης της μάζας σε κάθε υπολογιστικό κελί καταλήγει στην ακόλουθη γενική αλγεβρική εξίσωση για τη διόρθωση της πίεσης :

$$A_P P_P' = A_W P_W' + A_E P_E' + A_S P_S' + A_N P_N' + A_L P_L' + A_H P_H' + S_U + S_O \quad (83)$$

όπου :

A_i = συντελεστής που περιλαμβάνει την συναγωγή

S_U = ανισορροπία (μη διατήρηση) της μάζας σε κάθε κελί

S_O = κύριος όρος της μάζας για κάθε κελί

P_i' = τιμές της διόρθωσης της πίεσης στα γειτονικά σημεία

Ο κεντρικός συντελεστής υπολογίζεται από τη σχέση :

$$A_P = A_W + A_E + A_S + A_N + A_L + A_H \quad (84)$$

Οι συντελεστές A_i για την εξίσωση διόρθωσης της πίεσης υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$A_W = (\rho ADU)_w \quad (85a)$$

$$A_E = (\rho ADU)_e \quad (85b)$$

$$A_S = (\rho ADV)_s \quad (85c)$$

$$A_N = (\rho ADV)_n \quad (85d)$$

$$A_L = (\rho ADW)_l \quad (85e)$$

$$A_H = (\rho ADW)_h \quad (85f)$$

Όπου, A_i = εμβαδόν της επιφάνειας του κελιού

ρ = πυκνότητα του ρευστού

Οι συντελεστές πίεσης, DU_i , υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$DU_w = A_w/A_p \quad (86a)$$

$$DU_e = A_e/A_p \quad (86b)$$

$$DV_s = A_s/A_p \quad (86c)$$

$$DV_n = A_n/A_p \quad (86d)$$

$$DW_l = A_l/A_p \quad (86e)$$

$$DW_h = A_h/A_p \quad (86f)$$

Όπου, A_p , ο κεντρικός συντελεστής προκύπτει από την αντίστοιχη εξίσωση της ορμής.

Μετά τον υπολογισμό των τιμών διόρθωσης της πίεσης, τα πεδία των ταχυτήτων και της πίεσης διορθώνονται ως εξής :

$$U_w = U_w^* + DU_w (P_p' - P_w') \quad (87a)$$

$$U_E = U_E^* + DU_e (P_E' - P_p') \quad (87b)$$

$$V_s = V_s^* + DV_s (P_p' - P_s') \quad (87c)$$

$$V_N = V_N^* + DV_n (P_N' - P_p') \quad (87d)$$

$$W_L = W_L^* + DW_l (P_p' - P_L') \quad (87e)$$

$$W_H = W_H^* + DW_h (P_H' - P_p') \quad (87f)$$

και

$$P = P^* + P' \quad (87g)$$

4.2 Περιγραφή Αριθμητικού Μοντέλου

Οι εξισώσεις πεπερασμένων όγκων λύνονται για τις διαφορές των τιμών μεταξύ των επαναλήψεων παρά για τις απόλυτες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών. Η επίλυση των εξισώσεων μπορεί να γίνει με χρησιμοποίηση ενός από τους τρεις αλγόριθμους που ενσωματώνονται στον κώδικα. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ο SIMPLE, ο Raithby's SIMPLIC και η έκδοση του SIMPLIC της CHAM. Για την λύση των αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφονται στα Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι Point-by-Point, Jacobi ή Alternative Direction Implicit (ADI). Η μέθοδος ADI χρησιμοποιεί συγχρόνως τον αλγόριθμο TDMA και τον κυκλικό αλγόριθμο CTDMA, οι οποίοι εφαρμόζονται στον κώδικα και εξηγούνται παρακάτω.

Λύση Πίνακα με την Μέθοδο Point-by-Point

Οι αλγεβρικές εξισώσεις (73) και (83) λύνονται για κάθε σημείο, P, με την ακολουθία:

$$\Phi_P = \frac{\sum A_i \Phi_i + SU}{A_P} \quad (88)$$

Λύση Πίνακα με τον αλγόριθμο TDMA

Οι αλγεβρικές εξισώσεις (73) και (83) μπορούν να πάρουν μια απλή μορφή κατά μήκος μιας κατεύθυνσης. Για παράδειγμα, κατά μήκος της διεύθυνσης k, η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών παίρνει τη μορφή:

$$A_k \Phi_{k-1} + B_k \Phi_k + C_k \Phi_{k+1} = D_k \quad (89)$$

Τα υπόλοιπα γειτονικά σημεία παραμένουν σταθερά και αφομοιώνονται στο D_k .

Οι συνοριακές συνθήκες είναι : $A_1, C_N = 0$ και $\Phi_1, \Phi_N = \text{γνωστό}$

Η λύση επιτυγχάνεται με δύο βήματα :

- Πρόσω συντελεστής συναρμολόγησης

$$a_k = - C_k / (B_k + A_k a_{k-1}) \quad (90)$$

$$b_k = (D_k - A_k b_{k-1}) / B_k + A_k a_{k-1} \quad \text{για } k = 1, 2, \dots, N \quad (91)$$

- Οπίσω αντικατάσταση τιμών Φ

$$\Phi_N = b_N \quad \text{για } k = N \quad (92)$$

$$\Phi_k = a_k \Phi_{k+1} + b_k \quad \text{για } k = N-1, N-2, \dots, 2 \quad (93)$$

Λύση Πίνακα CTDMA

Ο κυκλικός αλγόριθμος TDMA χρησιμοποιείται μόνο όταν υπάρχουν κυκλικά σύνορα στην z-κατεύθυνση του υπολογιστικού πεδίου του DIAN3D. Οι εξισώσεις πεπερασμένου όγκου παίρνουν τη μορφή :

$$A_k \Phi_{k-1} + B_k \Phi_k + C_k \Phi_{k+1} = D_k \quad (94)$$

όπου το $k = 1$ είναι το πρώτο ενώ το $k = N$ είναι το τελευταίο κελί από τα κυκλικά σύνορα.

Η λύση επιτυγχάνεται σε δύο βήματα :

- Πρόσω συντελεστής συναρμολόγησης

$$a_1 = D_1 / B_1 \quad (95a)$$

$$b_1 = C_1 / B_1 \quad (95b)$$

$$c_1 = A_1 / B_1 \quad (95c)$$

$$F_1 = D_N \quad \text{για } k = 1 \quad (95d)$$

$$G_1 = C_N \quad (95e)$$

$$H_1 = B_N \quad (95f)$$

και

$$a_k = (D_k - A_k b_{k-1}) / (B_k - A_k b_{k-1}) \quad (96a)$$

$$b_k = C_k / (B_k - A_k b_{k-1}) \quad (96b)$$

$$c_k = A_k c_{k-1} / (B_k - A_k b_{k-1}) \quad (96c)$$

$$F_k = F_{k-1} - G_{k-1} a_{k-1} \quad \text{για } k = 2, 3, \dots, N \quad (96d)$$

$$G_k = - b_{k-1} G_{k-1} \quad (96e)$$

$$H_k = H_{k-1} - G_{k-1} c_{k-1} \quad (96f)$$

- Οπίσω αντικατάσταση Φ τιμών

Για $k = N$

$$\Phi_N = (F_{N-1} - (G_{N-1} - A_N) c_{N-1}) / (H_{N-1} - (G_{N-1} + A_N)(b_{N-1} + c_{N-1})) \quad (97)$$

και

$$\Phi_k = c_k - b_k \Phi_{k+1} \quad \text{για } k = N-1, N-2, \dots, 2 \quad (98)$$

4.2.1 Έλεγχος σύγκλισης

Στον κώδικα εφαρμόζεται ένας αυτόματος έλεγχος της σύγκλισης, ο οποίος χρησιμοποιεί "χαλάρωση" για να ρυθμίζει την σύγκλιση ενώ ελέγχει συνεχώς τα υπόλοιπα λάθη (residuals) για να καθορίσει εάν η σύγκλιση έχει φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα. Αυτές οι τεχνικές περιγράφονται παρακάτω.

Επίλυση με χαλάρωση

Λόγω της ελλειπτικής φύσης τους, οι θεμελιώδεις εξισώσεις πρέπει να επιλυθούν με μια επαναληπτική μέθοδο, χρησιμοποιώντας τυχαίες αρχικές τιμές για τα πεδία των εξαρτημένων μεταβλητών. Σε μια προσπάθεια να επιταχυνθεί η σύγκλιση, η λύση χρησιμοποιεί γραμμική και αδρανειακή χαλάρωση.

- Γραμμική χαλάρωση

Λαμβάνεται μια καινούργια τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής ως εξής:

$$\Phi^{n+1} = \alpha \Phi^{n+1} + (1-\alpha)\Phi^n \quad (99)$$

όπου, στον εκθέτη φαίνεται η τιμή της επανάληψης και α είναι ο συντελεστής της χαλάρωσης

- Αδρανειακή Χαλάρωση

Ένας αδρανειακός όρος εισάγεται στη θεμελιώδη εξίσωση με την μορφή:

$$(A_p + I_\Phi) \Phi_p = \sum A_i \Phi_i + SU + I_\Phi \Phi_p^* \quad (100)$$

Ο αδρανειακός όρος υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_\Phi = \rho \text{VOL} / \Delta t_F \quad (101)$$

όπου, ρ = πυκνότητα του ρευστού

VOL = όγκος του κελιού, και

Δt_F = ψευδές χρονικό βήμα για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή.

Το ψευδές χρονικό βήμα συνήθως παίρνεται ανάλογα με το χρόνο παραμονής του ρευστού σε κάθε υπολογιστικό κελί.

Παρακολούθηση των υπολοίπων (residuals)

Για κάθε επανάληψη της λύσης, τα υπόλοιπα σφάλματα υπολογίζονται για όλες τις επιλυόμενες εξισώσεις σε κάθε υπολογιστικό κελί με τον παρακάτω τύπο :

$$\epsilon_{\Phi p} = \sum A_i \Phi_i + SU + A_p \Phi_p^* \quad (102)$$

Τα υπόλοιπα σφάλματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παρακάτω μεγεθών τα οποία μπορούν να δώσουν χρήσιμους δείκτες σύγκλισης:

Μέγιστο υπόλοιπο σφάλμα $= \max (\epsilon_{\Phi,ijk})$

Άθροισμα των υπολοίπων σφαλμάτων $= \sum (\epsilon_{\Phi,ijk})$

Άθροισμα των απολύτων υπολοίπων σφαλμάτων = $\sum |\epsilon_{\phi,ijk}|$

Επιπροσθέτως, το μέγεθος των διαφορών ανάμεσα στις Φ τιμές μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων υπολογίζεται ως εξής:

Μέγιστη διαφορά στις Φ τιμές = $\text{Max} |\Phi_i - \Phi_i^*|$

Η λύση συνεχώς παρακολουθείται και εξετάζεται η σύγκλιση όταν όλα τα παραπάνω μεγέθη ικανοποιούν τις τιμές που έχουν καθοριστεί από το χρήστη.

4.2.2 Εξισώσεις Σωματιδίων κατά Lagrange

Οι εξισώσεις Lagrange για την κίνηση των σωματιδίων, τη μεταφορά θερμότητας είναι συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ) οι οποίες μπορούν να διατυπωθούν με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d\Phi_d}{dt} = \frac{1}{A}(\Phi_g - \Phi_d) + B \quad (103)$$

όπου Φ_g και Φ_d είναι οι ιδιότητες Φ για το αέριο και τα σωματίδια, αντίστοιχα, και A και B οι συντελεστές που σχετίζονται με τη διαδικασία προσομοίωσης.

Με την προϋπόθεση ότι το Φ_g παραμένει αμετάβλητο κατά την διάρκεια του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης της εξίσωσης (103), προκύπτει η τιμή νέα Φ_d στο χρόνο $t + \Delta t$:

$$\Phi_d = \Phi_g - (\Phi_g - \Phi_d^*) \exp(-\Delta t/A) + A B (1 - \exp(-\Delta t/A)) \quad (104)$$

όπου, Δt = χρονικό βήμα ολοκλήρωσης, και

Φ_d^* = παλιά τιμή Φ στο χρόνο t .

Ο συντελεστής A αντιστοιχεί σε μία χαρακτηριστική κλίμακα χρόνου της διαδικασίας. Το βήμα χρόνου για την ολοκλήρωση λαμβάνεται έτσι ώστε να υπάρχει ένας αριθμός βημάτων ολοκλήρωσης (2 έως 6) πριν το σωματίδιο φύγει από το υπολογιστικό κελί. Το χρονικό βήμα μπορεί να εκτιμηθεί από τον τύπο:

$$\Delta t_E = \frac{1}{N_{\Delta t}} \min\left[\frac{\Delta x}{U_g}, \frac{\Delta y}{V_g}, \frac{\Delta z}{W_g}, \frac{\Delta x}{U_d}, \frac{\Delta y}{V_d}, \frac{\Delta z}{W_d}\right] \quad (105)$$

όπου: $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = διαστάσεις των υπολογιστικών κελιών

U_g, V_g, W_g = συνιστώσες της ταχύτητας της αέριας φάσης

U_d, V_d, W_d = συνιστώσες της ταχύτητας των σωματιδίων

$N_{\Delta t}$ = αριθμός χρονικών βημάτων για κάθε κελί

Άλλες εκτιμήσεις για το απαραίτητο χρονικό βήμα μπορεί να εξαχθούν από τον συντελεστή A των εξισώσεων ενέργειας και ορμής του σωματιδίου (Εξ. 103). Δηλώνοντας αυτή τη εκτίμηση του χρονικού βήματος ως Δt_h , τα πραγματικά χρονικά βήματα των σωματιδίων είναι:

$$\Delta t^* = \min [\Delta t_E, \Delta t_h] \quad (106)$$

Αφού υπολογιστούν οι νέες συνιστώσες της ταχύτητας στο χρόνο $t + \Delta t$, η νέα θέση του σωματιδίου υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x = x^* + (U_d^* + U_d)\Delta t/2 \quad (107a)$$

$$y = y^* + (V_d^* + V_d)\Delta t/2 \quad (107b)$$

$$z = z^* + (W_d^* + W_d)\Delta t/2 \quad (107c)$$

όπου ο αστερίσκος (*) αναφέρεται σε ποσότητες στον παλιό χρόνο t.

Ο αριθμός των σφαιρικών σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου με μέγεθος D_i για κάθε υπολογιστικό σωματίδιο δίνεται από:

$$\dot{N}_i = \frac{\dot{m}_d \cdot m_i}{\rho \frac{\pi}{6} D_i^3} \quad (108)$$

όπου, \dot{m}_d = ρυθμός ροής της μάζας του ψεκασμού και

m_i = κλάσμα της μάζας του i-σωματιδίου.

Η κατανομή των μεγεθών των σωματιδίων μπορεί να είναι κανονική, λογαριθμική κανονική ή καθορισμένη από το χρήστη. Η διαφασική μεταφορά μιας συγκεκριμένης ιδιότητας Φ του σωματιδίου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta \Phi = \Delta \Phi_i \cdot N_i \cdot \Delta t \quad (109)$$

όπου, $\Delta \Phi_i$ = διαφασική μεταφορά της ιδιότητας Φ για κάθε σωματίδιο.

Η συνολική διαφασική μεταφορά υπολογίζεται από την άθροιση όλων των σωματιδίων σε όλα τα χρονικά βήματα που κάθε σωματίδιο βρίσκεται σε ένα δεδομένο υπολογιστικό κελί.

4.2.3 Παρουσία Τοιχωμάτων

Οι επιδράσεις των στερεών συνόρων (τοιχωμάτων) εισάγονται μέσω των συναρτήσεων των τοιχωμάτων (wall functions) οι οποίες αναλύονται παρακάτω για κάθε αντίστοιχη εξίσωση μεταφοράς.

• Εξισώσεις ορμής

Η διατμητική τάση στα τοιχώματα η οποία είναι απαραίτητη για την εξίσωση της ορμής της αέριας φάσης υπολογίζεται από τον λογαριθμικό νόμο του τοιχώματος:

$$\tau_w = \rho u_\tau^{*2} = \rho U^2 s \quad (110)$$

όπου, u_τ^* = η ταχύτητα τριβής

s = ο συντελεστής τριβής.

Ο τελευταίος υπολογίζεται από την επαναληπτική λύση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\sqrt{s} = \frac{\kappa}{\ln(1+ERe\sqrt{s})} \quad (111)$$

όπου, $E = 9,793$ και $\kappa = 0,41$ είναι πειραματικά καθορισμένες σταθερές.

Ο τοπικός αριθμός Reynolds δίδεται από την σχέση:

$$Re = \frac{\rho U \Delta y}{\mu} \quad (112)$$

όπου, Δy =κάθετη απόσταση από το τοίχωμα.

Η Εξίσωση (110) εισάγεται στη εξίσωση πεπερασμένων όγκων μηδενίζοντας την τιμή του συντελεστή που ενώνει το σημείο P με το τοίχωμα και προσθέτοντας στο SP τον όρο ($\tau_w A_{wall}$), όπου, A_{wall} το εμβαδόν του τοιχώματος του κελιού.

• Εξίσωση ενέργειας τύρβης

Η τιμή της κινητικής ενέργειας της τύρβης στο γειτονικό κελί του τοιχώματος δίνεται από την τοπική τιμή ισορροπίας:

$$SU_k = 10^{10} k_w \quad (113a)$$

$$\text{όπου, } k_w = C_D^{\frac{1}{2}} u_\tau^{*2} = C_D^{\frac{1}{2}} u^2 s \quad (113b)$$

$$\text{και } SP_k = - 10^{10} \quad (114)$$

• Εξίσωση ρυθμού σκέδασης της τύρβης

Η τιμή του ρυθμού σκέδασης της κινητικής ενέργειας της τύρβης για το γειτονικό κελί του τοιχώματος δίνεται από την τοπική τιμή ισορροπίας:

$$SU_\epsilon = 10^{10} \epsilon_w \quad (115a)$$

$$\text{όπου, } \epsilon_w = \frac{C_D^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa \delta y} \quad (115b)$$

$$\text{και, } SP = - 10^{10} \quad (116)$$

• Εξίσωση θερμικής ενέργειας

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στο τοίχωμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\dot{q}_w = -\frac{\mu y^+}{\sigma_t} \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) + P \right\}^{-1} \frac{\partial T_w}{\partial y} \quad (117)$$

για τυρβώδεις ροές ($y^+ > 11.63$) και

$$\dot{q}_w = -\frac{\mu}{\sigma} \frac{\partial T_w}{\partial y} \quad (118)$$

για στρωτές ροές ($y^+ < 11.63$) αντίστοιχα.

Στις παραπάνω εξισώσεις, $\frac{\partial T_w}{\partial y}$ είναι η θερμοκρασιακή κλίση κάθετα στο τοίχωμα και ο

συντελεστής P δίνεται από την σχέση:

$$P = 9 \left\{ \frac{\sigma}{\sigma_t} - 1 \right\} \left\{ \frac{\sigma}{\sigma_t} \right\}^{-\frac{1}{4}} \quad (119)$$

όπου σ και σ_t είναι ο μοριακός και τυρβώδης αριθμός Prandtl, αντίστοιχα.

Η συντεταγμένη του τοιχώματος y^+ υπολογίζεται από τον τύπο:

$$y^+ = \frac{\rho U \delta y}{\mu} \quad (120)$$

4.3 Περιγραφή Υπολογιστικού Αλγόριθμου

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια σύντομη περιγραφή των κυρίων βημάτων της διαδικασίας επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου. Έχει χωριστεί σε παραγράφους οι οποίες σχετίζονται με τις 'Αρχικές Ενέργειες', τους 'Υπολογισμούς της Αέριας Φάσης' και τους 'Υπολογισμούς Σωματιδίων'. Τα διαγράμματα ροής δίνονται στα Σχήματα 4-4 έως 4-7 για να γίνει κατανοητή η παρακάτω περιγραφή.

4.3.1 Αρχικές Ενέργειες

Η εκτέλεση του κώδικα DIAN3D αρχίζει με την κλήση της ρουτίνας INDEX η οποία διαβάζει το πρώτο μέρος από τα δεδομένα του προβλήματος στο αρχείο DIAN3.D. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται από την INDEX για την εύρεση της διάστασης του αντίστοιχου πίνακα για τις εξαρτημένες και τις βοηθητικές μεταβλητές. Στη συνέχεια η INDEX διαβάζει Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

το δεύτερο μέρος από τα δεδομένα του αρχείου DIAN3.D. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τη στοιχειοθέτηση των ιδιοτήτων, των συνοριακών τιμών και των χαρακτηριστικών του ψεκαστήρα. Όλες οι απαραίτητες διαστάσεις του πλέγματος υπολογίζονται στην ρουτίνα GRID1 και οι αρχικές συνθήκες προσδιορίζονται στις τρεις εισόδους (entries) της ρουτίνας START. Μέρος των αρχικών αποτελεσμάτων δίνονται σε αυτό το σημείο της εκτέλεσης με το κάλεσμα της ρουτίνας OUTPUT.

Εάν η εκτέλεση γίνεται από ένα αρχείο επανεκκίνησης, καλείται η ρουτίνα RTAPE για να διαβάσει τις ιδιότητες και τις τιμές του πεδίου ροής από την προηγούμενη εκτέλεση. Διαφορετικά, για νέα εκτέλεση, εμφανίζεται η επικεφαλίδα του προβλήματος (κλήση της ρουτίνας HEADER), και υπολογίζονται οι αρχικές τιμές του ιξώδους και της πυκνότητας (ρουτίνες VISCO και DENS1) και καθορίζονται οι συνοριακές τιμές (ρουτίνα VELBC). Τελικά, οι ρυθμοί συναγωγής και διάχυσης υπολογίζονται με την κλήση της ρουτίνας FLUX.

4.3.2 Υπολογισμοί της Αέριας Φάσης

Ο βρόγχος χρονικής ολοκλήρωσης (Βρόγχος 40) αγνοείται για προβλήματα μόνιμης ροής. Για κάθε χρονικό βήμα, ο Βρόγχος 60 αντιστοιχεί στο βρόχο τοπικής επανάληψης, στο τέλος του οποίου επιτυγχάνονται τιμές σύγκλισης για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή.

Εάν απαιτούνται υπολογισμοί με ψεκασμό το πρόγραμμα καλεί την κύρια ρουτίνα ψεκασμού SPRAYS. Οι ενέργειες που εκτελούνται με τη ρουτίνα SPRAYS θα αναλυθούν αργότερα. Σε αυτή τη φάση καλείται η ρουτίνα RELXM ώστε να εκτιμηθεί η βέλτιστη χαλάρωση για το παρόν πεδίο ροής. Οι πληροφορίες που συσχετίζονται με τα υπάρχοντα συνοριακά τοιχώματα ενημερώνονται με το κάλεσμα της ρουτίνας WALLS. Στην περίπτωση υπολογισμών τυρβώδους ροής, η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζεται με την ρουτίνα GENK.

Ο κώδικας σε αυτό το σημείο αρχίζει τη συναρμολόγηση και τη λύση των εξισώσεων πεπερασμένων όγκων για όλες τις βαθμωτές εξαρτημένες μεταβλητές με την σωστή σειρά. Η συναρμολόγηση πραγματοποιείται με την ρουτίνα COMPF και εκτελείται για όλα τα υπολογιστικά κελιά. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, η ρουτίνα COMPF καλεί βοηθητικές ρουτίνες για να εκτελέσει συγκεκριμένες εργασίες. Για παράδειγμα, καλείται η BOUND για να θέσει σε εφαρμογή τις συνοριακές συνθήκες, η SOURCE για να συναρμολογήσει τους πηγαίους όρους των εξισώσεων, και η SOLVE για να εκτελέσει του αντιστροφή του πίνακα των εξισώσεων.

Όταν οι βαθμωτές ιδιότητες της ροής εξασφαλιστούν, εκτελείται σε σειρά η συναρμολόγηση και η λύση των εξισώσεων πεπερασμένων όγκων για την εξίσωση της ορμής στις x , y , z κατευθύνσεις. Η συναρμολόγηση πραγματοποιείται στις ρουτίνες COMPU, COMPV, COMPW για όλα τα υπολογιστικά κελιά. Στη συνέχεια, καλούνται διάφορες βοηθητικές ρουτίνες για να θέσουν σε εφαρμογή τις συνοριακές συνθήκες (ρουτίνα BOUND), για να συναρμολογήσουν τους πηγαίους όρους των εξισώσεων (ρουτίνα SOURCE), και για να εκτελεστεί η αντιστροφή του πίνακα των εξισώσεων (ρουτίνα SOLVE). Τελικά, καλείται η VCORR για να ενημερώσει (διορθώσει) τα παλιά πεδία ταχυτήτων.

Επειδή τα πεδία ροής μπορεί να έχουν αλλάξει στη νέα επανάληψη, ενημερώνονται οι πυκνότητες του ρευστού (ρουτίνα DENSE), οι συνοριακές συνθήκες (καλείται η VELBC) και οι ρυθμοί συναγωγής και διάχυσης (καλείται η FLUX). Σε αυτό το σημείο, ο κώδικας εφαρμόζει την συνέχεια της μάζας στην μορφή των εξισώσεων διόρθωσης της πίεσης, καλώντας τη ρουτίνα COMPP. Αυτό έχει ως συνέπεια να καλούνται βοηθητικές ρουτίνες όπως η BOUND και η SOLVE. Μετά τη νέα λύση του πεδίου διόρθωσης της πίεσης, ενημερώνονται οι ταχύτητες, και οι συνοριακές πιέσεις και πυκνότητες. Τελικά, επανεκτιμούνται οι τιμές του ιξώδους και οι ρυθμοί συναγωγής και διάχυσης, καλώντας τις ρουτίνες VISCO και FLUX.

Προαιρετικές πληροφορίες για το επίπεδο της σύγκλισης και τα τυπικά πεδία τιμών μπορούν να τυπωθούν (καλούνται οι ρουτίνες OUTMON και OUTTYP). Μια κλήση της ρουτίνας CHKCNV επιτρέπει το σωστό έλεγχο της σύγκλισης της λύσης. Στην περίπτωση που η λύση δεν συγκλίνει, η εκτέλεση επανέρχεται στο βρόγχο τοπικής επανάληψης (Βρόγχος 60) και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Εάν η λύση έχει συγκλίνει, ο κώδικας εκτυπώνει τις τιμές των εξαρτημένων και βοηθητικών μεταβλητών (καλείται η OUTPRO) και των τιμών που υπολογίστηκαν από τον χρήστη (καλείται η OUTUSR). Τα αποτελέσματα της λύσης σώζονται σε ένα αρχείο δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία ή επανεκκινήσεις. Εάν το πρόβλημα είναι μόνιμης ροής ή αν φθάσει στο τελευταίο χρονικό βήμα για χρονικά μεταβαλλόμενες ροές, η εκτέλεση τερματίζεται.

Αποτελέσματα από τη λύση αποθηκεύονται στα παρακάτω αρχεία:

OUTPUT- Περιλαμβάνει τα μορφοποιημένα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

RESNEW- Περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα για μια επανεκκίνηση ή για περαιτέρω επεξεργασία. Τα συγκεκριμένα δεδομένα τα οποία είναι γραμμένα σε αυτό το αρχείο μπορούν να βρεθούν στην ρουτίνα WTAPE.

PH.PHI- Αυτό το μορφοποιημένο αρχείο που περιέχει όλα τα αποτελέσματα με κατάλληλη διάταξη έτσι ώστε να είναι αναγνώσιμα από το πακέτο γραφικών PHOTON του εμπορικού CFD κώδικα PHOENICS.

TEC1.DAT- Μορφοποιημένο αρχείο περιλαμβάνει τα δεδομένα του πλέγματος, τις τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας και της πίεσης για κάθε υπολογιστικό κελί. Η διάταξη στην οποία μορφοποιείται είναι αναγνώσιμη από το πακέτο απεικόνισης ρευστοδυναμικών ιδιοτήτων TECPLOT που εκτελείται σε υπολογιστή PC.

RES.DAT- Καταγράφονται οι δείκτες σύγκλισης για κάθε μεταβλητή που επιλύεται από τον κώδικα DIAN3D και για κάθε φορά που προβάλλονται αποτελέσματα σύγκλισης στην διάρκεια της εκτέλεσης του κώδικα.

4.3.3 Υπολογισμοί Σωματιδίων

Οι υπολογισμοί σωματιδίων ενεργοποιούνται όταν η λογική μεταβλητή SPRAY λάβει την τιμή TRUE. Οι υπολογισμοί του ψεκαστήρα ξεκινούν με το κάλεσμα της ρουτίνας SPRAYS από την κύρια ρουτίνα του DIAN3D. Στην αρχή της ρουτίνας SPRAYS τα δεδομένα για τον υπολογισμό των σωματιδίων και οι αρχικές τιμές λαμβάνονται από τα δεδομένα του χρήστη για την έκχυση και περιλαμβάνουν την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων καθώς και την ταχύτητα και τη γωνία ψεκασμού. Η ρουτίνα τότε εισέρχεται στο Βρόγχο Slot (Βρόγχος 1450) και προσδιορίζονται οι συνθήκες του περιβάλλοντος αερίου στο κελί που βρίσκεται το ακροφύσιο.

Η εκτέλεση συνεχίζεται με το Βρόγχο Droplet (Βρόγχο 1441) όπου για κάθε σωματίδιο προσδιορίζονται οι αρχικές συνθήκες. Τα αρχικά δεδομένα για τα σωματίδια στο σημείο έκχυσης αποθηκεύονται με το κάλεσμα της ρουτίνας STORP.

Η χρονική ολοκλήρωση ξεκινά με το Βρόγχο 350 όπου εκτιμάται το απαραίτητο χρονικό βήμα και εισάγονται οι δυνάμεις της βαρύτητας. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα υπολογίζει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας μεταξύ των Βρόγχων 355 έως 370. Στο τέλος αυτών των εργασιών οι ιδιότητες των σωματιδίων επανεξετάζονται.

Η λύση των εξισώσεων της ορμής των σωματιδίων αρχίζει στο Βρόγχο 380. Γίνονται διάφοροι έλεγχοι σε αυτή τη φάση ώστε να καθοριστεί το κατάλληλο χρονικό βήμα για την ολοκλήρωση. Εάν το χρονικό βήμα είναι πολύ μεγάλο, οι υπολογισμοί εγκαταλείπονται και η ολοκλήρωση επαναλαμβάνεται με μειωμένο χρονικό βήμα. Ο κώδικας επίσης ελέγχει εάν το σωματίδιο έχει φτάσει στο τοίχωμα ή εάν έχει διασχίσει έναν άξονα συμμετρίας (καλείται η CROSAX). Στην περίπτωση που το σωματίδιο χτυπήσει στο τοίχωμα ενεργοποιείται η ρουτίνα WALDRP και οι εξισώσεις ορμής παραβλέπονται. Μολονότι το σωματίδιο είναι προσκολλημένο στο τοίχωμα μπορεί να ανταλλάσσει θερμότητα και μάζα με την αέρια φάση.

Αφού λυθούν οι εξισώσεις της ορμής, υπολογίζονται οι καινούργιες συντεταγμένες των σωματιδίων. Καλείται η ρουτίνα CELLX για να προσδιορίσει σε ποιο υπολογιστικό κελί βρίσκεται το σωματίδιο στο συγκεκριμένο χρονικό σημείο, και ενεργοποιείται η ρουτίνα BTYPE για να καθορίσει το είδος του συνόρου που προσπαθεί να διασχίσει το σωματίδιο. Τελικά, οι πηγαίοι όροι για τους υπολογισμούς της αέριας φάσης συγκεντρώνονται από την τελευταία ενημέρωση των διαφασικών ρυθμών μεταφοράς. Λαμβάνεται ένα καινούργιο χρονικό βήμα και η χρονική ολοκλήρωση συνεχίζεται μέχρι το σωματίδιο να εξέλθει από το υπολογιστικό πεδίο ή να κατακαθίσει. Σε αυτό το σημείο καθορίζεται η τροχιά του συγκεκριμένου σωματιδίου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου όλα τα σωματίδια και τα ακροφύσια έκχυσης εξαντληθούν.

Τα αρχεία δεδομένων που δημιουργούνται από την εκτέλεση της ρουτίνας SPRAYS είναι:

DROPS.DATA - Μορφοποιημένο αρχείο που περιλαμβάνει τις τροχιές και τις ιδιότητες των σωματιδίων όπως διάμετρο και θερμοκρασία. Στην περίπτωση της διαφασικής μεταφοράς το κλάσμα της μη εξατμιθείσας μάζας Τα δεδομένα γράφονται σε συγκεκριμένη φόρμα ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν από πακέτα γραφικών για σχεδίαση.

DROPS.OUT - Μορφοποιημένο αρχείο που περιλαμβάνει την τροχιά του σωματιδίου και άλλα δεδομένα όπως διάμετρος, θερμοκρασία και συνιστώσες ταχύτητας. Και σε αυτή την περίπτωση όταν υφίσταται διαφασική μεταφορά το κλάσμα της μη εξατμιθείσας μάζας. Τα δεδομένα γράφονται σε ειδική φόρμα ώστε να είναι εύκολα αναγνώσιμα.

DROP[X].DAT - Όπου [X] είναι από 1 έως N. Εδώ ο κώδικας δημιουργεί N μορφοποιημένα αρχεία, τα οποία περιέχουν την τροχιά, την διάμετρο, την θερμοκρασία

καθώς και το κλάσμα της μη εξαμιθείσας μάζας στην περίπτωση διαφασικής μεταφοράς με καρτεσιανές συντεταγμένες. Το κάθε αρχείο αναφέρεται αποκλειστικά σε σωματίδια μιας διαμέτρου και ταχύτητας. Έτσι εάν ο κώδικας επιλύει μια δέσμη σωματιδίων με 3 ονομαστικές διαμέτρους και 2 ταχύτητες εκτόξευσης, στο τέλος θα δημιουργήσει 6 αρχεία με την παραπάνω μορφοποίηση.

DROPTEC[X] - Όπου [X] είναι από 1 έως N. Εδώ ο κώδικας δημιουργεί N μορφοποιημένα αρχεία, τα οποία περιέχουν την τροχιά στην περίπτωση διαφασικής μεταφοράς με πολικές συντεταγμένες. Το κάθε αρχείο αναφέρεται αποκλειστικά σε σωματίδια μιας διαμέτρου και ταχύτητας. Έτσι εάν ο κώδικας επιλύει μια δέσμη σωματιδίων με 3 ονομαστικές διαμέτρους και 2 ταχύτητες εκτόξευσης, στο τέλος θα δημιουργήσει 6 αρχεία με την παραπάνω μορφοποίηση

4.4 Επεμβάσεις στον Κώδικα

Οι επεμβάσεις στον κώδικα DIAN3D απαίτησαν ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο αρχικός κώδικας είχε συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 και δημιουργήθηκε σε υπολογιστή CONVEX C1.

Αρχικά με την συνεργασία του Φεΐδαρου [17] ξεπεράστηκαν τα προβλήματα εγκατάστασης του κώδικα στον υπολογιστή του Εργ. Ρευστομηχανικής (HP/UX 9000 C100), καθώς αρχικά η μεταγλώττιση (compilation) του κώδικα ήταν αδύνατη και προστέθηκαν ρουτίνες μορφοποίησης των τελικών αποτελεσμάτων.

1. Στη ρουτίνα WTAPE προστέθηκαν οι ρουτίνες TECOUT και PHOTONOUT οι οποίες δημιουργούν τα αρχεία TEC1.DAT και PHE.PHI για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του κώδικα, στην περίπτωση που το επιλυόμενο μοντέλο έχει καρτεσιανές συντεταγμένες.

2. Στη ρουτίνα OUTPUT προστέθηκαν νέες εντολές για τη καταγραφή των δεικτών σύγκλισης των επιλυόμενων μεταβλητών και τη δημιουργία του αρχείου RES.DAT.

3. Στη ρουτίνα SPRAYS προστέθηκαν νέες εντολές για την καταγραφή της τροχιάς των σωματιδίων (σε καρτεσιανά διδιάστατα μοντέλα) και τη δημιουργία των αρχείων DROP[X].DAT.

Στη συνέχεια ο κώδικας ελέγχθηκε για τη συμπεριφορά του σε πολικά τρισδιάστατα πλέγματα και έγιναν επεμβάσεις:

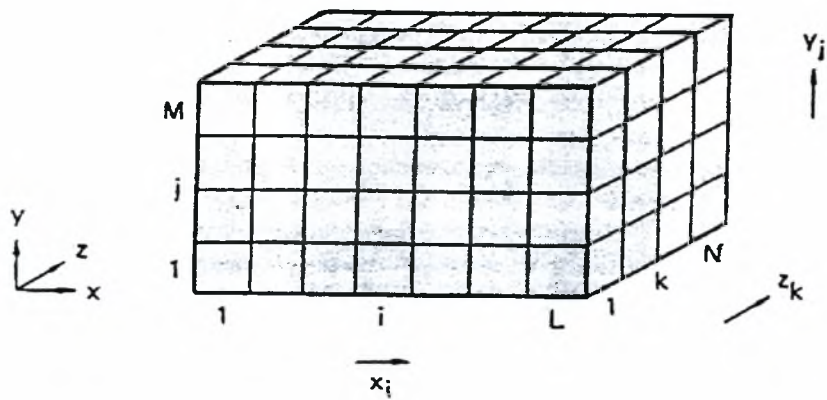
1. Για την επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας στην αέρια φάση και στα σωματίδια.

2. Για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (σε τρισδιάστατα πολικά μοντέλα) προστέθηκε η ρουτίνα PHOTONPOLAR η οποία δημιουργεί το αρχείο PH.PHI.

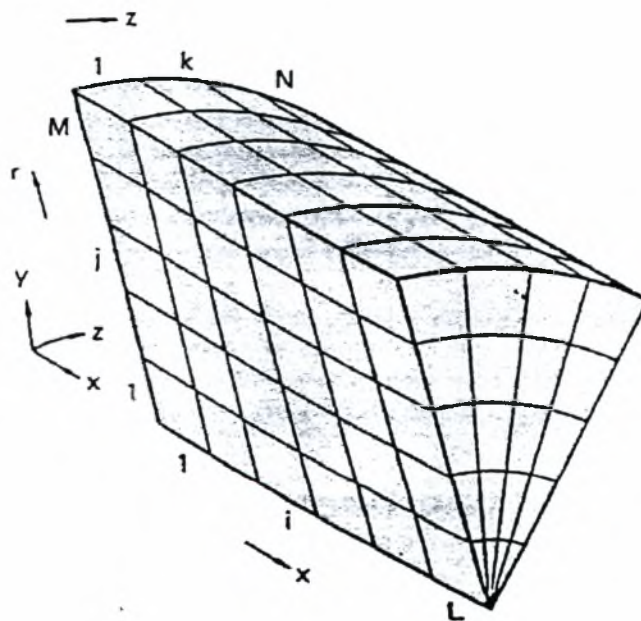
3. Στη ρουτίνα SPRAYS προστέθηκαν εντολές για την καταγραφή της τροχιάς των σωματιδίων (σε τρισδιάστατα πολικά μοντέλα) και τη δημιουργία των αρχείων DROPTEC[X].DAT.

4. Προστέθηκαν εντολές στη ρουτίνα SPRAYS για την μεταφορά θερμότητας από τη σωματιδιακή προς την αέρια φάση,

5. Προστέθηκαν εντολές στη ρουτίνα SPRAYS για τη μείωση της μάζας των σωματιδίων σε περίπτωση καύσης.

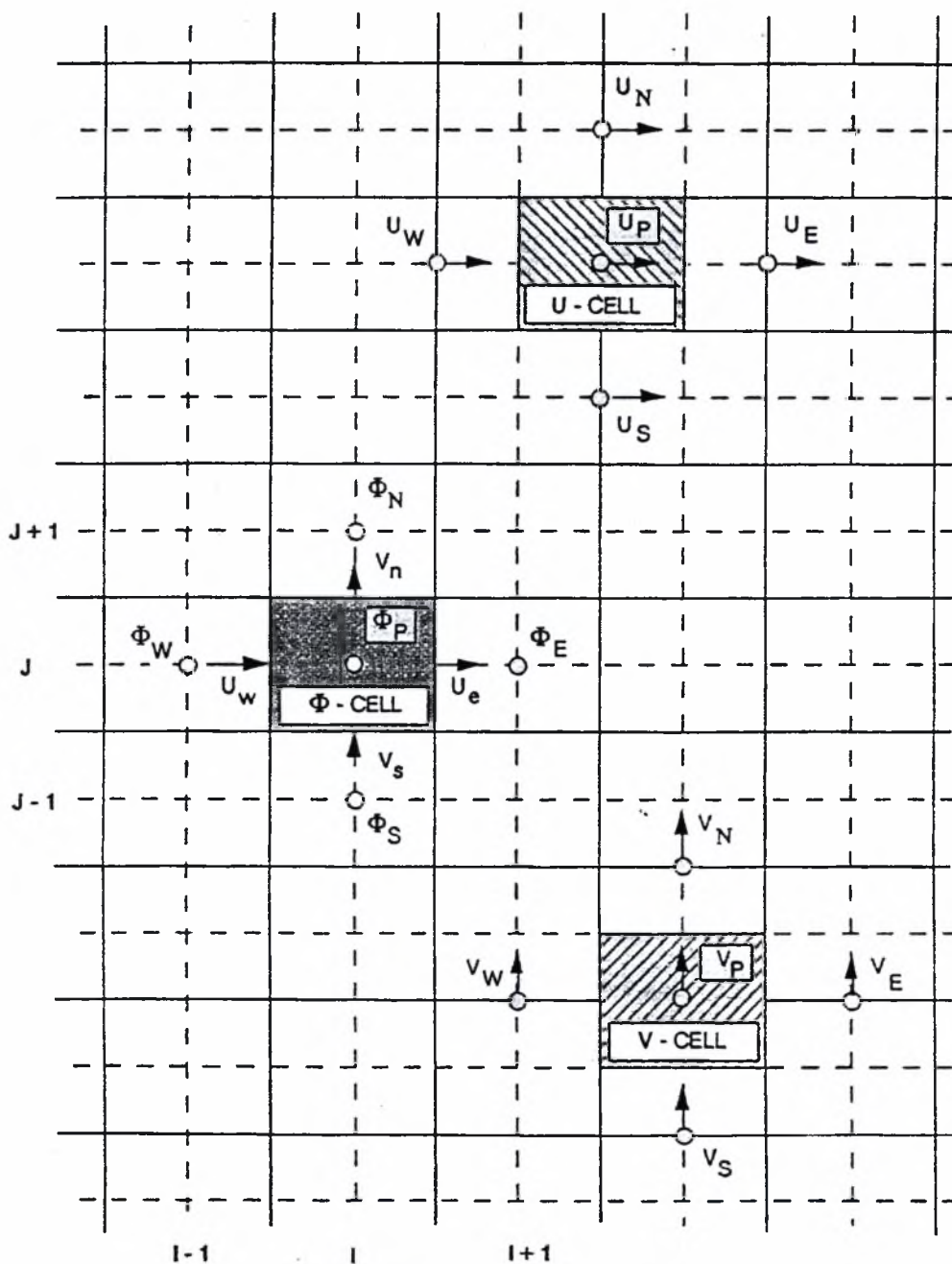


a) Καρτεσιανό πλέγμα



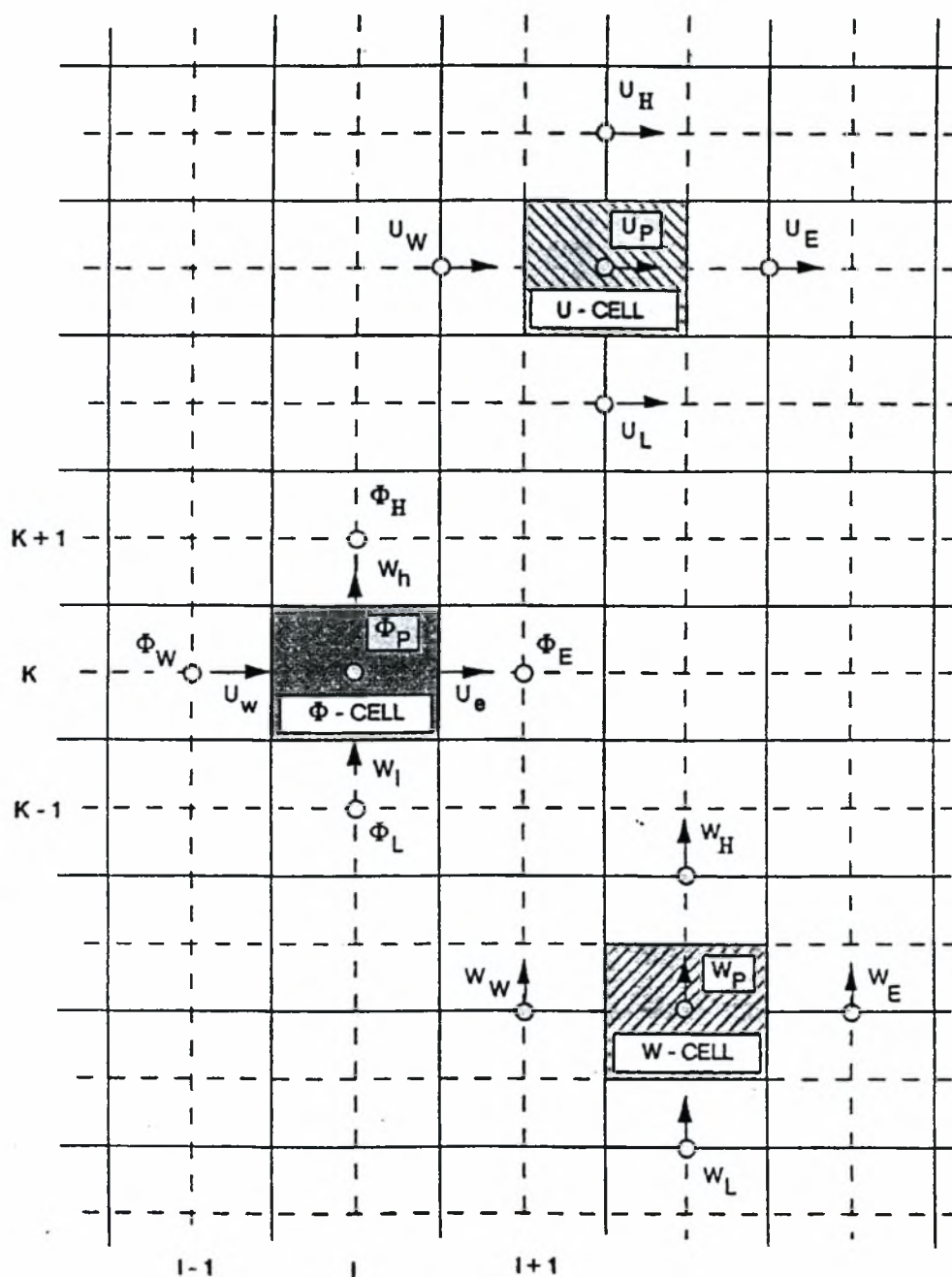
b) Πολικό-Κυλινδρικό πλέγμα

Σχήμα 4-1: Είδη Υπολογιστικών πλεγμάτων



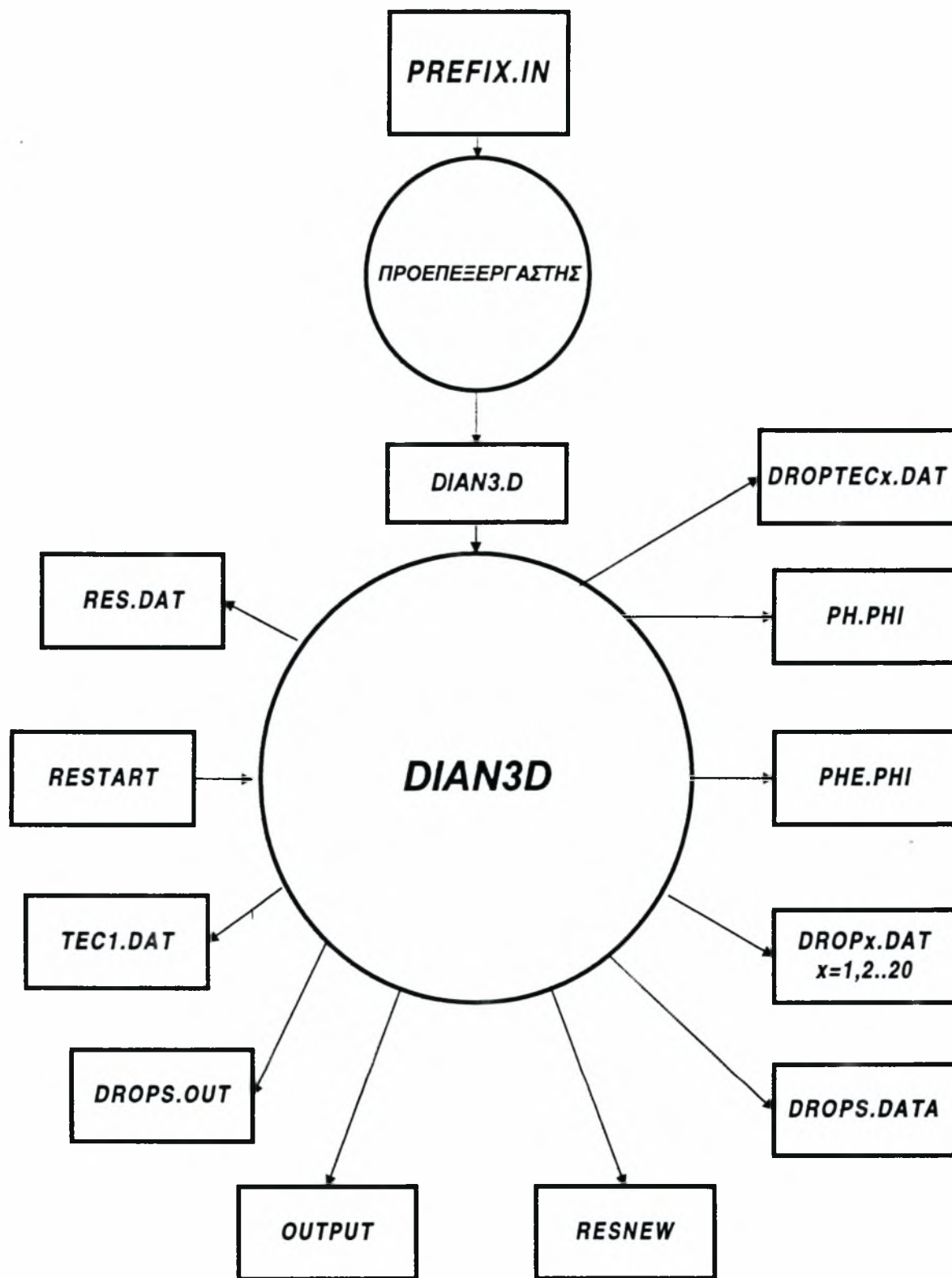
Τα Υπολογιστικά Κύττα του DIAN3D (Επίπεδο x-y)

Σχήμα 4-2: Τα κελιά για την βαθμωτή ιδιότητα Φ και τις ταχύτητες U & V

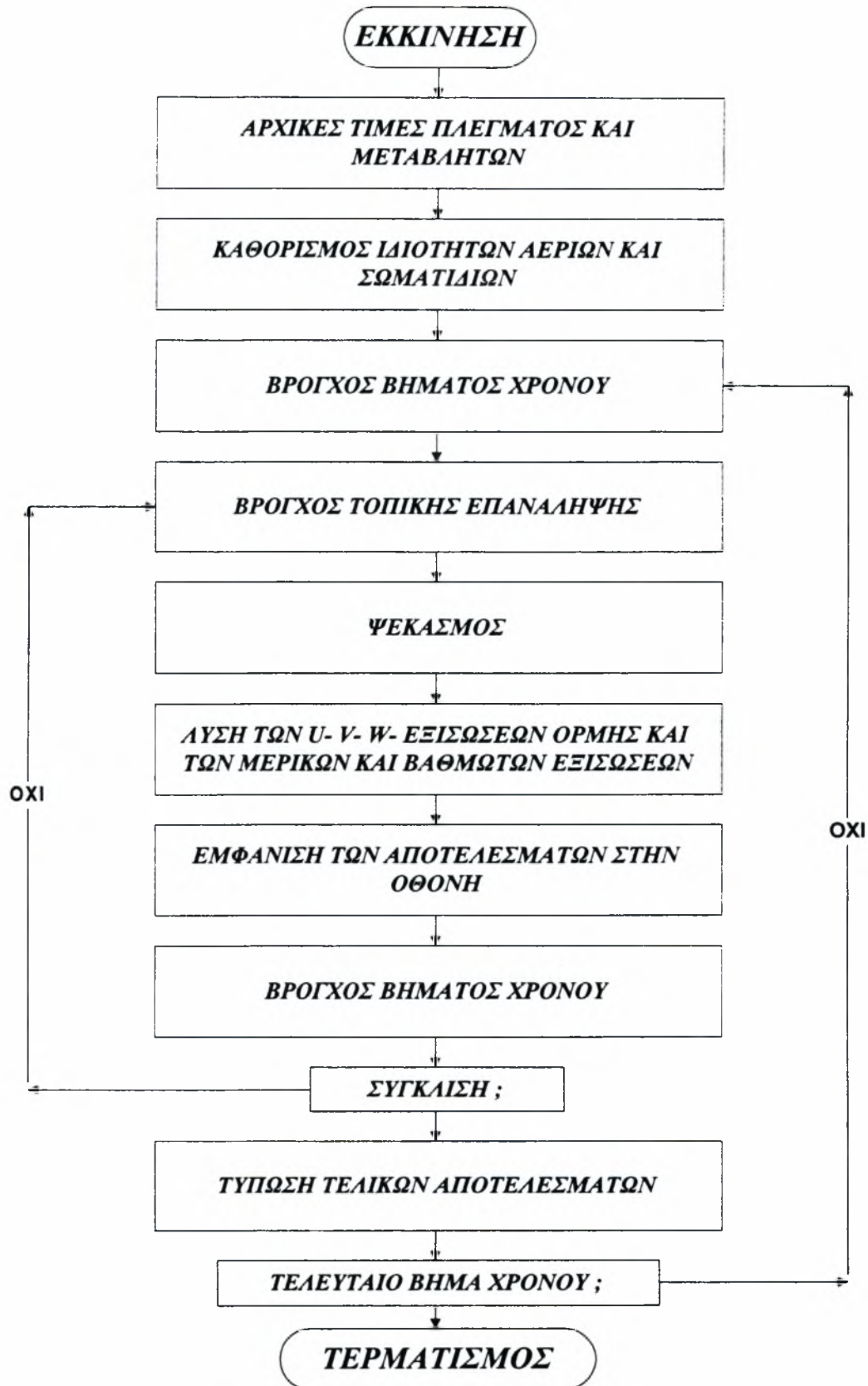


Τα Υπολογιστικά Κύττα του DIAN3D (Επίπεδο x-z)

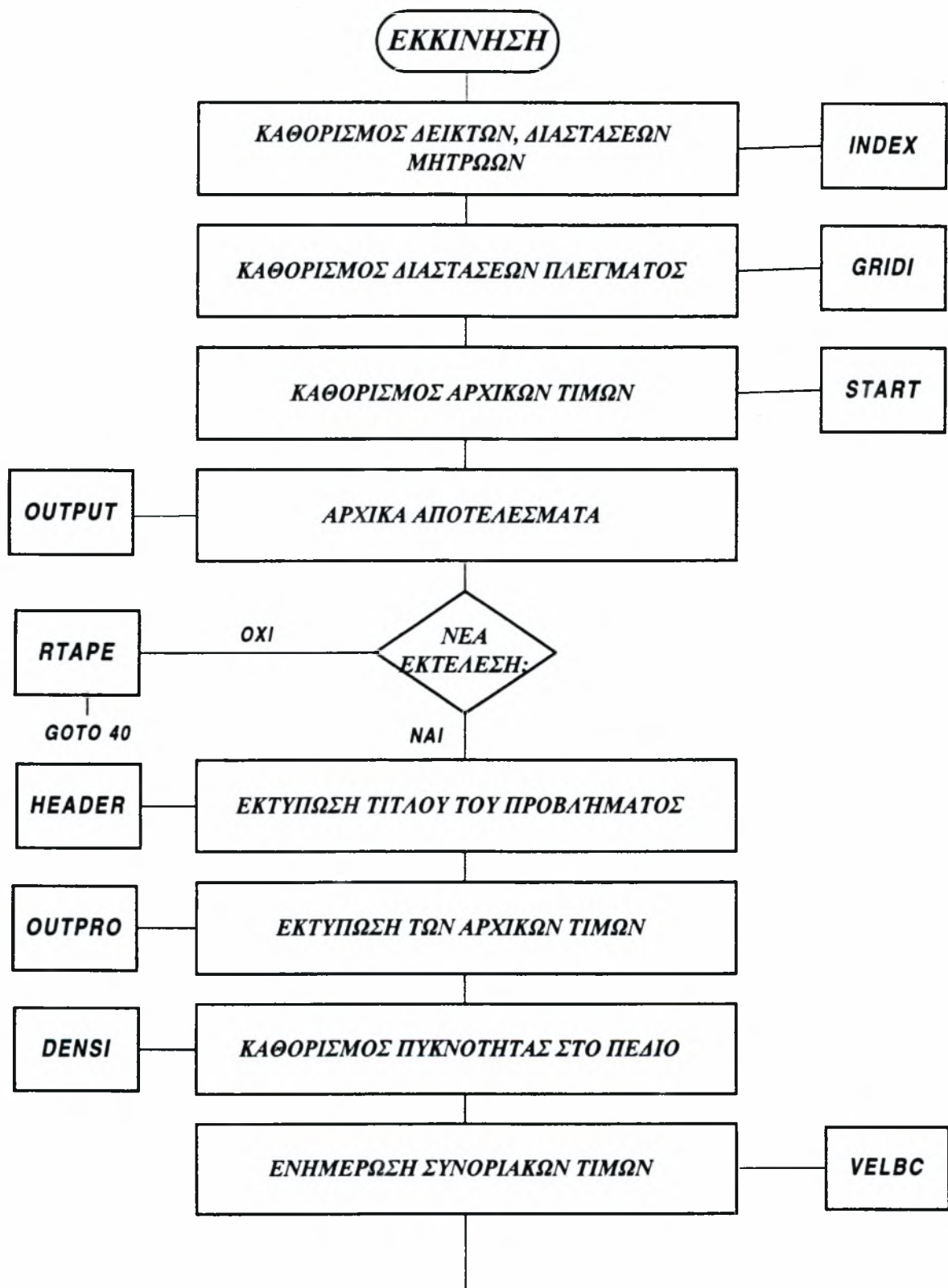
Σχήμα 4-3: Τα κελιά για την βαθμωτή ιδιότητα Φ και τις ταχύτητες U & W



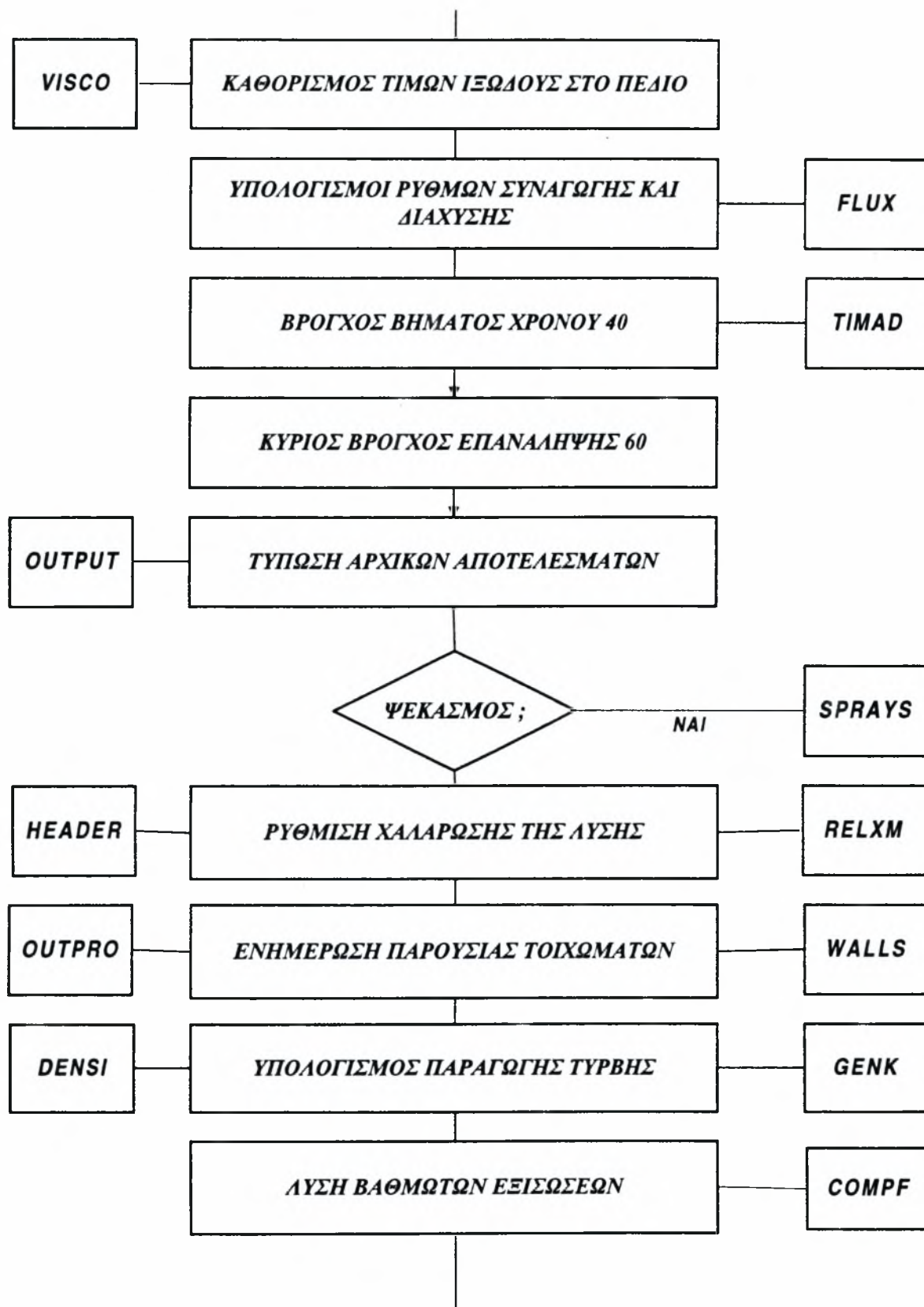
Σχήμα 4-4 Τα περιβάλλοντα αρχεία του κώδικα DIAN3D



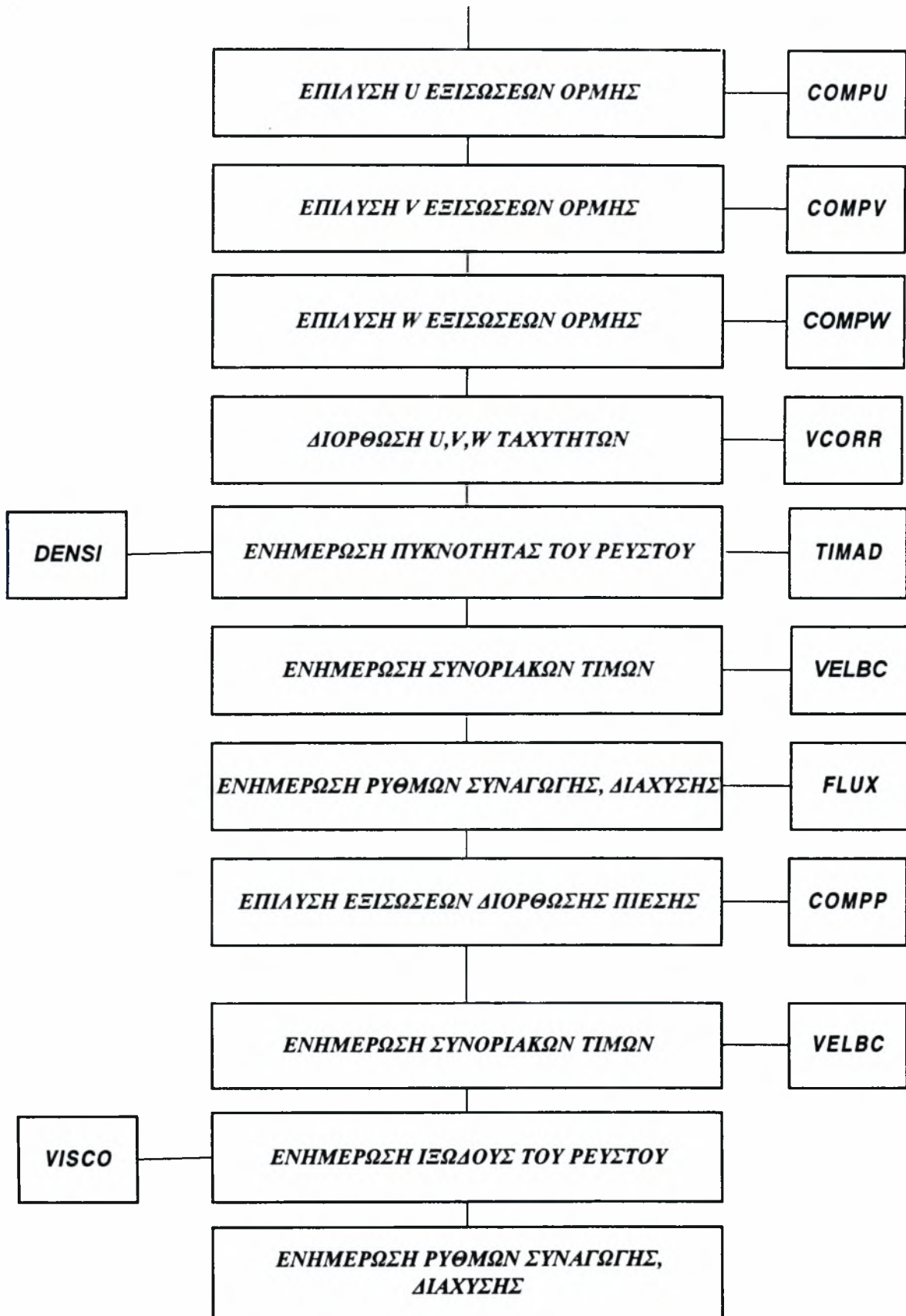
Σχήμα 4-5: Αρχιτεκτονική του κώδικα DIAN3D



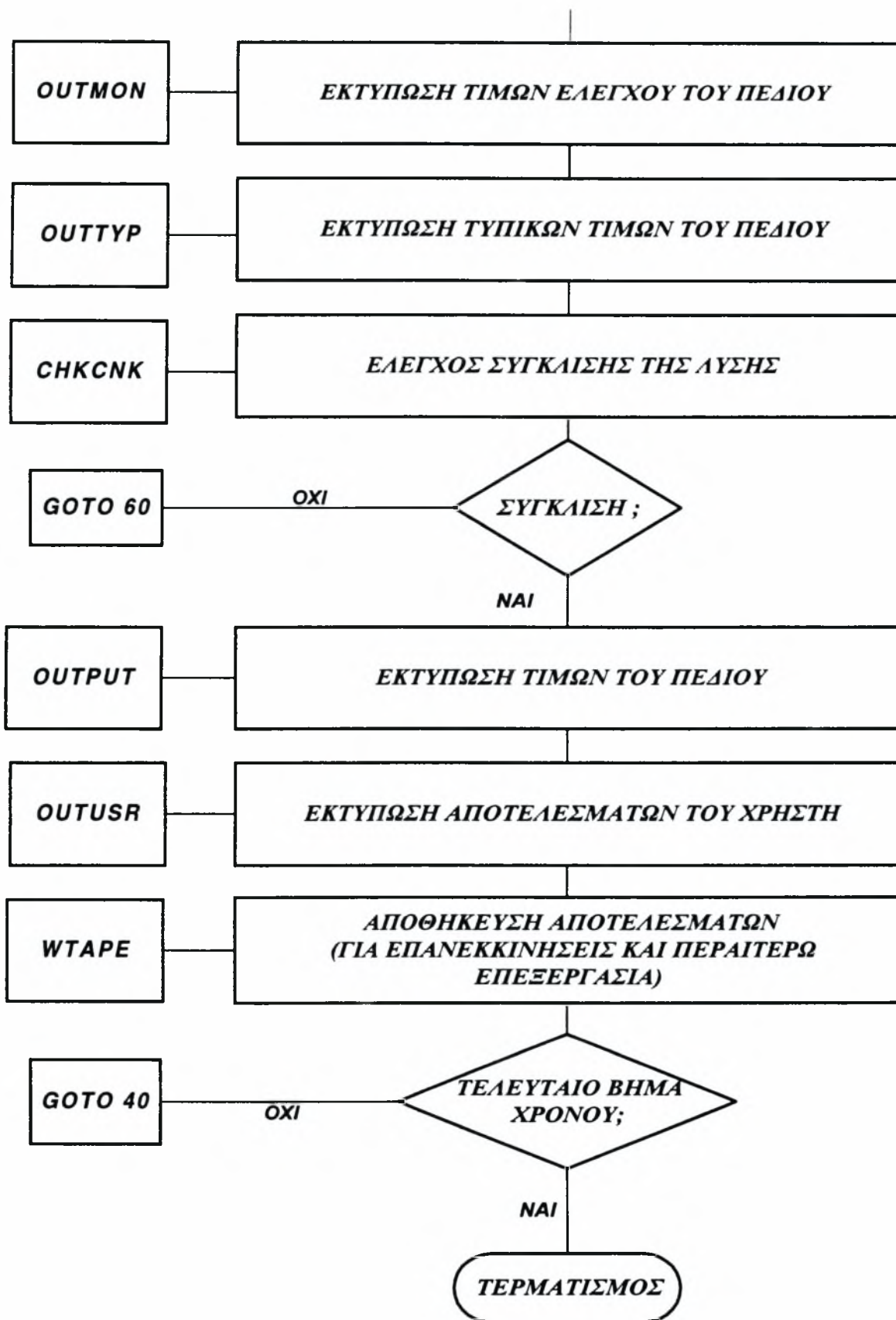
Σχήμα 4-6α: Διάγραμμα Ροής του κώδικα DIAN3D (συνέχεια)



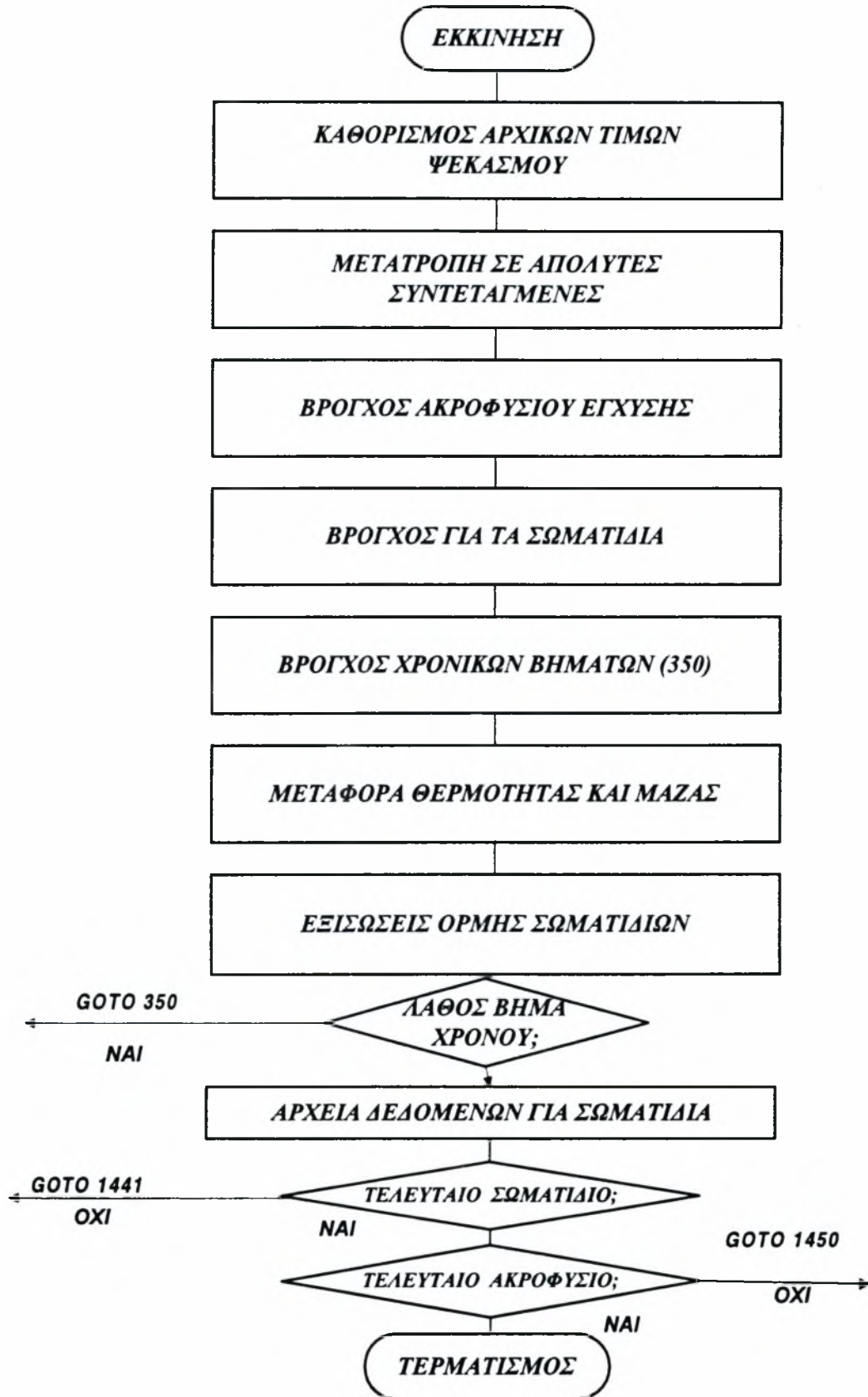
Σχήμα 4-6β: Διάγραμμα Ροής του κώδικα DIAN3D (συνέχεια)



Σχήμα 4-6γ: Διάγραμμα Ροής του κώδικα DIAN3D (συνέχεια)



Σχήμα 4-66: Διάγραμμα Ροής του κώδικα DIAN3D



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα Ροής της ρουτίνας SPRAYS

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά περιγράφεται το ισοζύγιο ενέργειας που έγινε για τον ΠΚ σε μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της καύσης. Στη συνέχεια περιγράφονται οι αρχικές και οι συνοριακές συνθήκες του υπό μελέτη προβλήματος, όπως απαιτούνται από το αριθμητικό μοντέλο. Η εισαγωγή των αρχικών και των συνοριακών συνθηκών γίνεται από ένα ειδικά διαμορφωμένο αρχείο τύπου 'Prefix.in', το οποίο διαβάζεται από τον προεπεξεργαστή DIANPRE του κώδικα, ο οποίος δημιουργεί ένα μορφοποιημένο αρχείο DIAN3.D. Το αρχείο αυτό περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το μοντέλο σε διατεταγμένη μορφή, ώστε να είναι αναγνώσιμο από τον κυρίως κώδικα DIAN3D.

Στην συνέχεια, γίνεται περιγραφή της μελέτης που βασίζεται πάνω στις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν το φυσικό πρόβλημα. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων της παρούσας παραμετρικής μελέτης.

Τέλος, γίνεται αναφορά στο αρχικό μοντέλο καύσης σωματιδίων κάρβουνου, το οποίο αναπτύχθηκε σε μια προσπάθεια ρεαλιστικότερης προσομοίωσης των χημικών διεργασιών της καύσης, στον ΠΚ.

5.1 Αρχικές και Συνοριακές Συνθήκες

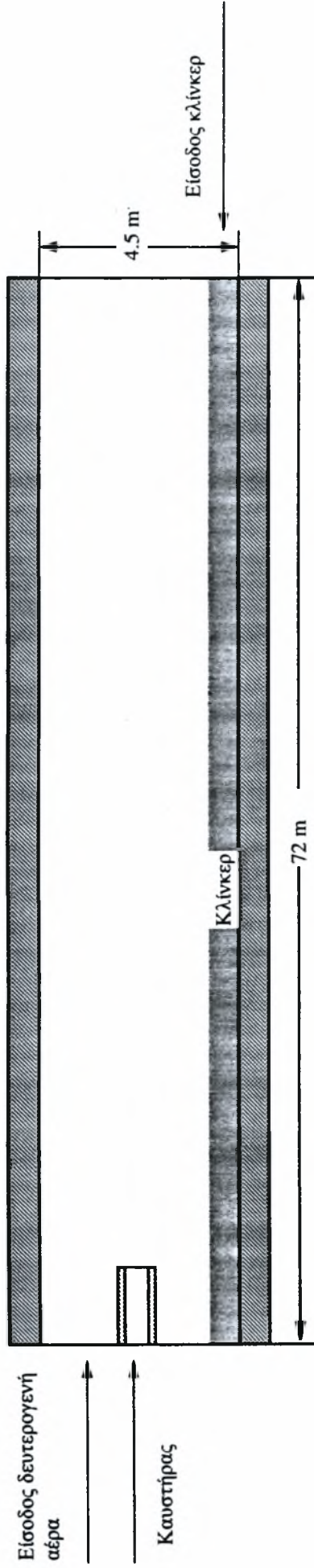
Για την προσομοίωση του ΠΚ χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής DIAN3D, στον οποίο έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις για τις ανάγκες της προσομοίωσης στους H/Y Hewlett Packard HP/UX 9000 C100 και Silicon Graphics Origin 200 του Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών (Παράγραφος 4.4). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω με το αρχείο 'Prefix.in', το οποίο διαβάζει ο προεπεξεργαστής, εισάγονται οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος όπως και όλα τα δεδομένα που απαιτεί ο κώδικας για τη λύση του προβλήματος.

Αρχικά στο αρχείο 'Prefix.in' εισάγεται η γεωμετρία του ΠΚ Σχήμα 5-1 καθώς και η γεωμετρία του καυστήρα, Σχήμα 5-2. Για την προσομοίωση του κλιβάνου χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες. Ο κλίβανος έχει μήκος 72m και διάμετρο μέχρι τα πυρότουβλα 4,5m. Στο Σχήμα 5-1 φαίνεται η είσοδος του δευτερογενή αέρα καθώς και η θέση του καυστήρα στον ΠΚ. Ο καυστήρας είναι τύπου Rotaflam και έχει τέσσερις εισαγωγές αέρα για την σωστή ανάμιξη και το στροβιλισμό του κάρβουνου Σχήμα 5-2. Όπως φαίνεται στο σχήμα, από την εσωτερική εισαγωγή μπαίνει ο κεντρικός αέρας, στην επόμενη το κάρβουνο Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

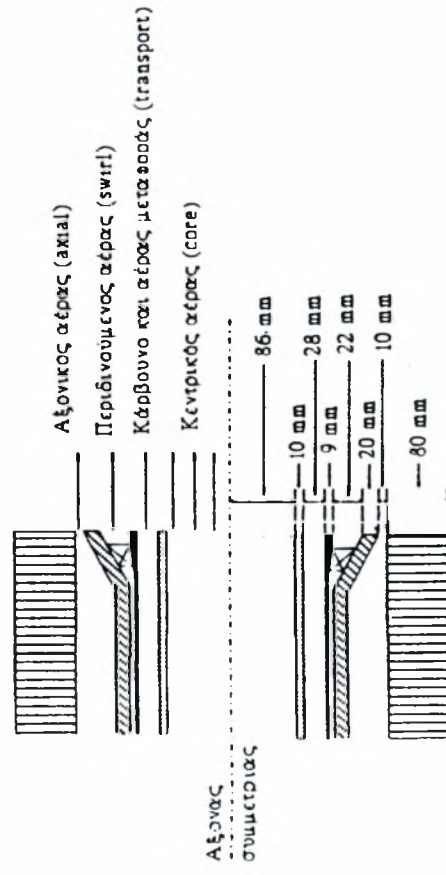
Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

με τον αέρα μεταφοράς, στην συνέχεια ο περιδινούμενος αέρας (για τον στροβιλισμό του μίγματος) και τέλος ο αξονικός αέρας.

Περιτροφικός Κλίβανος Τσιμέντου



Σχήμα 5-1



Σχήμα 5-2: Λεπτομέρειες του Καυστήρα Rotafiam

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έχουν παραλειφθεί τα τοιχώματα ανάμεσα στις εισόδους του καυστήρα που εμφανίζονται στο Σχήμα 5-2 και έχει υπολογιστεί η ισοδύναμη διάμετρος για κάθε είσοδο. Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται όλες οι εισαγωγές του αέρα στον ΠΚ με τις αντίστοιχες διαμέτρους, ταχύτητες και θερμοκρασίες.

Πίνακας 5-1: Στοιχεία Εισαγωγής Αέρα στον ΠΚ

Είσοδος	Ισοδύναμη Διάμετρος (m)	Αξονική Ταχύτητα m/s	Περιφερειακή Ταχύτητα (m/s)	Θερμοκρασία Εισαγωγής (K)
Κεντρικός Αέρας	0,172	25	0	300
Αέρας Μεταφοράς	0,233	25	0	353
Αέρας Περιδίνησης	0,282	120,208	120,208	300
Αξονικός Αέρας	0,306	165	0	300
Δευτερογενής Αέρας	4,5	4	0	1273

5.1.1 Ισοζύγιο Ενέργειας του ΠΚ

Ο περιστροφικός κλίβανος είναι μια διάταξη στην οποία πραγματοποιούνται πολλές και πολύπλοκες διεργασίες όπως καύση, μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία, ασβεστοποίηση της φαρίνας και τέλος έψηση και 'κλινκεροποίηση' της φαρίνας. Παράλληλα, μέσα στον ΠΚ δημιουργείται ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων λόγω της τυρβώδους ροής, καθώς οι ταχύτητες εξόδου από τον καυστήρα είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με την ταχύτητα του δευτερογενή αέρα. Τέλος, λόγω της παρουσίας του κλίνκερ και των σωματιδίων κάρβουνου η ροή είναι πολυφασική. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν όλα τα ροϊκά και φυσικοχημικά φαινόμενα ενός ΠΚ σε ένα κώδικα. Για παράδειγμα, επειδή ο κώδικας DIAN3D δεν έχει μοντέλο καύσης και η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου καύσης ξέφευγε από τα χρονικά περιθώρια της παρούσης εργασίας, έγινε ένα ισοζύγιο ενέργειας για τον υπολογισμό της απαιτούμενης

θερμότητας από την καύση που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των χημικών διεργασιών στον ΠΚ

Ανάλυση Ισοζυγίου Ενέργειας

Στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζεται αναλυτικά το ισοζύγιο ενέργειας του ΠΚ Αρχικά υπολογίζεται η ενθαλπία του αέρα στην είσοδο (δευτερογενής αέρας, παροχή αέρα καυστήρα). Ο υπολογισμός της ενθαλπίας γίνεται από τον τύπο $Q = \dot{m}c_p T$. Η ενθαλπία αυτή υπολογίζεται σε 27438 kJ/s. Η ενθαλπία του κλίνκερ στην είσοδο με θερμοκρασία 1173 K και παροχή 37.04 kg/s είναι 45617 kJ/s. Τέλος, προστίθεται η θερμογόνος δύναμη του κάρβουνου για παροχή 2,5 kg/s η οποία είναι 92500 kJ/s. Συνολικά η ενθαλπία που δίνεται στον κλίβανο είναι 165555 kJ/s.

Στην έξοδο η παροχή των αερίων παραμένει η ίδια λόγω της διατήρησης της μάζας. Η θερμοκρασία των αερίων στην έξοδο είναι 1173 K και η ενθαλπία τους είναι 40592 kJ/s. Το κλίνκερ στην έξοδο έχει θερμοκρασία 1673 K και η ενθαλπία του στην έξοδο είναι 65061 kJ/s. Η θερμότητα σχηματισμού του κλίνκερ είναι 380 Kcal/kg και η ενέργεια που απαιτείται για τον σχηματισμό 37,04 kg/s κλίνκερ είναι 58886 kJ/s. Η θερμότητα που χάνεται από τα τοιχώματα του ΠΚ, Σχήμα 5-3, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi h_1 R_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2\pi h_2 R_2 L}} \quad (1)$$

Τα τοιχώματα του ΠΚ έχουν εξωτερικό περίβλημα από χάλυβα πάχους 3cm ενώ εσωτερικά υπάρχουν θερμομονωτικά πυρότουβλα πάχους 20cm. Η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό τοίχωμα του ΠΚ (T_1) είναι 1000 °C. Αντίστοιχα μέση θερμοκρασία στο εξωτερικό τοίχωμα του ΠΚ (T_2) είναι 250 °C. Το μήκος L του ΠΚ είναι 72 m. Η εσωτερική ακτίνα R_1 είναι 2,25 m, η ακτίνα μέχρι το χαλύβδινο περίβλημα είναι 2,45 m και η ακτίνα μέχρι την εξωτερική επιφάνεια του κλιβάνου είναι 2,48m. Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας k_1 και k_2 για τα πυρότουβλα και το χάλυβα είναι 1,6 W/mK και 55 W/mK αντίστοιχα. Τα h_1 και h_2 είναι οι συντελεστές συναγωγής του αέρα μέσα και έξω από τον κλίβανο, αντίστοιχα.

Οι συντελεστή συναγωγής h_1 και h_2 στο εσωτερικό και εξωτερικό του ΠΚ υπολογίζονται ως εξής:

Οι αριθμοί Reynolds είναι:

$$\begin{aligned} Re_1 &= \frac{\rho_1 u_1 d_1}{\mu_1} = 105000 \\ Re_2 &= \frac{\rho_2 u_2 d_2}{\mu_2} = 742480 \end{aligned} \quad (2)$$

Για το εσωτερικό τοίχωμα :

- ρ_1 = πυκνότητα αερίου στο εσωτερικό τοίχωμα του ΠΚ (0.28 kg/m^3)
- u_1 = ταχύτητα αερίου (4 m/s)
- d_1 = εσωτερική διάμετρος ($4,5 \text{ m}$)
- μ_1 = ιξώδες ($4,8E-05 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$)

Για το εξωτερικό του ΠΚ επιλέγουμε ταχύτητα αέρα 4 m/s και θερμοκρασία ατμόσφαιρας 27°C .

- ρ_2 = πυκνότητα αερίου στην ατμόσφαιρα (0.84 kg/m^3)
στους $138^\circ\text{C} = (250+27)/2$
- u_2 = ταχύτητα αερίου (4 m/s)
- d_2 = εξωτερική διάμετρος (5 m)
- μ_2 = ιξώδες ($2,28E-05 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$)

Συνεπώς και για τα δυο ρεύματα η ταχύτητα είναι τυρβώδης.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγή εξάγεται από τον παρακάτω τύπο :

$$h = \frac{Nu_d \cdot k}{d} \quad (3)$$

Ο αριθμός Nusselt για τυρβώδη ροή σε σωλήνες είναι :

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{0.3} = 215,43 \quad (4)$$

$$Pr = 0,706$$

$$\text{Συνεπώς } h_1 = 3,83 \text{ J/(s m}^2 \text{ K)}$$

Ο αριθμός Nusselt για ροή γύρω από κύλινδρο είναι :

$$Nu_d = C \left(\frac{U_\infty d}{\nu_f} \right)^n Pr_f^{\frac{1}{3}} = 1250 \quad (5)$$

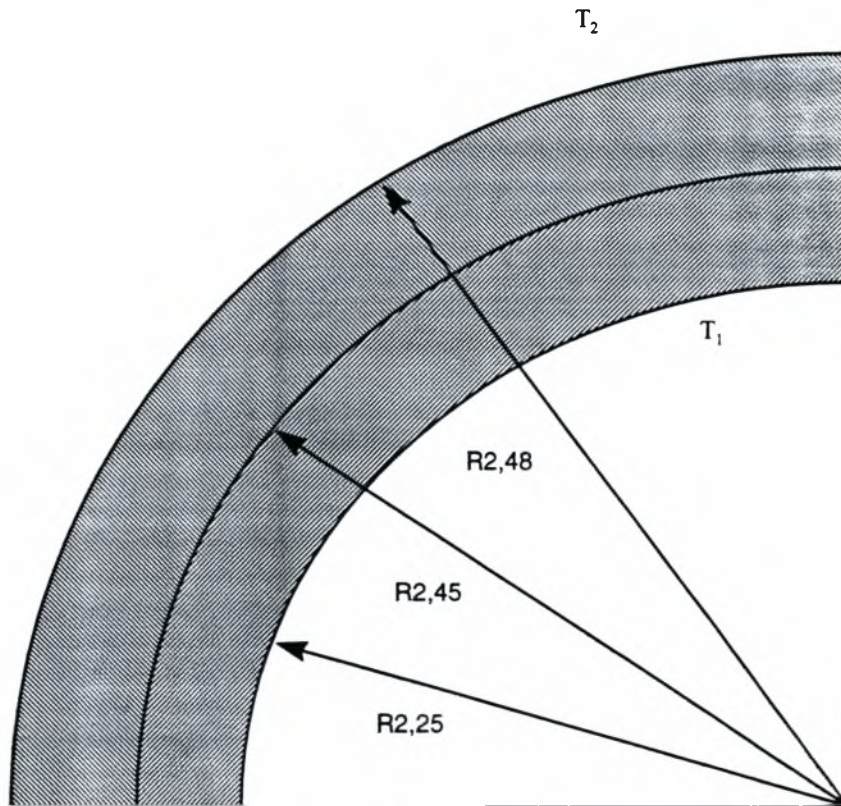
$$\text{Για } Re = 742480, \quad C = 0,0266, \quad n = 0,805 \quad \text{και } Pr_f = 0,689$$

$$\text{Συνεπώς } h_2 = 8,4 \text{ J/(s m}^2 \text{ K)}$$

Με τα παραπάνω δεδομένα η θερμότητα που χάνεται από τα τοιχώματα υπολογίζεται από την εξίσωση (1):

$$Q = 1559,238 \text{ kJ/s}$$

Τελικά, η ενέργεια που εκλύεται από το σύστημα είναι 166098,105 KJ/s και συνεπώς το ισοζύγιο ενέργειας είναι σωστό.



Σχήμα 5-3: Πάχος τοιχώματος ΠΚ

Πίνακας 5-2: Ισοζύγιο Ενέργειας για τον ΠΚ

Ισοζύγιο ενέργειας για τον Περιτροφική Κάμινο				
	Rate-Kg/s	Spec.Heat-J/KgK	Temperature-K	Enthalpy-J/s
ΕΙΣΟΔΟΙ				
A. Δευτερογενής Αέρας				
mh=m cp T	19,600	1150	1073	24.185.420
B. Κανστήρας				
Κεντρικός αέρας				
mh=m cp T	0,697	1006	300	210.202
Αέρας Μεταφοράς				
μαέρα	0,484	1009	353	172.233
μκάρβουνο	2,500	1100	353	970.750
μσυνολικό	2,984			1.142.983
Περιδινούμενος Αέρας				
m h = m cp T	4,059	1006	300	1.224.517
Αξονικός Αέρας				
m h = m cp T	2,238	1006	300	675.285
Γ. Κλίνκερ είσοδο				
Παροχή 3200 τόνους/μέρα	37,037	1050	1173	45.616.667
ΣΥΝΟΛΟ ΕΙΣΟΔΩΝ (χωρίς καύση)				73.055.073
Δ. Θερμογόνος Δύναμη Κάρβουνο				
m H	2,500	37000000		92.500.000
ΣΥΝΟΛΟ ΕΙΣΟΔΩΝ				165.555.073
ΕΞΟΔΟΙ				
Αέρας Εξόδου				
μδευτερογενή	19,600			
m αξονικού	2,238			
m περιδήνησης	4,059			
m μεταφοράς	0,484			
μκάρβουνο	2,500			
m κεντρικού	0,697			
mh=(m συνολική) cp T	29,577	1170	1173	40.591.830
Κλίνκερ έξοδος				
Παροχή 3200 τόνους/μέρα	37,037	1050	1673	65.061.111
Απώλειες τοιχωμάτων				1.559.238
Θερμότητα σχηματισμού κλίνκερ				58.885.926
ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΟΔΩΝ				166.098.105

Υπολογισμός Στοιχειομετρικού Αέρα

Για τον υπολογισμό του στοιχειομετρικού αέρα χρησιμοποιείται η βασική εξίσωση της καύσης του κάρβουνου:



Αν επιλέξουμε σαν βάση 1 kg-mole C, τότε απαιτείται 1 kg-mole O₂ για την καύση του κάρβουνου. Επειδή το O₂ αποτελεί το 21% του αέρα 1 kg-mole O₂ αντιστοιχεί σε 3,76 kg-mole N₂ και τελικά σε 4,76 kg-mole αέρα. Συνεπώς 12 kg C αντιστοιχούν σε 137,28 kg αέρα. Η παροχή του καύσιμου κάρβουνου είναι 2,5 kg/s. Παρακάτω παρουσιάζεται η Ultimate Analysis του καύσιμου κάρβουνου :

Ultimate Analysis I.S.O. (Dry Basis)	
Carbon	71,44 %
Hydrogen	4,02 %
Nitrogen	1,61 %
Sulfur	0,66 %
Ash	14,74 %
Chlorine	0,003 %
Oxygen	7,53 %

Από την παραπάνω ανάλυση θεωρούμε ότι το βασικό στοιχείο καύσης είναι το καθαρό κάρβουνο το οποίο αποτελεί το 71.44 % του καύσιμου κάρβουνου. Συνεπώς η παροχή του καθαρού κάρβουνου είναι 1,786 kg/s τα οποία απαιτούν 20,43 kg/s αέρα.

Υπολογισμός Αδιαβατικής Θερμοκρασίας

Η συνολική παροχή του αέρα είναι 27,04 kg/s. Αφού ο στοιχειομετρικά απαιτούμενος αέρας είναι 20,43 kg/s, στον ΠΚ έχουμε μια περίσσεια αέρα της τάξης του 32 %. Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός της αδιαβατικής θερμοκρασίας της φλόγας του κάρβουνου για 32% περίσσεια αέρα, Πίνακας 5-3. Η μέση θερμοκρασία εισόδου των αερίων εισαγωγής T₂ στον κλίβανο (μέση τιμή δευτερογενή αέρα και αέρα από καυστήρα) είναι 538 °C, ενώ επιλέγεται θερμοκρασία αναφοράς T₁ = 25 °C. Αρχικά υπολογίζονται τα kg-moles

των προϊόντων και των αντιδρώντων σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση. Στη συνέχεια υπολογίζεται το ΔH_{rxn} το οποίο ισούται με την θερμότητα σχηματισμού του CO_2 . Το $\Sigma \Delta H_R$ των αντιδρώντων ισούται με το άθροισμα των ΔH τους. Το ΔH για κάθε αέριο υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\Delta H = n \cdot C_{pm} \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$\text{Οπου, } C_{pm} = \frac{a(T_2 - T_1) + (b/2)(T_2^2 - T_1^2) + (c/3)(T_2^3 - T_1^3)}{T_2 - T_1}$$

και a, b, c συντελεστές που εξαρτώνται από το στοιχείο ή την ένωση για την οποία υπολογίζεται το C_{pm} .

Τελικά υπολογίζεται το $\Delta H_{(προϊόντων)} = \Sigma \Delta H_R - \Delta H_{rxn} = 118678 \text{ kJ/s}$

Ομοίως υπολογίζεται το $\Sigma \Delta H_p$ των προϊόντων και ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία ως προς το θεωρητικό T μέχρι να εξισωθούν το $\Sigma \Delta H_p$ με το $\Delta H_{(προϊόντων)}$. Για $T_{(θεωρητικό)} = 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ το $\Sigma \Delta H_p \approx \Delta H_{(προϊόντων)}$ και συνεπώς η αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας του κάρβουνου είναι $2200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Πίνακας 5-3: Αδιαβατική Θερμοκρασία της Φλόγας

Αδιαβατική Θερμοκρασία Φλόγας						
Βασική Αντίδραση C + O₂ -> CO₂						
Βάση 1 g mole C						
Θερμοκρασία εισόδου αερίων			538 C	811 K		
Θερμοκρασία Αναφοράς			25 C	298 K		
Αντιδρώντα στην είσοδο			Προϊόντα στην έξοδο			
Συστατικό		Mole	Συστατικό	Mole		
C (s)		1	CO ₂	1		
O ₂ Απαιτούμενο		1	O ₂	0,32		
O ₂ Περίσσεια		0,32	N ₂	4,97		
O ₂ Συνολικό		1,32				
N ₂		4,97				
Αέρας		6,29				
ΔH _{rxn}		-94052				
ΔH αντιδρώντων						
Συστατικό		mole	ΔT	C _{pm}	ΔH	
C (s)		1	513	1,80	923	
Αέρας		6,29	513	7,35	23703	
ΣΔHR					24627	
ΔH (προϊόντων) = ΣΔHR - ΔH _{rxn}					118679	
ΔH Προϊόντα						
Συστατικό		mole	Θεωρητικό T	C _{pm}	ΔT	ΔH
CO ₂		1,00	2200	12,67	2175	27556
O ₂		0,32	2200	8,28	2175	5762
N ₂		4,97	2200	7,96	2175	86023
ΣΔHP					119341	

Ισοζύγιο με παροχή αέρα 2200 °C

Για την προσέγγιση της επίδρασης της καύσης, ο αέρας που εισέρχεται στον ΠΚ θα έχει θερμοκρασία 2200 °C. Με αυτόν τον τρόπο, όπως αποδεικνύεται από το παρακάτω ισοζύγιο (Πίνακας 5-4), δίνεται στο σύστημα η απαιτούμενη ενθαλπία που θα έπαιρνε από την θερμογόνο δύναμη του κάρβουνου.

Πίνακας 5-4: Ισοζύγιο Ενέργειας με Παροχή Αέρα 2200 °C

Ισοζύγιο ενέργειας για την Περιστροφική Κάμνο				
	Rate-Kg/s	Spec.Heat-J/KgK	Temperature-K	Enthalpy-J/s
ΕΙΣΟΔΟΙ				
A. Δευτερογενής Αέρας				
$m\dot{h}=m\ c_p\ T$	19,600	1688	2473	81.818.710
B. Καυστήρας				
Κεντρικός αέρας				
$m\dot{h}=m\ c_p\ T$	0,697	1688	2473	2.908.335
Αέρας Μεταφοράς				
$m\dot{h}$ αέρα	0,484	1688	2473	2.018.584
$m\dot{h}$ κάρβουνου	2,500	1100	2473	6.800.750
$m\dot{h}$ συνολικό	2,984			8.819.334
Περιδινόμενος Αέρας				
$m\dot{h} = m\ c_p\ T$	4,059	1688	2473	16.942.268
Αξονικός Αέρας				
$m\dot{h} = m\ c_p\ T$	2,238	1688	2473	9.343.162
Γ. Κλίνκερ είσοδο				
\dot{m} cp (Τσισόδου)				
Παροχή 3200 τόνους/μέρα	37,037	1050	1173	45.616.667
ΣΥΝΟΛΟ ΕΙΣΟΔΩΝ (χωρίς καύση)				165.448.476
ΕΞΟΔΟΙ				
Αέρας Εξόδου				
$m\dot{h}$ δευτερογενή	19,600			
$m\dot{h}$ αξονικού	2,238			
$m\dot{h}$ περιδίνησης	4,059			
$m\dot{h}$ μεταφοράς	0,484			
$m\dot{h}$ κάρβουνου	2,500			
$m\dot{h}$ κεντρικού	0,697			
$m\dot{h}=(m\ \text{συνολική})\ c_p\ T$	29,577	1170	1173	40.591.830
Κλίνκερ έξοδος				
Παροχή 3200 τόνους/μέρα	37,037	1050	1673	65.061.111
Απώλειες τοιχωμάτων				1.559.238
Θερμότητα σχηματισμού κλίνκερ				58.885.926
ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΟΔΩΝ				166.098.105

5.1.2 Περιγραφή του αρχείου 'Kamino.in'

Η γεωμετρία του μοντέλου δηλώνεται στο αρχείο 'Kamino.in'. Παρακάτω παρουσιάζονται και τα υπόλοιπα δεδομένα που δηλώνονται στο αρχείο αυτό, και αφορούν στις αρχικές και συνοριακές συνθήκες.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιείται ένα τρισδιάστατο πολικό κυλινδρικό πλέγμα. Στην αξονική διεύθυνση χρησιμοποιούνται 84 υπολογιστικά κελιά στην ακτινική 24 και στην περιφεριακή 18. Όσον αφορά τον καυστήρα χρησιμοποιούμε ένα κελί για κάθε είσοδό του. Παρακάτω σημειώνονται οι αντίστοιχες γραμμές του αρχείου εισαγωγής 'Kamino.in' καθώς και ο τίτλος του προβλήματος.

```
title Fluid Dynamics Laboratory (CFD Group)
Mechanical Industrial Engineering Dept.
```

```
*
```

```
*----- GEOMETRY -----
```

```
*
```

```
integer l=84 , m=24 , n=18
```

```
l l ; m m ; n n
```

```
xgrid 1 1 0.0 72.0 1.0
```

```
ygrid 1 1 0.0 0.086 1.0
```

```
ygrid 2 2 0.086 0.116 1.0
```

```
ygrid 3 3 0.116 0.141 1.0
```

```
ygrid 4 4 0.141 0.153 1.0
```

```
ygrid 5 m 0.153 2.25 1.0
```

```
zgrid 6.28
```

```
polar t ; zcycle t
```

```
*
```

Παρακάτω ορίζονται οι μεταβλητές που θα επιλυθούν από τον κώδικα. Αυτές είναι οι ταχύτητες στις κατευθύνσεις x, y, z, η κινητική ενέργεια της τύρβης, η σκέδαση της κινητικής ενέργειας της τύρβης και η ενθαλπία.

```
*-----DEPENDAND VARIABLES-----
```

```
*
```

```
solve nvu nvn nvw nvk nvd nvh
```

```
*
```

Κατόπιν ορίζονται όλες οι παράμετροι του ψεκασμού σωματιδίων. Αρχικά, ορίζεται ο αριθμός των ακροφυσίων ψεκασμού, ο αριθμός των μεγεθών των σωματιδίων που θα εκτοξευθούν και ο αριθμός των διαφορετικών ταχυτήτων. Στη συνέχεια, δηλώνεται το σημείο εκτόξευσης των σωματιδίων και το τέλος του ανύσματος εκτόξευσης. Δηλώνεται επίσης η μέση διάμετρος και οι τυπικές αποκλίσεις των διαμέτρων και των ταχυτήτων των

σωματιδίων. Έπειτα, καθορίζεται η μάζα, η ταχύτητα, η θερμοκρασία εκτόξευσης καθώς και η πυκνότητα (kg/m^3) των σωματιδίων του κάρβουνου. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα με την οποία τα σωματίδια μπαίνουν στον κλίβανο είναι 25 m/s και η πυκνότητά τους 1300 kg/m^3 . Θεωρούμε ότι τα σωματίδια δεν συμμετέχουν σε φυσικοχημικές διεργασίες με τον αέρα εισαγωγής ή μεταξύ τους, αλλά παραμένουν χημικώς αδρανή.

----- PHYSICAL MODELS -----

*

spray t

spray t ; nslot 1

injector setup 1 1 1 1 1 1

injector locate 1 0.002 0.10 0 0.5 0.10 0

injector size 1 3.5e-6 1.5e-5 10.0

injector bc 1 25.0 0.0 0.0 2473.0 4.73e-3

*

rho11 1300

*

Παρακάτω ορίζονται οι ιδιότητες του αέρα για την θερμοκρασία εισαγωγής $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. Η πυκνότητα είναι $0,14 \text{ kg/s}$, η ειδική θερμότητα 1688 kJ/(kg K) , το μοριακό βάρος του αέρα 29 καθώς και η επιτάχυνση της βαρύτητας $9,81 \text{ m/s}$.

----- PROPERTIES -----

*

agravy -9.81 ; moder 0

modwal 1 ; modcp 0

cp 1688.0 ; moden 1

den 0.14 ; wmol 29.0

amul 4.200e-05 ; modvis 1

press 1.053e+05 ; gascon 8.314e+3

*

Οι αρχικές τιμές του υπολογιστικού πεδίου ορίζονται στο παρακάτω τμήμα. Η αρχική αξονική ταχύτητα ορίζεται ίση με 4 m/s , η αρχική θερμοκρασία 2473 K , η κινητική ενέργεια της τύρβης $0,144 \text{ m}^2/\text{sec}^2$, η σκέδαση της τύρβης $0,011 \text{ m}^2/\text{sec}^3$, η πυκνότητα $0,14 \text{ kg/sec}$ και η πίεση $1,053\text{E}+5$.

----- INITIAL CONDITIONS -----

*

uin 4.0 ; vin 0.0

win 0.0 ; tmin 200.0

tmax 2.6E+3 ; temin 2473.0

rho11 0.14 ; tkin 0.144

edin 0.011 ; temin 2473.0

Εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών

Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

presin 1.053e+05

*

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος ορίζονται παρακάτω. Θέτονται 8 συνοριακές συνθήκες. Η εισροή του αέρα γίνεται από αριστερά (WEST), του υπολογιστικού πεδίου και απαιτούνται πέντε συνοριακές συνθήκες. Οι πρώτες τέσσερις αφορούν την είσοδο αέρα από τον καυστήρα Η πέμπτη αφορά την είσοδο του δευτερογενή αέρα. Η έκτη προσομοιώνει το βόρειο (NORTH) τοίχωμα του ΠΚ και επειδή έχουμε κυλινδρικό πλέγμα δεν απαιτείται άλλη συνοριακή συνθήκη για τα τοιχώματα (νότιο, εμπρός και πίσω τοίχωμα). Η έβδομη αφορά τις επικρατούσες συνθήκες στην ανατολική (EAST) έξοδο ενώ η όγδοη αναφέρεται στις συνθήκες εκτόξευσης σωματιδίων.

***----- BOUNDARY CONDITIONS -----**

*

```
physbc ; nreg 8
region 1 west fixm 1 1 1 1 1 N
region 2 west fixm 1 1 2 2 1 N
region 3 west fixm 1 1 3 3 1 N
region 4 west fixm 1 1 4 4 1 N
region 5 west fixm 1 1 5 M 1 N
region 6 north wall 1 L M M 1 N
region 7 east fixp L L 1 M 1 N
region 8 slot fixm 1 1 2 2 1 N
```

*

Στις γραμμές που ακολουθούν καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες για την παροχή του πρωτογενή αέρα. Η αξονική ταχύτητα είναι 25 m/s, η ακτινική και η περιφερειακή 0, η κινητική ενέργεια της τύρβης $5,625 \text{ m}^2/\text{sec}^2$, η σκέδαση της τύρβης $0,5 \text{ m}^2/\text{sec}^3$, η πυκνότητα 0,14 kg/s και η θερμοκρασία 2473 K.

***Core air**

```
bc vu nvu = 25.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.625
bc vu nvd = 0.5
bc vu nar0 = 0.14
bc vu nat = 2473.0
bc set 1 vu
```

*

Η δεύτερη συνοριακή συνθήκη αφορά τον αέρα μεταφοράς, ο οποίος εισέρχεται στον ΠΚ μαζί με το κάρβουνο.

***Hot air for combustion , Transport air**

```
bc vu nvu = 25.18
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.625
bc vu nvd = 0.5
bc vu naro = 0.14
bc vu nat = 2473.0
bc set 2 vu
*
```

Στην παρακάτω συνοριακή συνθήκη δηλώνεται ο περιδινούμενος αέρας ο οποίος εξασφαλίζει το στροβιλισμό του κάρβουνου για τη σωστή ανάμιξή του. Οι παράμετροί της συνοριακής συνθήκης ορίζονται όπως στις άλλες περιπτώσεις μόνο που εδώ προστίθεται και η συνιστώσα της περιφερειακής ταχύτητας nvw.

***Swirl air**

```
bc vu nvu = 120.208
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 120.208
bc vu nvk = 260.0
bc vu nvd = 24.0
bc vu naro = 0.14
bc vu nat = 2473.0
bc set 3 vu
*
```

Τελευταία συνοριακή συνθήκη για τον καυστήρα είναι η τέταρτη που αφορά τον αξονικό αέρα. Ορίζεται όπως οι υπόλοιπες.

***Axial air**

```
bc vu nvu = 165.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 245.025
bc vu nvd = 21.5
bc vu naro = 0.14
bc vu nat = 2473.0
bc set 4 vu
*
```

Παρακάτω ορίζεται η συνοριακή συνθήκη για τον δευτερογενή αέρα. Η ταχύτητά του είναι 4 m/s.

***Second hot air**

```
bc vu nvu = 4.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 0.144
bc vu nvd = 0.01108
bc vu naro = 0.14
bc vu nat = 2473.0
bc set 5 vu
*
```

Στα τοιχώματα ορίζεται ως μηδενική η αξονική και η περιφερειακή ταχύτητα ενώ η ακτινική υπολογίζεται από τον κώδικα. Επίσης καθορίζεται και η θερμοκρασία των τοιχωμάτων στους 1273 K.

***North wall**

```
bc vu nvu = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 0.0
bc vu nvd = 0.0
bc vu nat = 1273.0
bc set 6 vu
*
```

Στην έξοδο ορίζεται μόνο η θερμοκρασία εξόδου και η διαφορά πίεσης.

***out**

```
bc vu nat = 1173.0
bc vu nap = 0
bc set 7 vu
*
```

Τέλος στην όγδοη συνοριακή συνθήκη καθορίζονται οι συνθήκες ψεκασμού των σωματιδίων του κάρβουνου.

***slot**

```
bc vu nvu = 25.18
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.625
bc vu nvd = 0.5
bc vu naro = 0.14
bc vu nat = 2473.0
```

```
bc set 8 vu
```

```
*
```

Στο τέλος του αρχείου εισαγωγής 'Kamino.in' δηλώνονται ορισμένες μεταβλητές που συμβάλουν στην σύγκλιση της λύσης, καθορίζουν τον αριθμό των επαναλήψεων, και καθορίζουν την εκτύπωση των αποτελεσμάτων.

```
*----- SOLUTION CONTROL -----
```

```
*
```

```
dtfals nvu 2.0e+2
```

```
dtfals nvv 2.0e+2
```

```
dtfals nvw 2.0e+2
```

```
dtfals nvk 2.0e-1
```

```
dtfals nvd 2.0e-1
```

```
nsweep nvu 20
```

```
nsweep nvw 20
```

```
niter 2500
```

```
*
```

```
*----- RESULTS CONTROL -----
```

```
*
```

```
nptyp 100
```

```
print nat nacp nvh
```

```
save to RESNEW
```

```
restart from RESTART
```

```
end
```

5.1.3 Περιγραφή Παραμετρικής Μελέτης

Με τη προσομοίωση ενός φυσικού προβλήματος στον υπολογιστή, δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν κάποια φαινόμενα τα οποία είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθούν πειραματικά. Παράλληλα, μπορεί να γίνει προσομοίωση πολλών περιπτώσεων με διαφοροποιημένες ορισμένες από τις βασικές μεταβλητές του προβλήματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί η επιρροή της μεταβλητών στο φυσικό πρόβλημα και να εξαχθούν συμπεράσματα για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί στον στροβιλισμό του αέρα του καυστήρα. Ο στροβιλισμός στον ΠΚ έχει μεγάλη σημασία, καθώς από αυτόν εξαρτάται η τροχιά των σωματιδίων του κάρβουνου και συνεπώς η καλή ανάμιξή του με τον αέρα, με σκοπό την αποδοτικότερη καύση.

Ο στροβιλισμός του αέρα στον ΠΚ προέρχεται από μια είσοδο του καυστήρα και εξαρτάται από την παροχή, την γωνία στροβιλισμού, και την διατομή της εισόδου. Στα πλαίσια της παραμετρικής μελέτης επιλέχτηκαν τρεις διαφορετικές γωνίες στροβιλισμού καθώς και τρία διαφορετικά πάχη για την μεταβολή της διατομής της εισόδου του αέρα περιδίνησης. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι στον καυστήρα Rotaflam υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της διατομής του αέρα περιδίνησης.

Οι τρεις γωνίες στροβιλισμού που επιλέχτηκαν είναι 30° , 45° , 60° ως προς τον αξονική διεύθυνση, ενώ τα πάχη 75%, 100%, 125% ως προς το πάχος της διατομής του περιδινούμενου αέρα του Σχήματος 5-2. Συνολικά δημιουργήθηκαν εννεία μοντέλα από τον συνδυασμό των γωνιών με τα πάχη, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-5: Περιπτώσεις (Μοντέλα) της Παραμετρικής Μελέτης

	Γωνία 30°	Γωνία 45°	Γωνία 60°
Πάχος 75%	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
Πάχος 100%	Μοντέλο 4	Μοντέλο 5	Μοντέλο 6
Πάχος 125%	Μοντέλο 7	Μοντέλο 8	Μοντέλο 9

Στον παρακάτω Πίνακα 5-6 αναγράφονται τα πάχη και οι αντίστοιχες ταχύτητες των παραπάνω μοντέλων.

Πίνακας 5-6: Συνθήκες Λειτουργίας Ακροφυσίου

Μοντέλο	Αξονική Ταχύτητα (m/s)	Περιδινούμενη Ταχύτητα (m/s)	Πάχος Διατομής Περιδινούμενου Αέρα (m)
Μοντέλο 1	200	115	0,018
Μοντέλο 2	163	163	0,018
Μοντέλο 3	115	200	0,018
Μοντέλο 4	147	85	0,024
Μοντέλο 5	120	120	0,024
Μοντέλο 6	85	147	0,024
Μοντέλο 7	115	66	0,030
Μοντέλο 8	94	94	0,030
Μοντέλο 9	66	115	0,030

5.2 Αρχικό Μοντέλο Καύσης

Όπως έχει είδη αναφερθεί ο κώδικας DIAN3.D δεν περιλαμβάνει μοντέλο καύσης. Για αυτό το λόγο, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την ρεαλιστικότερη προσομοίωση του ΠΚ αναπτύχθηκε ένα αρχικό μοντέλο καύσης σωματιδίων κάρβουνου.

Ο ρυθμός απώλειας μάζας ενός σωματιδίου κάρβουνου εξαρτάται από τον μηχανισμό καύσης του σωματιδίου και λαμβάνεται ανάλογα με το σχετικό ρυθμό δύο μηχανισμών. Αυτοί οι μηχανισμοί αφορούν το ρυθμό της χημικής αντίδρασης μεταξύ οξυγόνου και κάρβουνου και τη διάχυση του οξυγόνου στο οριακό στρώμα του αέρα που δημιουργείται γύρω από το σωματίδιο. Αν θεωρηθεί ότι και οι δύο μηχανισμοί έχουν την ίδια σπουδαιότητα, ο ρυθμός μείωσης της μάζας του σωματιδίου ανά μονάδα εξωτερικής επιφάνειας του σωματιδίου μπορεί να εκφραστεί [18] ως :

$$\frac{dM_p}{dt} = -K_{\text{eff}} \cdot A_p \cdot \beta \cdot \rho \cdot m_{O_2} \quad (8)$$



όπου : A_p = εξωτερική επιφάνεια του σωματιδίου

β = στοιχειομετρικός συντελεστής για την καύση κάρβουνου

ρ = πυκνότητα αερίου

m_{O_2} = συγκέντρωση μάζας οξυγόνου

Το K_{eff} υπολογίζεται από τον τύπο:
$$K_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{K_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_p}}} + \frac{D \cdot Nu_d}{d}} \quad (9)$$

όπου: $K_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_p}}$ είναι ο τύπος του Arrhenius

K_0 = συντελεστής συχνότητας

E = ενέργεια ενεργοποίησης

T_p = θερμοκρασία σωματιδίου

D = συντελεστής διάχυσης

d = διάμετρος σωματιδίου

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται από τον τύπο $Nu_d = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr^{0.3}$ (10)

Ο αριθμός Reynolds του σωματιδίου που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Re_d = \frac{\rho \cdot (u - u_p) \cdot d}{\mu} \quad (11)$$

Ο συντελεστής διάχυσης D υπολογίζεται από τον τύπο: $D = D_0 \left(\frac{T_m}{T_0}\right)^{1.75}$ (12)

όπου: D_0 = ο συντελεστής διάχυσης στη θερμοκρασία αναφοράς T_0

T_0 = θερμοκρασία αναφοράς

$$T_m = (T + T_p)/2 \quad (13)$$

όπου: T = θερμοκρασία του αερίου

Στον παρακάτω Πίνακα 5-5 υπολογίζεται το $\frac{dM_p}{dt}$

Πίνακας 5-7: Υπολογισμός Απώλειας Μάζας Σωματιδίου

Υπολογισμός Απώλειας Μάζας Σωματιδίων Κάρβουνου	
$dM_p/Dt = K_{eff} F_p \beta \rho$ mo2	-2,575E-11
$F_p = 4\pi R^2$	3,847E-11
β	2,664E+00
ρ	1,600E-01
mo2	1,123E+00
K_{eff}	1,399E+00
Nu_d	1,290E-02
k_o	2,600E+01
E/R	-2,979E+01
TR	2,473E+03
d	3,500E-06
D	1,837E-04
REd	5,548E-01
Pr	7,000E-01

Τα σωματίδια δίνουν θερμότητα στο υπολογιστικό πεδίο με σταθερό ρυθμό από το σημείο έκχυσης μέχρι το σημείο που χάνουν τη μάζα τους.

Το μοντέλο αυτό είναι μια καλύτερη προσέγγιση της καύσης από το προηγούμενο, καθώς σε αυτό ο αέρας εισαγωγής (δευτερογενής, αέρας από τον καυστήρα) έχει πλέον τις πραγματικές του τιμές οι οποίες απεικονίζονται στον Πίνακα 5-1. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σημεία έκχυσης σωματιδίων κάρβουνου. Παρακάτω παρουσιάζεται το αρχείο εισαγωγής 'kamino.in'

```

title Fluid Dynamics Laboratory (CFD Group)
Mechanical Industrial Engineering Dept.
*
*----- GEOMETRY -----
*
integer l=84 , m=24 , n=18
l l ; m m ; n n
xgrid 1 L 0.0 72.0 1.0
ygrid 1 1 0.0 0.086 1.0
ygrid 2 2 0.086 0.116 1.0
ygrid 3 3 0.116 0.141 1.0
ygrid 4 4 0.141 0.153 1.0
ygrid 5 m 0.153 2.25 1.0
zgrid 6.28
polar t ; zcycle t
*
*-----DEPENDENT VARIABLES-----
*
solve nvu nvv nvw nvk nvd nvh
*
*----- PHYSICAL MODELS -----
*
spray t
spray t ; nslot 4
injector setup 1 1 1 1 1 1
injector locate 1 0.005 0.10 0 1.9 0.10 0
injector size 1 3.5e-6 1.5e-5 10.0
injector bc 1 25.0 0.0 0.0 353.0 3.0e-2
*
injector setup 2 1 1 1 1 1
injector locate 2 0.005 0.10 1.57 1.9 0.10 1.57
injector size 2 3.5e-6 1.5e-5 10.0

```



```

injector bc      2  25.0  0.0  0.0  353.0  3.0e-2
*
injector setup   3   1    1    1    1    1
injector locate  3  0.005 0.10 3.14 1.9 0.10 3.14
injector size    3 3.5e-6 1.5e-5 10.0
injector bc      3 25.0 0.0 0.0 353.0 3.0e-2
*
injector setup   4   1    1    1    1    1
injector locate  4 0.005 0.10 4.71 1.9 0.10 4.71
injector size    4 3.5e-6 1.5e-5 10.0
injector bc      4  25.0  0.0  0.0  353.0  3.0e-2
*
rhol1 1300
*
*----- SO2 MODEL -----
*
lso2 f
*
*----- PROPERTIES -----
*
*agravy -9.81
moder 0 ; modwal 1
modcp 0 ; moden 1
modvis 1
cp 1688.0 ; amul 4.200e-05
den 0.353 ; wmol 29.0
press 1.053e+05 ; gascon 8.314e+3
*
*----- INITIAL CONDITIONS -----
*
uin 4.0 ; vin 1.0
win 1.0 ; tmin 200.0
tmax 2.6e+15
rhoin 0.353 ; tkin 0.144
edin 0.011 ; temin 1273.0
*presin -49.0
*
*----- BOUNDARY CONDITIONS -----
*
physbc ; nreg 8
region 1 west fixm 1 1 1 1 1 N
region 2 west fixm 1 1 2 2 1 N

```

```

region 3 west fixm 1 1 3 3 1 N
region 4 west fixm 1 1 4 4 1 N
region 5 west fixm 1 1 5 M 1 N
region 6 north wall 1 L M M 1 N
region 7 east fixp L L 1 M 1 N
region 8 slot fixm 1 1 2 2 1 N

```

*

*Core air

```

bc vu nvu = 25.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.0
bc vu nvd = 0.5
bc vu naro = 1.0
bc vu nat = 320.0
bc set 1 vu

```

*

*Hot air for combustion , Transport air

```

bc vu nvu = 25.18
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.625
bc vu nvd = 0.5
bc vu naro = 1.0
bc vu nat = 353.0
bc set 2 vu

```

*

*Swirl air

```

bc vu nvu = 123.208
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 123.0
bc vu nvk = 300.0
bc vu nvd = 30.0
bc vu naro = 1.0
bc vu nat = 320.0
bc set 3 vu

```

*

*Axial air

```

bc vu nvu = 165.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 245.025

```

```

bc vu nvd = 24.5
bc vu naro = 1.0
bc vu nat = 320.0
bc set 4 vu
*
*Second hot air
bc vu nvu = 4.0
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 0.144
bc vu nvd = 0.01108
bc vu naro = 0.353
bc vu nat = 1273.0
bc set 5 vu
*
*North wall
bc vu nvu = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 0.0
bc vu nvd = 0.0
bc vu nat = 1250.0
bc set 6 vu
*
*out
bc vu nat = 1173.0
bc vu nap = 0.0
bc set 7 vu
*
*slot
bc vu nvu = 25.18
bc vu nvv = 0.0
bc vu nvw = 0.0
bc vu nvk = 5.625
bc vu nvd = 0.5
bc vu naro = 1.0
bc vu nat = 353.0
*bc set 8 vu
*
*----- SOLUTION CONTROL -----
*
dtfals nvu 2.0E+2
dtfals nvv 2.0E+2

```

```

dtfals nvw 2.0E+2
dtfals nvh 5.0
dtfals nvk 1.0E+2
dtfals nvd 1.0E+2
nsweep nvu 20
nsweep nvw 20
nsweep nvh 30
niter 2500
*
*----- RESULTS CONTROL -----
*
nptyp 100
iref 1 ; jref 3 ; kref 1
print nat
save to RESNEW
restart from RESTART
end

```

5.3 Παρουσίαση και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα υπολογιστικά μοντέλα είναι η επίτευξη σύγκλισης της λύσης. Η σύγκλιση της λύσης στην υπολογιστική ρευστομηχανική εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που αφορούν την γεωμετρία του μοντέλου, την κατανομή του υπολογιστικού πλέγματος, τις συνοριακές συνθήκες, την ύπαρξη ή όχι πολυφασικής ροής και τον αλγόριθμο της λύσης. Η σύγκλιση ήταν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που εμφανίστηκαν λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας, των συνοριακών συνθηκών και της διφασικής ροής. Όσον αφορά τη γεωμετρία, οι είσοδοι του καυστήρα έχουν πολύ μικρή διατομή, πράγμα το οποίο κατέστησε αναγκαία την παρουσία πολλών κελιών κοντά στον καυστήρα. Παράλληλα, η μεγάλη διαφορά ταχυτήτων μεταξύ των διαφόρων εισόδων του καυστήρα και του δευτερογενή αέρα, έκανε ακόμα μεγαλύτερη την ανάγκη για πολλά κελιά κοντά στην είσοδο, ενώ στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε μεταβλητό μήκος κελιών παρουσιάστηκαν προβλήματα συμμετρίας του κώδικα. Ανεξάρτητα από αυτά, η ανάγκη τρισδιάστατου πλέγματος ήταν ανασταλτικός παράγοντας στην χρήση πολλών κελιών καθώς πολλαπλασιαζόταν ο χρόνος εκτέλεσης αρχικά στον Υπολογιστή HP/UX 9000 C100 και αργότερα στον Υπολογιστή Silicon Graphics Origin 200 του Εργ. Ρευστομηχανικής &

Στροβιλομηχανών. Επομένως η επιλογή του υπολογιστικού πλέγματος ήταν ένας συμβιβασμός όλων των παραπάνω παραγόντων. Το υπολογιστικό πεδίο του ΠΚ διαμέτρου 4,5 m εκτείνεται σε μήκος 72 m και το υπολογιστικό πλέγμα που επιλέχθηκε ήταν 84x24x18 κελιά στην x, y, z κατεύθυνση, αντίστοιχα.

Κατά την διάρκεια της παρούσης Διπλωματικής εργασίας δοκιμάστηκαν πολλά μοντέλα με διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων. Για την ικανοποιητική σύγκλιση των τελικών μοντέλων επιλέχθηκε ο αριθμός 2500 επαναλήψεων για κάθε μοντέλο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η διάρκεια εκτέλεσης κάθε μοντέλου για 2500 επαναλήψεις είναι 9 ώρες στον Υπολογιστή Silicon Graphics Origin 200 και 27ώρες στον Υπολογιστή HP/UX 9000 C100.

Οι γραφικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων επισυνάπτονται στο Παράρτημα στο τέλος της παρούσης εργασίας. Τα πρώτα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν σε δύο περιπτώσεις που εκτελέστηκαν για να ελεγχθεί οι συμμετρία του μοντέλου με στροβιλισμό και με βαρύτητα, αντίστοιχα.

Το πρώτο δοκιμαστικό μοντέλο που παρουσιάζεται (σελ. 154) αφορά σε ροή στο ΠΚ με στροβιλισμό και χωρίς βαρύτητα. Αρχικά, παρουσιάζεται το διαγράμμα τυπικής σύγκλισης για τις κύριες μεταβλητές που επλύει ο κώδικας. Κατόπιν, παρουσιάζονται οι κατανομές του θερμοκρασιακού πεδίου σε εγκάρσιες τομές κατά μήκος του ΠΚ. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται αξονοσυμμετρία του θερμοκρασιακού πεδίου. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος μιας διαμετρικής τομής όπου επιβεβαιώνεται η συμμετρία του πεδίου ροής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται λεπτομερής κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σε μια εγκάρσια τομή στα 10m από την είσοδο του ΠΚ. Παρατηρούμε ότι τα θερμότερα αέρια κινούνται στο κέντρο του πεδίου ροής ενώ η θερμοκρασία τους μειώνεται κοντά στα ψυχρότερα τοιχώματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο διαγράμματα κατανομής θερμοκρασίας σε εγκάρσιες τομές στα 20m και 30m από την είσοδο του ΠΚ. Στα ίδια διαγράμματα εμφανίζονται τα ανύσματα των ταχυτήτων στην συγκεκριμένη τομή. Πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτό, όπως και στα αντίστοιχα επόμενα διαγράμματα, οι εμφανιζόμενες κλίμακες των ανυσμάτων αφορούν το συνολικό μέγεθος των ταχυτήτων και όχι μόνο την προβολή τους στην εγκάρσια τομή. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται αξονοσυμμετρία του θερμοκρασιακού πεδίου και των ταχυτήτων στροβιλισμού.

Στο τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζονται οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας για τα πρώτα 15m που επιβεβαιώνουν την συμμετρία και δείχνουν το εύρος της ροής μετά το ακροφύσιο.

Το δεύτερο δοκιμαστικό μοντέλο που παρουσιάζεται (σελ. 162) αφορά σε ροή στο ΠΚ με βαρύτητα και χωρίς στροβιλισμό. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι αντίστοιχα με του προηγούμενου μοντέλου. Παρατηρούμε συμμετρία του πεδίου ροής ως προς το κατακόρυφο διαμετρικό επίπεδο κατά μήκος του ΠΚ. Τα θερμά αέρια παρασύρονται από τις δυνάμεις της βαρύτητας και ανέρχονται προς το πάνω μέρος του ΠΚ. Στο κάτω μέρος του ΠΚ και περίπου στα 10-15m, παρατηρείται μία έντονη ασυμμετρία θερμοκρασιακού πεδίου η οποία οφείλεται στην τάση για ανακυκλοφορία της ροής των αερίων του ακροφυσίου.

Το πρώτο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης (Πίνακας 5-5), που παρουσιάζεται (σελ. 170), έχει πάχος διατομής του στροβιλισμού 75% του κανονικού, ενώ η γωνία στροβιλισμού ως προς την αξονική διεύθυνση είναι 30° . Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι τα αντίστοιχα με τα παραπάνω, ενώ στο τέλος προστίθεται και ένα διάγραμμα με τις τροχιές των σωματιδίων του κάρβουνου. Πρέπει να τονιστεί ότι τα σωματίδια εκτοξεύονται παράλληλα στον άξονα συμμετρίας και ο κύριος αέρας του κλιβάνου, αλλά κυρίως οι μεγάλες ταχύτητες του αέρα στροβιλισμού (Πίνακας 5-1), τα παραλαμβάνουν, οδηγώντας τα σε πολύπλοκες τροχιές. Παρατηρούμε ότι το θερμοκρασιακό πεδίο δεν είναι συμμετρικό και τα θερμά αέρια παρασύρονται από τον στροβιλισμό της ροής και τις δυνάμεις της βαρύτητας με αποτέλεσμα να ανέρχονται ψηλά και δεξιά σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας του ΠΚ, λόγω της δύναμης Coriolis. Τα σωματίδια του κάρβουνου παρασύρονται από τις μεγάλες ταχύτητες που επικρατούν λόγω του καυστήρα και επειδή έχουν μικρή διάμετρο και μάζα παραμένουν σε ακτίνα 0,1m από τον άξονα συμμετρίας.

Στο δεύτερο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 179), αλλάζει η γωνία στροβιλισμού από 30° σε 45° , ενώ το πάχος διατομής του στροβιλισμού παραμένει 75% του κανονικού. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι τα αντίστοιχα με τα παραπάνω. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά σε σχέση με το πρώτο μοντέλο, ενώ καλύπτουν μεγαλύτερο μέρος του πεδίου. Τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπως φαίνεται στο διάγραμμα με τη λεπτομερή κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου στην εγκάρσια τομή στα 10m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γωνία στροβιλισμού και άρα ο κώνος διασποράς είναι μεγαλύτερα. Οι

ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανέρχονται ψηλότερα στον ΠΚ, μέχρι τα 1,2m.

Στο τρίτο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 188), η γωνία στροβιλισμού είναι 60^0 ενώ το πάχος διατομής του στροβιλισμού παραμένει 75% του κανονικού. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά σε σχέση με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, ενώ καλύπτουν ακόμα ευρύτερο μέρος του πεδίου. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν ακόμη μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν τις μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανεβαίνουν ακόμη ψηλότερα στον ΠΚ, μέχρι τα 1,6m.

Στο τέταρτο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 197), η γωνία στροβιλισμού είναι 30^0 ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το κανονικό. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανεβαίνουν πιο ψηλά ενώ υπάρχει μικρότερη μετατόπιση προς τα δεξιά σε σχέση με το πρώτο μοντέλο. Τα θερμά αέρια καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ η διασπορά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη σε σχέση πάντα με το πρώτο μοντέλο. Λόγω της πολυπλοκότητας της ροής είναι πολύ δύσκολο να χαρακτηριστεί το μέγεθος της επίδρασης των δυνάμεων βαρύτητας σε σχέση με τις δυνάμεις αδράνειας και οπισθέλκουσας των σωματιδίων.

Στο πέμπτο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 206), η γωνία στροβιλισμού είναι 45^0 ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το κανονικό. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά, ενώ καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανέρχονται ψηλότερα στον ΠΚ, μέχρι τα 0,8m. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο μοντέλο, με πάχος της διατομής του στροβιλισμού 75% και γωνία στροβιλισμού 45^0 (Μοντέλο 2) παρατηρούνται οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο μοντέλο.

Στο έκτο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 215), η γωνία στροβιλισμού είναι 60^0 ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το κανονικό. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά, ενώ καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου σε σχέση με τα δύο προηγούμενα μοντέλα. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω

μέρος του ΠΚ αποκτούν ακόμη μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανέρχονται ακόμη πιο ψηλά στον ΠΚ, μέχρι τα 1,2m. Σε σύγκριση με το αντίστοιχο μοντέλο, με πάχος της διατομής του στροβιλισμού 75% και γωνία στροβιλισμού 60° (Μοντέλο 3) παρατηρούνται οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στο τέταρτο μοντέλο.

Στο έβδομο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 224), η γωνία στροβιλισμού είναι 30° ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το 125% του κανονικού. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά ενώ παρατηρείται μικρότερη μετατόπιση προς τα δεξιά σε σχέση με το πρώτο και το τέταρτο μοντέλο. Τα θερμά αέρια καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ η διασπορά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη σε σχέση πάντα με το πρώτο και το τέταρτο μοντέλο.

Στο όγδοο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 233), η γωνία στροβιλισμού είναι 45° ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το 125% του κανονικού. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά, ενώ καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανέρχονται μέχρι τα 0,5m. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα, με πάχος της διατομής του στροβιλισμού 75% , 100% και γωνία στροβιλισμού 45° (Μοντέλο 2 και 5) παρατηρούνται οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο μοντέλο.

Στο ένατο μοντέλο της παραμετρικής μελέτης που παρουσιάζεται (σελ. 242), η γωνία στροβιλισμού είναι 60° ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το 125% του κανονικού. Παρατηρούμε ότι τα θερμά αέρια ανέρχονται πιο ψηλά, ενώ καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν μικρότερες θερμοκρασίες. Οι ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας παίρνουν ακόμη μικρότερες τιμές, ενώ τα σωματίδια ανέρχονται μέχρι τα 0,7m. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα, με πάχος της διατομής του στροβιλισμού 75% , 100% και γωνία στροβιλισμού 60° (Μοντέλο 3 και 6) παρατηρούνται οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στο έβδομο μοντέλο.

Στο αρχικό μοντέλο καύσης που παρουσιάζεται (σελ. 251), η γωνία στροβιλισμού είναι 45° ενώ το πάχος της διατομής του στροβιλισμού είναι το κανονικό. Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα τυπικής σύγκλισης για τις κύριες μεταβλητές του κώδικα. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος μιας διαμετρικής διατομής. Παρατηρούμε ότι τα σωματίδια προσδίδουν θερμότητα στο σύστημα θερμότητα σχηματίζοντας μία 'φλόγα'. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η ίδια διαμετρική διατομή για τα πρώτα 20m, όπου εμφανίζεται λεπτομερώς η 'φλόγα'. Η 'φλόγα' φαίνεται να έχει μήκος 10m και διάμετρο 1.5m. Παρατηρούμε τις χαμηλές θερμοκρασίες στην είσοδο του καυστήρα και την διάχυση της θερμότητας στο υπολογιστικό πεδίο. Στη συνέχεια φαίνονται οι ισοθερμοκρασιακές γραμμές του θερμοκρασιακού πεδίου. Παρατηρούμε την επίδραση του στροβιλισμού του αέρα του ακροφυσίου που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των ισοθερμοκρασιακών γραμμών ως 'ανοιγμένων' κώνων. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται μια λεπτομερής κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σε μια εγκάρσια τομή στα 4m από την είσοδο του ΠΚ. Παρατηρούμε τις τέσσερις εστίες θερμότητας, οι οποίες προέρχονται από τα τέσσερα σημεία εκτόξευσης του κάρβουνου που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Στη συνέχεια απεικονίζεται μια λεπτομερής κατανομή του πεδίου πυκνοτήτων των αερίων σε μια εγκάρσια τομή στα 4m από την είσοδο του ΠΚ. Παρατηρούμε μια μείωση της πυκνότητας στις περιοχές που υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες. Στο τελευταίο διάγραμμα εμφανίζεται η τροχιά μιας δέσμης σωματιδίων κάρβουνου. Η μάζα του σωματιδίου μειώνεται σταδιακά και μέχρι τα 6 μέτρα έχει 'καεί'.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των φαινομένων ροής και μεταφοράς στον ΠΚ που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και από την εμπειρία που αποκτήθηκε με την χρήση του κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής DIAN3D μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα που αφορούν την λειτουργία του κώδικα και το μοντέλο του ΠΚ.

Λειτουργία του Κώδικα DIAN3D

- Πιστοποιήθηκε η ικανότητα του κώδικα να επιλύει σύνθετα προβλήματα σε πολικές συντεταγμένες με στροβιλισμό και βαρύτητα και αποδείχτηκε η αξία του για την ανάλυση πολύπλοκων τεχνολογικών φαινομένων.
- Ενσωματώθηκαν ρουτίνες διαχείρισης των αποτελεσμάτων του κώδικα, σε πολιικά πλέγματα, για την γραφική απεικόνιση αυτών με γνωστά πακέτα γραφικών.
- Δημιουργήθηκε ένα αρχικό μοντέλο καύσης, διευρύνοντας σε μεγάλο βαθμό την χρήση του κώδικα σε ερευνητικές δραστηριότητες.

Προσομοίωση του ΠΚ

- Έγινε μια μαθηματική προσομοίωση και αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο με την χρήση του κώδικα DIAN3D, για την πραγματοποίηση μιας παραμετρικής μελέτης των φαινομένων ροής και μεταφοράς στον ΠΚ.
- Ο στροβιλισμός και η βαρύτητα παίζουν καθοριστικό ρόλο στη ροή των αερίων στον ΠΚ, γιατί μετατοπίζουν την ροή ψηλά και έκκεντρα.
- Η γωνία του στροβιλισμού επιδράει στο θερμοκρασιακό πεδίο των αερίων του ΠΚ προκαλώντας σημαντικές ασυμμετρίες. Όσο η γωνία στροβιλισμού μεγαλώνει σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας τα θερμότερα αέρια καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου και ανέρχονται ψηλότερα. Παράλληλα, τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες λόγω της τάσης για ανακυκλοφορία στην περιοχή αυτή. Τα σωματίδια ανέρχονται ψηλότερα στον ΠΚ.

- Το πάχος της διατομής του στροβιλισμού επηρεάζει το θερμοκρασιακό πεδίο του ΠΚ. Όσο το πάχος της διατομής μεγαλώνει τα θερμότερα αέρια καλύπτουν ευρύτερο μέρος του πεδίου, ανέρχονται ψηλότερα ενώ παρατηρείται μικρότερη μετατόπιση σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας. Παράλληλα τα αέρια στο κάτω μέρος του ΠΚ αποκτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η διασπορά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη.
- Η παραμετρική αυτή μελέτη επιτρέπει τον προσδιορισμό της λειτουργίας των ακροφυσίων εκτόξευσης, καθώς και των σωματιδίων του κάρβουνου.
- Το αρχικό μοντέλο καύσης το οποίο δεν περιελάμβανε χημικές αντιδράσεις, αλλά μόνο την επίδραση της έκλυσης θερμότητας της καύσης, επέτρεψε τον προσδιορισμό του σχήματος και της έκτασης της φλόγας.

6.2 Προτάσεις

Οι προτάσεις που διατυπώνονται αφορούν την βελτίωση και εξέλιξη του κώδικα, καθώς και την εξέλιξη του μοντέλου του ΠΚ.

- Να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο πακέτο καύσης και να προστεθούν οι ρουτίνες συγκεντρώσεων ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν οι φυσικοχημικές διεργασίες.
- Να αναπτυχθεί ένα μοντέλο ακτινοβολίας για τον πλήρη υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας, επειδή η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο σε καύση σωματιδίων κάρβουνου.
- Να εξελιχθεί ο κώδικας ώστε να έχει την δυνατότητα να δέχεται καμπυλόγραμμο καθορισμό του υπολογιστικού πλέγματος, για να μπορεί να επιλύει πιο σύνθετες γεωμετρίες.
- Να συμπεριληφθούν στον κώδικα μοντέλα τύρβης που λαμβάνουν υπόψη την παρουσία και την επίδραση των σωματιδίων.

Παράρτημα

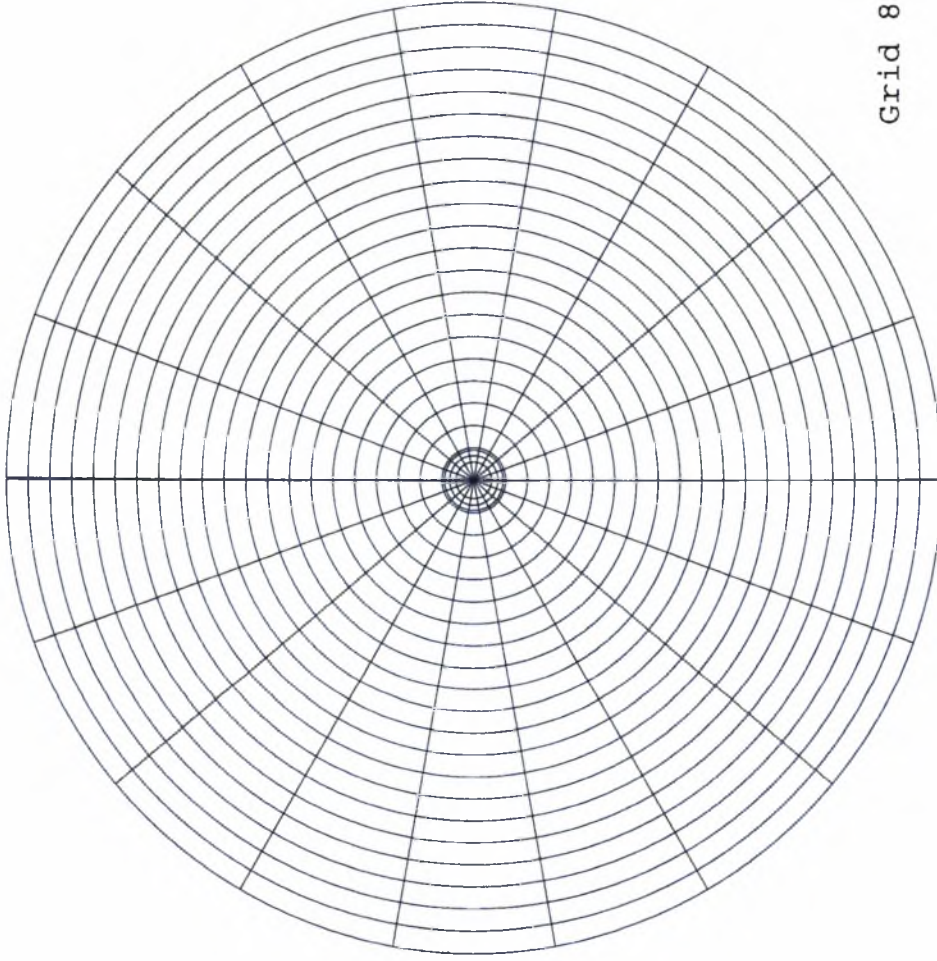
Παρουσίαση Αποτελεσμάτων των Μοντέλων

- 1) Παρουσίαση του υπολογιστικού πλέγματος σε εγκάρσια τομή
- 2) Παρουσίαση του υπολογιστικού πλέγματος κατά μήκος μιας διαμετρικής τομής
- 3) Για κάθε μοντέλο επισυνάπτονται τα εξής διαγράμματα:
 - Τυπική Σύγκλιση
 - Κατανομές θερμοκρασιακού πεδίου σε εγκάρσιες τομές κατά μήκος του ΠΚ
 - Κατανομή θερμοκρασιακού πεδίου κατά μήκος μιας διαμετρικής τομής
 - Λεπτομερή κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σε μια εγκάρσια τομή στα 10m
 - Λεπτομερή κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σε μια εγκάρσια τομή στα 20m
 - Λεπτομερή κατανομή του θερμοκρασιακού πεδίου σε μια εγκάρσια τομή στα 30m
 - Ισοταχείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας
 - Τροχιές σωματιδίων κάρβουνου

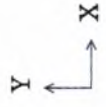


PHOTON

Grid Layout (Cross Plane)

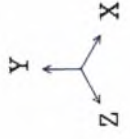


Grid 84 x 24 x 18

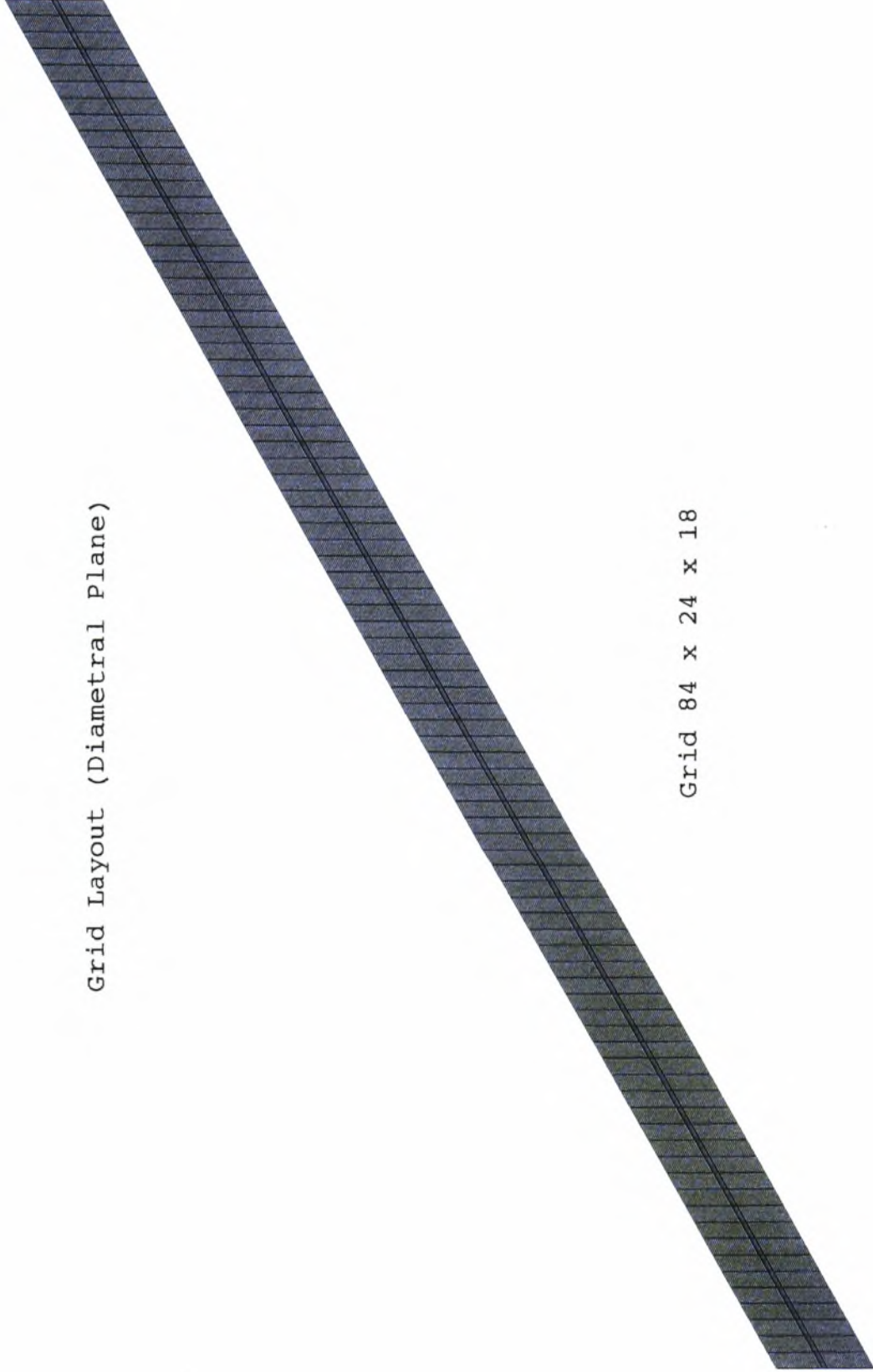




PHOTON



Grid Layout (Diametral Plane)



Grid 84 x 24 x 18

Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)

Μοντέλο με Στροβιλισμό χωρίς Βαρύτητα

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45⁰

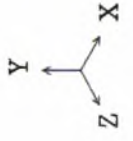
Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%



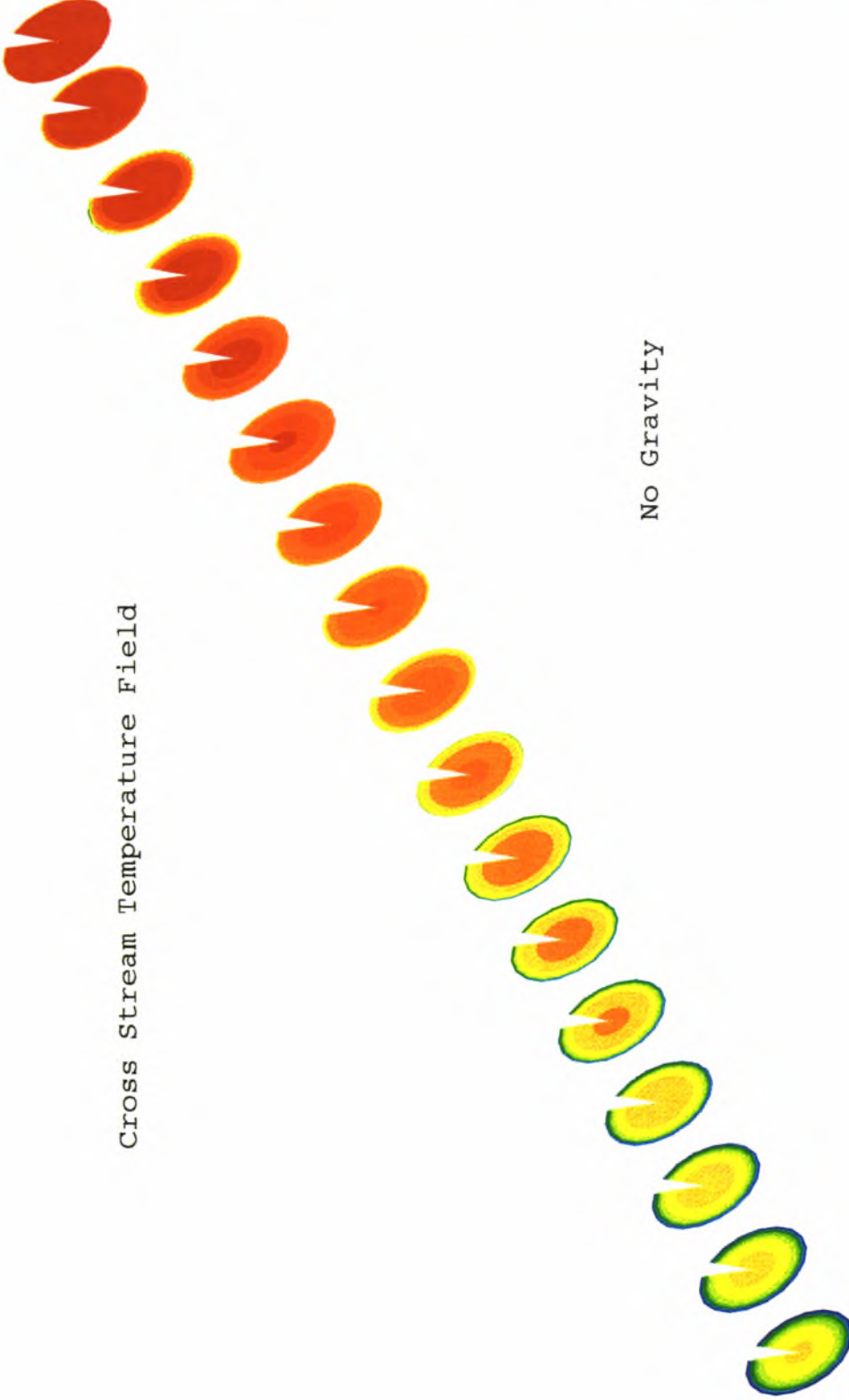
PHOTON

TEMP

1867
1910
1954
1997
2040
2083
2127
2170
2213
2257
2300
2343
2387
2430
2473



Cross Stream Temperature Field



No Gravity

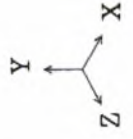
Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)



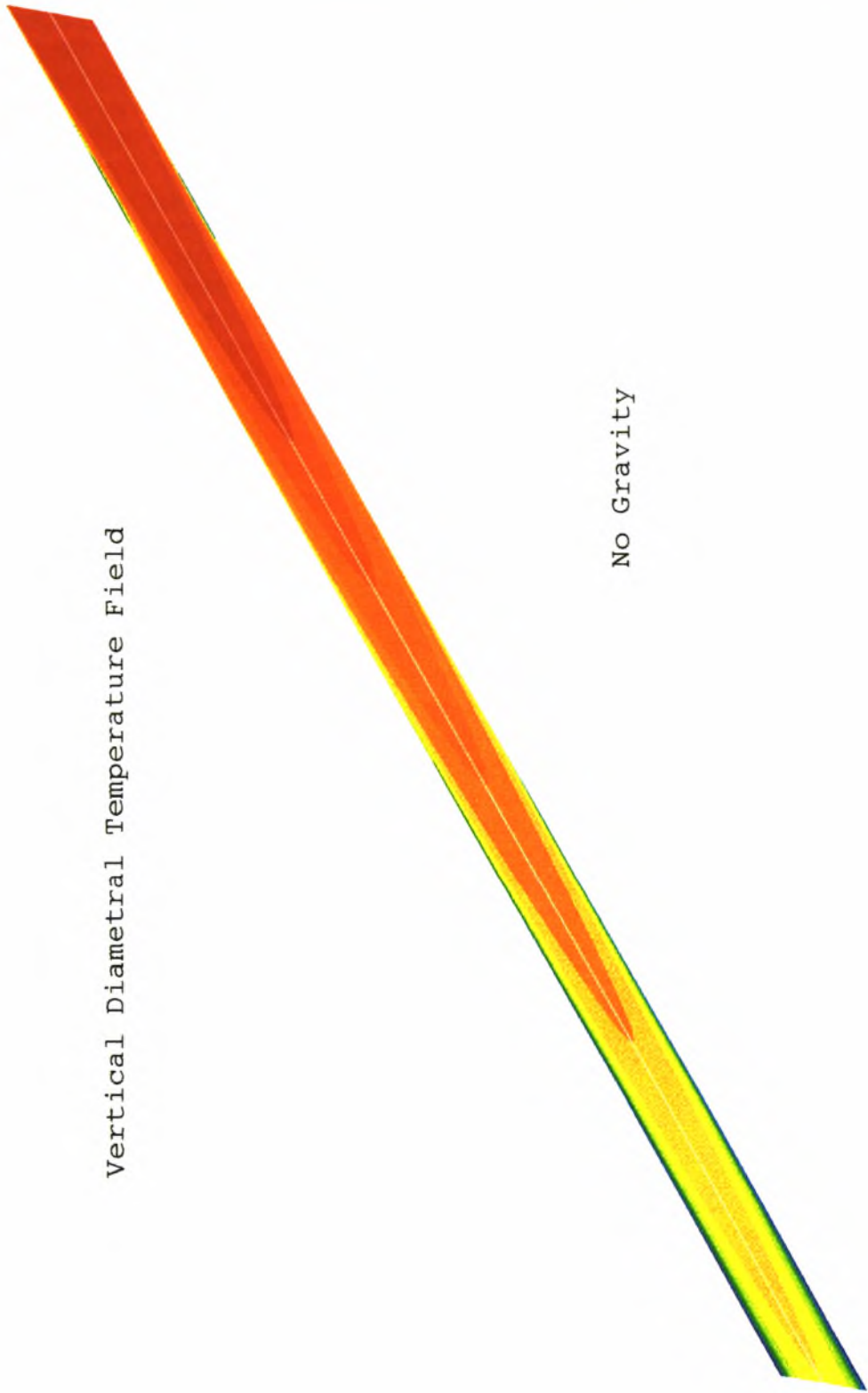
PHOTON

TEMP

- 1867
- 1910
- 1954
- 1997
- 2040
- 2083
- 2127
- 2170
- 2213
- 2257
- 2300
- 2343
- 2387
- 2430
- 2473

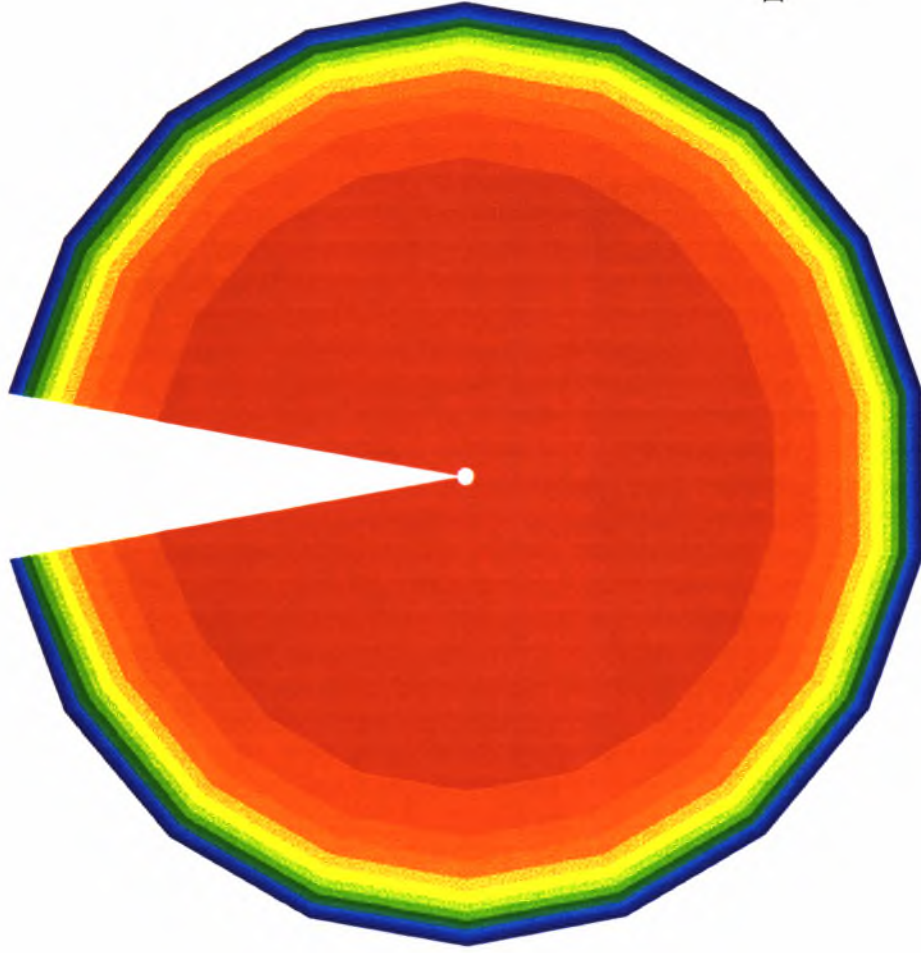


Vertical Diametral Temperature Field



Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)

Cross Stream Temperature Field at 10m



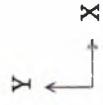
No Gravity



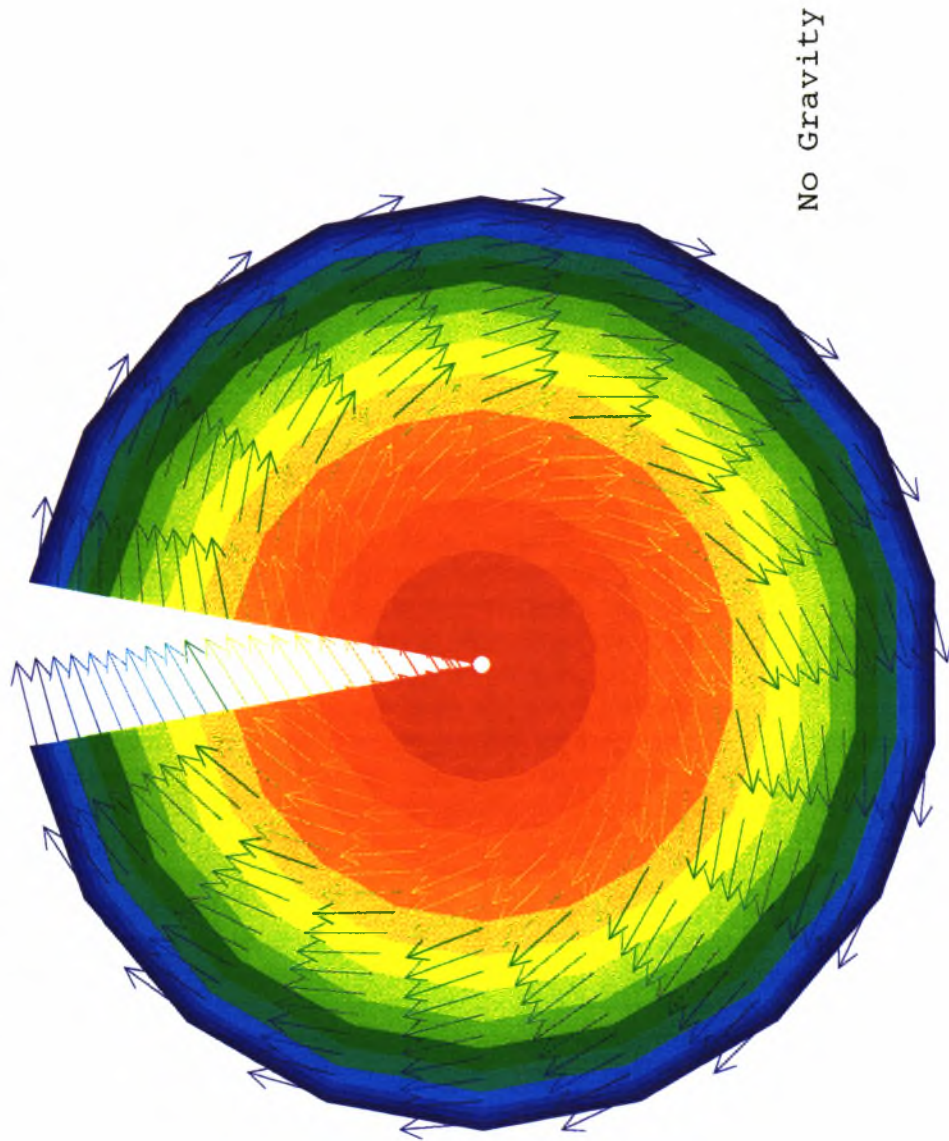
PHOTON

TEMP

2076
2104
2132
2161
2189
2217
2246
2274
2302
2331
2359
2388
2416
2444
2473

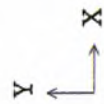
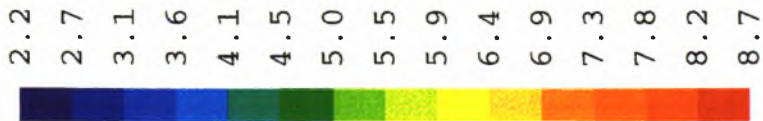


Cross Stream Temperature Field at 20m



PHOTON

Vector



→ .61

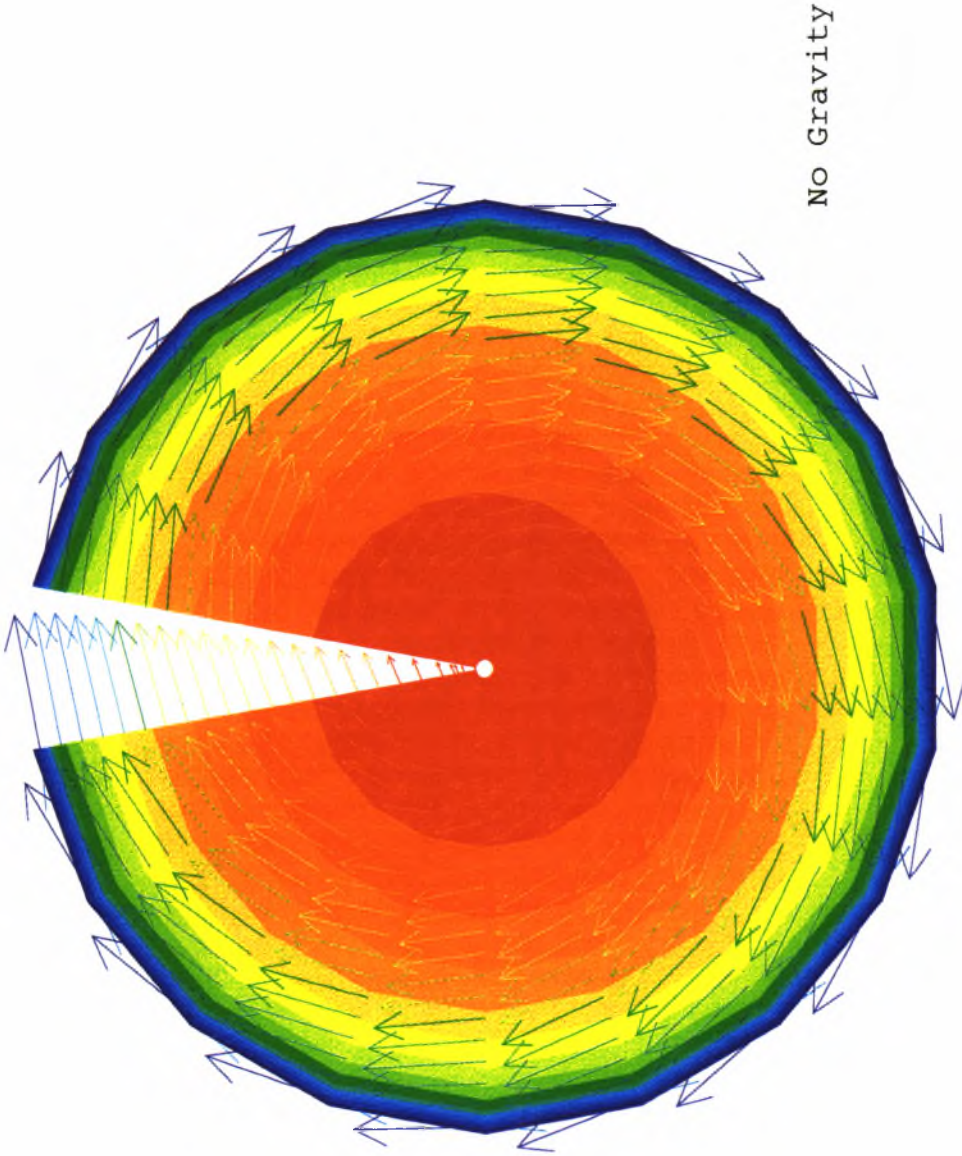
Min: 2.20E+00

Max: 8.71E+00

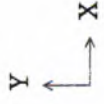
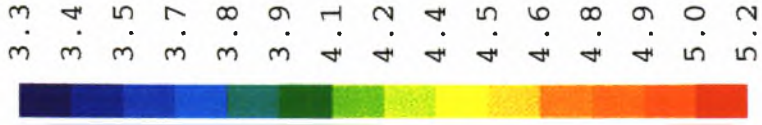


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m



Vector



→ .40

Min: 3.26E+00

Max: 5.17E+00



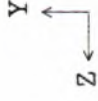
PHOTON

Axial Velocity Contour

Length 15m



No Gravity



Μοντέλο με Βαρύτητα χωρίς Στροβιλισμό

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45⁰

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%



PHOTON

TEMP

1200

1291

1382

1473

1564

1655

1746

1836

1927

2018

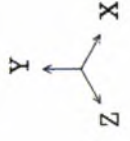
2109

2200

2291

2382

2473



Cross Stream Temperature Field

No Swirl

Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)

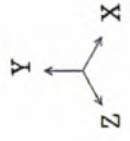


PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

TEMP

- 1200
- 1291
- 1382
- 1473
- 1564
- 1655
- 1746
- 1836
- 1927
- 2018
- 2109
- 2200
- 2291
- 2382
- 2473



No Swirl

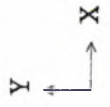
Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)



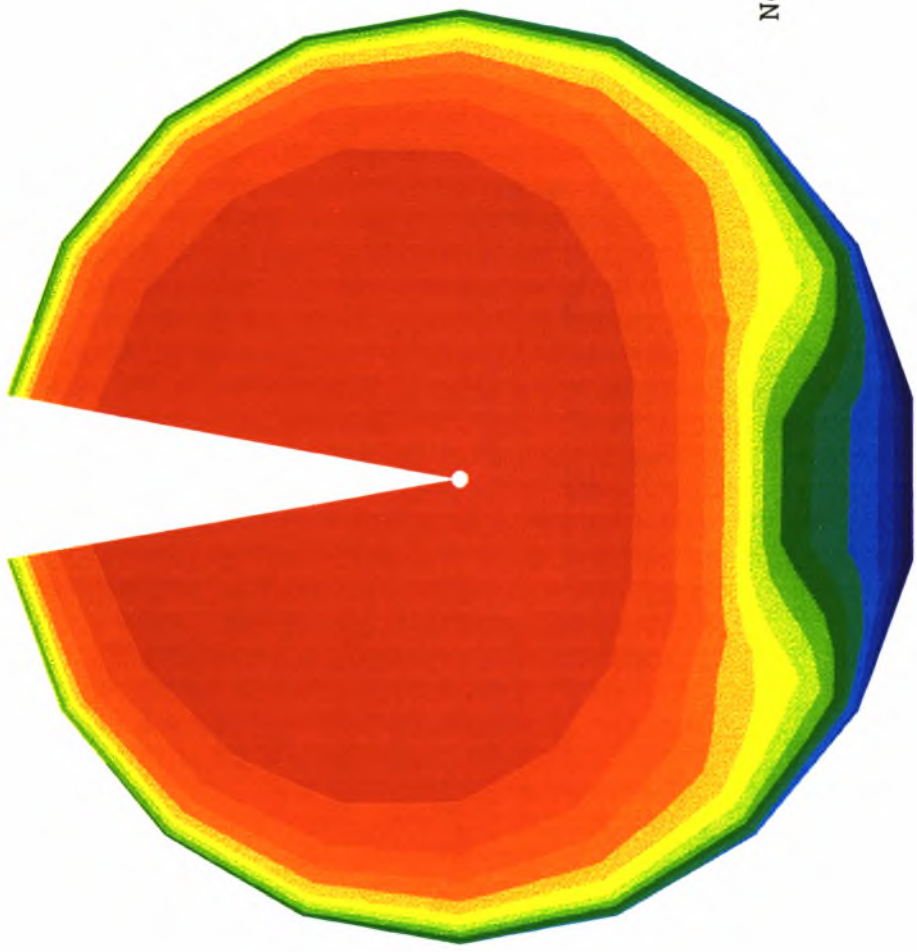
PHOTON

TEMP

- 2022
- 2054
- 2086
- 2118
- 2150
- 2183
- 2215
- 2247
- 2279
- 2311
- 2344
- 2376
- 2408
- 2440
- 2473

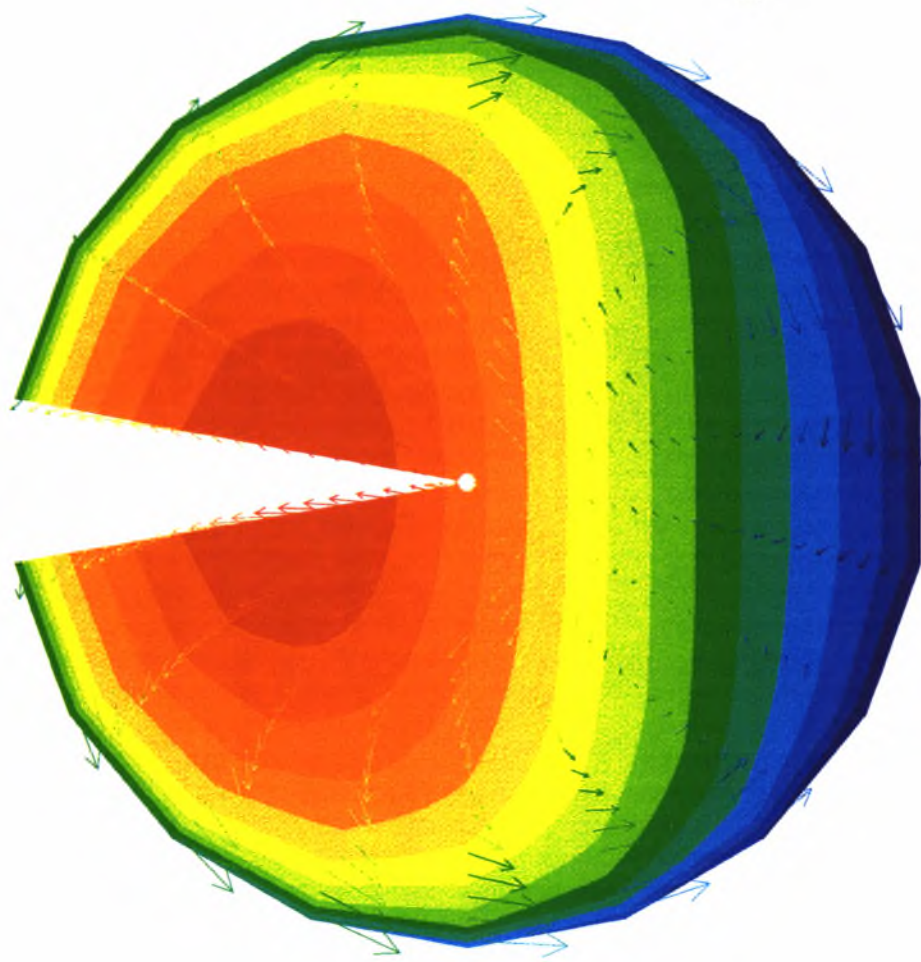


Cross Stream Temperature Field at 10m



No Swirl

Cross Stream Temperature Field at 20m



No Swirl

→ .90

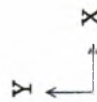
Min: 3.58E-01

Max: 8.65E+00



PHOTON

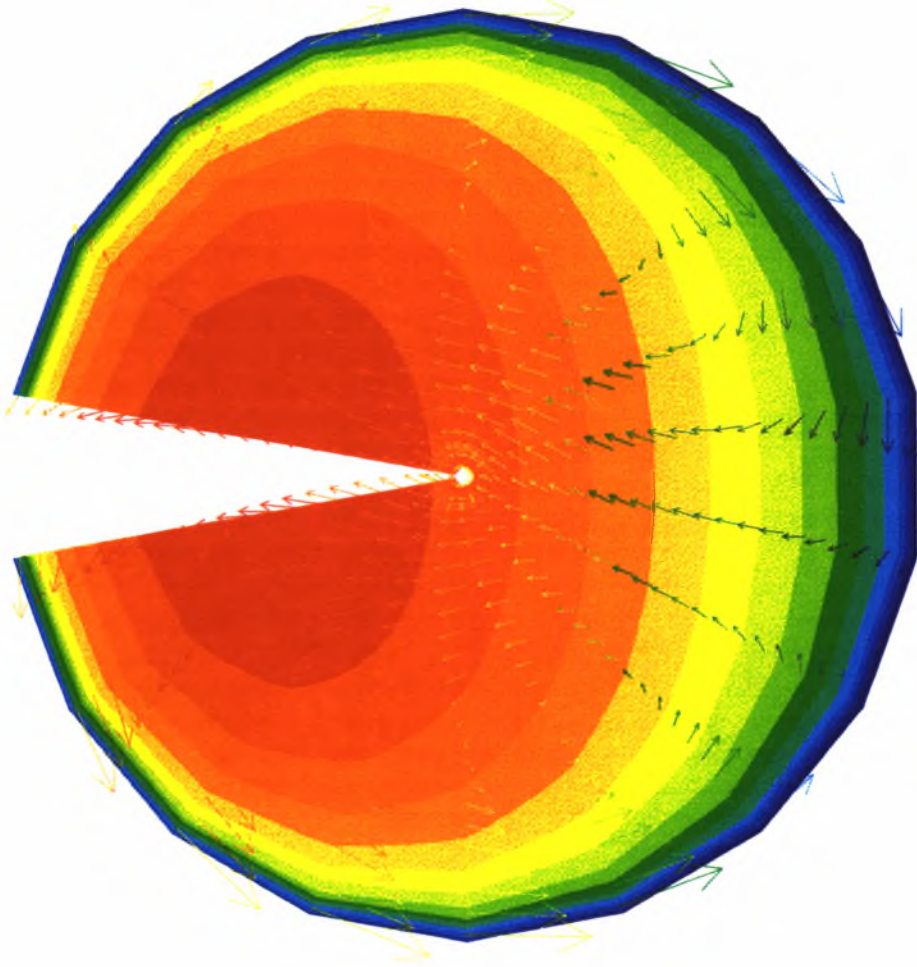
Vector



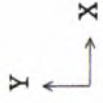
Cross Stream Temperature Field at 30m



PHOTON



No Swirl



→ .62

Min: 1.92E+00

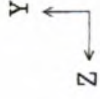
Max: 5.58E+00

Axial Velocity Contour

Length 15m



No Swirl



PHOTON

1^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

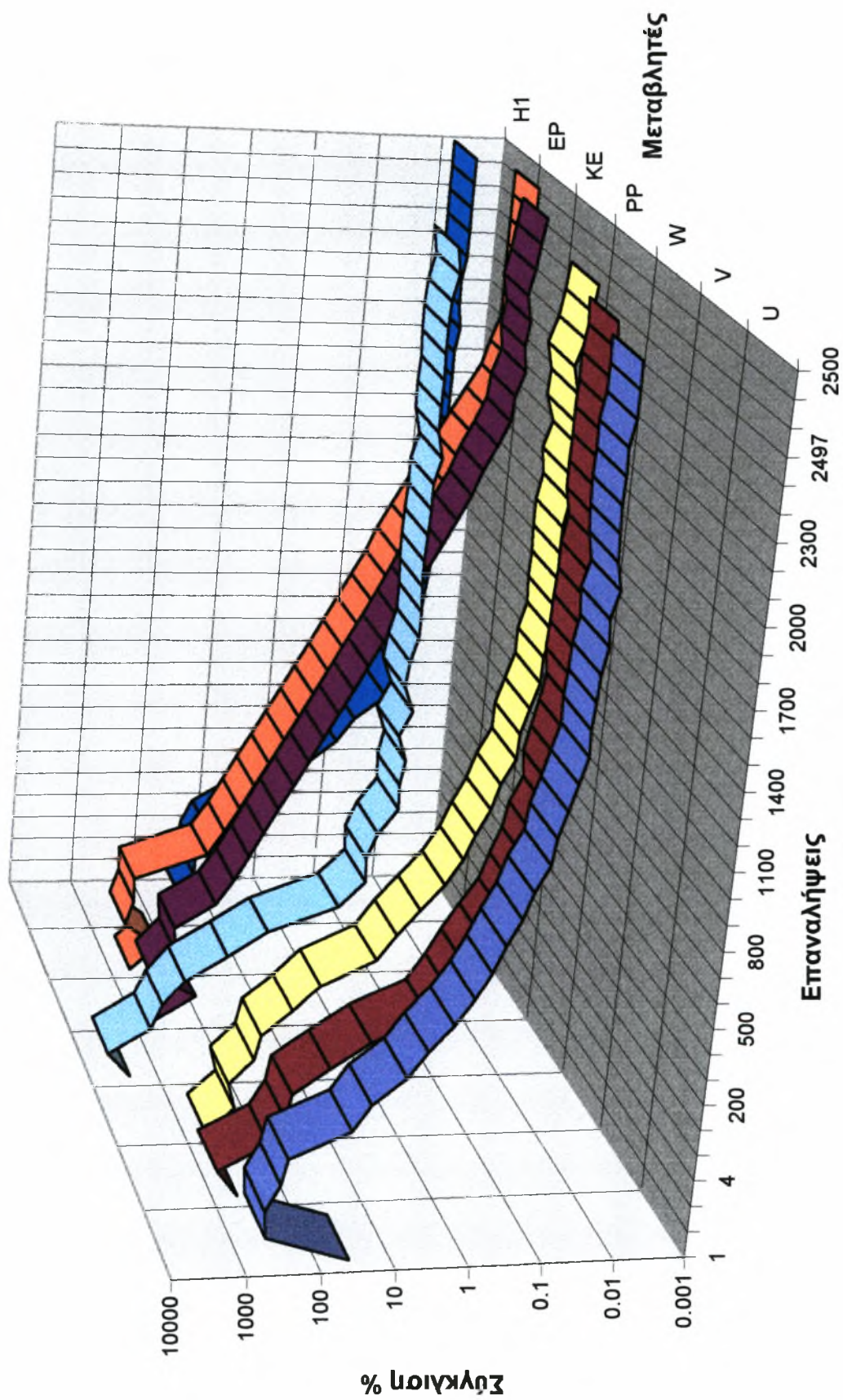
Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 30^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 75%

Διάγραμμα Τυπικής Σύγκλισης (Μοντέλο 1)

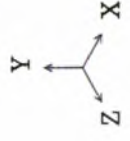




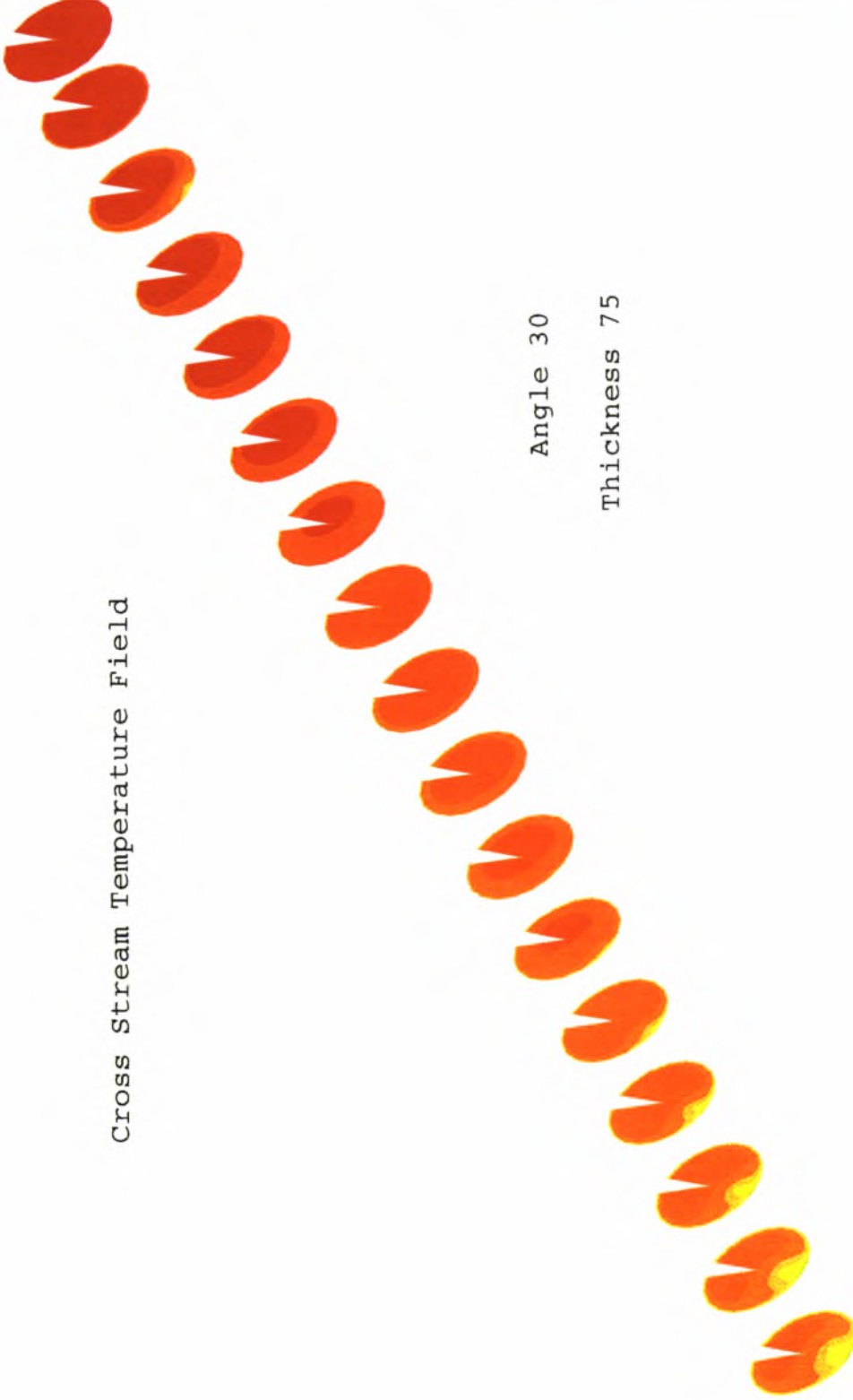
PHOTON

TEMP

1182
1274
1366
1459
1551
1643
1735
1827
1920
2012
2104
2196
2289
2381
2473



Cross Stream Temperature Field



Angle 30

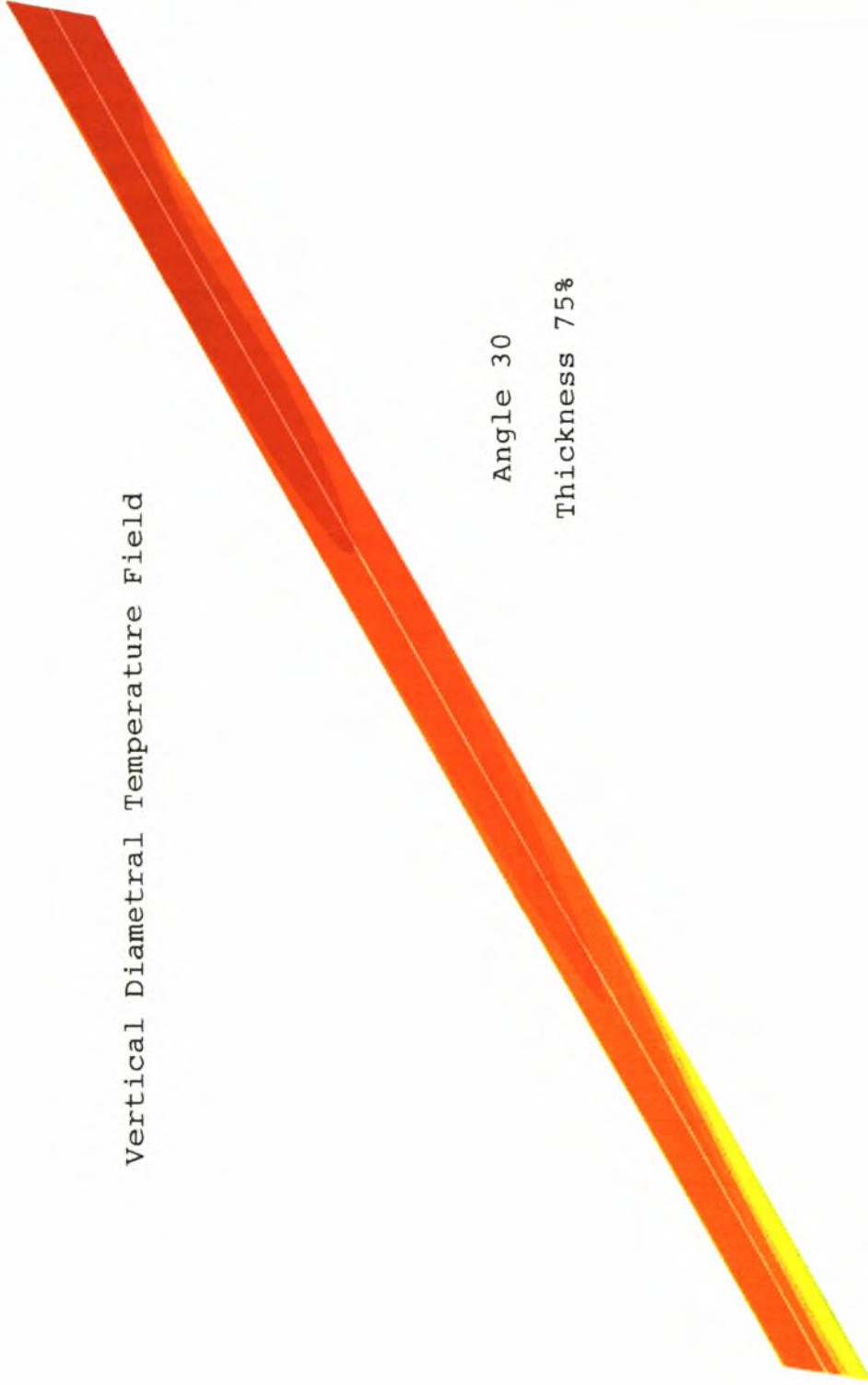
Thickness 75

Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)



PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

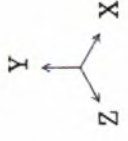


Angle 30

Thickness 75%

TEMP

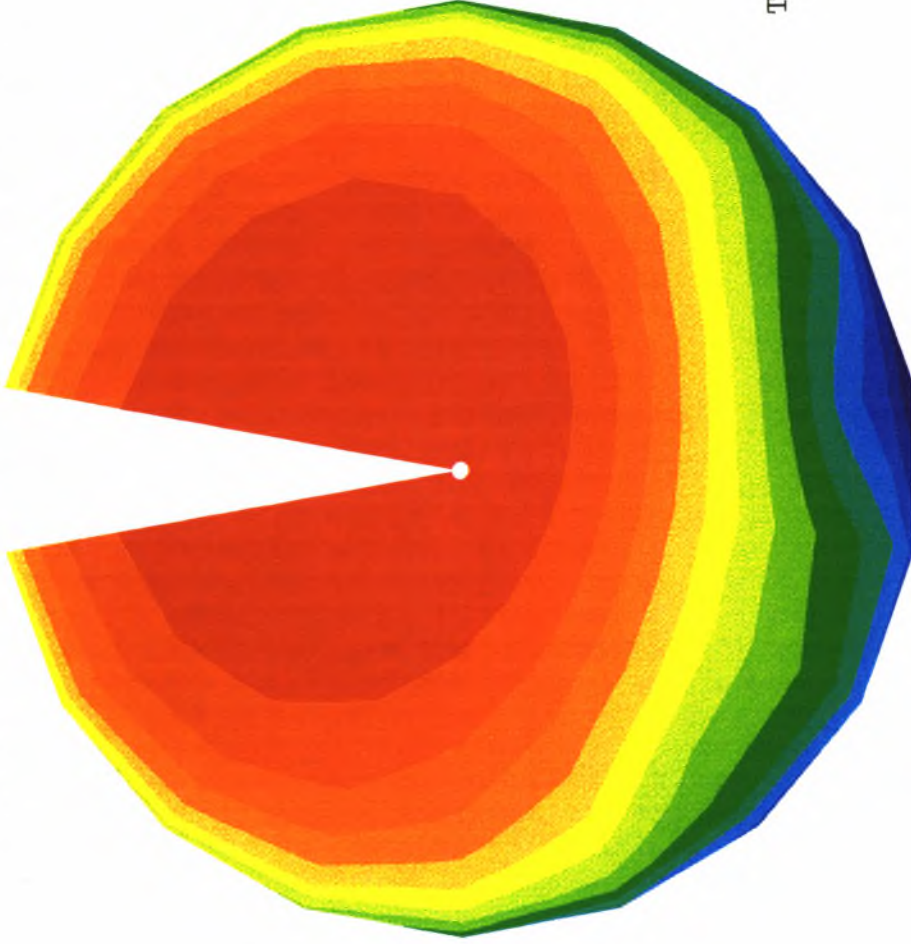
1182
1274
1366
1459
1551
1643
1735
1827
1920
2012
2104
2196
2289
2381
2473





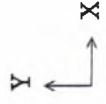
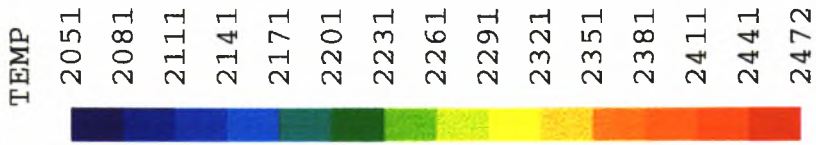
PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 10m



Angle 30

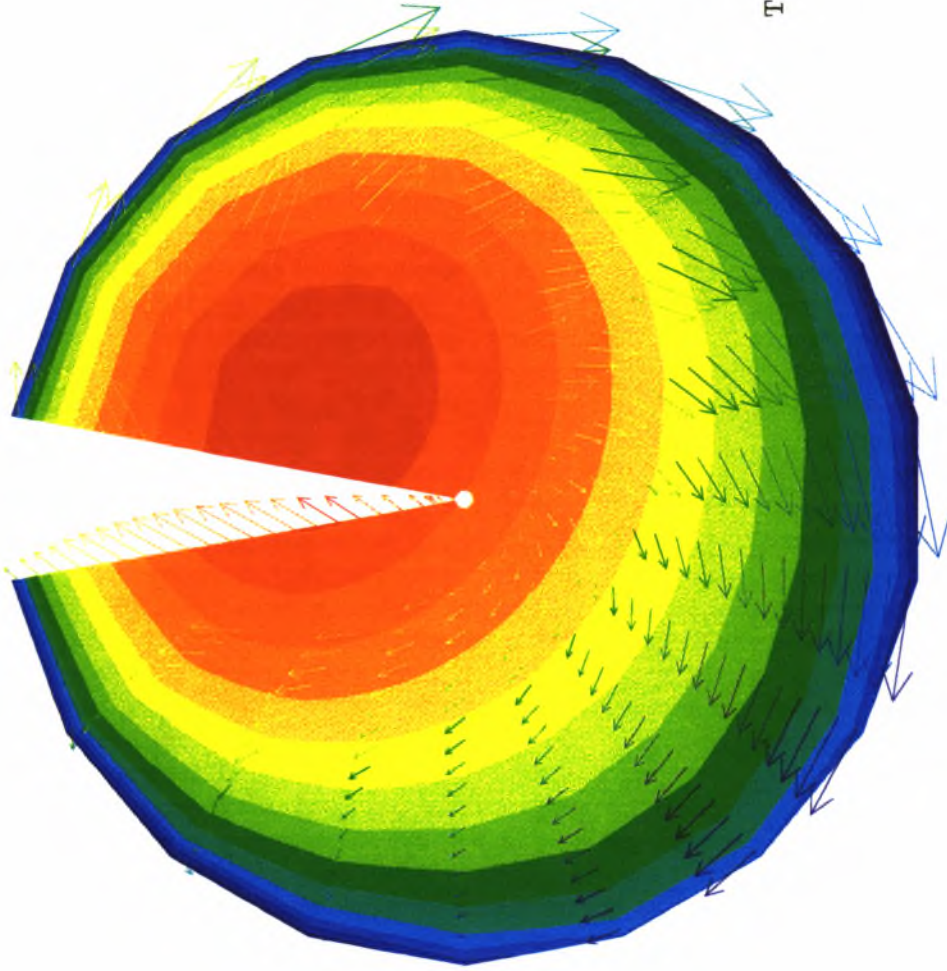
Thickness 75%





PHOTON

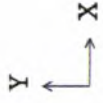
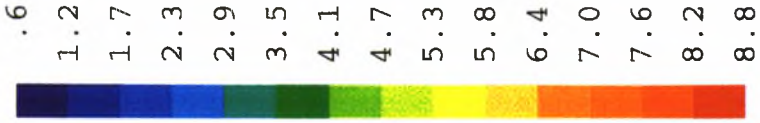
Cross Stream Temperature Field at 20m



Angle 30

Thickness 75%

Vector



→ .80

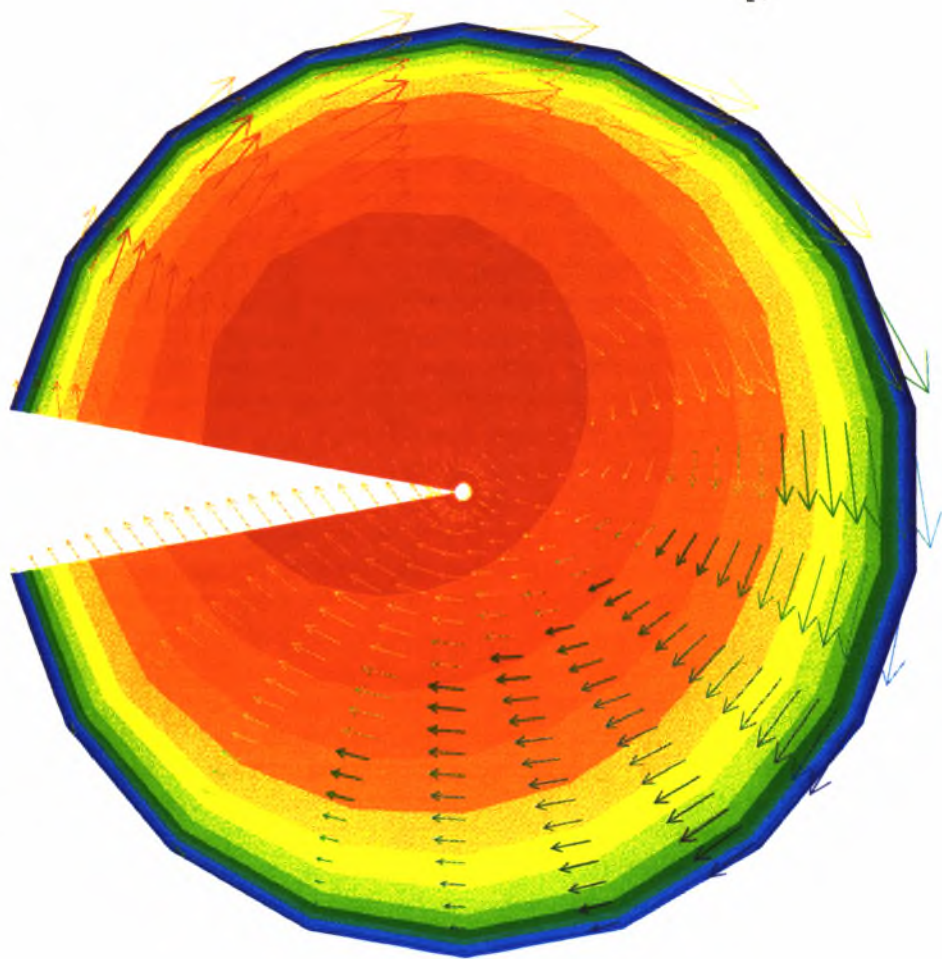
Min: 5.78E-01

Max: 8.76E+00



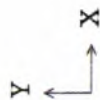
PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m



Vector

- 2.3
- 2.5
- 2.7
- 2.9
- 3.2
- 3.4
- 3.6
- 3.9
- 4.1
- 4.3
- 4.6
- 4.8
- 5.0
- 5.3
- 5.5



Angle 30

Thickness 75%

→ .72

Min: 2.25E+00

Max: 5.48E+00



PHOTON

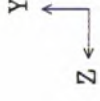
Axial Velocity Contour

Length 15m



Angle 30

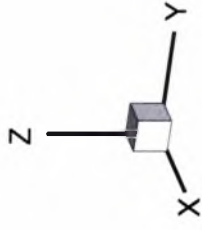
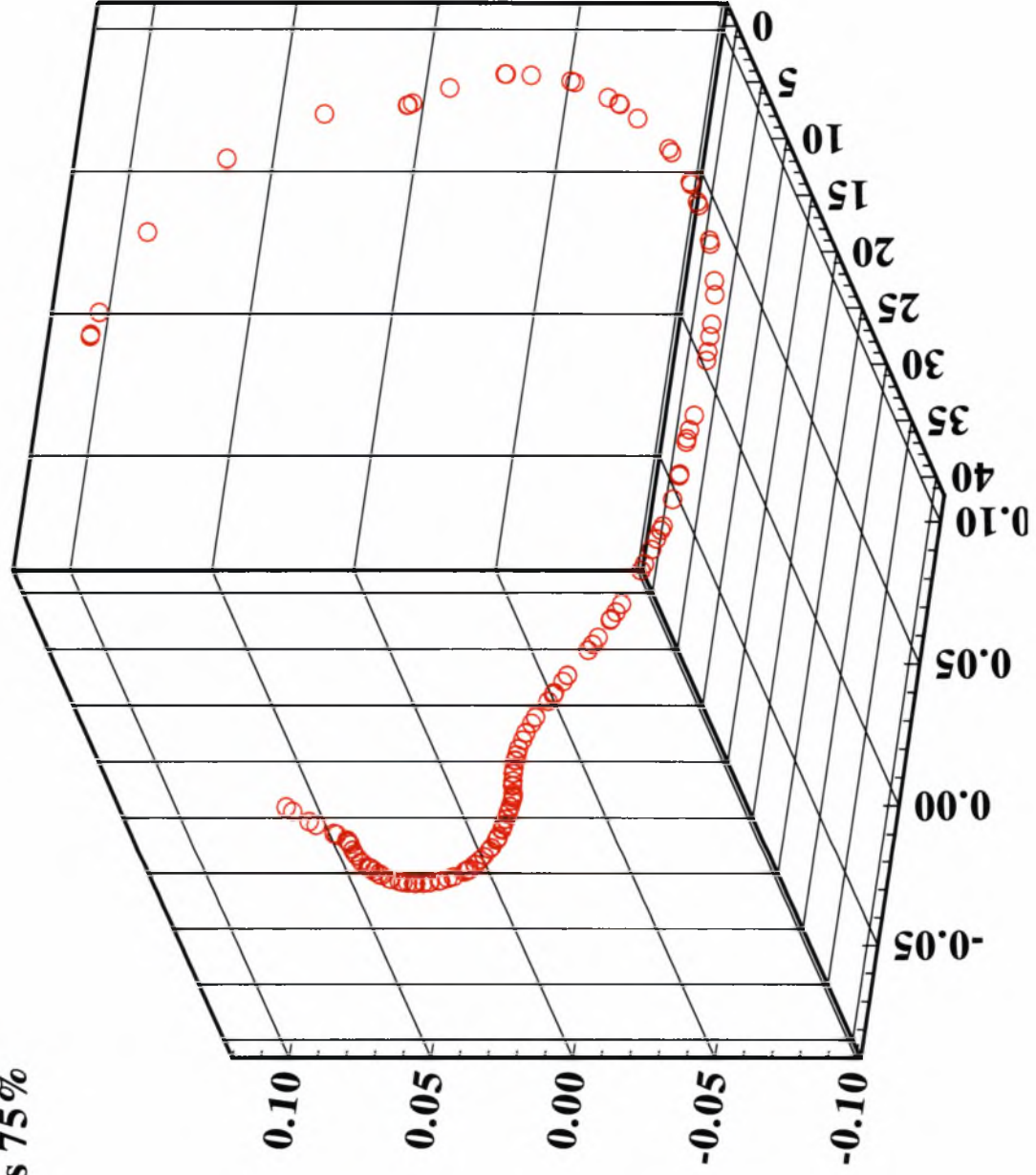
Thickness 75%



Trajectory of Carbon Particle

Angle 30

Thickness 75%



2^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 75%

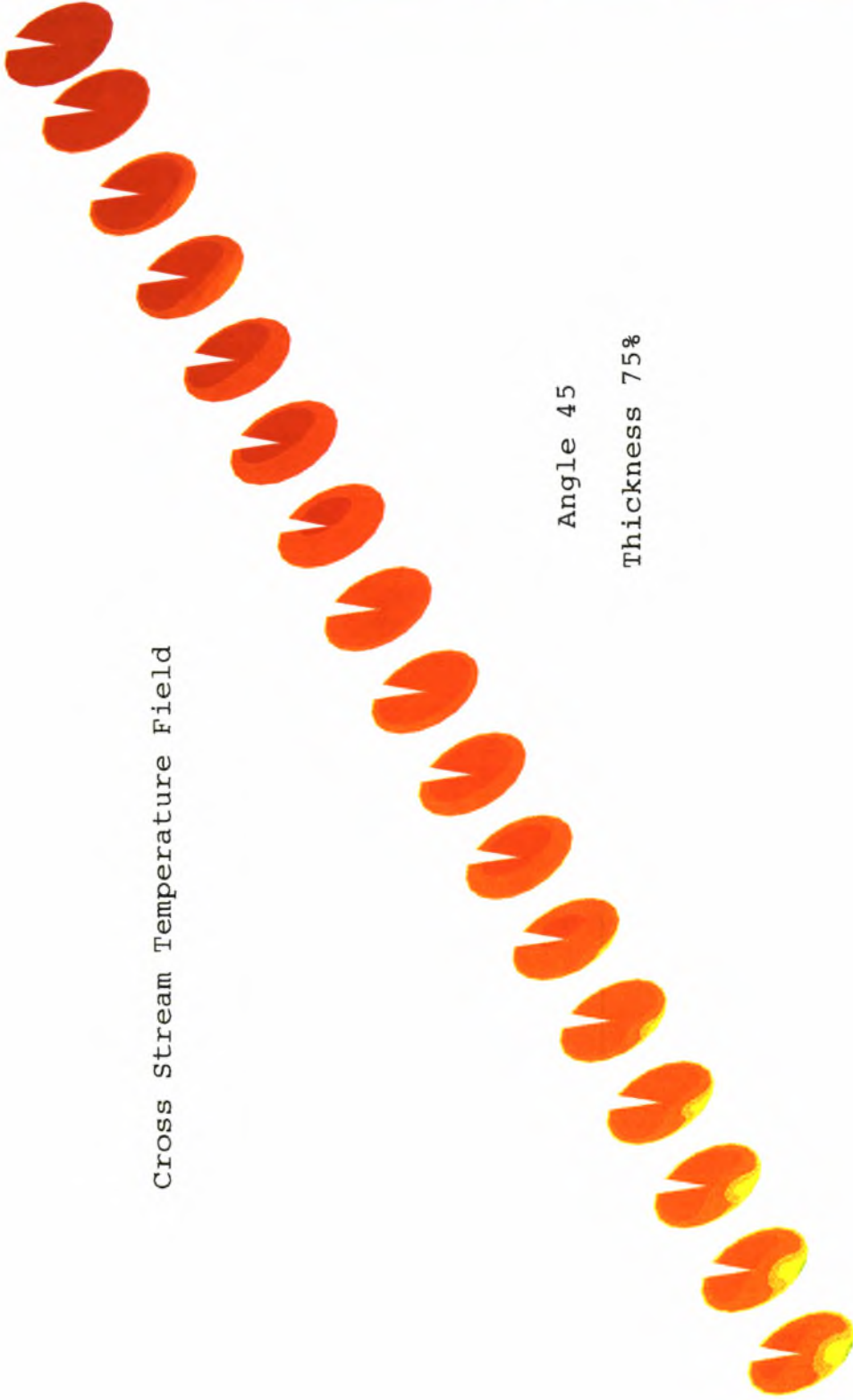
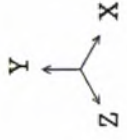


PHOTON

Cross Stream Temperature Field

TEMP

1181
1274
1366
1458
1550
1643
1735
1827
1920
2012
2104
2196
2289
2381
2473



Angle 45

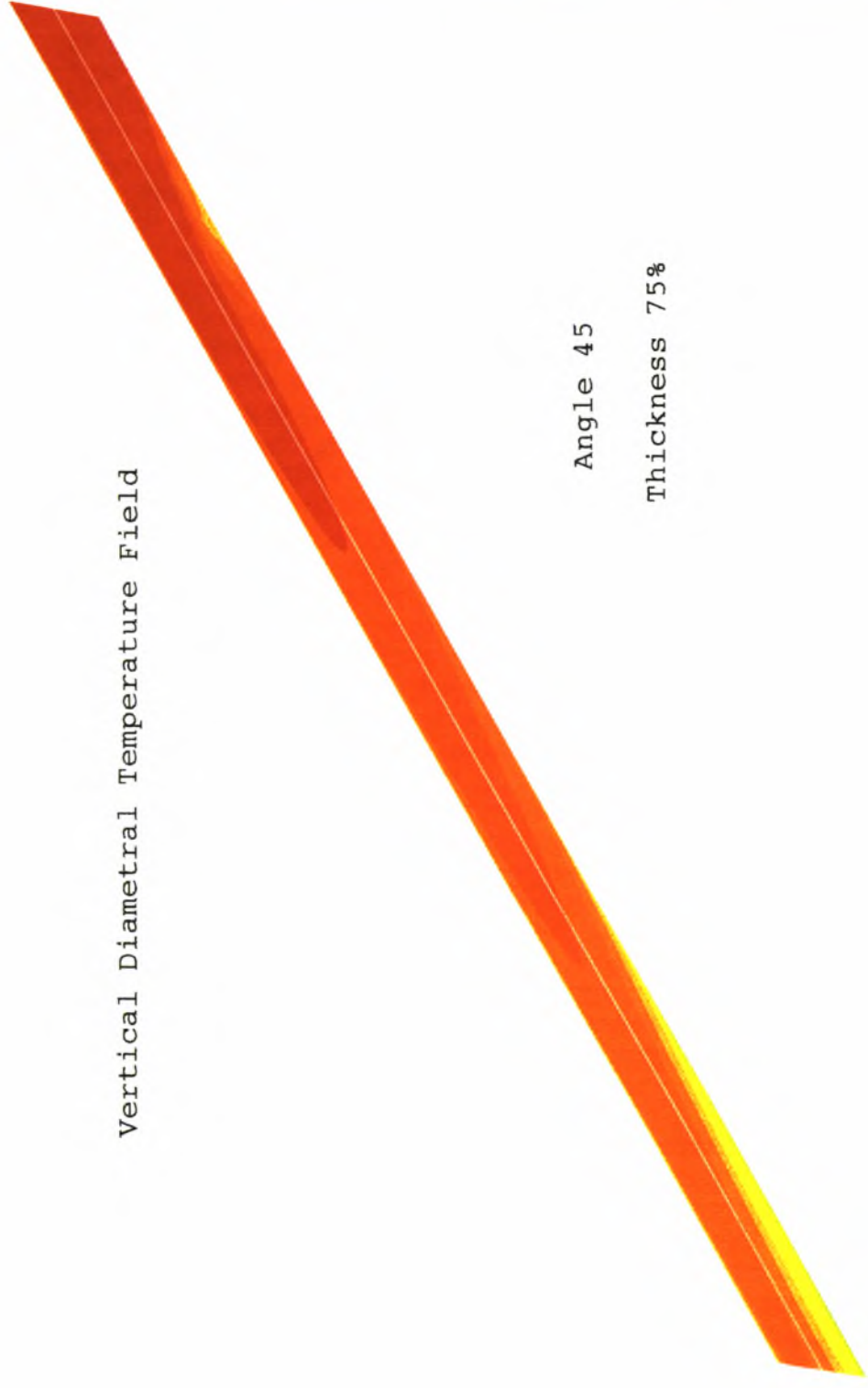
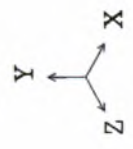
Thickness 75%



PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

TEMP



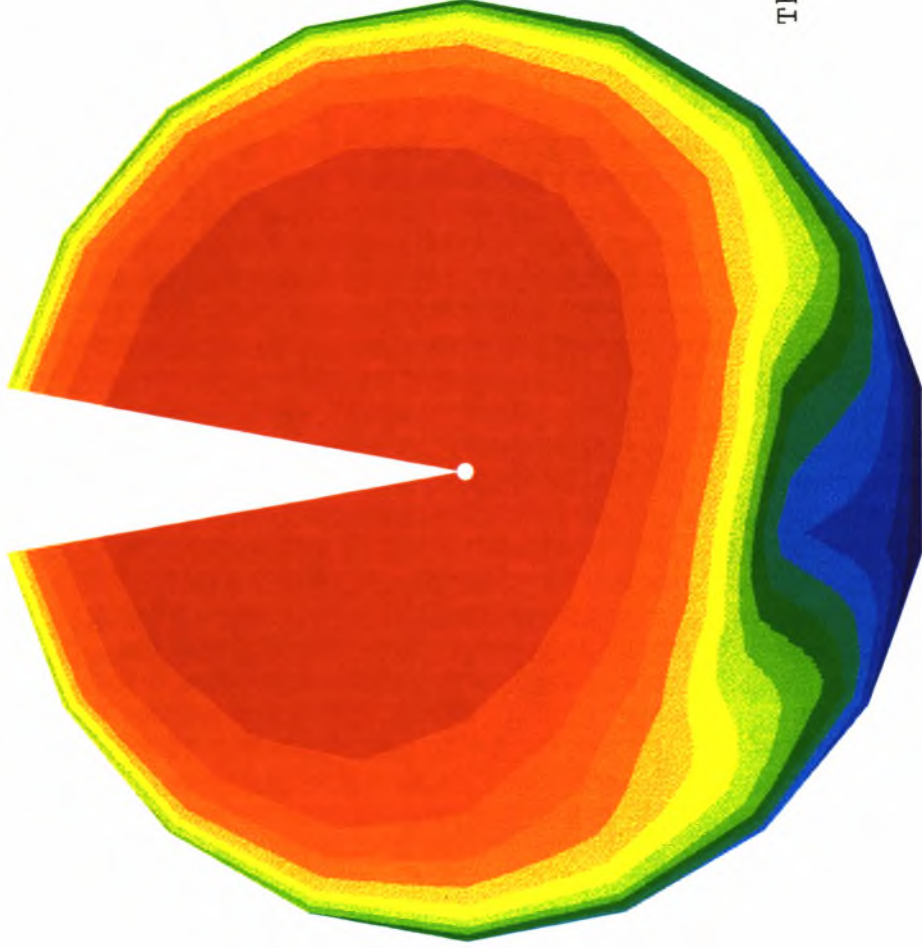
Angle 45

Thickness 75%

Cross Stream Temperature Field at 10m

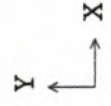


PHOTON



Angle 45

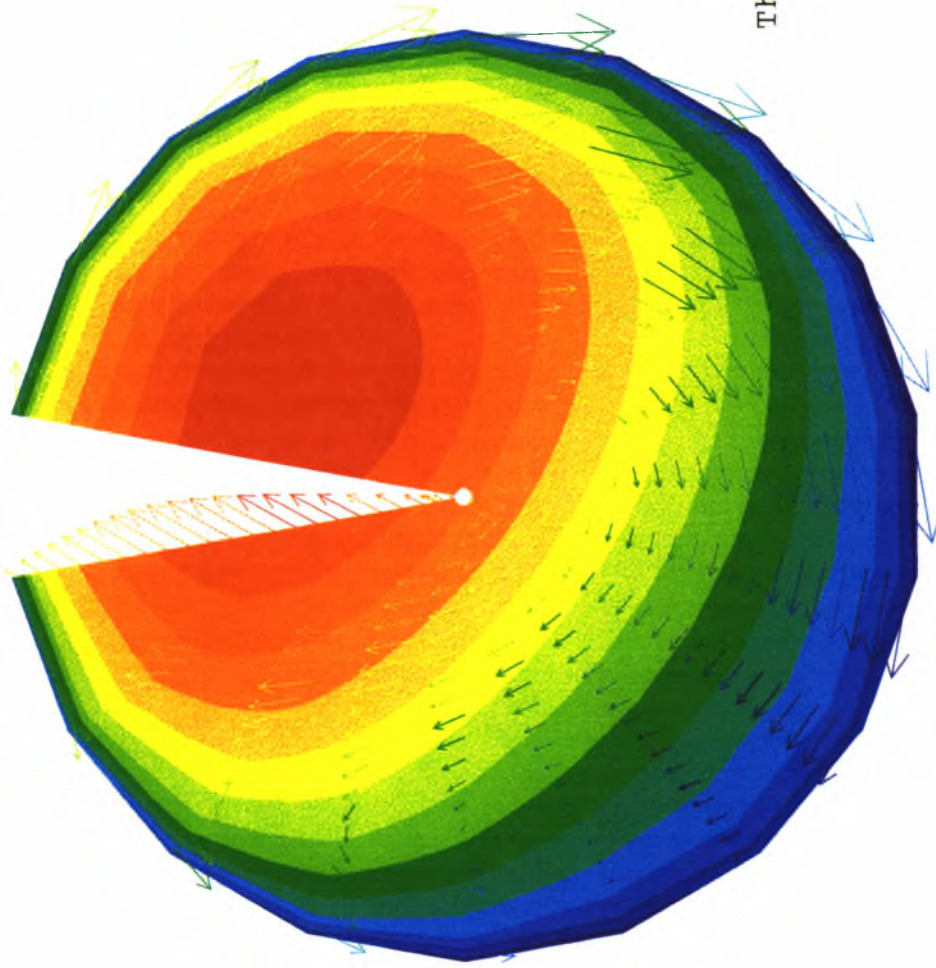
Thickness 75%



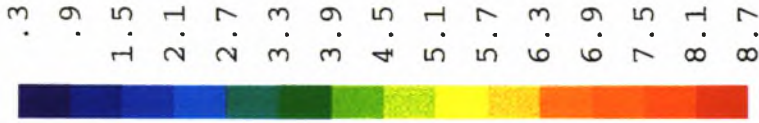


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 20m



Vector



→ .9

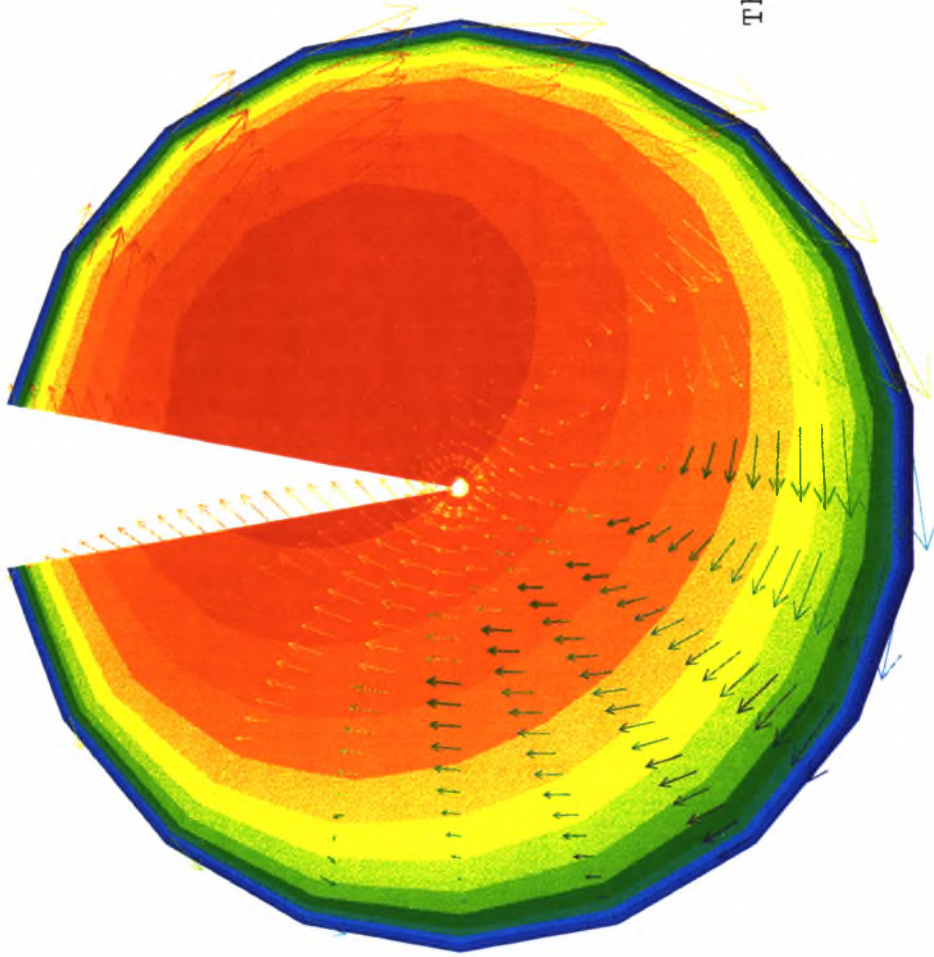
Min: 3.25E-01

Max: 8.69E+00



PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m



Angle 45

Thickness 75%

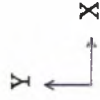
→ .75

Min: 1.82E+00

Max: 5.73E+00

Vector

- 1.8
- 2.1
- 2.4
- 2.7
- 2.9
- 3.2
- 3.5
- 3.8
- 4.1
- 4.3
- 4.6
- 4.9
- 5.2
- 5.5
- 5.7





PHOTON

Axial Velocity Contour

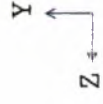
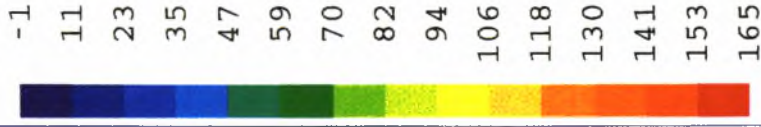
Length 15m



Angle 45

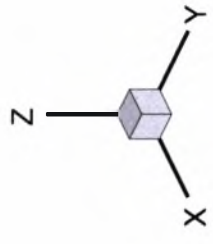
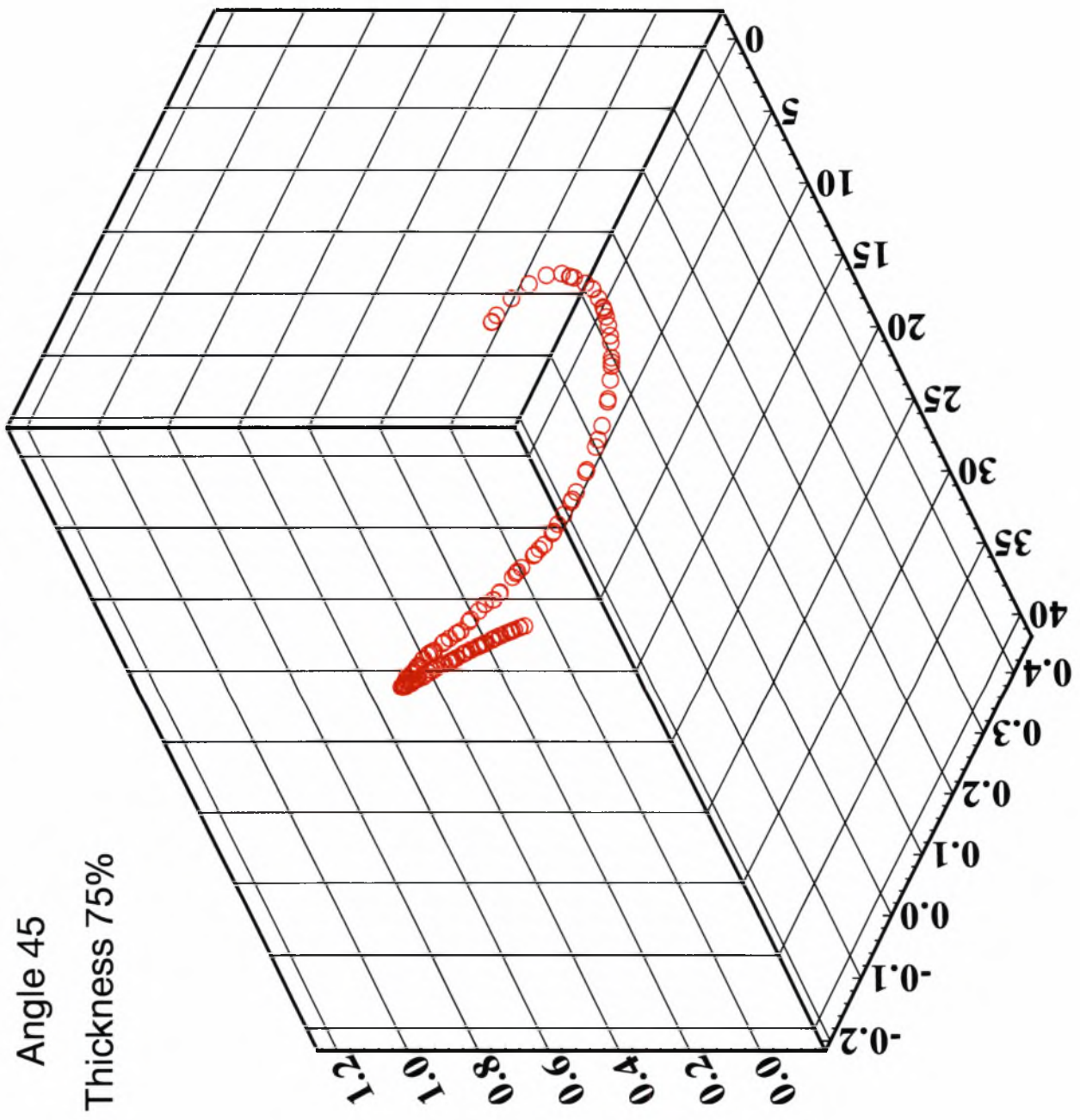
Thickness 75%

W1



Trajectory of Carbon Particle

Angle 45
Thickness 75%



3^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 60^ο

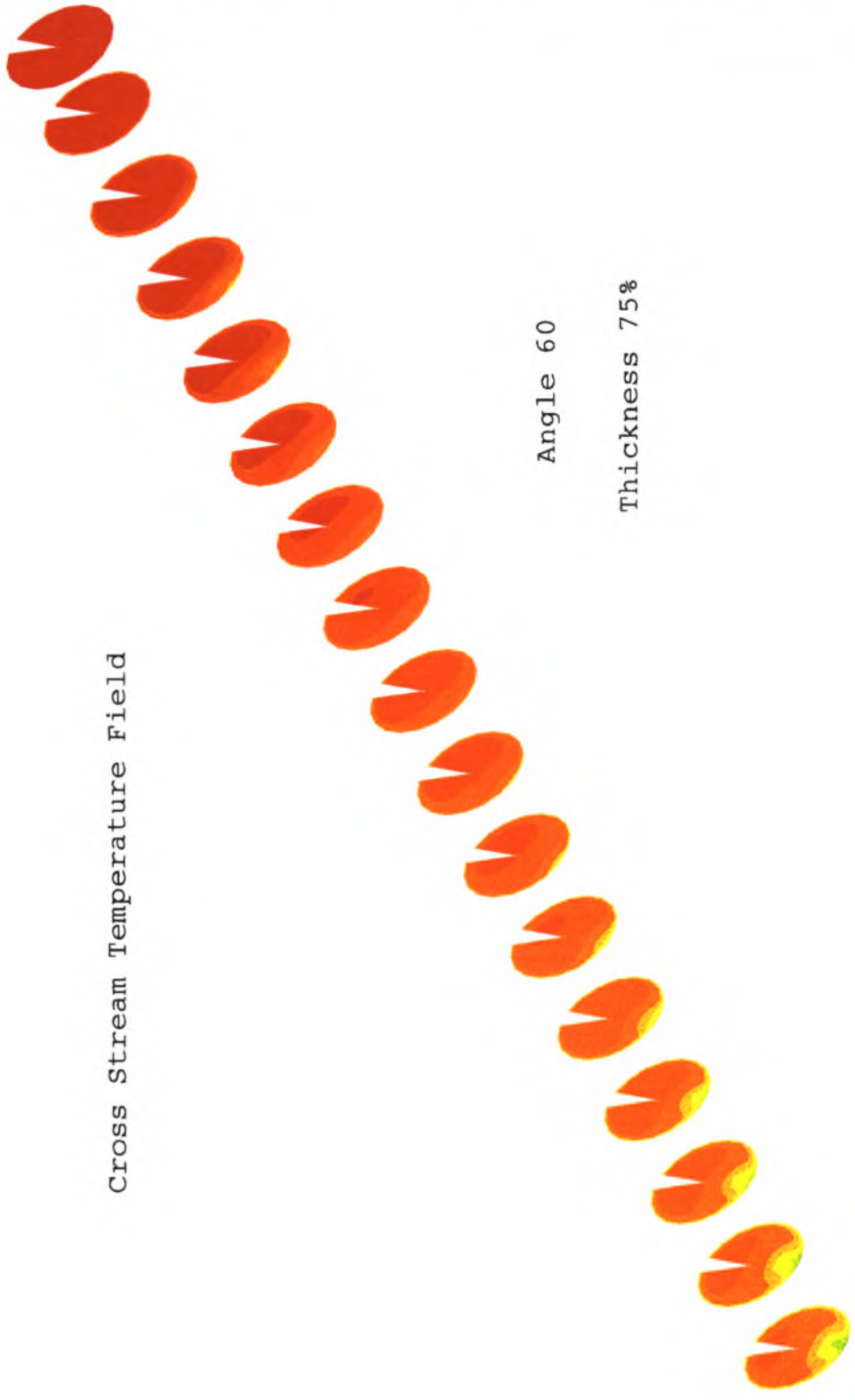
Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 75%



PHOTON



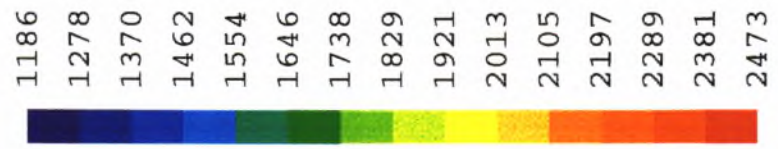
Cross Stream Temperature Field



Angle 60

Thickness 75%

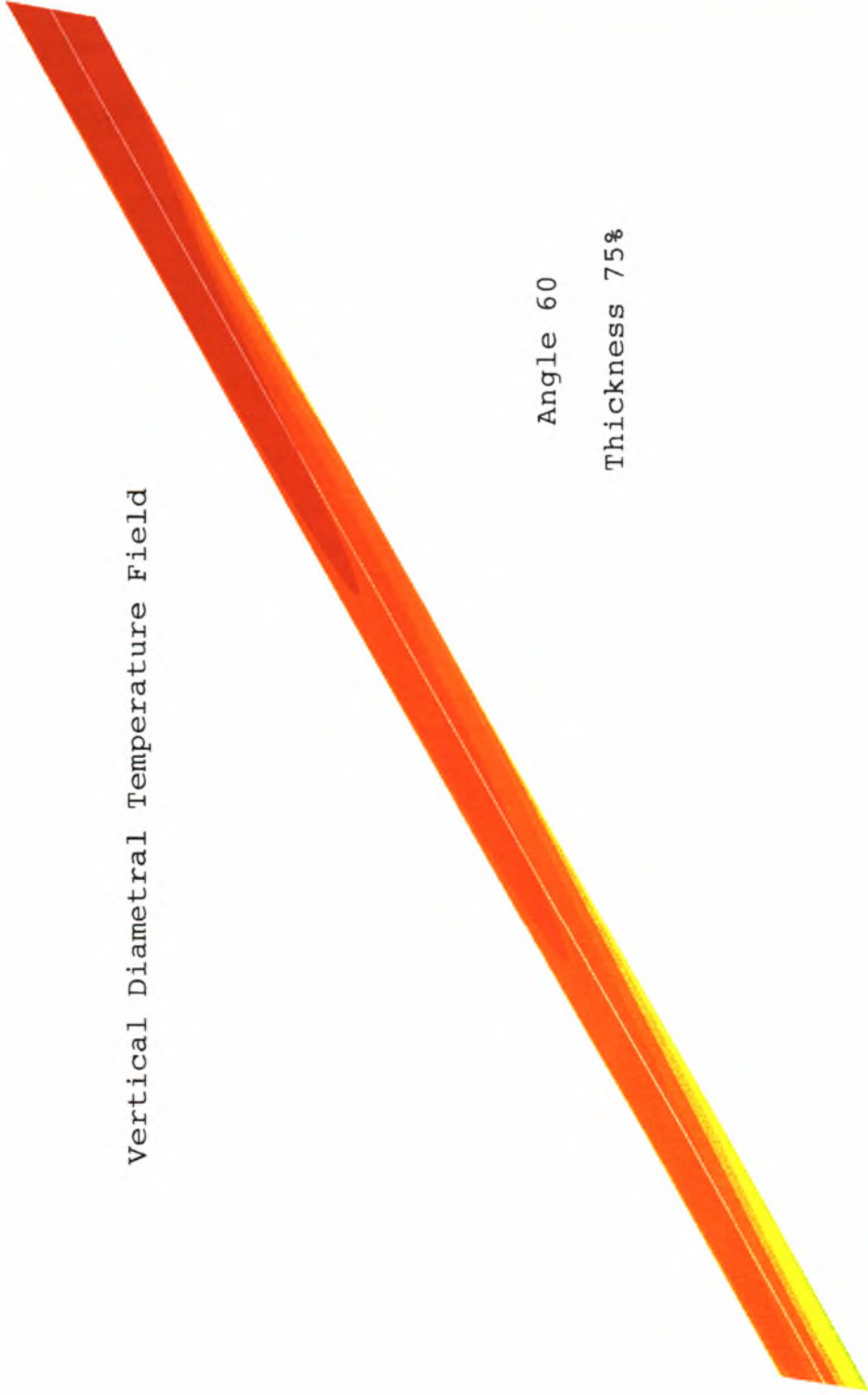
TEMP





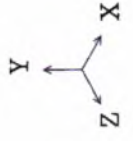
PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field



TEMP

- 1186
- 1278
- 1370
- 1462
- 1554
- 1646
- 1738
- 1829
- 1921
- 2013
- 2105
- 2197
- 2289
- 2381
- 2473

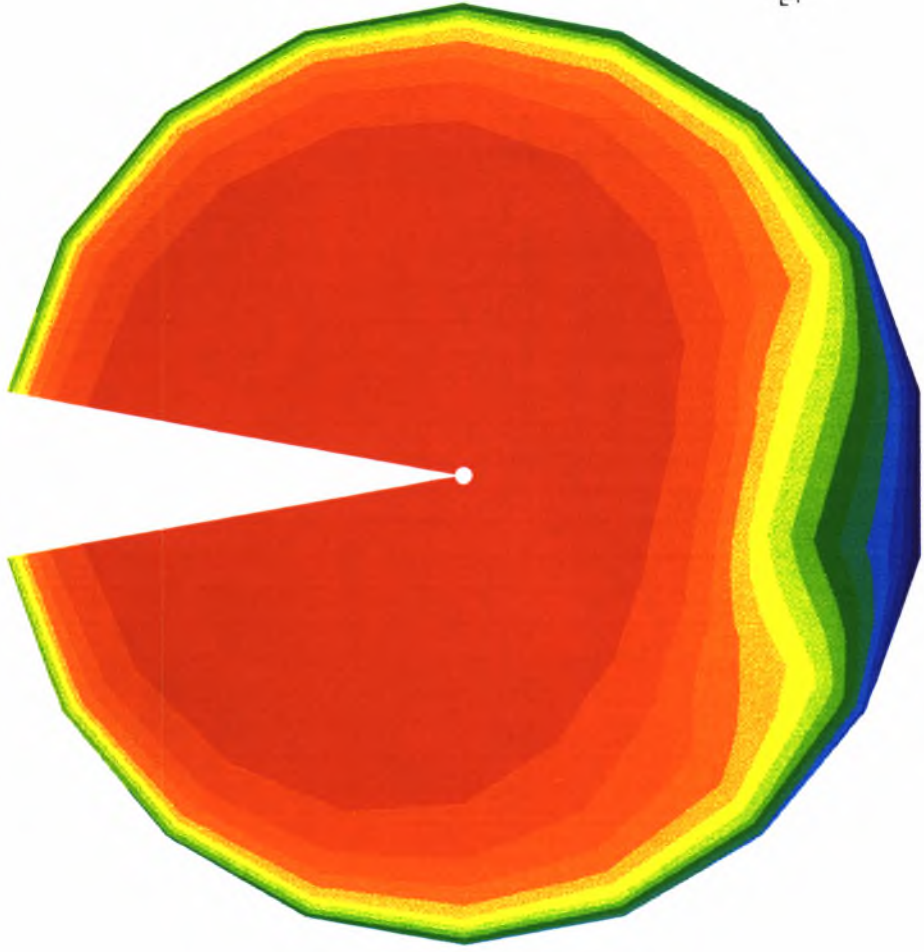
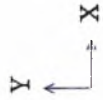


Cross Stream Temperature Field at 10m



PHOTON

TEMP



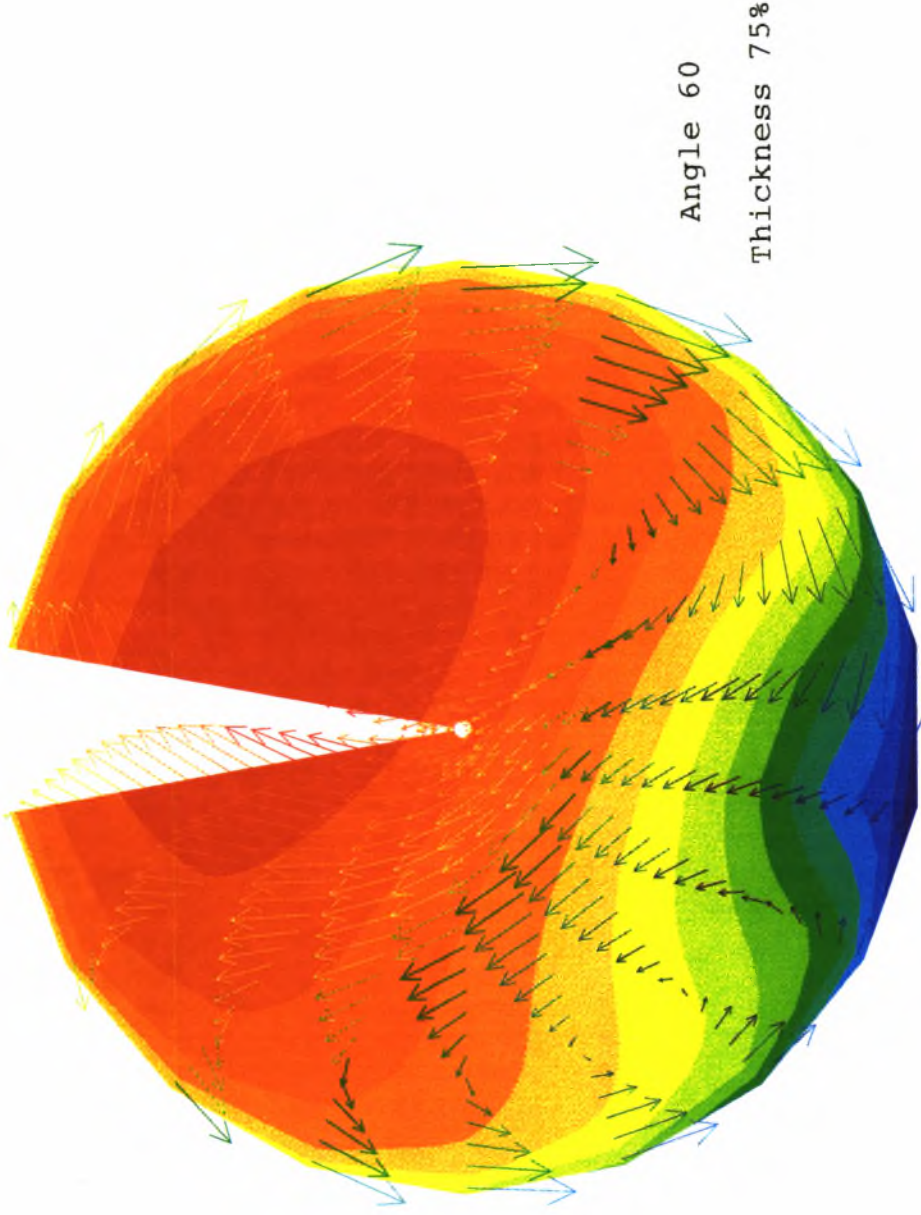
Angle 60

Thickness 75%

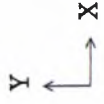
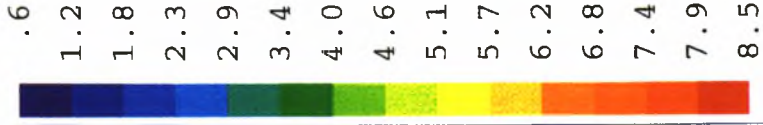


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 20m



Vector



→ 1.0

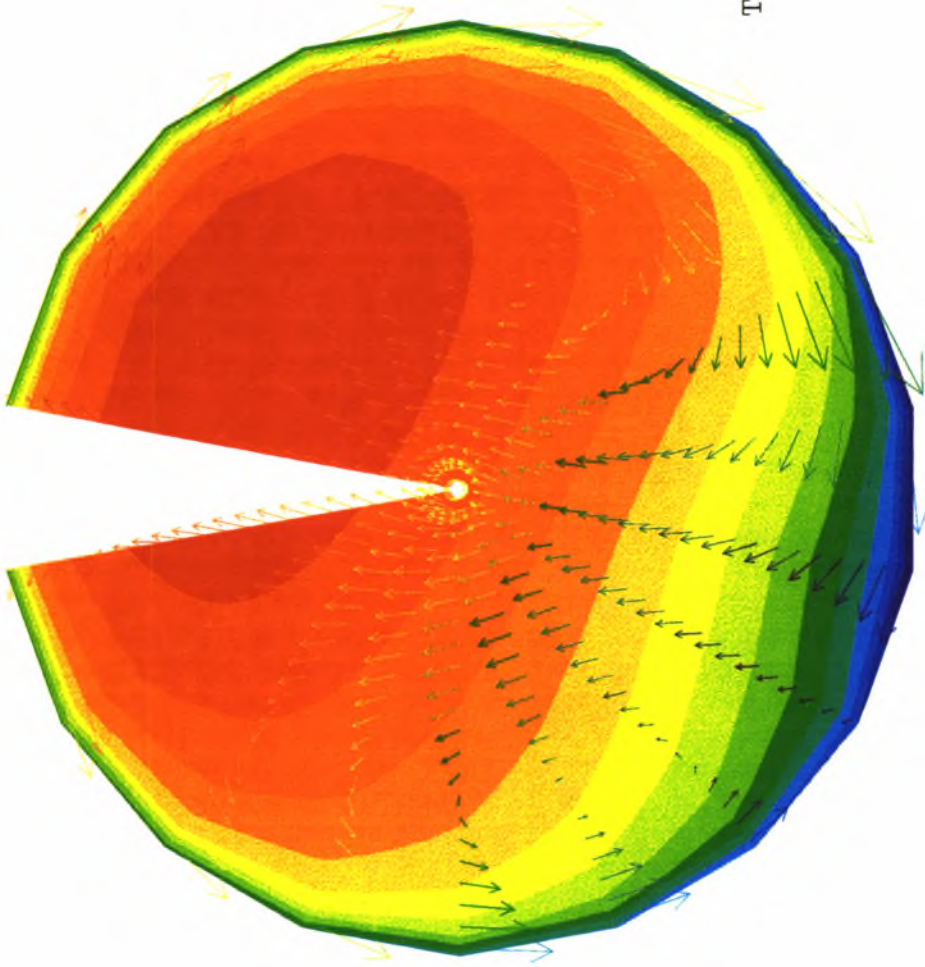
Min: 6.38E-01

Max: 8.48E+00



PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m

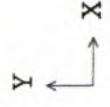


Angle 60

Thickness 75%

Vector

- 1.6
- 1.9
- 2.2
- 2.5
- 2.8
- 3.1
- 3.5
- 3.8
- 4.1
- 4.4
- 4.7
- 5.0
- 5.3
- 5.6
- 5.9



→ .81

Min: 1.59E+00

Max: 5.94E+00

Axial Velocity Contour

Length 15m



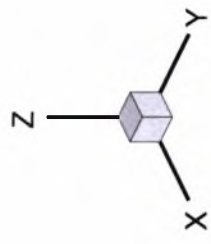
Angle 60

Thickness 75%



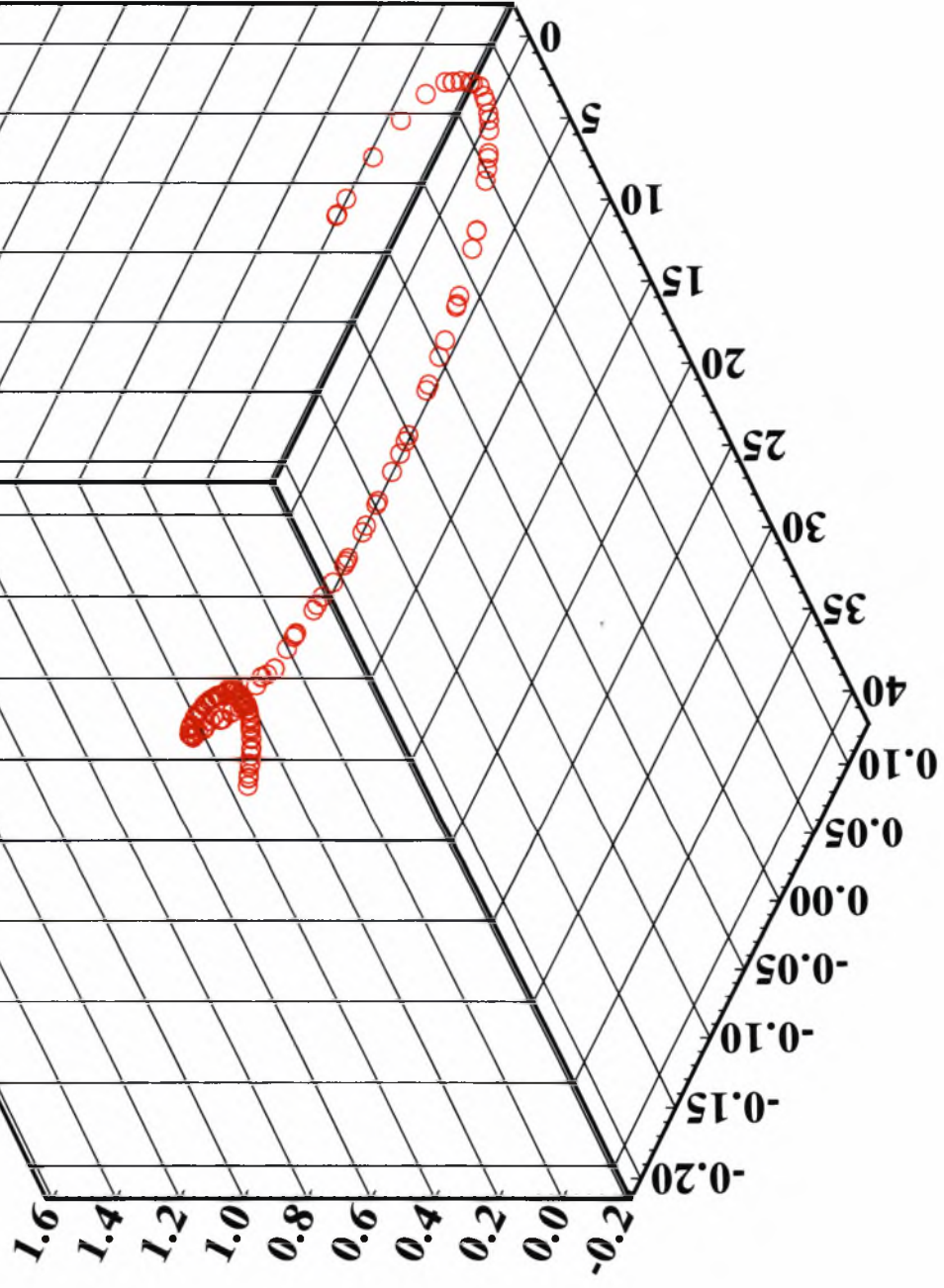
PHOTON

Trajectory of Carbon Particle



Angle 60

Thickness 75%



4⁰ Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

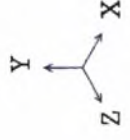
Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 30⁰

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%

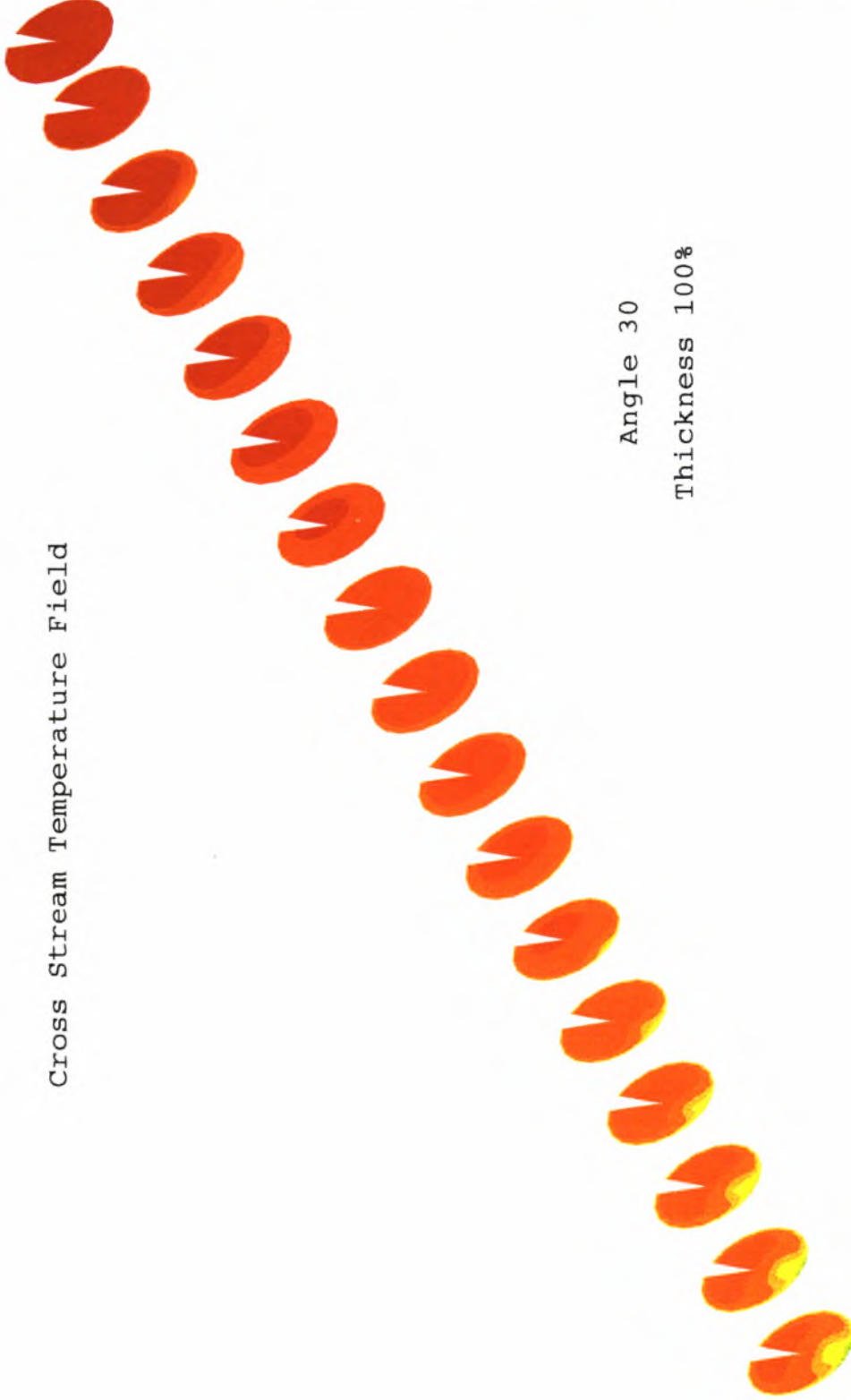


PHOTON

TEMP
1186
1278
1370
1462
1554
1646
1738
1830
1922
2013
2105
2197
2289
2381
2473



Cross Stream Temperature Field



Angle 30

Thickness 100%

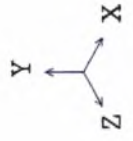


PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

TEMP

1186
1278
1370
1462
1554
1646
1738
1830
1922
2013
2105
2197
2289
2381
2473



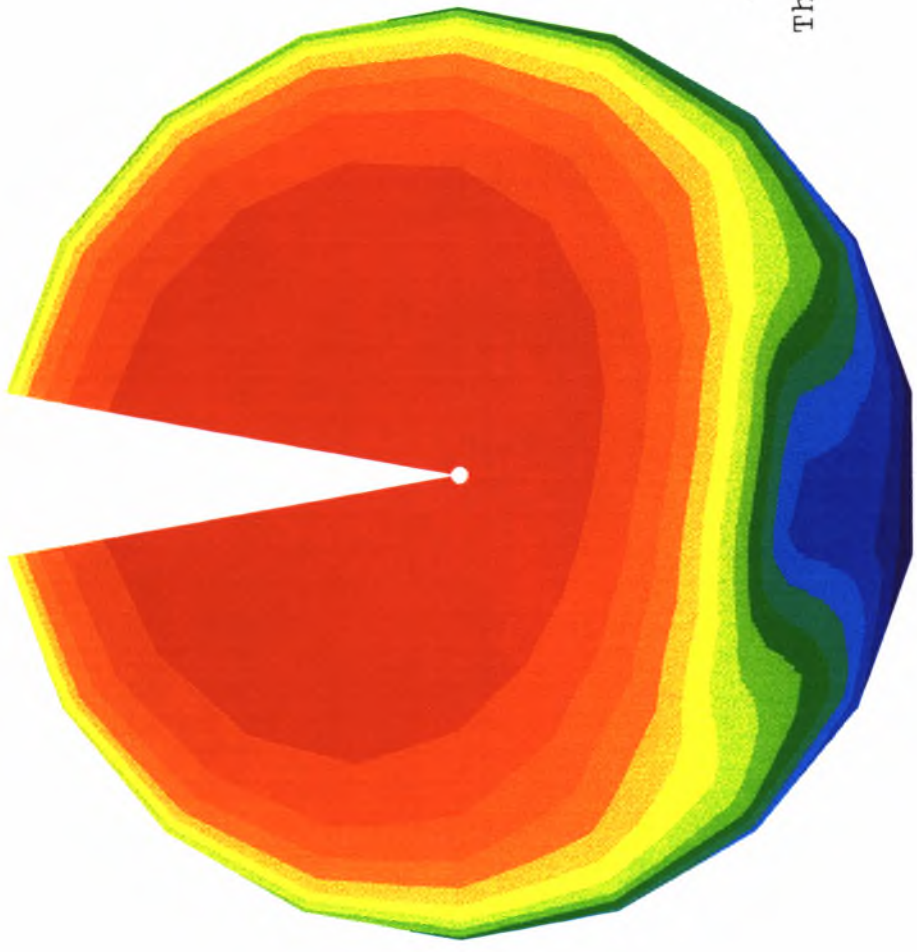
Angle 30

Thickness 100%

Cross Stream Temperature Field at 10m

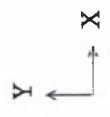
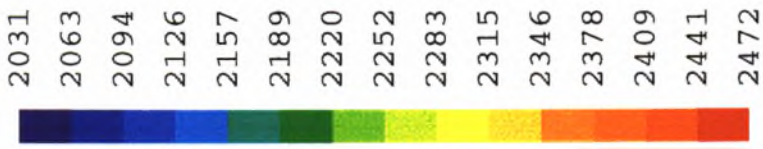


PHOTON



Angle 30
Thickness 100%

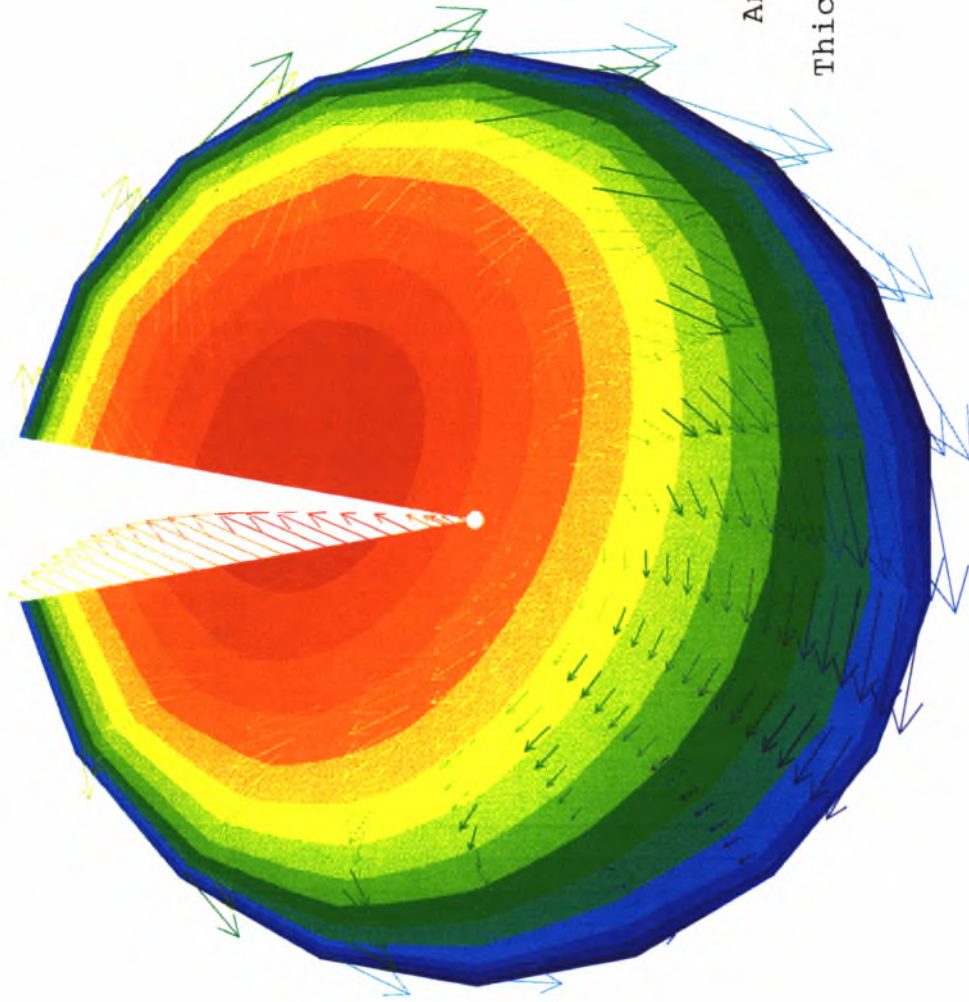
TEMP



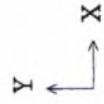
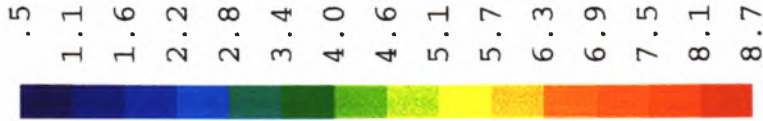


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 20m



Vector



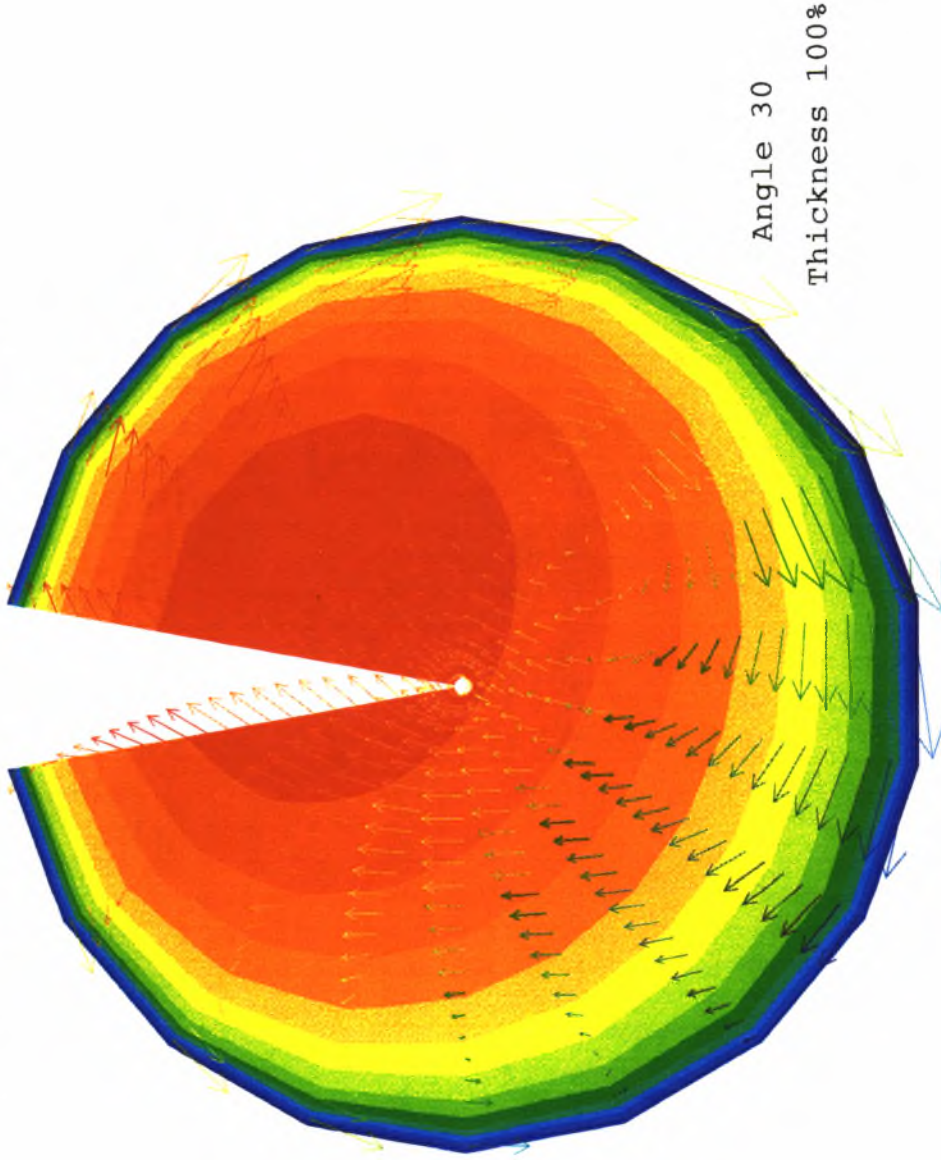
Min: 4.74E-01 Max: 8.65E+00

→ .52

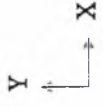
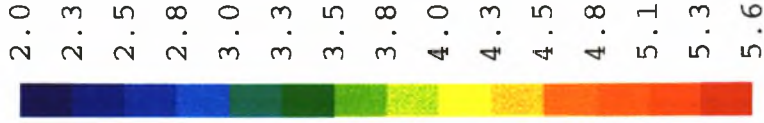


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m



Vector



→ .52

Min: 2.04E+00

Max: 5.55E+00



PHOTON

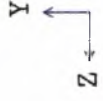
Axial Velocity Contour

Length 15m

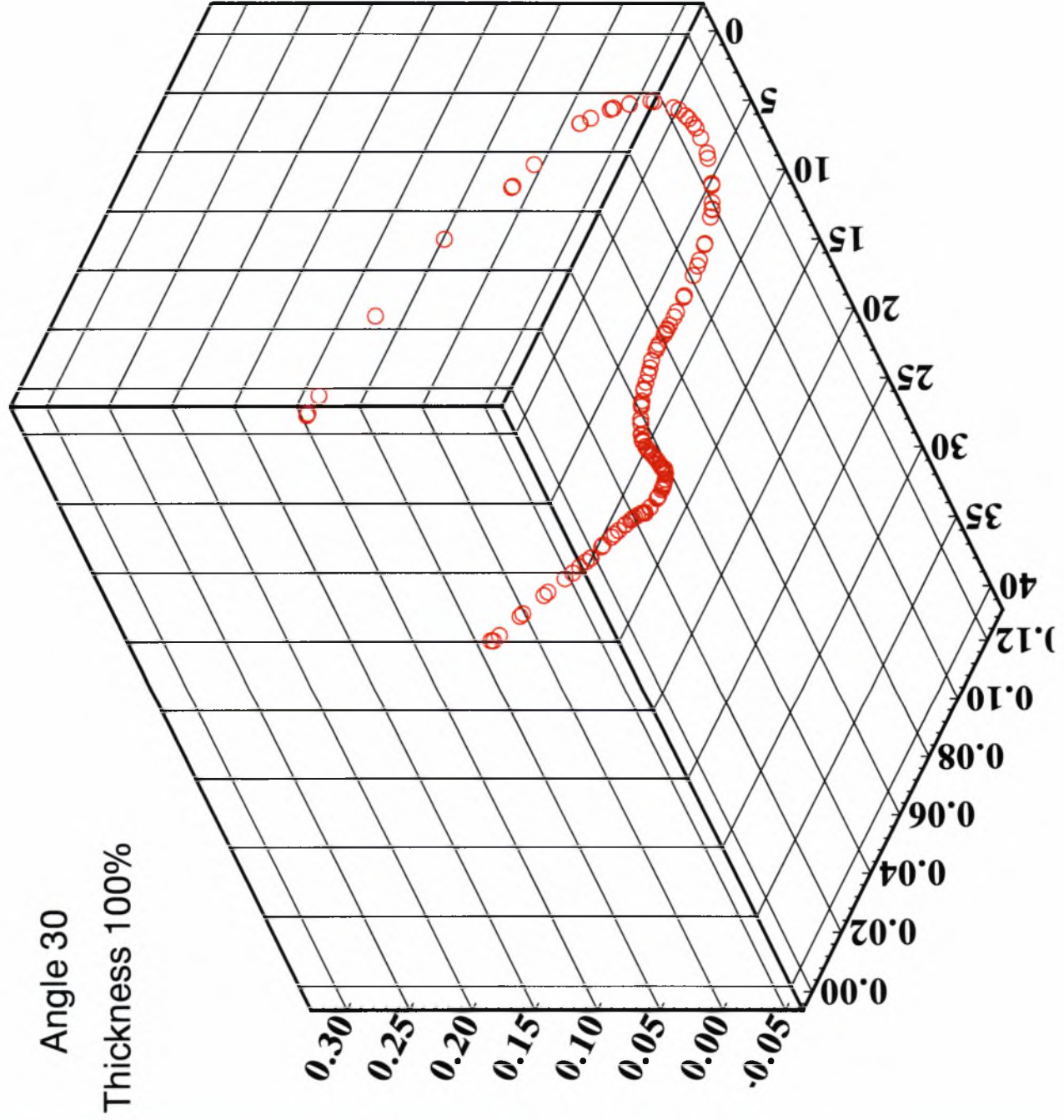
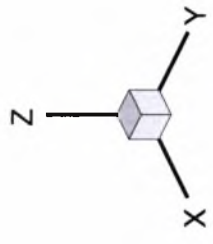


Angle 30

Thickness 100%



Trajectory of Carbon Particle



5^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

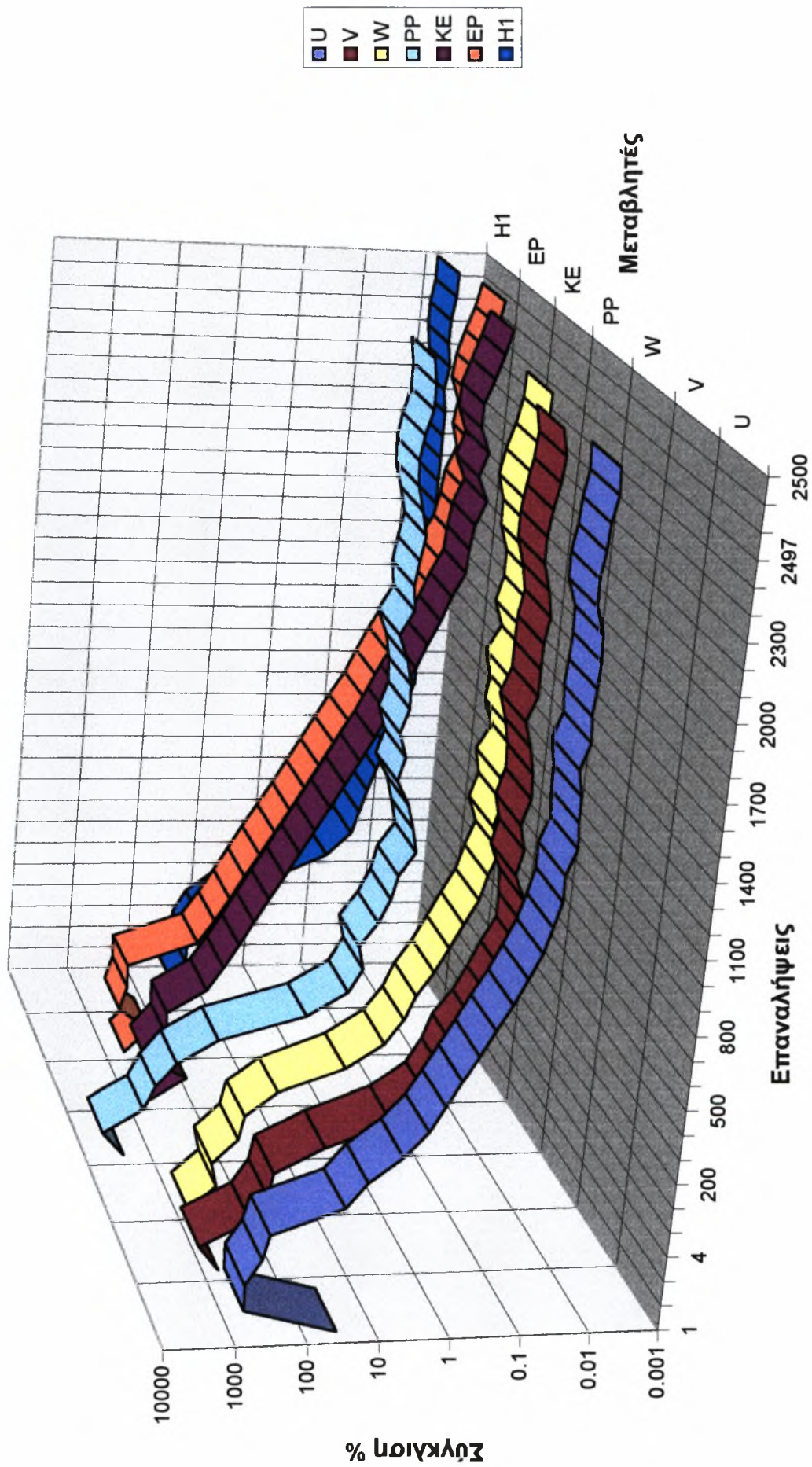
Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%

Διάγραμμα Τυπικής Σύγκλισης (Μοντέλο 5)

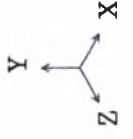




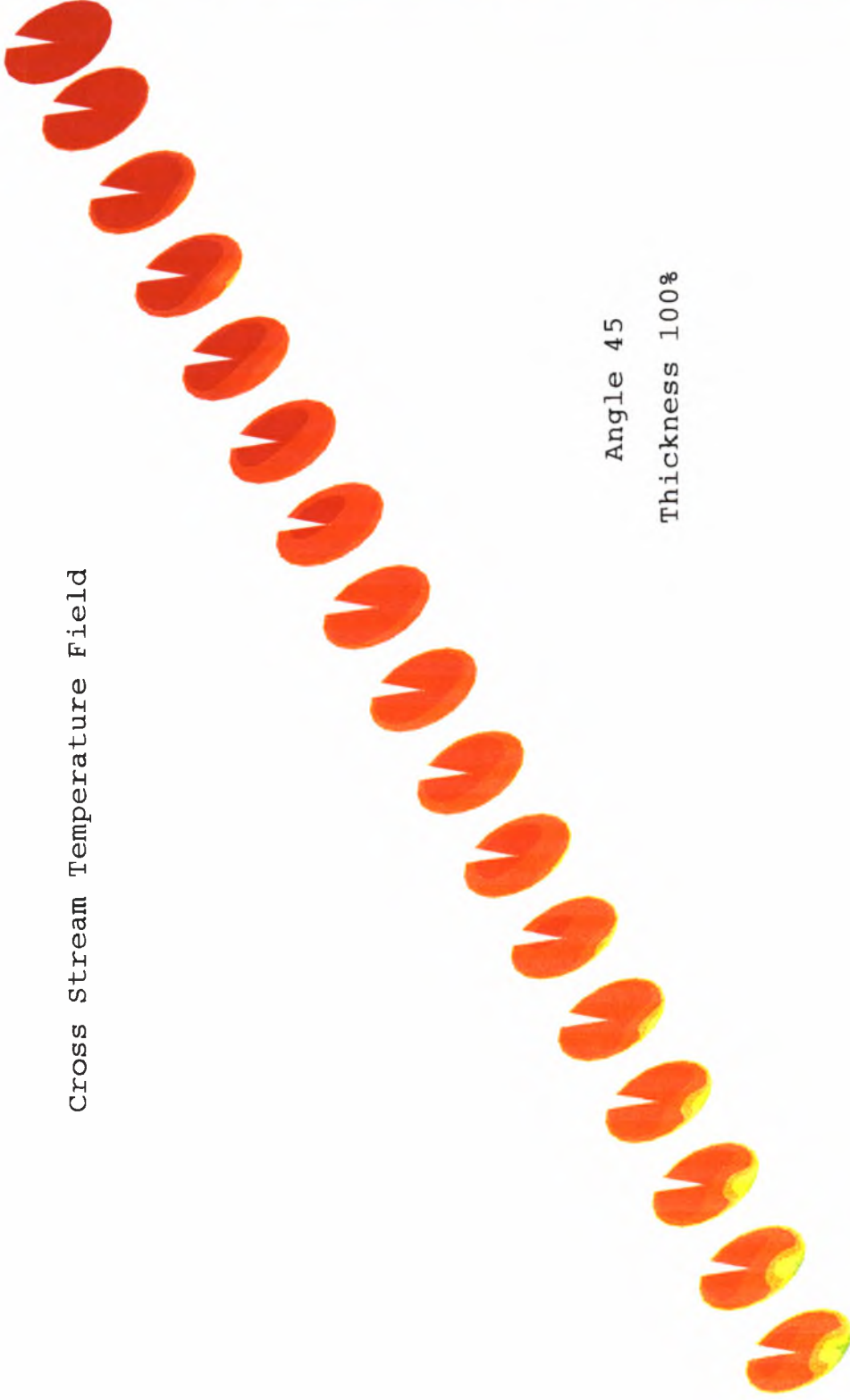
PHOTON

TEMP

- 1188
- 1279
- 1371
- 1463
- 1555
- 1647
- 1739
- 1830
- 1922
- 2014
- 2106
- 2198
- 2289
- 2381
- 2473



Cross Stream Temperature Field



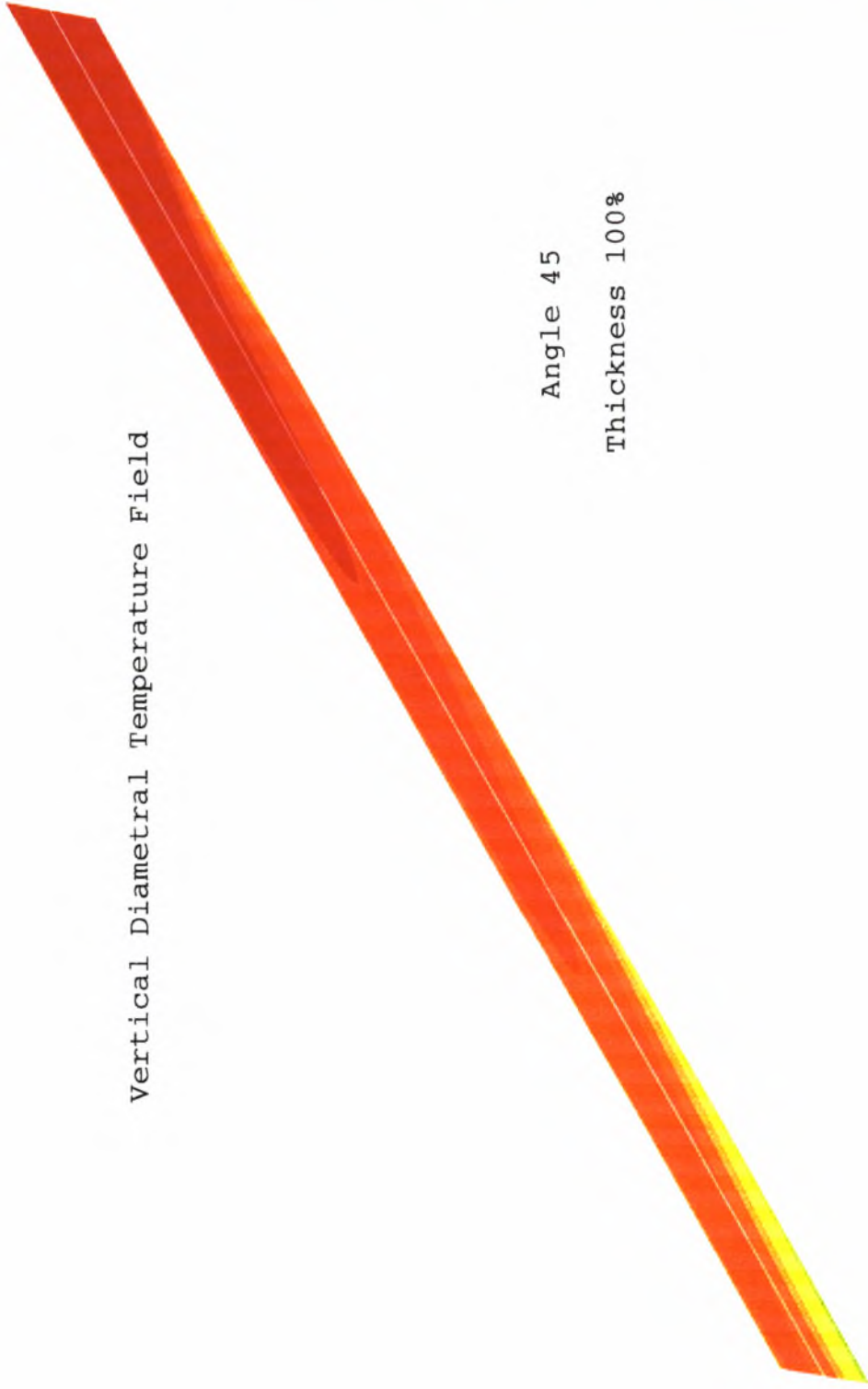
Angle 45

Thickness 100%



PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field



Angle 45

Thickness 100%

TEMP

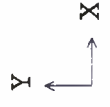
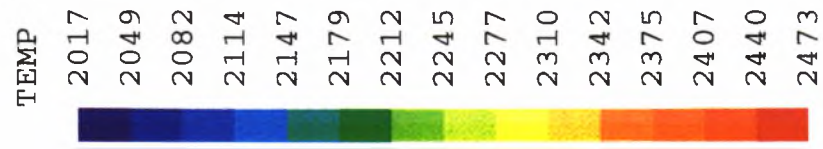
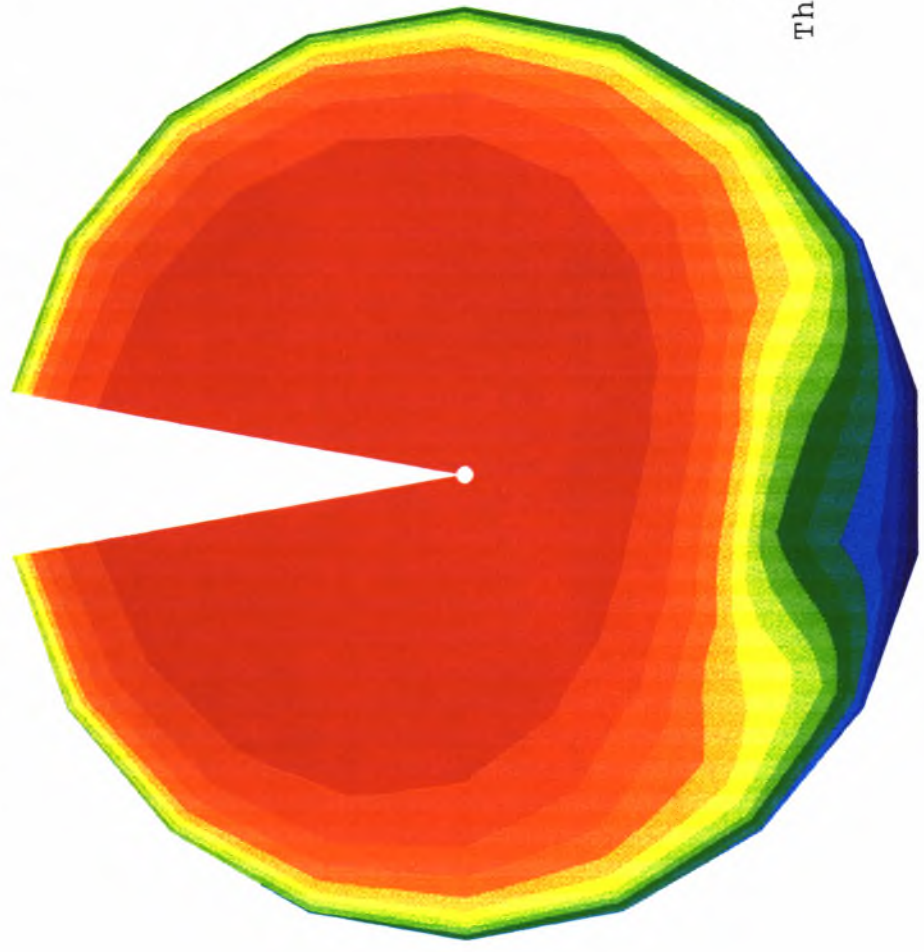
- 1188
- 1279
- 1371
- 1463
- 1555
- 1647
- 1739
- 1830
- 1922
- 2014
- 2106
- 2198
- 2289
- 2381
- 2473





PHOTON

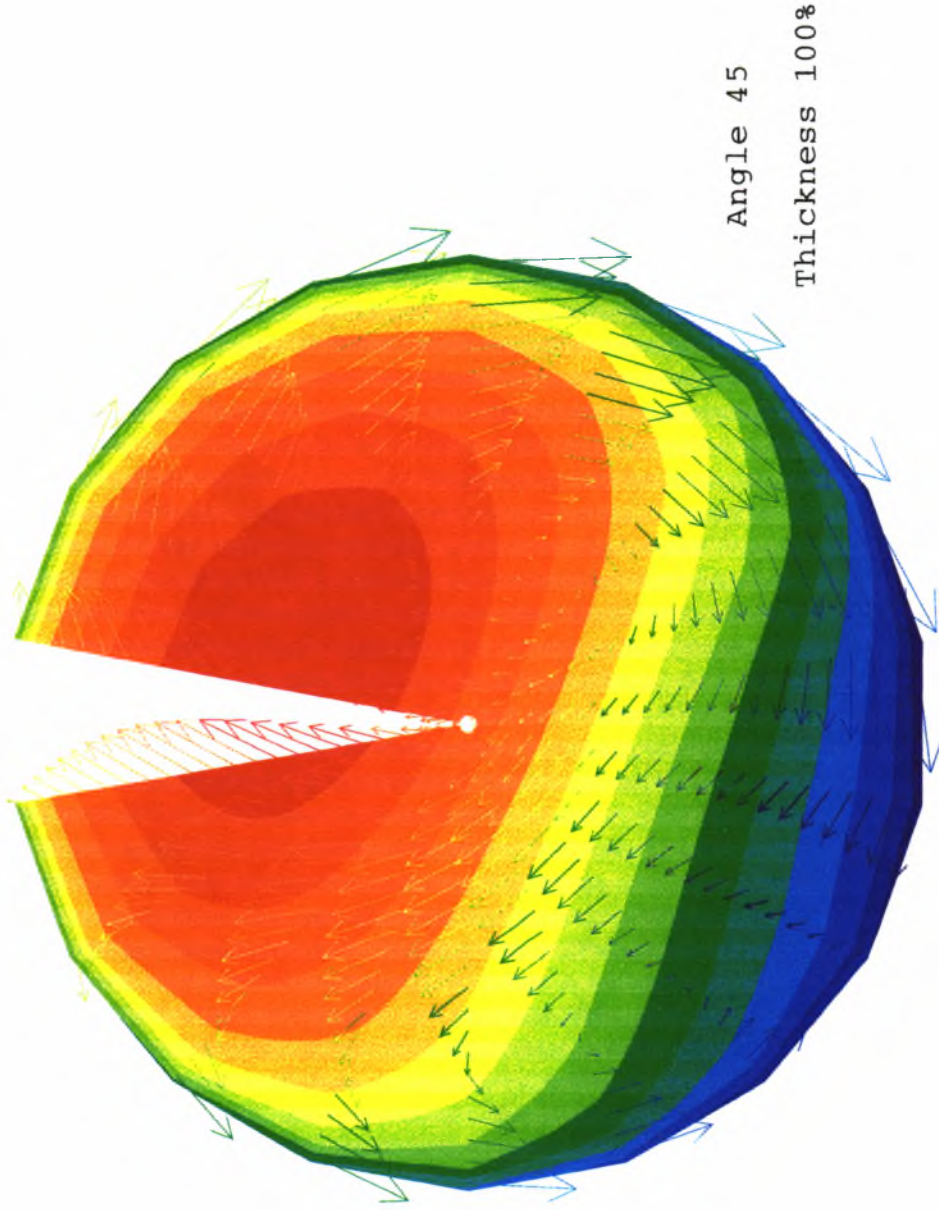
Cross Stream Temperature Field at 10m



Cross Stream temperature Field at 20m



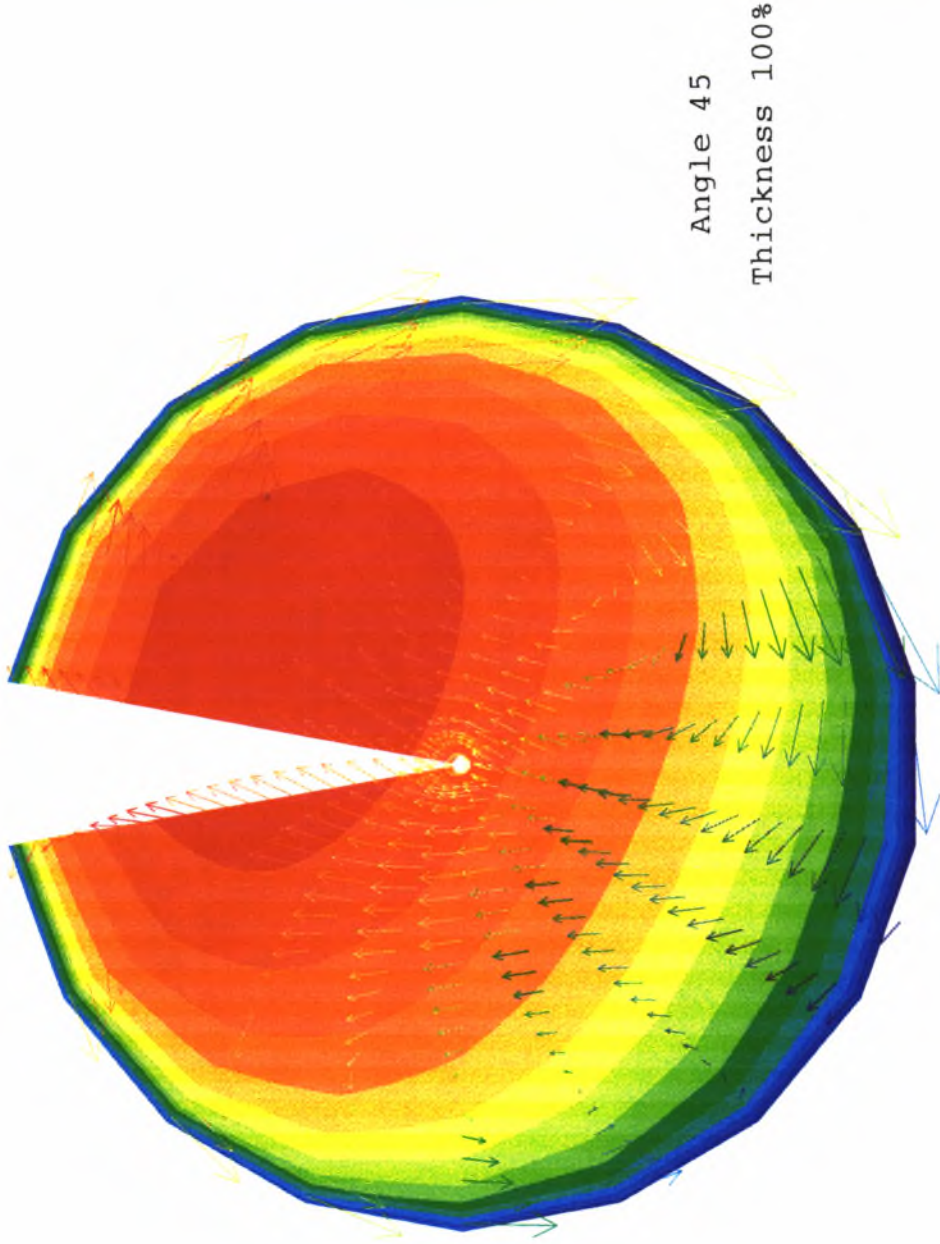
PHOTON



Cross Stream Temperature Field at 30m



PHOTON





PHOTON

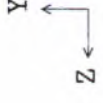
Axial Velocity Contour

Length 15m



Angle 45

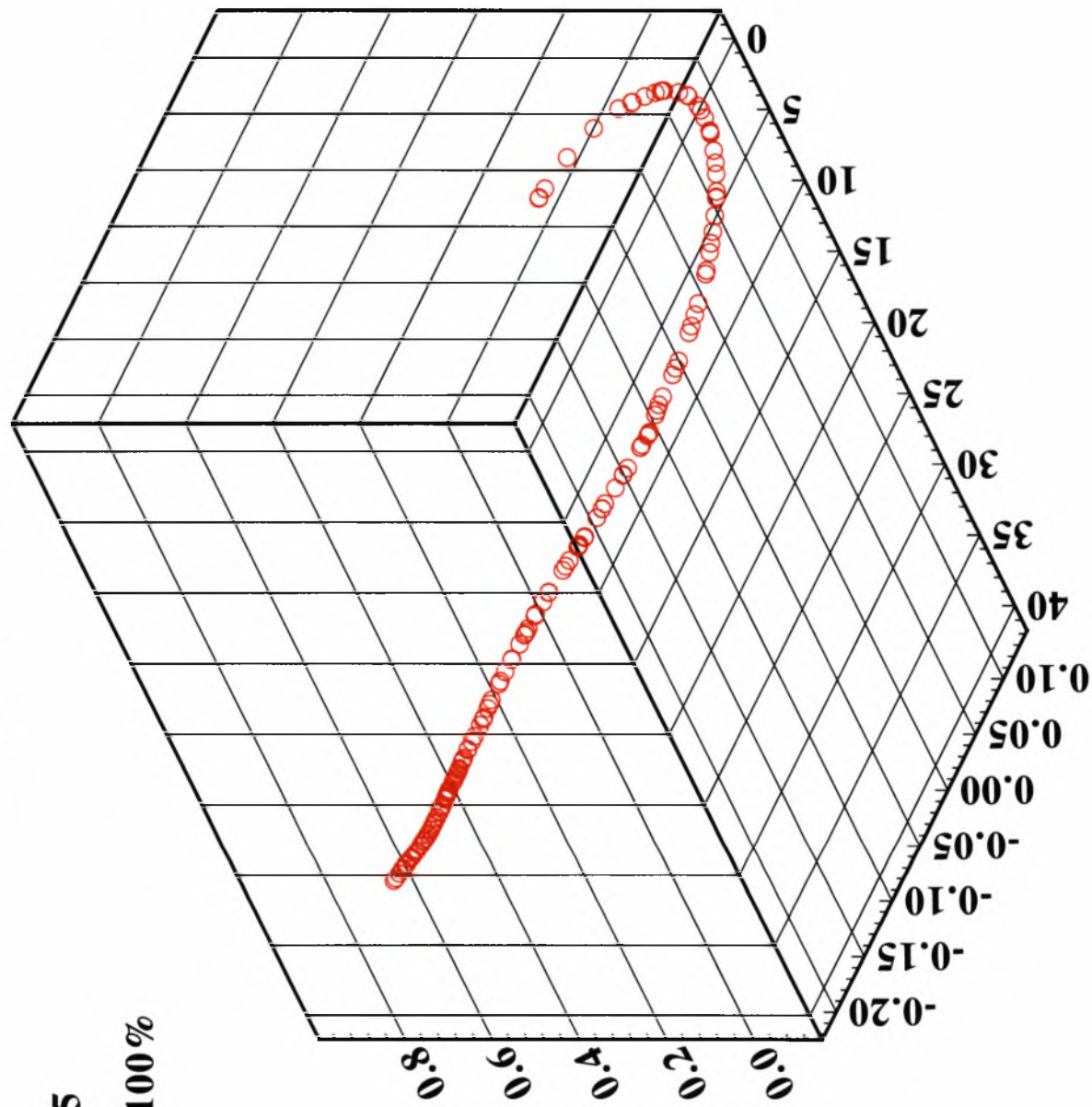
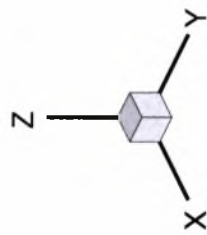
Thickness 100%



Trajectory of Carbon Particle

Angle 45

Thickness 100%



6^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

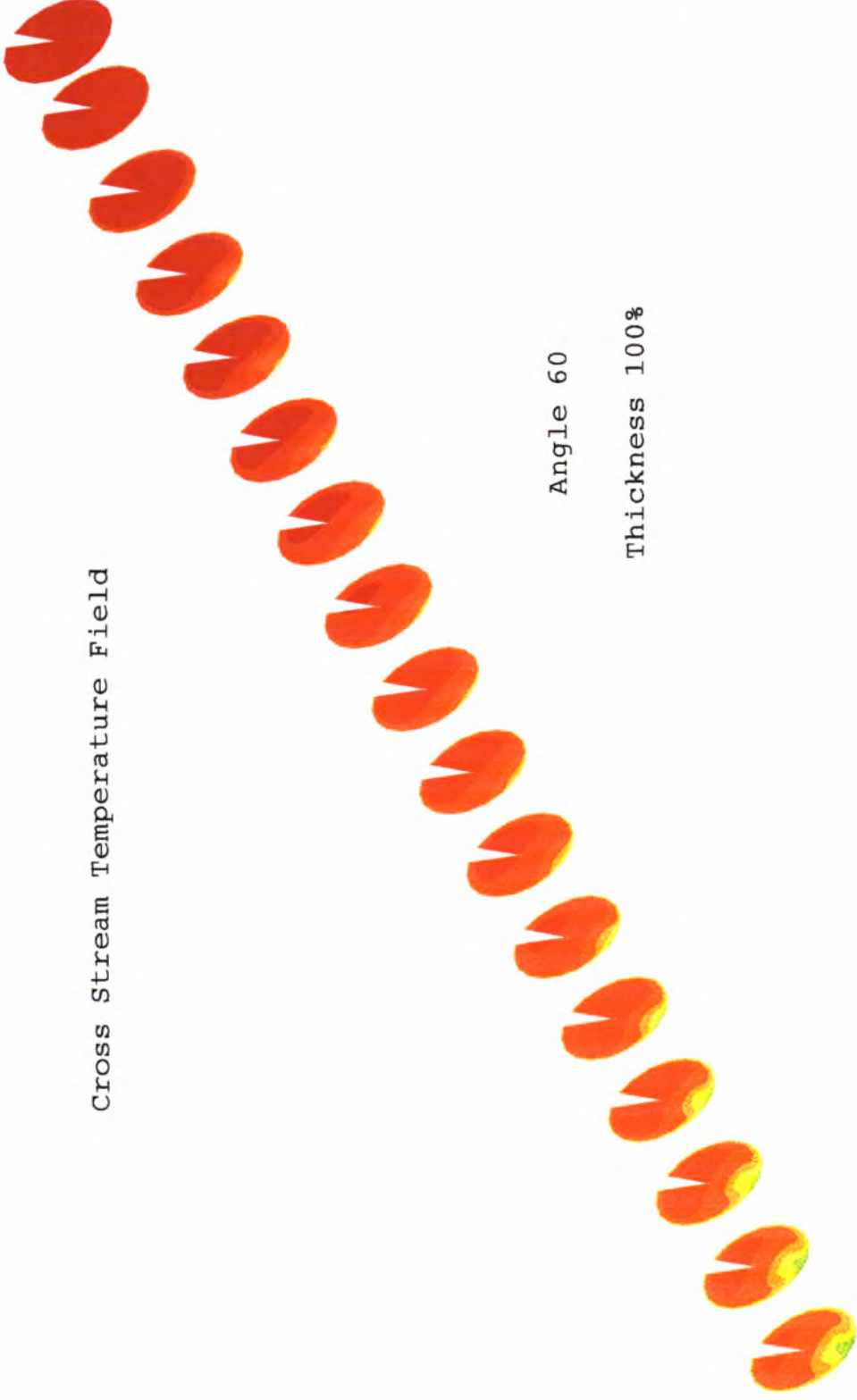
Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 60^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%



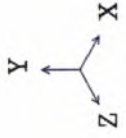
PHOTON

Cross Stream Temperature Field



TEMP

- 1190
- 1282
- 1373
- 1465
- 1557
- 1648
- 1740
- 1832
- 1923
- 2015
- 2107
- 2198
- 2290
- 2381
- 2473





PHOTON

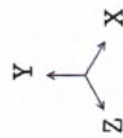
Vertical Diametral Temperature Field

Angle 60

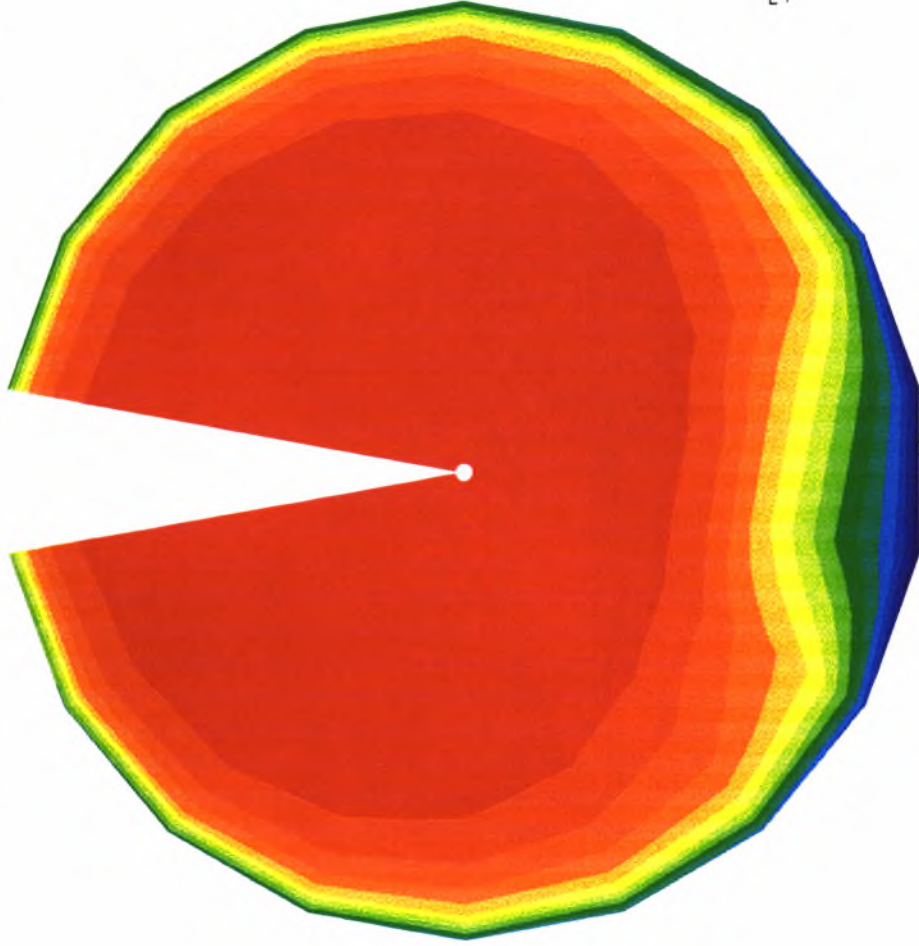
Thickness 100%

TEMP

1190
1282
1373
1465
1557
1648
1740
1832
1923
2015
2107
2198
2290
2381
2473

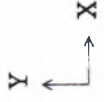


Cross Stream Temperature Field at 10m



PHOTON

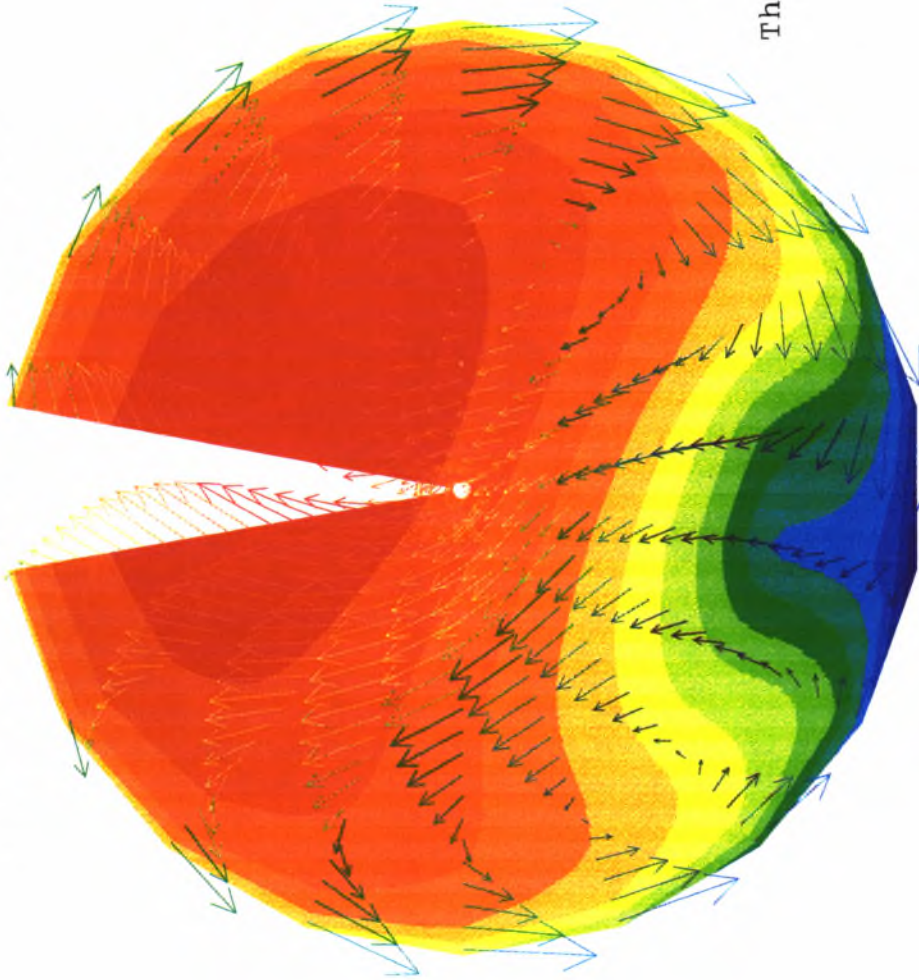
TEMP
2005
2039
2072
2106
2139
2172
2206
2239
2272
2306
2339
2373
2406
2439
2473





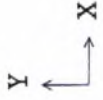
PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 20m



Vector

- 1.2
- 1.7
- 2.2
- 2.7
- 3.2
- 3.7
- 4.2
- 4.7
- 5.2
- 5.7
- 6.2
- 6.7
- 7.2
- 7.8
- 8.3



→ .9

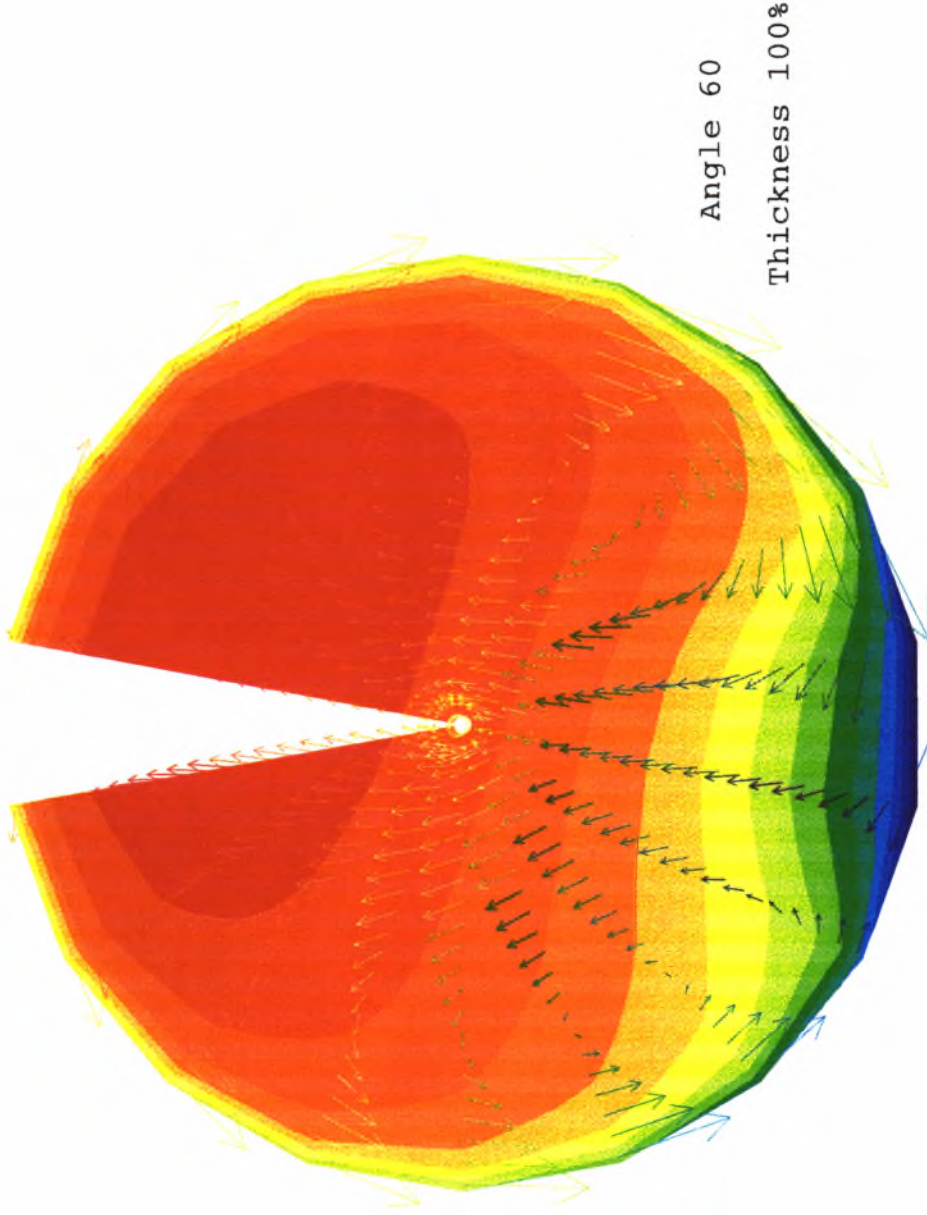
Min: 1.16E+00

Max: 8.26E+00

Cross Stream Temperature Field at 30m



PHOTON



Vector

- 1.5
- 1.8
- 2.1
- 2.4
- 2.8
- 3.1
- 3.4
- 3.7
- 4.0
- 4.4
- 4.7
- 5.0
- 5.3
- 5.6
- 5.9



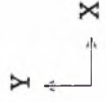
Angle 60

Thickness 100%

→ .75

Min: 1.48E+00

Max: 5.95E+00





PHOTON

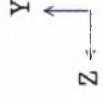
Axial Velocity Contour

Length 15m



Angle 60

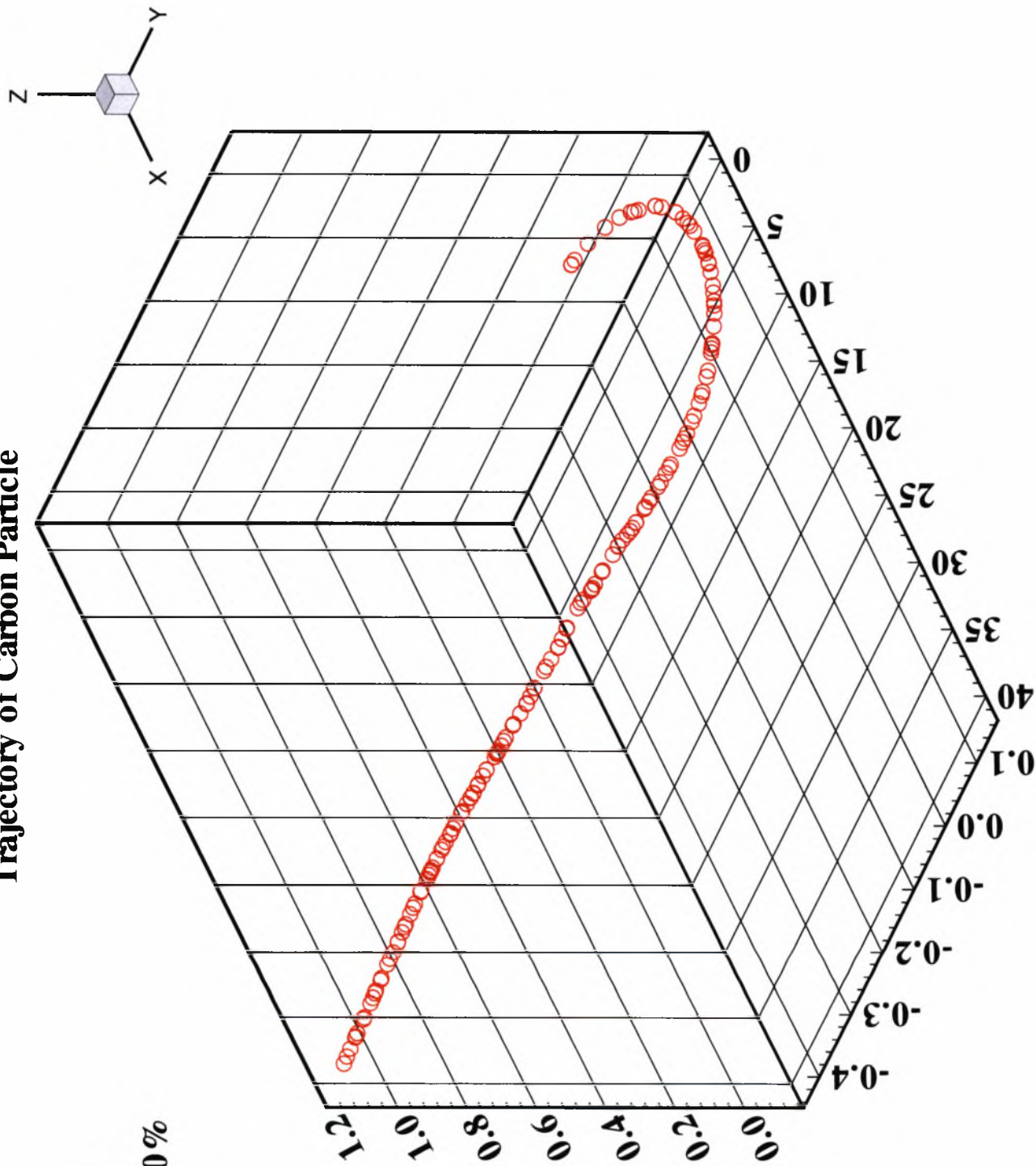
Thickness 100%



Trajectory of Carbon Particle

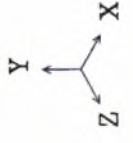
Angle 60

Thickness 100%

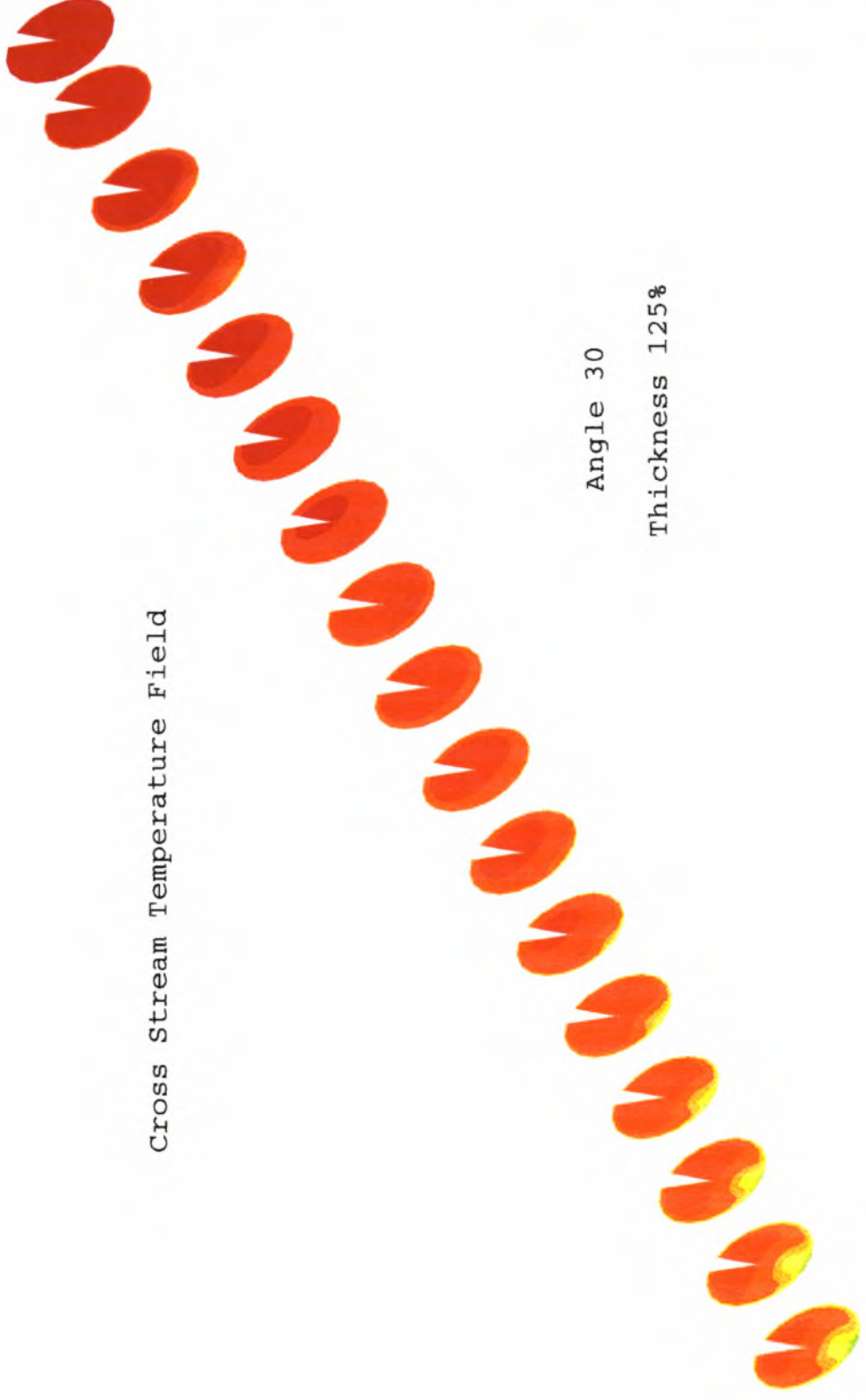




PHOTON



Cross Stream Temperature Field



TEMP

1191
1282
1374
1466
1557
1649
1740
1832
1924
2015
2107
2198
2290
2382
2473

Angle 30
Thickness 125%

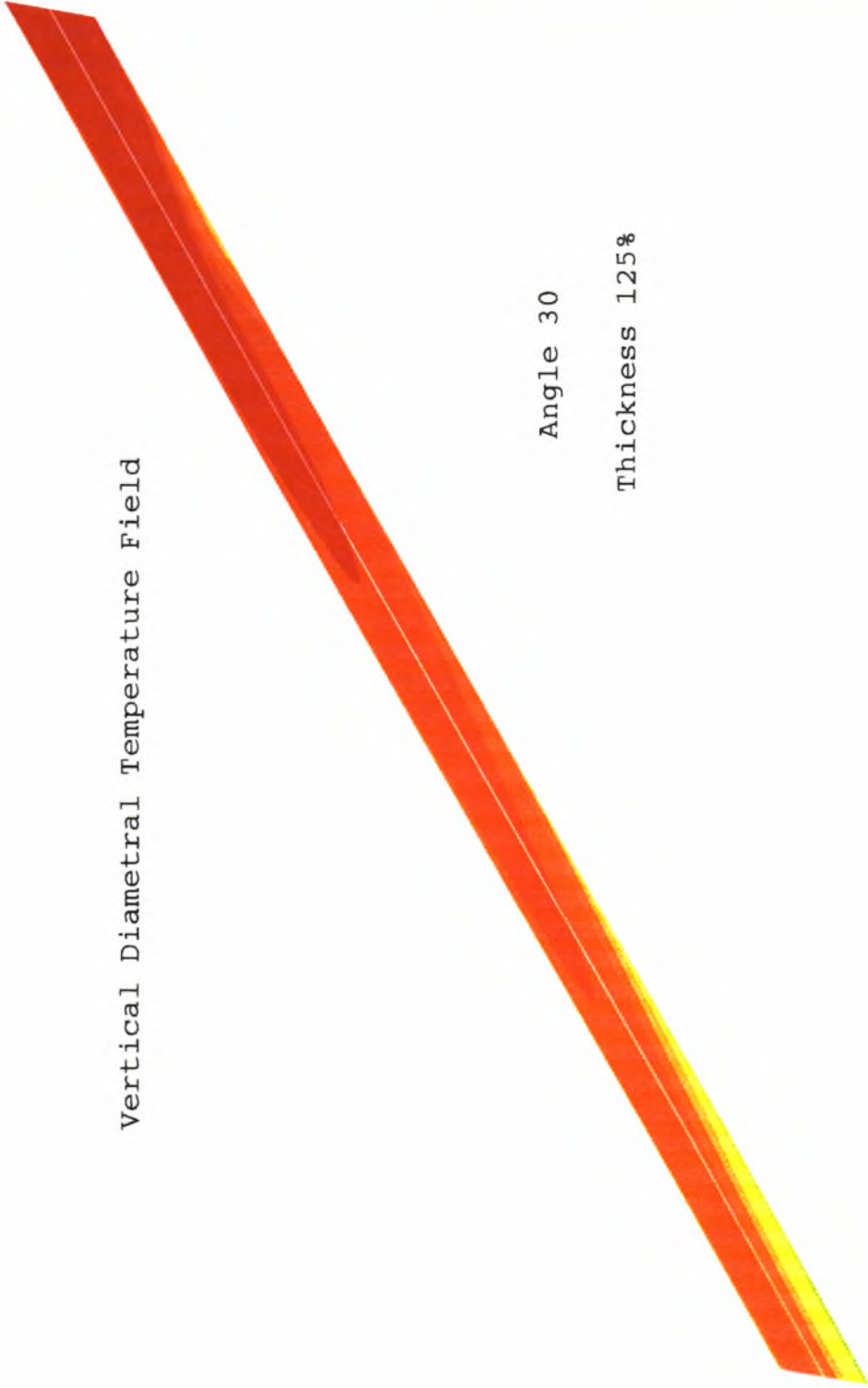
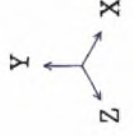


PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

TEMP

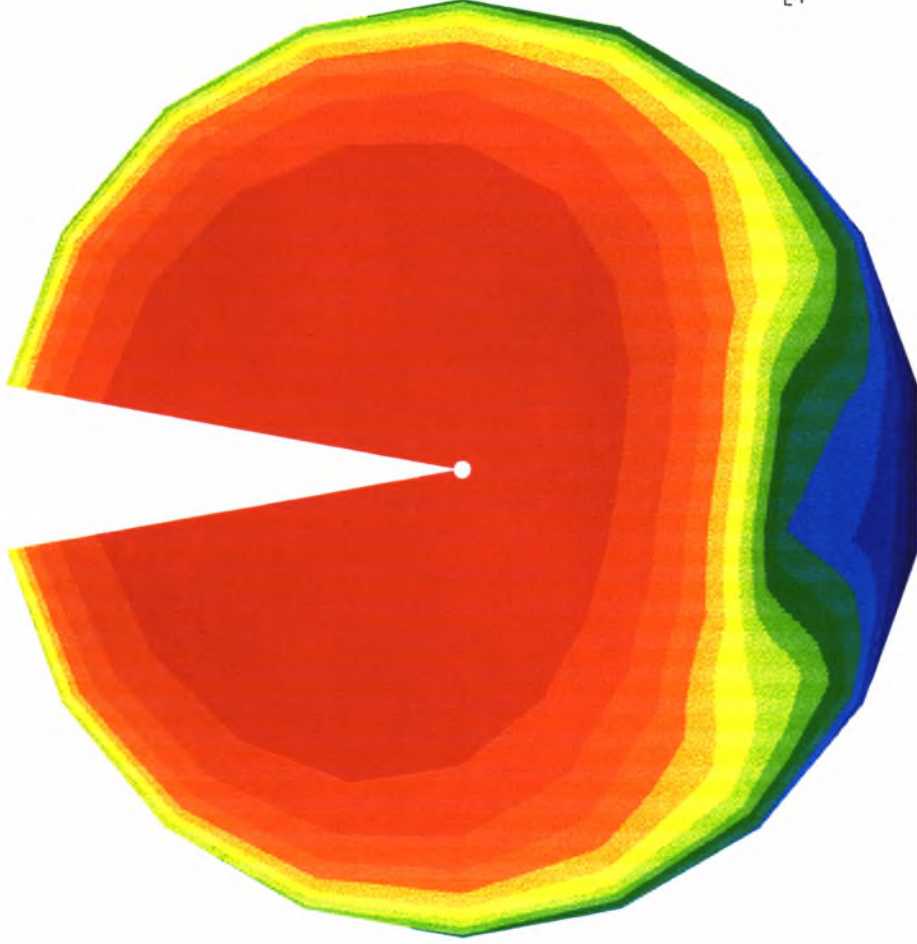
1191
1282
1374
1466
1557
1649
1740
1832
1924
2015
2107
2198
2290
2382
2473



Angle 30

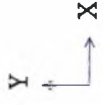
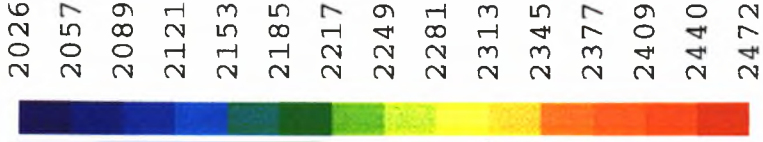
Thickness 125%

Cross Stream Temperature Field at 10m



PHOTON

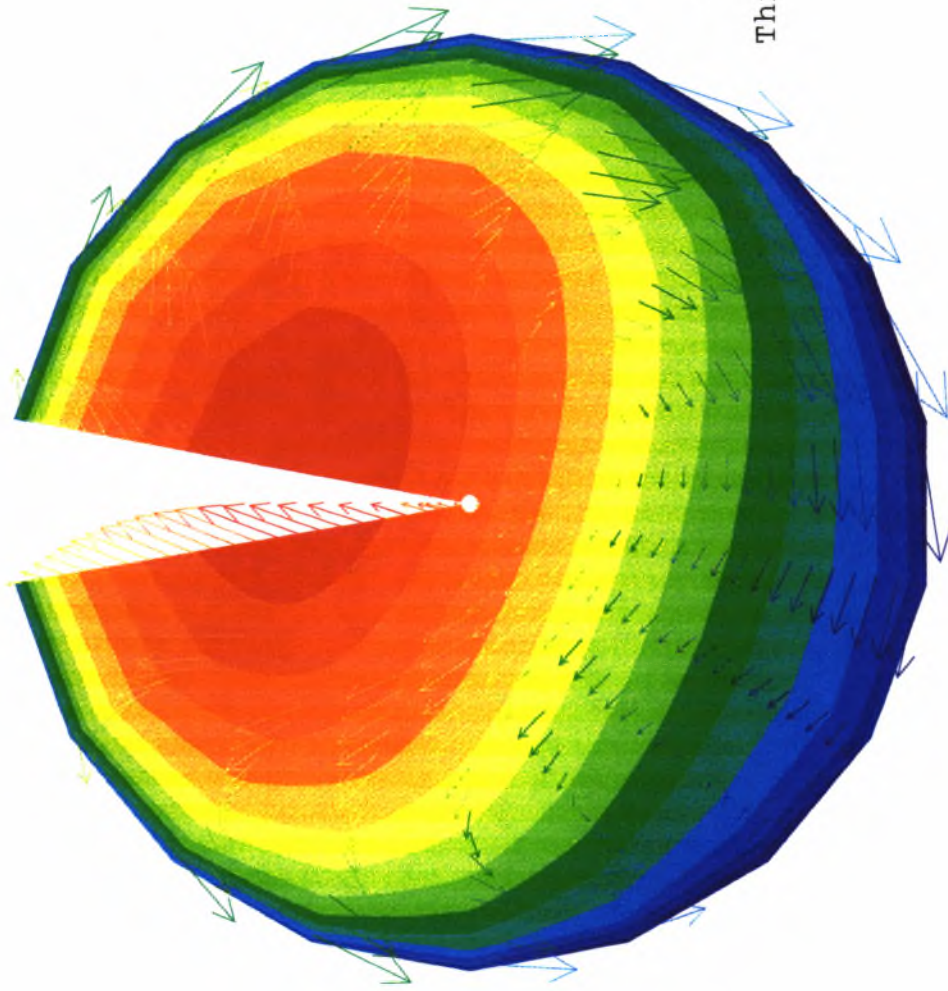
TEMP





PHOTON

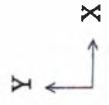
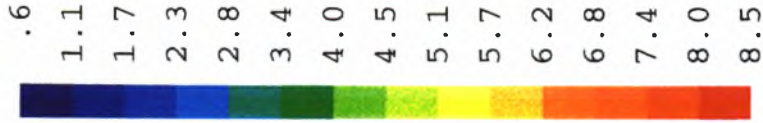
Cross Stream Temperature Field at 20m



Angle 30

Thickness 125%

Vector



→ .60

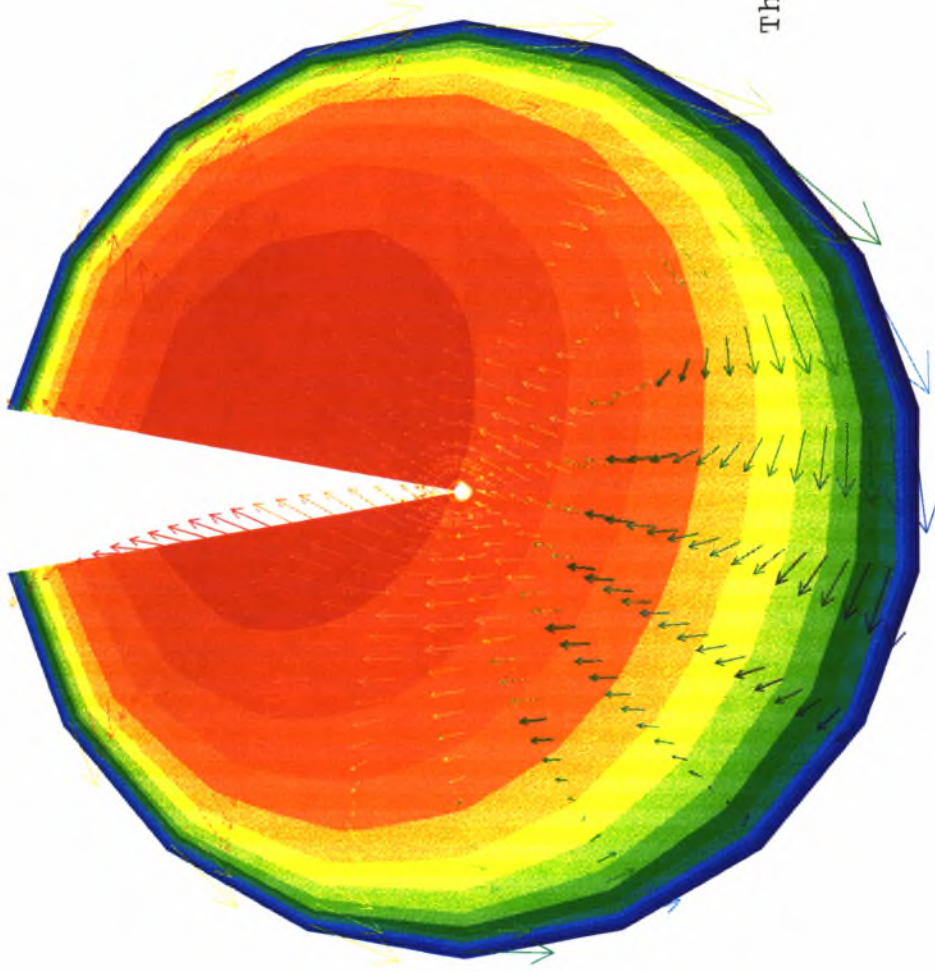
Min: 5.57E-01

Max: 8.52E+00

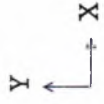
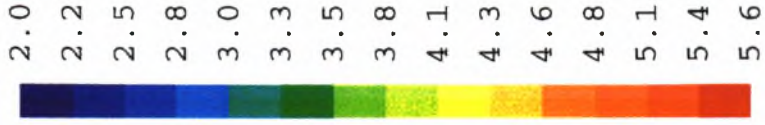


PHOTON

Cross Stream Temperature at 30m



Vector



→ .60

Min: 1.98E+00

Max: 5.61E+00



PHOTON

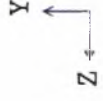
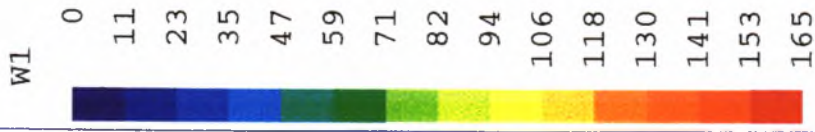
Axial Velocity Contour

Length 15m



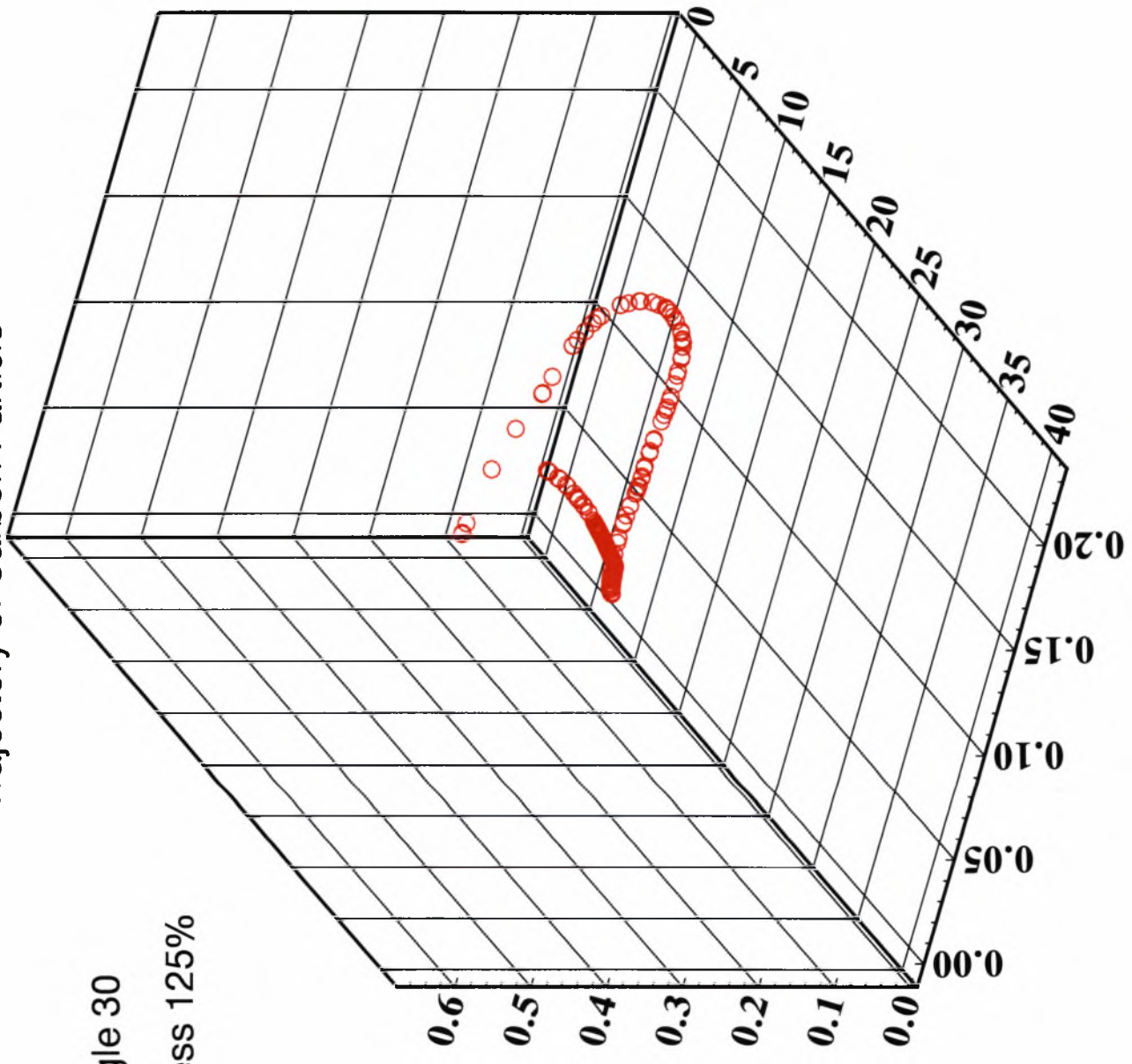
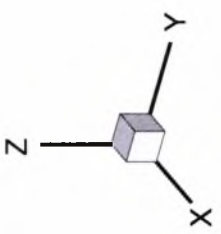
Angle 30

Thickness 125%



Trajectory of Carbon Particle

Angle 30
Thickness 125%



8^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

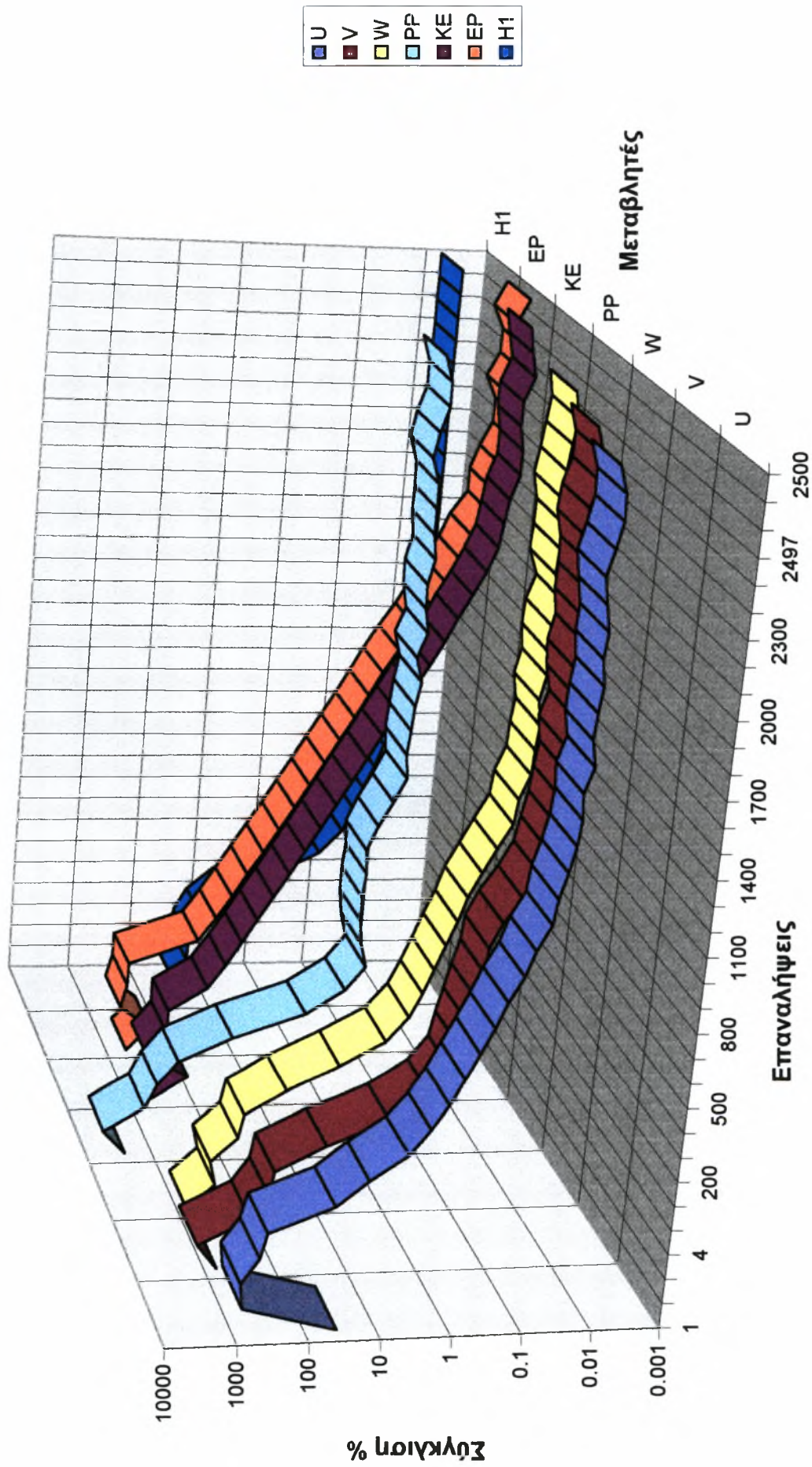
Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 125%

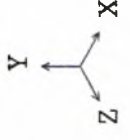
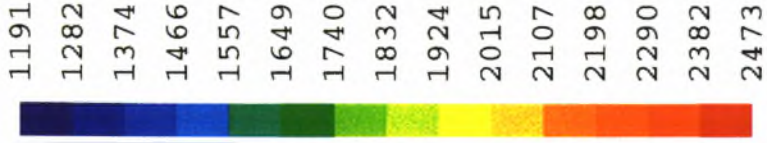
Διάγραμμα Τυπικής Σύγκλισης (Μοντέλο 8)



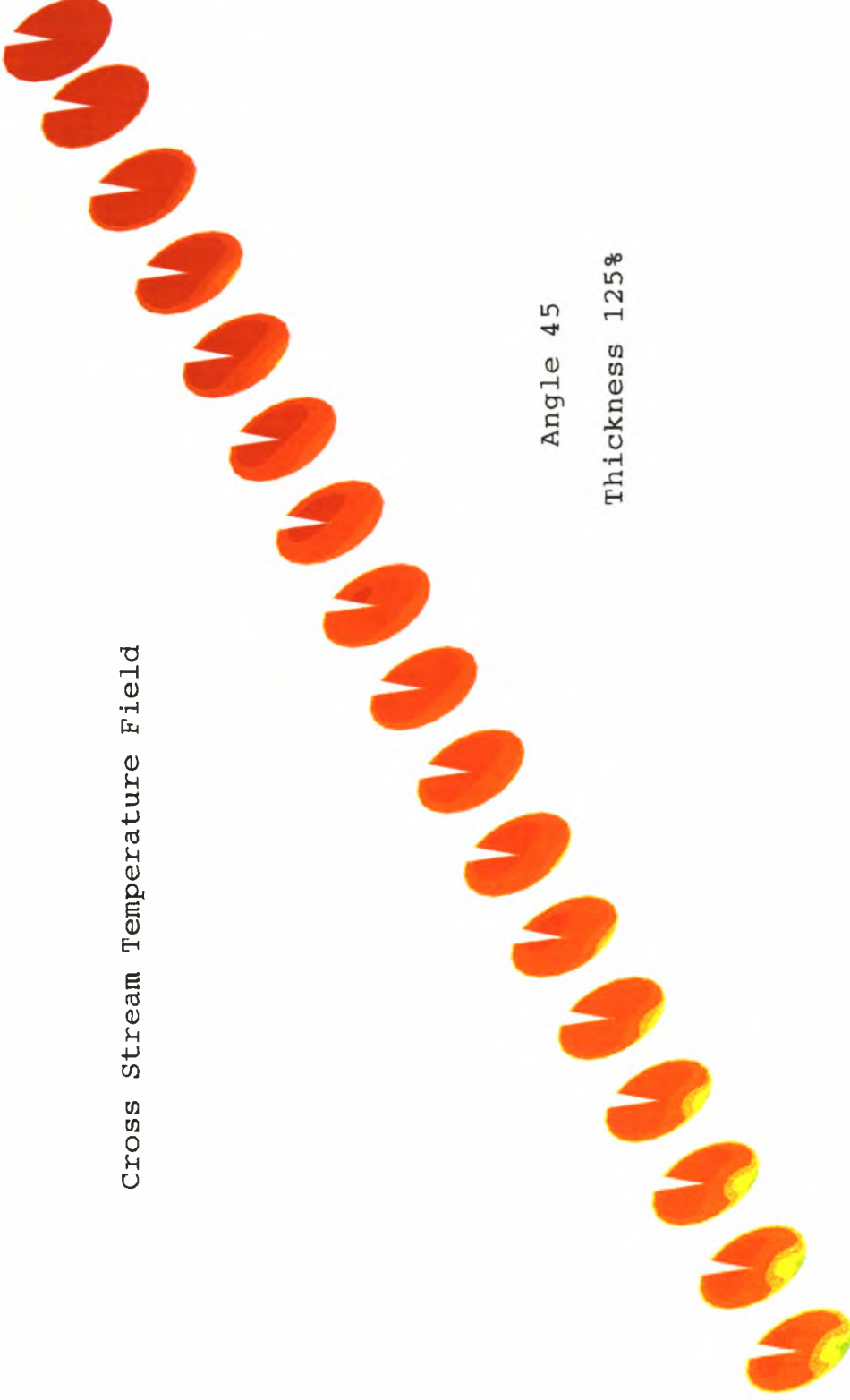


PHOTON

TEMP



Cross Stream Temperature Field



Angle 45

Thickness 125%

Fluid Dynamic Laboratory (CFD Group)

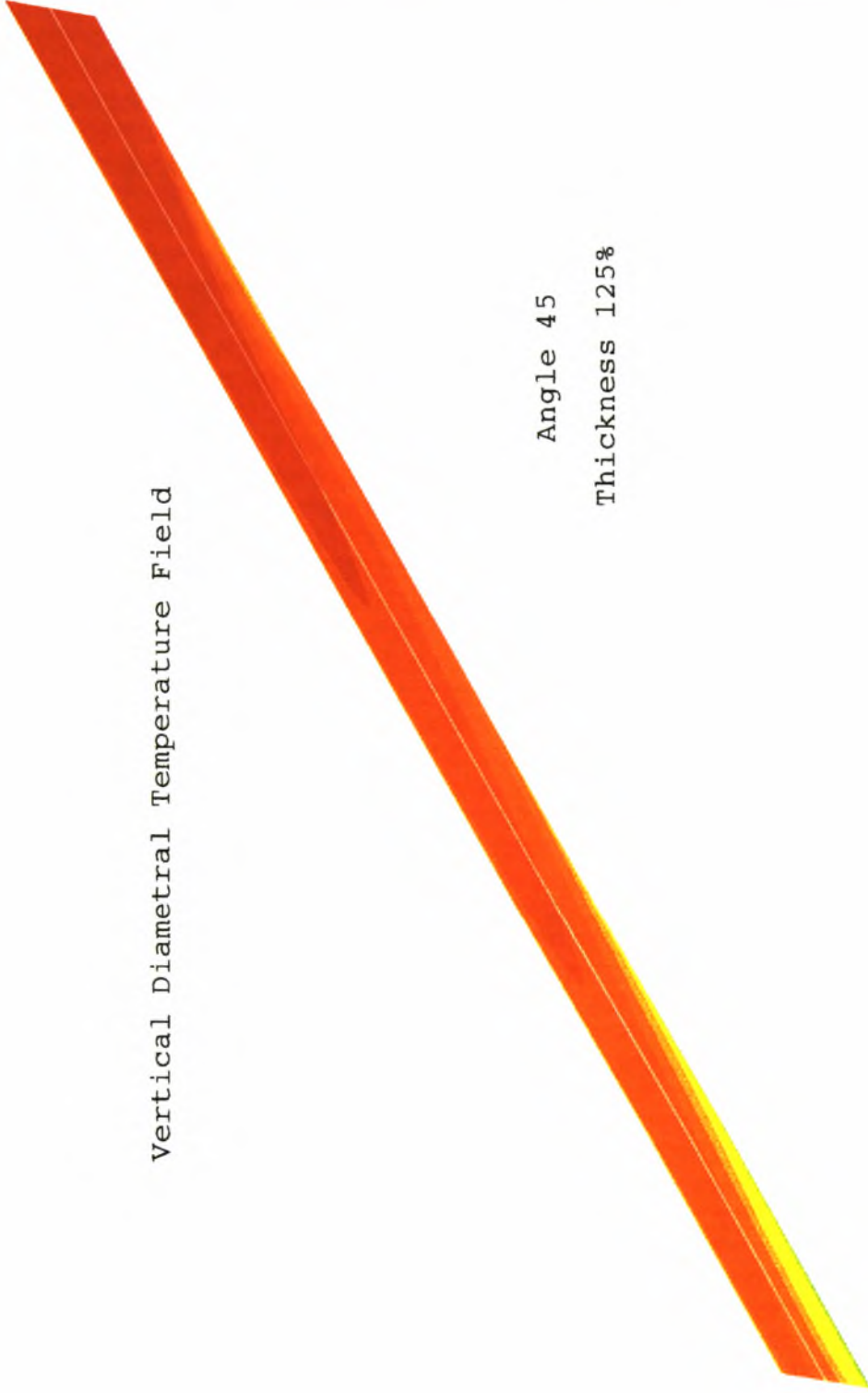
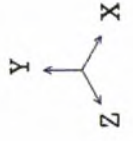


PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

TEMP

- 1191
- 1282
- 1374
- 1466
- 1557
- 1649
- 1740
- 1832
- 1924
- 2015
- 2107
- 2198
- 2290
- 2382
- 2473



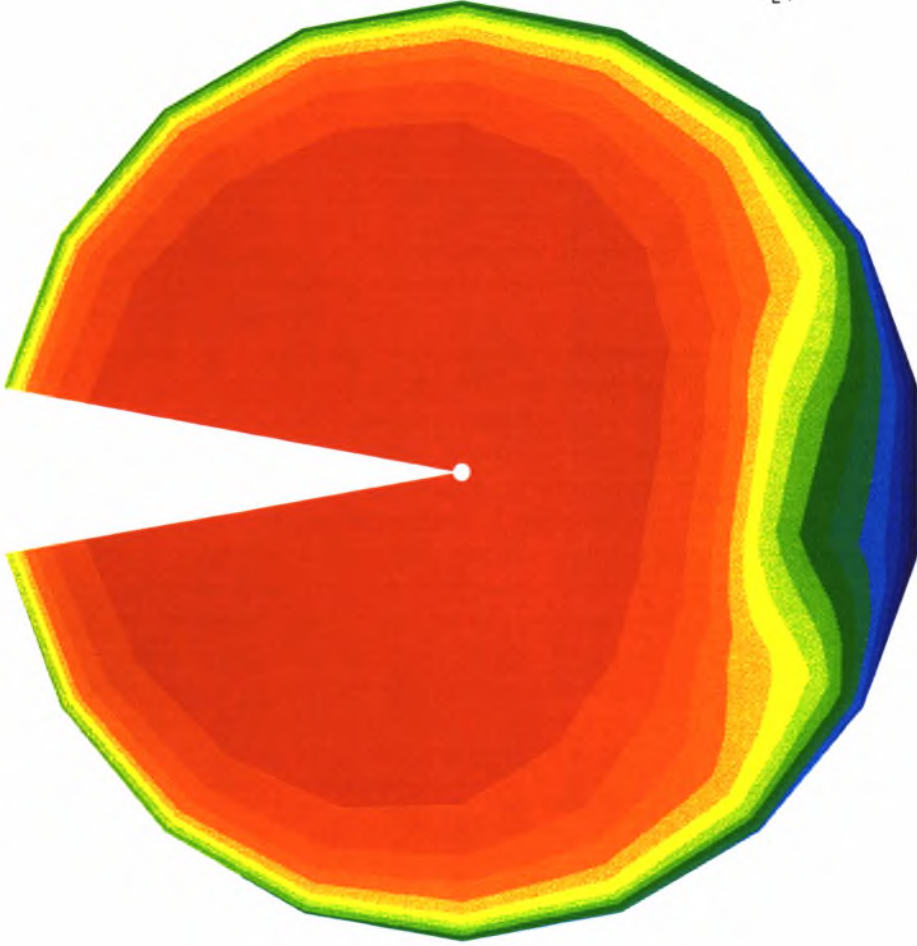
Angle 45

Thickness 125%



PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 10m

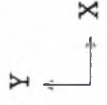


Angle 45

Thickness 125%

TEMP

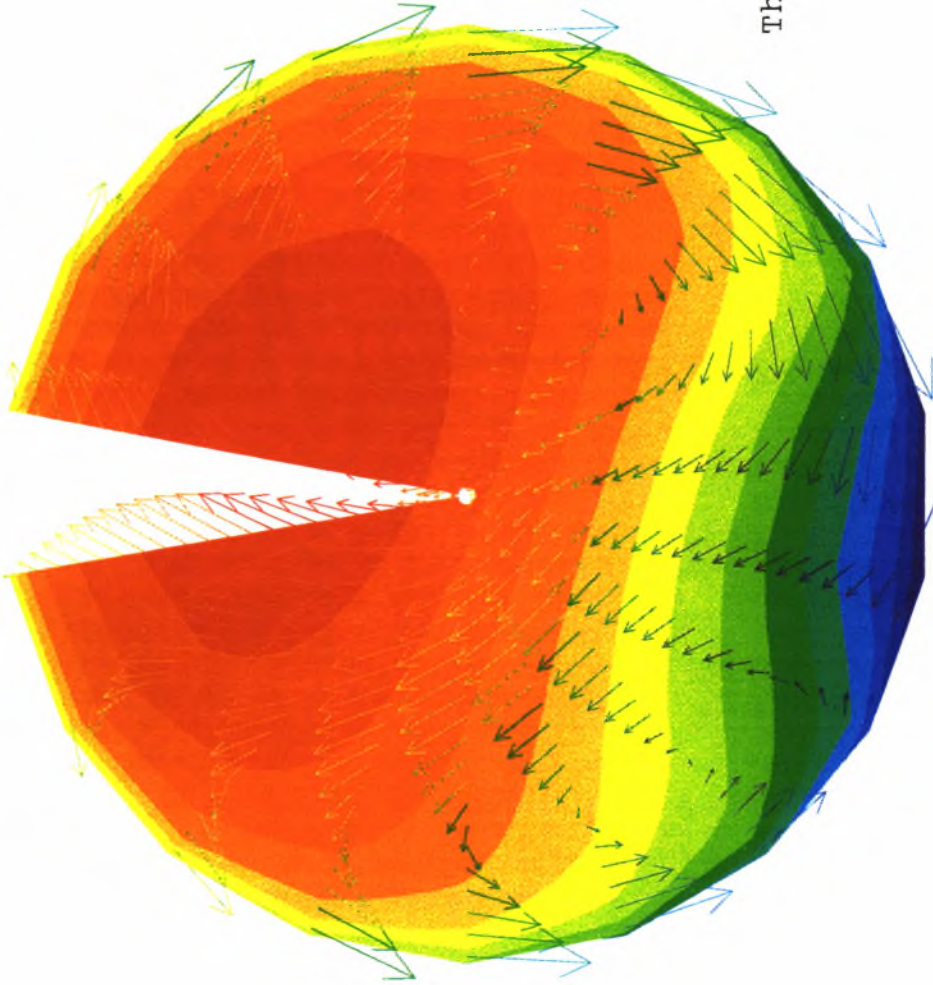
- 2013
- 2046
- 2079
- 2111
- 2144
- 2177
- 2210
- 2243
- 2276
- 2308
- 2341
- 2374
- 2407
- 2440
- 2473





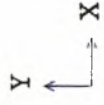
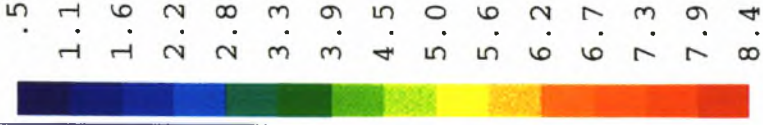
PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 20m



Angle 45
Thickness 125%

Vector



→ .75

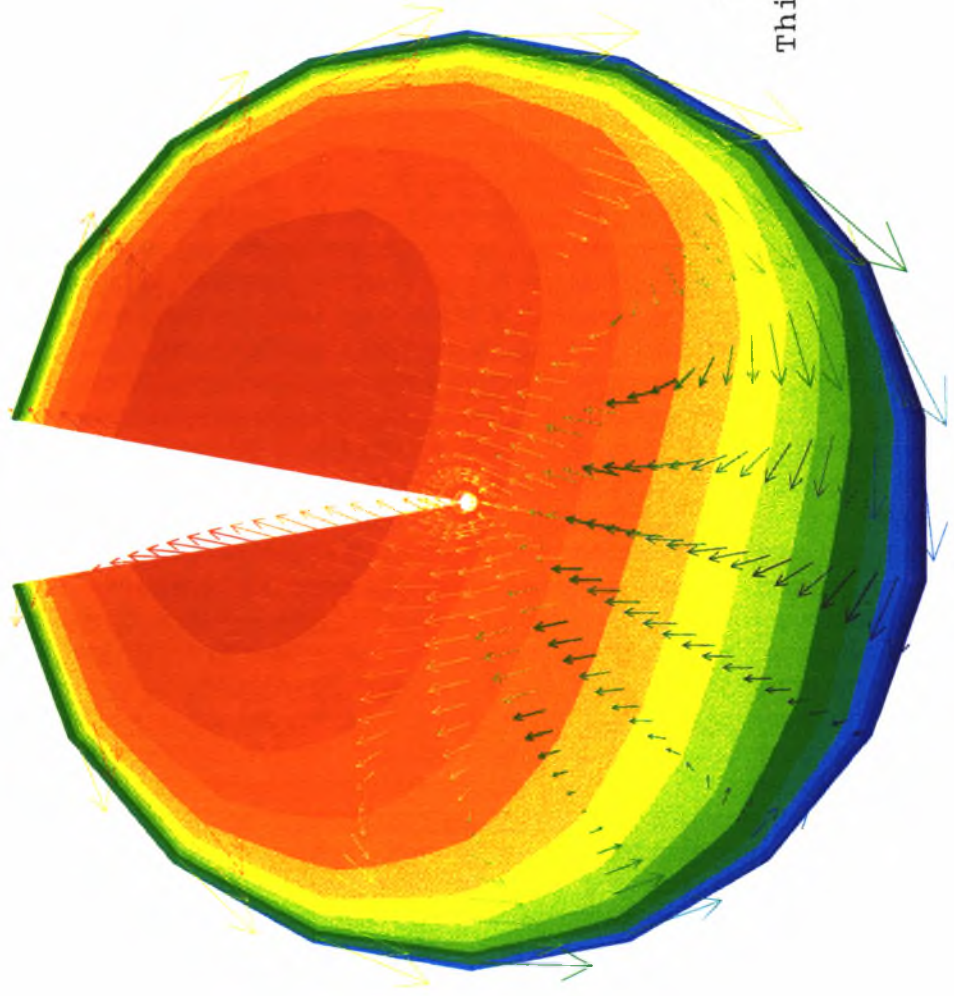
Min: 5.03E-01

Max: 8.42E+00



PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m

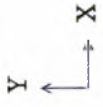


Vector

- 1.7
- 2.0
- 2.3
- 2.6
- 2.8
- 3.1
- 3.4
- 3.7
- 4.0
- 4.3
- 4.6
- 4.9
- 5.2
- 5.5
- 5.8



Angle 45
Thickness 125%



→ .60

Min: 1.67E+00

Max: 5.80E+00



PHOTON

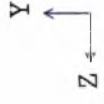
Axial Velocity Contour

Length 15m



Angle 45

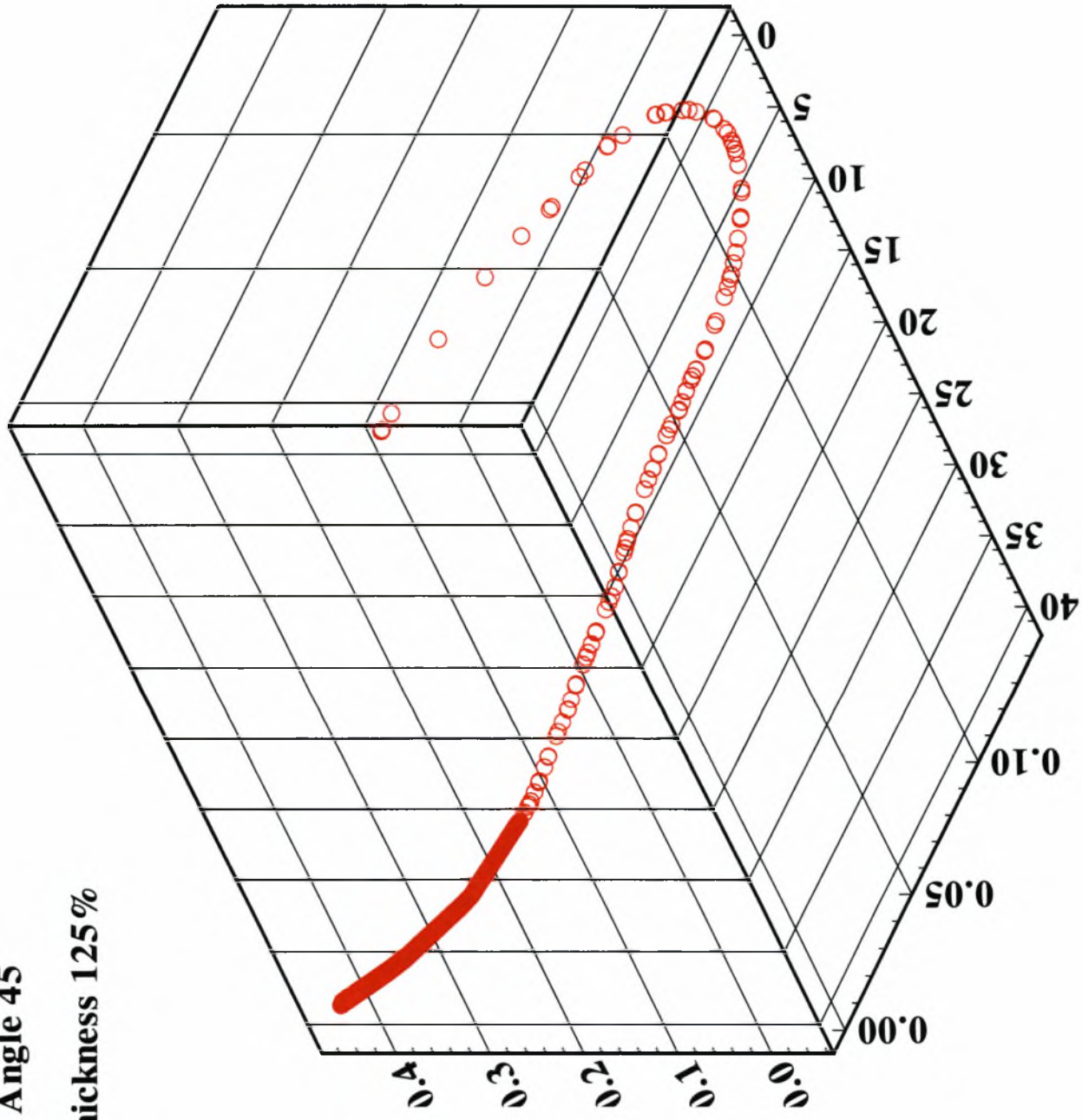
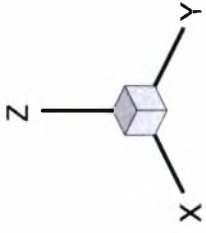
Thickness 125%



Trajectory of Carbon Particle

Angle 45

Thickness 125%



9^ο Μοντέλο Παραμετρικής Μελέτης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

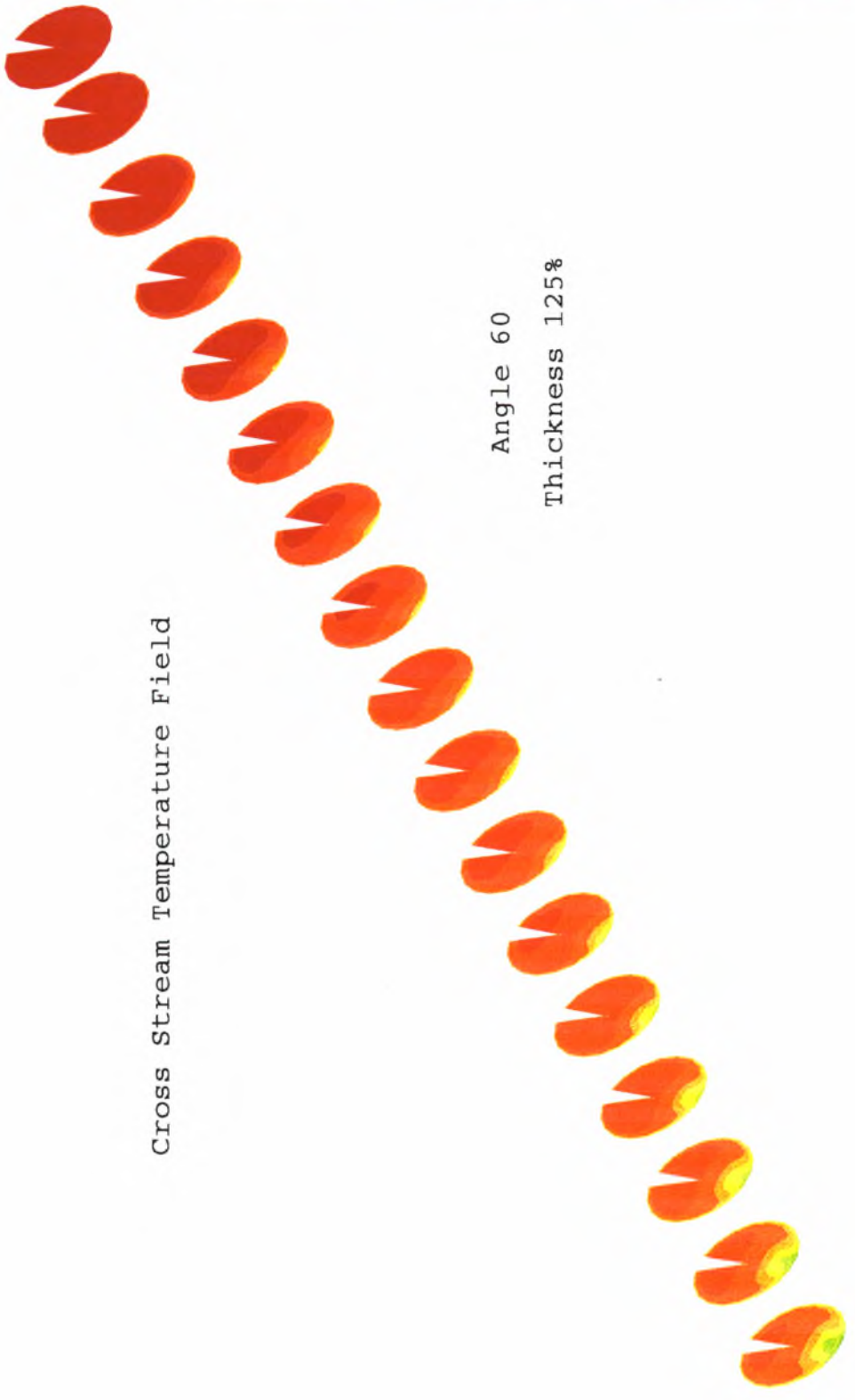
Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 60^ο

Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 125%

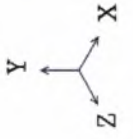
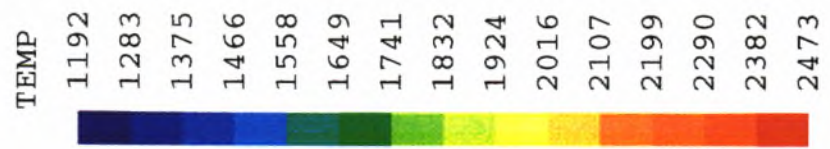


PHOTON

Cross Stream Temperature Field



Angle 60
Thickness 125%

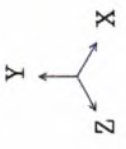
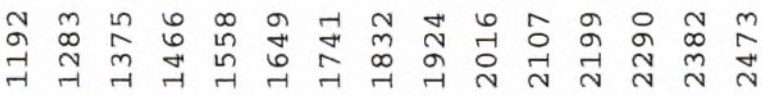




PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

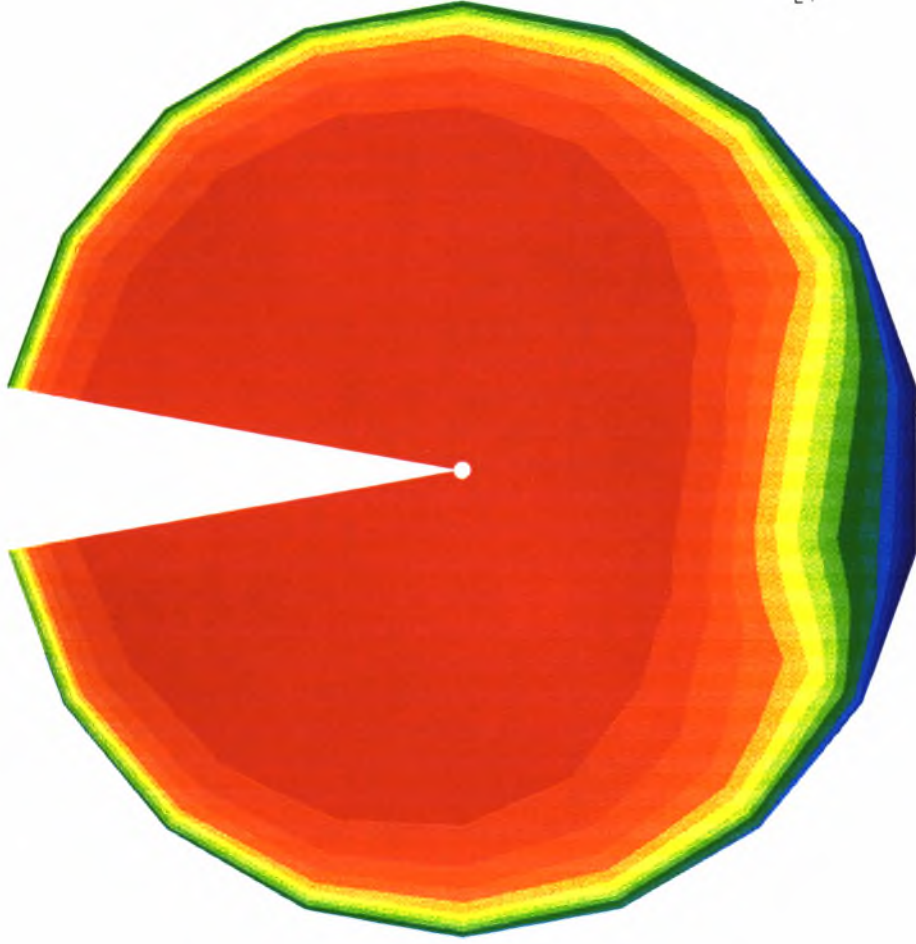
TEMP



Angle 60

Thickness 125%

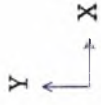
Cross Stream Temperature Field at 10m



PHOTON

TEMP

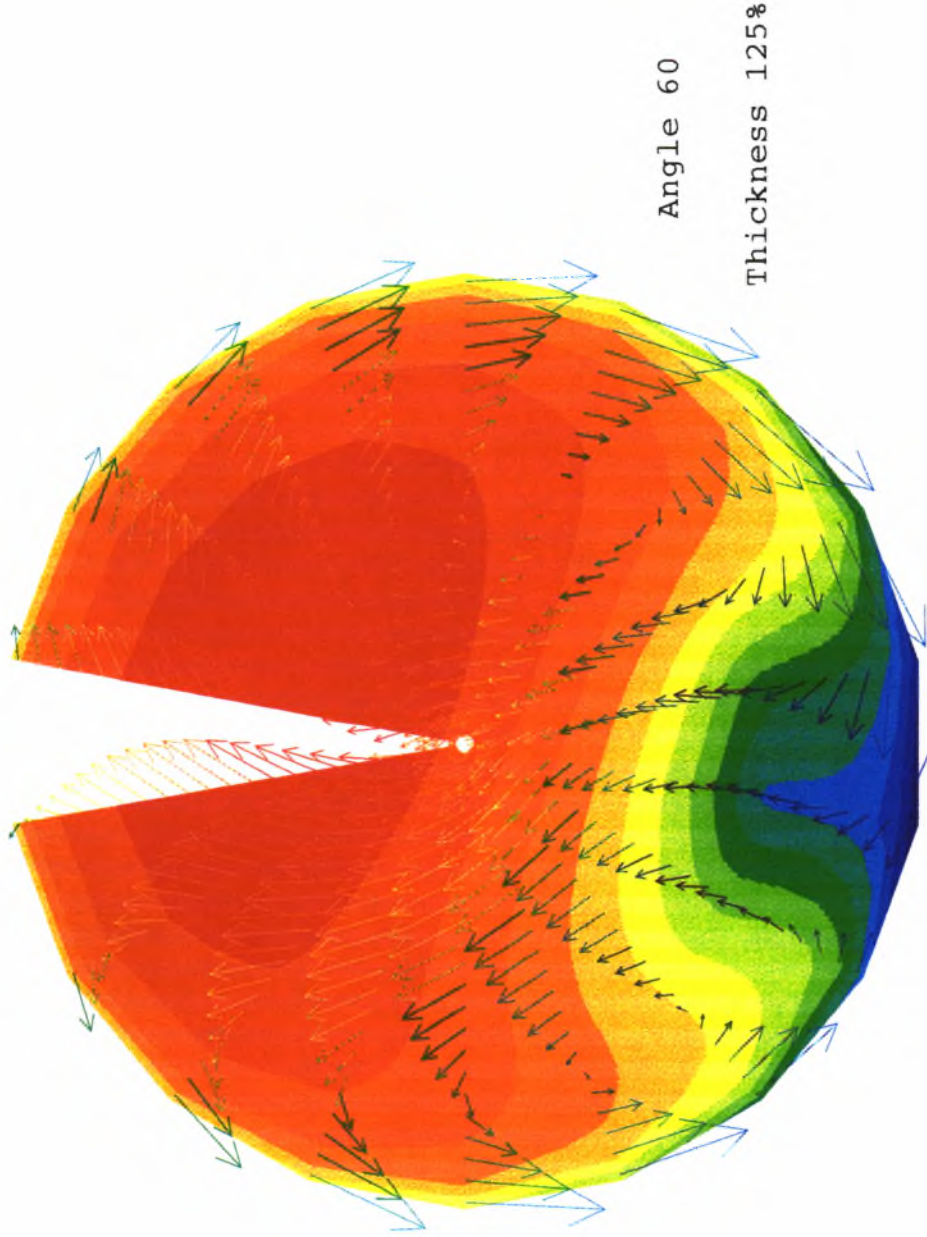
- 2003
- 2037
- 2070
- 2104
- 2137
- 2171
- 2205
- 2238
- 2272
- 2305
- 2339
- 2372
- 2406
- 2439
- 2473



Cross Stream Temperature Field at 20m

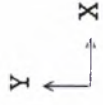


PHOTON



Vector

- 1.4
- 1.9
- 2.3
- 2.8
- 3.3
- 3.8
- 4.2
- 4.7
- 5.2
- 5.7
- 6.1
- 6.6
- 7.1
- 7.6
- 8.1



→ .9

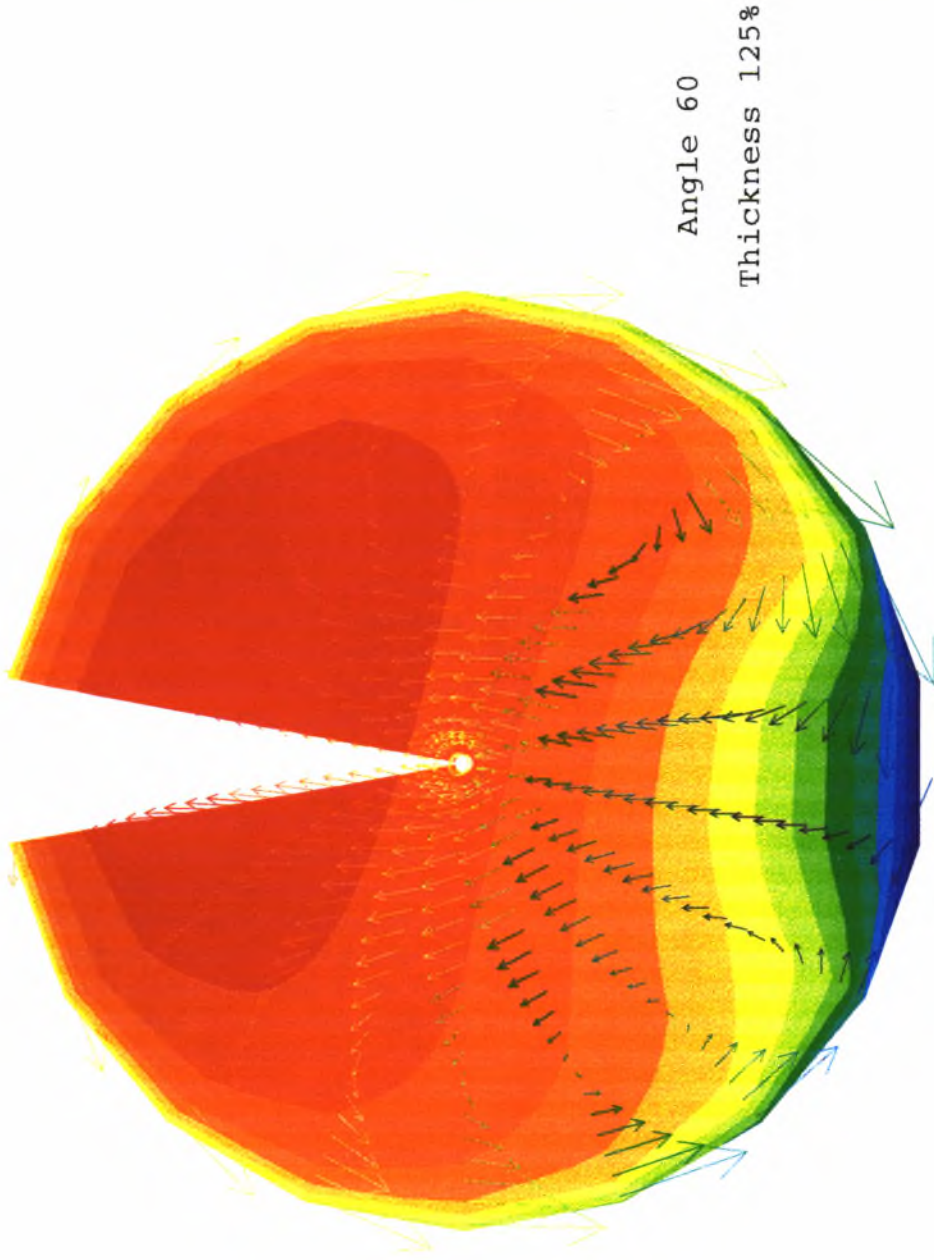
Min: 1.38E+00

Max: 8.06E+00

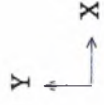
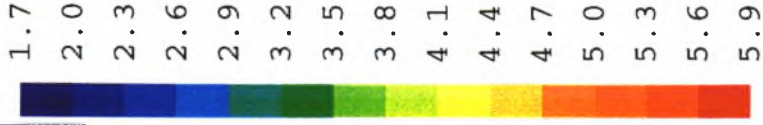


PHOTON

Cross Stream Temperature Field at 30m



Vector



→ .73

Min: 1.66E+00

Max: 5.94E+00

Axial Velocity Contour

Length 15m

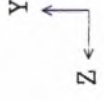


Angle 60

Thickness 125%



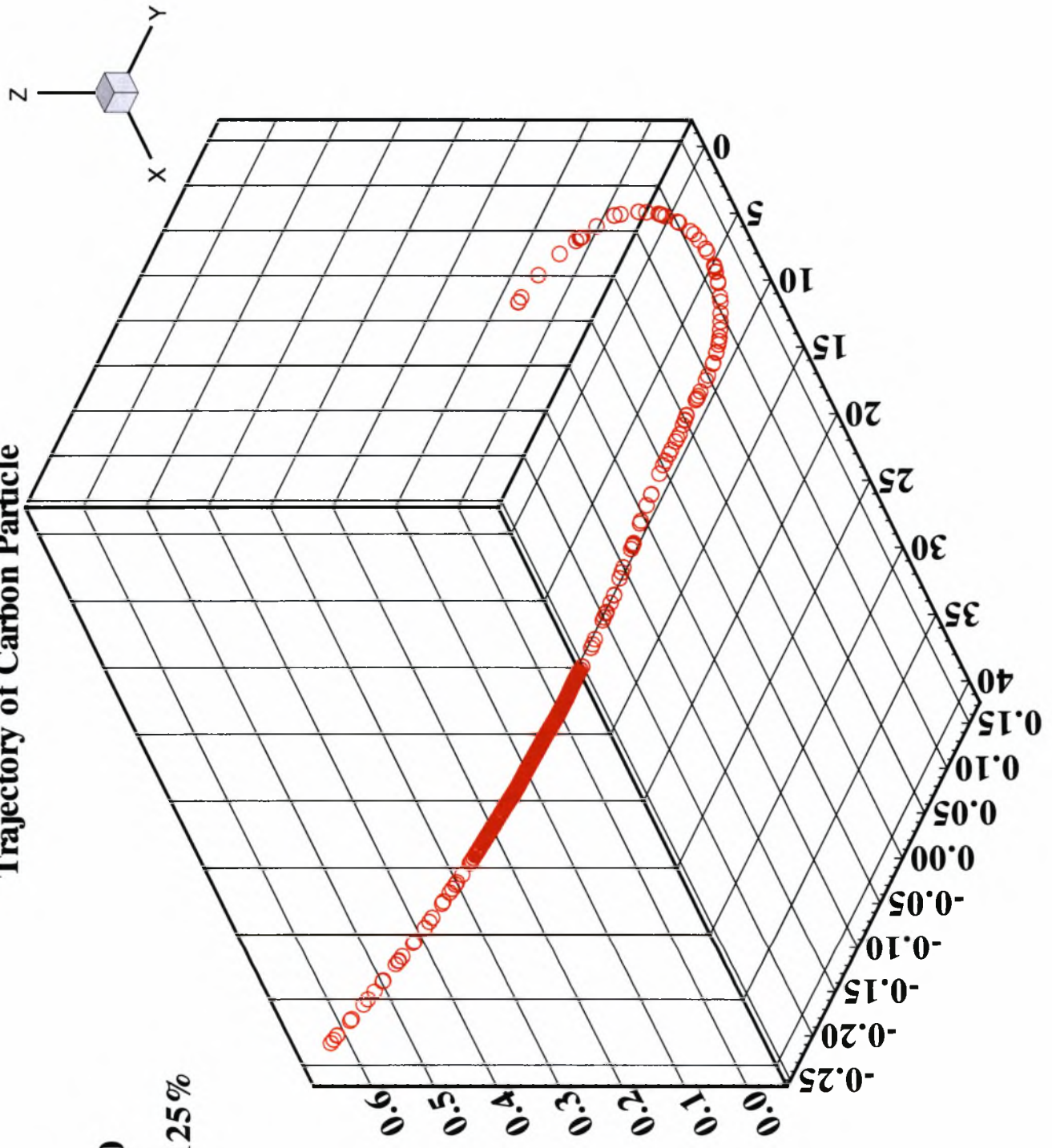
PHOTON



Trajectory of Carbon Particle

Angle 60

Thickness 125%



Αρχικό Μοντέλο Καύσης

Υπολογιστικό Πλέγμα 84 x 24 x 18

Πραγματικές Διαστάσεις 72m μήκος
4.5m διάμετρος

Γωνία στροβιλισμού ως προς της αξονική
διεύθυνση 45⁰

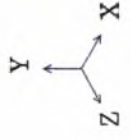
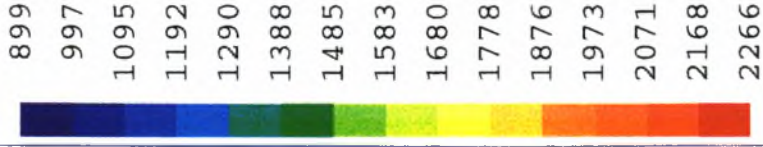
Πάχος της εισόδου του περιδινούμενου
αέρα σε σχέση με το κανονικό 100%



PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field

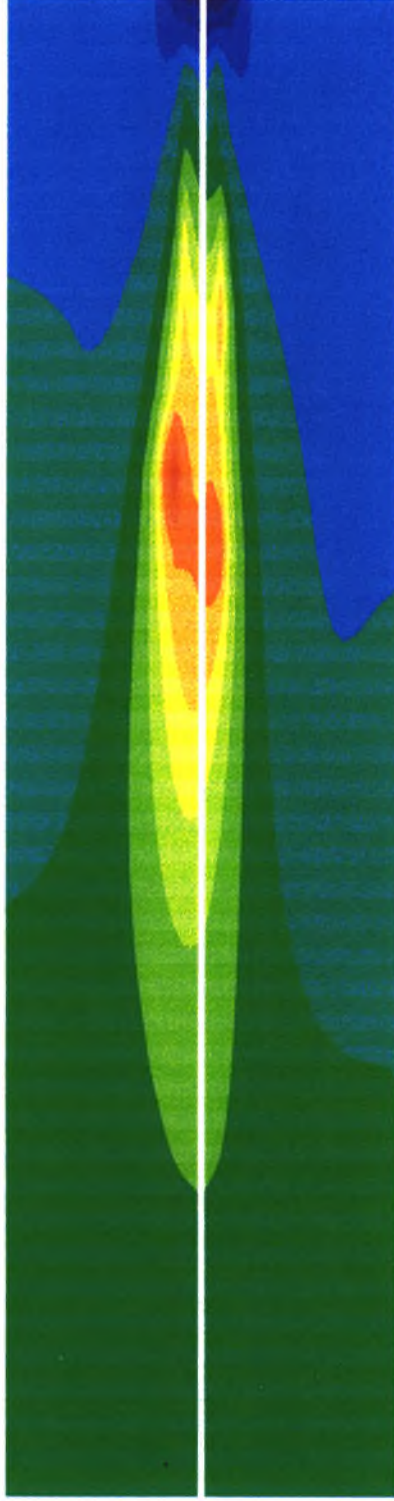
TEMP





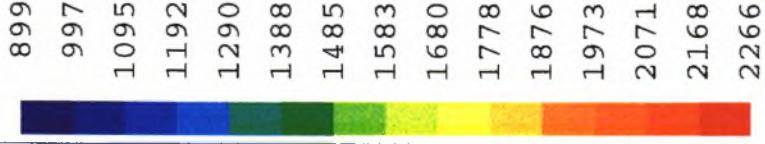
PHOTON

Vertical Diametral Temperature Field



Length 20m

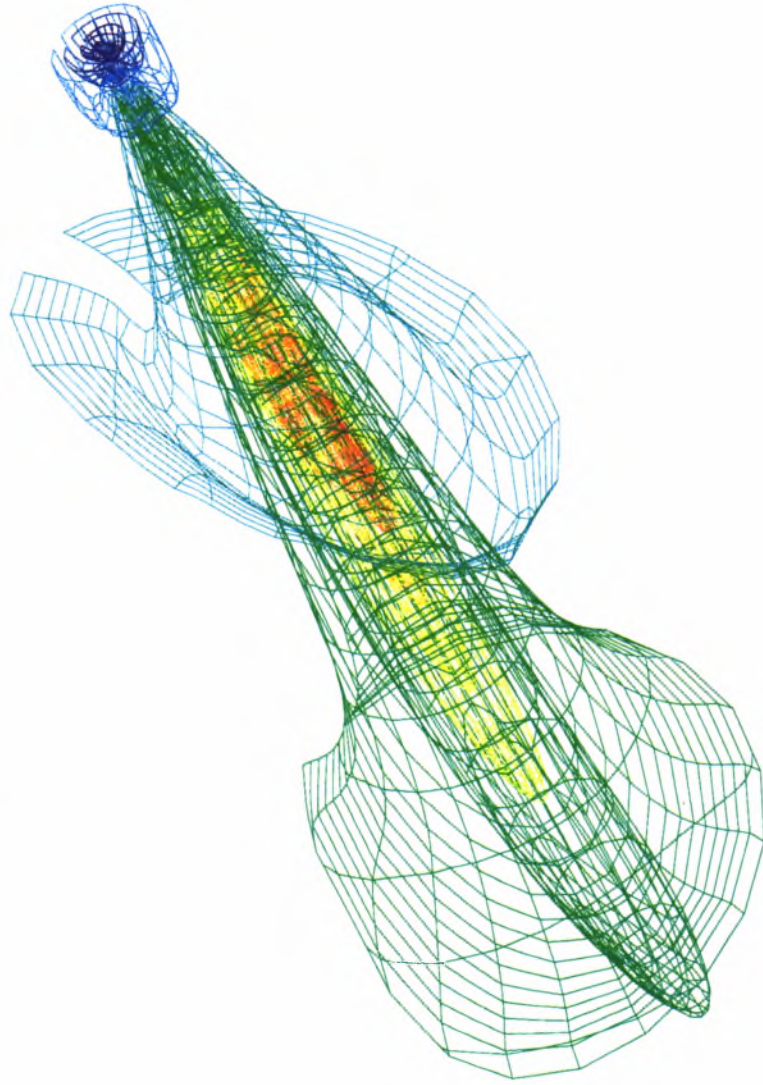
TEMP



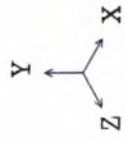
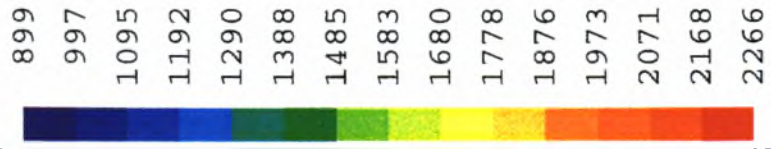


PHOTON

Temperature Isolines



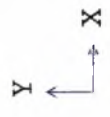
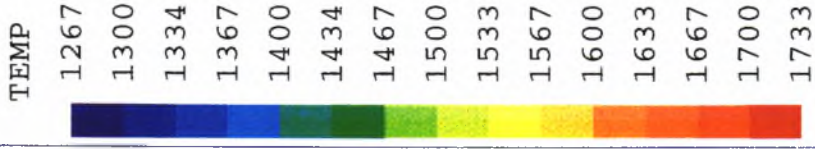
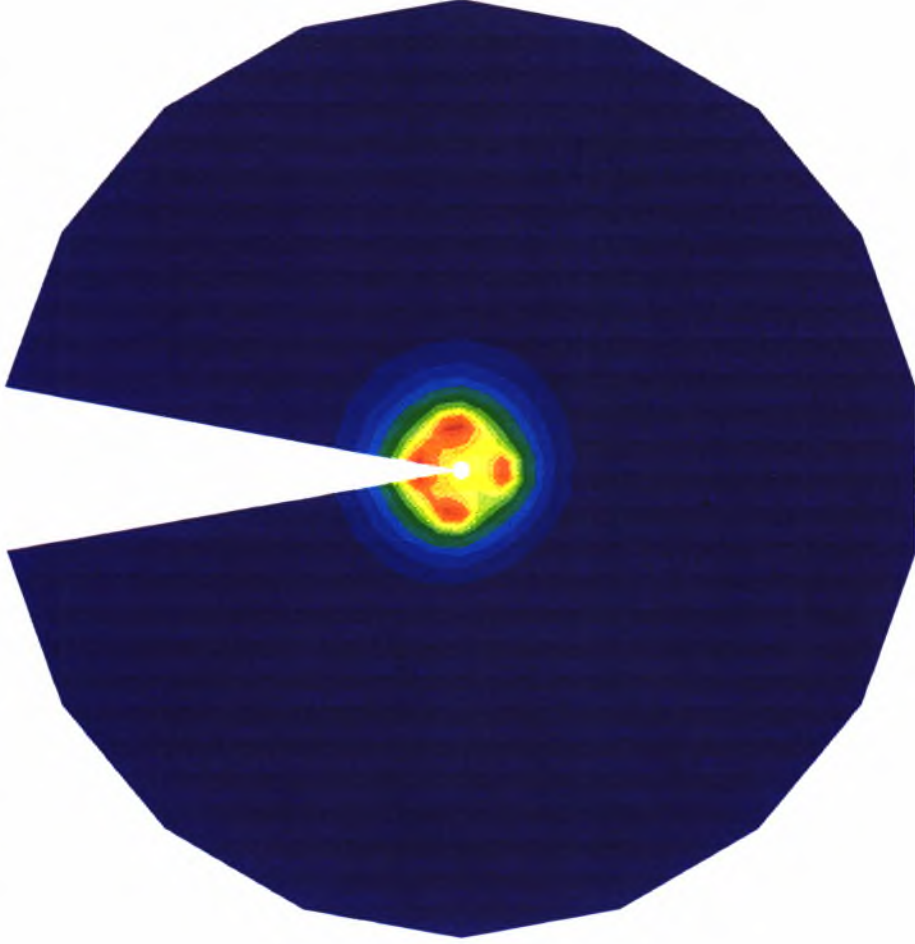
TEMP





PHOTON

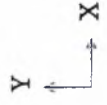
Cross Stream Temperature Field at 4m



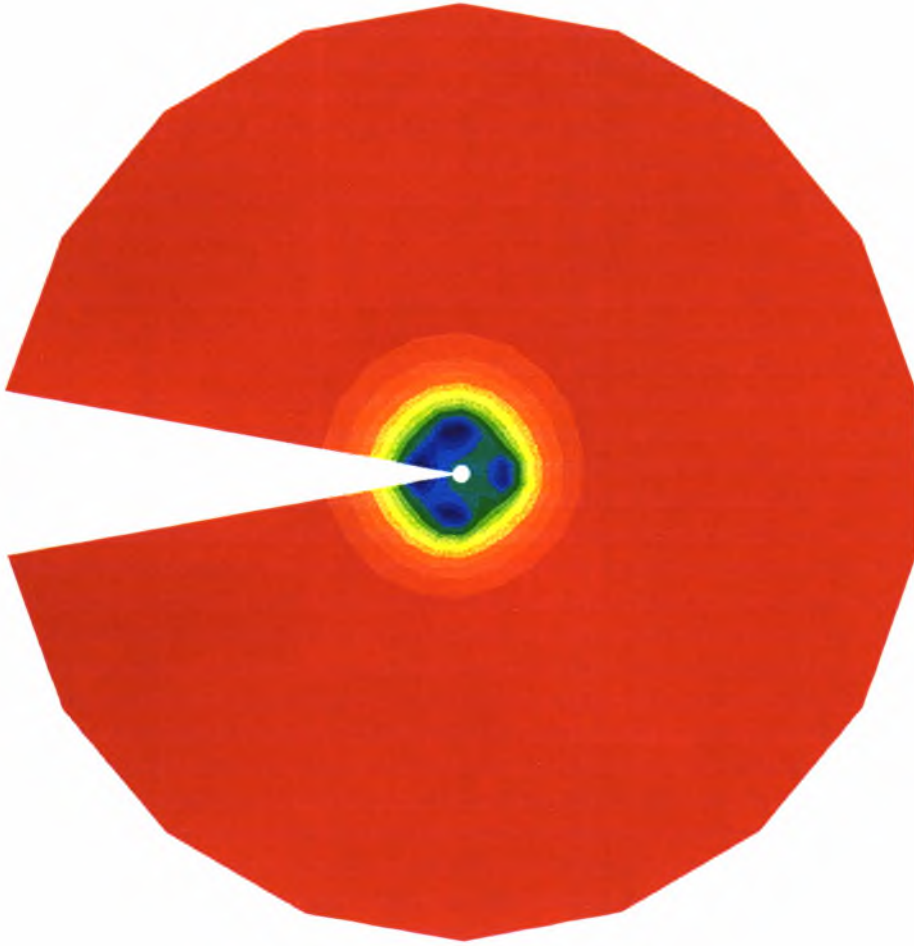


PHOTON

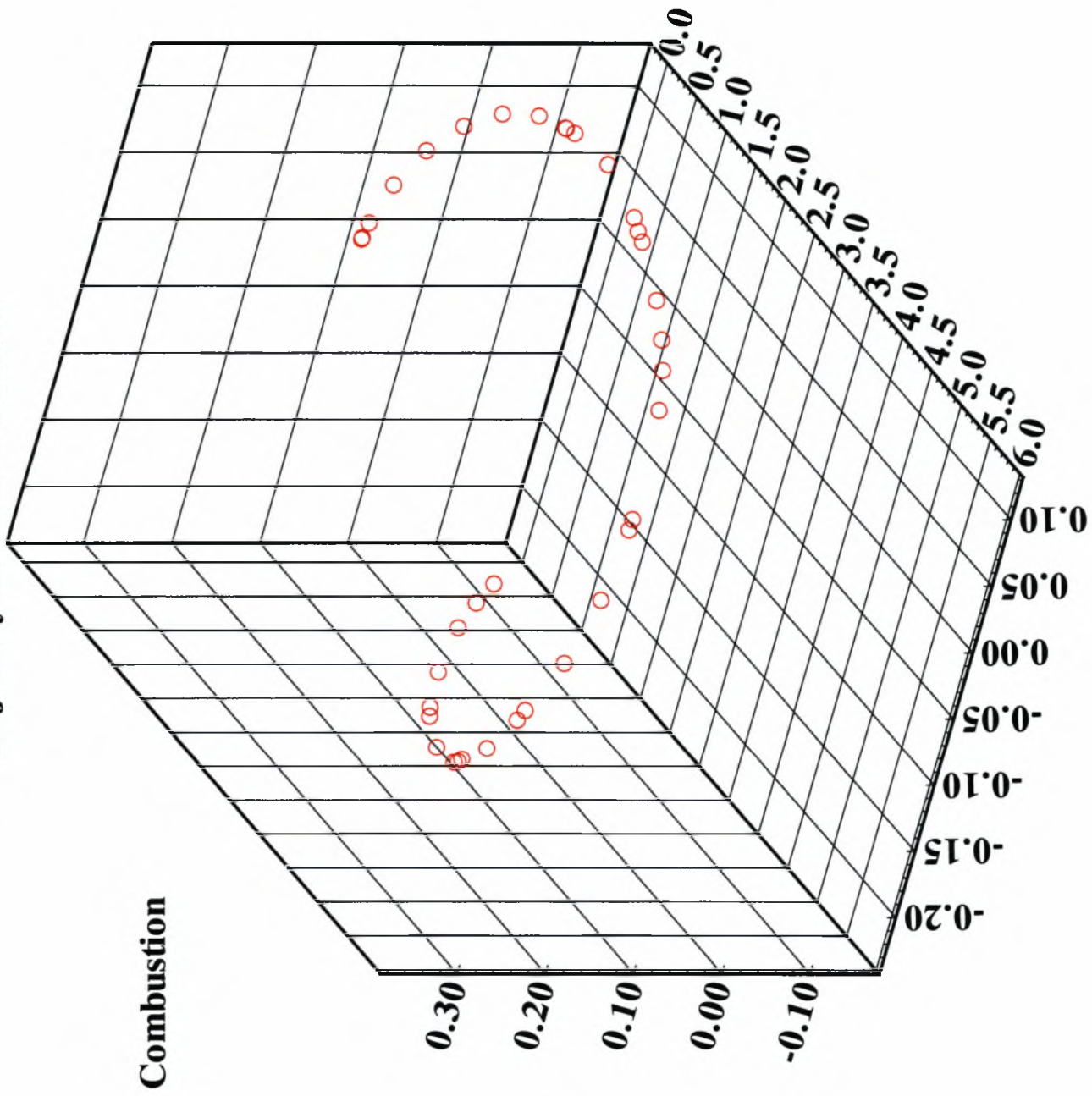
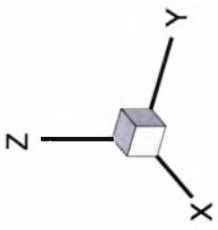
DEN



Cross Stream Density Field at 4m



Trajectory of Carbon Particle



Βιβλιογραφία

- 1) Φεΐδαρος Δ., Γιαννόπουλος Ο., Σαρρής Γ., Βλάχος Ν. Σ. 'Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής DIAN3D: Εγχειρίδιο Χρήσης', Εργ. Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Παν. Θεσσαλίας 1998
- 2) Beer M. & Chigier N. A. 'Combustion Aerodynamics', Applied Science Publishers LTD, London 1974
- 3) Holman P. 'Heat Transfer', 7th Edition, McGraw-Hill 1992
- 4) Weast R. C. 'Handbook of Chemistry and Physics', 61st Edition, Crc Press 1980 - 1981
- 5) Turns St. R. 'An Introduction to Combustion' McGraw-Hill
- 6) Κολυφέτης Ε. Δ. 'Μαθηματική Μοντελοποίηση Προασβεστοποιητή και Φλόγας Κάρβουνου Περιστροφικού Κλιβάνου Βιομηχανίας Τσιμέντου', Διδακτορική Διατριβή, Τμ. Χημικών Μηχανικών Παν. Πατρών 1993
- 7) 'Σημειώσεις για τον Περιστροφικό Κλίβανο Τσιμέντου', ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ
- 8) Anagnostopoulos J. S., Sargianos N. P. and Bergeles G. 'A Computer Code for Pulverised Fuel Combustion in Burners and Boilers', Symeon Publications, Athens 1991
- 9) Smith J. M. & Van Ness H. C. 'Εισαγωγή στη Θερμοδυναμική Τόμος Α - Β', Μετάφραση Δόνη Ε. Γ. & Μπλέρης Γ. Λ., McGraw-Hill 1987
- 10) Himmelblau D. M. 'Βασικές Αρχές και Υπολογισμοί στη Χημική Μηχανική', Μετάφραση Σακελλαρόπουλος Γ. Π., Amundson N. R. Prentice-Hall, Inc Englewood Clifts, New Jersey 1974
- 11) Streeter V. L. & Wylie E. B. 'Μηχανική Ρευστών', Μετάφραση Γ. Π. Τσιμικάλης, 6^η έκδοση, McGraw-Hill
- 12) Πασπαλάς Κ. Γ. 'Μετάδοση Θερμότητας', Σαλονικίδης Δ. Κ. 1993.
- 13) Λάζου Κ. Ε. 'Fortran 77', Λάζου Κ. Ε. 1991
- 14) Παπαιωάννου Α. Θ. 'Μηχανική των Ρευστών Τόμος Ι - ΙΙ', Παπαιωάννου Α. Θ. 1993
- 15) Βλάχος Ν. Σ. 'Σημειώσεις του Μαθήματος Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Ενεργειακή Περιοχή', Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Παν. Θεσσαλίας 1995
- 16) Μποντόζογλου Β. 'Σημειώσεις του Μαθήματος Μετάδοση θερμότητας', Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Παν. Θεσσαλίας 1994
- 17) Φεΐδαρος Δ. 'Μαθηματική Προσομοίωση Διασποράς & Εναπόθεσης Ρύπων', Διπλωματική Εργασία, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Παν. Θεσσαλίας 1997

- 18) Κλείτσα Π. 'Εκτίμηση Παραγωγής και Διασποράς Αερίων Βιομηχανικών Ρύπων στο Αστικό Κέντρο του Βόλου σε Σύγκριση με Μετρούμενες Τιμές', Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Παν. Θεσσαλίας 1997
- 19) Grzegolka K., Wanik A. & Przekwas A. 'Calculation of Pulverized Coal Combustion in Axisymmetrical Furnace', Abstract
- 20) Khodadadi J. M. & Vlachos N. S. 'Experimental and Numerical Study of Confined Coaxial Turbulent Jets', AIAA JOURNAL, Vol. 27, pp. 532-541, 1989
- 21) Khodadadi J. M. & Vlachos N. S. 'Effects of Turbulence Model Constants on Computation of Confined Swirling Flows', AIAA JOURNAL, VOL. 28, pp. 750-752, 1990
- 22) Lockwood F. C., Salooja A. P. & Syed S. A. 'A Prediction for Coal-Fired Furnaces', Combustion and Flame, VOL. 38, pp. 1-15, 1980
- 23) Lockwood F. C. & Salooja A. P. 'The Prediction of Some Pulverized Bituminous Coal Flames in a Furnace', Combustion and Flame, VOL. 54, pp. 23-32, 1983
- 24) Lockwood F. C., Rizvi S. M., Lee G. K. & Whaley H. 'Coal Combustion Model Validation Using Cylindrical Furnace Data', 20th Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 513-522, 1984
- 25) Gibson M. M., Mech M. I. & Morgan B. B. 'Mathematical Model of Combustion of Solid Particles in a Turbulent Stream with Recirculation', Journal Of The Institute Of Fuel, Vol. 517, pp. 518-523, 1970
- 26) Juniper L. A. & Wall T. F. 'Combustion of Particles in a Large Pulverized Brown Coal Flame', Combustion and Flame, Vol. 39, pp. 69-81, 1980
- 27) Moles F. D., Watson D. & Lain P. B. 'The Aerodynamics of the Rotary Cement Kiln', Journal Of The Institute Of Fuel, Vol. 353, pp. 354-362, 1973
- 28) Mullinger P. J. 'Rotary Kiln Firing: The Problems and the Solutions', Abstract
- 29) Chen X. Q. 'Efficient Particle Tracking Algorithm for Two-Phase Flows in Geometries using Curvilinear Coordinates', Numerical Heat Transfer, Part A, VOL. 31, pp. 387-405, 1997
- 30) Vlachos N. S., Mahaffey W. A. & Daley P. L. 'Fundamental Investigation of Duct/ESP Phenomena', Topical Report of Generation Duct Injection Model, US DOE, 1990



