



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής &  
Βελτιστοποίησης

**Βελτιστοποίηση Χωροθέτησης Κλιματιστικών Μονάδων σε  
Υπολογιστικό Κέντρο με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων και  
Λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΕΙΡΗΝΗΣ ΚΑΡΔΑΜΠΙΚΗ

**Επιβλέπων:** Γιαννάκογλου Κυριάκος - Καθηγητής Ε.Μ.Π.

17/07/2020



# Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου, για το χρόνο που αφιέρωσε στη συνεχή καθοδήγηση μου. Επιπλέον, τον ευχαριστώ καθώς οι διαλέξεις του στα αμφιθέατρα κέντρισαν το ενδιαφέρον μου και διεύρυναν τις γνώσεις μου σε επιστημονικό επίπεδο.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω την ερευνητική ομάδα της ΜΠΥΡ&Β για τη συνεχή υποστήριξη της, τη βοήθεια της και το ωραίο κλίμα συνεργασίας που έχει δημιουργήσει. Συγκεκριμένα, θέλω να ευχαριστήσω τη Δρ. Βαρβάρα Ασούτη, τους Υποψήφιους Διδάκτορες Κωνσταντίνο Γκαραγκούνη και Θεμιστοκλή Σκαμάγκη για τη στήριξη και τις συμβουλές τους. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική στην υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την έμπρακτη βοήθεια τους και την ψυχολογική στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Καρδαμπική Ειρήνη, Αθήνα 2020

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Τομέας Ρευστών**  
**Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής**  
**& Βελτιστοποίησης**

**Βελτιστοποίηση Χωροθέτησης Κλιματιστικών Μονάδων σε Υπολογιστικό**  
**Κέντρο με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων και Λογισμικού Υπολογιστικής**  
**Ρευστοδυναμικής**

Διπλωματική Εργασία  
της **Ειρήνης Καρδαμπίκη**

Επιβλέπων : Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ  
Αθήνα, 2020

**Σύνοψη**

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η ρευστοδυναμική ανάλυση και εν συνεχεία, η βελτιστοποίηση της χωροθέτησης του συστήματος κλιματισμού του υπολογιστικού κέντρου της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡ&Β) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Απώτερος σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης θερμοκρασίας του δωματίου. Η ρευστοδυναμική ανάλυση υλοποιείται με τη χρήση του λογισμικού OpenFOAM ενώ η βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των κλιματιστικών διεξάγεται με το λογισμικό EASY, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τους ερευνητές της ΜΠΥΡ&Β.

Στο πρώτο τμήμα της εργασίας, μοντελοποιείται η γεωμετρία του μελετώμενου δωματίου με τη χρήση του λογισμικού SolidWorks, το οποίο παρέχεται από το Εργαστήριο Προσωπικών Υπολογιστών (PCLab) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Στη συνέχεια, παράγονται έξι πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας γύρω από τη γεωμετρία του δωματίου και ελέγχεται η ευαισθησία του πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε πλέγμα επιλύονται οι Reynolds-Averaged Navier-Stokes εξισώσεις, μέσω του λογισμικού OpenFOAM, θεωρώντας χρονικά μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού και επιλέγοντας το μοντέλο τύρβης k-ε. Με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους και την επίτευξη της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα, επιλέγεται και παρουσιάζεται το τελικό πλέγμα. Το εν λόγω πλέγμα αξιοποιείται στη βελτιστοποίηση.

Στο δεύτερο τμήμα της εργασίας, υλοποιείται η βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των κλιματιστικών συσκευών του υπολογιστικού δωματίου. Αρχικά αναλύεται η ροή και τα χαρακτηριστικά της αρχικής διάταξης των κλιματιστικών. Έπειτα μελετώνται 6 βασικές πιθανές διατάξεις των κλιματιστικών στο χώρο και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τους, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση τους. Γίνεται επιλογή των τριών διατάξεων με τα καλύτερα χαρακτηριστικά και για κάθε μία εξ' αυτών πραγματοποιείται ένας κύκλος βελτιστοποίησης με τη χρήση του λογισμικού EASY. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η διαδικασία της βελτιστοποίησης, αναπτύσσεται κώδικας ο οποίος επιτρέπει τη γραμμική μετατόπιση και τη στροφή των κλιματιστικών γύρω από το κέντρο βάρους τους. Ο εν λόγω κώδικας προγραμματίστηκε σε γλώσσα Fortran 77.

Τέλος, η διπλωματική εργασία κλείνει με την παράθεση και το σχολιασμό των βέλτιστων χωροθετήσεων των κλιματιστικών σύμφωνα με τα αποτελέσματα των κύκλων βελτιστοποίησης.

**National Technical University of Athens**  
**School of Mechanical Engineering**  
**Fluids Section**  
**Parallel CFD & Optimization Unit**

**Optimization of the spatial allocation of the cooling system of a Computational  
Center with Evolutionary Algorithms and CFD software**

Diploma Thesis  
by **Kardampiki Eirini**

Supervisor: K. C. Giannakoglou, Professor NTUA  
Athens, 2020

**Abstract**

The current thesis deals with the fluid dynamic analysis and the optimization of placement of the cooling system of the computational room of Parallel CFD & Optimization Unit (PCOpt) of the Fluid Department of the School of Mechanical Engineering of National University of Athens (NTUA). The aim of this study is the minimization of the average temperature of the room. The fluid dynamic analysis is carried out with the use of OpenFOAM, while the optimization of the location of the air conditions is conducted with EASY, an evolutionary algorithm based optimization platform developed by the research group of PCOpt.

Initially, the geometry of the room, including the racks with the computational nodes and the available air-conditioning (A/C) units is modeled with the use of SolidWorks software, the use of which is available at the Personal Computer Laboratory (PCLab) of the School of Mechanical Engineering. In total, 6 meshes of different density are generated. For each mesh, the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved using the OpenFOAM software. The turbulent phenomena are simulated with the  $k-\varepsilon$  model. The final mesh is selected so that the solution becomes independent of the mesh cells.

In the next phase of this diploma thesis, the optimization of the location of the A/C units in the computational room is performed. Firstly, the results of the initial flow, derived from the initial position of the air conditions, are presented. Then, 6 possible positions of the air conditions are analyzed. The results of this study are interpreted and, finally, the best three

possible solutions are selected for optimization. To support the optimization, a Fortran 77 program which enables the A/C units to move and rotate around their center is developed.

To conclude, the results of the three optimization cycles are presented and discussed in this diploma thesis.

# Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχήμα 2.3.1: Διάγραμμα των συνιστωσών της ταχύτητας $u$ κατά Reynolds (Πηγή: McDonough,2007).....	22
Σχήμα 2.4.1: Κατανομή της ταχύτητας κοντά στο στερεό τοίχωμα πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής (Πηγή: McDonough,2007).....	25
Σχήμα 3.1.1: Θέση υπερυπολογιστών (clusters) στο υπολογιστικό δωμάτιο .....	28
Σχήμα 3.1.2: Θέση κλιματιστικών συσκευών στο υπολογιστικό δωμάτιο .....	29
Σχήμα 3.1.3: Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των κλιματιστικών, των clusters και των υπολογιστών του δωματίου σε κάτοψη.....	30
Σχήμα 3.1.4: Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των κλιματιστικών, των υπερυπολογιστών και των επίπλων του υπολογιστικού δωματίου.....	31
Σχήμα 3.1.5: Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των υπολογιστών και των κλιματιστικών του υπολογιστικού δωματίου .....	31
Σχήμα 3.1.6: Απεικόνιση των σχετικών αποστάσεων μεταξύ των υπολογιστών πάνω στο ράφι .....	32
Σχήμα 3.1.7: Ορθογώνια τρίγωνα στερεολιθογραφίας.....	32
Σχήμα 3.2.1: Πλέγμα αρχικού ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (blockMesh) .....	33
Σχήμα 3.2.2: Υπολογιστικό δωμάτιο ως υποσύνολο του αρχικού ορθογώνιου παραλληλόγραμμου πλέγματος .....	34
Σχήμα 3.2.3.: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό $c$ μετά την ολοκλήρωση της διαίρεσης και της αφαίρεσης κελιών (castellation) .....	35



Σχήμα 3.2.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας προσκόλλησης των κορυφών κελιών στη γεωμετρία (Snapping) .....	36
Σχήμα 3.2.5: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό c μετά την ολοκλήρωση της προσκόλλησης των κορυφών κελιών στη γεωμετρία (Snapping) .....	36
Σχήμα 3.2.6: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό c μετά την ολοκλήρωση της προσθήκης πέντε στιβάδων κελιών (Adding Layers) .....	37
Σχήμα 3.3.1: Διάγραμμα ευαισθησίας πλέγματος .....	39
Σχήμα 3.3.2: Πλέγμα στο επίπεδο $z=1.30\text{m}$ .....	40
Σχήμα 3.3.3: Πλέγμα γύρω από τα clusters στο επίπεδο $z=1.30\text{m}$ .....	40
Σχήμα 3.3.4: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό c στο επίπεδο $z=1.30\text{m}$ .....	41
Σχήμα 3.3.5: Πλέγμα στο επίπεδο $z=1.90\text{m}$ .....	41
Σχήμα 3.3.6: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό a στο επίπεδο $z=1.90\text{m}$ .....	42
Σχήμα 3.3.7: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό b στο επίπεδο $z=1.90\text{m}$ .....	42
Σχήμα 3.3.8: Πλέγμα γύρω από τον υπολογιστή d στο επίπεδο $z=1.90\text{m}$ .....	43
Σχήμα 4.2.1: Διάρθρωση προβλήματος στο περιβάλλον OpenFOAM .....	46
Σχήμα 5.3.1: Διάγραμμα ροής λογισμικού αξιολόγησης εξελικτικού αλγορίθμου.....	61
Σχήμα 5.3.2: Δομή αρχείου στερεολιθογραφίας .....	62
Σχήμα 5.3.3: (αριστερά) Αρχική θέση κλιματιστικού a, (δεξιά) Μεταφορά του κέντρου βάρους του κλιματιστικού a στην αρχή των αξόνων.....	64
Σχήμα 5.3.4: (αριστερά) Στροφή του κλιματιστικού a κατά $20^\circ$ γύρω από τον άξονα y, (δεξιά) Επιστροφή του κλιματιστικού a στην αρχική του θέση.....	64

Σχήμα 5.3.5: (αριστερά) Ορισμός αρνητική φοράς γωνίας $\theta$ , (δεξιά) Ανάλυση των συνιστωσών της ταχύτητας για περιστροφή των κλιματιστικών a κατά $-20^\circ$ , b κατά $20^\circ$ και c κατά $20^\circ$ .....	65
Σχήμα 6.1.1: (αριστερά) 1 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 2 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών ....	68
Σχήμα 6.1.2: (αριστερά) 3 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 4 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών....	69
Σχήμα 6.1.3: (αριστερά) 5 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 6 <sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών....	69
Σχήμα 6.1.4: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα .....	70
Σχήμα 6.1.5: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα .....	71
Σχήμα 6.1.6: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα .....	71
Σχήμα 6.1.7: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της αρχικής διάταξης .....	72
Σχήμα 6.1.8: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 1 <sup>ης</sup> διάταξης.....	73
Σχήμα 6.1.9: Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 1 <sup>ης</sup> διάταξης.....	74
Σχήμα 6.1.10: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 1 <sup>ης</sup> διάταξης.....	75
Σχήμα 6.1.11: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα.....	75
Σχήμα 6.1.12: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα .....	76
Σχήμα 6.1.13: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα .....	76

Σχήμα 6.1.14: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 .....	77
Σχήμα 6.1.15: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 3 <sup>ης</sup> διάταξης.....	78
Σχήμα 6.1.16: Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 3 <sup>ης</sup> διάταξης.....	79
Σχήμα 6.1.17: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 3 <sup>ης</sup> διάταξης.....	80
Σχήμα 6.1.18: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα.....	80
Σχήμα 6.1.19: Πεδίο της ταχύτητας και θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα .....	81
Σχήμα 6.1.20: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα .....	81
Σχήμα 6.1.21: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 .....	82
Σχήμα 6.1.22: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 4 <sup>ης</sup> διάταξης.....	83
Σχήμα 6.1.23: Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 4 <sup>ης</sup> διάταξης.....	84
Σχήμα 6.1.24: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 4 <sup>ης</sup> διάταξης.....	85
Σχήμα 6.1.25: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα.....	85
Σχήμα 6.1.26: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα .....	86
Σχήμα 6.1.27: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα .....	86

Σχήμα 6.1.28: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 .....87

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 3.3.1: Συγκριτικός πίνακας πλεγμάτων.....39

Πίνακας 6.1: Οριακές συνθήκες μελετώμενου προβλήματος .....67

Πίνακας 6.2: Βασικές ρυθμίσεις εξελικτικού αλγορίθμου EASY .....68

Πίνακας 6.1.1: Αποτελέσματα μελέτης των έξι βασικών διατάξεων .....69

Πίνακας 6.1.2: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 1<sup>ης</sup> διάταξης ....73

Πίνακας 6.1.3: Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 .....74

Πίνακας 6.1.4: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1.....77

Πίνακας 6.1.5: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 3<sup>ης</sup> διάταξης ....78

Πίνακας 6.1.6: Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 .....79

Πίνακας 6.1.7: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3.....82

Πίνακας 6.1.8: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 4<sup>ης</sup> διάταξης ....83

Πίνακας 6.1.9: Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 .....84

Πίνακας 6.1.10: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4.....87

Πίνακας 6.1.11: Συγκεντρωτικά στοιχεία των βελτιστοποιημένων διατάξεων .....87

# Περιεχόμενα

---

<b>Ευχαριστίες .....</b>	<b>iii</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>viii</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>xii</b>
<b>Περιεχόμενα .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> Εισαγωγή .....</b>	<b>15</b>
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	15
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	16
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> Εξισώσεις κίνησης των ρευστών.....</b>	<b>17</b>
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Εξισώσεις Navier-Stokes .....	18
2.3 Εξισώσεις Reynolds–Averaged Navier-Stokes.....	21
2.4 Μοντέλα τύρβης .....	23
2.4.1 Μοντέλο k-ε.....	24
2.4.2 Συναρτήσεις τοίχου (Wall functions).....	25
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> Γένεση υπολογιστικού πλέγματος .....</b>	<b>28</b>
3.1 Περιγραφή φυσικού προβλήματος .....	28
3.2 Γένεση πλέγματος.....	33
3.3 Ανάλυση ευαισθησίας και επιλογή πλέγματος.....	38
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> Λογισμικό OpenFOAM.....</b>	<b>44</b>
4.1 Περιγραφή λογισμικού OpenFOAM .....	44
4.2 Δημιουργία προσομοίωσης στο OpenFOAM .....	46

4.3	Αλγόριθμος SIMPLE .....	50
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> Βελτιστοποίηση με χρήση του λογισμικού EASY .....</b>		<b>53</b>
5.1	Εισαγωγή στις μεθόδους βελτιστοποίησης .....	53
5.1.1	Σημαντικές έννοιες για τη βελτιστοποίηση .....	53
5.2	Εξελκτικοί Αλγόριθμοι.....	56
5.2.1	Περιγραφή ενός (μ,λ) Εξελκτικού Αλγόριθμου .....	57
5.3	Λογισμικό αξιολόγησης.....	60
5.3.1	Μετακίνηση των κλιματιστικών .....	62
5.3.2	Έλεγχος εγκυρότητας θέσεων κλιματιστικών .....	65
5.3.3	Στροφή διανύσματος ταχύτητας στην είσοδο των κλιματιστικών.....	65
<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> Αποτελέσματα - Συμπεράσματα.....</b>		<b>67</b>
6.1	Αποτελέσματα .....	68
6.2	Ανακεφαλαίωση & Συμπεράσματα .....	88

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

---

### 1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης των τριών κλιματιστικών συσκευών του υπολογιστικού κέντρου της ΜΠΥΡ&Β της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Βασικό στόχο της μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη της μικρότερης δυνατής μέσης θερμοκρασίας στο χώρο του δωματίου. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων επεξεργαστών, οι υψηλές θερμοκρασίες (75-80°C) επιφέρουν βράχυνση της διάρκειας ζωής των επεξεργαστών. Σε ιδιαίτερα δυσμενείς θερμοκρασιακές συνθήκες, οι επεξεργαστές διακόπτουν αυτόματα τη λειτουργία τους έτσι ώστε να μην καταστραφούν.

Οι θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται εντός του δωματίου καθορίζονται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι: η θέση των κλιματιστικών στο χώρο, η θερμοδυναμική συμπεριφορά του αέρα, η μόνωση του δωματίου, το πλήθος και η ονομαστική ισχύς των επεξεργαστών που βρίσκονται σε λειτουργία. Η μελέτη εστιάζει την προσοχή της στη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η χωροθέτηση των κλιματιστικών στη μέση θερμοκρασία του δωματίου. Για το σκοπό αυτό, θεωρούνται σταθερές όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος, όπως η θέση των επίπλων στο χώρο και η θερμική ισχύς που παράγει κάθε υπολογιστής και υπερυπολογιστής.

Κατά τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο ελεύθερο υπολογιστικό πρόγραμμα OpenFOAM ενώ για τον εντοπισμό της βέλτιστης χωροθέτησης των κλιματιστικών αξιοποιήθηκε το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τους ερευνητές της ΜΠΥΡ&Β.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

- ✓ Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις εξισώσεις ροής, Navier-Stokes, που περιγράφουν το μελετώμενο ρευστοδυναμικό πρόβλημα. Παρουσιάζονται οι Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) εξισώσεις, οι οποίες επιλύονται κατά την προσομοίωση. Γίνεται αναφορά στη μοντελοποίηση της τύρβης και ιδιαίτερα στο μοντέλο  $k-\epsilon$ , το οποίο χρησιμοποιείται στη διπλωματική αυτή εργασία.
- ✓ Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωμετρία του υπολογιστικού δωματίου καθώς και η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος εντός αυτού. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις βασικές διαστάσεις των επίπλων, των κλιματιστικών, των υπολογιστών και των υπερυπολογιστών του δωματίου. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος με τη χρήση της εφαρμογής snappyHexMesh του OpenFOAM. Πραγματοποιώντας ανάλυση ευαισθησίας του πλέγματος, επιλέγεται το τελικό πλέγμα και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του.
- ✓ Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης του προβλήματος (case) στο λογισμικό OpenFOAM. Γίνεται αναφορά τόσο στις οριακές συνθήκες του προβλήματος όσο και στις ρυθμίσεις του λογισμικού. Συμπληρωματικά, αναλύεται ο αλγόριθμος SIMPLE, ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση της ροής αέρα στο δωμάτιο.
- ✓ Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται η κεντρική ιδέα και η δομή των εξελκτικών αλγόριθμων, εστιάζοντας στον αλγόριθμο EASY. Απαριθμούνται και επεξηγούνται οι παράμετροι ρύθμισης του λογισμικού EASY. Επιπλέον, γίνεται σύντομη παρουσίαση των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης.
- ✓ Στο έκτο κεφάλαιο, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του κλιματισμού του υπολογιστικού κέντρου. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της μελέτης καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.



# Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

## Εξισώσεις κίνησης των ρευστών

---

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του αέρα εντός του δωματίου. Παράλληλα γίνεται αναφορά στις σταθμισμένες κατά Reynolds Navier-Stokes εξισώσεις. Τέλος, περιγράφεται η λειτουργία των μοντέλων τύρβης δίνοντας έμφαση στο μοντέλο k-ε, το οποίο χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία.

### 2.1 Εισαγωγή

Η μηχανική των ρευστών είναι ο κλάδος της μηχανικής ο οποίος εξετάζει την κίνηση των ρευστών σωμάτων και τα αίτια που την προκαλούν. Για τη μελέτη των ρευστών εφαρμόζονται εξισώσεις που υπαγορεύονται από την κλασική μηχανική και τους νόμους της φυσικής. Απώτερος σκοπός αυτής της μελέτης είναι η απόκτηση πληροφοριών για το πεδίο σημαντικών ποσοτήτων όπως η ταχύτητα, η πίεση και η θερμοκρασία. Οι ροές μελετώνται με την εφαρμογή των νόμων διατήρησης, των υλικών και των καταστατικών εξισώσεων. Οι θεμελιώδεις αρχές διατήρησης αφορούν τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Οι υλικές εξισώσεις συνδέουν τη συμπεριφορά του υλικού με τα μηχανικά μεγέθη ενώ οι εξισώσεις κατάστασης με τα θερμικά μεγέθη [5].

Οι εξισώσεις της ρευστομηχανικής εξειδικεύονται ανάλογα με τη φύση της ροής και του ρέοντος μέσου. Για παράδειγμα, σε ροές ασυμπίεστου μη-συνεκτικού ρευστού εφαρμόζεται η εξίσωση Bernoulli, η οποία δημοσιεύτηκε το 1732 από το μαθηματικό Daniel Bernoulli. Οι γενικές εξισώσεις κίνησης μη-συνεκτικού ρευστού και η γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας εκφράζονται μέσω των εξισώσεων Euler. Οι εξισώσεις Navier-Stokes αποτελούν την επέκταση των εξισώσεων Euler καθώς ενσωματώνουν την επίδραση της συνεκτικότητας και της τύρβης της ροής, αν αυτή υπάρχει.

## 2.2 Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes θεμελιώνουν τη θεωρία συνεχούς μέσου για το νευτόνιο ρευστό. Με τον όρο νευτόνιο ρευστό δηλώνεται το ρευστό του οποίου οι διατμητικές τάσεις, λόγω συνεκτικότητας της ροής του, μεταβάλλονται γραμμικά με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης σε κάθε σημείο του. Το νευτόνιο ρευστό αποτελεί το πιο απλό μοντέλο ρευστού [22]. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα συνήθη ρευστά όπως ο αέρας, το λάδι και το νερό. Οι εξισώσεις ύλης οι οποίες χαρακτηρίζουν τα νευτόνια ρευστά είναι οι εξής:

$$\vec{\sigma} = -p\vec{I} + \vec{\tau} = -\begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] + \lambda (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{I} \quad (2.2)$$

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

όπου

- $\vec{\sigma}$  είναι ο τανυστής ορθών τάσεων
- $p$  είναι η πίεση
- $\vec{I}$  είναι ο μοναδιαίος πίνακας
- $\vec{\tau}$  είναι ο τανυστής διατμητικών τάσεων
- $\mu$  είναι ο δυναμικός συντελεστής συνεκτικότητας
- $\vec{u}$  είναι το διάνυσμα της ταχύτητας
- $\lambda$  είναι το ιξώδες όγκου

Το ιξώδες του όγκου συνήθως υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (2.4)$$

Η αρχή διατήρησης της μάζας διατυπώνεται με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.5)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού.

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής, στη γενική μορφή της, εφαρμόζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (2.6)$$

όπου  $\vec{f}$  είναι το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων (π.χ. δυνάμεις βαρύτητας, φυγόκεντρες δυνάμεις) ανά μονάδα μάζας. Στη συγκεκριμένη εργασία, το διάνυσμα  $\vec{f}$  παραλείπεται καθώς δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις.

Η γενική μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας ορίζεται ως:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} E) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (-p \vec{u} + \vec{\tau} \cdot \vec{u}) + \rho \vec{u} \cdot \vec{f} \quad (2.7)$$

$$E = e + \frac{1}{2} |\vec{u}|^2 \quad (2.8)$$

$$\vec{\varphi} = (\vec{\tau} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (2.9)$$

όπου

- $E$  είναι η ολική ενέργεια
- $e$  είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας
- $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία
- $\varphi$  είναι η συνάρτηση διάχυσης ή καταστροφής . Εκφράζει το έργο για την υπερνίκηση των δυνάμεων λόγω ιξώδους, το οποίο μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια.
- $k$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγής του ρευστού

Η εξίσωση της ενέργειας 2.7 προκύπτει με την υπόθεση ότι δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Ο όρος  $-k\nabla T$ , ο οποίος ενσωματώνεται στην εξίσωση της ενέργειας, εκφράζει τον νόμο Fourier [4].

Με την παραδοχή ότι η ροή είναι ασυμπίεστη και σταθερή στο πεδίο του χρόνου, οι εξισώσεις γράφονται στη μορφή:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.10)$$

$$\rho \vec{u} \cdot \nabla (\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu \left( \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) \right) \quad (2.11)$$

$$\rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.12)$$

όπου  $C_p$  είναι ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση.

Η εξίσωση της ορμής εκφράζει το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, ο οποίος δηλώνει ότι η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε κάθε σώμα ισούται με το γινόμενο της μάζας του σώματος και της επιτάχυνσης του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σώμα έχει αντικατασταθεί από ένα σωματίδιο του ρευστού, η μάζα από την πυκνότητα του ρευστού, η επιτάχυνση από τον όρο συναγωγής του ρευστού  $\vec{u} \cdot \nabla (\vec{u})$  και οι δυνάμεις του σώματος από τους όρους που βρίσκονται στο δεξί μέλος της εξίσωσης 2.11. Πιο αναλυτικά, η δύναμη  $\nabla p$  εκφράζει την τάση των μορίων του ρευστού να κινούνται από περιοχές υψηλής προς περιοχές χαμηλής πίεσης. Η δύναμη  $\nabla \cdot \left( \mu \left( \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T \right) \right)$  προκύπτει από την τριβή μεταξύ των στρωμάτων (layers) με τη μορφή των οποίων ρέει το ρευστό. Για αυτόν το λόγο, συχνά, ονομάζεται ως όρος ιξώδους ή διάχυσης.

Στις ασυμπίεστες ροές, δεν υπάρχουν εξισώσεις κατάστασης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η εξίσωση της μηχανικής ενέργειας δεν «αλληλεπιδρά» με τις υπόλοιπες εξισώσεις. Συνεπώς, λύνεται πρώτα το πεδίο της ταχύτητας και της πίεσης με την ικανοποίηση των εξισώσεων 2.10 και 2.11 ενώ, στη συνέχεια, επιλύεται ξεχωριστά το πεδίο της θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.12.

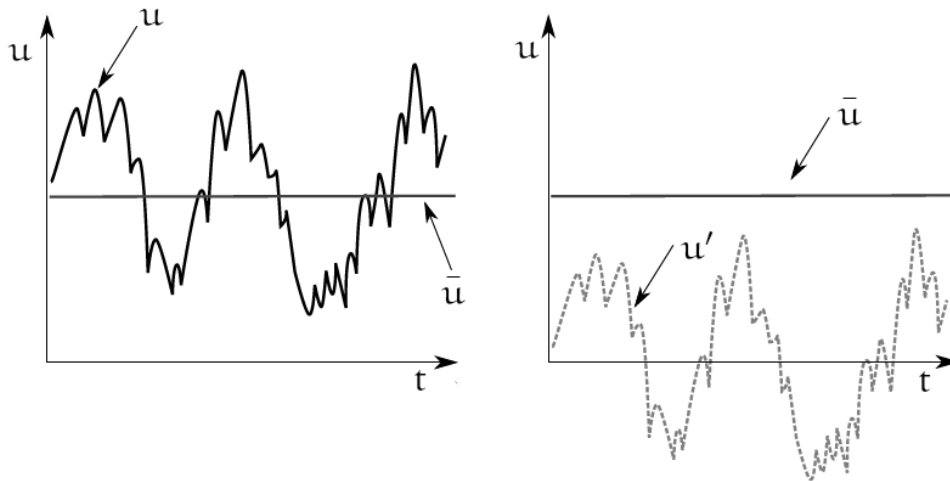
## 2.3 Εξισώσεις Reynolds–Averaged Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes, όπως παρουσιάστηκαν, είναι μη-γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης και μοντελοποιούν στρωτές και τυρβώδεις ροές. Στη συγκεκριμένη μελέτη, η ροή είναι πλήρως τυρβώδης. Μια τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από ακανόνιστες διακυμάνσεις της πίεσης και της ταχύτητας στο πεδίο του χώρου και του χρόνου. Οι αταξίες στο πεδίο των ταχυτήτων δημιουργούν χωρικές δομές που ονομάζονται μικροδίνες ή μεγάλες δίνες ανάλογα με την έκταση και την ένταση τους. Για να επιλυθεί μια τυρβώδης ροή με την άμεση αριθμητική επίλυση (Direct Numerical Solution, DNS) των εξισώσεων Navier-Stokes απαιτείται μεγάλη πυκνότητα υπολογιστικού πλέγματος και πολύ μικρά χρονικά βήματα [24]. Συνεπώς, το υπολογιστικό κόστος μιας τέτοιας εφαρμογής είναι τεράστιο, γεγονός που την καθιστά σχεδόν ανέφικτη.

Προς την κατεύθυνση της δραστηκής μείωσης του υπολογιστικού κόστους, χρησιμοποιούνται συνήθως οι εξισώσεις Navier-Stokes μετασχηματισμένες/σταθμισμένες κατά Reynolds (RANS). Οι εξισώσεις προτάθηκαν από τον Reynolds, το 1895. Η βασική ιδέα είναι ότι τα ροϊκά μεγέθη, εκφράζονται ως συνάρτηση μιας μέσης χρονικά τιμής και μιας διακύμανσης [28]. Εξ ορισμού ισχύει ότι η μέση τιμή της διακύμανσης είναι ίση με το μηδέν.

Τέλος, στις αρχές του 1960, αναπτύσσεται η προσομοίωση των μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation) [30]. Με τη συγκεκριμένη θεώρηση, η ροή επιλύεται αναλυτικά αποκλειστικά στις περιοχές όπου παρατηρούνται δίνες μεγάλης κλίμακας. Στις περιοχές εμφάνισης μικρών δινών χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις προσεγγιστικών μοντέλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους σε σχέση με την άμεση αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes.

Η εργασία εστιάζει στις RANS εξισώσεις χρονικά μόνιμης ροής ασυμπίεστου ρευστού. Στο σχήμα 2.3.1 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά Reynolds. Αντίστοιχα, προκύπτουν οι σχέσεις για τις υπόλοιπες μεταβλητές ροής.



Σχήμα 2.3.1: Διάγραμμα των συνιστωσών της ταχύτητας  $u$  κατά Reynolds (Πηγή: McDonough,2007)

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.13)$$

$$\overline{u'(t)} = 0 \quad (2.14)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 2.13 και 2.14 στις εξισώσεις 2.10 έως 2.11, λαμβάνουμε τις RANS εξισώσεις για χρονικά μόνιμη και ασυμπίεστη ροή.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.15)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{-u'_i u'_j} \right) = 0 \quad i=1,2,3 \quad (2.16)$$

όπου

- $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού
- ο διπλά επαναλαμβανόμενος δείκτης υπονοεί άθροιση σύμφωνα με τη σύμβαση του Einstein
- Οι ποσότητες  $\bar{u}_i, \bar{u}_j, \bar{p}$  συμβολίζουν τη μέση τιμή των μεταβλητών  $u_i, u_j, p$

- Οι ποσότητες  $u_i', u_j'$  συμβολίζουν τη διακύμανση των μεταβλητών  $u_i, u_j$ .

Παρατηρώντας τις εξισώσεις 2.15 και 2.16, διαπιστώνεται ότι εμφανίζονται νέες ποσότητες προς υπολογισμό, αυτές του όρου  $-\overline{u_i' u_j'}$ , οι οποίες ονομάζονται τάσεις Reynolds. Οι διαθέσιμες εξισώσεις δεν επαρκούν για την επίλυση του ρευστοδυναμικού προβλήματος. Για το κλείσιμο του προβλήματος της τύρβης (closure problem) προκύπτει η ανάγκη εύρεσης νέων εξισώσεων. Οι επιπλέον εξισώσεις λαμβάνονται από ημιεμπειρικές σχέσεις, οι οποίες ονομάζονται μοντέλα τύρβης. Οι αλγεβρικές ή διαφορικές αυτές εξισώσεις συσχετίζουν τις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις με τα μέσα χρονικά μεγέθη λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική της τύρβης. Η μοντελοποίηση της τύρβης αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έρευνας ακόμη και σήμερα, καθώς η άμεση αριθμητική προσομοίωση της τύρβης παραμένει ακριβή σε όρους υπολογιστικού κόστους.

## 2.4 Μοντέλα τύρβης

Τα μοντέλα τύρβης τα οποία βασίζονται στην εξίσωση της κινητικής ενέργειας της τύρβης  $k$  είναι ευρέως διαδεδομένα στο χώρο του CFD. Τα μοντέλα αυτά ονομάζονται μοντέλα τυρβώδους συνεκτικότητας και θεμελιώνονται με την υπόθεση Boussinesq [5].

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_i^j \quad (2.17)$$

Όπου

- $\nu_t$  είναι η τυρβώδης κινηματική συνεκτικότητα
- $\delta_i^j$  είναι το δέλτα του Kronecker.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια ορίζεται ως:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (2.18)$$

Τέτοια μοντέλα είναι τα k-ε, k-ω και Spalart-Allmaras [20], [26]. Στη διπλωματική αυτή εργασία επιλέχθηκε το μοντέλο k-ε.

### 2.4.1 Μοντέλο k-ε

Το μοντέλο k-ε είναι ένα μοντέλο δύο μερικών διαφορικών εξισώσεων, το οποίο δίνει μια γενική περιγραφή της τύρβης και λαμβάνει υπόψη τη μεταφορά και τη διάχυση της τυρβώδους ενέργειας. Οι χρησιμοποιούμενες από το μοντέλο μεταβλητές είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια k, η οποία καθορίζει την ενέργεια της τύρβης και η καταστροφή της τύρβης ε, η οποία καθορίζει το ρυθμό καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ε για μόνιμη, ασυμπιεστή ροή και υψηλούς αριθμούς Reynolds τύρβης, όπως παρουσιάστηκαν από τον Chien [10] είναι:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij}' \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (2.19)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij}' \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.20)$$

όπου η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τη σχέση Prandtl-Kolmogorov-Taylor:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

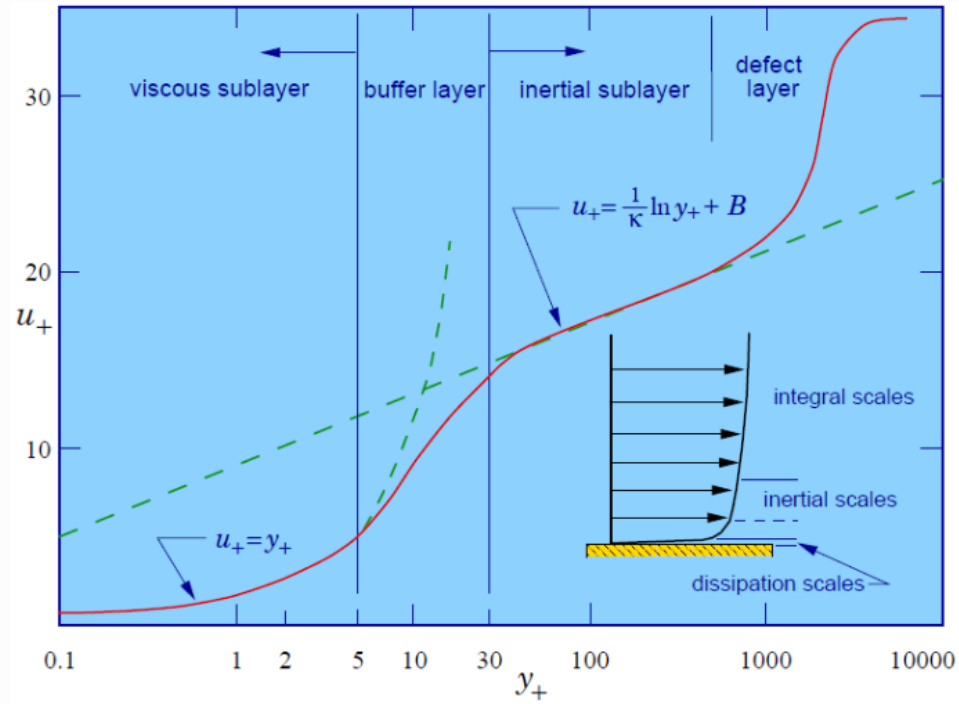
Οι συνήθεις τιμές των εμπειρικών συντελεστών είναι:

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad c_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (2.22)$$



## 2.4.2 Συναρτήσεις τοίχου (Wall functions)

Το διάγραμμα του σχήματος 2.4.1, παρουσιάζει τη συμπεριφορά του ρευστού κοντά στον τοίχο όπου διαμορφώνονται τρεις περιοχές: η περιοχή του στρωτού οριακού στρώματος, η μεταβατική περιοχή και η πλήρως τυρβώδης περιοχή [19].



Σχήμα 2.4.1: Κατανομή της ταχύτητας κοντά στο στερεό τοίχωμα πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής (Πηγή: McDonough, 2007)

Για την ανάλυση του φαινομένου που εκτυλίσσεται στην περιοχή κοντά στο στερεό, ορίζεται η αδιάστατη απόσταση  $y^+$  ως εξής:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (2.23)$$

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w} \quad (2.24)$$

όπου

- $u_\tau$  είναι η ταχύτητα τριβής
- $\tau_w$  είναι η τάση τριβής στο τοίχωμα
- $y$  είναι η απόσταση από το τοίχωμα

- $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού

Στο στρωτό οριακό στρώμα ( $y^+ < 5$ ), κυριαρχούν οι τάσεις συνεκτικότητας [27]. Συνεπώς, οι διατμητικές τάσεις Reynolds θεωρούνται αμελητέες. Στη συγκεκριμένη περιοχή ισχύει ο νόμος της γραμμικής ταχύτητας (linear velocity law):

$$u^+ = y^+ \quad (2.25)$$

Στη μεταβατική περιοχή ( $5 < y^+ < 30$ ), πραγματοποιείται η μετάβαση από το στρωτό οριακό στρώμα στην πλήρως τυρβώδη ροή. Η περιγραφή της κατανομής της ταχύτητας προσδιορίζεται από σύνθετες σχέσεις καθώς στην εν λόγω περιοχή συνυπάρχουν στρωτές και τυρβώδεις τάσεις παρόμοιου μεγέθους. Τέλος, στην πλήρως τυρβώδη περιοχή ( $y^+ > 30$ ) επικρατούν οι τυρβώδεις τάσεις. Η κατανομή της ταχύτητας θεωρείται λογαριθμική ως προς το  $y^+$ . Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα περιγράφεται από τη σχέση:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (2.26)$$

όπου

- $\kappa$  είναι η σταθερά von Karman και είναι ίση με 0.41.
- $B$  είναι μια σταθερά, η οποία λαμβάνει την τιμή 5.2

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, ανακύπτει η ανάγκη μοντελοποίησης της ροής κοντά στο τοίχωμα. Για την επίλυση του συγκεκριμένου ζητήματος έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές τεχνικές.

Η πρώτη τεχνική αναφέρεται στα μοντέλα χαμηλού αριθμού Reynolds (Low-Re models). Εδώ γίνεται ολοκλήρωση των εξισώσεων μέχρι το στερεό τοίχωμα και οι εξισώσεις των μεταβλητών  $k$ ,  $\varepsilon$  εμπλουτίζονται με όρους απόσβεσης. Για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του μοντέλου τύρβης, πρέπει η τιμή του αριθμού  $y^+$  στο κέντρο βάρους του πρώτου κελιού από το τοίχωμα να είναι μικρότερη της μονάδας ( $y^+ < 1$ ).

Η δεύτερη τεχνική αναφέρεται στα μοντέλα υψηλού αριθμού Reynolds (High-Re models). Επιλέγοντας High-Re μοντέλα, δεν επιλύεται η ροή στο στρωτό τμήμα της κοντά στο στερεό. Αντίθετα, στην περιοχή αυτή, γίνονται προσεγγίσεις της συμπεριφοράς της ροής, με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων και αναλυτικών εκφράσεων για την κατανομή της μέσης ταχύτητας. Οι προσεγγίσεις αυτές ονομάζονται συναρτήσεις τοίχου (wall functions). Για να λειτουργούν σωστά τα μοντέλα υψηλού αριθμού Re, πρέπει για το πρώτο κελί από τον τοίχο να ισχύει η ανίσωση:

$$100 > y^+ > 30 \quad (2.27)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό η μέθοδος αυτή επιτρέπει αραιότερο πλέγμα κοντά στο τοίχωμα, συνεπώς μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Για τον παραπάνω λόγο, επιλέχθηκε η εφαρμογή της στη διπλωματική εργασία.

# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

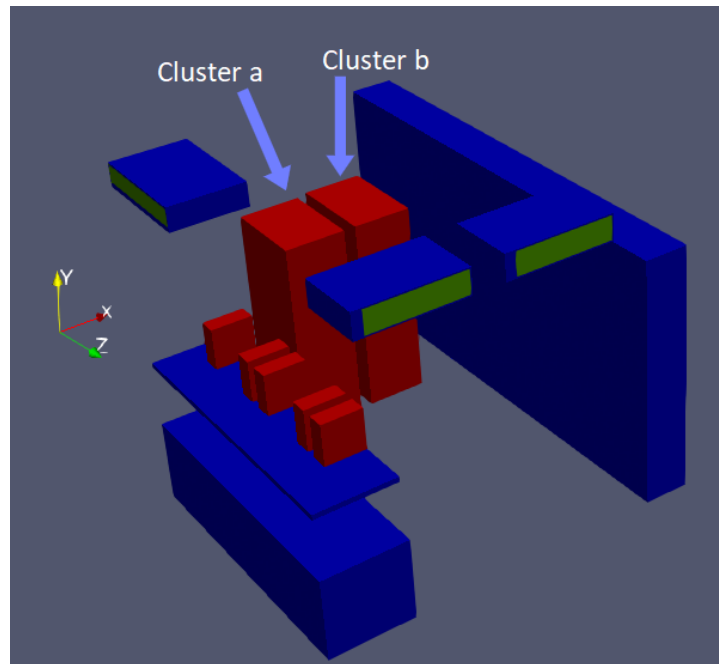
## Γένεση υπολογιστικού πλέγματος

---

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαρρύθμιση του υπό μελέτη δωματίου καθώς και η διαδικασία γένεσης πλέγματος μέσα σε αυτό. Προκειμένου να σχεδιαστεί το μοντέλο του δωματίου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εντός αυτού. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων εμφανίζονται στα σχήματα 3.1.1 έως 3.1.6.

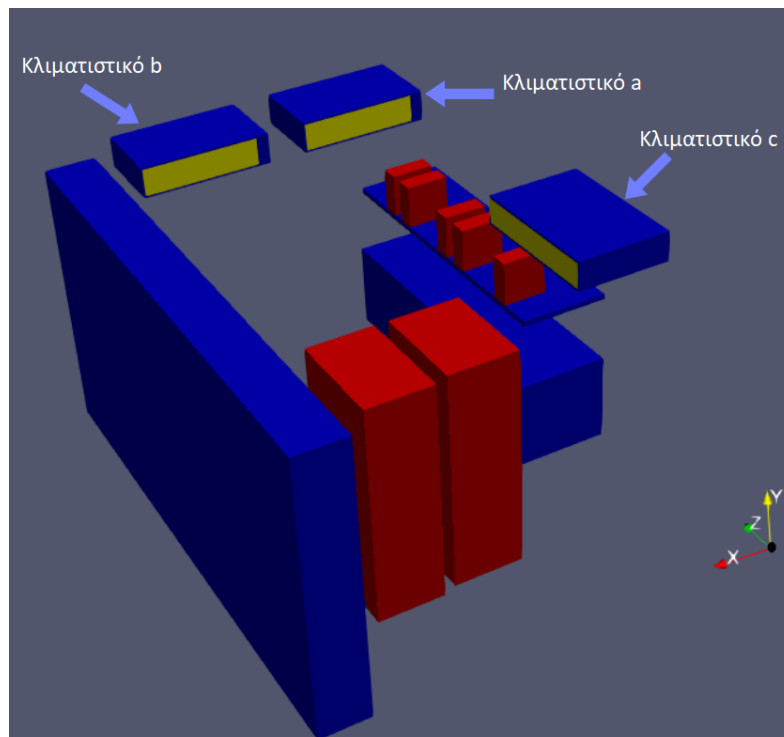
### 3.1 Περιγραφή φυσικού προβλήματος

Ο μελετώμενος χώρος είναι το υπολογιστικό κέντρο της ΜΠΥΡ&Β, το οποίο φιλοξενεί όλους τους διαθέσιμους επεξεργαστές της. Το δωμάτιο μοντελοποιείται ως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο εκτείνεται 3.80m κατά την κατεύθυνση x (πλάτος δωματίου), 3.46m κατά την κατεύθυνση y (ύψος δωματίου) και 4.8m κατά την κατεύθυνση z (βάθος δωματίου).



Σχήμα 3.1.1: Θέση υπερυπολογιστών (clusters) στο υπολογιστικό δωμάτιο

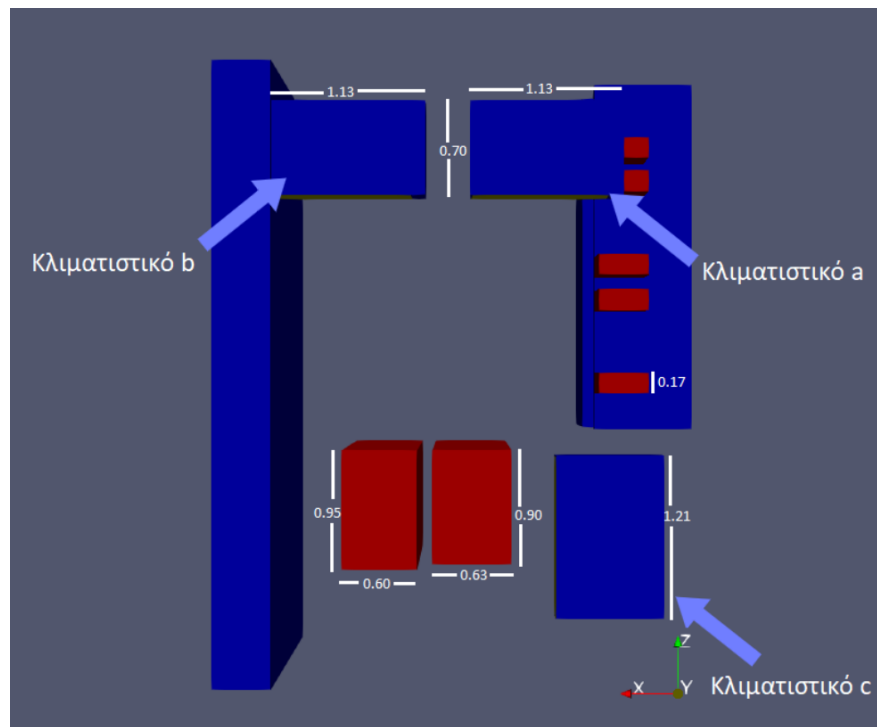
Μέσα στο χώρο, υπάρχουν δύο υπερυπολογιστές οι οποίοι όταν λειτουργούν παράγουν θερμότητα. Αυτοί συμβολίζονται στο σχήμα 3.1.1 ως cluster a και b. Παράλληλα, προστίθεται θερμότητα στο δωμάτιο λόγω της λειτουργίας των πέντε υπολογιστών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι πάνω στο ράφι. Επιλέχθηκε όλες οι πηγές θερμότητας να εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα. Κάτω από το ράφι υπάρχει αποθηκευτικός χώρος, ο οποίος λήφθηκε υπόψη κατά τη μοντελοποίηση καθώς περιορίζει την κίνηση του αέρα. Με την ίδια λογική, τοποθετήθηκε η βιβλιοθήκη στο δεξιά τοίχο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βιβλιοθήκη εκτείνεται καθ' όλο το βάθος (διεύθυνση z) του δωματίου.



Σχήμα 3.1.2: Θέση κλιματιστικών συσκευών στο υπολογιστικό δωμάτιο

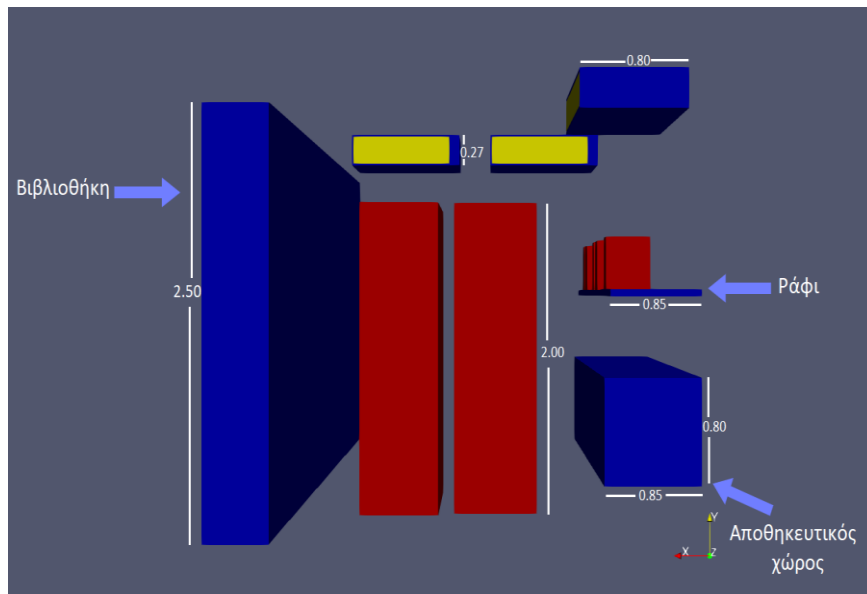
Για την επαρκή απαγωγή της θερμότητας από τους υπολογιστές και τους υπερυπολογιστές έχουν εγκατασταθεί τρεις κλιματιστικές συσκευές, οι οποίες εμφανίζονται στο σχήμα 3.1.2. Οι συσκευές αυτές διοχετεύουν αέρα στο δωμάτιο μέσω της κίτρινης επιφάνειας και αναρροφούν αέρα από το δωμάτιο από την πράσινη επιφάνεια (βλ. Σχήμα 3.1.1, 3.1.2). Στο πλαίσιο της εργασίας, ονομάζουμε κατά σύμβαση την κίτρινη επιφάνεια ως είσοδο και την πράσινη επιφάνεια ως έξοδο των κλιματιστικών. Τα κλιματιστικά a, b είναι ίδια ενώ το c έχει διαφορετικά κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Τέλος, η αρχή των αξόνων  $O(0,0,0)$  βρίσκεται στο βάθος του δωματίου και επισημαίνεται με τη μαύρη κουκίδα στο σχήμα 3.1.2.

Οι βασικές διαστάσεις όλων των παραπάνω μοντελοποιημένων στοιχείων παρουσιάζονται στα σχήματα 3.1.3 έως 3.1.6. Οι μονάδες δίδονται σε μέτρα.

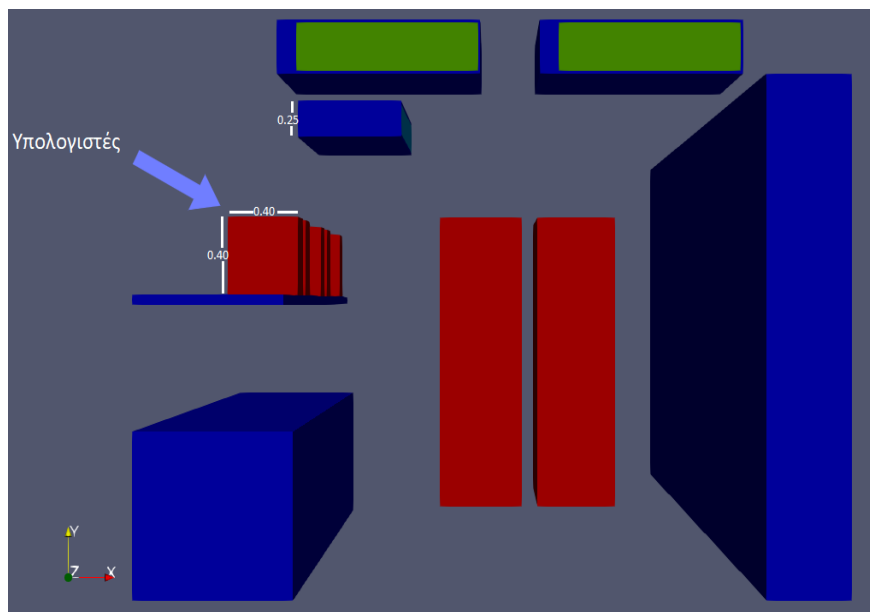


**Σχήμα 3.1.3:** Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των κλιματιστικών, των clusters και των υπολογιστών του δωματίου σε κάτοψη

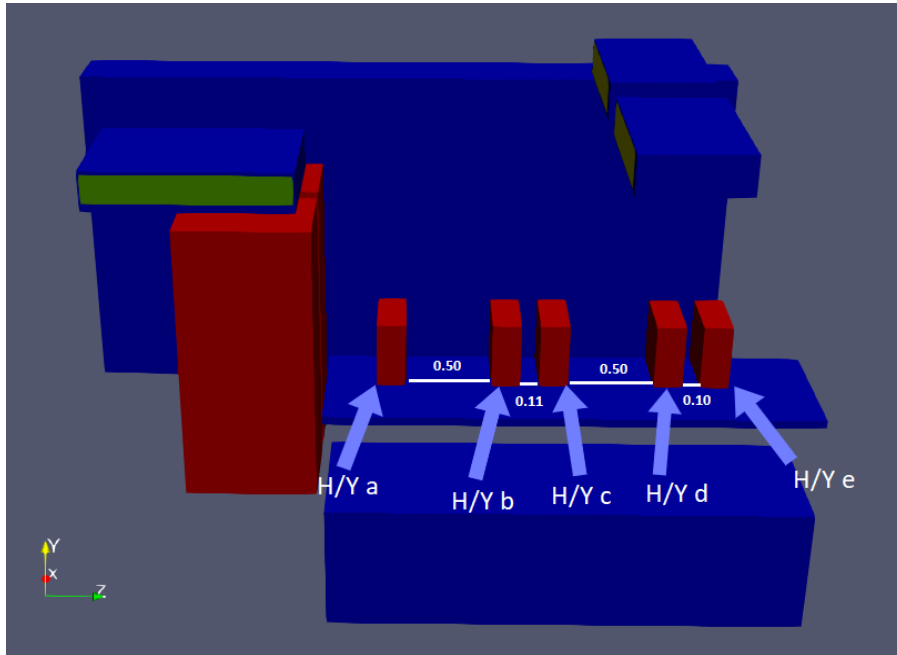
Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι το μήκος του ραφίου και του αποθηκευτικού χώρου κατά τη διεύθυνση z είναι ίσο με 2.85m. Επιπλέον, το πάχος του ραφίου κατά τη διεύθυνση y είναι ίσο με 5cm.



Σχήμα 3.1.4: Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των κλιματιστικών, των υπερυπολογιστών και των επίπλων του υπολογιστικού δωματίου

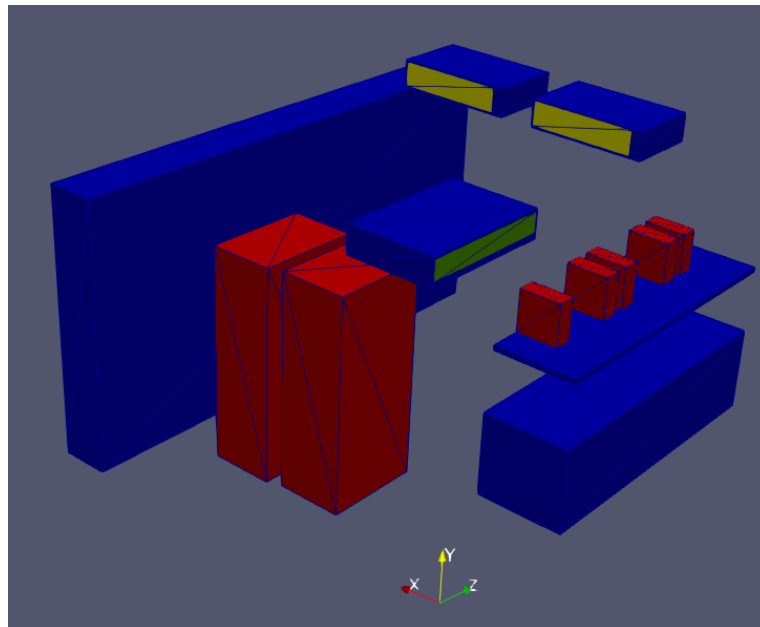


Σχήμα 3.1.5: Απεικόνιση των βασικών διαστάσεων των υπολογιστών και των κλιματιστικών του υπολογιστικού δωματίου



Σχήμα 3.1.6: Απεικόνιση των σχετικών αποστάσεων μεταξύ των υπολογιστών πάνω στο ράφι

Οι παραπάνω γεωμετρίες σχηματίστηκαν με τη χρήση του προγράμματος SolidWorks, το οποίο διατίθεται από το Εργαστήριο Προσωπικών Υπολογιστών της σχολής (PCLab). Κάθε αντικείμενο του δωματίου δημιουργείται σε μορφή στερεολιθογραφίας (.stl) ή 3D εκτύπωσης και περιγράφεται από ένα σύνολο ορθογώνιων τριγώνων (βλ. Σχήμα 3.1.7).



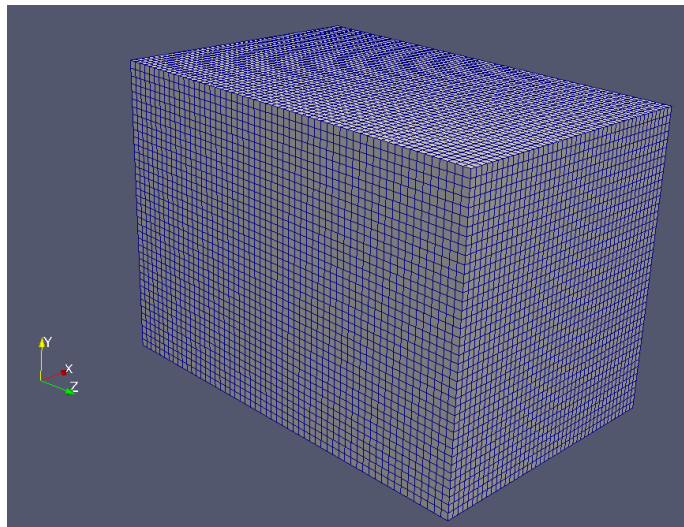
Σχήμα 3.1.7: Ορθογώνια τρίγωνα στερεολιθογραφίας



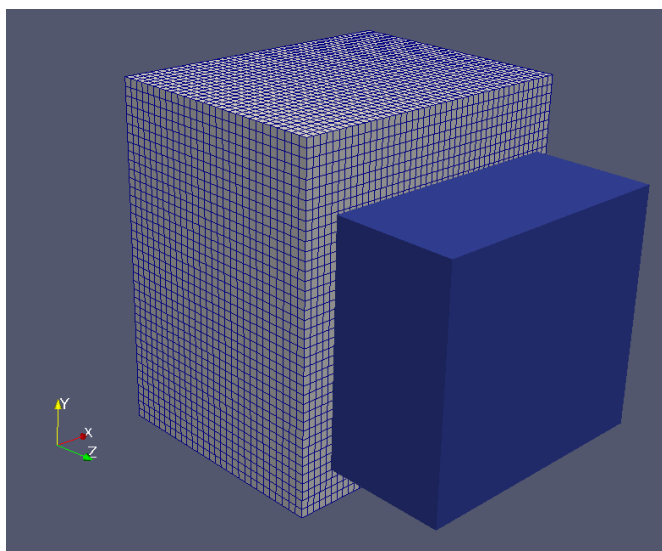
## 3.2 Γένεση πλέγματος

Αφού αναπαράχθηκε η γεωμετρία στο εσωτερικό του δωματίου, στη συνέχεια ανέκυψε η ανάγκη δημιουργίας πλέγματος. Το πλέγμα παράχθηκε με τη χρήση εφαρμογών, οι οποίες προσφέρονται από το λογισμικό OpenFOAM. Αναλυτικότερα ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Αρχικά δημιουργείται μέσω της εφαρμογής blockMesh, ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με πλάτος 4.5m (κατά τον άξονα x), ύψος 5m (κατά τον άξονα y) και βάθος 7m (κατά τον άξονα z). Όπως αναδεικνύεται από το σχήμα 3.2.2, το μελετώμενο δωμάτιο αποτελεί υποσύνολο του αρχικού παραλληλεπίπεδου. Στον όγκο που καλύπτει το εξωτερικό παραλληλόγραμμο, σχηματίζεται ένα ορθογωνικό πλέγμα, το οποίο έχει κατά τις διευθύνσεις x, y, z, 44, 40 και 56 κελιά αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, τα κελιά είναι κύβοι πλευράς 12.5cm. Το αρχικό πλέγμα είναι αραιό και λειτουργεί ως βάση για τον ορισμό υψηλότερων επιπέδων πύκνωσης.



Σχήμα 3.2.1: Πλέγμα αρχικού ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (blockMesh)



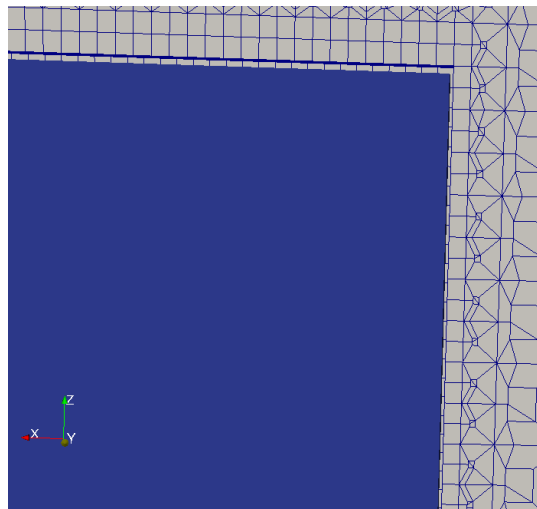
Σχήμα 3.2.2: Υπολογιστικό δωμάτιο ως υποσύνολο του αρχικού ορθογώνιου παραλληλόγραμμου πλέγματος

2. Στη συνέχεια, εκτελείται η εφαρμογή `surfaceFeatureExtract`, η οποία ανατρέχει στα αρχεία (.stl) στερεολιθογραφίας και εγγράφει τα χαρακτηριστικά των επιφανειών σε νέα αρχεία (.eMesh). Σε αυτό το στάδιο, καταγράφονται οι αιχμηρές ακμές των μοντελοποιούμενων στοιχείων του δωματίου, γύρω από τις οποίες θα διαμορφωθεί το πλέγμα.
3. Στο τρίτο βήμα γίνεται η εκτέλεση της εφαρμογής `snappyHexMesh` [12]. Η συγκεκριμένη λειτουργία δημιουργεί τριδιάστατο πλέγμα γύρω από σύνθετες γεωμετρίες. Το πλέγμα αυτό είναι μη-δομημένο και περιέχει διάφορα είδη κελιών με πιο συνήθη τα εξάεδρα, τα τετράεδρα, τα πολύεδρα και τις πυραμίδες. Η γένεση του πλέγματος ρυθμίζεται μέσω του αρχείου `snappyHexMeshDict` και περιλαμβάνει τα εξής τρία διακριτά στάδια:

➤ Διαίρεση και αφαίρεση κελιών (Castellation)

Στο πρώτο στάδιο η εφαρμογή συγκρίνει το αρχικό πλέγμα, το οποίο παράχθηκε με το `blockMesh`, με τη γεωμετρία, η οποία εξάχθηκε από το `surfaceFeatureExtract` [17]. Στα σημεία τομής αυτών των δύο επιφανειών, διαιρούνται τα κελιά έως το επίπεδο σχετικής πυκνότητας (`refinement level`) το οποίο έχει καθοριστεί στο αρχείο `snappyHexMeshDict`. Οι ακμές της γεωμετρίας, στις οποίες έχει ειδικά οριστεί συγκεκριμένο επίπεδο πύκνωσης, αποτελούν την πρώτη περιοχή που επεξεργάζεται ο κώδικας. Στη συνέχεια

ορίζεται στο ίδιο αρχείο, ένα σημείο εντός πλέγματος. Με βάση αυτό το σημείο η εφαρμογή αφαιρεί όλα τα περιττά κελιά. Ως περιττά ορίζονται όσα κελιά διαθέτουν λιγότερο από το 50% του όγκου τους στην περιοχή εντός πλέγματος. Τέλος, όσα κελιά βρίσκονται στα όρια της γεωμετρίας διαιρούνται περαιτέρω με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας του πλέγματος. Από τα τελευταία κελιά, διατηρούνται μόνο όσα βρίσκονται εντός πλέγματος. Στο σχήμα 3.2.3 παρουσιάζεται το πλέγμα που προκύπτει γύρω από το κλιματιστικό  $c$  σε αυτό το στάδιο.

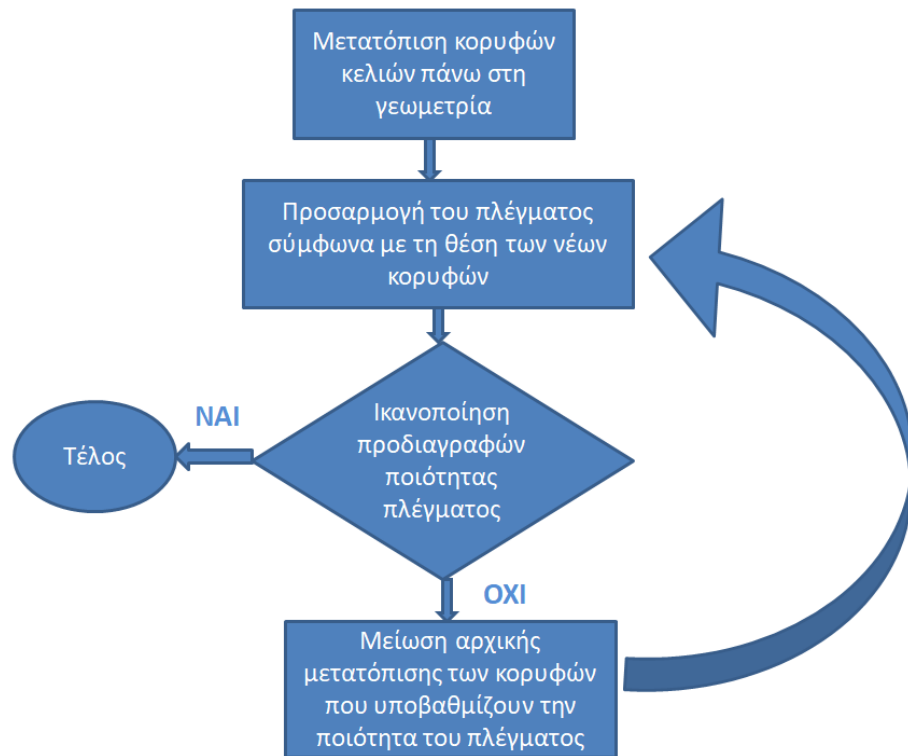


**Σχήμα 3.2.3.: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό  $c$  μετά την ολοκλήρωση της διαίρεσης και της αφαίρεσης κελιών (castellation)**

Παρατηρείται ότι λόγω της αφαίρεσης κελιών, υπάρχει ένα μικρό διάκενο ανάμεσα στο πλέγμα και το κλιματιστικό. Γι' αυτόν το λόγο, είναι απαραίτητη η εκτέλεση των επόμενων σταδίων της εφαρμογής snappyHexMesh.

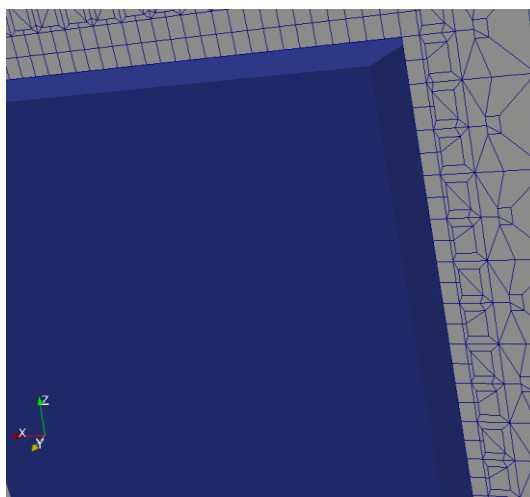
➤ Προσκόλληση κορυφών κελιών στη γεωμετρία (Snapping)

Στο δεύτερο στάδιο, οι κορυφές των κελιών που βρίσκονται στο όριο των επιφανειών (.stl), μετατοπίζονται επί της επιφάνειας της γεωμετρίας. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική και ελέγχεται μέσω απαιτήσεων ποιότητας του πλέγματος, οι οποίες τίθενται στο αρχείο snappyHexMeshDict. Στο σχήμα 3.2.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της εν λόγω λειτουργίας.



Σχήμα 3.2.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας προσκόλλησης των κορυφών κελιών στη γεωμετρία (Snapping)

Εφαρμόζοντας τη λειτουργία της προσκόλλησης των κελιών στη γεωμετρία, λαμβάνουμε το πλέγμα του σχήματος 3.2.5 γύρω από το κλιματιστικό  $c$ . Διαπιστώνεται ότι το πλέγμα έχει προσαρμοστεί σωστά γύρω από τη γεωμετρία και δεν την παραβιάζει.

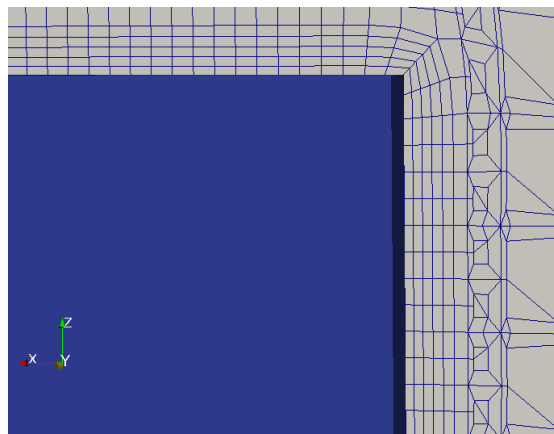


Σχήμα 3.2.5: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό  $c$  μετά την ολοκλήρωση της προσκόλλησης των κορυφών κελιών στη γεωμετρία (Snapping)

➤ Προσθήκη επιπλέον στιβάδων κελιών (Adding Layers)

Στο τελευταίο στάδιο, εισάγονται στιβάδες από εξαεδρικά κελιά ευθυγραμμισμένα πάνω στα όρια της γεωμετρίας [8]. Πιο αναλυτικά, το πλέγμα υποχωρεί κάθετα από την οριακή επιφάνεια κατά ένα ορισμένο πάχος με κατεύθυνση προς το εσωτερικό του. Στη συνέχεια, γίνεται προσαρμογή του πλέγματος στις νέες θέσεις των οριακών κελιών. Έπειτα, πραγματοποιείται έλεγχος της ποιότητας του πλέγματος. Στην περίπτωση όπου η ποιότητα του πλέγματος δεν είναι ικανοποιητική, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με μικρότερο πάχος υποχώρησης έως ότου παραχθεί ένα έγκυρο πλέγμα. Όταν εντοπιστεί το κατάλληλο πάχος υποχώρησης, γίνεται η εισαγωγή στιβάδων κελιών. Το πλήθος των στιβάδων κελιών ορίζεται στο αρχείο `snappyHexMeshDict`. Ο κώδικας εισάγει μια στιβάδα κάθε φορά και, στη συνέχεια, ελέγχει την ποιότητα του πλέγματος. Εάν με την εισαγωγή κάποιας στιβάδας, «υποβαθμιστεί» η ποιότητα του πλέγματος τότε γίνεται επιπλέον οπισθοχώρηση του αρχικού πλέγματος προς το εσωτερικό του και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Υπάρχει ένα όριο πλήθους στιβάδων κελιών, πάνω από το οποίο, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχτεί καλή ποιότητα του πλέγματος. Γι' αυτόν το λόγο, προτείνεται ο χρήστης να προσθέτει σταδιακά τις στιβάδες μέσω της αντίστοιχης ρύθμισης του αρχείου `snappyHexMeshDict` και να ελέγχει το πλέγμα οπτικά. Μετά την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου, το πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό `c` διαμορφώνεται σύμφωνα με το σχήμα 3.2.6



Σχήμα 3.2.6: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό `c` μετά την ολοκλήρωση της προσθήκης πέντε στιβάδων κελιών (Adding Layers)

### 3.3 Ανάλυση ευαισθησίας και επιλογή πλέγματος

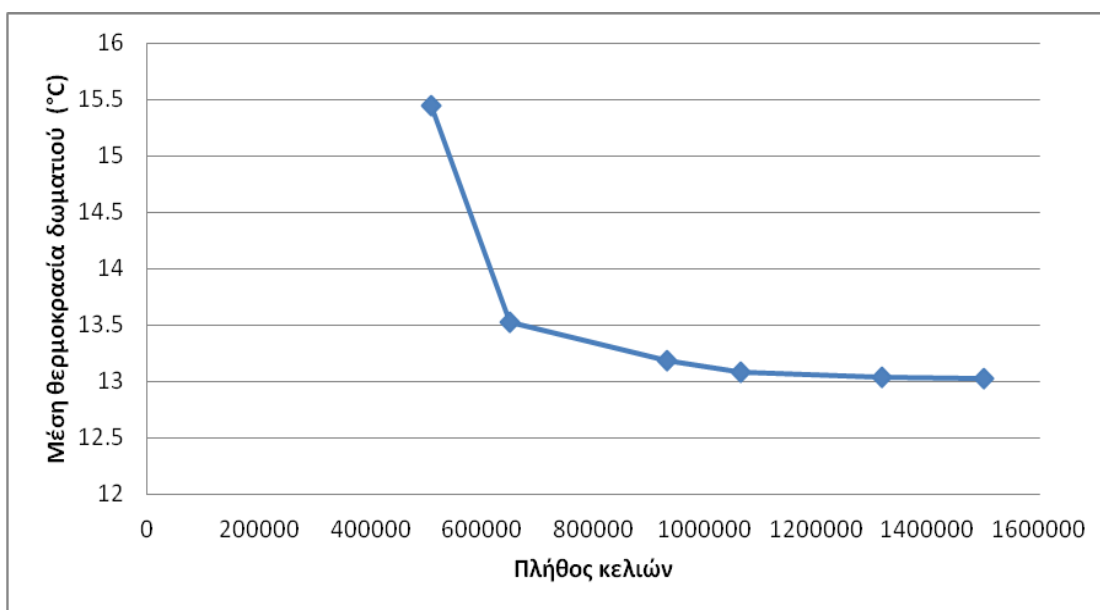
Όπως αναδείχθηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετές παράμετροι προς ρύθμιση για τη γένεση του πλέγματος με τη χρήση της εφαρμογής snappyHexMesh, οι οποίες επιτρέπουν τη δημιουργία πυκνότερου ή αραιότερου πλέγματος σε ορισμένες περιοχές ή καθολικά. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι η πυκνωση του πλέγματος με τη χρήση της εφαρμογής snappyHexMesh πραγματοποιείται πάντοτε ισότροπα προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου. Αυτό το γεγονός αναγκάζει το χρήστη να πυκνώνει το πλέγμα σε κατευθύνσεις όπου δεν κρίνεται αναγκαίο, με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του και μείωση της ποιότητας του.

Σε κάθε περίπτωση, βασική απαίτηση κατά τη γένεση πλέγματος είναι ο σεβασμός των ορίων της γεωμετρίας. Το πλέγμα πρέπει να είναι προσκολλημένο πάνω στις οριακές επιφάνειες, χωρίς να τις παραβιάζει. Επιπλέον, όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων εξασφαλίζει κατά την επίλυση των εξισώσεων ροής. Συμπληρωματικά, η πυκνωση του πλέγματος κοντά στα στερεά τοιχώματα είναι επιθυμητή καθώς σε αυτήν την περιοχή συμβαίνουν μεγάλες μεταβολές των μεταβλητών ροής.

Στον αντίποδα, χρησιμοποιώντας πυκνά πλέγματα δημιουργούνται μεγάλα μητρώα αγνώστων προς επίλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή το πλέγμα είναι μη-δομημένο, προκύπτουν πυκνά μητρώα για την επίλυση των οποίων δεν υπάρχουν γρήγοροι αλγόριθμοι. Συνεπώς, γίνεται εμφανές ότι τα πυκνά πλέγματα έχουν χαμηλή ταχύτητα σύγκλισης και μεγάλο κόστος σε υπολογιστικό χρόνο. Στα μειονεκτήματα των πυκνών πλεγμάτων, προστίθεται η απαίτηση για μεγάλο χώρο αποθήκευσης των δεδομένων. Ιδιαίτερα με τη χρήση του μη-δομημένου πλέγματος, όπως γίνεται σε αυτήν την εργασία, χρειάζεται επιπλέον απόθεμα μνήμης για την αποθήκευση της λίστας συνδεσιμότητας μεταξύ των κελιών.

Είναι φανερό ότι η επιλογή πλέγματος συνιστά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο θα επιλυθεί με την ανάλυση ευαισθησίας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, παράχθηκαν έξι πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας στα οποία εν συνεχεία επιλύθηκε η ροή. Για κάθε πλέγμα, υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία του δωματίου, η οποία αποτελεί τη συνάρτηση-κόστους στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης. Οι οριακές συνθήκες, οι οποίες εφαρμόστηκαν στις οριακές επιφάνειες όλων των πλεγμάτων, αναλύονται λεπτομερώς στο

κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας του πλέγματος.



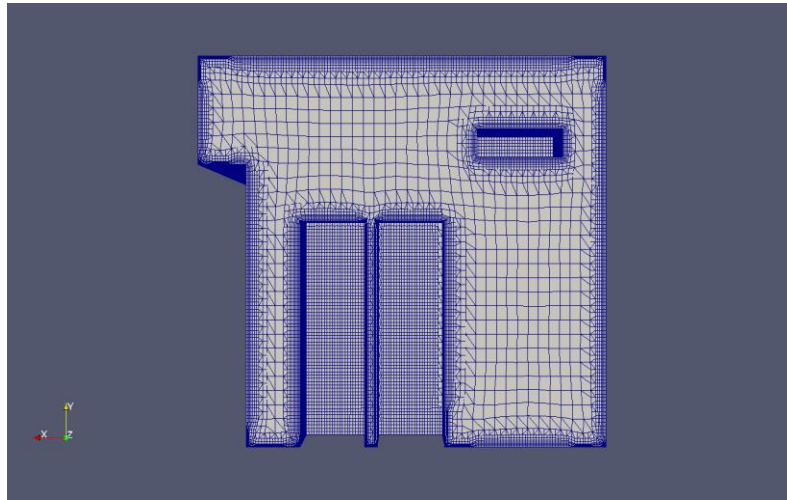
Σχήμα 3.3.1: Διάγραμμα ευαισθησίας πλέγματος

Πίνακας 3.3.1: Συγκριτικός πίνακας πλεγμάτων

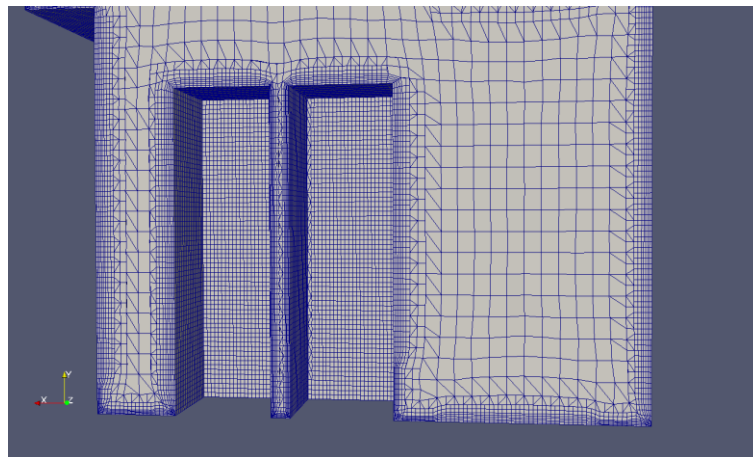
Αριθμός πλέγματος	Πλήθος κελιών	Μέση θερμοκρασία δωματίου (°C)
1	509.750	15,44
2	650.393	13,52
3	931.147	13,19
4	1.063.720	13,08
5	1.317.003	13,04
6	1.500.824	13,02

Μελετώντας τα παραπάνω δεδομένα, αντιλαμβανόμαστε ότι το πλέγμα που θα επιλεγεί δεν πρέπει να έχει λιγότερα από περίπου ένα εκατομμύριο κελιά γιατί η ακρίβεια της προσομοίωσης της ροής θα είναι χαμηλή. Το τέταρτο πλέγμα, συνδυάζει την καλή ακρίβεια, την ικανοποιητική σύγκλιση και το διαχειρίσιμο υπολογιστικό κόστος. Είναι σκόπιμο να σημειωθεί ότι δεν συμπεριλήφθηκαν πλέγματα με μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτή των ~1.500.000 κελιών καθώς είτε απέκλιναν είτε χαρακτηρίζονταν από χαμηλή ποιότητα. Η γένεση καλού πλέγματος δεν είναι πάντα εύκολη και αποτελεί ξεχωριστό

επιστημονικό πεδίο μελέτης. Περισσότερα δεδομένα σχετικά με το τελικό πλέγμα, προβάλλονται στα σχήματα 3.3.2 έως 3.3.8.

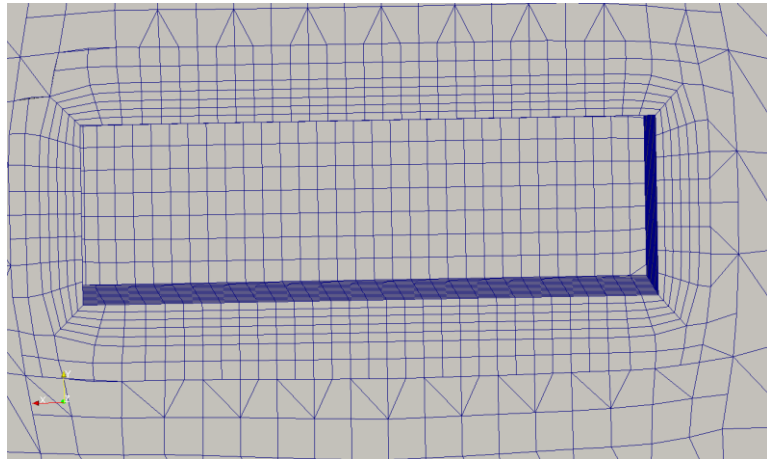


**Σχήμα 3.3.2: Πλέγμα στο επίπεδο z=1.30m**



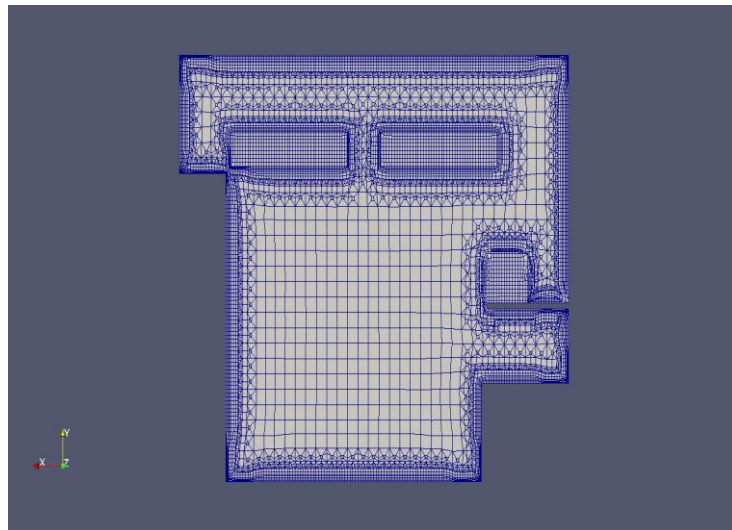
**Σχήμα 3.3.3: Πλέγμα γύρω από τα clusters στο επίπεδο z=1.30m**



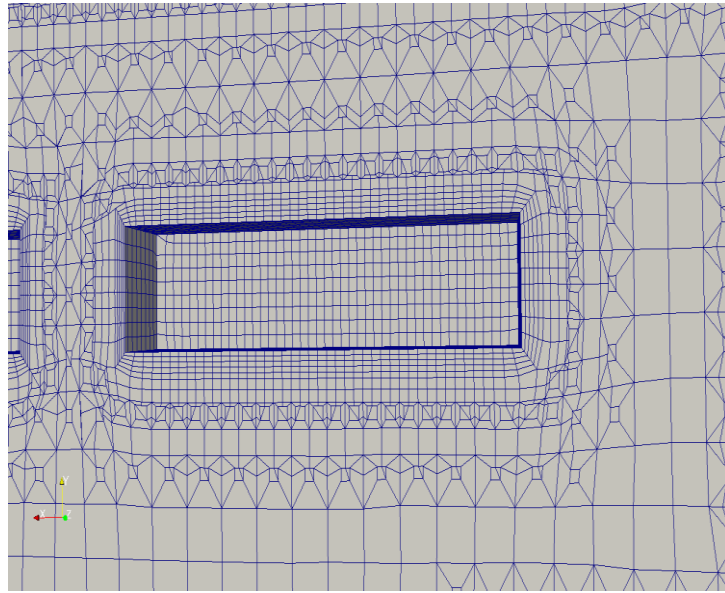


**Σχήμα 3.3.4: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό c στο επίπεδο  $z=1.30m$**

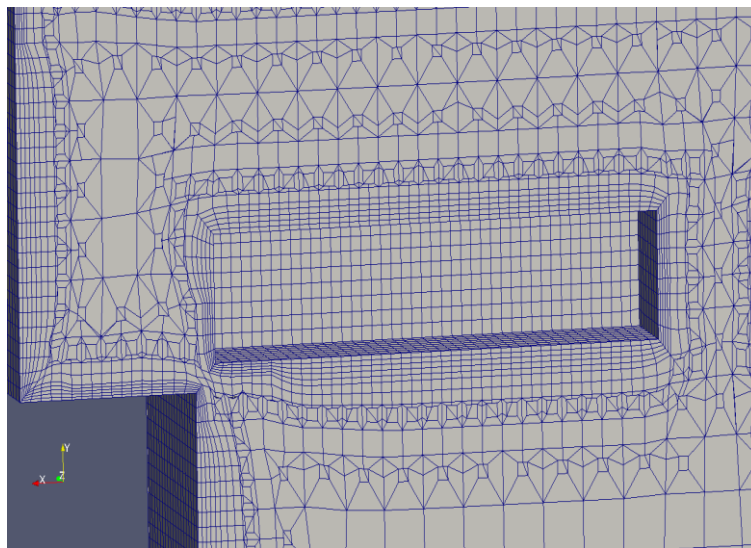
Όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, υπάρχουν δύο επίπεδα πυκνώσης γύρω από κάθε γεωμετρία. Κάθε ένα επίπεδο από αυτά εκτείνεται κατά ύψος σε δύο στιβάδες. Επιπλέον, γύρω από όλα τα στερεά τοιχώματα έχουν εισαχθεί πέντε στιβάδες κελιών, των οποίων το πάχος αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο λόγου 1.05.



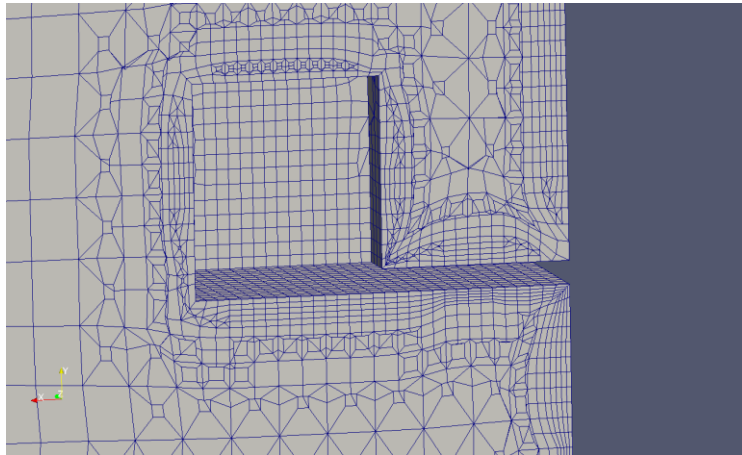
**Σχήμα 3.3.5: Πλέγμα στο επίπεδο  $z=1.90m$**



**Σχήμα 3.3.6: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό a στο επίπεδο  $z=1.90m$**



**Σχήμα 3.3.7: Πλέγμα γύρω από το κλιματιστικό b στο επίπεδο  $z=1.90m$**



**Σχήμα 3.3.8: Πλέγμα γύρω από τον υπολογιστή d στο επίπεδο z=1.90m**

Το τελικό πλέγμα περιλαμβάνει 1.063.720 κελιά και 1.203.069 κόμβους. Τα δομικά στοιχεία του πλέγματος είναι 1.014.604 εξάεδρα, 682 πρίσματα, 2 τριγωνικές σφήνες και 48.429 πολύεδρα. Ο μέγιστος λόγος των πλευρών των κελιών είναι 16.46 και θεωρείται φυσιολογικός. Οι περιπτώσεις μεγάλων μέγιστων λόγων πλευρών προκύπτουν συνήθως όταν το πλέγμα είναι πολύ πυκνό στις οριακές επιφάνειες. Ο ελάχιστος όγκος κελιού είναι  $4.63 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$  ενώ ο μέγιστος  $0.0196 \text{ m}^3$ . Είναι επιθυμητό ο όγκος των κελιών να αυξάνεται ομαλά καθώς μεταβαίνουμε από την περιοχή του τοιχώματος στο εσωτερικό πλέγμα. Η παράμετρος της μη-ορθογωνικότητας μετρά τη γωνία μεταξύ της ευθείας που διέρχεται από τα κέντρα δύο κελιών και του κάθετου διανύσματος στην κοινή τους επιφάνεια. Η μέση μη ορθογωνικότητα στο πλέγμα είναι ίση με 10.26. Η στρέβλωση απεικονίζει την απόσταση μεταξύ της τομής της γραμμής που συνδέει δύο κέντρα κελιών με την κοινή τους επιφάνεια και του κέντρου της κοινής τους επιφάνειας. Στο εν λόγω πλέγμα η μέγιστη τιμή της στρέβλωσης είναι ίση με 3.97.

# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

## Λογισμικό OpenFOAM

---

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητες του προγράμματος OpenFOAM. Επιπλέον, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος OpenFOAM και επεξηγείται ο τρόπος που εισήχθησαν τα δεδομένα στο εν λόγω λογισμικό. Τέλος, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος επίλυσης της ροής.

### 4.1 Περιγραφή λογισμικού OpenFOAM

Το OpenFOAM είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής ανοιχτού κώδικα, όπως δηλώνει η ονομασία του «Open Source Field Operation And Manipulation». Το συγκεκριμένο πακέτο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Το OpenFOAM άρχισε να αναπτύσσεται το 1989 στο Imperial College του Λονδίνου από τον Henry Weller. Ο κώδικας παρέμεινε κλειστός μέχρι το 2004, όπου και έγινε ανοιχτός προς όλους τους χρήστες. Σήμερα, κάθε χρήστης έχει πρόσβαση στο λογισμικό και στον κώδικα του [29].

Η δημοτικότητα του λογισμικού οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι προσφέρει μια τεράστια βάση μοντέλων και επιλυτών για διάφορες εφαρμογές όπως ηλεκτρομαγνητικές ροές, πολυφασικές ροές, προβλήματα μεταφοράς θερμότητας και προβλήματα καύσης. Επιπλέον, είναι διαθέσιμοι κώδικες όχι μόνο για την επίλυση των RANS αλλά και για την επίλυση των DNS και LES εξισώσεων. Συνεπώς, ο χρήστης επιλέγει τον επιλύτη που θα χρησιμοποιήσει ανάλογα με τους υπολογιστικούς πόρους που διαθέτει καθώς και την ακρίβεια που επιθυμεί για την εφαρμογή του.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι ο χρήστης έχει πρόσβαση στους κώδικες και μπορεί να τους προσαρμόζει στις εφαρμογές του. Κατά αυτήν την έννοια, ο χρήστης έχει απόλυτη γνώση της λειτουργίας του επιλύτη, έλεγχο των ρυθμίσεων του επιλύτη και δύναται να πειραματιστεί στις εφαρμογές ενδιαφέροντος του. Με τη συνεισφορά των χρηστών, το λογισμικό εξελίσσεται καθημερινά και εμπλουτίζεται με

περισσότερους και καλύτερους επιλύτες. Συμπληρωματικά, αναφέρεται ότι ο κώδικας του ελεύθερου πακέτου OpenFOAM είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C++.

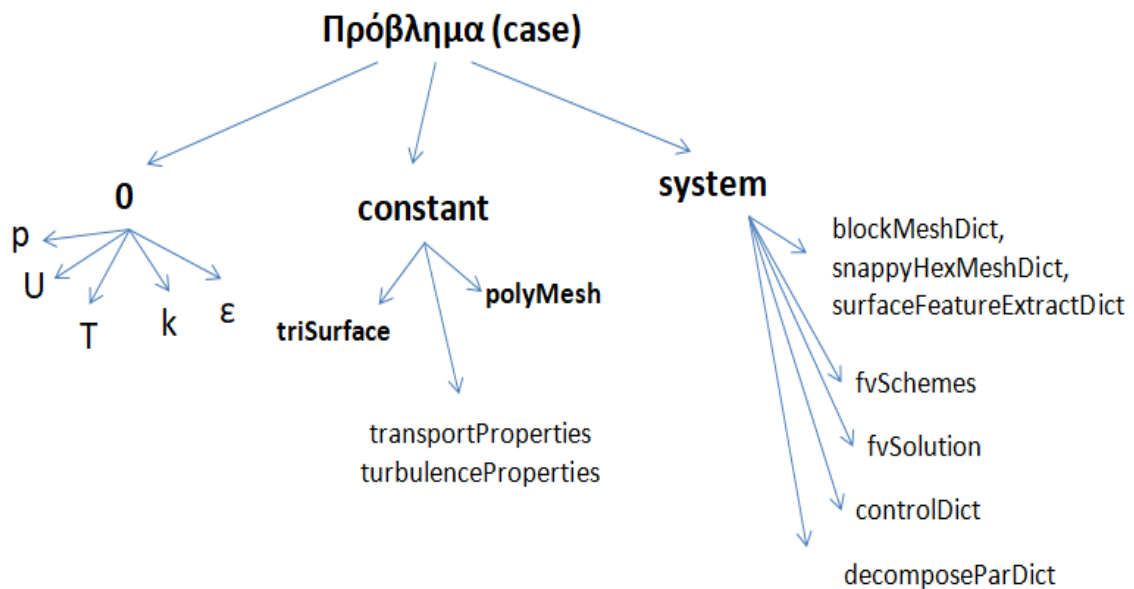
Το OpenFOAM επιλύει προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Η μέθοδος αυτή σέβεται απόλυτα τις εξισώσεις διατήρησης, στις οποίες έγινε αναφορά στο κεφάλαιο 2, γι' αυτό είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στο χώρο του CFD. Συγκεκριμένα, το OpenFOAM υιοθετεί την κεντροκυβελική διατύπωση (cell-centered) των πεπερασμένων όγκων και αποθηκεύει τη λύση στα κέντρα των κελιών.

Πέρα από την επίλυση εξισώσεων ρευστοδυναμικής, το OpenFOAM εξοπλίζει το χρήστη με βοηθητικά εργαλεία πριν και μετά τη διαδικασία της επίλυσης της ροής. Όπως αναδείχτηκε ήδη, υπάρχει η εφαρμογή snappyHexMesh για τη γένεση υπολογιστικού πλέγματος. Επιπλέον, υπάρχουν έτοιμοι κώδικες υπολογισμού της μέσης τιμής βασικών μεγεθών της ροής όπως η πίεση και η ταχύτητα σε περιοχές ενδιαφέροντος. Συμπληρωματικά, υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού του λογισμικού OpenFOAM με το πακέτο ParaView, το οποίο οπτικοποιεί τη λύση που προκύπτει από το πρώτο.

Τέλος, με τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας, σχεδόν σε όλα τα εργαλεία του OpenFOAM με τη χρήση κατάλληλων σχημάτων MPI (Message Passing Interface), εξοικονομείται πολύτιμος χρόνος για το χρήστη. Κατ' επέκταση ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες και πολύπλοκες προσομοιώσεις οι οποίες θα εκτελεστούν σε χρόνο αντιστρόφως ανάλογο του αριθμού των επεξεργαστών που έχει στη διάθεση του.

## 4.2 Δημιουργία προσομοίωσης στο OpenFOAM

Κάθε πρόβλημα (case) διαρθρώνεται με προκαθορισμένο τρόπο, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους καταλόγους [23]. Η βασική δομή έχει ως εξής:



Σχήμα 4.2.1: Διάρθρωση προβλήματος στο περιβάλλον OpenFOAM

Με έντονα μαύρα γράμματα συμβολίζονται όλοι οι κατάλογοι, οι οποίοι εμπεριέχουν διάφορα αρχεία ή υποκαταλόγους.

### Κατάλογος 0

Ο κατάλογος 0 περιέχει αρχεία για την αρχικοποίηση και τις οριακές συνθήκες των μεγεθών της ροής. Πιο αναλυτικά, σε κάθε ένα από τα αρχεία  $p$ ,  $u$ ,  $T$ ,  $k$ ,  $\epsilon$  επιλέγεται ο τύπος της οριακής συνθήκης για κάθε οριακή επιφάνεια του πλέγματος (patch). Οι πιο συνηθισμένες οριακές συνθήκες, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία, είναι τύπου Dirichlet, Neumann και συναρτήσεις τοίχου.

Στην εν λόγω εργασία υπάρχουν 20 οριακές επιφάνειες, στις οποίες εφαρμόζονται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες:

## Ταχύτητα ( $u$ )

Η ταχύτητα είναι μηδενική πάνω σε όλα τα στερεά σώματα που υπάρχουν στο χώρο, καθώς και στα τοιχώματα του δωματίου. Συνεπώς ορίζεται η οριακή συνθήκη Dirichlet, ίση με  $u=0$  ή  $(u_x, u_y, u_z)=(0,0,0)$  για τη βιβλιοθήκη, το ράφι, τον αποθηκευτικό χώρο, τα τοιχώματα του δωματίου και το τμήμα της επιφάνειας των κλιματιστικών, το οποίο δε διοχετεύει ούτε αναρροφά αέρα. Οι υπολογιστές και οι υπερυπολογιστές (clusters) διαθέτουν ενσωματωμένους ανεμιστήρες για την αποτελεσματικότερη ψύξη τους. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, πραγματοποιείται η παραδοχή ότι ο αέρας από τους υπερυπολογιστές/υπολογιστές εισέρχεται και εξέρχεται με μηδενική ταχύτητα στο χώρο. Συνεπώς εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη  $u=0$  στις αντίστοιχες επιφάνειες.

Σύμφωνα με επιτόπιες μετρήσεις, γίνεται η παραδοχή ότι ο αέρας εισέρχεται στο χώρο με ταχύτητα  $u_{\infty}=4.5\text{m/s}$  από όλα τα κλιματιστικά [11]. Τα κλιματιστικά  $a$  και  $b$ , στην αρχική τους θέση, βγάζουν αέρα με φορά προς τον αρνητικό άξονα  $z$ . Γι' αυτό το λόγο, η οριακή συνθήκη για αυτά παίρνει τη μορφή  $(u_x, u_y, u_z)=(0,0,-4.5)$ . Με την ίδια λογική, για την αρχική χωροθέτηση του κλιματιστικού  $c$  ορίζεται στην είσοδο του η οριακή συνθήκη  $(u_x, u_y, u_z)=(4.5,0,0)$  καθώς ο αέρας εξέρχεται με φορά προς τα θετικά του άξονα  $x$ . Στην έξοδο των κλιματιστικών, δηλαδή στην επιφάνεια αναρρόφησης του αέρα, επιβάλλεται οριακή συνθήκη zeroGradient.

**Σημείωση:** Υπενθυμίζεται ότι είσοδος των κλιματιστικών ονομάζεται κατά σύμβαση η επιφάνεια από την οποία τα κλιματιστικά διοχετεύουν αέρα προς το δωμάτιο (κίτρινη επιφάνεια). Αντίστοιχα, έξοδος των κλιματιστικών ονομάζεται η επιφάνεια από την οποία τα κλιματιστικά αναρροφούν αέρα από το δωμάτιο (πράσινη επιφάνεια).

## Πίεση ( $p$ )

Για το πεδίο της πίεσης, εφαρμόζεται σε όλα τα στερεά σώματα και τα τοιχώματα του δωματίου η οριακή συνθήκη zeroGradient. Για να προκύψει η πίεση στα διάφορα σημεία του χώρου πρέπει να οριστεί μια πίεση αναφοράς. Η πίεση αναφοράς είναι σταθερή και ίση με μηδέν και επιβάλλεται στην έξοδο των κλιματιστικών. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η πίεση  $p$  είναι διαιρεμένη με την πυκνότητα. Γι' αυτόν το λόγο, μετράται σε  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , αντί για Pa.

## Θερμοκρασία (T)

Όλα τα έπιπλα του δωματίου, η βιβλιοθήκη, ο αποθηκευτικός χώρος, το ράφι θεωρούνται αδιαβατικά και λαμβάνουν την οριακή συνθήκη zeroGradient. Η ίδια οριακή συνθήκη εφαρμόζεται και στην έξοδο των κλιματιστικών. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι το δωμάτιο είναι αδιαβατικό, συνεπώς δεν συναλλάσσει θερμότητα με τον εξωτερικό χώρο. Όλες οι θερμικές συσκευές, cluster a, b και υπολογιστές, εκπέμπουν ομοιόμορφα θερμότητα από τις πέντε ελεύθερες έδρες τους. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρονικών συσκευών [6], [16] ανέρχεται στα 12.857kW. Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι οι υπολογιστές και τα clusters λειτουργούν σε ποσοστό 35%. Επομένως, προκύπτει ότι η θερμική ισχύς του cluster a είναι 2732W, ενώ του b είναι 1268W. Επιπλέον καθένας από τους πέντε υπολογιστές, καταναλώνει ισχύ ίση με 100W, η οποία μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε θερμότητα. Προκειμένου να εκτιμηθεί η θερμορροή κάθε συσκευής, πρέπει να υπολογιστεί το μέγεθος της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Γνωρίζοντας ότι ο συντελεστής θερμικής αγωγής του αέρα είναι ίσος με  $k=0.026\text{W/mK}$  για θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  και θεωρώντας τον σταθερό για τη μελέτη, μπορεί να υπολογιστεί η θερμορροή μέσω της σχέσης:

$$Q = \frac{q}{A} \quad (4.1)$$

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών προβάλλονται στον πίνακα 4.2.2:

Πίνακας 4.2.2: Θερμικά φορτία και θερμορροές υπερυπολογιστών και υπολογιστών

Θερμική συσκευή	Cluster a	Cluster b	Υπολογιστής
Ισχύς q (W)	2732	1268	100
Επιφάνεια A (m <sup>2</sup> )	6.687	6.77	0.524
Θερμορροή Q (W/m <sup>2</sup> )	408.554	187.297	190.840

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, εφαρμόζεται σε κάθε επιφάνεια που εκπέμπει θερμότητα η αντίστοιχη μη-μηδενική συνθήκη Neumann [4]. Η οριακή τιμή αυτής της συνθήκης υπολογίζεται για κάθε επιφάνεια σύμφωνα με τη σχέση:



$$\nabla T = \frac{Q}{k} \quad (4.2)$$

Τέλος, ο αέρας εισέρχεται στο δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία ίση με 10°C. Για αυτόν το λόγο, στην είσοδο των κλιματιστικών (κίτρινες επιφάνειες) εισάγεται οριακή συνθήκη Dirichlet για τη θερμοκρασία.

### **Τυρβώδης κινητική ενέργεια (k)**

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k, υπολογίζεται με τη χρήση συναρτήσεων τοίχου για όλες τις επιφάνειες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μηδενική ταχύτητα. Για την είσοδο των κλιματιστικών, η τυρβώδης κινητική ενέργεια εκτιμάται από την σχέση [10]:

$$k = \frac{3}{2} (Iu_m)^2 \quad (4.3)$$

Πραγματοποιώντας την παραδοχή ότι η ένταση της τύρβης είναι 2%, τότε προκύπτει ότι το k στην είσοδο των κλιματιστικών, δηλαδή στην κίτρινη επιφάνεια, είναι ίσο με 0.01215m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Για την έξοδο των κλιματιστικών (πράσινη επιφάνεια), εισάγεται η οριακή συνθήκη zeroGradient.

### **Τυρβώδης διάχυση (ε)**

Η μεταβλητή της τυρβώδους διάχυσης προσδιορίζεται με τη χρήση συναρτήσεων τοίχου για όλες τις οριακές επιφάνειες που έχουν μηδενική ταχύτητα. Στην είσοδο των κλιματιστικών, η τυρβώδης διάχυση λαμβάνεται ίση με ε=0.0590m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>. Συνεπώς υπολογίζεται η τυρβώδης κλίμακα μήκους από τη σχέση:

$$L = \frac{c_\mu^{0.75} k^{1.5}}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

όπου το  $C_\mu$  δίδεται από τη σχέση 2.22. Προκύπτει ότι  $L \approx 0.0037m$  για όλα τα κλιματιστικά. Αντίστοιχα με τη μεταβλητή k, στην έξοδο των κλιματιστικών επιβάλλεται οριακή συνθήκη zeroGradient για το ε.

## Κατάλογος constant

Μέσα στον κατάλογο constant είναι αποθηκευμένο το πλέγμα (polyMesh), οι ιδιότητες του ρευστού (transportProperties), το μοντέλο τύρβης (RANSProperties) και η γεωμετρία του δωματίου (triSurface). Τα πιο σημαντικά από τα αρχεία που περιέχει ο υποκατάλογος polyMesh είναι το αρχείο points με τις συντεταγμένες όλων των κόμβων του πλέγματος, το αρχείο cells με τις υπολογιστικές κυψέλες και τα σημεία από τα οποία αυτές απαρτίζονται, το αρχείο faces με τις οριακές επιφάνειες κάθε υπολογιστικής κυψέλης. Όλα ότα παραπάνω αρχεία δημιουργούνται αυτόματα κατά τη γένεση του πλέγματος.

## Κατάλογος system

Στον κατάλογο system εντοπίζονται όλα τα αρχεία, τα οποία ρυθμίζουν τη γένεση του πλέγματος, δηλαδή snappyHexMeshDict, surfaceFeatureExtractDict, blockMeshDict. Επιπλέον υπάρχει το αρχείο controlDict το οποίο ρυθμίζει τη συχνότητα και την ακρίβεια αποθήκευσης της λύσης, το χρόνο έναρξης επίλυσης και διάφορα άλλα. Στον κατάλογο system εντοπίζεται επίσης το αρχείο fvSolution, μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η επιλογή του επίλυτη για κάθε μεταβλητή της ροής. Επιπλέον υπάρχει το αρχείο fvSchemes που ορίζει τα σχήματα διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων. Τέλος, σ' αυτόν τον κατάλογο, αποθηκεύονται διάφορα αρχεία, όπως το deComposeParDict, το οποίο ορίζει τον τρόπο παραλληλοποίησης του προβλήματος.

## 4.3 Αλγόριθμος SIMPLE

Όπως αναδείχθηκε στο κεφάλαιο 2, οι εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή δεν είναι απεμπλεγμένες μεταξύ τους (decoupled). Για αυτόν τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης αυτών των εξισώσεων. Η αριθμητική μέθοδος που υιοθετείται από τον επίλυτη simpleFoam του λογισμικού OpenFOAM, ονομάζεται SIMPLE και προέρχεται από τα αρχικά **S**emi-**I**mplicit **M**ethod for **P**ressure **L**inked **E**quations [23]. Ο αλγόριθμος SIMPLE χρησιμοποιεί μία μέθοδο προκειμένου να δημιουργήσει μια εξίσωση για την πίεση και μια εξίσωση διόρθωσης του πεδίου της ταχύτητας έτσι ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας.

Αρχικά, η εξίσωση της ορμής 2.6 διατυπώνεται με τη βοήθεια ενός μητρώου  $\overline{M}$  ως εξής:

$$\vec{M}\vec{u} = -\nabla p \quad (4.5)$$

Το μητρώο  $\vec{M}$  περιέχει τους συντελεστές, οι οποίοι προκύπτουν από τη διακριτοποίηση των όρων της ορμής. Συνεπώς, το μητρώο  $\vec{M}$  συνιστά γνωστή ποσότητα.

Στην συνέχεια, το μητρώο  $\vec{M}$  εκφράζεται ως συνάρτηση των πινάκων  $\vec{A}$ ,  $\vec{H}$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{A}\vec{u} - \vec{H} = -\nabla p \quad (4.6)$$

Ο πίνακας  $\vec{A}$  είναι εξ ορισμού διαγώνιος και κατ' επέκταση αντιστρέφεται εύκολα. Ο πίνακας  $\vec{H}$  περιέχει μηδενικά στοιχεία στη διαγώνιο του (off-diagonal). Εάν επιλυθεί η εξίσωση 4.6 ως προς την ταχύτητα τότε προκύπτει η σχέση:

$$\vec{u} = \vec{A}^{-1}\vec{H} - \vec{A}^{-1}\nabla p \quad (4.7)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 4.7 στην εξίσωση της συνέχειας, προκύπτει μια εξίσωση Poisson για την πίεση:

$$\nabla \cdot (\vec{A}^{-1}\nabla p) = \nabla \cdot (\vec{A}^{-1}\vec{H}) \quad (4.8)$$

Ο αλγόριθμος SIMPLE ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- 1) Αρχικά πραγματοποιείται αρχικοποίηση του πεδίου της πίεσης.
- 2) Στη συνέχεια, επιλύονται οι τρεις εξισώσεις της σχέσης 4.5 και υπολογίζεται το πεδίο της ταχύτητας. Οι ταχύτητες που προκύπτουν από το συγκεκριμένο στάδιο, δεν είναι οι σωστές καθώς ικανοποιούν μόνο τις εξισώσεις ορμής ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου.
- 3) Έπειτα επιλύεται η εξίσωση συνέχειας 4.8 για την εύρεση της πίεσης του πεδίου.
- 4) Επόμενο βήμα είναι η διόρθωση της ταχύτητας με τη χρήση της σχέσης 4.7, έτσι ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση συνέχειας.

- 5) Με την εκτέλεση του τελευταίου βήματος υπολογίζονται νέες ταχύτητες, οι οποίες δεν επαληθεύουν την εξίσωση της ορμής. Γι' αυτόν το λόγο, επαναλαμβάνεται ο ίδιος κύκλος, από το βήμα 2 έως το 4, μέχρις ότου η διαδικασία συγκλίνει.

Η επίλυση των εξισώσεων της ενέργειας και του μοντέλου τύρβης εισάγεται ύστερα από το 4<sup>ο</sup> βήμα της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας.

Οι σχέσεις του αλγόριθμου SIMPLE διακριτοποιούνται με τη χρήση σχημάτων δεύτερης τάξης. Στο πίνακα 4.3.1 παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα σχήματα διακριτοποίησης, τα οποία επιλέγονται στην εργασία [3].

**Πίνακας 4.3.1: Σχήματα διαφόρισης και ερμηνεία αυτών**

Μαθηματική πράξη	Σύμβολο	Σχήμα Διαφόρισης	Ερμηνεία σχήματος διαφόρισης
Gradient	$\nabla$	cellLimited Gauss linear	Δεύτερη τάξης, ολοκλήρωση κατά Gauss, cell limited
Divergence	$\nabla \cdot$	bounded Gauss linearUpWind	Δεύτερης τάξης με φραγή
Laplacian	$\nabla^2$	Gauss linear corrected	Δεύτερης τάξης χωρίς φραγή

Κατά την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιείται υποχαλάρωση (under-relaxation). Οι συντελεστές υποχαλάρωσης των μεταβλητών της ροής παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.2.

**Πίνακας 4.3.2: Συντελεστές υποχαλάρωσης των μεταβλητών της ροής**

Μεταβλητή ροής	Συντελεστής υποχαλάρωσης
p	0.3
u	0.7
T	0.8
k	0.3
$\epsilon$	0.3

# Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

## Βελτιστοποίηση με χρήση του λογισμικού

### EASY

---

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες των μεθόδων βελτιστοποίησης. Η ανάλυση εστιάζεται στους εξελικτικούς αλγόριθμους και ειδικότερα στον αλγόριθμο EASY, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των κλιματιστικών του δωματίου. Τέλος, γίνεται αναφορά στα προγράμματα που αναπτύχθηκαν.

#### 5.1 Εισαγωγή στις μεθόδους βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις στοχαστικές και τις αιτιοκρατικές [1]. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι αναζητούν τη βέλτιστη λύση, υπολογίζοντας την παράγωγο της συνάρτησης-στόχου. Η συγκεκριμένη εργασία γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη, όταν οι προς βελτιστοποίηση εξισώσεις είναι μη-γραμμικές. Οι στοχαστικές μέθοδοι, των οποίων υποκατηγορία συνιστούν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, αναζητούν τη βέλτιστη λύση με τρόπο τυχηματικό. Με τον όρο τυχηματικό, εννοούμε ότι αναζητείται η βέλτιστη λύση με τρόπο τυχαίο αλλά οργανωμένο [7]. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανίχνευση του χώρου των λύσεων (exploration) αλλά και εκμετάλλευση όποιας πληροφορίας είναι ήδη διαθέσιμη για να κατευθυνθεί σωστά η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (exploitation).

##### 5.1.1 Σημαντικές έννοιες για τη βελτιστοποίηση

Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να οριστούν τα παρακάτω:

1. **Συναρτήσεις-στόχοι:** Είναι οι συναρτήσεις, οι οποίες εκφράζουν μαθηματικά την υπό βελτιστοποίηση ποσότητα. Οι συναρτήσεις-στόχοι μπορούν να είναι μία ή

περισσότερες. Όταν υπάρχουν περισσότερες της μίας, αντικρουόμενες συναρτήσεις-στόχοι υλοποιείται μία πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Η γενική μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης  $M$  στόχων είναι:

$$\min \vec{f}(\vec{x}) = \min [\vec{f}_1(\vec{x}), \vec{f}_2(\vec{x}), \dots, \vec{f}_M(\vec{x})] \quad (5.1)$$

Η συνάρτηση-στόχος υπολογίζεται μετά το πέρας της επίλυσης των εξισώσεων RANS της ροής. Εδώ, χρησιμοποιείται ως συνάρτηση-στόχος, η ελαχιστοποίηση της μέσης θερμοκρασίας του δωματίου:

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=i_{\max}} (V_i T_i)}{\sum_{i=1}^{i=i_{\max}} V_i} = \frac{\sum_{i=1}^{i=i_{\max}} (V_i T_i)}{V_{total}} \quad (5.2)$$

όπου

- $V_i$  είναι ο όγκος του κελιού υπ' αριθμό  $i$  του πλέγματος
- $T_i$  είναι η θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) στο κέντρο βάρους του κελιού  $i$
- $i_{\max}$  είναι το πλήθος των κελιών του πλέγματος
- $V_{total}$  είναι ο συνολικός όγκος του πλέγματος.

Ένας επιπλέον δείκτης ο οποίος υπολογίζεται είναι ο όγκος των υπερθερμασμένων κυψελών σταθμισμένων κατά το βαθμό υπερθέρμανσης τους:

$$OverheatedVolume = \sum_{i=1}^{i=i_{\max}} [(\max(T_i, 35) - 35) V_i] \quad (5.3)$$

Ως υπερθερμασμένα θεωρούνται όσα κελιά έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $35^{\circ}\text{C}$ . Κατά σύμβαση για την υπόλοιπη εργασία, ο συγκεκριμένος δείκτης θα αναφέρεται ως όγκος υπερθερμασμένων κυψελών.

2. **Παραμετροποίηση:** Σε αυτό το στάδιο, επιλέγονται οι παράμετροι ως προς τις οποίες θα βελτιστοποιηθεί το πρόβλημα. Οι παράμετροι αυτοί ονομάζονται

μεταβλητές σχεδιασμού. Η επιλογή των μεταβλητών σχεδιασμού είναι μια σημαντική διαδικασία καθώς σχετίζεται άμεσα το πεδίο που θα αναζητηθεί η βέλτιστη λύση. Οι μεταβλητές σχεδιασμού πρέπει να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σε γενική μορφή, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού συμβολίζεται ως

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5.4)$$

όπου  $N$  είναι το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού ή ελεύθερων μεταβλητών.

Κάθε μεταβλητή σχεδιασμού διαθέτει ένα εύρος μέσα στο οποίο είναι δυνατό να λαμβάνει τιμές. Η μεταβλητή  $i$  λαμβάνει ως κατώτατη τιμή την  $x_{low}^i$ , ενώ ως μέγιστη τιμή  $x_{upp}^i$ . Εδώ, επιλέχθηκαν 12 μεταβλητές σχεδιασμού. Πιο αναλυτικά, κάθε κλιματιστικό μεταφέρεται στο χώρο με μετατοπίσεις  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . Επιπλέον, επιτρέπεται η στροφή των κλιματιστικών a,b,c στο επίπεδο xz κατά τις γωνίες  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  αντίστοιχα.

Κάθε μεταβλητή κωδικοποιείται στο δυαδικό σύστημα (binary) με τη χρήση ορισμένου αριθμού bits. Η επιλογή του αριθμού των bits της κάθε μεταβλητής καθορίζει το επίπεδο διακριτοποίησής της στο χώρο. Το βήμα  $\Delta x_i$  κατά το οποίο μετατοπίζεται κάθε μεταβλητή  $i$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta x_i = \frac{x_{upp}^i - x_{low}^i}{2^k - 1} \quad (5.5)$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της μεταβλητής  $i$ .

3. **Λογισμικό αξιολόγησης:** Το λογισμικό αξιολόγησης αποτελεί το συνδεδετικό κρίκο ανάμεσα στο διάνυσμα μεταβλητών  $\vec{x}$  και την αξιολόγηση αυτού, δηλαδή την αντιστοίχιση του σε μια τιμή συνάρτησης-στόχου. Στην εργασία, το λογισμικό αξιολόγησης συνίσταται από μια σειρά εκτελέσιμων εντολών και προγραμμάτων. Το βασικό εργαλείο του λογισμικού αξιολόγησης είναι το λογισμικό OpenFOAM, με τη βοήθεια του οποίου προσομοιώνεται η ροή. Η δομή του λογισμικού αξιολόγησης και τα προγράμματα, τα οποία καλούνται μέσα σε αυτό, αναλύονται στην ενότητα 5.3.

4. **Περιορισμοί:** Σημαντική συνιστώσα στα προβλήματα βελτιστοποίησης αποτελούν οι περιορισμοί. Οι περιορισμοί ενσωματώνονται στη διαδικασία της βελτιστοποίησης έτσι ώστε να ελέγχεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων. Σε αυτήν την εργασία, εισάγεται περιορισμός για το βαθμό σύγκλισης της ροής. Ο συγκεκριμένος περιορισμός εφαρμόζεται στο πεδίο της πίεσης γιατί αυτό συγκλίνει συνήθως δυσκολότερα σε μια προσομοίωση.
5. **Επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης:** Τέλος, πρέπει να επιλεγθεί η μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Εδώ χρησιμοποιείται ο εξελικτικός αλγόριθμος του λογισμικού EASY.

## 5.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι στηρίζονται σε ένα μοντέλο φυσικής και βιολογικής εξέλιξης, το οποίο προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Κάρολο Δαρβίνο [15]. Σύμφωνα με το Δαρβινικό μοντέλο, αιτία της εξέλιξης είναι η φυσική επιλογή, που οφείλεται στην ανάγκη για τη «διαίωσιση του είδους». Έτσι, κάθε άτομο και κάθε είδος αναπτύσσει εκείνες τις ιδιότητες που το βοηθούν να επιβιώσει ή δημιουργεί νέες, ανάλογα με το τι απαιτεί η προσαρμογή του στο περιβάλλον, ώστε να εξασφαλιστεί η συνέχεια, η «διαίωσιση». Σε κάθε νέα γενιά, υπάρχουν μικρές τυχαίες μεταλλάξεις στα άτομα, οι οποίες εάν συμβάλλουν στην ενδυνάμωση του είδους κυριαρχούν, αντίθετα καταστρέφονται. Η σύγχρονη βιοχημεία και η γενετική έχουν επεκτείνει τη θεωρία εισάγοντας την έννοια της κληρονομικότητας. Η κληρονομικότητα φροντίζει για τη μεταφορά των γονιδίων από τους γονείς στους απογόνους.

Στους εξελικτικούς αλγόριθμους, τα γονίδια αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος και η καταλληλότητα των υποψήφιων λύσεων υπολογίζεται με τις συναρτήσεις-στόχους. Συνεπώς, εάν οι αποκρίσεις των συναρτήσεων-στόχων είναι χαμηλές (για προβλήματα ελαχιστοποίησης), τα διανύσματα μεταβλητών που παράγουν αυτές τις αποκρίσεις, έχουν μεγάλες πιθανότητες να μεταφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στις επόμενες γενιές και να συμμετέχουν στις διαδικασίες εξέλιξης. Σε αντίθετη περίπτωση, τα διανύσματα μεταβλητών εμφανίζουν μικρές πιθανότητες «επιβίωσης» και ίσως τελικά εξαφανιστούν από τον πληθυσμό. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για αρκετές γενιές με αποτέλεσμα να επιβιώνουν τα καλά χαρακτηριστικά του διανύσματος



μεταβλητών, δηλαδή αυτά τα οποία συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης-στόχου.

### 5.2.1 Περιγραφή ενός (μ,λ) Εξελικτικού Αλγόριθμου

Ο αλγόριθμος EASY ανήκει στην κατηγορία των (μ,λ) εξελικτικών αλγορίθμων [1]. Χρησιμοποιεί τρεις πληθυσμούς σε κάθε γενιά: τους γονείς, τους απογόνους και τους επίλεκτους. Οι γονείς είναι συνήθως μικρότεροι σε πλήθος από τους απογόνους και διασταυρώνονται έτσι ώστε να προκύψουν οι απόγονοι. Οι επίλεκτοι αποτελούν το βέλτιστο διάνυσμα μεταβλητών μέχρι και τη γενιά τους. Συνήθως, επιλέγεται η προώθηση τους χωρίς καμία μετάλλαξη στην επόμενη γενιά, έτσι ώστε να μη χαθεί η βέλτιστη λύση.

Η διαδικασία που εφαρμόζεται στον εξελικτικό αλγόριθμο, που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία είναι η εξής:

1. **Επιλογή πλήθους γονέων και απογόνων:** Αρχικά καθορίζεται το πλήθος των γονέων,  $\mu$  και το πλήθος των απογόνων,  $\lambda$ . Εδώ, επιλέγεται  $\mu=5$  και  $\lambda=10$ . Εμπειρικά ισχύει η σχέση:

$$\mu = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}\right)\lambda \quad (5.6)$$

2. **Αρχικοποίηση:** Σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται μέσω μιας γεννήτριας παραγωγής τυχαίων αριθμών (RNG),  $\lambda$  διανύσματα μεταβλητών. Το σύνολο αυτών των διανυσμάτων αποτελεί τον πληθυσμό των απογόνων της μηδενικής γενιάς. Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής διανυσμάτων μεταβλητών από το χρήστη, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να εκκινήσει με την επιθυμητή αρχικοποίηση. Στην εργασία αυτή, εισάγεται ως απόγονος της μηδενικής γενιάς, το διάνυσμα μεταβλητών που αντιστοιχεί στην αρχική θέση των κλιματιστικών.
3. **Αξιολόγηση:** Καθένα από τα  $\lambda$  διανύσματα αξιολογείται, καλώντας το λογισμικό αξιολόγησης. Στο πέρας αυτής της διαδικασίας, όλα τα διανύσματα των απογόνων έχουν αντιστοιχιστεί σε μία τιμή συνάρτησης-στόχου. Εάν το πρόβλημα έχει περιορισμούς τότε υπολογίζονται και οι τιμές αυτών για να συμπεριληφθούν στις συναρτήσεις-στόχους. Εάν οι περιορισμοί ικανοποιούνται τότε λαμβάνεται υπόψη

μόνο η τιμή της συνάρτησης-στόχου για την επιλογή ή μη επιλογή του διανύσματος των μεταβλητών ως γονέα στην επόμενη γενιά. Αντίθετα εάν οι περιορισμοί δεν ικανοποιούνται τότε χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις ποινής. Πραγματοποιείται η υπόθεση ότι υπάρχει ο περιορισμός ανισο-ισότητας της μορφής :

$$c_k(\vec{x}) \leq c_{k,thres} \quad (5.7)$$

Ανάλογα με το μέγεθος της παραβίασης του περιορισμού, προστίθεται στις συναρτήσεις-στόχους ένας εκθετικός όρος ποινής της μορφής:

$$\exp\left(\alpha_k \frac{c_k(\vec{x}) - c_{k,thres}}{d_k^* - c_{k,thres}}\right) \quad (5.8)$$

όπου

- $\alpha_k$  είναι ο συντελεστής, ο οποίος καθορίζει την κλίση της εκθετικής καμπύλης. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο συντελεστής, τόσο πιο απότομη γίνεται η κλίση της εκθετικής καμπύλης και κατ' επέκταση γίνεται πιο μεγάλη η ποινή που επιβάλλεται στο διάνυσμα μεταβλητών.
- $c_k(\vec{x})$  είναι η τιμή που λαμβάνει ο περιορισμός για το διάνυσμα μεταβλητών  $\vec{x}$ .
- $c_{k,thres}$  είναι όριο του περιορισμού. Όταν ο περιορισμός λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του  $c_{k,thres}$  τότε επιβάλλεται ποινή σύμφωνα με τη σχέση 5.8.
- $d_k^*$  είναι μια τιμή μεγαλύτερη από το ανώτατο όριο του περιορισμού  $c_{k,thres}$  και ονομάζεται όριο χαλάρωσης. Εάν η τιμή του περιορισμού  $c_k(\vec{x})$  είναι μεγαλύτερη του ορίου χαλάρωσης τότε επιβάλλεται θανατική ποινή στο διάνυσμα μεταβλητών  $\vec{x}$ . Με τον όρο θανατική ποινή, εννοείται η απόρριψη ενός διανύσματος μεταβλητών από τον πληθυσμό του εξελικτικού αλγορίθμου ως μη-αποδεκτού.

Στην εργασία, εισάγεται περιορισμός για το υπόλοιπο (residual) της εξίσωσης της πίεσης. Πιο αναλυτικά, επιβάλλεται ποινή σε όσα διανύσματα εμφανίζουν υπόλοιπο πίεσης μεγαλύτερο της τιμής  $c_{k,thres} = 0.0006$ . Η εκθετική καμπύλη ορίζεται με το συντελεστή  $\alpha_k = 3$ . Το ανώτατο όριο του περιορισμού επιλέγεται ίσο με  $d_k^* = 0.0009$ .

4. **Ανανέωση πληθυσμού επίλεκτων:** Σε αυτό το στάδιο αντικαθιστούνται οι επίλεκτοι με όσοι μέλη της νέας γενιάς επιτυγχάνουν καλύτερες, δηλαδή χαμηλότερες τιμές συνάρτησης-στόχου (σε προβλήματα ελαχιστοποίησης).
5. **Ελιτισμός:** Με αυτήν τη διεργασία, διατηρείται το διάνυσμα μεταβλητών με την καλύτερη συνάρτηση-στόχο στην επόμενη γενιά χωρίς να υποστεί καμία αλλαγή. Αυτό εξασφαλίζει ότι οποτεδήποτε σταματήσει ο αλγόριθμος, προσφέρεται ως τρέχουσα βέλτιστη λύση η καλύτερη που έχει εμφανιστεί μέχρι εκείνη τη στιγμή.
6. **Επιλογή γονέων:** Στη διαδικασία επιλογής γονέων συμμετέχουν οι απόγονοι της τρέχουσας και οι γονείς της προηγούμενης γενιάς. Όσα διανύσματα μεταβλητών χαρακτηρίζονται από χαμηλές συναρτήσεις-στόχους έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγθούν ως γονείς σε σχέση με τα διανύσματα μεταβλητών που χαρακτηρίζονται από μεγάλες συναρτήσεις-στόχους. Σε κάθε περίπτωση, δίνεται σε όλα τα διανύσματα μεταβλητών έστω και μια μικρή θετική πιθανότητα επιλογής τους ως γονείς. Αυτό συμβαίνει για να διασφαλίζεται ότι ο αλγόριθμος δεν θα «εγκλωβιστεί» σε μια τοπικά βέλτιστη λύση. Στην εργασία, γίνεται πιθανοτικός διαγωνισμός ανάμεσα σε τρία διανύσματα μεταβλητών με το καλύτερο εξ αυτών να έχει πιθανότητα 90% να εκλεγεί γονέας, το αμέσως επόμενο καλύτερο διάνυσμα έχει πιθανότητα 9% και το τελευταίο 1%. Το διάνυσμα που εκλέγεται από το διαγωνισμό, γίνεται γονέας στην επόμενη γενιά. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μ φορές έτσι ώστε να εντοπιστούν οι μ γονείς της επόμενης γενιάς.
7. **Αναπαραγωγή:** Η νέα γενιά γονέων διασταυρώνεται προκειμένου να παραχθεί η νέα γενιά απογόνων. Η διασταύρωση πραγματοποιείται μεταξύ ενός, δύο ή περισσότερων γονέων. Εδώ, επιλέγεται η διασταύρωση τριών γονέων, σε 2 σημεία ανά μεταβλητή, για τη δημιουργία ενός απόγονου. Ο απόγονος περιέχει στο

διάνυσμα μεταβλητών του τμήματα του διανύσματος μεταβλητών των γονέων του. Συμπληρωματικά μετά από την αναπαραγωγή, εισάγεται το στοιχείο της μετάλλαξης. Η μετάλλαξη στοχεύει στην εισαγωγή νέου γενετικού υλικού στον πληθυσμό των απογόνων. Στην εργασία, η πιθανότητα μετάλλαξης της μεταβλητής σχεδιασμού  $x_i$  ενός διανύσματος μεταβλητών  $\vec{x}$  έχει οριστεί ίση με 2%. Στη δυαδική κωδικοποίηση, η μετάλλαξη επιτρέπει να αντιστραφεί ένα ψηφίο που θα επιλεγεί (αν ήταν 0 να γίνει 1 και αντιστρόφως).

8. **Έλεγχος Σύγκλισης:** Η περιγραφείσα διαδικασία τερματίζεται συνήθως όταν τελειώνει το διαθέσιμο υπολογιστικό απόθεμα ή ο διαθέσιμος υπολογιστικός χρόνος. Εδώ, επιλέγεται ο τερματισμός του αλγορίθμου ύστερα από 100 αξιολογήσεις καθώς τότε εξαντλείται ο διαθέσιμος υπολογιστικός χρόνος (περίπου 10.5 ημέρες). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση δύο εξαπύρηνων επεξεργαστών, Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v2. Επιπλέον είναι δυνατόν να εισαχθεί ως κριτήριο τερματισμού του εξελικτικού αλγορίθμου, το γεγονός ότι κατά τις τελευταίες  $k$  γενιές δεν έχει μεταβληθεί η βέλτιστη λύση. Εάν δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, τότε ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 3.

### 5.3 Λογισμικό αξιολόγησης

Το λογισμικό αξιολόγησης συνίσταται από το λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, OpenFOAM. Συμπληρωματικά πλαισιώνεται από μια ομάδα εντολών, οι οποίες εκτελούνται διαδοχικά και οδηγούν στον υπολογισμό της τιμής της συνάρτησης-στόχου. Τα βήματα, τα οποία ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Τα κλιματιστικά μετατοπίζονται κατά τους άξονες  $x, y, z$  και στρέφονται κατά γωνία  $\theta$  γύρω από το κέντρο βάρους τους σύμφωνα με το διάνυσμα  $\vec{x}$ .
- Γίνεται έλεγχος της θέσης των κλιματιστικών έτσι ώστε να μη συμπίπτουν στο χώρο και να μην τέμνονται με τα έπιπλα ή τους υπολογιστές/υπερυπολογιστές. Στην περίπτωση όπου οι νέες θέσεις των κλιματιστικών δεν περάσουν με επιτυχία τον έλεγχο τότε τερματίζεται η

αξιολόγηση και το αντίστοιχο διάνυσμα μεταβλητών λαμβάνει μια ποινή της τάξης  $10^9$ . Η διαδικασία συνεχίζεται με την αξιολόγηση νέου διανύσματος μεταβλητών από τον εξελικτικό αλγόριθμο.

- Εφόσον η χωροθέτηση των κλιματιστικών είναι έγκυρη, προσαρμόζεται η οριακή συνθήκη της ταχύτητας στην είσοδο των κλιματιστικών έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη ο νέος προσανατολισμός της μονάδας.
- Στη συνέχεια, επιλύεται η ροή με χρήση του επιλύτη simpleFoam, του λογισμικού OpenFOAM.
- Τέλος, υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης-στόχου και αποστέλλεται στον εξελικτικό αλγόριθμο προκειμένου να αποθηκευτεί.

Το διάγραμμα ροής του λογισμικού αξιολόγησης, παρουσιάζεται συνοπτικά στο σχήμα 5.3.1.



Σχήμα 5.3.1: Διάγραμμα ροής λογισμικού αξιολόγησης εξελικτικού αλγορίθμου

Στις παραγράφους 5.3.1-5.3.3, γίνεται αναφορά στους συμπληρωματικούς κώδικες που αναπτύχθηκαν για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης. Οι κώδικες αυτοί προγραμματίστηκαν σε γλώσσα Fortran 77 [25].

### 5.3.1 Μετακίνηση των κλιματιστικών

Προκειμένου να υλοποιηθεί η προσομοίωση μιας προτεινόμενης διάταξης, πρέπει να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα το οποίο μετακινεί τα κλιματιστικά σύμφωνα με το διάνυσμα των μεταβλητών  $\vec{x}$ . Υπενθυμίζεται ότι η γεωμετρία των κλιματιστικών περιέχεται σε αρχεία με κατάληξη (.stl) και περιγράφεται με τη χρήση επιφανειακού πλέγματος ορθογώνιων τριγώνων, τα οποία κείτονται στα επίπεδα  $xy, xz, yz$ . Η δομή ενός αρχείου στερεολιθογραφίας είναι η εξής:

```

solid name
facet normal   $n_i$    $n_j$    $n_z$ 
  outer loop
    vertex   $x_1$    $y_1$    $z_1$ 
    vertex   $x_2$    $y_2$    $z_2$ 
    vertex   $x_3$    $y_3$    $z_3$ 
  endloop
endfacet
...
facet normal   $n_i$    $n_j$    $n_z$ 
  outer loop
    vertex   $x_1$    $y_1$    $z_1$ 
    vertex   $x_2$    $y_2$    $z_2$ 
    vertex   $x_3$    $y_3$    $z_3$ 
  endloop
endfacet
endsolid name

```

Σχήμα 5.3.2: Δομή αρχείου στερεολιθογραφίας

Στην αρχή του αρχείου αναγράφεται το όνομα (name) του αντικειμένου που περιγράφεται. Κάθε επόμενες 7 γραμμές του αρχείου προσδιορίζουν πλήρως ένα ορθογώνιο τρίγωνο, το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία του αντικειμένου. Οι ποσότητες  $n_i, n_j, n_z$  είναι οι συνιστώσες του καθέτου μοναδιαίου διανύσματος του περιγραφόμενου τριγώνου στους άξονες  $x, y, z$ . Οι συντεταγμένες  $x_1, y_1, z_1$  είναι οι συντεταγμένες της πρώτης κορυφής του

τριγώνου. Ακολούθως οι συντεταγμένες  $x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$  περιγράφουν τις συντεταγμένες της δεύτερης και της τρίτης αντίστοιχα κορυφής του τριγώνου.

Κάθε κλιματιστικό εκτελεί δύο κινήσεις: μια μετατόπιση και μια στροφή. Η μετατόπιση ενός κλιματιστικού επιτυγχάνεται εάν σε κάθε συντεταγμένη  $x, y, z$  όλων των τριγώνων που το περιγράφουν, προστεθούν οι μετατοπίσεις  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  αντίστοιχα. Η διαδικασία για τη στροφή του κλιματιστικού είναι πιο σύνθετη καθώς πρέπει να οριστεί ένας άξονας γύρω από τον οποίο περιστρέφεται. Αυτός ο άξονας επιλέγεται να διέρχεται από το κέντρο βάρους του κλιματιστικού και να είναι παράλληλος με τον άξονα  $y$ . Πριν την εφαρμογή της μετατόπισης του κλιματιστικού, το κέντρο βάρους του κλιματιστικού μεταφέρεται στην αρχή των αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο, τα κλιματιστικά στρέφονται εν τέλει γύρω από τον άξονα  $y$  [2].

Κάθε σημείο της επιφάνειας του κλιματιστικού με συντεταγμένες  $(x_i, y_i, z_i)$  περιστρέφεται κατά μια γωνία  $\theta$  στο επίπεδο  $xz$  και αποκτά νέες μεταβατικές συντεταγμένες  $(x_i^*, y_i^*, z_i^*)$ . Η μετάβαση στις νέες συντεταγμένες γίνεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3 \quad (5.9)$$

Το ίδιο μητρώο εφαρμόζεται και για τη στροφή των καθέτων στις επιφάνειες των τριγώνων διανυσμάτων,

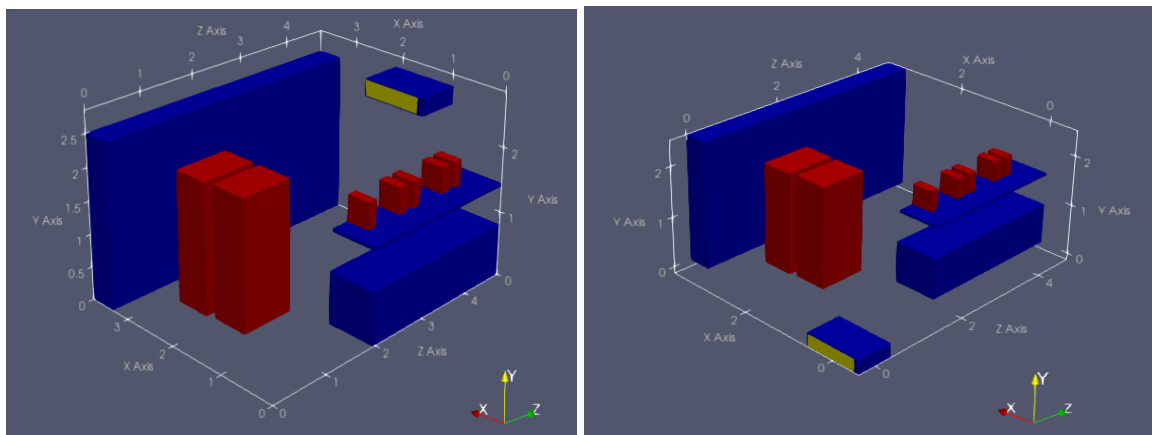
$$\begin{bmatrix} n_i' \\ n_j' \\ n_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_j \\ n_z \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια, το κλιματιστικό επιστρέφει στην αρχική του θέση και υπόκειται στη μετατόπιση που προβλέπεται από το διάνυσμα  $\vec{x}$  κατά τους άξονες  $x, y, z$ . Το μητρώο της μεταφοράς των κλιματιστικών διαμορφώνεται ως εξής:

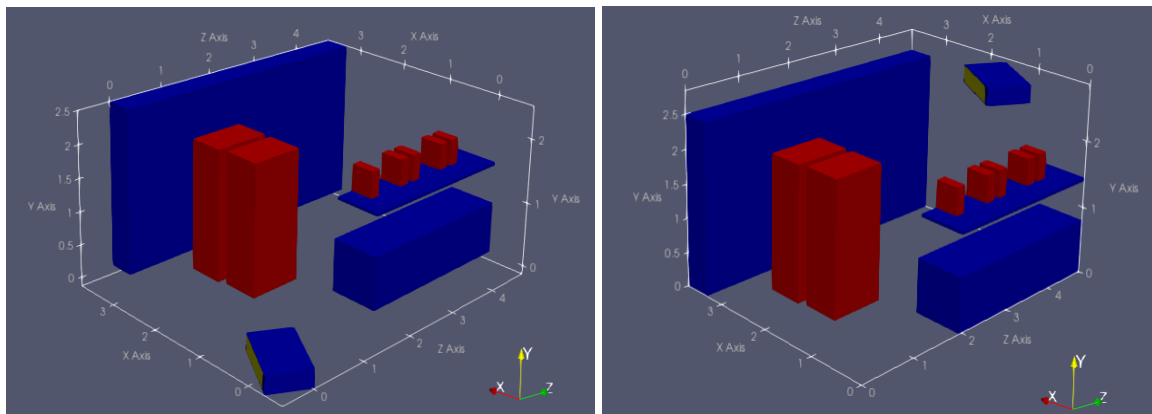
$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^* \\ y_i^* \\ z_i^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Τέλος, οι νέες συντεταγμένες και τα νέα κάθετα διανύσματα των τριγώνων εγγράφονται σε νέα αρχεία υπό τη μορφή που αναλύθηκε στο σχήμα 5.3.2.

Στα σχήματα 5.3.3, 5.3.4 παρουσιάζεται η διαδικασία στροφής του κλιματιστικού a κατά 20°. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τη στροφή των κλιματιστικών b και c.



**Σχήμα 5.3.3:** (αριστερά) Αρχική θέση κλιματιστικού a, (δεξιά) Μεταφορά του κέντρου βάρους του κλιματιστικού a στην αρχή των αξόνων



**Σχήμα 5.3.4:** (αριστερά) Στροφή του κλιματιστικού a κατά 20° γύρω από τον άξονα y, (δεξιά) Επιστροφή του κλιματιστικού a στην αρχική του θέση

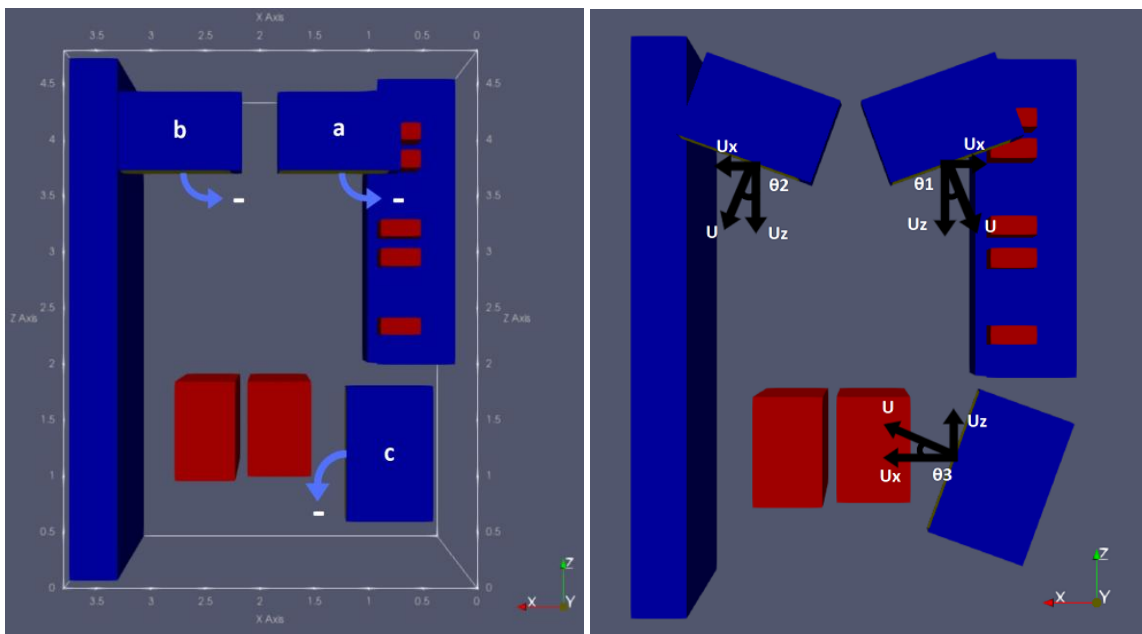


### 5.3.2 Έλεγχος εγκυρότητας θέσεων κλιματιστικών

Έχοντας μετακινήσει τα κλιματιστικά, προκύπτει η ανάγκη για τον έλεγχο της θέσης που αυτά κατέχουν στο χώρο. Αρχικά, αναπτύσσεται ένα υποπρόγραμμα το οποίο αποθηκεύει τις συντεταγμένες των ακμών κάθε κλιματιστικού, δηλαδή τις ποσότητες  $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ . Στη συνέχεια, εκτιμάται εάν αυτές οι τιμές βρίσκονται εντός συγκεκριμένων επιτρεπτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από την απαίτηση που προβλέπει να μην επικαλύπτονται τα κλιματιστικά μεταξύ τους καθώς και να μη συμπίπτουν με τα έπιπλα του χώρου ή τους υπολογιστές/υπερυπολογιστές.

### 5.3.3 Στροφή διανύσματος ταχύτητας στην είσοδο των κλιματιστικών

Μια επιπλέον ανάγκη που ανακύπτει είναι η στροφή των διανυσμάτων της ταχύτητας εισόδου του αέρα από τα κλιματιστικά έτσι ώστε αυτά να εναρμονίζονται με τις νέες θέσεις των κλιματιστικών. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, σε κάθε κλιματιστικό αναλύονται οι συνιστώσες της ταχύτητας σε δύο διανύσματα: το πρώτο διάνυσμα βρίσκεται στη διεύθυνση του άξονα x και το δεύτερο στη διεύθυνση του άξονα z. Η διεργασία που πραγματοποιείται για διάφορες γωνίες στροφής των κλιματιστικών, αποτυπώνεται στο σχήμα 5.3.5.



Σχήμα 5.3.5: (αριστερά) Ορισμός αρνητική φοράς γωνίας  $\theta$ , (δεξιά) Ανάλυση των συνιστωσών της ταχύτητας για περιστροφή των κλιματιστικών a κατά  $-20^\circ$ , b κατά  $20^\circ$  και c κατά  $20^\circ$

Στο σχήμα 5.3.5, το κλιματιστικό a έχει στραφεί κατά  $-20^\circ$ , το κλιματιστικό b κατά  $20^\circ$  και το κλιματιστικό c κατά  $20^\circ$ .

Η ταχύτητα  $\vec{u}$  έχει μέτρο ίσο με 4.5m/s. Εφαρμόζοντας τριγωνομετρικές ιδιότητες, προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού των συνιστωσών των ταχυτήτων των μετατοπισμένων κατά τη γωνία  $\theta$  κλιματιστικών.

Για τα κλιματιστικά a και b χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$u_x = 4.5 \sin \theta \quad (5.12)$$

$$u_y = 0 \quad (5.13)$$

$$u_z = -4.5 \cos \theta \quad (5.14)$$

όπου χρησιμοποιείται  $\theta = \theta_1, \theta_2$  ανάλογα με το κλιματιστικό a,b του οποίου υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας.

Για το κλιματιστικό c εφαρμόζονται οι σχέσεις:

$$u_x = 4.5 \cos \theta_3 \quad (5.15)$$

$$u_y = 0 \quad (5.16)$$

$$u_z = 4.5 \sin \theta_3 \quad (5.17)$$

Σε όλες τις περιπτώσεις, η γωνία  $\theta$  εισάγεται με πρόσημο στις παραπάνω σχέσεις. Η αρνητική φορά της γωνίας  $\theta$  προσδιορίζεται σύμφωνα με το σχήμα 5.3.5.

# Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

## Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

---

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία ανάλυσης και βελτιστοποίησης της ψύξης του υπολογιστικού κέντρου. Στη συνέχεια, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της χωροθέτησης των κλιματιστικών. Γίνεται ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, προτείνονται θέματα για περαιτέρω εμβάθυνση στο πεδίο της ψύξης χώρων που φιλοξενούν clusters/υπολογιστές.

Η ανάλυση της ροής του υπολογιστικού κέντρου υλοποιήθηκε με την επίλυση των RANS εξισώσεων μέσω του επιλύτη simpleFoam του λογισμικού OpenFOAM. Το πλέγμα, το οποίο επιλέχθηκε, αποτελείται από 1.063.720 κελιά και αναλύθηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3. Οι οριακές συνθήκες των μεταβλητών ροής και των τυρβωδών μεγεθών, όπως έχουν επιβληθεί στις οριακές επιφάνειες του μελετώμενου χώρου, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Οριακές συνθήκες μελετώμενου προβλήματος

Μεταβλητή	Είσοδος AC a/b	Έξοδος AC a/b	Είσοδος AC c	Έξοδος AC c	Έπιπλα (ράφι, βιβλιοθήκη κλπ.)	Cluster a	Cluster b	H/Y
$u$ (m/s)	4.5	$\nabla u = 0$	4.5	$\nabla u = 0$	0	0	0	0
$p$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\nabla p = 0$	0	$\nabla p = 0$	0	$\nabla p = 0$	$\nabla p = 0$	$\nabla p = 0$	$\nabla p = 0$
$T$ (°C)	10	$\nabla T = 0$	10	$\nabla T = 0$	$\nabla T = 0$	$\nabla T = 15713.6$	$\nabla T = 7203.7$	$\nabla T = 7340.0$
$k$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	0.01215	$\nabla k = 0$	0.01215	$\nabla k = 0$	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου
$\varepsilon$ (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	0.059049	$\nabla \varepsilon = 0$	0.059049	$\nabla \varepsilon = 0$	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου	Συνάρτ. τοιχίου

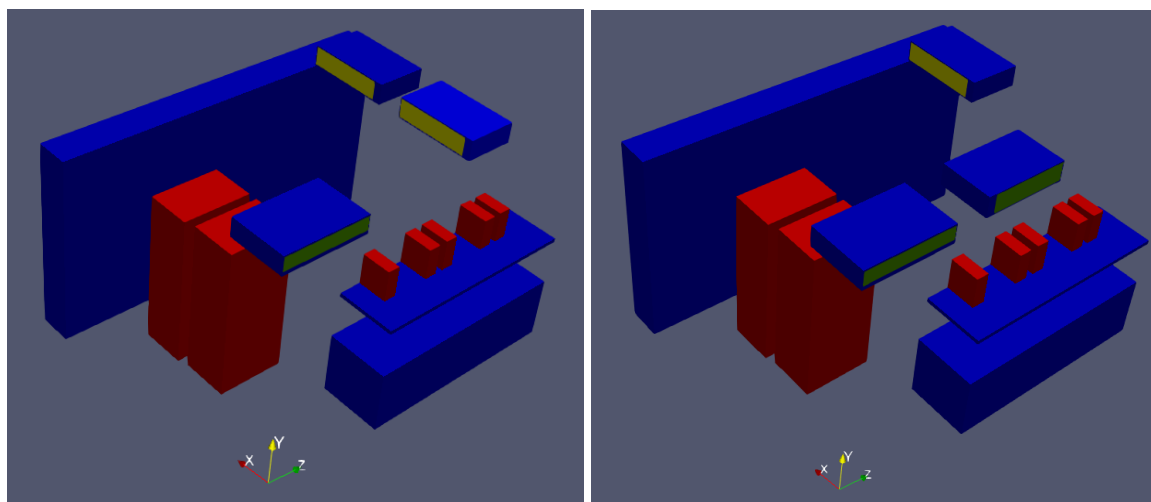
Οι σημαντικότερες παράμετροι ρύθμισης του εξελικτικού αλγορίθμου EASY αποτυπώνονται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Βασικές ρυθμίσεις εξελικτικού αλγορίθμου EASY

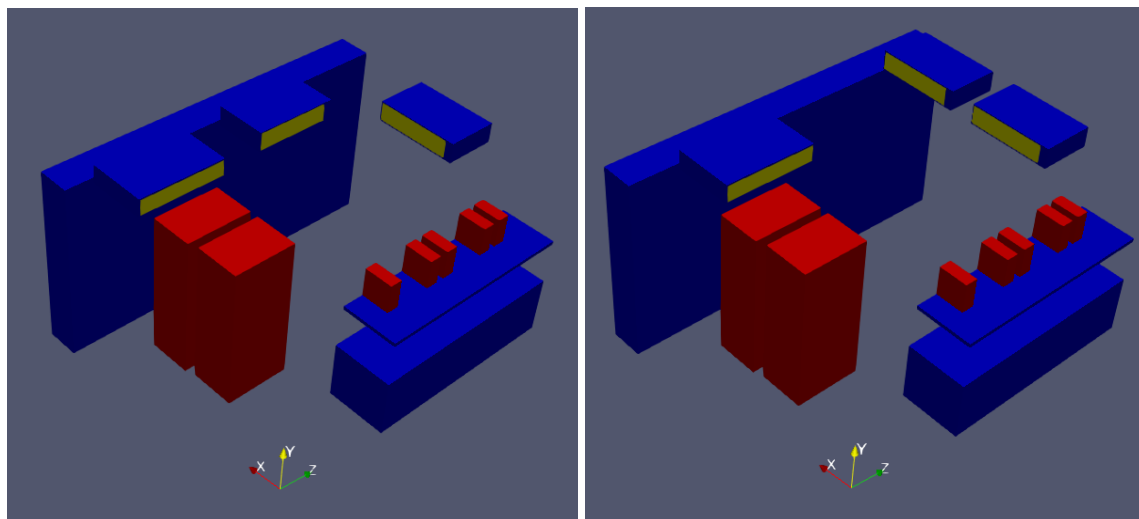
Ρυθμίσεις EASY	
Πλήθος γονέων	5
Πλήθος απογόνων	10
Πλήθος επίλεκτων	1
Σχήμα διασταύρωσης (Crossover)	2 σημεία/μεταβλητή
Πιθανότητα μετάλλαξης (Mutation)	2%
Μέγιστη πιθανότητα επιλογής ενός διανύσματος μεταβλητών ως γονέα	90%
Ελάχιστη πιθανότητα επιλογής ενός διανύσματος μεταβλητών ως γονέα	1%
Όριο σύγκλισης/αξιολογήσεων	100

## 6.1 Αποτελέσματα

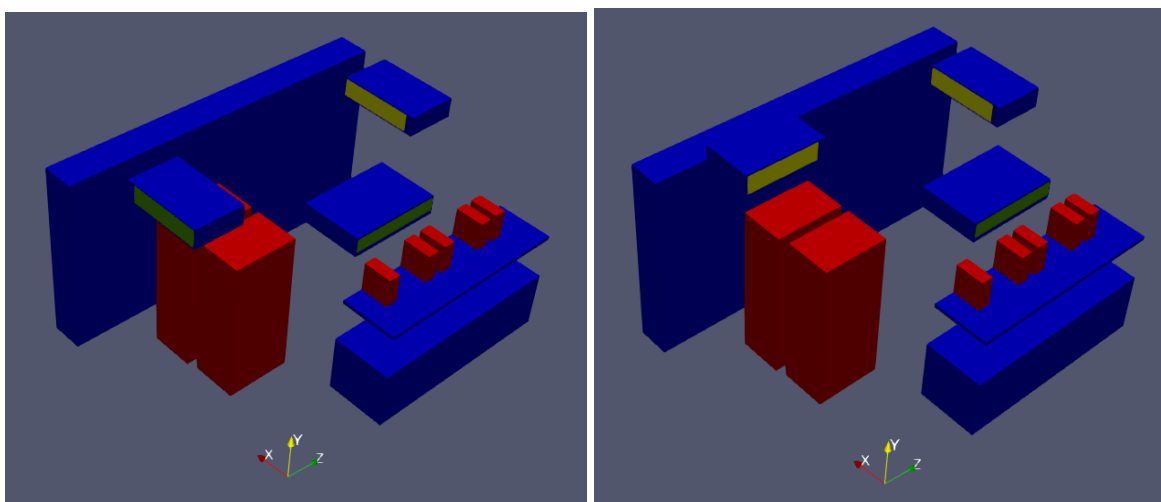
Η αναζήτηση της βέλτιστης χωροθέτησης των κλιματιστικών πραγματοποιήθηκε ελέγχοντας αρχικά έξι βασικές πιθανές διατάξεις. Η μορφή αυτών των διατάξεων στο χώρο καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις εμφανίζονται στα σχήματα 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 και στον πίνακα 6.1.1.



Σχήμα 6.1.1: (αριστερά) 1<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 2<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών



Σχήμα 6.1.2: (αριστερά) 3<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 4<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών



Σχήμα 6.1.3: (αριστερά) 5<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών, (δεξιά) 6<sup>η</sup> Διάταξη κλιματιστικών

Πίνακας 6.1.1: Αποτελέσματα μελέτης των έξι βασικών διατάξεων

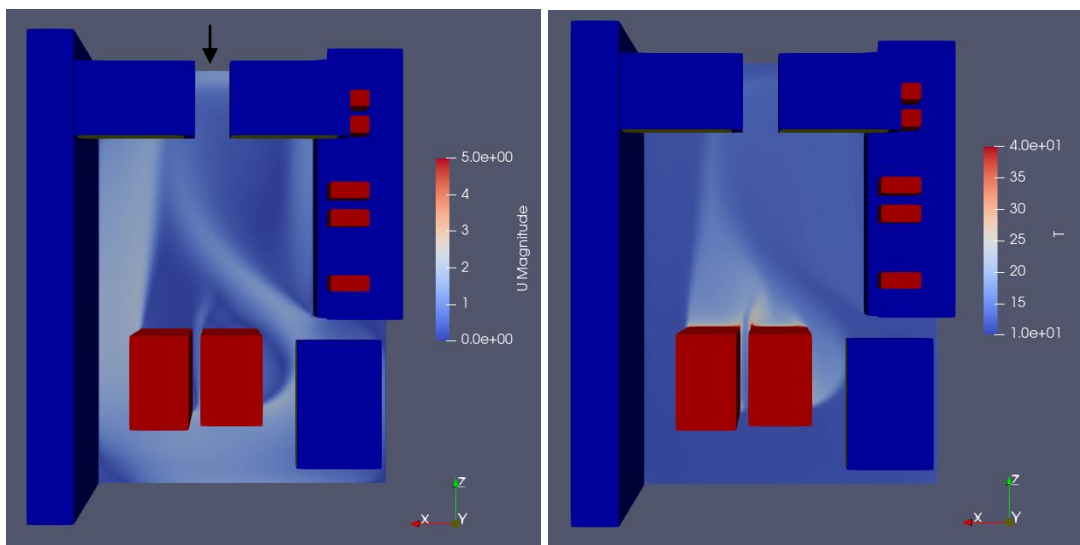
Διάταξη κλιματιστικών	Μέση θερμοκρασία δωματίου (°C)	Όγκος υπερθερμασμένων κυψελών (°C m <sup>3</sup> )	Υπόλοιπο πίεσης (residual)	Υπόλοιπο θερμοκρασίας (residual)
1	13.08	$7.6670 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-6}$	$1.35 \cdot 10^{-7}$
2	13.37	$1.5140 \cdot 10^{-1}$	$2.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-4}$
3	12.69	$1.7758 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-7}$	$3.25 \cdot 10^{-8}$
4	13.14	$3.0520 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$1.00 \cdot 10^{-7}$
5	13.67	$1.5510 \cdot 10^{-1}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$1.89 \cdot 10^{-5}$
6	13.29	$1.4064 \cdot 10^{-1}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$1.20 \cdot 10^{-4}$

Σημείωση: Η 1<sup>η</sup> διάταξη είναι η αρχική χωροθέτηση των κλιματιστικών στο υπολογιστικό κέντρο.

Μελετώντας τον πίνακα 6.1.1, παρατηρείται ότι οι διατάξεις 2,5,6 δεν αποτελούν καλές επιλογές καθώς εμφανίζουν μεγάλη μέση θερμοκρασία δωματίου και υψηλό όγκο υπερθερμασμένων κυψελών του πλέγματος. Συμπληρωματικά, οι συγκεκριμένες διατάξεις δεν επιτυγχάνουν ικανοποιητική σύγκλιση, συνεπώς τα αποτελέσματα τους κρίνονται ως μη-αξιόπιστα. Η δυσκολία σύγκλισης αποδίδεται στα κυβικής μορφής σώματα που είναι τοποθετημένα μέσα στο χώρο, και στις επαγόμενες ανακυκλοφορούσες ροές στις πλευρές αυτών. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται η βελτιστοποίηση των διατάξεων 1,3 και 4.

## Αρχικό δωμάτιο

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής της αρχικής διάταξης των κλιματιστικών παρουσιάζονται στα σχήματα 6.1.4 έως 6.1.6.

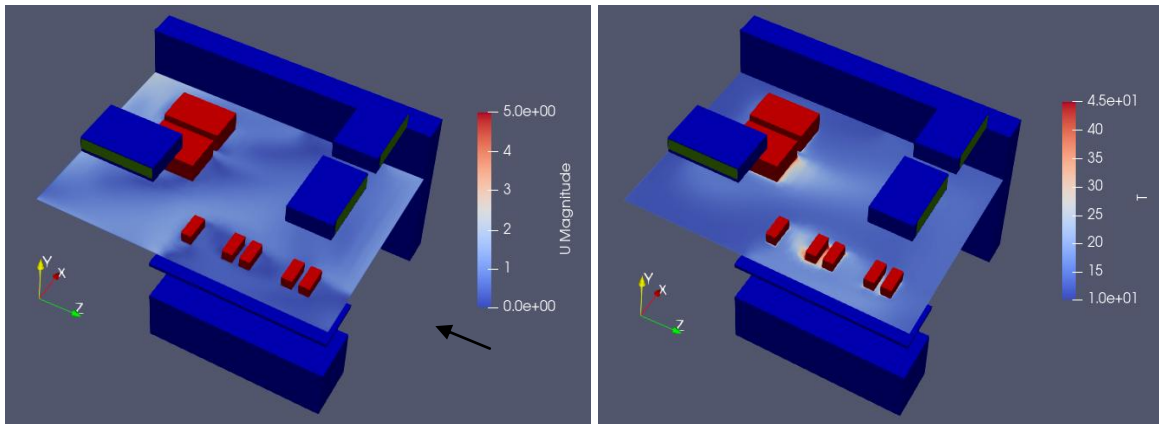


Σχήμα 6.1.4: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα

Σημείωση: Η φορά θέασης του δωματίου συμβολίζεται με το μαύρο βέλος, που αποτυπώνεται σε κάθε σχήμα.

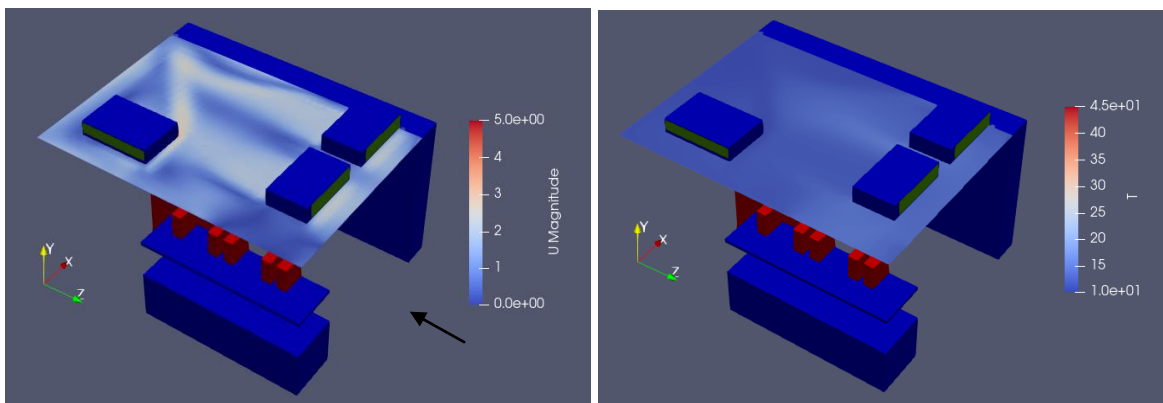
Αναλύοντας το σχήμα 6.1.4, φαίνεται ότι υπάρχει αποκόλληση της ροής στο πλευρικό τμήμα του cluster a. Αποκόλληση της ροής εμφανίζεται επίσης στη γωνία που σχηματίζει ο αποθηκευτικός χώρος καθώς και στις γωνίες του δωματίου. Υψηλές θερμοκρασίες

καταγράφονται στην περιοχή μπροστά από τα clusters, όπου ο αέρας κυκλοφορεί με πολύ μικρή ταχύτητα.



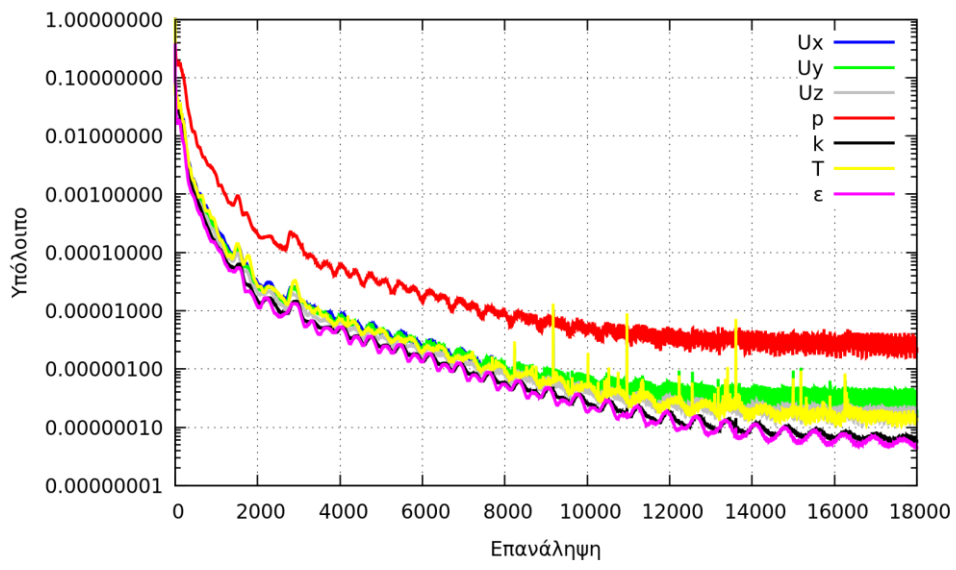
Σχήμα 6.1.5: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα

Στο επίπεδο  $y=1.70\text{m}$ , παρατηρείται μικρή ταχύτητα του αέρα ανάμεσα στους υπολογιστές που βρίσκονται πάνω στο ράφι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογιστής b εμφανίζει θερμοκρασία ίση με  $T=44.8^\circ\text{C}$ . Επιπλέον, σημειώνεται ότι στο μπροστινό τμήμα του cluster a δεν απάγεται πλήρως η θερμότητα, με άμεση συνέπεια την εμφάνιση αυξημένων θερμοκρασιών.



Σχήμα 6.1.6: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της αρχικής διάταξης στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα

Στο επίπεδο  $y=2.50\text{m}$ , εντοπίζεται η αποκόλληση της ροής στο περίβλημα του κλιματιστικού c. Η αλληλεπίδραση των τριών ροών των κλιματιστικών φαίνεται να ωθεί τον αέρα προς τη δεξιά γωνία στο βάθος του δωματίου. Οι θερμοκρασίες σε αυτό το επίπεδο είναι χαμηλές, καθώς έχουμε απομακρυνθεί από τους υπολογιστές/υπερυπολογιστές.

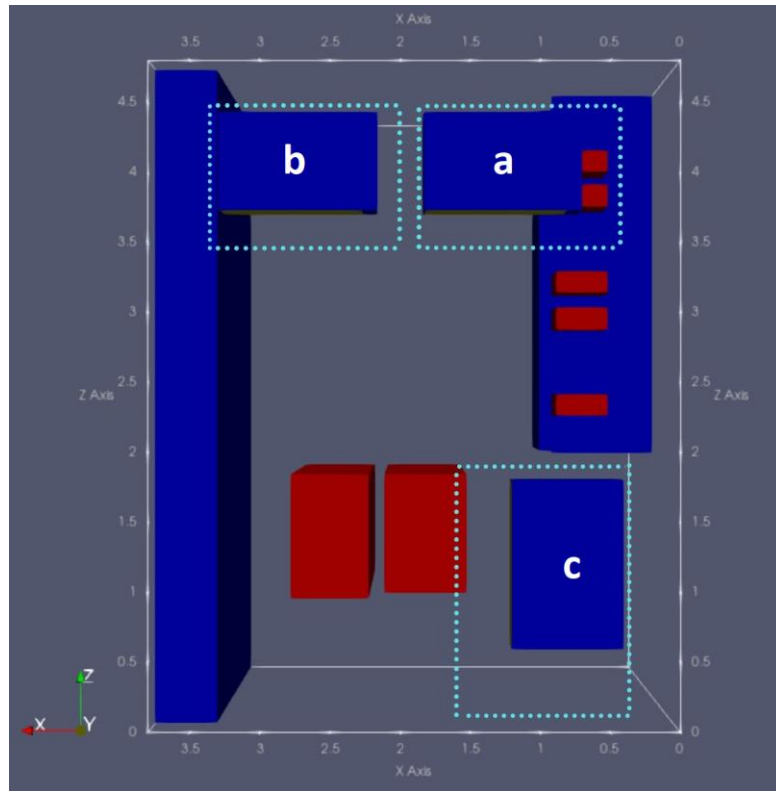


Σχήμα 6.1.7: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της αρχικής διάταξης



## Βελτιστοποιημένη διάταξη 1

Κατά τη βελτιστοποίηση της διάταξης 1 (αρχική διάταξη), τα κλιματιστικά μετακινούνται και στρέφονται από την αρχική τους θέση σε ένα ορισμένο επιτρεπόμενο εύρος. Το εύρος αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.8 και στον πίνακα 6.1.2.



Σχήμα 6.1.8: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 1<sup>ης</sup> διάταξης

Πίνακας 6.1.2: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 1<sup>ης</sup> διάταξης

Μεταβλητή σχεδιασμού	Ερμηνεία	$x_{low}^i$	$x_{upp}^i$	bits	Βήμα $\Delta x_i$
$x_1$	$\Delta x$ του a	-0.21	0.00	3	0.03
$x_2$	$\Delta y$ του a	-0.21	0.24	4	0.03
$x_3$	$\Delta z$ του a	-0.30	0.00	4	0.02
$x_4$	$\Delta x$ του b	-0.14	0.00	3	0.02
$x_5$	$\Delta y$ του b	0.00	0.21	3	0.03
$x_6$	$\Delta z$ του b	-0.30	0.00	4	0.02
$x_7$	$\Delta x$ του c	0.00	0.45	4	0.03
$x_8$	$\Delta y$ του c	-0.21	0.24	4	0.03
$x_9$	$\Delta z$ του c	-0.52	0.10	5	0.02
$x_{10}$	$\theta_1$ του a	-21	24	4	3.0
$x_{11}$	$\theta_2$ του b	-21	24	4	3.0
$x_{12}$	$\theta_3$ του c	-21	24	4	3.0

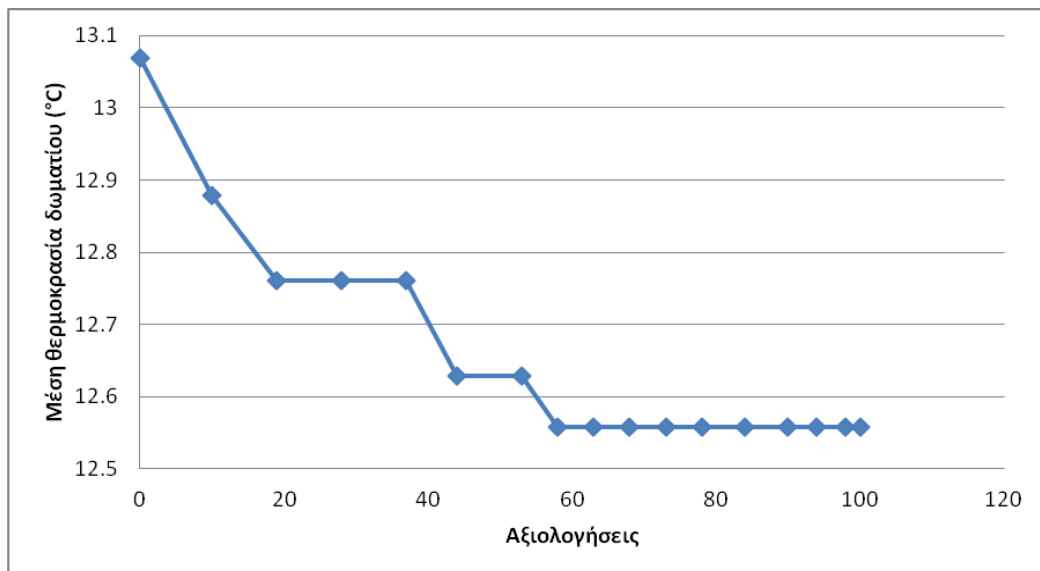
Σημείωση: Οι παραπάνω μετατοπίσεις δίνονται σε μέτρα ενώ οι γωνίες στροφής σε μοίρες. Η αρνητική φορά της γωνίας  $\theta$  έχει οριστεί στο σχήμα 5.3.5.

Ο βελτιστοποιημένος κλιματισμός του δωματίου προκύπτει για το διάνυσμα μεταβλητών:

**Πίνακας 6.1.3:** Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 1

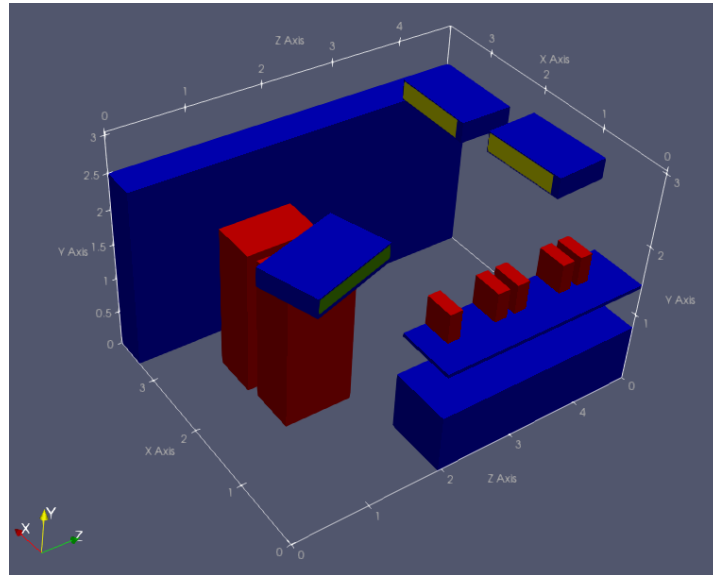
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
-0.18	0.21	-0.06	-0.14	0.12	-0.14	0.27	-0.09	-0.14	-3	0	-18

Η πορεία σύγκλισης του λογισμικού EASY παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.9.

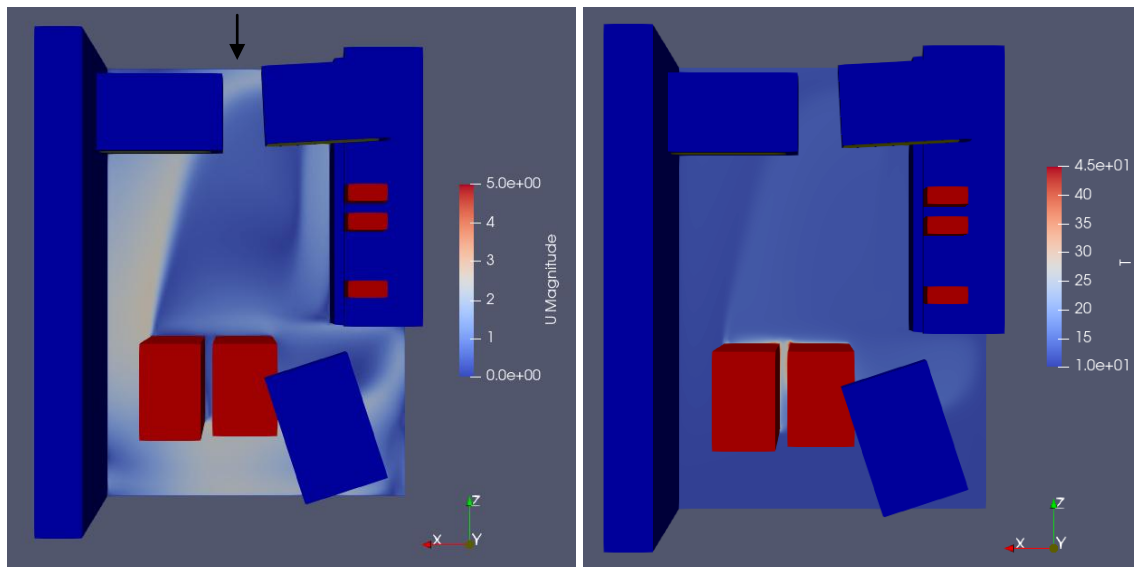


**Σχήμα 6.1.9:** Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 1<sup>ης</sup> διάταξης

Η βελτιστοποιημένη χωροθέτηση των κλιματιστικών καθώς και η προσομοίωση της ροής της, παρουσιάζεται στα σχήματα 6.1.10 έως 6.1.13.

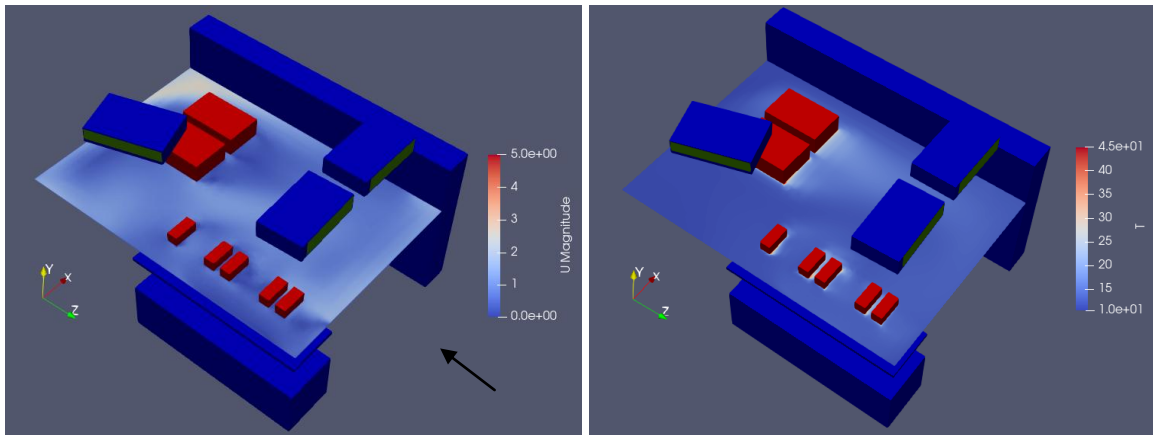


Σχήμα 6.1.10: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 1<sup>ης</sup> διάταξης



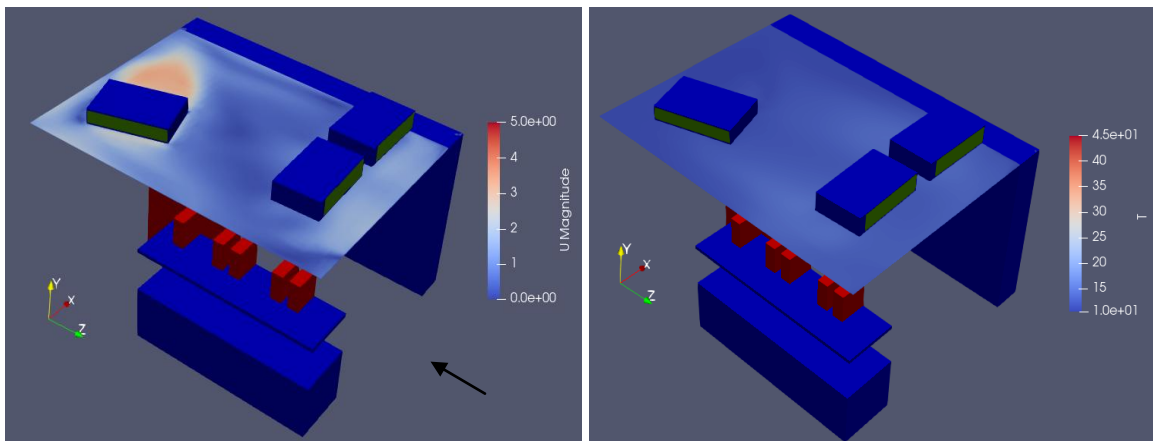
Σχήμα 6.1.11: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα

Σύμφωνα με το σχήμα 6.1.11, η ροή αποκολλάται μπροστά από τους υπερυπολογιστές και το ράφι. Σ' αυτήν την περιοχή εντοπίζονται ιδιαίτερα χαμηλές ταχύτητες, γεγονός που καθιστά την ψύξη των υπερυπολογιστών μερικώς επιτυχημένη. Συμπληρωματικά, διαπιστώνεται ότι θερμοκρασία ανάμεσα στα δύο clusters είναι αυξημένη.



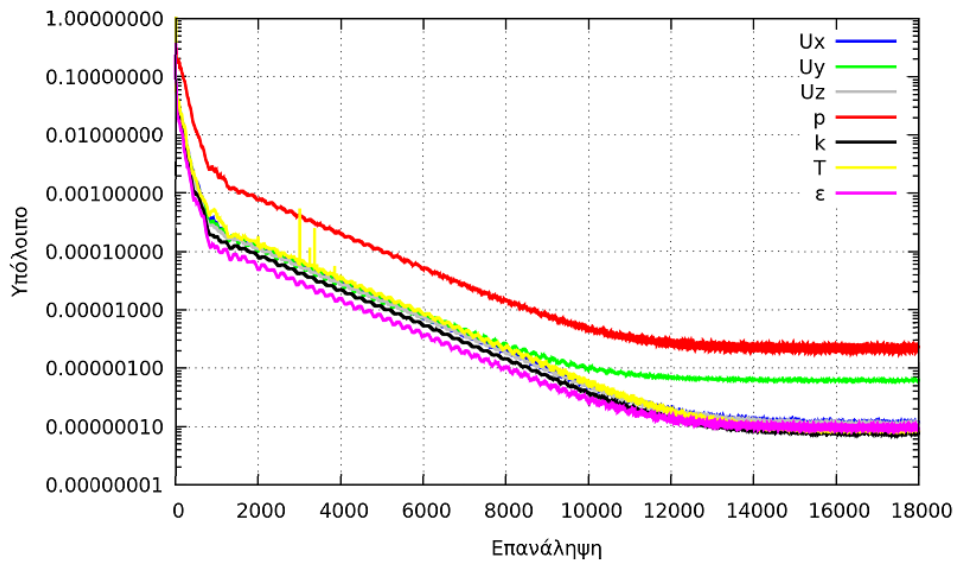
Σχήμα 6.1.12: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα

Μελετώντας το σχήμα 6.1.12, διαπιστώνεται ότι στη δεξιά γωνία του δωματίου, πίσω από τα clusters, εμφανίζεται μεγάλη ταχύτητα του αέρα. Πιο συγκεκριμένα, ο αέρας ανακυκλοφορεί σε αυτήν την περιοχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία γύρω από το cluster b είναι αυξημένη σε σχέση με αυτήν του cluster a, παρά το γεγονός ότι το θερμικό φορτίο του cluster a είναι σχεδόν διπλάσιο από αυτό του cluster b. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη σημασία της τοποθέτησης των κλιματιστικών στις κατάλληλες θέσεις.



Σχήμα 6.1.13: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα

Η συγκεκριμένη τομή περιγράφει την κατάσταση της ροής του αέρα στο επίπεδο όπου βρίσκεται το κλιματιστικό c. Η ταχύτητα του αέρα που εξέρχεται από το κλιματιστικό c έχει φορά προς τη δεξιά γωνία που βρίσκεται στο βάθος του δωματίου. Η θερμοκρασία παρουσιάζεται ελαφρώς αυξημένη στην περιοχή κάτω από τα κλιματιστικά a, b.



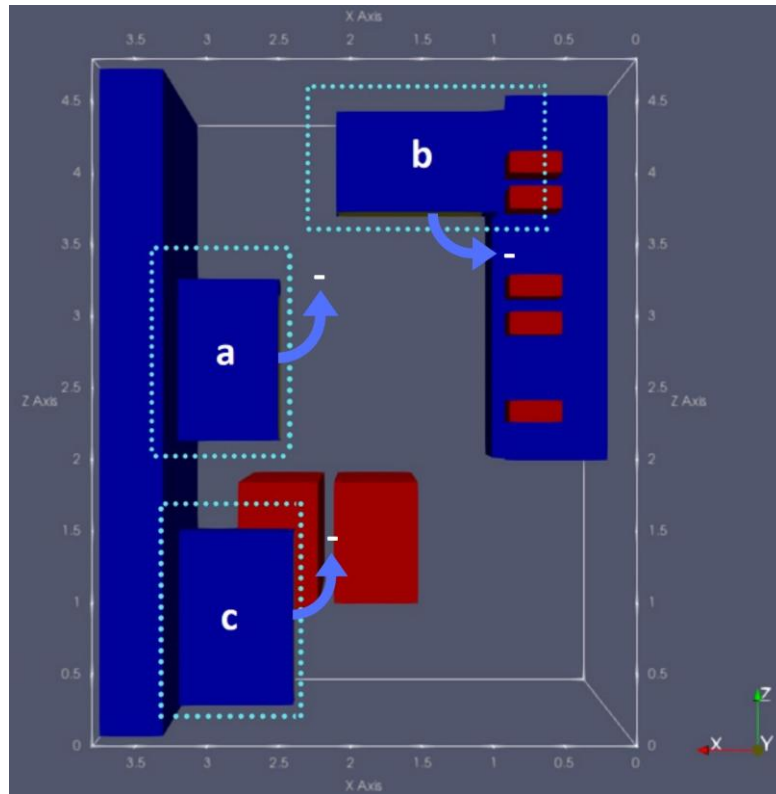
Σχήμα 6.1.14: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1

Πίνακας 6.1.4: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 1

Βελτιστοποιημένη διάταξη 1	Μέση θερμοκρασία δωματίου (°C)	Όγκος υπερθερμασμένων κυψελών (°C m <sup>3</sup> )	Υπόλοιπο πίεσης (residual)	Υπόλοιπο θερμοκρασίας (residual)
		12.56	$9.1875 \cdot 10^{-2}$	$2.29 \cdot 10^{-6}$

## Βελτιστοποιημένη διάταξη 3

Κατά τη βελτιστοποίηση της διάταξης 3, επιτρέπεται η μετακίνηση και η στροφή των κλιματιστικών από την αρχική τους θέση (βλ. διάταξη 3 , σχήμα 6.1.2) στο εύρος που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.15 και στον πίνακα 6.1.5.



Σχήμα 6.1.15: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 3<sup>ης</sup> διάταξης

Πίνακας 6.1.5: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 3<sup>ης</sup> διάταξης

Μεταβλητή σχεδιασμού	Ερμηνεία	$x_{low}^i$	$x_{upp}^i$	bits	Βήμα $\Delta x_i$
$x_1$	$\Delta x$ του a	-0.06	0.24	4	0.02
$x_2$	$\Delta y$ του a	0.00	0.45	4	0.03
$x_3$	$\Delta z$ του a	-0.10	0.20	4	0.02
$x_4$	$\Delta x$ του b	-0.30	0.15	4	0.03
$x_5$	$\Delta y$ του b	-0.12	0.33	4	0.03
$x_6$	$\Delta z$ του b	-0.06	0.15	3	0.03
$x_7$	$\Delta x$ του c	-0.06	0.24	4	0.02
$x_8$	$\Delta y$ του c	0.00	0.45	4	0.03
$x_9$	$\Delta z$ του c	-0.18	0.12	4	0.02
$x_{10}$	$\theta_1$ του a	-21	24	4	3.0
$x_{11}$	$\theta_2$ του b	-21	24	4	3.0
$x_{12}$	$\theta_3$ του c	-21	24	4	3.0

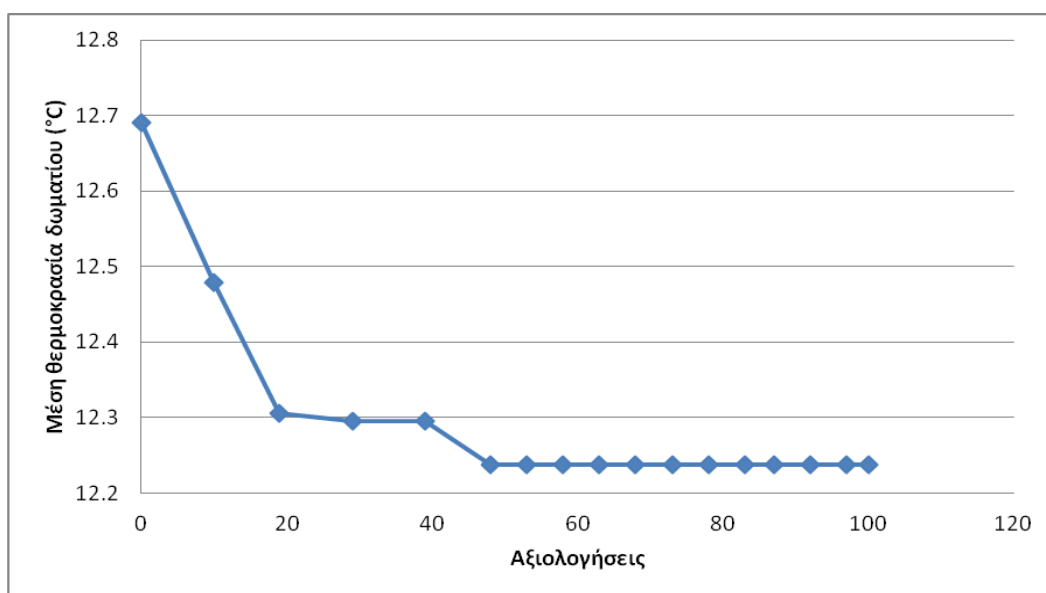
Σημειώνεται ότι στο σχήμα 6.1.15 ορίζεται η αρνητική φορά στροφής των κλιματιστικών.

Ο βελτιστοποιημένος κλιματισμός του δωματίου προκύπτει για το διάνυσμα μεταβλητών:

**Πίνακας 6.1.6:** Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 3

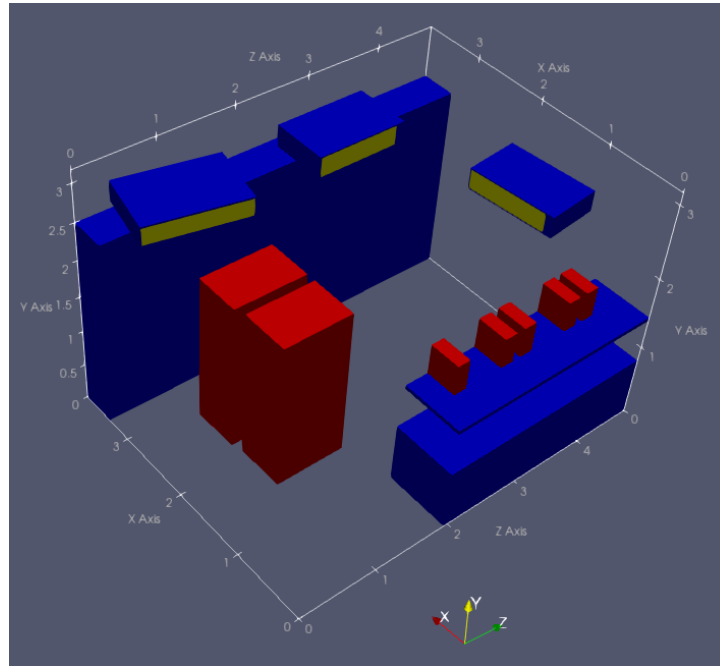
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
0.06	0.33	0.02	-0.12	-0.09	0.06	0.16	0.33	-0.16	0	-6	12

Η πορεία σύγκλισης του λογισμικού EASY παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.1.16.

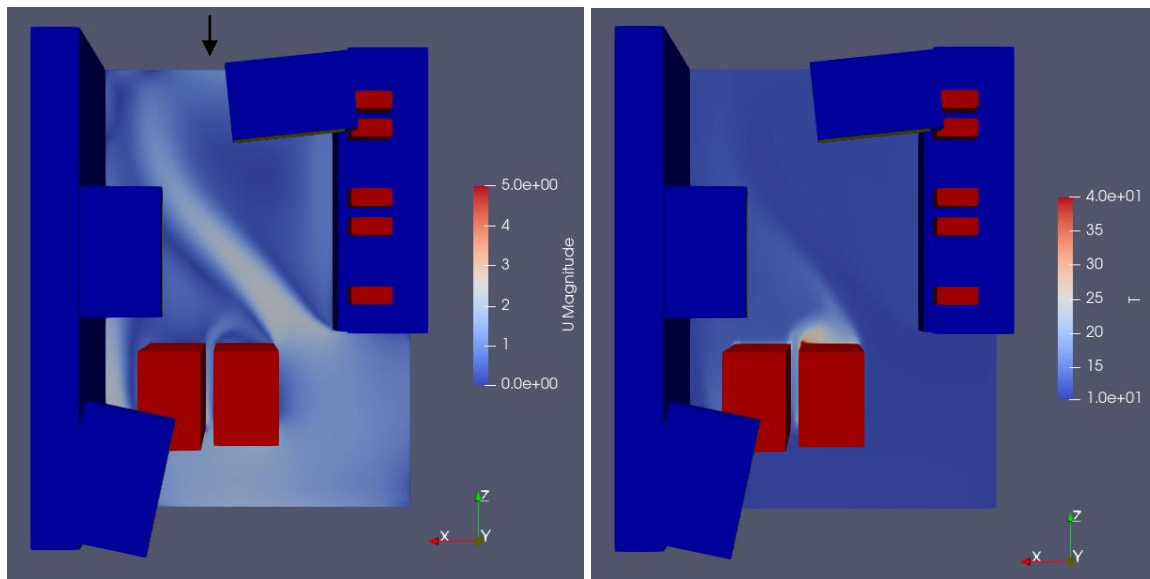


**Σχήμα 6.1.16:** Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 3<sup>ης</sup> διάταξης

Η βελτιστοποιημένη χωροθέτηση των κλιματιστικών καθώς και η προσομοίωση της ροής της, προβάλλονται στα σχήματα 6.1.17 έως 6.1.20.



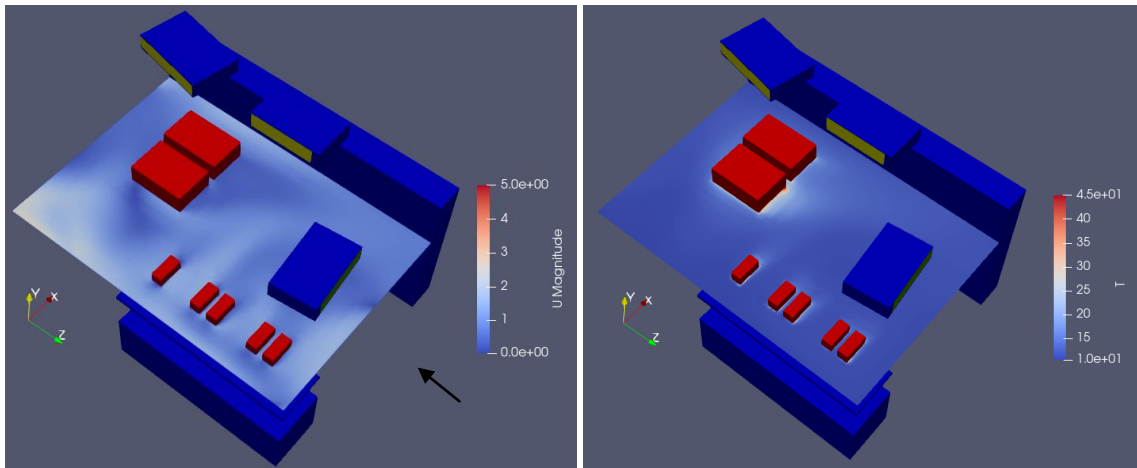
Σχήμα 6.1.17: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 3<sup>ης</sup> διάταξης



Σχήμα 6.1.18: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα

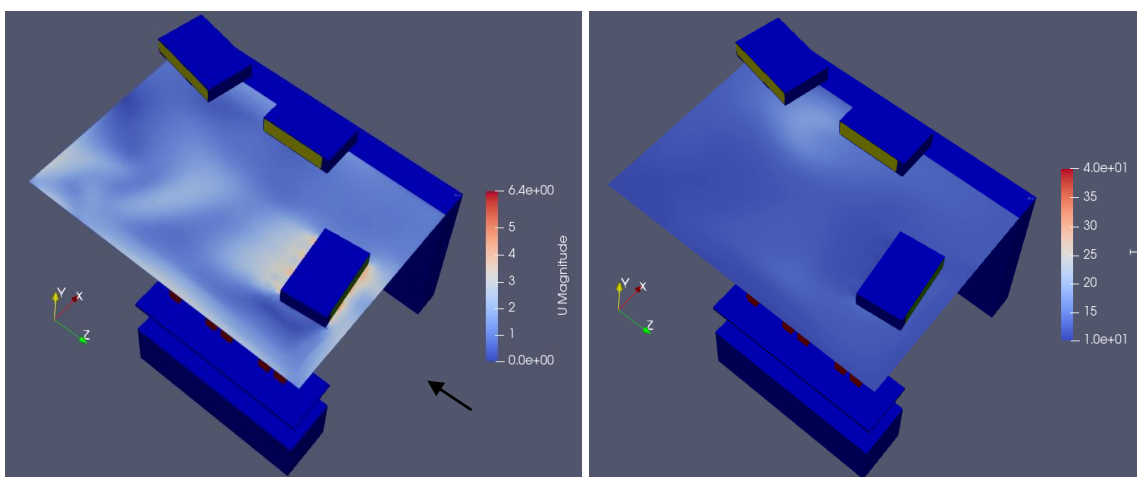
Παρατηρείται ανακυκλοφορία του αέρα στο μπροστινό τμήμα του cluster a και στο δεξί πλευρικό τμήμα του cluster b. Επιπλέον, είναι καταφανές ότι ο αέρας ανακυκλοφορεί στην περιοχή που εντοπίζεται μπροστά από τον αποθηκευτικό χώρο. Οι μεγάλες ταχύτητες του αέρα εντοπίζονται στο βάθος του δωματίου. Η θερμοκρασία εμφανίζεται αυξημένη στο μπροστινό τμήμα του cluster a.





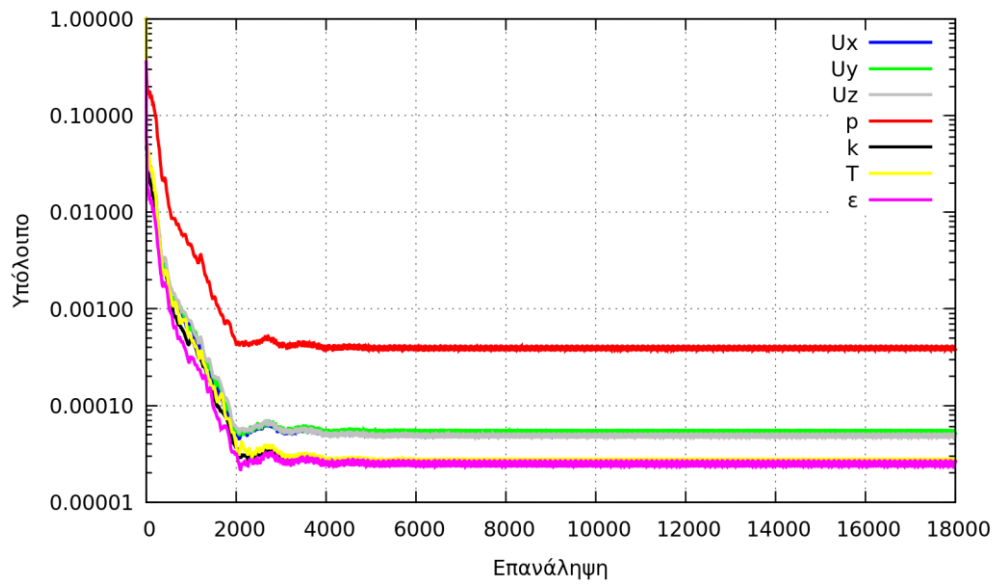
**Σχήμα 6.1.19:** Πεδίο της ταχύτητας και θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα

Στη γωνία του δωματίου, όπου είναι τοποθετημένη η αρχή των αξόνων, εντοπίζεται αυξημένη ταχύτητα του αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συμβολή των ρευμάτων των τριών κλιματιστικών οδηγεί τον αέρα προς αυτήν την περιοχή. Οι θερμοκρασίες γύρω από τους πέντε υπολογιστές είναι χαμηλές λόγω της καλής κυκλοφορίας του αέρα ( $u \approx 1\text{m/s}$ ) πάνω στο ράφι. Συμπληρωματικά, σημειώνεται ότι γύρω από τις ακμές του cluster α παρουσιάζονται θερμοκρασίες της τάξης των  $44^\circ\text{C}$ .



**Σχήμα 6.1.20:** Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα

Το επίπεδο  $y=2.50\text{m}$  τέμνει το κλιματιστικό b στο κάτω τμήμα του περιβλήματος του. Γι' αυτόν το λόγο, η ταχύτητα κοντά στην είσοδο και στην έξοδο του κλιματιστικού παρουσιάζεται αυξημένη. Η θερμοκρασία αυξάνεται στην περιοχή που εκτείνεται κάτω από τα κλιματιστικά a και c.



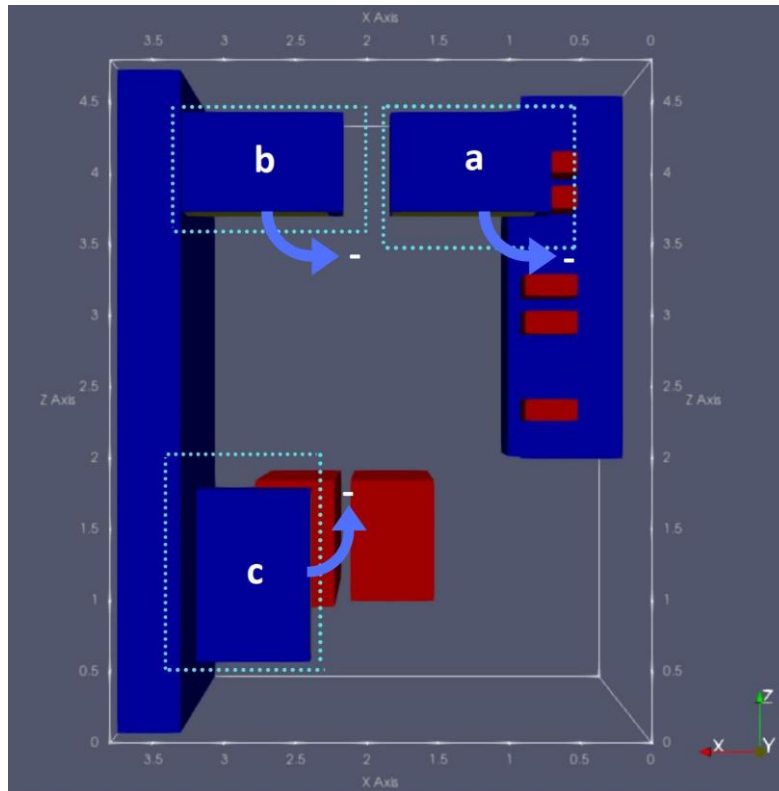
Σχήμα 6.1.21: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3

Πίνακας 6.1.7: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 3

Βελτιστοποιημένη διάταξη 3	Μέση θερμοκρασία δωματίου (°C)	Όγκος υπερθερμασμένων κυψελών (°C m <sup>3</sup> )	Υπόλοιπο πίεσης (residual)	Υπόλοιπο θερμοκρασίας (residual)
		12.24	$3.6026 \cdot 10^{-2}$	$3.76 \cdot 10^{-4}$

## Βελτιστοποιημένη διάταξη 4

Για τη βελτιστοποίηση της διάταξης 4, το επιτρεπόμενο εύρος μετακίνησης και στροφής των κλιματιστικών από την αρχική τους θέση (βλ. διάταξη 4, σχήμα 6.1.2) καθορίστηκε σύμφωνα με το σχήμα 6.1.22 και τον πίνακα 6.1.8.



Σχήμα 6.1.22: Περιοχή αναζήτησης βέλτιστης χωροθέτησης κλιματιστικών κατά τη βελτιστοποίηση της 4<sup>ης</sup> διάταξης

Πίνακας 6.1.8: Όρια μεταβλητών σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της 4<sup>ης</sup> διάταξης

Μεταβλητή σχεδιασμού	Ερμηνεία	$x_{low}^i$	$x_{upp}^i$	bits	Βήμα $\Delta x_i$
$x_1$	$\Delta x$ του a	-0.21	0.00	3	0.03
$x_2$	$\Delta y$ του a	-0.10	0.20	4	0.02
$x_3$	$\Delta z$ του a	-0.30	0.00	4	0.02
$x_4$	$\Delta x$ του b	-0.14	0.00	3	0.02
$x_5$	$\Delta y$ του b	0.00	0.30	3	0.02
$x_6$	$\Delta z$ του b	-0.21	0.00	3	0.03
$x_7$	$\Delta x$ του c	-0.06	0.24	4	0.02
$x_8$	$\Delta y$ του c	0.00	0.45	4	0.03
$x_9$	$\Delta z$ του c	-0.21	0.00	3	0.03
$x_{10}$	$\theta_1$ του a	-9	21	4	2.0
$x_{11}$	$\theta_2$ του b	-21	9	4	2.0
$x_{12}$	$\theta_3$ του c	-21	9	4	2.0

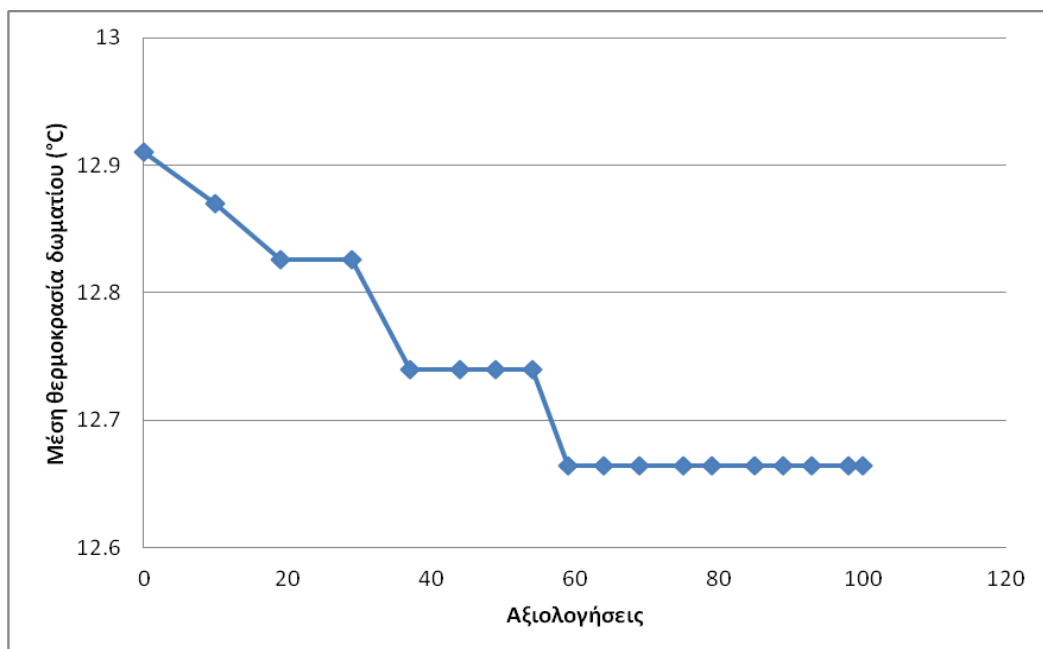
Υπογραμμίζεται ότι η αρνητική φορά στροφής των κλιματιστικών ορίζεται από το σχήμα 6.1.22.

Ο βελτιστοποιημένος κλιματισμός προκύπτει για το διάνυσμα μεταβλητών:

**Πίνακας 6.1.9:** Διάνυσμα μεταβλητών της βελτιστοποιημένης διάταξης 4

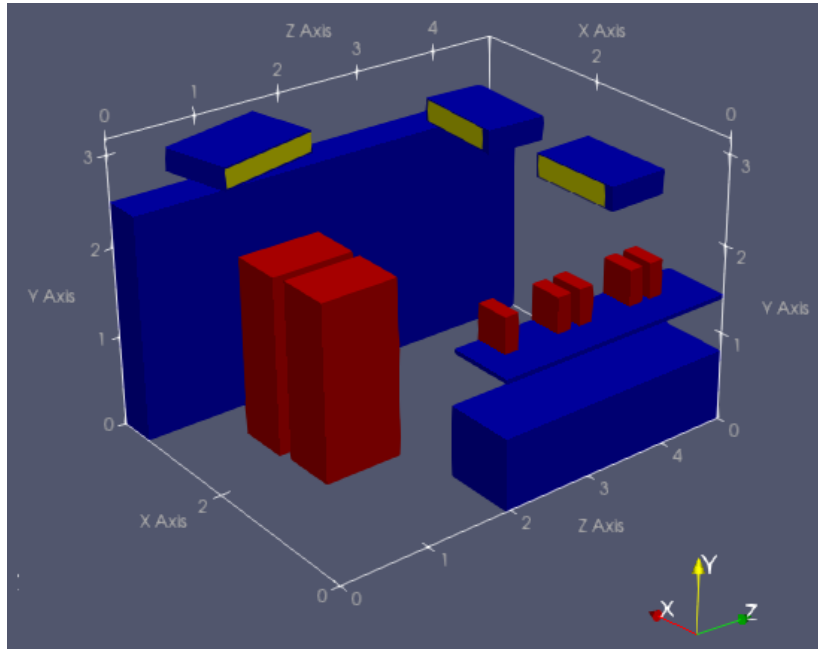
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
-0.21	-0.04	-0.06	0.00	0.06	-0.21	0.22	0.36	-0.15	-1	3	-13

Η πορεία σύγκλισης του λογισμικού EASY παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.23.

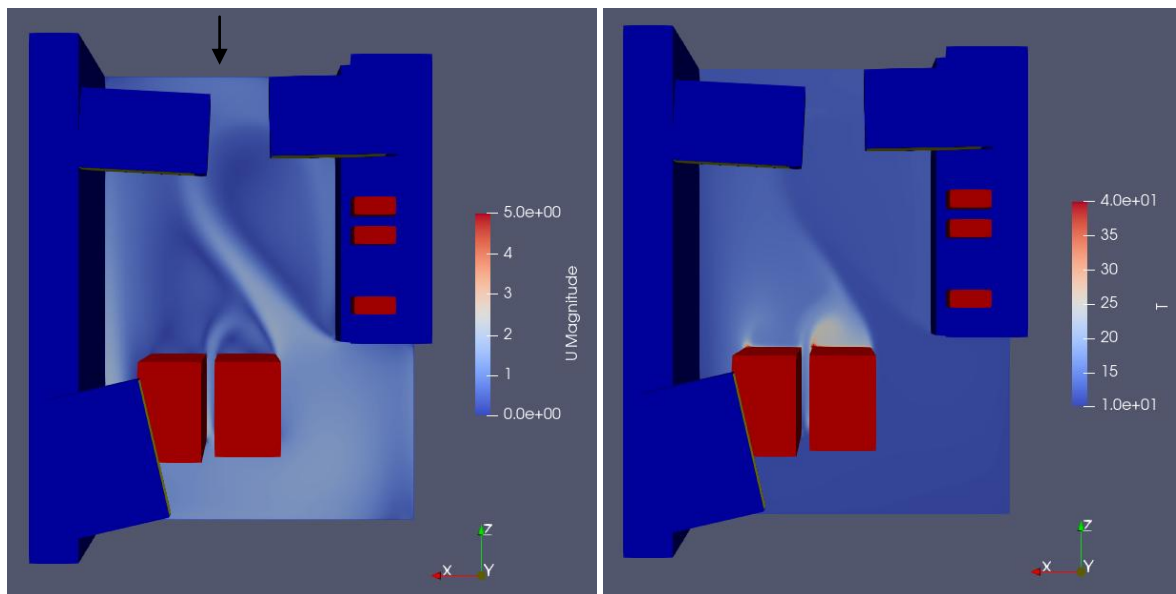


**Σχήμα 6.1.23:** Πορεία σύγκλισης λογισμικού EASY κατά τη βελτιστοποίηση της 4<sup>ης</sup> διάταξης

Τα αποτελέσματα της ροής του συγκεκριμένου δωματίου παρουσιάζονται στα σχήματα 6.1.24 έως 6.1.27.

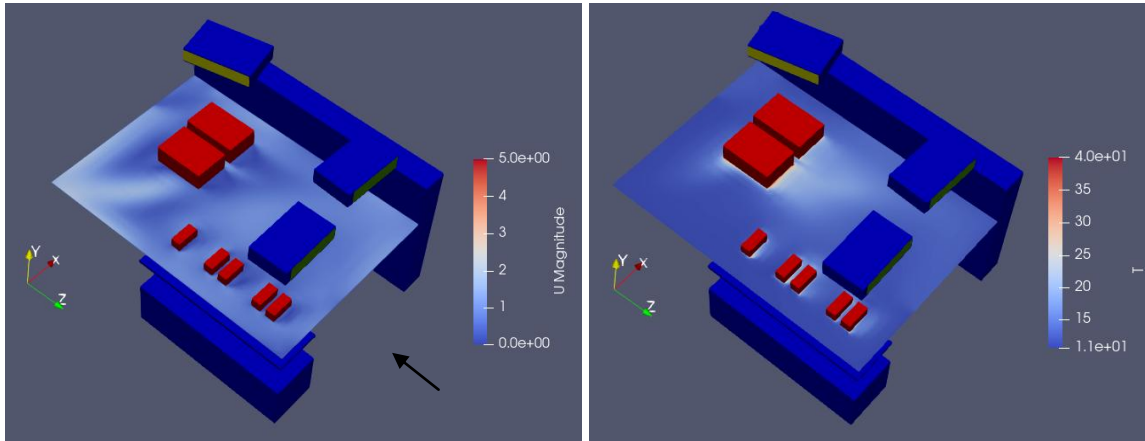


Σχήμα 6.1.24: Βελτιστοποιημένη θέση των κλιματιστικών της 4<sup>ης</sup> διάταξης



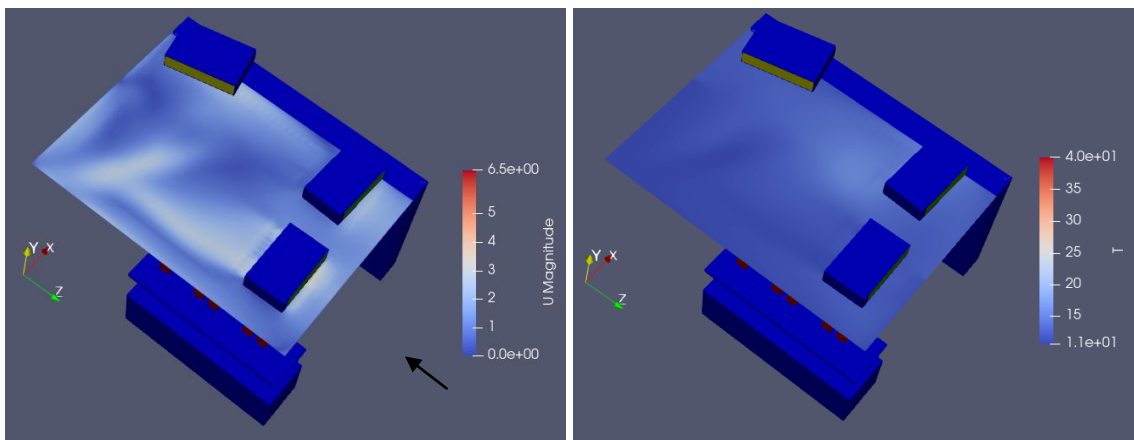
Σχήμα 6.1.25: Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 5cm από το πάτωμα

Το πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής εμφανίζει αρκετές ομοιότητες με αυτό που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση της 3<sup>ης</sup> διάταξης. Σημαντική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι μπροστά από το cluster α παρουσιάζεται μεγαλύτερη αποκόλληση της ροής. Αυτό συνεπάγεται την εμφάνιση ακόμα υψηλότερων θερμοκρασιών στην εν λόγω περιοχή.



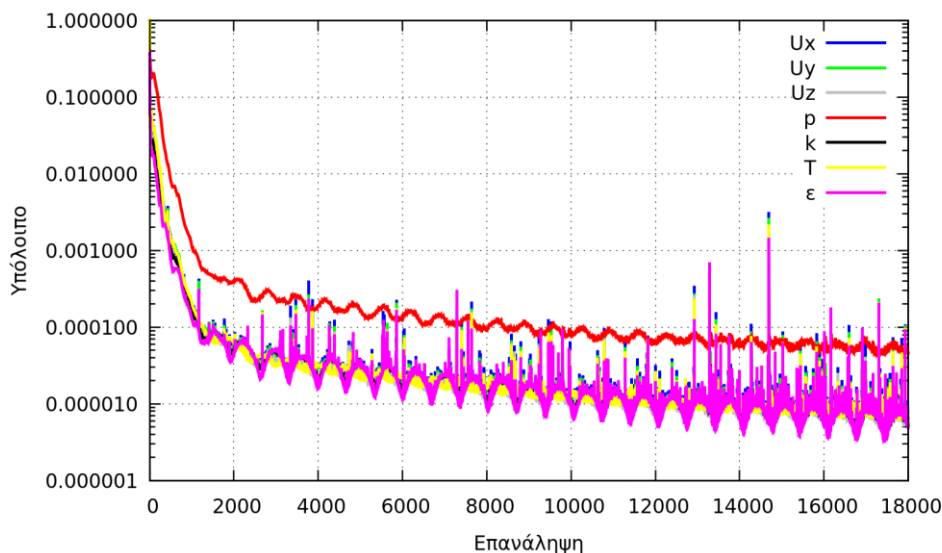
**Σχήμα 6.1.26:** Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 1.70m από το πάτωμα

Πλευρικά του cluster a, εμφανίζεται ένα ρεύμα μεγάλης ταχύτητας το οποίο προέρχεται από την πρόσκρουση του αέρα στην αριστερή γωνία του δωματίου. Επιπλέον, δύο μικροί στρόβιλοι χαμηλής ταχύτητας εμφανίζονται μπροστά από τα clusters a,b. Η ανακυκλοφορία του αέρα δεν επιτρέπει την πλήρη απαγωγή της θερμότητας που εκπέμπουν τα δύο clusters.



**Σχήμα 6.1.27:** Πεδίο της ταχύτητας και της θερμοκρασίας της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4 στο επίπεδο xz σε ύψος 2.50m από το πάτωμα

Η τομή στο επίπεδο  $y=2.50\text{m}$  καταδεικνύει ότι το δωμάτιο διαχωρίζεται νοητά σε δύο θερμοκρασιακές περιοχές: τη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή που καταλαμβάνει το αριστερό τμήμα του δωματίου και την υψηλή θερμοκρασιακή περιοχή που εντοπίζεται στο δεξί τμήμα του δωματίου.



Σχήμα 6.1.28: Διάγραμμα σύγκλισης της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4

Πίνακας 6.1.10: Χαρακτηριστικά της ροής της βελτιστοποιημένης διάταξης 4

Βελτιστοποιημένη διάταξη 4	Μέση θερμοκρασία δωματίου (°C)	Όγκος υπερθερμασμένων κυψελών (°C m <sup>3</sup> )	Υπόλοιπο πίεσης (residual)	Υπόλοιπο θερμοκρασίας (residual)
	12.64	$1.6956 \cdot 10^{-2}$	$4.59 \cdot 10^{-5}$	$7.00 \cdot 10^{-6}$

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των τριών διατάξεων, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.10.

Πίνακας 6.1.11: Συγκεντρωτικά στοιχεία των βελτιστοποιημένων διατάξεων

Βελτιστοποιημένη διάταξη	Μείωση μέσης θερμοκρασίας σε σχέση με το αρχικό δωμάτιο (°C)	Ποσοστιαία μείωση μέσης θερμοκρασίας σε σχέση με το αρχικό δωμάτιο (%)	Μείωση του όγκου υπερθερμασμένων κυψελών σε σχέση με το αρχικό δωμάτιο (°C m <sup>3</sup> )	Ποσοστιαία μείωση του όγκου υπερθερμασμένων κυψελών σε σχέση με το αρχικό δωμάτιο (%)
1	0.52	3.98	$-1.5205 \cdot 10^{-2}$	-19.83
3	0.84	6.42	$4.0644 \cdot 10^{-2}$	53.01
4	0.44	3.36	$5.9714 \cdot 10^{-2}$	77.88

## 6.2 Ανακεφαλαίωση & Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκε και βελτιστοποιήθηκε η χωροθέτηση του συστήματος κλιματισμού του υπολογιστικού κέντρου της ΜΠΥΡ&Β. Για το σκοπό αυτό, αναπαράχθηκε η γεωμετρία των επίπλων, των κλιματιστικών και των υπολογιστικών μηχανημάτων του δωματίου με τη χρήση του προγράμματος SolidWorks. Έπειτα δημιουργήθηκε το υπολογιστικό πλέγμα στο εσωτερικό του δωματίου με τη χρήση της εφαρμογής snappyHexMesh του OpenFOAM και μελετήθηκε η ευαισθησία του.

Στο δεύτερο σκέλος της μελέτης, αναπτύχθηκε κώδικας που επέτρεψε τη μετατόπιση και την περιστροφή των κλιματιστικών στο χώρο. Συμπληρωματικά, προγραμματίστηκαν κώδικες για τον έλεγχο της εγκυρότητας της θέσης των κλιματιστικών στο χώρο και για την προσαρμογή του διανύσματος της ταχύτητας στην εκάστη περιστροφή των κλιματιστικών. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν 6 βασικές διατάξεις των κλιματιστικών στο χώρο και επιλέχθηκαν οι 3 καλύτερες για να βελτιστοποιηθούν. Καθεμία από τις τρεις καλύτερες διατάξεις εισήχθη σε ένα κύκλο βελτιστοποίησης. Στο πέρας των 3 βελτιστοποιήσεων, προέκυψαν οι 3 βελτιστοποιημένες διατάξεις κλιματισμού του υπολογιστικού κέντρου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω εργασία είναι τα εξής:

### Γένεση και επιλογή πλέγματος

Η διεργασία γένεσης του πλέγματος είναι καθοριστική για τη μετέπειτα σύγκλιση της ροής κατά την επίλυση των εξισώσεων RANS. Πιο αναλυτικά, οι γενικοί κανόνες του CFD προβλέπουν την πύκνωση του πλέγματος γύρω από τα στερεά τοιχώματα. Η οδηγία αυτή εφαρμόστηκε γύρω από τα clusters/υπολογιστές. Διαπιστώθηκε όμως ότι όσο πιο μικρά ήταν τα κελιά που εντοπίζονταν γύρω από αυτά τα αντικείμενα, τόσο πιο καλή ήταν η σύγκλιση αλλά τόσο πιο μεγάλες θερμοκρασίες εμφανίζονταν περιμετρικά αυτών, καθώς η κλίση της θερμοκρασίας  $\nabla T$  γινόταν τεράστια. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η μικρή ακρίβεια των συντεταγμένων των τριγώνων στερεολιθογραφίας οδηγούσε στην ανακριβή περιγραφή των ακμών των αντικειμένων με αποτέλεσμα τη γένεση πλεγμάτων κακής ποιότητας. Ένα ακόμα συμπέρασμα της παραπάνω μελέτης είναι ότι ο οπτικός έλεγχος του πλέγματος είναι απαραίτητος, ακόμη και εάν ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια ένδειξης



καλής ποιότητας πλέγματος. Τέλος, η διαδικασία παραγωγής πλέγματος με την εφαρμογή snappyHexMesh είναι ιδιαίτερα εύχρηστη και γρήγορη. Αναφέρεται ότι το τελικό πλέγμα των 1.063.720 κελιών δημιουργήθηκε από 2 εξαπύρηνους επεξεργαστές σε 12 λεπτά.

### **Σύγκλιση εξισώσεων RANS**

Η ροή της αρχικής και της 1<sup>ης</sup> βελτιστοποιημένης διάταξης, συγκλίνει ύστερα από 12000 επαναλήψεις. Το υπόλοιπο της πίεσης και της θερμοκρασίας στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι αρκετά χαμηλό ( $T_{res} < 10^{-6}$ ,  $p_{res} < 10^{-5}$ ). Η σύγκλιση της ροής της 3<sup>ης</sup> βελτιστοποιημένης διάταξης σταθεροποιείται στις 4000 επαναλήψεις και χαρακτηρίζεται από υψηλό υπόλοιπο πίεσης ( $p_{res} = 3.76 \cdot 10^{-4}$ ). Συνεπώς, δεν προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία. Η ροή της 4<sup>ης</sup> βελτιστοποιημένης διάταξης, δεν παρουσιάζει σταθερή σύγκλιση και το υπόλοιπο των εξισώσεων της ταλαντώνεται γύρω από μια μειούμενη μέση τιμή. Η ταλάντωση αυτή οφείλεται πιθανότατα στη μικρή μη-μονιμότητα της ροής που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη διάταξη. Γενικά διαπιστώθηκε ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα χαρακτηρίζεται από έντονη δυσκολία σύγκλισης των εξισώσεων ροής λόγω της κυβικής μορφής των μοντελοποιούμενων αντικειμένων που οδηγεί σε συχνή αποκόλληση της ροής.

### **Σύγκλιση EASY**

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της 1<sup>ης</sup> και της 4<sup>ης</sup> διάταξης κλιματισμού συγκλίνει στην τελική λύση κατά την 58<sup>η</sup> και 59<sup>η</sup> αξιολόγηση αντίστοιχα, ενώ η 3<sup>η</sup> βελτιστοποιημένη διάταξη των κλιματιστικών εντοπίζεται από την 48<sup>η</sup> αξιολόγηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίηση κάθε διάταξης διήρκεσε 250h και εκτελέστηκε σε δύο εξαπύρηνους Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v2 χρονισμού 2.60GHz. Το χρονοβόρο τμήμα της βελτιστοποίησης εντοπίζεται στην εκτέλεση του λογισμικού αξιολόγησης και πιο συγκεκριμένα στην προσομοίωση της ροής (OpenFOAM). Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η επίλυση της ροής μέχρι τις 4000 επαναλήψεις, έτσι ώστε η ροή να έχει συγκλίνει σε μεγάλο βαθμό και τα αποτελέσματα που επεξεργάζεται ο εξελικτικός αλγόριθμος να είναι αξιόπιστα. Αναφέρεται ότι η επίλυση της ροής κάθε υποψήφιας λύσης διαρκούσε περίπου 2.5h.

Η λύση, η οποία προσφέρεται ως βέλτιστη από τον αλγόριθμο σε κάθε βελτιστοποίηση, δεν αλλάζει κατά τις τελευταίες τουλάχιστον 40 αξιολογήσεις. Συνεπώς θεωρείται ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο για τον εντοπισμό της βέλτιστης

λύσης, έπρεπε να πραγματοποιηθούν περισσότερες αξιολογήσεις. Αυτό δεν ήταν εφικτό λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων. Επομένως με την παραπάνω μελέτη, προσεγγίζεται μια σημαντικά βελτιωμένη λύση, η οποία δεν είναι κατά ανάγκη η βέλτιστη.

### **Μέση θερμοκρασία & Όγκος υπερθερμασμένων κυψελών**

Η μέγιστη μείωση της μέσης θερμοκρασίας του δωματίου προέρχεται από την 3<sup>η</sup> βελτιστοποιημένη διάταξη των κλιματιστικών και είναι ίση με 0.84°C. Η μέγιστη ποσοστιαία μείωση του όγκου των υπερθερμασμένων κυψελών επιτυγχάνεται από την 4<sup>η</sup> βελτιστοποιημένη διάταξη και αγγίζει το 77.88%. Διαπιστώνεται ότι η διαδικασία ελαχιστοποίησης της μέσης θερμοκρασίας δεν ταυτίζεται με τη διαδικασία ελαχιστοποίησης του όγκου των υπερθερμασμένων κυψελών. Η παραπάνω παρατήρηση ενισχύεται από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της 1<sup>ης</sup> διάταξης των κλιματιστικών. Σε αυτήν την περίπτωση, ενώ η μέση θερμοκρασία του δωματίου μειώνεται κατά 0.52°C, ο όγκος των υπερθερμασμένων κυψελών αυξάνεται σε ποσοστό 19.83%. Συμπεραίνεται ότι η βελτιστοποιημένη διάταξη 1 εμφανίζει υψηλότερες ακραίες θερμοκρασίες σε σχέση με τις άλλες δύο βελτιστοποιημένες διατάξεις.

### **Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη**

Δεδομένης της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στη διπλωματική αυτή εργασία, και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από αυτή, γίνεται σαφές ότι η βελτιστοποίηση του συστήματος κλιματισμού του υπολογιστικού κέντρου αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας. Προτάσεις για την εξέλιξη της συγκεκριμένης μελέτης αποτελούν οι εξής:

- Η μελέτη της επίδρασης της εξωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου (θερμοκρασία περιβάλλοντος) στην απόδοση της ψύξης των υπολογιστών/clusters.
- Η μελέτη των θερμοκρασιακών συνθηκών εντός του δωματίου σε περιπτώσεις εμφάνισης ακραίων θερμικών φορτίων.
- Η μοντελοποίηση της ταχύτητας αναρρόφησης και απόρριψης του αέρα από τα clusters και τους υπολογιστές.

- Η μελέτη και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της ροής για τη χρήση διάφορων μοντέλων τύρβης όπως το μοντέλο Spalart-Allmaras και k- $\omega$  SST, αν και το μοντέλο k- $\epsilon$  που χρησιμοποιήθηκε προτιμάται κατά κύριο λόγο για τέτοιες μελέτες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ, Γ.Χ., 2006. Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική. Ε.Μ.Π, Αθήνα
- [2] ΚΑΔΙΑΝΑΚΗΣ, Ν., ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΣ, Σ., 2008. Γραμμική Άλγεβρα Αναλυτική Γεωμετρία και εφαρμογές. 4<sup>η</sup> Έκδοση, Αθήνα
- [3] ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ, Γ., 2012. Υπολογιστική Ρευστομηχανική. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα
- [4] ΣΤΕΓΓΟΥ, Α., 2016. Μετάδοση Θερμότητας. ΕΜΠ, Αθήνα
- [5] ΤΣΑΓΓΑΡΗΣ, Σ., 2015. Μηχανική των ρευστών θεωρία & ασκήσεις. ΤΣΟΤΡΑΣ, Αθήνα

### Διεθνής Βιβλιογραφία

- [6] Advanced Micro Devices (AMD) [<https://www.amd.com/>]
- [7] BÄCK, T., 1996. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms. 1<sup>st</sup> Edition, Oxford
- [8] CFD Direct [<https://cfdirect.com/openfoam/user-guide/v6-snappyhexmesh/>]
- [9] CFD Online [<https://www.cfd-online.com/>]
- [10] CHIEN, K.Y., 1982. Predictions of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model. AIAA Journal, vol. 20, no. 1:33-38
- [11] DAIKIN Europe N.V. [<https://www.daikin.eu/>]
- [12] ENGYS Ltd, 2012. A Comprehensive Tour of SnappyHexMesh. 7<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop
- [13] GIANNAKOGLU, K.C., 2002. Design of optimal aerodynamic shapes using stochastic optimization methods and computational intelligence. Progress in Aerospace Sciences, vol. 38, no. 1, pp. 43-76
- [14] GIANNAKOGLU K.C., PAPADIMITRIOU, D.I., KAMPOLIS. I.C., 2006. Aerodynamic Shape Design Using Evolutionary Algorithms and New Gradient-Assisted Metamodels. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 195, pp. 6312-6329

- [15] GOLDBERG, D.E, 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison - Wesley
- [16] Intel Corporation [<https://www.intel.com/>]
- [17] JACKSON, A., COMBEST, D.P., 2016. SnappyHexMesh Theory and Application. 11<sup>th</sup> OpenFOAM Workshop
- [18] JASAK, H., 1996. Error Estimation and Analysis for Finite Volume Method with Application to Fluid Flows. PhD thesis, Imperial College London
- [19] MCDONOUGH, J.M., 2007. Introductory Lectures on Turbulence: Physics, Mathematics and Modeling. Mechanical Engineering Textbook Gallery 2
- [20] MENTER, F.R., 1993. Zonal two equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. AIAA Conference Paper 93-2906
- [21] MICHALEWICZ, Z., SCHOENAUER, M., 1996. Evolutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems, Evolutionary Computation. MIT Press, vol.20, no. 1, pp. 1-32
- [22] MOUKALLED, F., MANGANI, L., DARWISH, M., 2015. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. Springer
- [23] OpenCFD Ltd, 2019. OpenFOAM User Guide v1906
- [24] POPE, S.B., 2000. Turbulent Flows. Cambridge University Press
- [25] SHELLEY, J., 1989. Essentials of Fortran. 2<sup>nd</sup> edition, Wiley
- [26] SPALART, P., ALLMARAS, S., 1992. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. AIAA Paper 1992-439, 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA
- [27] SPALDING, D.B., 1961. A single formula for the law of the wall. Journal of Applied Mechanics, 28:455–457
- [28] TENEKES, H., LUMLEY, J.L., 1972. A first course in turbulence. The MIT Press
- [29] The OpenFOAM Foundation [<https://openfoam.org/>]
- [30] VOLKER, J., 2004. Large Eddy Simulation of Turbulent Incompressible Flows. Springer