

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη εσωτερικών και εξωτερικών ροών σε κτήρια με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Κουτουλάκη Αφροδίτη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ρόβας Δημήτριος

Χανιά 2010

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή κ. Ρόβα Δημήτριο για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Κουτουλάκη Αφροδίτη

Χανιά 2010

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	IV
Περίληψη.....	1
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	3
Κεφάλαιο 2 Μαθηματικό υπόβαθρο	9
2.1 Μαθηματικό Μοντέλο	9
2.2 Αριθμητική μέθοδος-Μέθοδος Διακριτοποίησης (Discretization Method)	9
2.3 Η επαναληπτική φύση της λύσης	10
2.4 «Ψεύτικα» Χρονικά Βήματα (False Time Steps)	11
2.5 Σύζευξη εξισώσεων ορμής-πίεσης - Ο αλγόριθμος SIMPLER.....	11
2.6 Σύγκλιση.....	12
Κεφάλαιο 3 Στοιχεία και Μοντελοποίηση	15
3.1 Κτήριο Τεχνικών Υπηρεσιών.....	15
3.1.1 Οριοθέτηση της μοντελοποίησης	19
3.1.2 Γεωμετρία.....	19
3.1.3 Πλέγμα Διακριτοποίησης	21
3.1.4 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)	24
3.1.4.1 Αντικείμενα στο DesignBuilder	25
3.1.6 Προετοιμασία της προσομοίωσης για να παράγει τις οριακές συνθήκες.....	29
3.2 Εσωτερική Ανάλυση	31
3.2.1 Λειτουργία (Operation)	32
3.2.1.1 Διαμόρφωση περιοχής (Edit Region):.....	32
3.2.1.2 Τύπος διαμέρισης (Spacing Type).....	32
3.2.2.1 Μοντέλο Τύρβης (Turbulence Model)	33
3.2.5.1 Εσωτερική επανάληψη (Inner iteration).....	34
3.2.5.2 Το ψευδο-χρονικό βήμα (False time-step)	34
3.2.5.3 Παράγοντες Χαλάρωσης (Relaxation factors)	35
3.2.5.4 Συνθήκες Τερματισμού (Termination residual)	35
3.3 Εξωτερική Ανάλυση.....	35
3.3.1.1 Τύπος Πλέγματος (Grid type).....	35
3.3.1.2 Το προεπιλεγμένο διάστημα πλέγματος (Default Grid Spacing)	36
3.3.1.3 Ανοχή συγχώνευσης γραμμών πλέγματος (Grid Line Merge Tolerance)	36
3.3.1.4 Η ταχύτητα αέρα (Wind Velocity).	36
3.3.1.5 Η κατεύθυνση αέρα (Wind Direction).	36

3.3.1.6 Η έκθεση αέρα (Wind Exposure)	36
3.3.1.7 Πολλαπλασιαστικοί παράγοντες για τον ορισμό του υπολογιστικού χωρίου (Site Domain Factors).....	36
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα Εσωτερικής Ανάλυσης	37
4.1 Γραφείο 8.....	37
4.1.1 Ανάλυση 1	37
4.1.1.1 Διαγράμματα Ταχύτητας	40
4.1.1.2 Γραφήματα Θερμοκρασίας.....	42
4.1.1.3 Δείκτες Άνεσης.....	44
4.1.2 Γραφείο 8.....	45
4.1.2.1 Ανάλυση 2	45
4.1.2.2 Διαγράμματα Ταχύτητας	47
4.1.2.3 Γραφήματα Θερμοκρασίας.....	48
4.2 Γραφείο 4.....	50
4.3 Γραφείο 9.....	58
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα Εξωτερική Ανάλυση.....	69
5.1 Περιγραφή υπολογισμών (Calculation Description)	69
5.2 Αποτελέσματα εξωτερικής ανάλυσης CFD του κτηρίου	71
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	75

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές παροχής αέρα ανά είδος χώρου [4].....	4
Πίνακας 2: Ενδεικνυόμενες ταχύτητες του αέρα σε κλειστούς χώρους [4].....	4
Πίνακας 3: Συνιστώμενες συνθήκες σχεδιασμού για κλιματιζόμενους χώρους το καλοκαίρι [4].....	5
Πίνακας 4: Συνιστώμενες συνθήκες σχεδιασμού για κλιματιζόμενους χώρους το χειμώνα [4]5	
Πίνακας 5: Επιμέρους επιφάνειες του κτηρίου [5].....	19
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά θερμαντικών σωμάτων [8].....	27
Πίνακας 7: Τεχνικά Χαρακτηριστικά κλιματιστικών ανά γραφείο [8].....	27
Πίνακας 8: Τεχνητός φωτισμός ανά γραφείο [10].....	28
Πίνακας 9: Η/Υ και περιφερειακά ανά γραφείο [10].....	29
Πίνακας 10: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα παράθυρα είναι τελείως ανοικτά	39
Πίνακας 11: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα παράθυρα είναι τελείως ανοικτά	39
Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8....	39
Πίνακας 13: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8.....	40
Πίνακας 14: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία ...	46
Πίνακας 15: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία	46
Πίνακας 16: Στατιστική στοιχεία πλέγματος για το γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία	46
Πίνακας 17: Ρύθμιση των παραμέτρων των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία ...	47
Πίνακας 18: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4.....	51
Πίνακας 19: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4.....	51
Πίνακας 20: Στατιστικά στοιχεία Πλέγματος που δημιουργήθηκε για την ανάλυση της εσωτερικής ροής στο γραφείο 4	52
Πίνακας 21: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4.....	52
Πίνακας 22: Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας για τις επιφάνειες του γραφείου 9.....	59
Πίνακας 23: Οριακές συνθήκες για την παροχή του αέρα στις εισόδους και τις εξόδους του γραφείου 9 όπως εισήχθησαν από το EnergyPlus	59
Πίνακας 24: Στατιστικά στοιχεία του πλέγματος που δημιουργήθηκε για την εσωτερική ανάλυση της ροής στο γραφείο 9	61
Πίνακας 25: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 9.....	61
Πίνακας 26: Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος Εξωτερικής ανάλυσης CFD	71

Περιεχόμενα Σχημάτων

Εικόνα 1: Πρόσοψη του κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών [5]	7
Εικόνα 2: Παράδειγμα εξωτερικής ανάλυσης σε κτήριο [6].....	8
Εικόνα 3: Παράδειγμα εσωτερικής ανάλυσης της ροής σε επίπεδο ζώνης [6]	8
Εικόνα 4: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων (αριστερά) και πεπερασμένος όγκος με αναπαράσταση του κεντρικού κόμβου και τους γειτονικούς κόμβους του (δεξιά).[6].....	10
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου SIMPLER [7]	12
Εικόνα 6: Διάγραμμα ροής των εργασιών CFD	13
Εικόνα 7: Διάγραμμα των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών που σημειώθηκαν κατά το έτος 2009 [10]	16
Εικόνα 8: Διάγραμμα της μέγιστης ταχύτητας του ανέμου ανά μήνα όπως καταγράφηκε κατά το έτος 2009[10].....	16
Εικόνα 9: Πρόσοψη κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών[10]	17
Εικόνα 10: Κάτοψη ισογείου [10].....	17
Εικόνα 11: Κάτοψη ορόφου [10]	18
Εικόνα 12: Το κτήριο σχεδιασμένο στο DesignBuilder.....	18
Εικόνα 13: Κάτοψη ισογείου σχεδιασμένη στο DesignBuilder	20
Εικόνα 14: Κάτοψη ισογείου μετά την προσθήκη αντικειμένων	20
Εικόνα 15: Κάτοψη τμήματος δευτέρου ορόφου μετά την προσθήκη των αντικειμένων.....	21
Εικόνα 16: Κάτοψη τμήματος δευτέρου ορόφου μετά την προσθήκη των αντικειμένων.....	21
Εικόνα 17: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων όγκων [6].....	22
Εικόνα 18: Παράδειγμα Πλέγματος πεπερασμένων όγκων με υψηλό λόγο διάστασης [6]....	23
Εικόνα 19: Παράδειγμα Πλέγματος πεπερασμένων όγκων- συγχώνευση κελιών [6]	23
Εικόνα 20: Υπολογισμός του φυσικού εξαερισμού[6].....	29
Εικόνα 21: Καρτέλα Εισαγωγής Οριακών Συνθηκών [6]	31
Εικόνα 22: Το Γραφείο 8 σχεδιασμένο στο DesignBuilder	37
Εικόνα 23: Πλάγια όψη του γραφείου 8 σχεδιασμένο στο DesignBuilder	38
Εικόνα 24: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις	40
Εικόνα 25: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 όταν τα παράθυρα είναι ανοικτά-πλάγια όψη	41
Εικόνα 26: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 όταν τα παράθυρα είναι ανοικτά - πρόσοψη	41
Εικόνα 27: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά.....	42
Εικόνα 28: Διανομή της θερμοκρασίας ακτινοβολίας για το γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά..	43
Εικόνα 29: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας για το γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά...	43
Εικόνα 30: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 8...	44
Εικόνα 31: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 8	45
Εικόνα 32: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις-ανάλυση 2..	47
Εικόνα 33: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία-πλάγια όψη	48
Εικόνα 34: Διανομή της θερμοκρασίας στο γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν.	49
Εικόνα 35: Το γραφείο 4 σχεδιασμένο στο DesignBuilder.....	50
Εικόνα 36: Πλάγια όψη του γραφείου 4 σχεδιασμένο στο DesignBuilder	51
Εικόνα 37: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις	53

Εικόνα 38: Διανύσματα ταχύτητας στο γραφείο 4.....	53
Εικόνα 39: Η διανομή ταχύτητας στο γραφείο 4-πρόσοψη.....	54
Εικόνα 40: Αναπαράσταση ισοϋψών καμπύλων ταχύτητας-γραφείο 4	54
Εικόνα 41: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα-γραφείο 4	55
Εικόνα 42: Διανομή την θερμοκρασίας ακτινοβολίας στο γραφείο 4.....	56
Εικόνα 43: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας-γραφείο 4.....	56
Εικόνα 44: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 9... 57	
Εικόνα 45: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 4	57
Εικόνα 46: Πλάγια όψη του γραφείου 9 όπως σχεδιάστηκε στο DesignBuilder	60
Εικόνα 47: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων για την εσωτερική ανάλυση της ροής του γραφείου 9.....	60
Εικόνα 48: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 9	62
Εικόνα 49: Πεδίο ροής ταχυτήτων όπως φαίνεται από την κάτοψη γραφείου 9.....	62
Εικόνα 50: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο γραφείο 9.....	63
Εικόνα 51: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα καθ' ύψος στο γραφείο 9	64
Εικόνα 52: Διανομή της θερμοκρασίας ακτινοβολίας στο γραφείο 9	64
Εικόνα 53: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας στο γραφείο 9	65
Εικόνα 54: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 9... 66	
Εικόνα 55: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 9	66
Εικόνα 56: Η ηλικία του αέρα στο γραφείο 9	67
Εικόνα 57: Υπολογιστικό Χωρίο για την εξωτερική ανάλυση	70
Εικόνα 58: Τελικό Πλέγμα για την εξωτερική ανάλυση.....	70
Εικόνα 59: Πρόσοψη κτηρίου	72
Εικόνα 60: Πίσω όψη κτηρίου	72

Περίληψη

Ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 40% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η αναζήτηση τρόπων για περιορισμό της υπέρμετρης κατανάλωσης ενέργειας και βελτίωσης των συνθηκών θερμικής άνεσης έχει οδηγήσει σε αναθεώρηση του τρόπου κατασκευής και λειτουργίας των κτηρίων. Η χρήση μοντέλων προσομοίωσης είναι πλέον απαραίτητη για να αποτιμηθούν σωστά οι ενεργειακές απαιτήσεις καθώς και για την εκτίμηση των συνθηκών θερμικής άνεσης. Η τρέχουσα πρακτική βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες και απλούς υπολογισμούς οι οποίοι όμως δεν είναι αρκετοί για να προλέξουν με ακρίβεια την επίδραση διαφόρων σχεδιαστικών επιλογών και παραμέτρων. Το σύνηθες πρόβλημα είναι ότι ο σχεδιασμός που γίνεται για «τυπικές μέρες» ή με βάση απλουστευμένα μοντέλα, οδηγεί σε μειωμένη ακρίβεια – άρα και αξιοπιστία. Ικανοποιητική ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη χρήση ζωνικού-τύπου μοντέλων τα οποία προκύπτουν από την υπόθεση ότι σε κάθε ζώνη πεδιακές μεταβλητές όπως π.χ. η θερμοκρασία και η υγρασία έχουν μόνο χρονική εξάρτηση – υποθέτουμε δηλαδή ότι σε κάθε χρονική στιγμή η θερμοκρασία έχει μια κατάλληλη μέση τιμή ίδια σε κάθε σημείο της ζώνης. Η ακρίβεια από τα ζωνικά μοντέλα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ικανοποιητική. Σε περιπτώσεις όμως όπως ο εξαερισμός ή η ύπαρξη έντονων θερμοκρασιακών διαφορών απαιτείται λεπτομερέστερη μοντελοποίηση της ροής. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται λεπτομερής υπολογισμός της κίνησης του αέρα στους εσωτερικούς αλλά και στους εξωτερικούς χώρους και η ζωνική θεώρηση οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την λεπτομερή ανάλυση της ροής σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κτηρίων με σκοπό την ακριβέστερη περιγραφή περιπτώσεων όπου τα ζωνικά μοντέλα είναι ανεπαρκή. Στην μεθοδολογία που ακολουθείται γίνεται χρήση του λογισμικού EnergyPlus (το οποίο βασίζεται στη ζωνική θεώρηση) για τη θερμική προσομοίωση των κτηρίων και την εξαγωγή οριακών συνθηκών, η ύπαρξη των οποίων είναι απαραίτητη για την ανάλυση της ροής. Στη συνέχεια γίνεται λεπτομερής υπολογισμός της ροής στο εσωτερικό και εξωτερικό του κτηρίου με χρήση λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Για εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας επιλέχθηκε το κτήριο των Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης το οποίο βρίσκεται στα Χανιά. Αρχικά έγινε συλλογή στοιχείων που αφορούν την κατασκευή του, τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, το είδος δραστηριότητας των εργαζομένων αλλά και κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Στη συνέχεια με την βοήθεια του DesignBuilder έγινε ο σχεδιασμός του κτηρίου και εισήχθησαν δεδομένα που αφορούν την μοντελοποίηση του, όπως κατασκευαστικά υλικά, στοιχεία για τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης, ενώ με χρήση του λογισμικού EnergyPlus υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση θερμοκρασίες, και παροχές όγκου αέρα στα παράθυρα, πόρτες και ανοίγματα. Τέλος με την βοήθεια του DesignBuilder CFD έγινε μελέτη της ροής και εξάχθηκαν τα αποτελέσματα που αφορούν πεδία ταχυτήτων και θερμοκρασιών.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο κτηριακός τομέας έχει σημαντική συνεισφορά - περίπου 40% - στην συνολική ενεργειακή κατανάλωση στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [1,2]. Από την ενέργεια που καταναλώνεται στα κτήρια εκτιμάται ότι το 57% χρησιμοποιείται για κάλυψη αναγκών θέρμανσης, το 25% για ζεστό νερό, και το 11% για ηλεκτρική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται πρωτίστως για δροσίση των χώρων. Η παραγωγή και χρήση ενέργειας ευθύνεται για το 94% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα [1], με το 45% αυτής να αποδίδεται στον κτηριακό τομέα γεγονός που κρίνει επιτακτική την ανάγκη λήψης μέτρων για περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι προσπάθειες που γίνονται για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας νέων και υφιστάμενων κτηρίων, έχουν στρέψει τη προσοχή σε θέματα βελτιωμένου και ολιστικού ενεργειακού σχεδιασμού. Σήμερα, πολύ περισσότερο από ότι στο παρελθόν, είναι απαραίτητη η σωστή αποτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων καθώς και η ακριβής εκτίμηση των συνθηκών θερμικής άνεσης στους χώρους του κτηρίου. Η ακριβής εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων είναι απαραίτητη τόσο στο βιοκλιματικό σχεδιασμό όσο και σε προσπάθειες για την ανακαίνιση υφιστάμενων κτηρίων. Για παράδειγμα, ο φυσικός ή εξαναγκασμένος εξαερισμός — σε συνδυασμό με κατάλληλα επιλεγμένη θερμική μάζα — αποτελεί μια από τις βασικές μεθόδους παθητικού σχεδιασμού. Η ενεργειακή σχεδίαση των κτηρίων έχει κατευθύνει τους αναλυτές προς την μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη και η ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στη διαμόρφωση θερμικής άνεσης, την ποιότητα του αέρα, την ανανέωση και κυκλοφορία του αέρα καθώς και στην επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση εξαερισμού.

Η ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων σε κτήρια είναι σημαντική καθώς επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη ευεξία και δύναται να προκαλέσει κίνδυνους στην υγεία του ανθρώπου όταν δεν είναι η κατάλληλη. Ειδικότερα, σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη από το Κοινό Ερευνητικό Κέντρο (JRC) [3], περισσότερο από το 20% του πληθυσμού υποφέρει από άσθμα και αλλεργικές παθήσεις που προκαλούνται από αέριους ρύπους σε εσωτερικούς χώρους. Επίσης, έχουν αναφερθεί αρκετά άλλα συμπτώματα όπως ρινικές, οφθαλμικές και στοματοφαρυγγικές παθήσεις. Η παροχή φρέσκου αέρα σε ένα χώρο κρίνεται αναγκαία για την ανανέωση του οξυγόνου του χώρου, για την αραίωση των οσμών, του καπνού από το κάπνισμα και του διοξειδίου του άνθρακα που παράγουν οι άνθρωποι. Η απαραίτητη ποσότητα φρέσκου αέρα για τον παραπάνω σκοπό γίνεται συνήθως με κριτήριο την απαιτούμενη ποσότητα αέρα ανά άτομο ($\text{m}^3 / (\text{h} \text{ άτομο})$) και εξαρτάται από τη πυκνότητα των ατόμων μέσα στο χώρο και από το είδος της δραστηριότητάς τους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές παροχής αέρα ανά είδος χώρου.

Είδος χώρου	Παροχή αέρα εξαερισμού(m^3/h ανά άτομο)
Δωμάτια	17-26
Τουαλέτες	51-85

Δημόσιοι χώροι	17-26
Αίθουσες Συναντήσεων	34-51
Δημόσιες τουαλέτες	26-34
Τραπεζαρίες	68-85

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές παροχής αέρα ανά είδος χώρου [4]

Επιπλέον, η κυκλοφορία του αέρα επιδρά στο αίσθημα της θερμικής άνεσης. Σε κλειστούς χώρους ο άνθρωπος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στην κίνηση του αέρα. Γενικά η επιτρεπτή ταχύτητα του αέρα για θερμοκρασίες 20 - 25°C είναι περίπου 0,15 έως 0,25 m/s. Σε χώρους με μεγάλη πυκνότητα όπου οι άνθρωποι κινούνται συνεχώς (π.χ. εμπορικά καταστήματα) επιτρέπεται μεγαλύτερη ταχύτητα του αέρα.

Ενδεικνύόμενες ταχύτητες του αέρα σε κλειστούς χώρους		
Ταχύτητα Αέρα(m/s)	Επίδραση	Συνιστώμενη Χρήση
0-0.08	Παράπονα για έλλειψη κίνησης του αέρα	Καμία
0.125	Ιδανική κατάσταση	Για όλες τις εφαρμογές
0.125-0.25	Πολύ ικανοποιητική κατάσταση αλλά η ταχύτητα των 0.25m/s πλησιάζει την μέγιστη επιτρεπόμενη για άτομα που κάθονται.	Για όλες τις εφαρμογές
0.325	Όχι ικανοποιητική για χώρους γραφείων.	Για όλες τις εφαρμογές
0.375	Μέγιστη επιτρεπόμενη για άτομα που κινούνται.	Εμπορικά καταστήματα
0.375-1.5	Επιτρεπόμενη σε βιομηχανικούς χώρους	Εργοστάσια
Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στη ζώνη διαμονής ατόμων κάθε χώρου(από το δάπεδο μέχρι 2m ύψος περίπου)		

Πίνακας 2: Ενδεικνύόμενες ταχύτητες του αέρα σε κλειστούς χώρους [4]

Ο φυσικός εξαερισμός αποτελεί συνήθη πρακτική για εξασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης στα κτήρια. Αποκτά καίρια σημασία όταν πρόκειται για την αποβολή της υγρασίας από χώρους κατά τους ψυχρούς μήνες ενώ για τους θερμούς μήνες αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο για την ψύξη των χώρων χωρίς να επιφέρει σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις. Στόχος είναι να περιοριστεί η χρήση κλιματιστικών καθώς και των συστημάτων θέρμανσης το οποία απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας για τη λειτουργία τους. Η εκτίμηση, λοιπόν της αποτελεσματικότητας του φυσικού εξαερισμού είναι πρωταρχικής σημασίας στην σχεδίαση των κτηρίων. Κατά την διαμόρφωση των συστημάτων φυσικού εξαερισμού είναι χρήσιμο να μελετηθεί η ροή ώστε να αποφευχθούν καταστάσεις όπως η στασιμότητα του αέρα, ή για να προσδιοριστούν περιοχές όπου δεν είναι επαρκής η κυκλοφορία φρέσκου αέρα.

Η αξιολόγηση των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης αποτελεί ένα μείζον ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί παράλληλα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης και ευεξίας σε ένα χώρο και που μπορούν να ρυθμιστούν από ένα σύστημα κλιματισμού είναι: η θερμοκρασία του αέρα του χώρου, η θερμοκρασία των επιφανειών που περιβάλλουν το χώρο,

η υγρασία του αέρα του χώρου, η κίνηση του αέρα στο χώρο Ένα βασικό ζήτημα είναι η επιλογή των τιμών θερμοκρασίας και υγρασίας οι οποίες πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε ούτε η θερμική άνεση να επιβαρύνεται αλλά ούτε και το λειτουργικό κόστος να ανεβαίνει σημαντικά. Μεγάλες τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στους χώρους το χειμώνα μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά τόσο το κόστος εγκατάστασης όσο και το κόστος λειτουργίας των συστημάτων κλιματισμού. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει συνήθως και η επιλογή χαμηλών τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Στους πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται οι συνιστώμενες συνθήκες σχεδιασμού για κλιματιζόμενους χώρους το καλοκαίρι και τον χειμώνα αντίστοιχα. Σε χώρους γραφείων η συνιστώμενη θερμοκρασία το καλοκαίρι είναι 21 με 23 °C και σχετική υγρασία 30 με 35 % ενώ για τον χειμώνα 25 με 26 °C με σχετική υγρασία 30 με 35%.

Κατηγορία χώρου	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)
Κατοικίες	22	30-50
Κτήρια γραφείων	21-23	30-35
Βιβλιοθήκες- Μουσεία	20-22	40-50
Νοσοκομεία	24	30
Εστιατόρια και γενικά κέντρα διασκέδασης	21-23	30-40

Πίνακας 3: Συνιστώμενες συνθήκες σχεδιασμού για κλιματιζόμενους χώρους το καλοκαίρι [4]

Κατηγορία χώρου	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)
Κατοικίες	25-26	30-50
Κτήρια γραφείων	25-26	30-35
Βιβλιοθήκες- Μουσεία	22	40-50
Εστιατόρια και γενικά κέντρα διασκέδασης	23-26	30
Εκπαιδευτικά Κτήρια	26	30-40
Νοσοκομεία		
Αίθουσες	24	45-50
Χειρουργεία	20-24	50-60
Αναρρωτήρια	24	50-60

Πίνακας 4: Συνιστώμενες συνθήκες σχεδιασμού για κλιματιζόμενους χώρους το χειμώνα [4]

Η σωστή ρύθμιση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την θερμική άνεση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στους 20 έως 22 °C, το ποσό της θερμότητας που απάγεται με εξάτμιση είναι πολύ μικρό. Στις θερμοκρασίες αυτές τα όρια της σχετικής υγρασίας είναι: το κατώτερο 30% (κάτω από το οποίο σχηματίζεται σκόνη, δημιουργείται στατικός ηλεκτρισμός, ξηραίνονται οι βλεννογόνοι και το ανώτερο 70% (πάνω από το οποίο δημιουργείται συμπύκνωση υδρατμών, σχηματίζεται μούχλα, εμφανίζονται οσμές που ερεθίζουν τα οσφρητικά όργανα του ανθρώπου). Όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη, η επίδραση της υγρασίας γίνεται σημαντική, καθώς δυσχεράνει την απαγωγή θερμικών φορτίων από το σώμα μέσω του μηχανισμού της εφίδρωσης. Σημαντικό είναι να αποφεύγονται καταστάσεις που εμποδίζουν την εξάτμιση από το ανθρώπινο σώμα (υψηλή θερμοκρασία με αυξημένη υγρασία). Στους 24 έως 26 °C τα επιθυμητά όρια της σχετικής υγρασίας κυμαίνονται από 40% έως 60% για την διασφάλιση της θερμικής άνεσης.

Ως αποτέλεσμα η σχεδίαση των συστημάτων HVAC προϋποθέτει κάτι παραπάνω από απλή εξασφάλιση ότι τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης είναι ικανά να αντισταθμίσουν τα θερμικά κέρδη. Εξίσου σημαντικό είναι ο σχεδιασμός συστημάτων εφοδιασμού τα οποία να επιτυγχάνουν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας και βελτιωμένη διανομή και κυκλοφορία του αέρα σε όλο τον χώρο. Πέρα από την επιλογή κατάλληλου τύπου συστήματος καθώς και τον έλεγχο και την συντήρηση του, η σωστή τοποθέτηση των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης μέσα στον χώρο είναι καίριας σημασίας για την επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας και του αέρα και ταυτόχρονα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η λεπτομερής μελέτη της ροής μέσα στο χώρο παρέχει ακριβή εκτίμηση της διανομής της θερμοκρασίας και της κίνησης του αέρα.

Η σωστή τοποθέτηση των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης και γενικότερα η διανομή της θερμοκρασίας και του αέρα επηρεάζονται άμεσα από τις εξωτερικές συνθήκες. Τα μοντέλα προσομοίωσης ζωνικού τύπου (π.χ. EnergyPlus, TRNSYS) χρησιμοποιούν συντελεστές πίεσης οι οποίοι είναι εμπειρικοί για το υπολογισμό του φυσικού εξαερισμού και της διήθησης του αέρα. Συγκεκριμένα, διαθέτουν βάση δεδομένων για τους συντελεστές πίεσης που βασίζεται στην ανάλυση του Martin Liddament -Air Infiltration Calculation Techniques, An Application Guide (AIVC) όπου αφορούν κτήρια το πολύ τριών ορόφων με τετραγωνικές επιφάνειες και τρία επίπεδα έκθεσης του κτηρίου. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί καλή προσέγγιση για τον βασικό σχεδιασμό αλλά δεν παρέχει ακριβή εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης κτηρίων με πιο πολύπλοκες γεωμετρίες με αποτέλεσμα να γίνονται λαθεμένες ενέργειες στον σχεδιασμό με πιθανή επιβάρυνση της θερμικής άνεσης. Η ακριβής ανάλυση της εξωτερικής ροής του αέρα στο κτήριο είναι εξίσου σημαντικό και για την εκτίμηση του συντελεστή συναγωγής και τον υπολογισμό των απωλειών. Ο ακριβής υπολογισμός συντελεστών πίεσης βοηθά στον προσδιορισμό με ακρίβεια της διήθησης του αέρα στο εσωτερικό.

Ο σχεδιασμός με χρήση πειραματικών μοντέλων είναι ανέφικτος, ενώ σημαντικές ανακρίβειες προκύπτουν από τη χρήση ζωνικού-τύπου μοντέλων προσομοίωσης (π.χ. EnergyPlus, TRNSYS) τα οποία υπολογίζουν μέσες τιμές θερμοκρασίας για το χώρο και δεν λαμβάνουν υπ' όψη τις λεπτομέρειες τις ροής στο εσωτερικό του χώρου. Ενδεικτικά ερωτήματα τα οποία οι σχεδιαστές επιθυμούν *a priori* να απαντήσουν είναι: ποια είναι η αναμενόμενη κατανομή θερμοκρασίας στον χώρο για δεδομένες καιρικές συνθήκες, ποιο είναι το κατάλληλο σημείο τοποθέτησης για τα κλιματιστικά και τα θερμαντικά σώματα, πόση θα είναι η επίδραση του φυσικού εξαερισμού και είναι αυτή αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες του χώρου, υπάρχουν περιοχές όπου ο αέρας δεν ανανεώνεται; Η τρέχουσα πρακτική βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες και απλούς υπολογισμούς οι οποίοι όμως δεν είναι αρκετοί για να προλέξουν με ακρίβεια την επίδραση. Για τη σωστή εκτίμηση απαιτούνται τρόποι λεπτομερούς υπολογισμού της κίνησης του αέρα στους εσωτερικούς αλλά και στους εξωτερικούς χώρους.

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational fluid dynamics, CFD) αποσκοπεί στην ανάπτυξη και υλοποίηση υπολογιστικών εργαλείων και μοντέλων για ανάλυση φαινομένων ροής και μεταφοράς θερμότητας ή/και μάζας. Πρακτικά, πρόκειται για προσομοίωση ροών με H/Y , που επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων προβλημάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια από αναλυτικές προσεγγίσεις και μεγαλύτερη ταχύτητα από πειραματική προσομοίωσή τους. Για να εξαχθεί μια προσεγγιστική λύση αριθμητικά πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος διακριτοποίησης η οποία προσεγγίζει το σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων της ροής με ένα διακριτοποιημένο σύστημα εξισώσεων το οποίο μπορεί να επιλυθεί με χρήση

υπολογιστή. Οι προσεγγίσεις αυτές εφαρμόζονται σε μικρές περιοχές στο χώρο ή στο χρόνο και έτσι η αριθμητική λύση δίνει αποτελέσματα σε διακριτά σημεία στο χώρο και το χρόνο. Η ακρίβεια της αριθμητικής λύσης εξαρτάται από την ποιότητα της διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται.

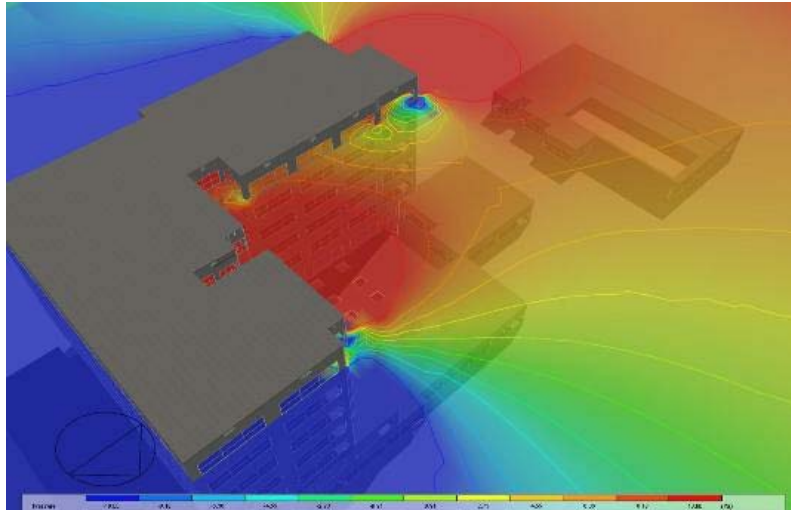
Για τη μελέτη των εσωτερικών και εξωτερικών ροών σε κτήρια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής DesignBuilder CFD. Έγινε εφαρμογή στο Πολυτεχνείο Κρήτης στο κτήριο Τεχνικών Υπηρεσιών το οποίο βρίσκεται στα Χανιά.



Εικόνα 1: Πρόσοψη του κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών [5]

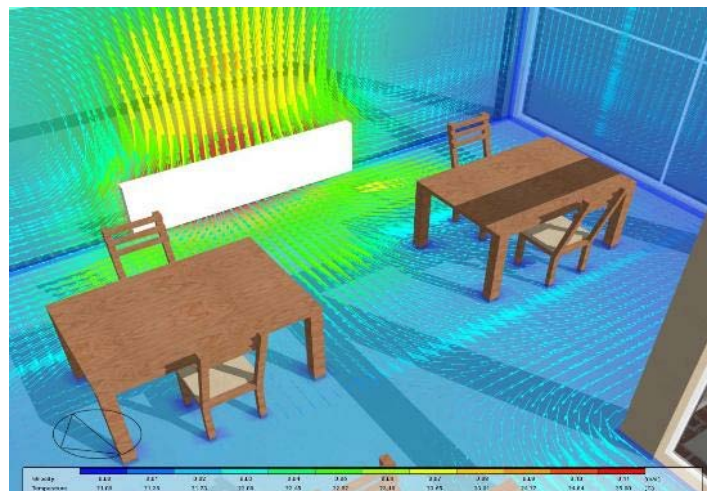
Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EnergyPlus για την θερμική προσομοίωση του κτηρίου και την εξαγωγή δεδομένων χρήσιμων για την εσωτερική ανάλυση της ροής. Οι διαφορικές εξισώσεις της ροής απαιτούν για την επίλυσή τους να είναι γνωστές οι τιμές στο όριο της περιοχής υπολογισμού ώστε οι υπολογισμοί να δώσουν τις τιμές σε όλη την περιοχή. Αυτές οι τιμές είναι γνωστές ως οριακές συνθήκες. Το EnergyPlus υπολογίζει τις θερμοκρασίες στις εσωτερικές επιφάνειες του υπό μελέτη κτηρίου και την παροχή όγκου αέρα από τα ανοίγματα, πόρτες, παράθυρα. Οι τιμές αυτές εισάγονται ως οριακές συνθήκες στο πρόβλημα. Στη συνέχεια προστέθηκαν αντικείμενα που αναπαριστούν γραφεία, υπολογιστές και εργαζόμενους. Τα αντικείμενα είτε θεωρήθηκαν ως εμπόδια στην περιρρέουσα ροή είτε όχι επιτρέποντας την ροή να περνάει από μέσα τους, ανάλογα με την χρήση του κάθε αντικειμένου. Το DesignBuilder CFD χρησιμοποιήθηκε τόσο για εσωτερική όσο και για εξωτερική ανάλυση του κτηρίου.

Η εξωτερική ανάλυση παρέχει την διανομή της ταχύτητας και της πίεσης του αέρα γύρω από κτηριακές δομές. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποτιμηθεί η θερμική άνεση στον περιβάλλοντα χώρο, καθώς και για τον ακριβέστερο υπολογισμό του φυσικού εξαερισμού (Calculated Natural Ventilation) στο EnergyPlus όπου γίνεται χρήση των συντελεστών πίεσης.



Εικόνα 2: Παράδειγμα εξωτερικής ανάλυσης σε κτήριο [6]

Η εσωτερική ανάλυση παρέχει την διανομή της ταχύτητας του αέρα, της πίεσης, της θερμοκρασίας και διαφόρων άλλων παραμέτρων σε κάθε σημείο στο εσωτερικό του κτηρίου. Επίσης υπολογίζεται η ηλικία του αέρα για να υποδείξει την σχετική "φρεσκάδα" του αέρα στον χώρο και κατά πόσο ανανεώνεται ο αέρας. Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger (Predicted Mean Voted, PMV) για να εκτιμηθεί η θερμική άνεση των ενοίκων καθώς και το προβλεπόμενο ποσοστό μη ικανοποίησης, (Predicted Percentage Dissatisfied, PPD) [8]. Η εσωτερική ανάλυση της ροής χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων HVAC και του φυσικού αερισμού



Εικόνα 3: Παράδειγμα εσωτερικής ανάλυσης της ροής σε επίπεδο ζώνης [6]

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση του κτηρίου τόσο για την εσωτερική όσο και εξωτερική ανάλυση της ροής. Επιπλέον γίνεται μια αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου που υπολογίζεται η ροή καθώς και των προβλημάτων που ανακύπτουν. Τέλος, αναλύονται γραφεία του κτηρίου για διάφορες περιπτώσεις με την βοήθεια του λογισμικού DesignBuilder CFD και εξάγονται τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματικό υπόβαθρο

2.1 Μαθηματικό Μοντέλο

Τα ρευστά διέπονται από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν τους νόμους διατήρησης της μάζας, της ορμής, και της ενέργειας. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τις εξισώσεις ορμής με τα τρία διανύσματα της ταχύτητας (γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes), την εξίσωση ενέργειας όπου χρησιμοποιείται το k-ε μοντέλο τύρβης, τις εξισώσεις για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας [6]. Οι εξισώσεις συνιστούν ένα σύνολο συζευγμένων μη-γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξης που έχουν την ακόλουθη γενική μορφή, στην οποία το ϕ αναπαριστά την εξαρτημένη μεταβλητή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S$$

Όπου το ϕ μπορεί να είναι:

u, v, w οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας για την εξίσωση της ορμής

T : η θερμοκρασία για την εξίσωση της ενέργειας

k : τυρβώδης κινητική ενέργεια

ϵ : ρυθμός διάχυσης τυρβώδους ροής

Επίσης σε κάθε περίπτωση:

Γ : συντελεστής διάχυσης.

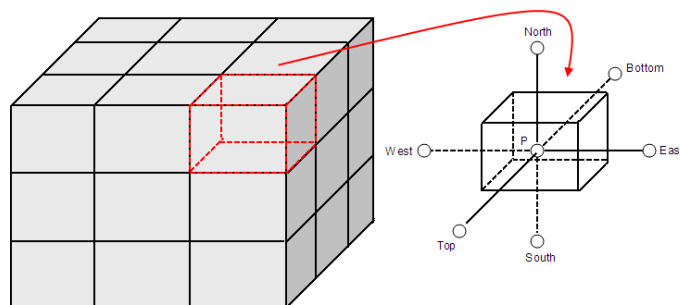
S : όροι πηγών

Ανάλογα με το ϕ προσδιορίζονται κατάλληλα οι όροι πηγών καθώς και ο συντελεστής διάχυσης. Ο πρώτος όρος στην εξίσωση είναι ο όρος αποθήκευσης, ο δεύτερος ο όρος μεταφοράς, ο τρίτος ο όρος διάχυσης και ο τελευταίος αντιπροσωπεύει τους όρους πηγών. Για χρονικά μόνιμα προβλήματα ο πρώτος όρος είναι μηδενικός. Μαζί με την εξίσωση συνέχειας αποτελούν ένα σύστημα από 7 μερικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες πρέπει να επιλυθούν μαζί με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες στο υπολογιστικό χωρίο.

2.2 Αριθμητική μέθοδος-Μέθοδος Διακριτοποίησης (Discretization Method)

Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας και των οριακών συνθηκών σε συνδυασμό με τη μη-γραμμικότητα των εξισώσεων δεν είναι δυνατόν να ευρεθούν αναλυτικές λύσεις και απαιτείται χρήση αριθμητικών μεθόδων. Η μέθοδος που υιοθετείται από DesignBuilder CFD

για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων είναι η μέθοδος πεπερασμένου όγκου (Finite-Volume Method). Ως αφετηρία η μέθοδος χρησιμοποιεί την ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων διατήρησης. Αρχικά η περιοχή της λύσης υποδιαιρείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό παρακαίμενων όγκων ελέγχου (Control Volumes = CVs), και οι εξισώσεις διατήρησης διατυπώνονται σε κάθε όγκο ελέγχου. Στο κέντρο (Centroid) κάθε όγκου ελέγχου βρίσκεται ένας υπολογιστικός κόμβος στον οποίο οι μεταβλητές πρόκειται να υπολογιστούν.



Εικόνα 4: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων (αριστερά) και πεπερασμένος όγκος με αναπαράσταση του κεντρικού κόμβου και τους γειτονικούς κόμβους του (δεξιά).[6]

Στην συνέχεια οι εξισώσεις ολοκληρώνονται επάνω στους όγκους ελέγχου, διακριτοποιούνται και τέλος γραμμικοποιούνται κατάλληλα ώστε να καταλήξει στην επαναληπτική επίλυση ενός γραμμικού συστήματος. Στους οριακούς κόμβους απαιτείται ο προσδιορισμός κατάλληλων οριακών συνθηκών, οι οποίες λαμβάνονται υπ' όψη στην αριθμητική ολοκλήρωση που γίνεται στους πεπερασμένους όγκους.

Η μέθοδος FV μπορεί να προσαρμόσει οποιοδήποτε τύπο πλέγματος, έτσι είναι κατάλληλο για σύνθετες γεωμετρίες. Το πλέγμα καθορίζει μόνο τα όρια του όγκου ελέγχου και δεν χρειάζεται να αφορά ένα συγκεκριμένο σύστημα. Η μέθοδος είναι συντηρητική από την κατασκευή της, εφ' όσον τα ολοκληρώματα επιφάνειας (που αντιπροσωπεύουν τις εκ μεταφοράς και διάχυσης ροές) είναι τα ίδια για τους όγκους ελέγχου που μοιράζονται το όριο.

2.3 Η επαναληπτική φύση της λύσης

Η μη γραμμικότητα του συνόλου των εξισώσεων αντιμετωπίζεται με την χρήση ενός ένθετου επαναληπτικού σχεδίου με το οποίο κάθε εξαρτημένη μεταβλητή η οποία παρουσιάζεται στις εξισώσεις (π.χ. ταχύτητα, θερμοκρασία, κ.λπ.) προσδιορίζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας μέσα σε έναν γενικό εξωτερικό επαναληπτικό βρόχο και στη λήξη κάθε εξωτερικής επανάληψης, οι πιο πρόσφατες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών ανατροφοδοτούνται στους συντελεστές των εξαρτημένων μεταβλητών. Ο εξωτερικός επαναληπτικός βρόχος επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθούν οι πεπερασμένες εξισώσεις διαφοράς για όλες τις κυνέλες από τις τρέχουσες τιμές των κατάλληλων εξαρτημένων μεταβλητών. Επομένως οι εξισώσεις αναδημιουργούνται επανειλημμένα και λύνονται έως ότου δεν υπάρχει καμία αλλαγή στις εξαρτημένες μεταβλητές. Οι αλγεβρικές εξισώσεις κατασκευάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε εάν οι συντελεστές ήταν σταθεροί, θα είχαμε λύση που συγκλίνει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Gauss-Siedel. Οι συντελεστές των εξαρτημένων μεταβλητών περιέχουν τις εξαρτημένες μεταβλητές και δεν είναι επομένως σταθεροί. Στην πράξη, εάν οι συντελεστές είναι παρόμοιου μεγέθους σ' όλο τον υπολογιστικό χώρο και αλλάζουν βαθμιαία, μια συγκλίνουσα λύση είναι εφικτή.

2.4 «Ψεύτικα» Χρονικά Βήματα (False Time Steps)

Η επίτευξη σύγκλισης του αριθμητικού σχήματος δεν είναι εγγυημένη για όλες τις περιπτώσεις. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, εφ' όσον οι εξαρτημένες μεταβλητές παρουσιάζουν μικρή μεταβολή από επανάληψη σε επανάληψη και ιδιαίτερα οι ταχύτητες, είναι εφικτή η εύρεση μιας συγκλίνουσας λύσης. Ο κύριος μηχανισμός για να εξασφαλιστεί ότι οι μεταβλητές αλλάζουν αργά είναι αυτός των ψευδο-χρονικών βημάτων (false time-steps). Το πεπερασμένο σύνολο εξίσωσης διαφοράς διατυπώνεται υπό μορφή χρονικά-μεταβαλλόμενης εξίσωσης καθορισμένης αν και οι υπολογισμοί είναι «steady state», δηλ. ουσιαστικά ένα στιγμιότυπο στο χρόνο. Ο λόγος για αυτήν την διατύπωση είναι ότι ο χρονικός όρος είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος αριθμητικής χαλάρωσης, η οποία μπορεί να επιβραδύνει την αλλαγή στις εξαρτώμενες μεταβλητές προκειμένου να επιτευχθεί μια σταθερή λύση. Το ψεύτικο χρονικό βήμα (παράμετρος χαλάρωσης) είναι το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στο «ψεύτικο» χρονικό όρο της εξαρτώμενης μεταβλητής.

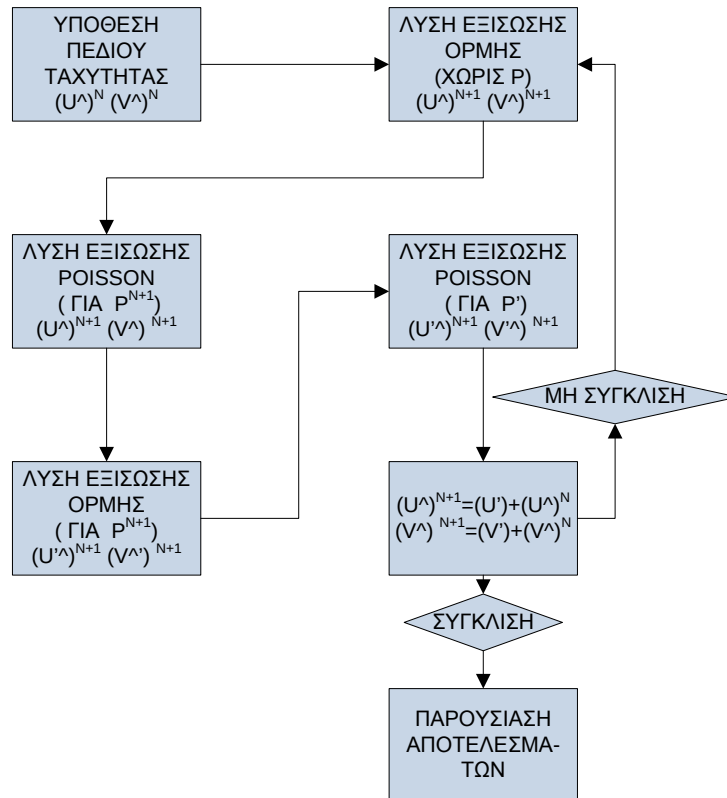
2.5 Σύζευξη εξισώσεων ορμής-πίεσης - Ο αλγόριθμος SIMPLER

Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις της ορμής παρουσιάζουν ιδιαιτερότητα λόγω της συνθήκης (περιορισμού) μη συμπίεστότητας η οποία απαιτεί-οδηγεί στον προσδιορισμό του κατάλληλου πεδίου πιέσεων ώστε να ισχύει ο εν λόγω περιορισμός. Η δυσκολία αυτή αντιμετωπίζεται με την μέθοδο των διαδοχικών επαναλήψεων ενώ οι όροι πίεσης αντιμετωπίζονται ως όροι πηγής. Ωστόσο στην εξίσωση της συνέχειας δεν υπάρχει αυτή η σύνδεση ταχύτητας-πίεσης που υπάρχει στην ορμή. Άρα απουσιάζει μια ρητή εξίσωση υπολογισμού της πίεσης.

Ο αλγόριθμος SIMPLER χρησιμοποιείται από το Designbuilder CFD για την σύζευξη των εξισώσεων της ορμής και συνέχειας καθώς και για τον προσδιορισμό της πίεσης. Στηρίζεται στην εκτίμηση ενός πεδίου πίεσης p^* και στην διόρθωση αυτού μέχρι οι ταχύτητες να ικανοποιήσουν και την εξίσωση συνέχειας σε κάθε υπολογιστική κυψέλη. Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις ορμής επιλύονται με βάση μία αρχική εκτίμηση του πεδίου πίεσης p^* και οι ταχύτητες που προκύπτουν (u^*, v^*) αντικαθίστανται στην εξίσωση συνέχειας η οποία παίρνει την μορφή της εξίσωσης διόρθωσης της πίεσης.[9]

SIMPLER (Semi-Implicit Method for pressure-Linked Equations Revised)

1. Υπόθεση ενός πεδίο πίεσης p^*
2. Λύση των εξισώσεων ορμής για να λάβετε u^*, v^*, w^*
3. Λύση του p' (η εξίσωση πίεση-διορθώσεων)
4. $p = p^* + p'$
5. Υπολογισμός το u, v, w και την χρησιμοποίηση των τιμών τους στις εξισώσεις ταχύτητα-διορθώσεων
6. Λύση της διακριτοποιημένης εξίσωση για άλλες μεταβλητές, όπως θερμοκρασία και ποσότητες αναταραχής.
7. Μεταχείριση διορθωμένης πίεση p ως νέα πίεση p^* , επιστροφή στο βήμα 2, και επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου SIMPLER [7]

2.6 Σύγκλιση

Η λύση μπορεί να θεωρηθεί ότι συγκλίνει όταν δεν υπάρχει καμία αντιληπτή αλλαγή στις εξαρτημένες μεταβλητές από μια εξωτερική επανάληψη σε άλλη.

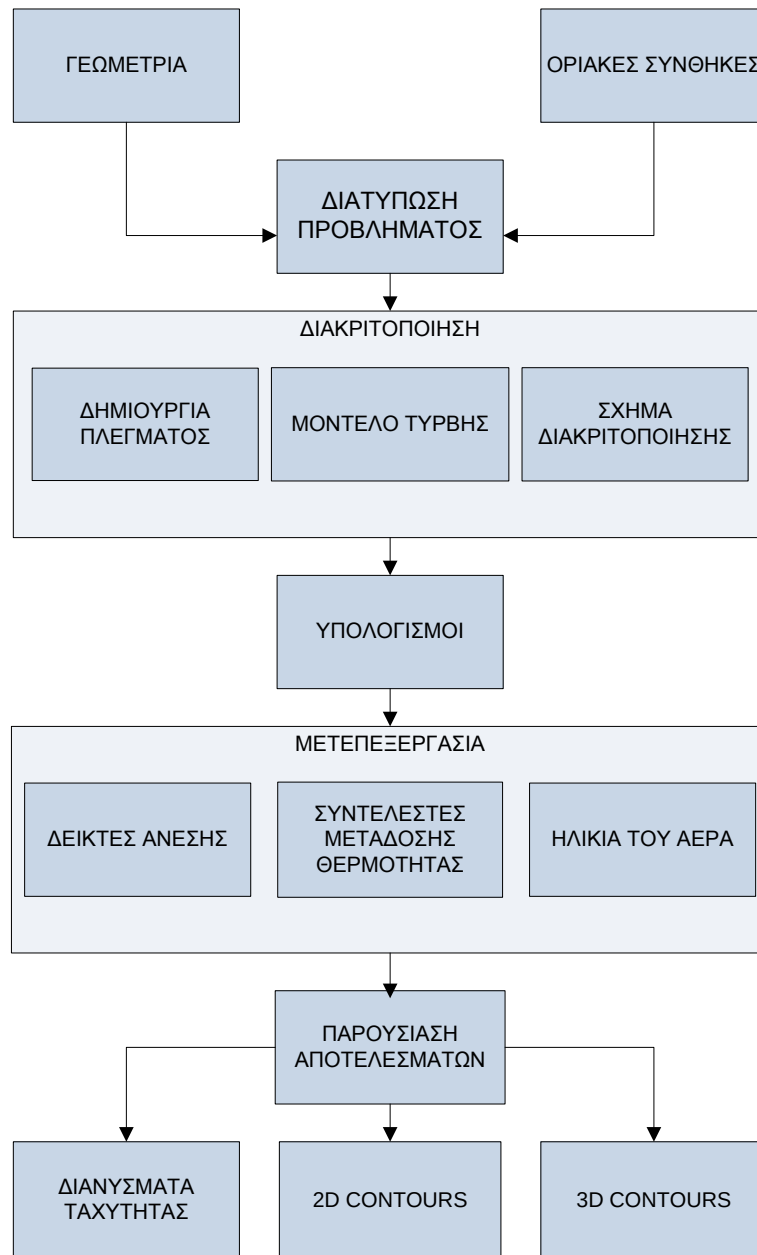
Σε περιπτώσεις όπου έχουν υιοθετηθεί πολύ μικρά «ψεύτικα» χρονικά βήματα, οι αλλαγές στις εξαρτημένες μεταβλητές μπορούν να μην είναι προφανείς.

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της διαμόρφωσης του όγκου ελέγχου είναι ότι μόλις επιτευχθεί η σύγκλιση, η ολοκληρωτική διατήρηση των ποσοτήτων όπως η μάζα, η ορμή και η ενέργεια ικανοποιείται ακριβώς για κάθε κελί, οποιαδήποτε ομάδα κελιών και φυσικά για ολόκληρη την περιοχή.

Μια σημαντικότερη ένδειξη της σύγκλισης είναι να εξεταστεί ο βαθμός στον οποίο η διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας ικανοποιείται για την περιοχή υπολογισμού. Ένα υπόλοιπο μπορεί να υπολογιστεί με την εξέταση της γενικής ισορροπίας μιας συγκεκριμένης ποσότητας χρησιμοποιώντας την αλγεβρική εξίσωση για την κατάλληλη εξαρτώμενη μεταβλητή:

$$R = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p$$

Τα μέγιστα υπόλοιπα για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή υπολογίζονται και συγκρίνονται με ένα παρεχόμενο υπόλοιπο λήξης για να καθορίσουν εάν η σύγκλιση έχει επιτευχθεί ή όχι.



Εικόνα 6: Διάγραμμα ροής των εργασιών CFD

Κεφάλαιο 3

Στοιχεία και Μοντελοποίηση

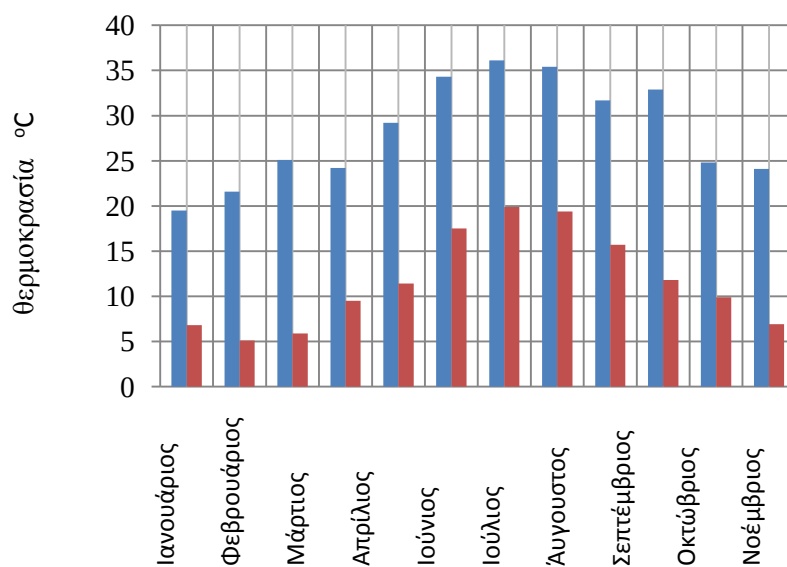
Έχοντας αναλύσει το μαθηματικό υπόβαθρο που αφορά την υπολογιστική ρευστομηχανική αναλύεται στη συνέχεια η μοντελοποίηση του κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη βοήθεια των λογισμικών DesignBuilder CFD και EnergyPlus. Το DesignBuilder είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα του κτηρίου όπως κατασκευαστικά υλικά, υαλοπίνακες, στοιχεία για το σύστημα θέρμανσης/κλιματισμού/εξαερισμού, στοιχεία για το είδος της δραστηριότητας των εργαζομένων. Επίσης παρέχει στο χρήστη σχεδιαστικό περιβάλλον αλλά και επιλογές που αφορούν στη μοντελοποίηση του κτηρίου. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω του EnergyPlus το οποίο είναι ένα λογισμικό θερμικής προσομοίωσης κτηρίων. Η ανάλυση που ακολουθεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αποσκοπεί στην πραγματοποίηση μελέτης των ροϊκών πεδίων στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του κτηρίου με σκοπό την αναγνώριση περιοχών βελτίωσης της θερμικής άνεσης χωρίς τη χρήση εκτεταμένων μετρήσεων αλλά με τη βοήθεια αξιόπιστου λογισμικού.

3.1 Κτήριο Τεχνικών Υπηρεσιών

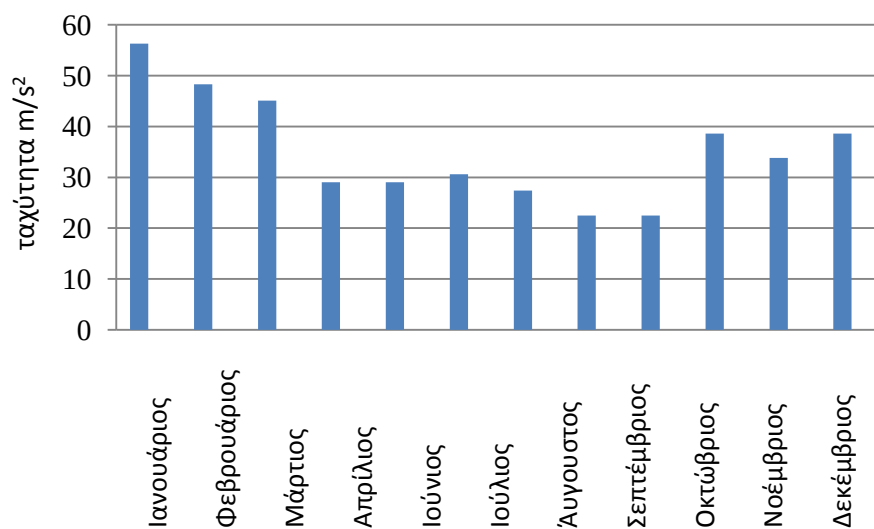
Το κτήριο αποτελείται από δύο ορόφους, ο καθένας έχει επιφάνεια 450 m^2 και χωρίζεται σε δέκα γραφεία, ένα δωμάτιο εξοπλισμού, τέσσερις διαδρόμους, μία τουαλέτα, ένα χώρο συνάντησης και την κεντρική είσοδο. Η διάταξη των δύο ορόφων είναι η ίδια με μόνη διαφορά την ύπαρξη του αίθριου επιφάνειας $17,6 \text{ m}^2$ στην οροφή του δεύτερου ορόφου. Στοιχεία του κτηρίου παρουσιάζονται παρακάτω.

Το υπό μελέτη κτήριο που μοντελοποιείται παρακάτω κατασκευάστηκε το 2006 και στεγάζει το τμήμα Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Βρίσκεται στην περιοχή Ακρωτήρι, 7 χιλιόμετρα βορειοδυτικά των Χανίων. Η περιοχή είναι αραιοκατοικημένη. Βρίσκεται σε υψόμετρο 137 μέτρα. Το γεωγραφικό μήκος είναι 24° και το γεωγραφικό πλάτος 35° . Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται από μεγάλης διάρκειας θερμά καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες με υψηλά ποσοστά υγρασίας και ηλιοφάνεια σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Ο χειμώνας διαρκεί από το Οκτώβριο έως τον Απρίλιο ενώ το καλοκαίρι διαρκεί από το Μάιο έως τον Σεπτέμβριο. Με βάση τα κλιματικά δεδομένα που εισήχθησαν στο EnergyPlus η μέγιστη θερμοκρασία είναι $36,1^\circ\text{C}$ τον Ιούλιο και η ελάχιστη $5,1^\circ\text{C}$ τον Φεβρουάριο. Η μέγιστες θερμοκρασίες του χρόνου παρατηρήθηκαν τον Ιούλιο και τον Αύγουστο ενώ οι χαμηλότερες τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Η μέση σχετική υγρασία το καλοκαίρι είναι περίπου 45% και το χειμώνα 55% ενώ η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου όπως σημειώθηκαν το έτος 2009 [5].



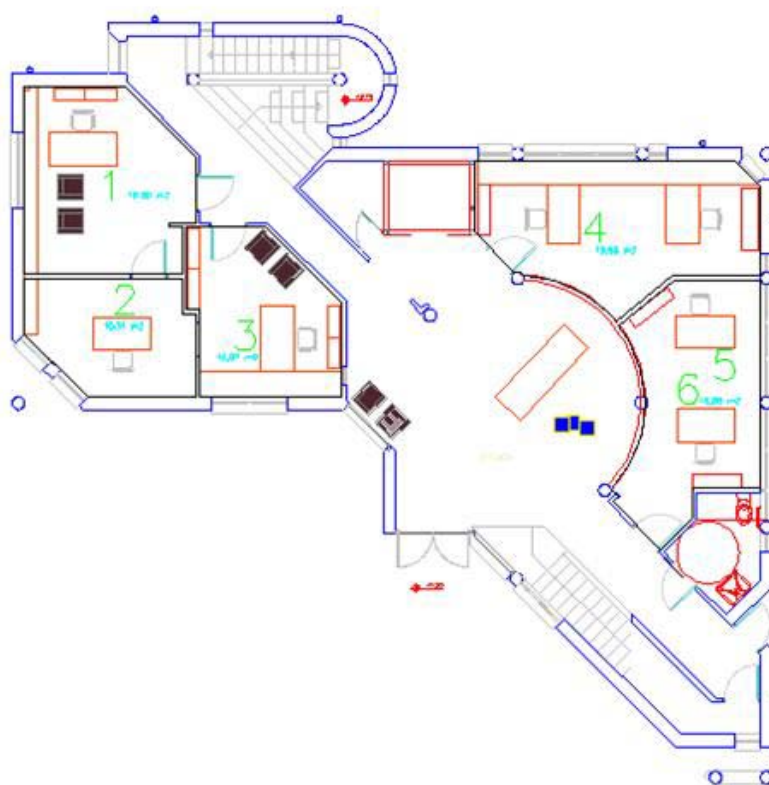
Εικόνα 7: Διάγραμμα των μέγιστων και ελάχιστων θερμοκρασιών που σημειώθηκαν κατά το έτος 2009 [10]



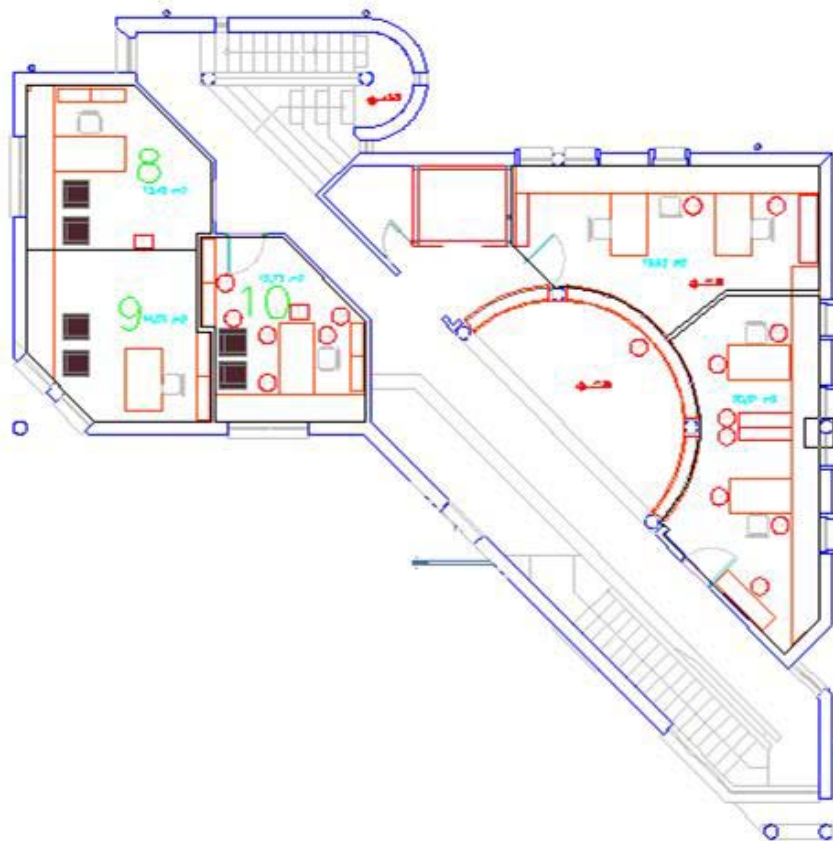
Εικόνα 8: Διάγραμμα της μέγιστης ταχύτητας του ανέμου ανά μήνα όπως καταγράφηκε κατά το έτος 2009[10]



Εικόνα 9: Πρόσοψη κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών[10]



Εικόνα 10: Κάτοψη ισογείου [10]



Εικόνα 11: Κάτοψη ορόφου [10]



Εικόνα 12: Το κτήριο σχεδιασμένο στο DesignBuilder

Περιγραφή	Επιφάνεια (m ²)	Ύψος(m)
Κτήριο	450	6,5
Πρώτος Όροφος	157	3,5
Δεύτερος Όροφος	157	3
Διάδρομος 1 ^{ου} ορόφου	91,85	3,5
Διάδρομος 2 ^{ου} ορόφου	49	3
Τουαλέτα	5,079	3,5
Γραφείο 1	21,89	3,5
Γραφείο 2	10,5	3,5
Γραφείο 3	13,58	3,5
Γραφείο 4	23,26	3,5
Γραφείο 5-6	17,8	3,5
Γραφείο 8	16,9	3
Γραφείο 9	15,19	3
Γραφείο 10	13,58	3
Γραφείο 11	23,8	3
Δωμάτιο Εξοπλισμού	7,9	3
Γραφείο 13	14,9	3

Πίνακας 5: Επιμέρους επιφάνειες του κτηρίου [5]

3.1.1 Οριοθέτηση της μοντελοποίησης

Η ανάλυση του κτηρίου μπορεί να γίνει σε τέσσερα επίπεδα:

Ζώνης (Zone)

Τμήματος (Block)

Κτηρίου (building)

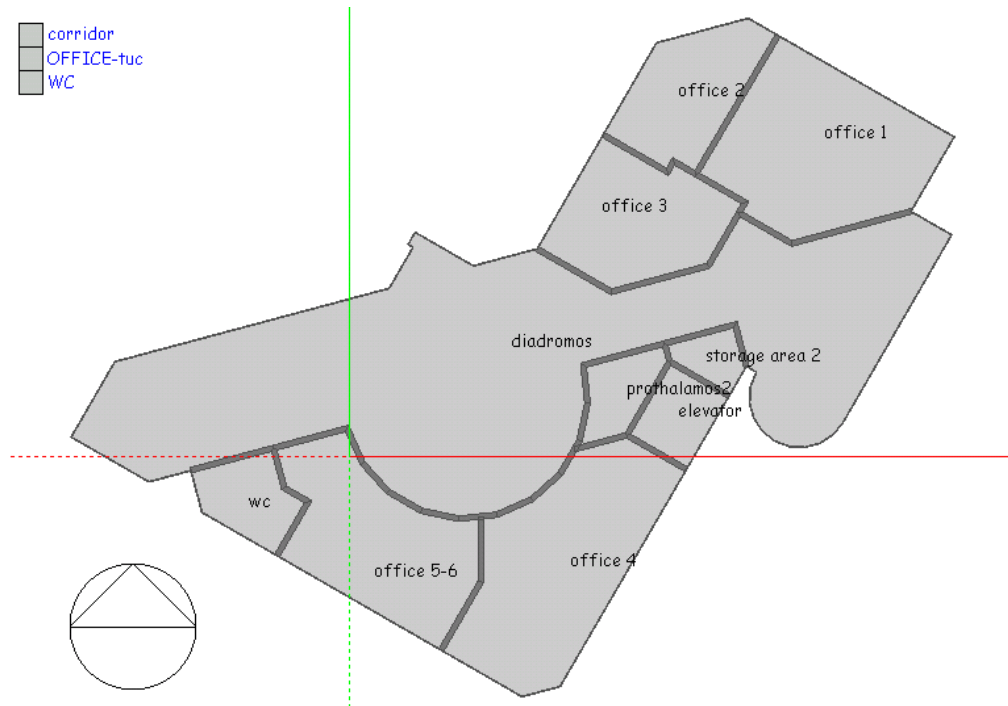
Περιοχής (Site)

Το επίπεδο το οποίο επιλέγεται καθορίζει και τον τύπο της ανάλυσης CFD (εσωτερική, εξωτερική) όπως επίσης και την έκταση του υπολογιστικού χωρίου (domain). Η εσωτερική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο ζώνης, τμήματος του κτηρίου καθώς και συνολικά στο εσωτερικό του κτηρίου. Αντίθετα, η εξωτερική ανάλυση πραγματοποιείται μόνο σε επίπεδο περιοχής.

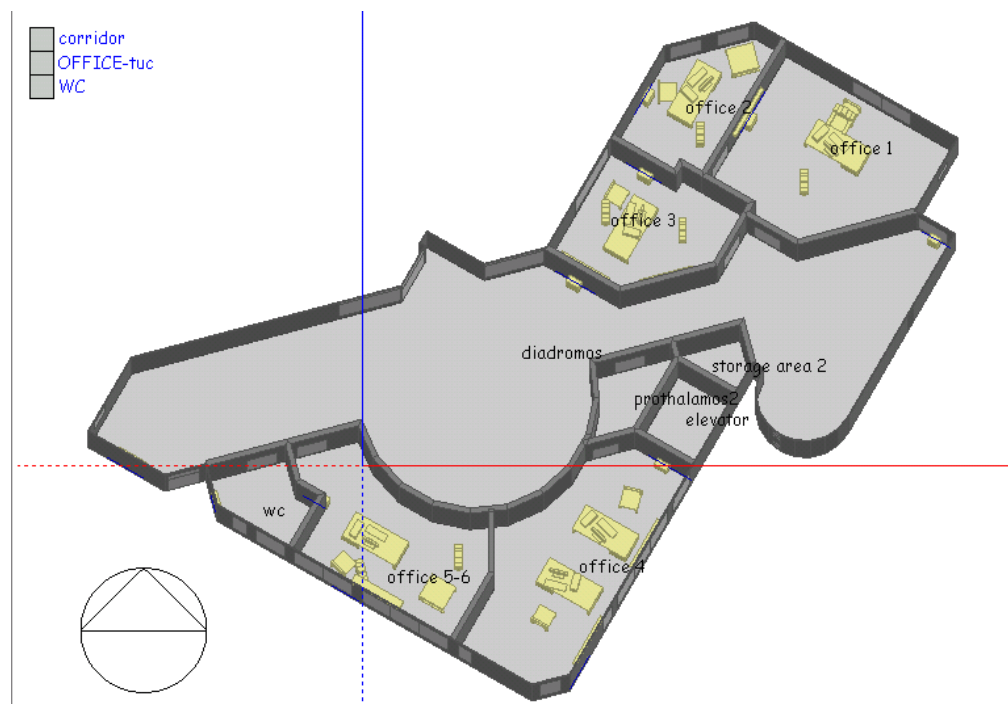
3.1.2 Γεωμετρία

Η γεωμετρία του κτηρίου στην αρχική φάση περιλαμβάνει την συνολική τοιχοποιία με τα παράθυρα, τις πόρτες και τα ανοίγματα ενώ μέσω του DesignBuilder εισήχθησαν στοιχεία που αφορούν την κατασκευή του. Στην συνέχεια διαμορφώνεται εσωτερικά ο κάθε χώρος.

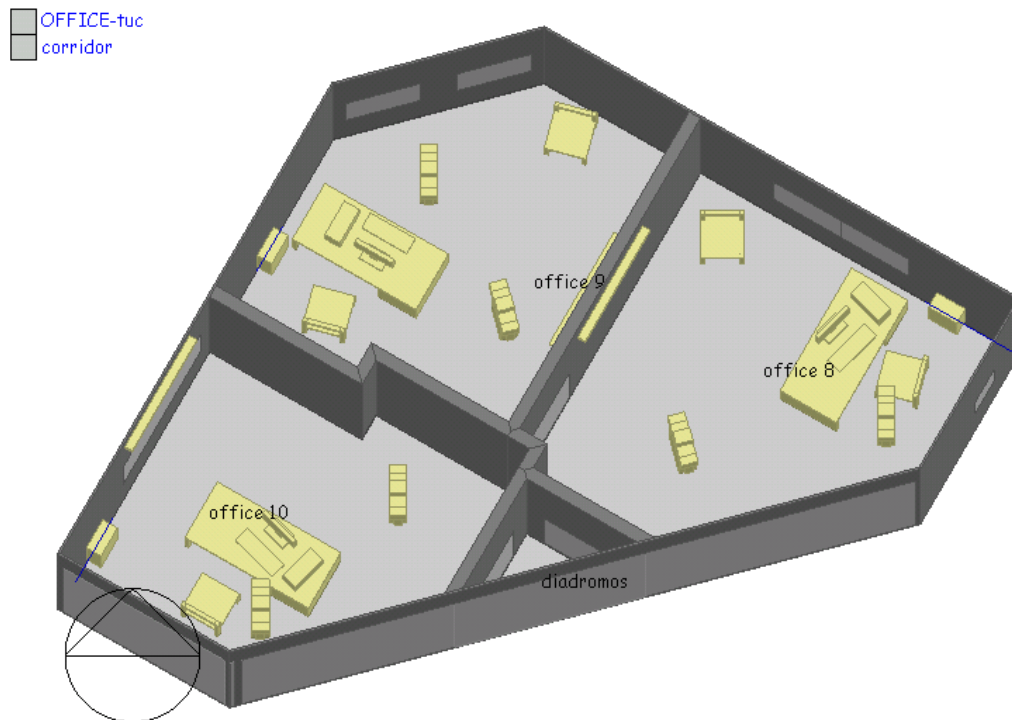
Αυτό έγινε με την προσθήκη έτοιμων αντικειμένων από την βιβλιοθήκη του Designbuilder άλλα και με την κατασκευή νέων όπου κρίνεται αναγκαίο. Τα αντικείμενα αναπαριστούν τους εργαζόμενους, τα γραφεία, καρέκλες, βιβλιοθήκες, τραπεζία, καλοριφέρ, φωτισμό και εξοπλισμό γραφείου. Σκοπός αυτής της προσθήκης είναι η καλύτερη δυνατή αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης του προβλήματος. Επιπλέον τα αντικείμενα χρησιμοποιούνται και ως οριακές συνθήκες στο πρόβλημα.



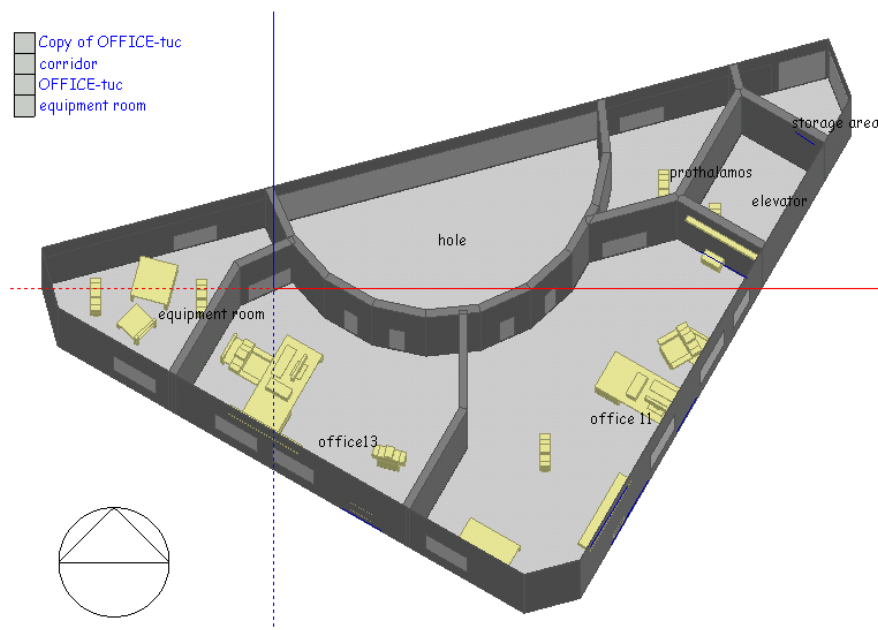
Εικόνα 13: Κάτοψη ισογείου σχεδιασμένη στο DesignBuilder



Εικόνα 14: Κάτοψη ισογείου μετά την προσθήκη αντικειμένων



Εικόνα 15: Κάτοψη τμήματος δευτέρου ορόφου μετά την προσθήκη των αντικειμένων

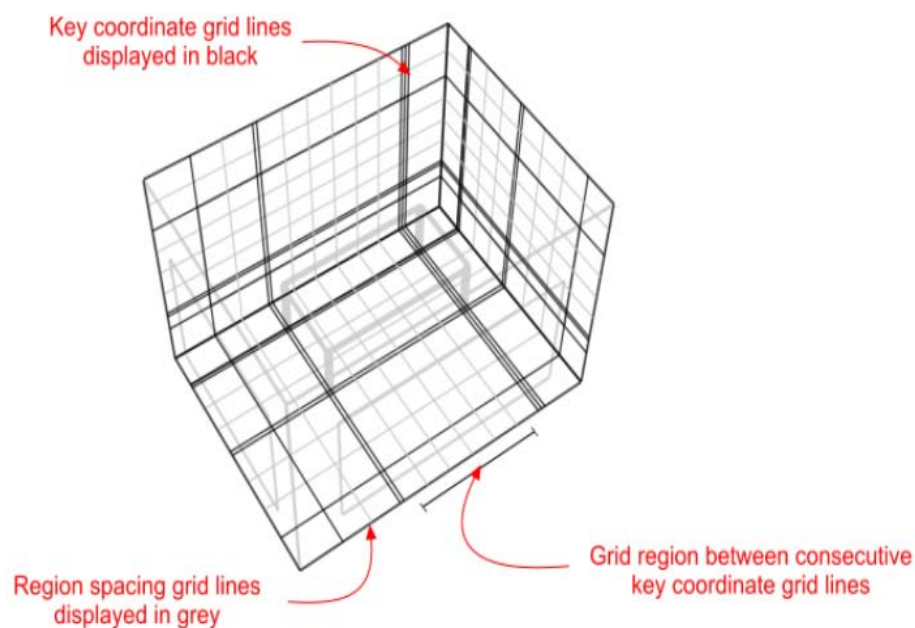


Εικόνα 16: Κάτοψη τμήματος δευτέρου ορόφου μετά την προσθήκη των αντικειμένων

3.1.3 Πλέγμα Διακριτοποίησης

Η μέθοδος υπολογισμού απαιτεί ότι ο γεωμετρικός χώρος μέσα στον οποίον θα πραγματοποιηθούν υπολογισμοί διαιρείται σε μη-επικαλυπτόμενες γειτονικές κυψέλες τα οποία είναι οι χώροι στοιχειώδους ολοκλήρωσης στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Την γεωμετρική αυτή διαμέριση του χώρου επίλυσης θα την ονομάζουμε υπολογιστικό πλέγμα.

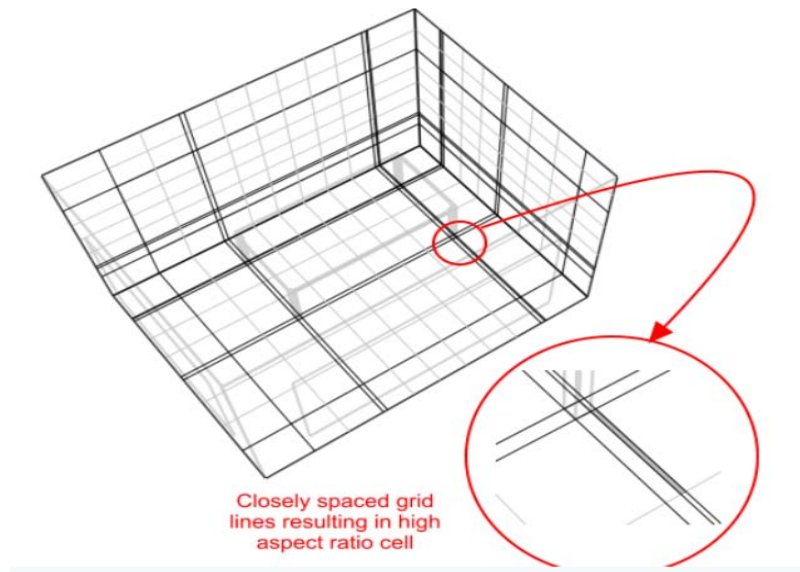
Όταν το πρόγραμμα CFD εκτελείται, ένα πλέγμα παράγεται αυτόματα για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Αρχικά αναγνωρίζονται όλα τα αντικείμενα που περιέχονται στον εξεταζόμενο χώρο και έπειτα παράγονται βασικές συντεταγμένες, από τις κορυφές των κύριων αντικειμένων, κατά μήκος των σημαντικότερων αξόνων πλέγματος. Αυτές οι βασικές συντεταγμένες, που επεκτείνονται από τους X,Y και Z άξονες πέρα από το πλάτος, το βάθος και το ύψος της περιοχής είναι οι γραμμές πλέγματος. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών πλέγματος κατά μήκος κάθε άξονα είναι γνωστή ως περιοχή πλέγματος και αυτές οι περιοχές χωρίζονται κατά διαστήματα αρχικά υιοθετώντας προεπιλεγμένο διάστημα πλέγματος προκειμένου να ολοκληρωθεί η παραγωγή του πλέγματος. Το πλέγμα που χρησιμοποιείται από το DesignBuilder CFD είναι ένα ανομοιόμορφο (non-uniform)καρτεσιανό πλέγμα, στο οποίο οι γραμμές πλέγματος είναι παράλληλες με τους σημαντικότερους άξονες ενώ η ανομοιομορφία προέρχεται από το μεταβλητό διάστημα μεταξύ των γραμμών του πλέγματος.



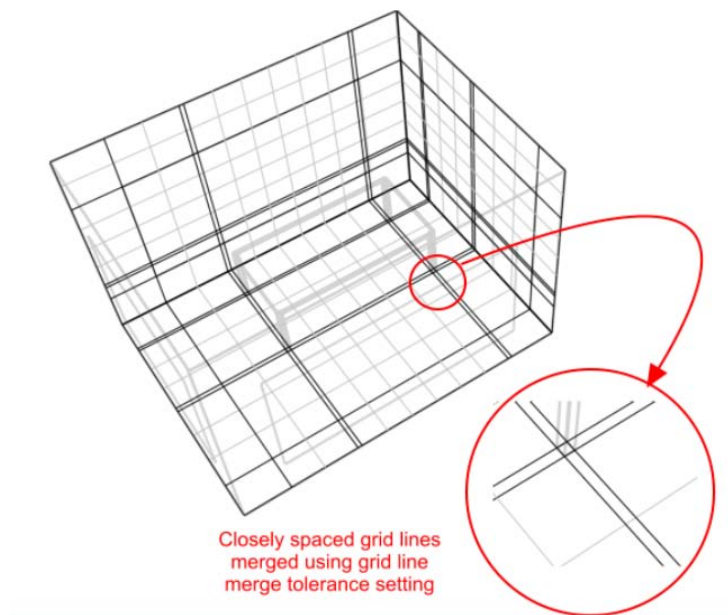
Εικόνα 17: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων όγκων [6]

Εξ ορισμού, οι περιοχές πλέγματος χωρίζονται ομοιόμορφα κατά διαστήματα χρησιμοποιώντας ένα διάστημα που υπολογίζεται να είναι όσο κοντά σε ένα προκαθορισμένο από το χρήστη διάστημα πλέγματος. Η απόσταση μεταξύ αυτών των κόμβων πρέπει να είναι μέσα σε αποδεκτά πλαίσια. Εν γένει, οι πολύ στενές περιοχές με συνέπεια τις μακριές στενές κυψέλες πλέγματος ή τις κυψέλες που έχουν έναν υψηλό λόγο διάστασης πρέπει να αποφευχθούν, δεδομένου ότι τείνουν να οδηγήσουν σε δυσκολίες σύγκλισης είτε να απαιτηθεί σημαντικό πλήθος επαναλήψεων. Τα αντικείμενα που έχουν ιδιαίτερες λεπτομέρειες μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ μεγάλους αριθμούς κόμβων με συνέπεια οι κυψέλες να έχουν υψηλούς τιμές της αναλογίας διάστασης (aspect ratio). Οι μεγάλοι αριθμοί κόμβων μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε υπερβολικά σύνθετα πλέγματα και κατά συνέπεια υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους ή/και μνήμη. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την αντικατάσταση των πολύπλοκων αντικειμένων με απλούστερες γεωμετρικές μορφοποιήσεις. Εντούτοις, όπου είναι αναπόφευκτες οι πολύ στενές περιοχές πλέγματος, οι

παρακείμενες γραμμές πλέγματος που διαμορφώνονται από τους κόμβους μπορούν να συγχωνευθούν ρυθμίζοντας την ανοχή συγχώνευσης.



Εικόνα 18: Παράδειγμα Πλέγματος πεπερασμένων όγκων με υψηλό λόγο διάστασης [6]



Εικόνα 19: Παράδειγμα Πλέγματος πεπερασμένων όγκων- συγχώνευση κελιών [6]

Λόγω της φύσης του πλέγματος, οι κυψέλες που βρίσκονται στις περιοχές έξω από το χωρίο υπολογισμού είναι αδρανοποιημένα.. Είναι σημαντικό να ληφθεί αυτό υπόψη κατά το δημιουργία ενός μοντέλου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της παραγωγής πλέγματος ή/και για να εξασφαλίσει ότι τα όρια των επιφανειών θα βρεθούν στο επίπεδο ενός σημαντικού άξονα πλέγματος για να επιτευχθεί ακριβής προσέγγιση των ορίων.

Η ακρίβεια προσέγγισης μη-ορθογώνιων επιφανειών μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας πυκνότερη διαμέριση ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις συγκεκριμένες περιοχές του πλέγματος μπορούν να πυκνωθούν για να αυξηθεί η ακρίβεια προσέγγισης σε μια συγκεκριμένη

περιοχή. Οι περιοχές πλέγματος μεταξύ των κόμβων μπορούν επίσης να χωριστούν κατά διαστήματα χρησιμοποιώντας τις ανομοιόμορφες επιλογές διαστήματος.

3.1.4 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Μια σημαντική έννοια στις αναλύσεις CFD είναι αυτή των οριακών συνθηκών. Για επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων για προσδιορισμό των εξαρτημένων μεταβλητών απαιτείται η διατύπωση συνθηκών σε περιοχές του ορίου της περιοχής υπολογισμού.

Ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών για τις εξωτερικές αναλύσεις είναι σχετικά απλός επειδή είναι ένας ισοθερμικός υπολογισμός, απαιτεί μόνο την έκθεση του κτηρίου στον άνεμο, την ταχύτητα του ανέμου καθώς και την κατεύθυνση του. Τα στοιχεία λαμβάνονται από αρχεία καιρού και εισάγονται από τον χρήστη.

Οι οριακές συνθήκες για την εσωτερική ανάλυση είναι πιο πολύπλοκες και απαιτούν την προσθήκη σε επίπεδο ζώνης των επιφανειακών συνθηκών όπως των αεραγωγών εισόδου και εξόδου των κλιματιστικών, θερμοκρασίες και παροχές όγκου και επίσης την τοποθέτηση των αντικειμένων με καθορισμένη θερμορροή που αντιπροσωπεύουν τους εργαζόμενους και τα θερμαντικά σώματα. Το DesignBuilder παρέχει αυτόματα προεπιλεγμένες σταθερές θερμοκρασίες για τις συνθήκες στους τοίχους και τα παράθυρα αλλά είναι σημαντικό να γίνεται έλεγχος ότι αυτές οι προεπιλογές είναι κατάλληλες.

Οι θερμοκρασίες στις εσωτερικές επιφάνειες για κάθε επιφάνεια στο κτήριο όπως επίσης παροχή όγκου αέρα μέσα από τα ανοικτά παράθυρα, πόρτες και γενικά κάθε είδους άνοιγμα μπορούν να υπολογιστούν από την θερμική προσομοίωση στο EnergyPlus και να υιοθετηθούν από το DesignBuilder CFD.

3.1.4.1 Οριακές Συνθήκες για την εσωτερική ανάλυση της ροής

Οι εσωτερικές οριακές συνθήκες μπορούν να καθοριστούν με τρεις τρόπους:

1. Οι θερμοκρασίες επιφάνειας και η παροχή όγκου μπορούν να καθοριστούν από τον χρήστη ή να υιοθετηθούν από την θερμική προσομοίωση του EnergyPlus, για όλες τις επιφάνειες σε επίπεδο ζώνης συμπεριλαμβανομένων των παραθύρων και άλλων ανοιγμάτων.
2. Οριακές συνθήκες για τις επιφάνειες σε επίπεδο ζώνης, συμπεριλαμβανομένων των αεραγωγών εισόδου και εξόδου των κλιματιστικών, τη σταθερή θερμοκρασία και σταθερή ροή θερμότητας, μπορούν να προστεθούν υπό μορφή νοητών επιφανειών (patches) χρησιμοποιώντας παρόμοια μέθοδο με αυτή που χρησιμοποιείται για την προσθήκη παραθύρων και πορτών.
3. Στερεά αντικείμενα που μπορούν να οριστούν ως συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας ή ροής θερμότητας, μπορούν επίσης να προστεθούν υπό μορφή νοητών επιφανειών (patches) στην υπάρχουσα γεωμετρία.

Οι ακόλουθοι τύποι οριακών συνθηκών είναι διαθέσιμοι για όλες τις επιφάνειες.

1. Αεραγωγός εισόδου (HVAC Supply diffuser). Σε αυτόν το τύπο καθορίζεται επιπρόσθετα η θερμοκρασία του αέρα που εισάγεται από το κλιματιστικό στον χώρο, η παροχή όγκου του αέρα, η γωνία στην οποία έχει ρυθμιστεί το κλιματιστικό να λειτουργεί, και η ελάχιστη απαραίτητη ταχύτητα στην είσοδο του κλιματιστικού.

2. Αεραγωγός εξόδου(HVAC extract grille)Σε αυτόν τον τύπο καθορίζεται επιπρόσθετα μόνο η παροχή εξόδου του αέρα.
3. Θερμοκρασία (surface temperature patch)
4. Θερμορροή (surface heat flux patch)

3.1.4. Αντικείμενα ως Οριακές Συνθήκες

3.1.4.1 Αντικείμενα στο DesignBuilder

Η βιβλιοθήκη του DesignBuilder περιέχει προκαθορισμένα αντικείμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν στο κτήριο στοιχεία όπως: οι κάτοικοι-εργαζόμενοι (occupants), τα θερμαντικά σώματα (radiators) τα έπιπλα (office desk, chair, table) , εξοπλισμός γραφείου (computer), φωτισμός (lighting).

Οι ακόλουθες ρυθμίσεις είναι διαθέσιμες για τα αντικείμενα

Είδος θερμικού ορίου (thermal boundary type)

Τα αντικείμενα μπορεί να διαθέτουν είτε σταθερή θερμοκρασία είτε σταθερή θερμορροή. Όσο αφορά την θερμορροή, γίνεται εισαγωγή του ποσοστού της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Radiant Fraction) που εισέρχεται στο χώρο μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από το αντικείμενο. Εάν είναι γνωστή η συνολική ροή θερμότητας είναι εφικτός ο υπολογισμός του εκ μεταφοράς μέρους με τον πολλαπλασιασμό με το ποσοστό ακτινοβολίας το οποίο έχει την τιμή 0 αν το θερμικό κέρδος προέρχεται εξ ολοκλήρου εκ μεταφοράς οπότε σε αυτή την περίπτωση όλη η θερμότητα μεταφέρεται στον χώρο ενώ η τιμή 1 σημαίνει ότι το θερμικό κέρδος προέρχεται εξ ολοκλήρου από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία.

Μάζα (Mass)

Καθορίζει εάν το αντικείμενο θα ενεργήσει ή όχι ως φυσικό εμπόδιο στην περιβάλλουσα ροή. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι επιθυμητό να καθοριστεί η θερμοκρασία ή η ροή του αντικειμένου αλλά να επιτρέπει στον αέρα να περάσει από μέσα του, π.χ. για να αναπαρασταθεί μια ροή σε έναν μεγάλο όγκο χωρίς να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση μεμονωμένων αντικειμένων.

3.1.5 Μοντελοποίηση των Αντικειμένων

Για την μοντελοποίηση του κτηρίου των Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα αντικείμενα και δημιουργήθηκαν νέα.

Συγκεκριμένα, προστέθηκαν έπιπλα όπως γραφεία, καρέκλες, βιβλιοθήκες που ενεργούν ως φυσικά εμπόδια στην περιβάλλουσα ροή. Τα αντικείμενα αυτά διαθέτουν θερμοκρασία 20 °C. Επίσης, συμπεριλήφθηκαν υπολογιστές γραφείου οι οποίοι ενεργούν ως οριακή συνθήκη σταθερής ροής θερμότητας. Οι υπολογιστές παρέχουν σημαντικά θερμικά κέρδη στο χώρο τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συγκεκριμένα, ένας υπολογιστής προσδίδει ενέργεια στην μονάδα του χρόνου 100W. Σε γραφεία όπου υπάρχουν και εκτυπωτές θεωρούνται ότι αποφέρουν κέρδη 15W όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής. Για να μην υπάρχουν πολλά αντικείμενα σε κάθε χώρο, για γραφεία όπου ο εξοπλισμός, πέρα από υπολογιστή, περιλαμβάνει και εκτυπωτή, επιλέχθηκε τιμή του θερμικού κέρδους για το υπολογιστή ίση με 115W.

Επιπλέον, τοποθετήθηκαν αντικείμενα σε διάφορα σημεία στο χώρο που αντιπροσωπεύουν τους εργαζομένους (occupants). Ένας εργαζόμενος ο οποίος κάνει ελαφριά δουλειά γραφείου προσδίδει εσωτερικό θερμικό κέρδος 120W στο περιβάλλον όταν είναι καθιστός και 140W όταν βρίσκεται σε κίνηση.[4]

Ακόμα, προστέθηκαν καλοριφέρ (radiator) τα οποία επίσης εκπέμπουν σταθερή ροή θερμότητας. Το ποσό της ροής εξαρτάται από τον τύπο του καλοριφέρ ο οποίος διαφέρει από γραφείο σε γραφείο.

Τέλος, κατασκευάστηκαν νέα αντικείμενα που αντιπροσωπεύουν τον φωτισμό του χώρου. Η κάθε λάμπα τεχνητού φωτισμού εκπέμπει ισχύς ίση με 36W.

Τα καλοριφέρ και ο τεχνητός φωτισμός είναι ενεργά κυρίως το χειμώνα. Τις υπόλοιπες περιόδους λειτουργούν απλά σαν φυσικά εμπόδια.

Στην συνέχεια, έγινε η εισαγωγή των κλιματιστικών σε κάθε γραφείο. Η θερμοκρασία και η παροχή αέρα ρυθμίστηκαν ανάλογα με τον τύπο του κλιματιστικού ο οποίος διαφέρει από γραφείο σε γραφείο. Παράλληλα με την εισαγωγή των κλιματιστικών προστέθηκαν και αντίστοιχοι αγωγοί εξόδου στην οροφή του κάθε γραφείου πάνω ακριβώς από την θέση του κλιματιστικού. Παρακάτω παρουσιάζονται στοιχεία για τον κλιματισμό, την θέρμανση, των φωτισμό και τον εξοπλισμό γραφείου.

Γραφείο	Τύπος	Φέτες	στήλες	Μήκος (mm)	Υψος _{h2} (mm)	Υψος _{h1} (mm)	Ισχύς (kW)
Γραφείο 1	k11	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 2	k13	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 3	k12	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 4	k18	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 5-6	k17	18	3	684	905	995	2.72
Γραφείο 8	k2	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 9	k3	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 10	k4	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 11	k8	10	3	380	505	595	0.93
Γραφείο 11	k9	10	3	380	905	995	1.51
Γραφείο 13	k7	12	4	456	905	995	2.37
WC	k16	10	2	380	905	995	1.04
Διάδρομος 1a	k14	10	3	380	905	995	1.51
Διάδρομος 1a	k15	22	2	836	905	995	2.3

Διάδρομος 2a	k5	10	3	380	905	995	1.51
Διάδρομος 2a	k6	24	2	912	905	995	2.51
Διάδρομος 2b	k1	14	2	532	355	445	0.89
Διάδρομος 1b	k10	8	3	304	905	995	1.2

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά θερμαντικών σωμάτων [8]

Γραφείο	Κλιματιστικό	Συντελεστής απόδοσης COP	Capacity (kW)
Γραφείο 1	Haier HSU-09 HC03/R2	3.82	2.6
Γραφείο 2	MITSUBISHI MSH-AXV12WV	2.41	3.5
Γραφείο 3	MITSUBISHI MSH-AXV12WV	2.41	3.5
Γραφείο 4	MITSUBISHI GA50VB	2.81	5
Γραφείο 5-6	MITSUBISHI MCFH-A24WV	2.45	6
Γραφείο 8	Haier HSU-09 HC03/R2	3.82	2.6
Γραφείο 9	MITSUBISHI MSH-AXV12WV	2.41	3.5
Γραφείο 10	MITSUBISHI MSH-AXV12WV	2.41	3.5
Γραφείο 11	MITSUBISHI GA50VB	2.81	5
Γραφείο 13	MITSUBISHI GA50VB	2.81	5

Πίνακας 7: Τεχνικά Χαρακτηριστικά κλιματιστικών ανά γραφείο [8]

Ζώνη	Επιφάνεια (m ²)	Σωλήνες φωτισμού	Συνολική ενεργειακή απαίτηση (W)	W/m ²
Ισόγειο- Διάδρομος	91.85	8	288	3.13
1 ^{ος} Όροφος- Διάδρομος	49	8	288	5.87
WC	5.079	1	36	7.08
Γραφείο 1	21.89	4	144	6.57

Γραφείο 2	10.5	4	144	13.7
Γραφείο 3	13.58	8	288	21.2
Γραφείο 4	23.26	8	288	12.38
Γραφείο 5,6	17.8	10	360	20.2
Γραφείο 8	16.9	4	144	8.52
Γραφείο 9	15.19	4	144	9.48
Γραφείο 10	13.58	8	288	21.2
Γραφείο 11	23.8	14	504	21.17
Γραφείο 12 (Δωμάτιο εξοπλισμού)	7.9	2	72	9.11
Γραφείο 13	14.9	6	216	14.5

Πίνακας 8: Τεχνητός φωτισμός ανά γραφείο [10]

Ζώνη	Επιφάνεια (m ²)	Εξοπλισμός γραφείου	Θερμικά κέρδη H/Y (W/m ²)	Θερμικά κέρδη εξοπλισμού (W/m ²)
Γραφείο 1	21.89	1 PC (100 Watt)	4.57	-
Γραφείο 2	10.5	1 PC (100 Watt), 1 printer (15 Watt, sleep mode)	9.52	1.42
Γραφείο 3	13.58	1 PC (100 Watt), 1 printer (15 Watt, sleep mode)	7.36	1.1
Γραφείο 4	23.26	1 PC (100 Watt), 1 printer (15 Watt, sleep mode)	4.3	0.64
Γραφείο 5,6	17.8	2 PC (200 Watt)	11.23	-
Γραφείο 8	16.9	1 PC (100 Watt), 1 printer (15 Watt, sleep mode)	5.9	0.88
Γραφείο 9	15.19	1 PC (100 Watt), 1 printer (15 Watt, sleep mode)	6.58	0.94
Γραφείο 10	13.58	1 PC (100 Watt)	7.36	-
Γραφείο 11	23.8	1 PC (100 Watt)	4.2	-
Γραφείο 12 (Δωμάτιο)	7.9	1 plotter (HP designjet 800ps-15 Watt sleeping mode, 150	-	22.4

εξοπλισμού)		Watt max), OKI C7300 (120 Watt sleep mode), Samsung SF-560 R (12 Watt, sleep mode), refrigerator Goldstar GR-1410 GS (30 Watt)		
Γραφείο 13	14.9	1 H/Y (100 Watt)	6.7	-

Πίνακας 9: H/Y και περιφερειακά ανά γραφείο [10]

3.1.6 Προετοιμασία της προσομοίωσης για να παράγει τις οριακές συνθήκες

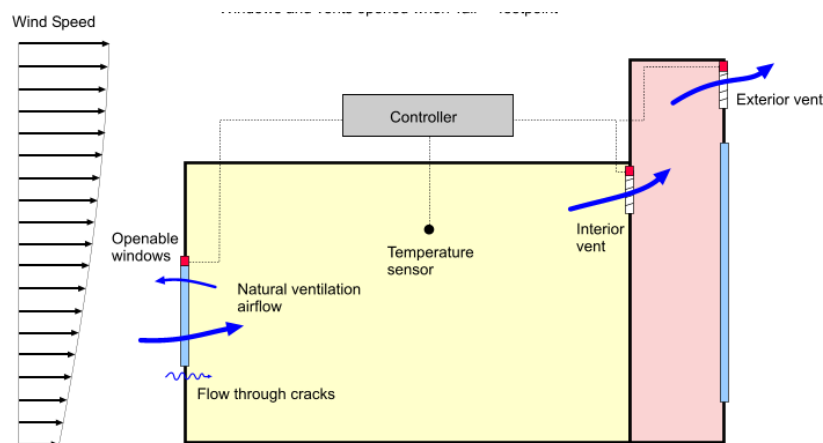
Οι προσομοιώσεις του EnergyPlus χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι οριακές συνθήκες για τους υπολογισμούς CFD. Το EnergyPlus υπολογίζει τη γενική θερμική συμπεριφορά του κτηρίου κυρίως όσο αφορά τις θερμοκρασίες των εσωτερικών επιφανειών και την παροχή όγκου του φυσικού εξαερισμού. Έπειτα το CFD επιτρέπει στο χρήστη να εστιάσει στις λεπτομέρειες της διανομής της θερμοκρασίας και της ροής μέσα στο χώρο για ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο του χρόνου προσομοίωσης.

Τα στοιχεία της προσομοίωσης του EnergyPlus που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες στους υπολογισμούς CFD είναι:

- Θερμοκρασίες στις εσωτερικές επιφάνειες
- Παροχή όγκου αέρα μέσω των εξωτερικών παραθύρων, των πορτών, των διεξόδων και των ανοιγμάτων

Τα βήματα που απαιτούνται για την εξαγωγή των οριακών συνθηκών από την προσομοίωση είναι:

1. Ο φυσικός εξαερισμός (Natural Ventilation) μοντελοποιείται με αναλυτικές μεθόδους (Calculated). Το EnergyPlus υπολογίζει την παροχή χρησιμοποιώντας τον αέρα, το μέγεθος των ανοιγμάτων, τη λειτουργία τους και τα μεγέθη των ρωγμών.



Εικόνα 20: Υπολογισμός του φυσικού εξαερισμού[6]

2. Η διήθηση του αέρα (Infiltration) δεν μοντελοποιείται στο CFD, οπότε σε περίπτωση που γίνεται ανάλυση της καλοκαιρινής περιόδου είναι προτιμότερο να απενεργοποιείται η

επιλογή για την διήθηση του αέρα από τις προσομοιώσεις. Αυτό θα εξασφαλίσει ότι υπάρχει ισοζύγιο μάζας με ελάχιστη ή καμία ανάγκη για διόρθωση της μάζας κατά την εισαγωγή των δεδομένων στον πίνακα των οριακών συνθηκών. Επιταχύνεται επίσης η προσομοίωση, με τη μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών στο EnergyPlus. Η προσομοίωση το χειμώνα ενδέχεται να χρειαστεί να συμπεριλαμβάνει τη διήθηση εάν είναι σημαντική.

3.Εξασφάλιση ότι όλα τα παράθυρα διαμορφώνονται χωριστά με την απενεργοποίηση των Lumping and Merging. Η επιλογή Lumping and Merging χρησιμοποιείται στην περίπτωση που υπάρχουν όμοια παράθυρα και μοντελοποιούνται με τον ίδιο τρόπο.

4.Προετοιμασία των δεδομένων της προσομοίωσης. Πραγματοποίηση δοκιμών στις προσομοιώσεις και έλεγχος ότι τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα κατά τη διάρκεια της περιόδου ενδιαφέροντος (π.χ. συνθήκες θερινού σχεδίου).

5.Πλοήγηση στο επιθυμητό επίπεδο που θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση (ζώνης, μπλοκ, κτηρίου) και από την καρτέλα *Options* γίνεται επιλογή των παρακάτω:

Store opening output – Με αυτή την επιλογή εξασφαλίζεται ότι τα δεδομένα για τα παράθυρα, τις διεξόδους, τις πόρτες, τα ανοίγματα και τις υποεπιφάνειες συμπεριλαμβάνονται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Inside Surface Temperature - Με αυτή την επιλογή αποθηκεύονται οι θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας για όλες τις επιφάνειες και τα ανοίγματα στην περιοχή.

Airflow in - Με αυτή την επιλογή καταγράφεται η ροή που εισέρχεται μέσω των παραθύρων, των διεξόδων, των πορτών και της τρύπας (υπολογισμοί φυσικού εξαερισμού μόνο).

Airflow out - Με αυτή την επιλογή καταγράφεται η ροή που εξέρχεται μέσω των παραθύρων, των διεξόδων, των πορτών και των ανοιγμάτων (υπολογισμοί φυσικού εξαερισμού μόνο).

6. Επιλογή χρονικού βήματος για την προσομοίωση. Το EnergyPlus μπορεί να υπολογίζει με χρονικό βήμα από 1 λεπτό έως 1 ώρα.

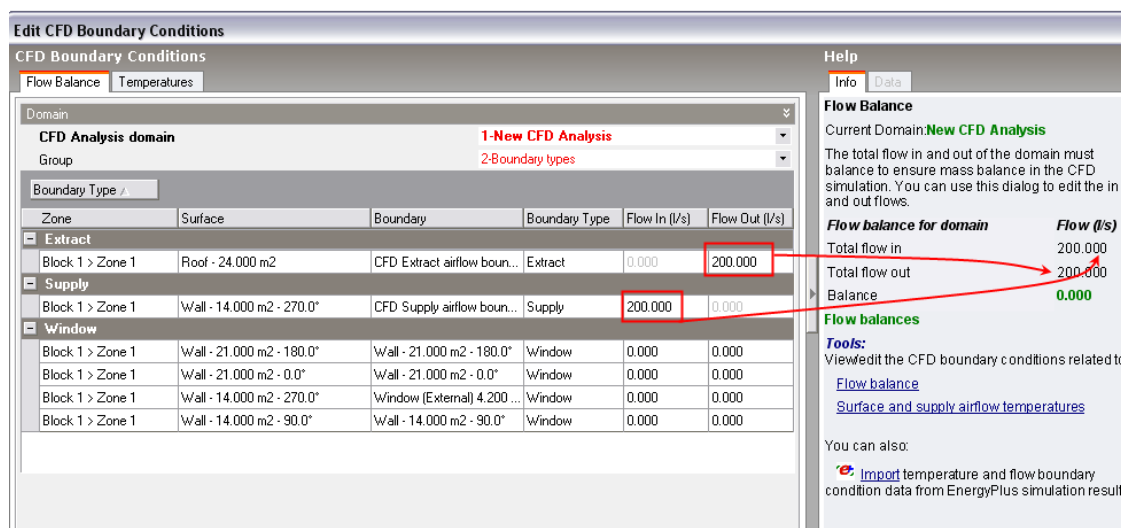
7. Έλεγχος των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με την εξέταση των ωριαίων αποτελεσμάτων πριν την υιοθέτηση τους στους υπολογισμούς CFD. Ο έλεγχος έγκειται στο ότι η ροή του αέρα μέσω των παραθύρων πρέπει να έχει την αναμενόμενη κατεύθυνση βασισμένη στην κατεύθυνση του αέρα και τις αναμενόμενες πιέσεις.

8. Εισαγωγή των οριακών συνθηκών που σχετίζονται με τις θερμοκρασίες των επιφανειών και τις ροές στα παράθυρα, πόρτες, ανοίγματα, από το EnergyPlus με κατάλληλη επιλογή του χρόνου. Στην πραγματικότητα, γίνεται επιλογή ενός στιγμιότυπου στο χρόνο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης CFD.

9. Προσθήκη αντικειμένων και προσδιορισμός των επιπλέον οριακών συνθηκών.

10. Έλεγχος ότι η συνολική εκ μεταφοράς θερμότητα από τα εσωτερικά κέρδη στο μοντέλο CFD είναι ίδια και στην προσομοίωση του EnergyPlus.

11.Έλεγχος ότι τα αποτελέσματα CFD αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες που παρέχονται με την προσομοίωση.



Εικόνα 21: Καρτέλα Εισαγωγής Οριακών Συνθηκών [6]

Η εισαγωγή οριακών συνθηκών γίνεται από την καρτέλα του CFD Boundary Editor. Συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής δυνατότητες:

Έλεγχος και ρύθμιση των παροχών μάζας για κάθε έναν από τους αεραγωγούς εισόδου και εξόδου των κλιματιστικών και επίσης μέσω κάθε παραθύρου, διεξόδου, πόρτας και ανοιγμάτων στην επιλεγμένη περιοχή.

Έλεγχος ότι η συνολική ροή που εισέρχεται ισορροπεί με τη συνολική ροή που εξέρχεται (μια βασική απαίτηση για τους υπολογισμούς CFD). Εάν οι ροές δεν ισορροπούν υπάρχουν επιλογές να εφαρμοστεί αυτόματα μια διόρθωση της ροής σε ένα από τα υπάρχοντα ανοίγματα για να εξασφαλιστεί η ισορροπία.

Σε κάθε επιφάνεια όπου απαιτείται καθορισμός της οριακής συνθήκης, (επιφάνειες, ροή ανεφοδιασμού, παράθυρα, οριακές συνθήκες θερμοκρασίας) προσδιορισμός της δεδομένης θερμοκρασίας.

Εισαγωγή οριακών συνθηκών για τις επιφάνειες και τα ανοίγματα στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας εξόδους της προσομοίωσης του EnergyPlus.

3.2 Εσωτερική Ανάλυση

Μόλις δημιουργηθεί μια νέα ανάλυση, παράγεται ένα πλέγμα χρησιμοποιώντας το προεπιλεγμένο διάστημα πλέγματος (default grid spacing). Ωστόσο, είναι επιθυμητό αρκετές φορές να ρυθμίζεται κατάλληλα το πλέγμα, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη σύγκλιση και πιο ακριβή αποτελέσματα. Σε περιοχές όπου παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση των μεγεθών είναι προτιμότερη η πυκνωση του πλέγματος ενώ αντίθετα σε περιοχές που έχουμε ελάχιστη έως και μηδενική διακύμανση των μεγεθών είναι προτιμότερη η αραίωση του πλέγματος, μειώνοντας έτσι και τον υπολογιστικό φόρτο. Για την εσωτερική ανάλυση του κτηρίου των Τεχνικών Υπηρεσιών επιλέχθηκαν για ανάλυση συγκεκριμένα γραφεία στο ισόγειο και στον πρώτο όροφο όπως επίσης και ο διάδρομος του ορόφου. Τα δωμάτια αναλύθηκαν στις εξής περιπτώσεις:

1. Επιλογή θερμής μέρας και ρύθμιση των παραθύρων να είναι συνέχεια τελείως ανοικτά.

2. Επιλογή θερμής μέρας, ρύθμιση των κλιματιστικών να βρίσκονται σε λειτουργία χωρίς ανοικτά παράθυρα.
3. Επιλογή ψυχρής μέρας, ρύθμιση των καλοριφέρ να βρίσκονται σε λειτουργία.

3.2.1 Διαμόρφωση πλέγματος

Οι ακόλουθες ρυθμίσεις είναι διαθέσιμες στη καρτέλα διαμόρφωσης του CFD πλέγματος:

3.2.1.1 Λειτουργία (Operation)

3.2.1.1.1 Διαμόρφωση περιοχής (Edit Region):

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αλλαγή των παραμέτρων της επιλεγμένης περιοχής.

Εισαγωγή Περιοχής (Insert Region) Παρεμβολή μιας νέας βασικής συντεταγμένης σε ένα καθορισμένο σημείο στην τρέχουσα περιοχή.

Αφαίρεση Περιοχής (Remove Region) Αυτή η επιλογή είναι μόνο διαθέσιμη εάν η τρέχουσα περιοχή έχει προστεθεί προηγουμένως και επιτρέπει την αφαίρεσή της.

3.2.1.1.2 Τύπος διαμέρισης (Spacing Type)

Ομοιόμορφο (Uniform) - Η περιοχή υποδιαιρείται σε ίσες υποδιαστήματα, η διάσταση των οποίων υπολογίζεται ώστε να είναι κοντά στην προκαθορισμένη διάσταση.

Increasing power-law - Η θέση κάθε γραμμής πλέγματος υποδιαίρεσης αυξάνεται ως δύναμη του αριθμού διαστήματος, το οποίο ξεκινά στην αρχή της περιοχής. Έτσι ώστε εάν i είναι ο αριθμός δείκτης της γραμμής πλέγματος που μετρίεται από την αρχή της περιοχής, η συντεταγμένη της γραμμής πλέγματος υποδιαίρεσης i th υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$x_i = (rd)(i / n)^2 + x_s,$$

όπου rd η διάσταση της περιοχής.

Decreasing power-law - η θέση κάθε γραμμής πλέγματος υποδιαίρεσης μέσα στην περιοχή μειώνεται ως δύναμη του αριθμού διαστήματος, το οποίο ξεκινά στο τέλος της περιοχής. Έτσι ώστε εάν i είναι ο αριθμός δείκτης της γραμμής πλέγματος που μετρίεται από την αρχή της περιοχής, η συντεταγμένη της γραμμής πλέγματος υποδιαίρεσης i th υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$x_i = (rd)(1 - (i / n)^2) + x_s$$

Symmetric power-law - Η συντεταγμένη της γραμμής πλέγματος υποδιαίρεσης i th υπολογίζεται χρησιμοποιώντας και αύξηση και μείωση τις σχέσεις power-law που συναντιούνται στη μέση της περιοχής:

$$i \leq n / 2 \rightarrow x_i = [(rd) / 2](2i / n)^2 + x_s$$

$$i > n / 2 \rightarrow x_i = [(rd) / 2][2 - (2i / n)^2] + x_s$$

Τα προβλήματα μπορεί να παρουσιαστούν κατά την δημιουργία του πλέγματος είναι τα εξής:

1.Ο μέγιστος λόγος διαστάσεων του κελιού υπερβαίνει το επιθυμητό όριο. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να διαγραφεί το υπάρχον πλέγμα και να δημιουργηθεί ένα νέο είτε που μειώνει τη διάσταση πλέγματος είτε αυξάνει την ανοχή συγχώνευσης κατά ένα κατάλληλο ποσό.

2.Η απαιτούμενη μνήμη υπερβαίνει την διαθέσιμη μνήμη. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να διαγραφεί το υπάρχον πλέγμα και να δημιουργηθεί ένα νέο πλέγμα με μικρότερο αριθμό κόμβων.

3.Μη ισορροπία μάζας. Το συνολικό ποσό ροής που παρέχεται από τους αεραγωγούς εισόδου δεν ισορροπεί με το συνολικό ρυθμό ροής που παρέχεται για τα αεραγωγούς εξόδου.

3.2.2 Ρυθμίσεις των υπολογισμών (CFD Calculation Options)

Η καρτέλα για τους υπολογισμούς ενσωματώνει τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

3.2.2.1 Μοντέλο Τύρβης (Turbulence Model)

k-ε: Αυτό το πρότυπο είναι ένα από ευρύτατα χρησιμοποιούμενα και δοκιμασμένα όλων των μοντέλων τύρβης, και ανήκει στην RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) οικογένεια μοντέλων. Αυτά τα πρότυπα περιλαμβάνουν την αντικατάσταση της στιγμιαίας ταχύτητας στις εξισώσεις Navier-Stokes και στις εξισώσεις ενέργειας με μια μέση και μια κυμαινόμενη συνιστώσα. Οι προκύπτουσες εξισώσεις δίνουν έμφαση στους πρόσθετους όρους γνωστούς ως τάσεις Reynolds. Οι πιέσεις και τάσεις αντικαθίστανται με κατάλληλους όρους οι οποίοι λαμβάνουν υπ' όψη και τις τυρβώδεις επιδράσεις. Ενώ το ορίζεται ο συνολικός συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας ο οποίος αποτελείται από τον συντελεστή δυναμικής συνεκτικότητας και κατάλληλο όρο ο οποίος περιλαμβάνει τις τυρβώδεις επιδράσεις. Ο όρος αυτός υπολογίζεται από τις εκάστοτε τιμές του k (τυρβώδης κινητική ενέργεια) και ε (ρυθμός διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας), όπως προκύπτουν από την επίλυση εξισώσεων για τους δύο αυτούς όρους. Η λεπτομερέστερη περιγραφή της μοντελοποίησης των τυρβωδών όρων ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής – για περισσότερες λεπτομέρειες το [11] δίνει μια πλήρη περιγραφή.

Σταθερός συνολικός συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας (Constant effective viscosity): Η επιλογή αυτή αποτελεί μια απλούστερη προσέγγιση και περιλαμβάνει την αντικατάσταση της δυναμικής συνεκτικότητας στις εξισώσεις Navier-Stokes με μια σταθερή τιμή. Αν και αυτό το μοντέλο αδυνατεί να συν-υπολογίσει τοπικές αλλαγές του ενεργού συντελεστή δυναμικής συνεκτικότητας (όπως για παράδειγμα γίνεται με χρήση του μοντέλου τύρβης k-ε), έχει μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις και είναι αριθμητικά σταθερότερο (προφανώς με το μειονέκτημα τη μειωμένη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων).

3.2.2.2 Σχήμα Διακριτοποίησης (Discretisation scheme)

Στην καρτέλα επιλογής του σχήματος διακριτοποίησης δίνονται τρεις επιλογές:

Ανάντι (Upwind). Χρησιμοποιείται η ανάντι μέθοδος διακριτοποίησης για την εξαγωγή των διακριτοποιημένων εξισώσεων πεπερασμένων όγκων.

Υβριδικό σχήμα (Hybrid). Πρόκειται για υπολογιστικά πιο ακριβή προσέγγιση από το ανάντι σχήμα αλλά μειώνει την αριθμητική διάχυση στις υψηλές τιμές του αριθμού Peclet.

Power-Law: Το σχήμα αυτό είναι ελάχιστα ακριβέστερο από το υβριδικό σχέδιο αλλά αυξάνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα.

3.2.3 Επαναλήψεις (Iterations)

Οι εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά μέχρι να επέλθει η σύγκλιση. Συγκεκριμένα, η κάθε εξίσωση λύνεται επαναληπτικά (εσωτερική επανάληψη) και δίνει τιμή στις εξαρτημένες μεταβλητές. Στην συνέχεια οι εξισώσεις στο σύνολό τους επιλύονται με επαναληπτικά (εξωτερική επανάληψη) μέχρι να υπάρξει σύγκλιση του συνόλου. Σε κάθε εσωτερική επανάληψη ενημερώνονται οι συντελεστές των εξαρτημένων μεταβλητών και συνεχίζονται οι επαναλήψεις, ενώ μετά από τμη το πέρας των εσωτερικών επαναλήψεων ενημερώνονται οι συντελεστές στην εξωτερική επανάληψη. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που διευθύνονται από τον εξωτερικό βρόχο υπολογισμού καθορίζει και το πότε θα ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί ανεξάρτητα από το εάν η λύση έχει συγκλίνει ή όχι.

3.2.4 Μεταφορά θερμότητας στις επιφάνειες (Surface heat transfer)

Οι ακόλουθες επιλογές είναι διαθέσιμες για την μετάδοση θερμότητας στις επιφάνειες:

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας των επιφανειών υπολογίζονται από το CFD εάν το μοντέλο τύρβης k-ε έχει επιλεχτεί.

Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας επιφάνειας μπορούν να καθοριστούν για τις οροφές, τον τοίχο και τα πατώματα από τον χρήστη χρησιμοποιώντας αναλυτικές ή εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του αριθμού Nusselt στις επιφάνειες αυτές.

3.2.5 Ρυθμίσεις για τον υπολογισμό των Εξαρτημένων Μεταβλητών (Dependent Variable Control Settings)

Για την προσομοίωση και τον υπολογισμό της απαιτούμενης λύσης απαιτείται ο προσδιορισμός παραμέτρων που σχετίζεται με την αριθμητική προσέγγιση. Με βάση τα παραπάνω οι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν είναι:

3.2.5.1 Εσωτερική επανάληψη (Inner iteration)

Ο αριθμός επαναλήψεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής στην εκάστοτε εξίσωση.

3.2.5.2 Το ψευδο-χρονικό βήμα (False time-step)

Μια σημαντική μέθοδος αριθμητικής χαλάρωσης για την επίλυση των εξισώσεων ροής και θερμότητας είναι η χρήση του ψευδο-χρονικού βήματος. Έτσι αντί να επιλύσουμε ένα μόνιμο πρόβλημα (όπου $\partial/\partial t = 0$) επιλύουμε ένα μη-μόνιμο πρόβλημα ξεκινώντας από μια κατάλληλα επιλεγμένη αρχική συνθήκη και προχωρώντας στον χρόνο μέχρι να προσεγγίσουμε τη χρονικά-μόνιμη λύση. Για εξαναγκασμένες ροές, η επιλογή του ψευδοχρονικού βήματος γίνεται αυτόματα με βάση την κλίμακα ταχυτήτων που εμφανίζονται. Στην περίπτωση των μη εξαναγκασμένων ροών η προκαθορισμένη τιμή που προτείνεται από το λογισμικό είναι 0.2, αλλά ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να αυξήσει ή να μειώσει την τιμή αυτή. Στην πράξη αύξηση του χρονικού βήματος οδηγεί γρηγορότερα στην «μόνιμη» κατάσταση και άρα στη σύγκλιση. Η υπέρμετρη όμως αύξηση του βήματος μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα σύγκλισης. Από την άλλη, μείωση του ψευδο-χρονικού βήματος βελτιώνει την ευστάθεια της αριθμητικής προσέγγισης αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται

σημαντικά και το πλήθος των χρονικών βημάτων – και άρα και των επαναλήψεων – που απαιτούνται για τη σύγκλιση της λύσης με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Τίθεται ένα θέμα λοιπόν επιλογής κατάλληλου χρονικού βήματος για σύγκλιση της μεθοδολογίας, χωρίς όμως υπέρμετρη αύξηση του υπολογιστικού φόρτου (ο οποίος είναι ήδη αυξημένος λόγω της υψηλής διάστασης των συστημάτων που προκύπτουν) και η σωστή επιλογή είναι κρίσιμη. Σε αρκετές περιπτώσεις εκτίμηση του αριθμού Pe μπορεί να καθοδηγήσει στην κατάλληλη επιλογή του ψευδο-χρονικού βήματος.

3.2.5.3 Παράγοντες Χαλάρωσης (Relaxation factors)

Μια δεύτερη μέθοδος χαλάρωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο ψευδο-χρονικού βήματος είναι να επιλέξουμε να κρατήσουμε όχι την τιμή για την «επόμενη χρονική στιγμή» αλλά ένα γραμμικό συνδυασμό της τιμής αυτής και της τιμής την προηγούμενη χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό «ομαλοποιείται» η αλλαγή των όρων γραμμικοποίησης (οι μη-γραμμικοί όροι οι οποίοι σε κάθε βήμα γίνεται κατάλληλη γραμμικοποίηση). Η παραδοσιακή μέθοδος χαλάρωσης είναι ο παράγοντας χαλάρωσης που συνδυάζει ένα ποσοστό της εξαρτώμενης μεταβλητής από την προηγούμενη εξωτερική επανάληψη με μια αναλογία από την τρέχουσα επανάληψη. Μια αξία χαλάρωσης 1.0 χρησιμοποιεί το 100% της τιμής της τρέχουσας εξαρτώμενης μεταβλητής ενώ ένας παράγοντας χαλάρωσης 0.5 θα συνδυάζει το 50% της τιμής από την προηγούμενη επανάληψη με 50% της τρέχουσας τιμής.

3.2.5.4 Συνθήκες Τερματισμού (Termination residual)

Το υπόλοιπο των εξαρτημένων μεταβλητών είναι η μέγιστη υπολειπόμενη ποσότητα ώστε να έχει επιτευχθεί ισορροπία σε όλες τις κυψέλες στην περιοχή. Η λύση κρίνεται να έχει συγκλίνει για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή όταν το υπόλοιπο είναι λιγότερο από το υπόλοιπο λήξης.

3.3 Εξωτερική Ανάλυση

3.3.1 Μοντελοποίηση

Η εξωτερική ανάλυση μοντελοποιείται το ίδιο με την εσωτερική ανάλυση όσο αφορά τις ρυθμίσεις των υπολογισμών. Οι επιλογές που είναι διαθέσιμες για την εξωτερική ανάλυση είναι οι εξής:

3.3.1.1 Τύπος Πλέγματος (Grid type)

κτηρΥπάρχει δυνατότητα επιλογής 2 τύπων πλέγματος:

Μη ομοιόμορφο - το πλέγμα οργανώνεται χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα με σταθερά κυβικά κυψέλες χρησιμοποιώντας ένα προεπιλεγμένο διάστημα πλέγματος (Default grid spacing).

Ομοιόμορφο - Το DesignBuilder προσπαθεί να οργανώσει ένα ομοιόμορφο πλέγμα αλλά δημιουργεί τις εξαιρέσεις προκειμένου να επιτευχθεί εναρμόνιση με τα όρια του υπολογιστικού χωρίου (για τη σωστή εφαρμογή των οριακών συνθηκών). Για να επιτύχουν αυτό, οι παραλλαγές πρέπει να δημιουργηθούν στο πλέγμα χρησιμοποιώντας τα στοιχεία ανοχής συγχώνευσης γραμμών πλέγματος (Grid line merge tolerance).

3.3.1.2 Το προεπιλεγμένο διάστημα πλέγματος (Default Grid Spacing)

Το πλέγμα δημιουργείται αφού πρώτα καθοριστούν βασικά σημεία που λαμβάνονται από τους άξονες των σημαντικότερων αντικειμένων. Από την απόσταση μεταξύ γειτονικών βασικών σημείων ορίζονται περιοχές. Κάθε περιοχή πλέγματος CFD κατά μήκος κάθε κύριου άξονα χωρίζεται κατά διαστήματα αυτόματα χρησιμοποιώντας την προεπιλεγμένη διάσταση πλέγματος

3.3.1.3 Ανοχή συγχώνευσης γραμμών πλέγματος (Grid Line Merge Tolerance) Το πιθανό πρόβλημα κατά το παραγωγή του πλέγματος είναι η δημιουργία των κελιών με έναν υψηλό αναλογία διαστάσεων που μπορεί να οδηγήσει προβλήματα κατά την αριθμητική επίλυση. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιες κυψέλες, οι γραμμές πλέγματος που είναι πολύ στενές μπορούν να συγχωνευθούν. Η ανοχή συγχώνευσης γραμμών πλέγματος (Grid Line Merge Tolerance) είναι η διάσταση κάτω από την οποία καθορίζεται εάν πρέπει να συγχωνευθούν αυτόματα οι γραμμές πλέγματος.

3.3.1.4 Η ταχύτητα αέρα (Wind Velocity). Εισάγεται η ταχύτητα του αέρα σε m/s (σε απόσταση 10m επάνω από το έδαφος).

3.3.1.5 Η κατεύθυνση αέρα (Wind Direction). Η κατεύθυνση αέρα καθορίζεται δεξιόστροφα από το Βορρά. Η κατεύθυνση προεπιλογής είναι 270°, δηλ. Δυτικά.

3.3.1.6 Η έκθεση αέρα (Wind Exposure). Η ταχύτητα αέρα διορθώνεται για το ύψος επάνω από το έδαφος και την περιβάλλουσα έκταση χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση. Μπορούν να επιλεγθούν εκθέσεις αστικές, προαστιακές και ανοικτές των χωρών. Ο κάθε τύπος έκθεσης διαμορφώνει ένα ανάλογο προφίλ ταχύτητας.

3.3.1.7 Πολλαπλασιαστικοί παράγοντες για τον ορισμό του υπολογιστικού χωρίου (Site Domain Factors).

Απαιτείται ο ορισμός τριών τέτοιων παραγόντων για το μήκος, το πλάτος και το ύψος. Με δεδομένες τις βασικές διαστάσεις του υπό μελέτη κτηρίου, εφαρμόζονται οι παράγοντες αυτοί για να προσδιοριστούν οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου. Οι προεπιλεγμένες τιμές για του παράγοντες αυτούς είναι 2.0 για το μήκος και το πλάτος ενώ είναι 1.5 για το ύψος.

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα

Εσωτερικής Ανάλυσης

Η μοντελοποίηση του κτηρίου Τεχνικών Υπηρεσιών του Πολυτεχνείου Κρήτης έγινε με τη βοήθεια των λογισμικών DesignBuilder CFD και EnergyPlus. Με την βοήθεια του DesignBuilder έγινε ο σχεδιασμός του κτηρίου και εισήχθησαν δεδομένα που αφορούν την μοντελοποίηση του, όπως κατασκευαστικά υλικά, στοιχεία για τα συστήματα θέρμανσης-ψύξης. Προστέθηκαν επίσης κατάλληλα αντικείμενα για την καλύτερη δυνατή αναπαράσταση του χώρου. Στην συνέχεια με χρήση του λογισμικού EnergyPlus υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση θερμοκρασίες, και παροχές όγκου αέρα στα παράθυρα, πόρτες και ανοίγματα. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται η ροή με την βοήθεια του DesignBuilder CFD και εξάγονται τα αποτελέσματα που αφορούν πεδία ταχυτήτων και θερμοκρασιών.

4.1 Γραφείο 8

4.1.1 Ανάλυση 1



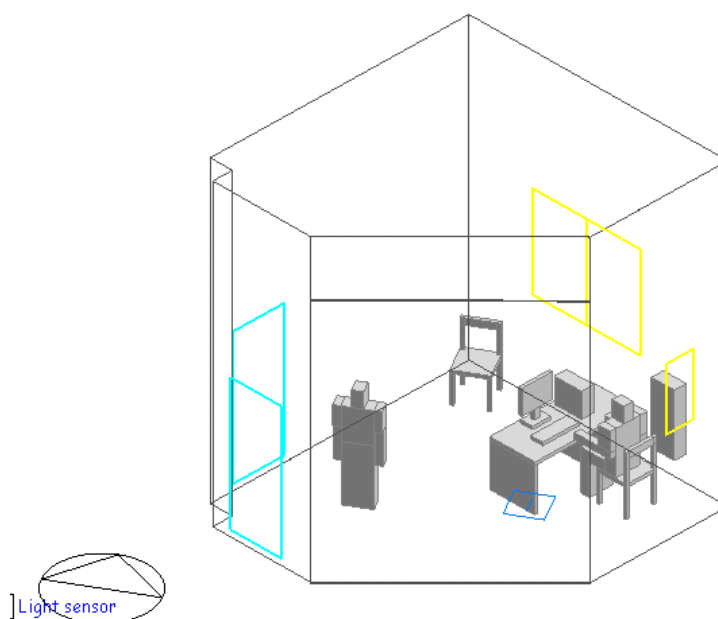
Εικόνα 22: Το Γραφείο 8 σχεδιασμένο στο DesignBuilder

Το γραφείο 8 βρίσκεται στην βορειοανατολική πλευρά του κτηρίου στον πρώτο όροφο. Στην εικόνα 23 φαίνεται το γραφείο όπως έχει σχεδιαστεί στο DesignBuilder. Διαθέτει τρία παράθυρα συνολικά και δυο εσωτερικές πόρτες. Τα δυο παράθυρα έχουν προσανατολισμό 30° από τον βορρά, ενώ το τρίτο 120° . Στο γραφείο βρίσκονται δυο εργαζόμενοι (όπως στο παραπάνω σχήμα) και είναι εξοπλισμένο με ένα γραφείο και έναν υπολογιστή.

Αρχικά γίνεται ανάλυση της εσωτερικής ροής στο γραφείο, ενός θερμού μήνα, στις 10 Ιουλίου και ώρα 9:00 πμ όπου έπνεαν άνεμοι με ταχύτητα $19,3 \text{ m/s}$ κατεύθυνσης 270° . Η εισαγωγή συγκεκριμένης ημερομηνίας και ώρας έχει σκοπό όχι μόνο να εισαχθούν οι κατάλληλες θερμοκρασίες επιφανειών και ροές, αλλά και επειδή λαμβάνονται στοιχεία που αφορούν τις γενικότερες καιρικές συνθήκες πχ την θέση του ηλίου, από αρχεία καιρού για την συγκεκριμένη περίοδο. Επίσης στην συγκεκριμένη ανάλυση τα παράθυρα θεωρούνται

τελείως ανοικτά (100%). Σκοπός αυτού είναι να διαπιστωθεί αν είναι επαρκής ο φυσικός εξαερισμός ή αν απαιτείται και η χρήση συστημάτων μηχανικού εξαερισμού για την καλύτερη κυκλοφορία του αέρα μέσα στον χώρο.

Η εισαγωγή των θερμοκρασιών για όλες τις επιφάνειες του γραφείου, έγινε από το EnergyPlus, όπως επίσης και των παροχών αέρα εισόδου και εξόδου για όλα τα ανοίγματα του γραφείου. Στον πίνακα 10 και 11 παρουσιάζονται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες για τις θερμοκρασίες και τις παροχές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Συνολικά προστέθηκαν 24 συνθήκες για την ανάλυση του χώρου. Σε αυτές τις οριακές συνθήκες περιλαμβάνονται και οι συνθήκες που αφορούν τους εργαζόμενους και τον εξοπλισμό γραφείου. Επιπλέον, επιλέχθηκε το k-ε μοντέλο τύρβης ενώ χρησιμοποιήθηκε ανάντη σχήμα για την διακριτοποίηση. Στον πίνακα 12 συνοψίζονται τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται από το λογισμικό. Ο μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων ορίστηκε στις 1500 επαναλήψεις. Στον πίνακα 13 παρουσιάζεται η ρύθμιση που επιλέχθηκε για τις εξαρτημένες μεταβλητές ώστε να επιτευχθεί ομαλή σύγκλιση. Η λύση συνέκλινε στις 1450 επαναλήψεις και τα γραφήματα σύγκλισης των κανονικοποιημένων υπολοίπων απεικονίζονται στην εικόνα 22.



Εικόνα 23: Πλάγια όψη του γραφείου 8 σχεδιασμένο στο DesignBuilder

Zone	Surface	Boundary	Boundary Type Δ	Temperature (°C)
Door				
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	23.87
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, diadro...	Door (Internal) 1.841 m2	Door	23.89
Temperature				
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, diadro...	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, diadro...	Temperature	24.20
first floor 2 > office 8	Wall (with hole) - 2.946 m2, 165.0°	Wall (with hole) - 2.946 m2, 165.0°	Temperature	23.88
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office...	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office...	Temperature	24.11
first floor 2 > office 8	Partition - 1.789 m2 (first floor 2, office ...	Partition - 1.789 m2 (first floor 2, office ...	Temperature	24.03
first floor 2 > office 8	Partition - 1.566 m2 (first floor 2, office ...	Partition - 1.566 m2 (first floor 2, office ...	Temperature	24.07
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Temperature	24.98
first floor 2 > office 8	Floor - 16.891 m2	Floor - 16.891 m2	Temperature	24.92
first floor 2 > office 8	Inter-block partition - 13.088 m2 (first flo...	Inter-block partition - 13.088 m2 (first flo...	Temperature	24.32
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Temperature	25.29
first floor 2 > office 8	Roof - 16.891 m2	Roof - 16.891 m2	Temperature	24.24
Window				
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Window (External) 0.450 m2	Window	21.54
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	21.46
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	21.46

Πίνακας 10: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα παράθυρα είναι τελείως ανοικτά

Zone	Surface	Boundary	Boundary Type Δ	Flow In (l/s)	Flow Out (l/s)
Door					
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first floor 2...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	2.847000	0.305000
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, ...	Door (Internal) 1.841 m2	Door	15.904000	0.000000
Temperature					
Window					
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Window (External) 0.450 m2	Window	134.812000	0.000000
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	0.166000	95.241
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	0.166000	58.349000

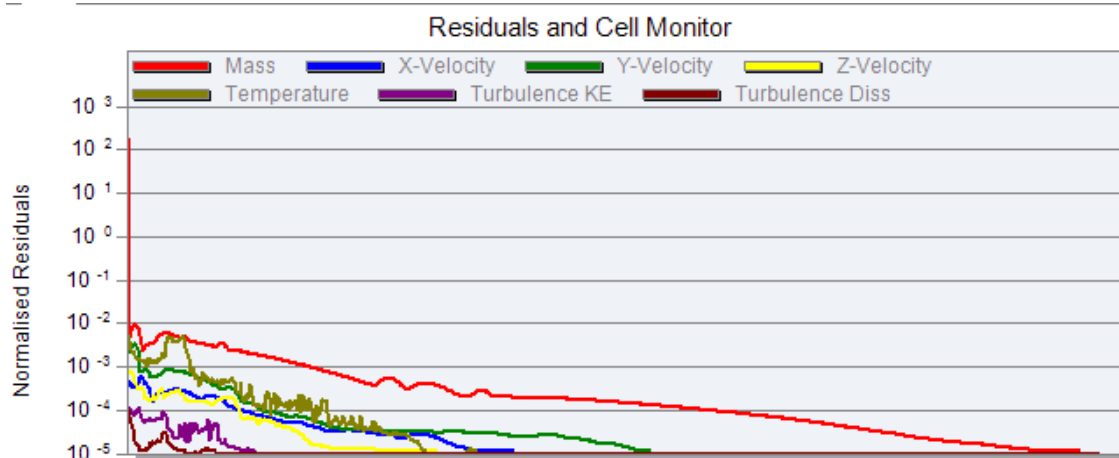
Πίνακας 11: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα παράθυρα είναι τελείως ανοικτά

Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος	
Αριθμός Κελιών στο X επίπεδο	70
Αριθμός Κελιών στο Y επίπεδο	52
Αριθμός Κελιών στο Z επίπεδο	32
Μέγιστος Λόγος Διάστασης (max aspect ratio)	16.159
Απαιτούμενη Μνήμη (MB)	15

Πίνακας 12: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8

Γραφείο 8	Εσωτερικές Επαναλήψεις	Ψευδο-χρονικό βήμα	Παράγοντας Χαλάρωσης	Υπόλοιπο
X,Y,Z διανύσματα της ταχύτητας	2	0,2	1,00	0,00001
Θερμοκρασία	6	10,00	1,00	0,00001
Πίεση	6			
Μάζα				0,00001
Τυρβώδης κινητική Ενέργεια	4	0,1	1,00	0,00001
Ρυθμός Διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας	4	0.1	1.00	0,00001
Συντελεστής Ιξώδους	1,00			

Πίνακας 13: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8

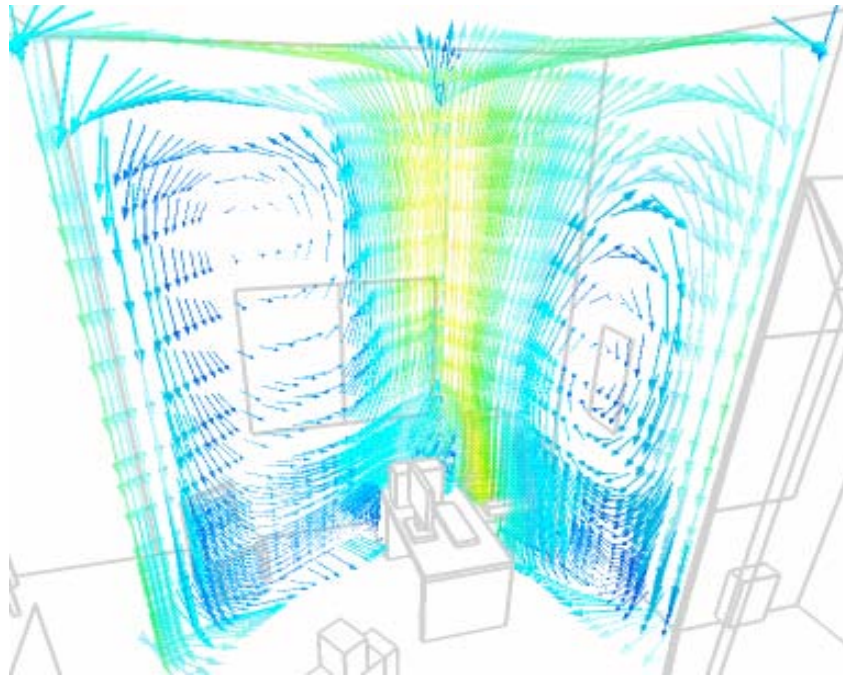


Εικόνα 24: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις

4.1.1.1 Διαγράμματα Ταχύτητας

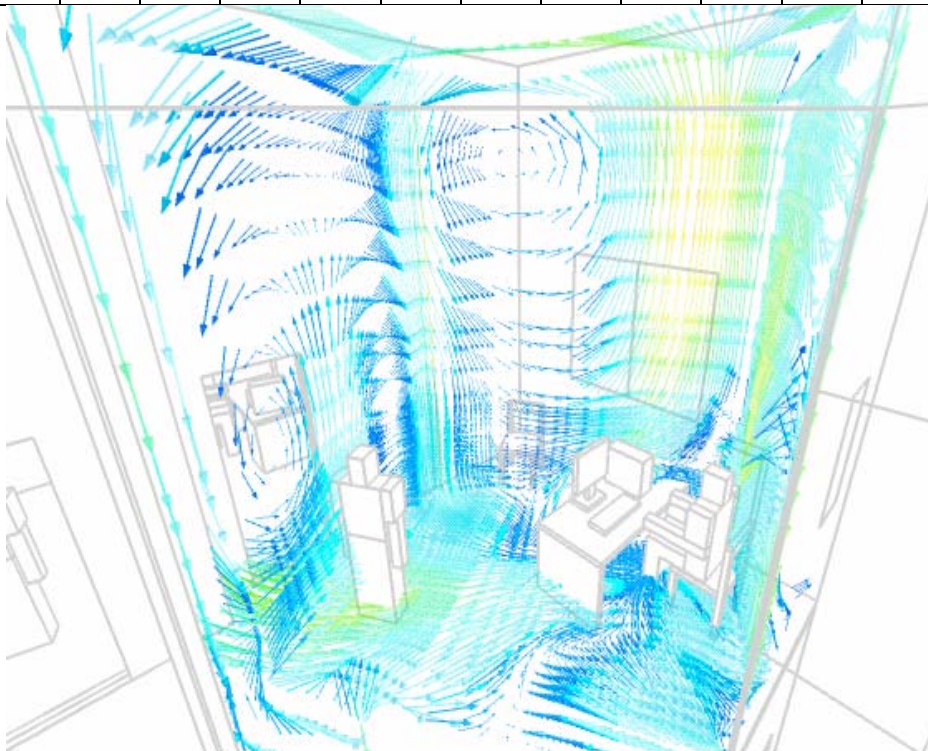
Ο αέρας εισέρχεται κυρίως από το παράθυρο που βρίσκεται στα ανατολικά και λιγότερο από τα παράθυρα που βρίσκονται στην βορινή πλευρά του κτηρίου. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε στιγμή όπου ο άνεμος είναι δυτικός. Η ταχύτητα στα παράθυρα κυμαίνεται από 0,22 με 0,25 m/s ενώ καθώς εισέρχεται προς το εσωτερικό του δωματίου ελαττώνεται. Σε κάποια σημεία μάλιστα η ταχύτητα μηδενίζεται, ο αέρας είναι σχεδόν στάσιμος και δεν υπάρχει κυκλοφορία φρέσκου αέρα. Η κυκλοφορία του αέρα που παρατηρείται οφείλεται κυρίως στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Επιπλέον, παρατηρείται ταχύτητα της τάξης 0,18 – 0,22

m/s στην πόρτα. Από τις οριακές συνθήκες που εισήχθησαν στην συγκεκριμένη είσοδο εισέρχεται ροή 15,8 l/s.



Εικόνα 25: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 όταν τα παράθυρα είναι ανοικτά - πλάγια όψη

Ταχύτητα m/s	0,01	0,04	0,08	0,11	0,15	0,18	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,39
-----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

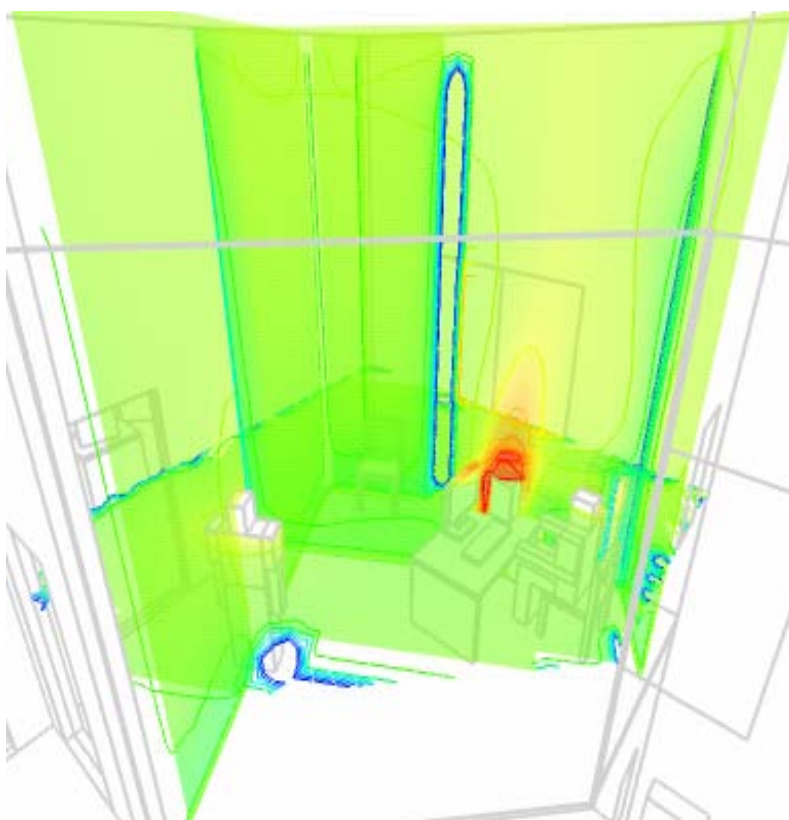


Εικόνα 26: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 όταν τα παράθυρα είναι ανοικτά - πρόσοψη

4.1.1.2 Γραφήματα Θερμοκρασίας

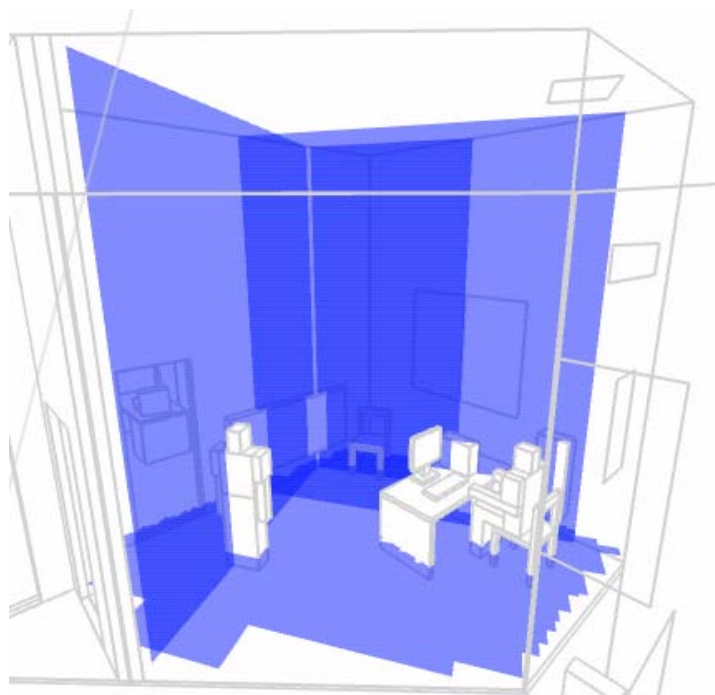
Η θερμοκρασία που σημειώνεται στο εσωτερικό του χώρου κυμαίνεται γύρω από τους 28,8°C. Η θερμοκρασία μειώνεται στους τοίχους 24-26° C, και είναι σύμφωνη με τις οριακές συνθήκες που εισήχθησαν. Επιπλέον, γύρω από το γραφείο με τον υπολογιστή η θερμοκρασία είναι αυξημένη στους 33,2°C. Ο υπολογιστής προσθέτει σημαντικά θερμικά κέρδη στον χώρο και συντελεί στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Τα επίπεδα τιμών της θερμοκρασίας είναι ίδια σχεδόν με τις εξωτερικές συνθήκες, όπου η θερμοκρασία είναι γύρω στους 28,3° C. Ο φυσικός αερισμός δεν είναι επαρκής για να υπάρξει επαρκής κυκλοφορία του αέρα μέσα στον χώρο και να μειωθεί η θερμοκρασία. Η κύρια είσοδος του αέρα, το ανατολικό παράθυρο, είναι μικρό σε διάσταση, ενώ τα άλλα δύο παράθυρα που είναι αρκετά μεγαλύτερα σε διάσταση, βρίσκονται βόρεια οπότε δεν εισέρχεται αρκετός αέρας από αυτά.

Το λογισμικό υπολογίζει και την διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας του χώρου. Η λειτουργική θερμοκρασία αποτελεί μια καλύτερη ένδειξη της θερμικής άνεσης των εργαζομένων. Πρόκειται για την μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα είναι η θερμοκρασία που αισθάνονται οι εργαζόμενοι.



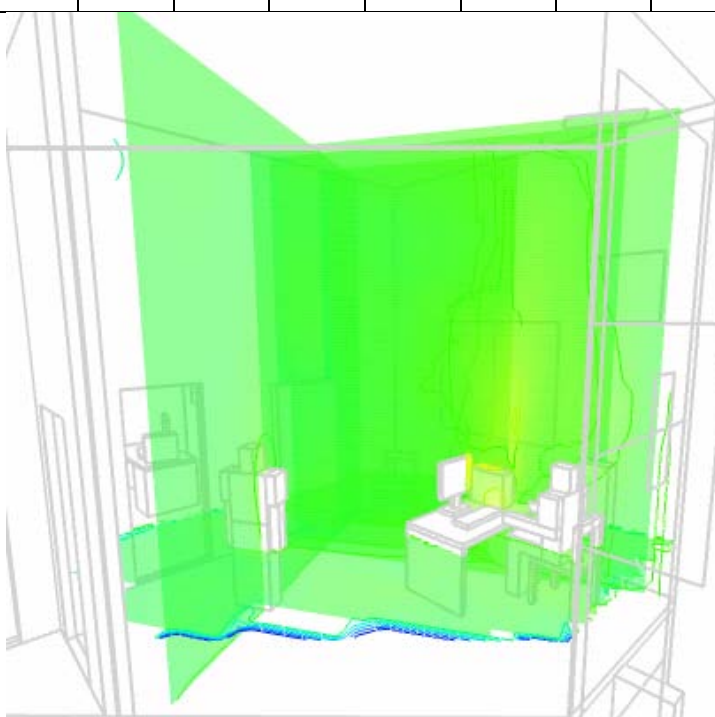
Εικόνα 27: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά

ΘερμοκρασίαΑέρα (°C)	25,2	25,9	26,6	27,3	28,1	28,8	29,5	30,2	31,0	31,7	32,4	33,2
-------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



Εικόνα 28: Διανομή της θερμοκρασίας ακτινοβολίας για το γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά

Θερμοκρασία ακτινοβολίας °C												
	24,2	24,7	25,3	25,8	26,4	26,9	27,5	28,0	28,6	29,1	29,7	30,2



Εικόνα 29: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας για το γραφείο 8-παράθυρα ανοικτά

Λειτουργική Θερμοκρασία °C												
	25,2	26,0	26,9	27,7	28,6	29,4	30,3	31,1	31,9	32,8	33,6	34,5

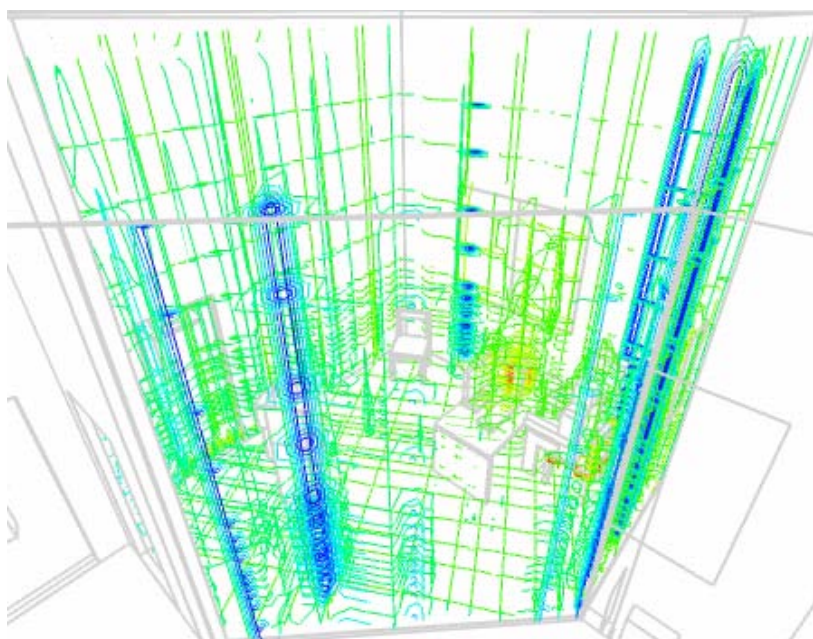
4.1.1.3 Δείκτες Άνεσης

Πέρα από την διανομή της θερμοκρασίας και της ταχύτητας, το DesignBuilder CFD υπολογίζει και κάποιους δείκτες άνεσης όπως επίσης και την μέση θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας και την λειτουργική θερμοκρασία του χώρου.

Οι δείκτες άνεσης που υπολογίζονται είναι:

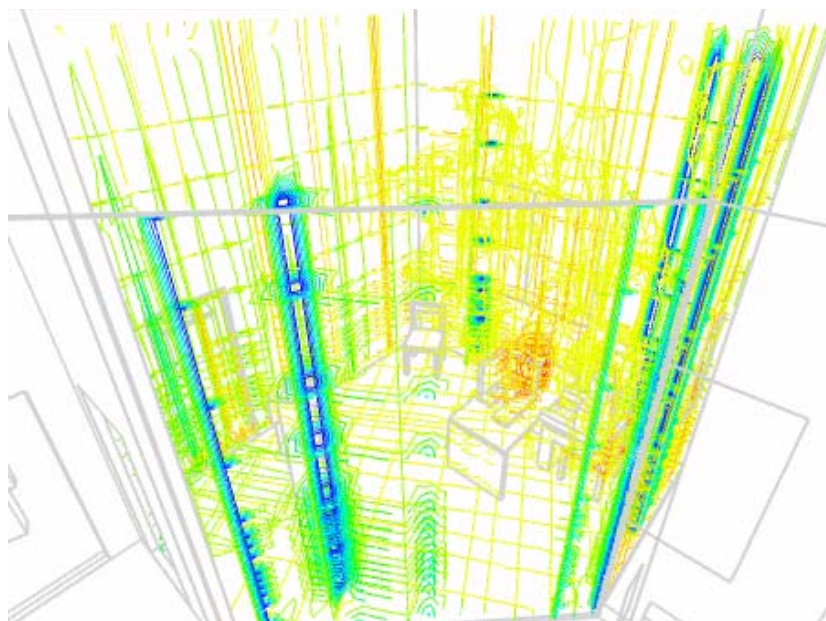
- PMV(Predicted Mean Vote)
- PPD (Predicted Percentage Dissatisfied)

Το μοντέλο θερμικής άνεσης του Fanger χρησιμοποιεί μία κλίμακα επτά σημείων: από το -3 που σημαίνει ότι οι ένοικοι αισθάνονται πολύ κρύο έως το 3 όπου αισθάνονται πολύ ζέστη. Το επίπεδο 0 είναι το σημείο θερμικής άνεσης. Είναι φανερό ότι στην δεδομένη κατάσταση οι εργαζόμενοι νιώθουν δυσαρέσκεια λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στον εσωτερικό χώρο και της αδυναμίας του φυσικού αερισμού να τους παρέχει άνεση. Η κατάσταση αυτή έγινε αντιληπτή ήδη από τα γραφήματα της ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Το ποσοστό των εργαζομένων το οποίο δεν είναι ικανοποιημένο με τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο ανέρχεται στο 81.44% σχεδόν σε όλο το χώρο, εκτός από τις περιοχές κοντά στις εξωτερικές επιφάνειες που επικρατούν ελαφρώς βελτιωμένες συνθήκες (PMV 1,60-1,80 και PPD 68%). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς κοντά στις εξωτερικές επιφάνειες λόγω διήθησης του αέρα η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη.



Εικόνα 30: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 8

PMV												
	1,50	1,63	1,76	1,89	2,03	2,16	2,29	2,42	2,55	2,68	2,81	2,94



Εικόνα 31: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 8

PPD(%)												
	51,00	55,35	59,70	64,05	68,40	72,75	77,10	81,44	85,79	90,14	94,49	98,84

4.1.2 Γραφείο 8

4.1.2.1 Ανάλυση 2

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά την μελέτη της ροής στο γραφείο 8 όταν το σύστημα ψύξης έχει τεθεί σε λειτουργία και τα παράθυρα είναι τελείως κλειστά. Σκοπός αυτού είναι να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ψύξης στην επίτευξη επαρκούς κυκλοφορίας του αέρα και είναι ικανά να εξασφαλίσουν συνθήκες θερμικής άνεσης.

Επιλέχθηκε η ίδια μέρα με αυτήν που έγινε η ανάλυση για τελείως ανοικτά παράθυρα, 10 Ιουλίου και ώρα 9:00μμ με ταχύτητα ανέμου 19.3m/s και κατεύθυνση 270° ενώ η εξωτερική θερμοκρασία είναι ίση με 28.3°C. Το κλιματιστικό έχει ρυθμιστεί στους 24 °C με γωνία κλίσης 45 °, παροχή 110 l/s και ταχύτητα 0,5m/s. Η επιλογή μικρής ταχύτητας έγινε με γνώμονα του γεγονότος ότι οι υψηλές ταχύτητες προκαλούν έντονα φαινόμενα αναταραχής με αποτέλεσμα το πρόβλημα να μην μπορεί να επέλθει στην μόνιμη κατάσταση. Η εισαγωγή των θερμοκρασιών για όλες τις επιφάνειες του γραφείου, έγινε από το EnergyPlus, όπως επίσης και των παροχών αέρα εισόδου και εξόδου για όλα τα ανοίγματα του γραφείου. Στον πίνακα 14 και 15 παρουσιάζονται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες για τις θερμοκρασίες και τις παροχές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Συνολικά προστέθηκαν 25 συνθήκες για την ανάλυση του χώρου. Επιπλέον επιλέχθηκε το k-ε ως μοντέλο τύρβης ενώ σχήμα διακριτοποίησης ήταν το ανάντι σχήμα. Στον πίνακα 16 συνοψίζονται τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται από το λογισμικό. Ο μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων ορίστηκε στις 3200 επαναλήψεις. Στον πίνακα 17 παρουσιάζεται η ρύθμιση που επιλέχθηκε για τις εξαρτημένες μεταβλητές ώστε να

επιτευχθεί ομαλή σύγκλιση. Η λύση συνέκλινε στις 2700 επαναλήψεις και τα γραφήματα των κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις απεικονίζονται στην εικόνα 33.

Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office 9)					
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	4.201	4.201
Partition - 7.950 m2 (first floor 2, diadromos)					
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first f...	Door (Internal) 1.841 m2	Door	4.796	4.796
Roof - 16.891 m2					
first floor 2 > office 8	Roof - 16.891 m2	CFD Extract airflow boun...	Extract	0	110.000
Wall - 11.097 m2 - 120.0°					
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Window (External) 0.450 ...	Window	0.000	0.000
Wall - 21.072 m2 - 30.0°					
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 ...	Window	0.000	0.000
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	CFD Supply airflow boun...	Supply	110.000	0
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 ...	Window	0.000	0.000

Πίνακας 14: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία

Zone	Surface	Boundary	Boundary Type Δ	Temperature (°C)
Door				
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, ...	Door (Internal) 1.841 m2	Door	36.61
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first floor 2...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	37.99
Extract				
Supply				
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	CFD Supply airflow boundary (E...	Supply	20.00
Temperature				
first floor 2 > office 8	Partition - 7.950 m2 (first floor 2, ...	Partition - 7.950 m2 (first floor 2...	Temperature	37.79
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Temperature	36.37
first floor 2 > office 8	Wall (with hole) - 2.946 m2, 165...	Wall (with hole) - 2.946 m2, 165...	Temperature	37.04
first floor 2 > office 8	Roof - 16.891 m2	Roof - 16.891 m2	Temperature	35.92
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Temperature	36.54
first floor 2 > office 8	Floor - 16.891 m2	Floor - 16.891 m2	Temperature	37.74
first floor 2 > office 8	Partition - 20.845 m2 (first floor 2...	Partition - 20.845 m2 (first floor ...	Temperature	38.07
first floor 2 > office 8	Partition - 1.789 m2 (first floor 2, ...	Partition - 1.789 m2 (first floor 2...	Temperature	38.92
first floor 2 > office 8	Inter-block partition - 13.088 m2...	Inter-block partition - 13.088 m2...	Temperature	37.56
first floor 2 > office 8	Partition - 1.566 m2 (first floor 2, ...	Partition - 1.566 m2 (first floor 2...	Temperature	38.83
Window				
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	38.61
first floor 2 > office 8	Wall - 11.097 m2 - 120.0°	Window (External) 0.450 m2	Window	41.31
first floor 2 > office 8	Wall - 21.072 m2 - 30.0°	Window (External) 1.354 m2	Window	38.62

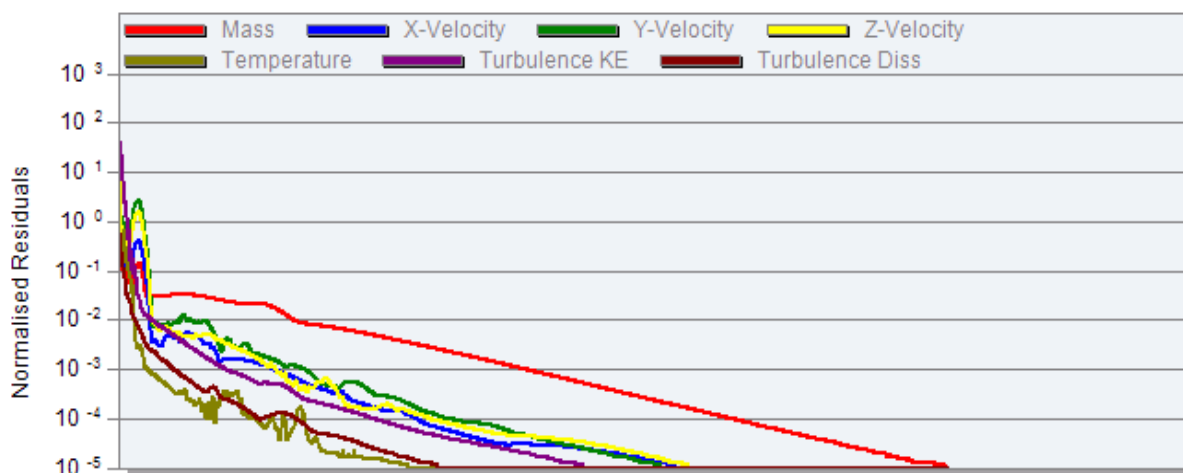
Πίνακας 15: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία

Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος	
Αριθμός Κελιών στο Χ επίπεδο	74
Αριθμός Κελιών στο Υ επίπεδο	57
Αριθμός Κελιών στο Z επίπεδο	34
Μέγιστος Λόγος Διάστασης (max aspect ratio)	16,159
Απαιτούμενη Μνήμη (MB)	18,5

Πίνακας 16: Στατιστικά στοιχεία πλέγματος για το γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία

Γραφείο 8	Εσωτερικές Επαναλήψεις	Ψευτο-χρονικό βήμα	Παράγοντας Χαλάρωσης	Υπόλοιπο
X,Y,Z διανύσματα της ταχύτητας	1	0,2	1,00	0,00001
Θερμοκρασία	6	10,00	1,00	0,00001
Πίεση	6			
Μάζα				0,00001
Τυρβώδης κινητική Ενέργεια	2	0,1	1,00	0,00001
Ρυθμός Διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας	2	0,1	1,00	0,00001
Συντελεστής Ιξώδους	1,00			

Πίνακας 17: Ρύθμιση των παραμέτρων των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία

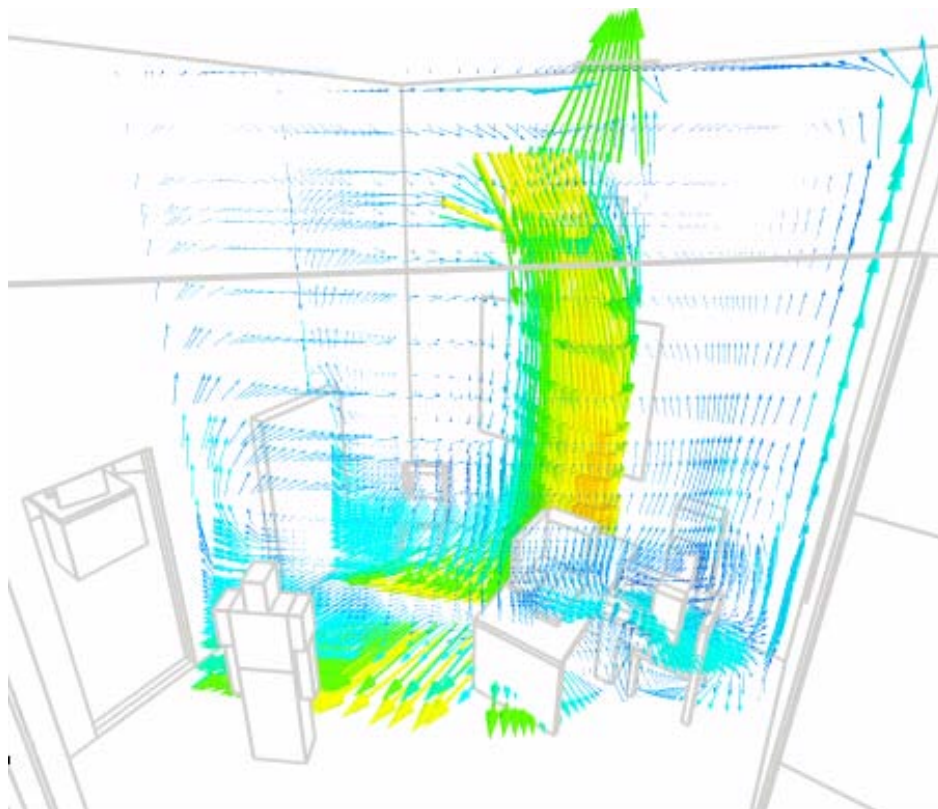


Εικόνα 32: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις-ανάλυση 2

4.1.2.2 Διαγράμματα Ταχύτητας

Η ταχύτητα του αέρα είναι σε γενικά επίπεδα αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση που ήταν μόνο ανοικτά τα παράθυρα. Ο αέρας εισέρχεται στον χώρο από τους αεραγωγούς εισόδου του κλιματιστικού με ταχύτητα 0,76m/s ενώ εξέρχεται από του αεραγωγούς εξόδου με ταχύτητα 0,49m/s. Επίσης παρατηρείται κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του χώρου λόγω του κλιματιστικού. Η ταχύτητα του αέρα είναι 0,39 m/s .Ο αέρας κινείται με κατεύθυνση κυρίως προς τα κάτω με εξαίρεση την ποσότητα αέρα που εξέρχεται από το αεραγωγό. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς από το κλιματιστικό εξέρχεται αέρας χαμηλότερης

θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να κινείται προς τα κάτω οδηγώντας τον ζεστό αέρα προς τα πάνω. Η ταχύτητα κοντά στις επιφάνειες είναι 0,02m/s. Σε κάποια σημεία μάλιστα όπου υπάρχουν εμπόδια τα διανύσματα της ταχύτητας αλλάζουν κατεύθυνση δημιουργώντας μια κυκλοφορία του αέρα και σε άλλες διευθύνσεις με την ταχύτητα όμως να εξασθενεί σταδιακά.



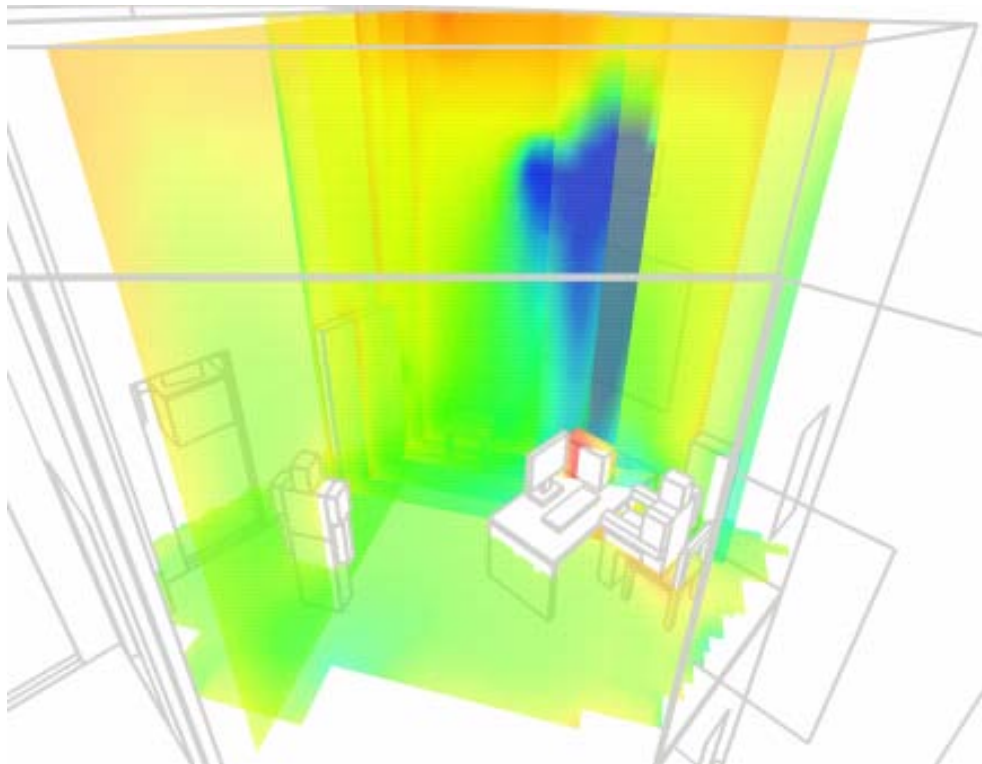
Εικόνα 33: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά βρίσκονται σε λειτουργία-πλάγια όψη

Ταχύτητα m/s												
	0,02	0,11	0,21	0,30	0,39	0,49	0,58	0,67	0,76	0,86	0,90	0,95

4.1.2.3 Γραφήματα Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία που σημειώνεται στο εσωτερικό του χώρου κυμαίνεται γύρω από τους 30,21 °C. Στην περιοχή γύρω από το κλιματιστικό η θερμοκρασία μειώνεται τοπικά 27,3 °C ενώ η θερμοκρασία στους τοίχους κυμαίνεται από 31,7 μέχρι 33,1 C. Επιπλέον, γύρω από το γραφείο με τον υπολογιστή η θερμοκρασία αυξάνεται στους 35,3°C. Ο υπολογιστής προσθέτει σημαντικά θερμικά κέρδη στον χώρο και συντελεί στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Ακόμα, η θερμοκρασία στην οροφή υψηλότερη από τον υπόλοιπο χώρο 35,3 °C Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το κλιματιστικό έχει ρυθμιστεί με γωνία 45° προς το εσωτερικό χώρο και επιπλέον ότι τον μήνα Ιούλιο που γίνεται η ανάλυση ο ήλιος είναι κάθετος και αυξάνει σημαντικά την θερμοκρασία στα κτήρια. Τα επίπεδα τιμών της θερμοκρασίας είναι αυξημένα σε σχέση με τις εξωτερικές συνθήκες, όπου η θερμοκρασία είναι γύρω στους 28,3° C και είναι αρκετά πάνω από τα επιθυμητά όρια θερμικής άνεσης (25-26 °C). Η κυκλοφορία του αέρα που προκαλείται από το κλιματιστικό δεν είναι επαρκής ώστε

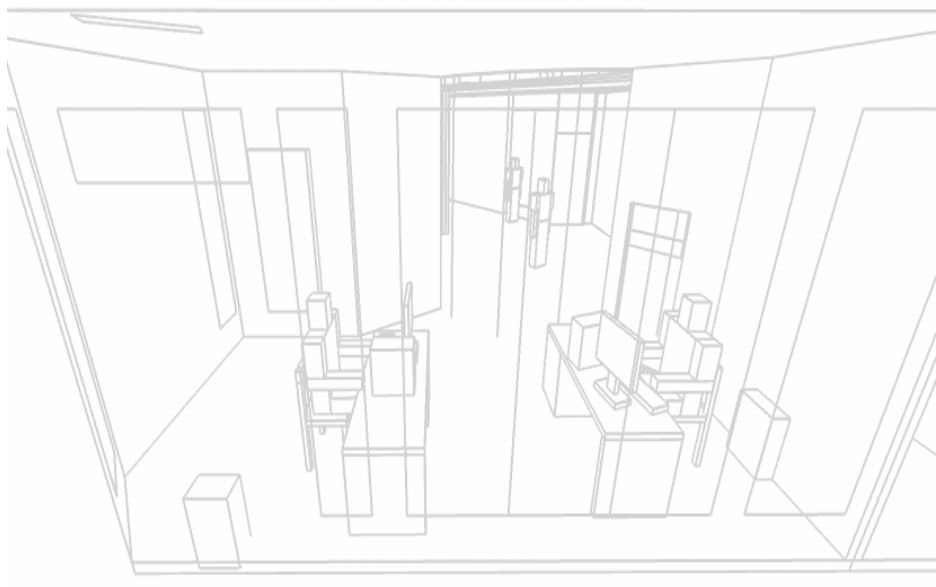
να μειωθεί η θερμοκρασία. Επιπλέον, το κλιματιστικό έχει ρυθμιστεί σε χαμηλή ταχύτητα γιατί η υψηλότερη ταχύτητα δημιουργεί τυρβώδη ροή και αστάθεια στην λύση.



Εικόνα 34: Διανομή της θερμοκρασίας στο γραφείο 8 στην περίπτωση που τα κλιματιστικά έχουν ρυθμιστεί να λειτουργούν.

Θερμοκρασία Αέρα °C	27,3	28,0	28,8	29,5	30,2	30,94	31,7	32,4	33,1	33,9	34,6	35,3

4.2 Γραφείο 4

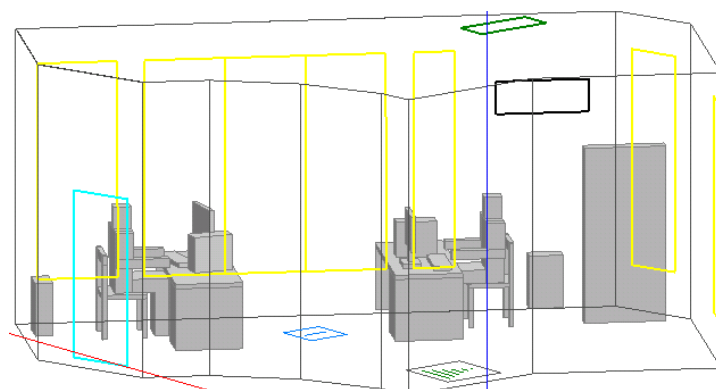


Εικόνα 35: Το γραφείο 4 σχεδιασμένο στο DesignBuilder

Το γραφείο 4 βρίσκεται στην νοτιοδυτική πλευρά του κτηρίου στον ισόγειο. Στην εικόνα 36 και 37 φαίνεται το γραφείο όπως έχει σχεδιαστεί στο DesignBuilder. Διαθέτει επτά παράθυρα συνολικά και μια εσωτερική πόρτα. Τα πέντε παράθυρα έχουν προσανατολισμό 120° από τον βορρά και τα υπόλοιπα δύο 165° και 210° αντίστοιχα. Στο συγκεκριμένο γραφείο εργάζονται δυο άτομα οπότε είναι εξοπλισμένο με δύο γραφεία, δυο υπολογιστές. Η μοντελοποίηση έχει γίνει όταν βρίσκονται και οι δυο εργαζόμενοι μέσα.

Αρχικά γίνεται ανάλυση της εσωτερικής ροής στο γραφείο, ενός θερμού μήνα, στις 10 Ιουλίου και ώρα 9:00 πμ όπου έπνεαν άνεμοι με ταχύτητα $19,3 \text{ m/s}$ και κατεύθυνση 270° και η εξωτερική θερμοκρασία ήταν $28,3^\circ\text{C}$. Επίσης στην συγκεκριμένη ανάλυση τα παράθυρα θεωρούνται τελείως ανοικτά (100%).

Η εισαγωγή των θερμοκρασιών για όλες τις επιφάνειες του γραφείου, έγινε από το EnergyPlus, όπως επίσης και των παροχών αέρα εισόδου και εξόδου για όλα τα ανοίγματα του γραφείου. Συνολικά προστεθήκαν 21 οριακές συνθήκες. Επιπλέον, επιλέχθηκε το k-ε ως μοντέλο τύρβης ενώ κατάλληλο θεωρήθηκε το ανάντι σχήμα διακριτοποίησης του χώρου. Στον πίνακα 20 συνοψίζονται τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται από το λογισμικό. Ο μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων ορίστηκε στις 3700 επαναλήψεις. Στον πίνακα 21 παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για τις εξαρτημένες μεταβλητές ώστε να επιτευχθεί ομαλή σύγκλιση. Η λύση συνέκλινε στις 3400 επαναλήψεις. Στην εικόνα 38 φαίνονται τα γραφήματα των κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις.



Εικόνα 36: Πλάγια όψη του γραφείου 4 σχεδιασμένο στο DesignBuilder

Zone	Surface	Boundary	Boundary Type Δ	Flow In (l/s)	Flow Out (l/s)
Door					
ground_floor > office 4	Partition - 4.847 m2 (ground_flo...	Door (Internal) 1.418 m2	Door	0.000000	0.336000
Temperature					
Window					
ground_floor > office 4	Wall - 8.306 m2 - 210.0°	Window (External) 1.103 m2	Window	4.115000	0.222000
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.191 m2	Window	4.323000	1.227000
ground_floor > office 4	Wall - 3.488 m2 - 165.1°	Window (External) 1.470 m2	Window	3.112000	1.999000
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.205 m2	Window	2.035000	6.491000
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 1.103 m2	Window	0.890000	2.840000
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.191 m2	Window	4.323000	1.227000
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.205 m2	Window	2.035000	6.491000

Πίνακας 18: Οριακές συνθήκες παροχών όγκου αέρα για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4

Zone	Surface	Boundary	Boundary Type Δ	Temperature (°C)
Temperature				
ground_floor > office 4	Partition - 2.521 m2 (ground_floor, diad...	Partition - 2.521 m2 (ground_floor, diad...	Temperature	35.10
ground_floor > office 4	Partition - 3.418 m2 (ground_floor, diad...	Partition - 3.418 m2 (ground_floor, diad...	Temperature	35.11
ground_floor > office 4	Partition - 4.847 m2 (ground_floor, prot...	Partition - 4.847 m2 (ground_floor, prot...	Temperature	34.61
ground_floor > office 4	Partition - 6.081 m2 (ground_floor, elev...	Partition - 6.081 m2 (ground_floor, elev...	Temperature	33.72
ground_floor > office 4	Partition - 3.418 m2 (ground_floor, diad...	Partition - 3.418 m2 (ground_floor, diad...	Temperature	35.11
ground_floor > office 4	Wall - 8.306 m2 - 210.0°	Wall - 8.306 m2 - 210.0°	Temperature	34.54
ground_floor > office 4	Wall - 3.488 m2 - 165.1°	Wall - 3.488 m2 - 165.1°	Temperature	33.94
ground_floor > office 4	Partition - 7.035 m2 (ground_floor, offic...	Partition - 7.035 m2 (ground_floor, offic...	Temperature	34.40
ground_floor > office 4	Partition - 1.449 m2 (ground_floor, diad...	Partition - 1.449 m2 (ground_floor, diad...	Temperature	35.12
ground_floor > office 4	Partition - 5.840 m2 (ground_floor, offic...	Partition - 5.840 m2 (ground_floor, offic...	Temperature	34.41
ground_floor > office 4	Ground floor - 23.264 m2 (Ground)	Ground floor - 23.264 m2 (Ground)	Temperature	31.65
ground_floor > office 4	Ceiling - 23.264 m2	Ceiling - 23.264 m2	Temperature	35.86
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Temperature	34.53
Window				
ground_floor > office 4	Wall - 8.306 m2 - 210.0°	Window (External) 1.103 m2	Window	29.87
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.191 m2	Window	36.19
ground_floor > office 4	Wall - 3.488 m2 - 165.1°	Window (External) 1.470 m2	Window	30.68
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.205 m2	Window	36.99
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 1.103 m2	Window	37.11
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.191 m2	Window	36.45
ground_floor > office 4	Wall - 22.445 m2 - 120.1°	Window (External) 2.205 m2	Window	37.02

Πίνακας 19: Οριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις επιφάνειες για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4

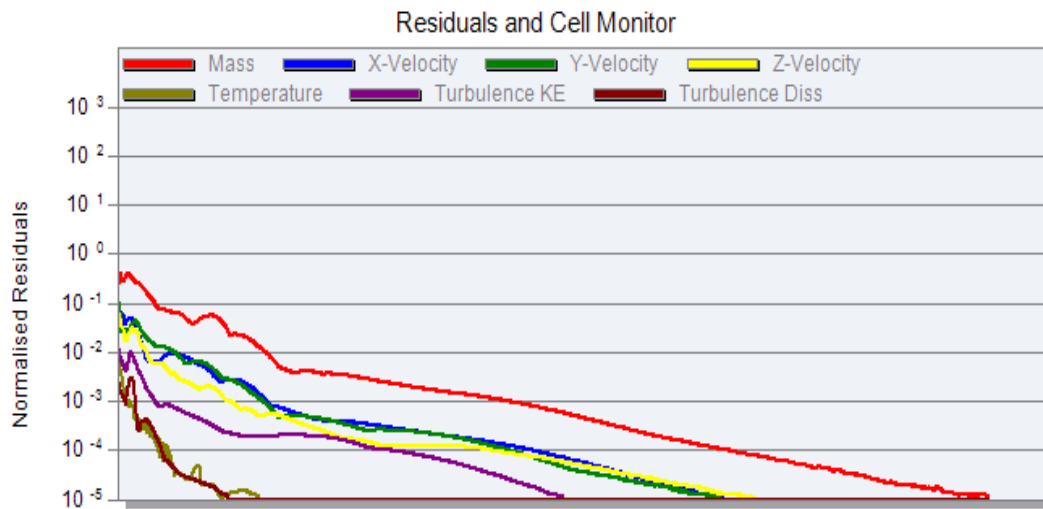
Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος	
Αριθμός Κελιών στο X επίπεδο	86
Αριθμός Κελιών στο	91

Υ επίπεδο	
Αριθμός Κελιών στο Ζ επίπεδο	23
Μέγιστος Λόγος Διάστασης	17,914
Απαιτούμενη Μνήμη (MB)	23,2

Πίνακας 20: Στατιστικά στοιχεία Πλέγματος που δημιουργήθηκε για την ανάλυση της εσωτερικής ροής στο γραφείο 4

Γραφείο 4	Εσωτερικές Επαναλήψεις	Ψευτο- χρονικό βήμα	Παράγοντας Χαλάρωσης	Υπόλοιπο
X,Y,Z διανύσματα της ταχύτητας	2	0,2	1,00	0,00001
Θερμοκρασία	6	10,00	1,00	0,00001
Πίεση	6			
Μάζα				0,00001
Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια	4	0,1	1,00	0,00001
Ρυθμός διάχυσης τυρβώδους κινητικής ενέργειας	4	0,1	1,00	0,00001
Συντελεστής Ιξώδους	1,00			

Πίνακας 21: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 4



Εικόνα 37: Γραφήματα κανονικοποιημένων υπολοίπων για όλες τις εξισώσεις

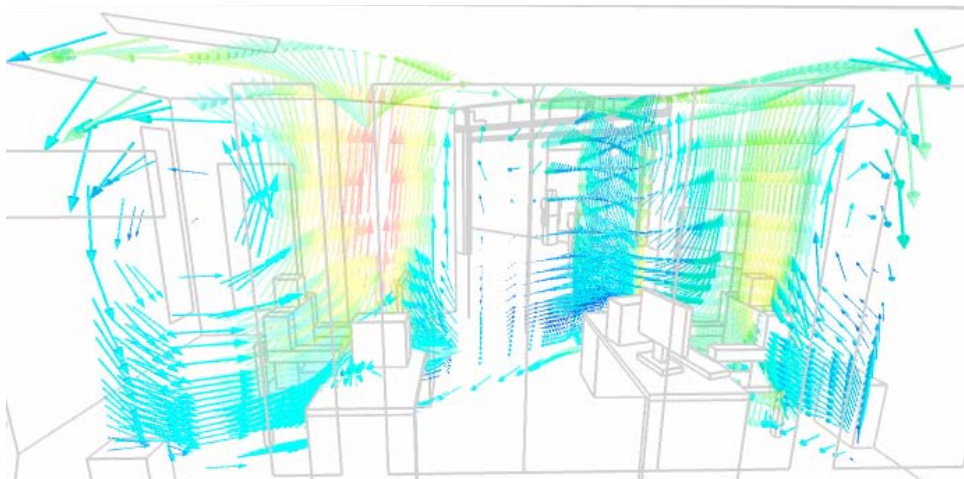
4.2.1 Διαγράμματα Ταχύτητας

Ο αέρας εισέρχεται κυρίως από το παράθυρο που βρίσκεται στις 210° και λιγότερο από τα παράθυρα που βρίσκονται στην νότια πλευρά. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε στιγμή όπου ο άνεμος είναι δυτικός. Στο μεγαλύτερο μέρος του χώρου η ταχύτητα κυμαίνεται από 0,03m/s μέχρι 0,10 m/s. Πιο συγκεκριμένα με κατεύθυνση από τους τοίχους προς το εσωτερικό η ταχύτητα στα παράθυρα κυμαίνεται από 0,10m/s ενώ καθώς εισέρχεται προς το εσωτερικό του δωματίου ελαττώνεται σταδιακά 0.06 και φτάνει 0,03m/s στο κέντρο.

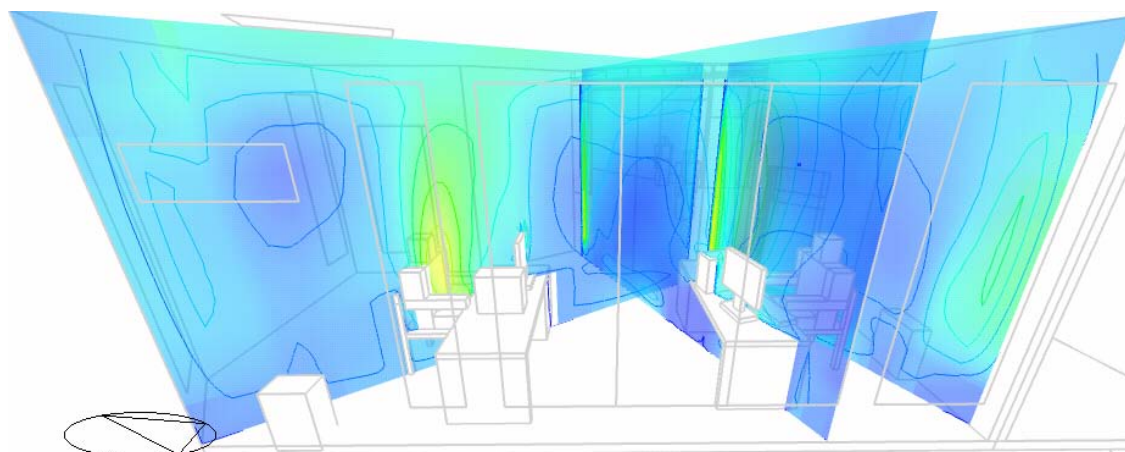
Ωστόσο, σε κάποια σημεία η ταχύτητα αυξάνει αρκετά το οποίο οφείλεται στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στις περιοχές γύρω από τους υπολογιστές λόγω των σημαντικών θερμικών κερδών από τους υπολογιστές. Η ταχύτητα που σημειώνεται είναι 0,22-0,35 m/s.

Επιπλέον, παρατηρείται ταχύτητα της τάξης 0,19 – 0,22 m/s στην πόρτα. Από τις οριακές συνθήκες που εισήχθησαν στην συγκεκριμένη είσοδο εισέρχεται ροή.

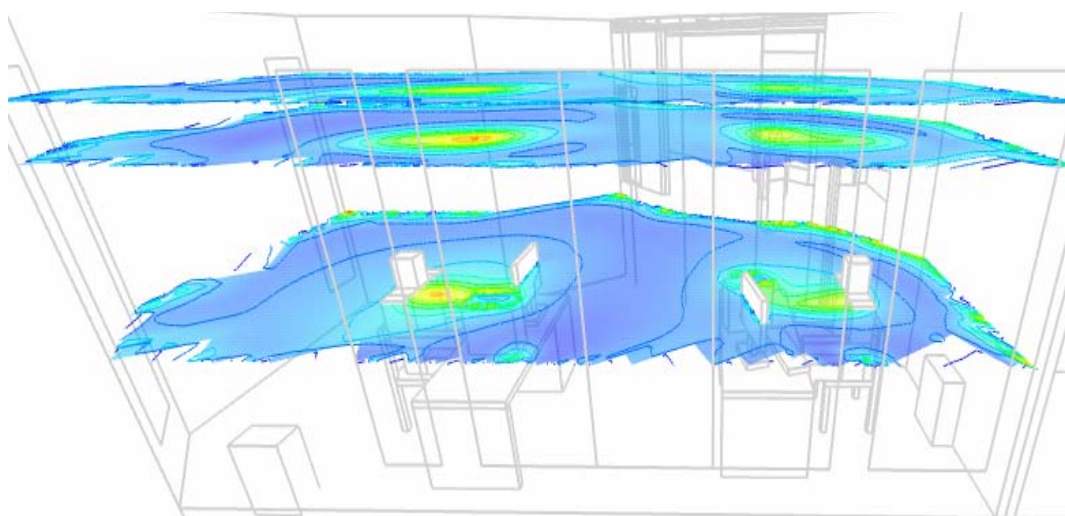
Σε όλο το χώρο παρατηρείται κυκλοφορία του αέρα αλλού περισσότερο και αλλού λιγότερο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι υπάρχει παροχή του αέρα από δυο σημεία τα οποία βρίσκονται σχεδόν αντικριστά (παράθυρο 210° και πόρτα 30°)



Εικόνα 38: Διανύσματα ταχύτητας στο γραφείο 4



Εικόνα 39: Η διανομή ταχύτητας στο γραφείο 4-πρόσωπη

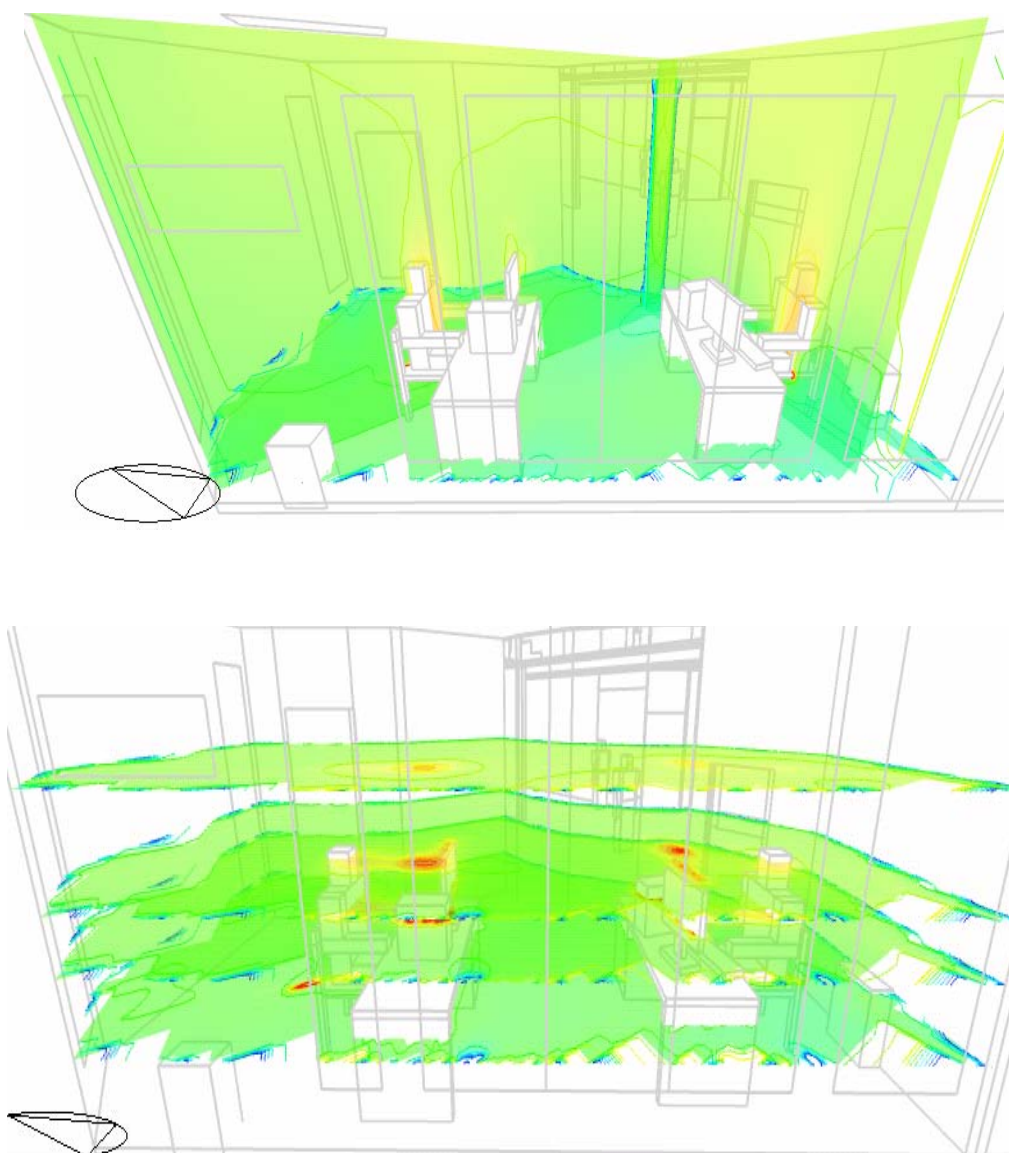


Εικόνα 40: Αναπαράσταση ισοϋψών καμπύλων ταχύτητας-γραφείο 4

Ταχύτητα												
m/s	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29	0,32	0,35

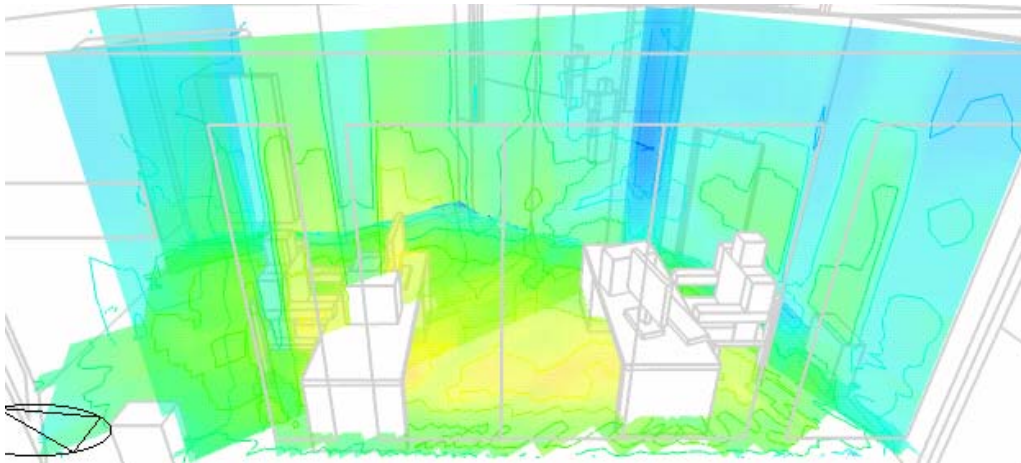
4.2.2 Διάγραμμα Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία που σημειώνεται στο εσωτερικό του χώρου κυμαίνεται γύρω στους 29,9°C. Η θερμοκρασία μειώνεται στους τοίχους στους 27,7°C, και είναι σύμφωνη με τις οριακές συνθήκες που εισήχθηκαν. Επιπλέον, γύρω από τα γραφεία με τους υπολογιστές η θερμοκρασία αυξάνεται με μέγιστη τιμή 34,3°C. Ο υπολογιστής προσθέτει σημαντικά θερμικά κέρδη στον χώρο και συντελεί στην τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Στην εικόνα 44 απεικονίζεται η διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας έτσι όπως έχει υπολογιστεί από το DesignBuilder CFD. Βρίσκεται στα ίδια επίπεδά με την θερμοκρασία του αέρα 29,6°C. Ο χώρος είναι ιδιαίτερα ζεστός. Τα επίπεδα τιμών της θερμοκρασίας είναι ίδια σχεδόν με τις εξωτερικές συνθήκες, όπου η θερμοκρασία είναι γύρω στους 28,3°C.



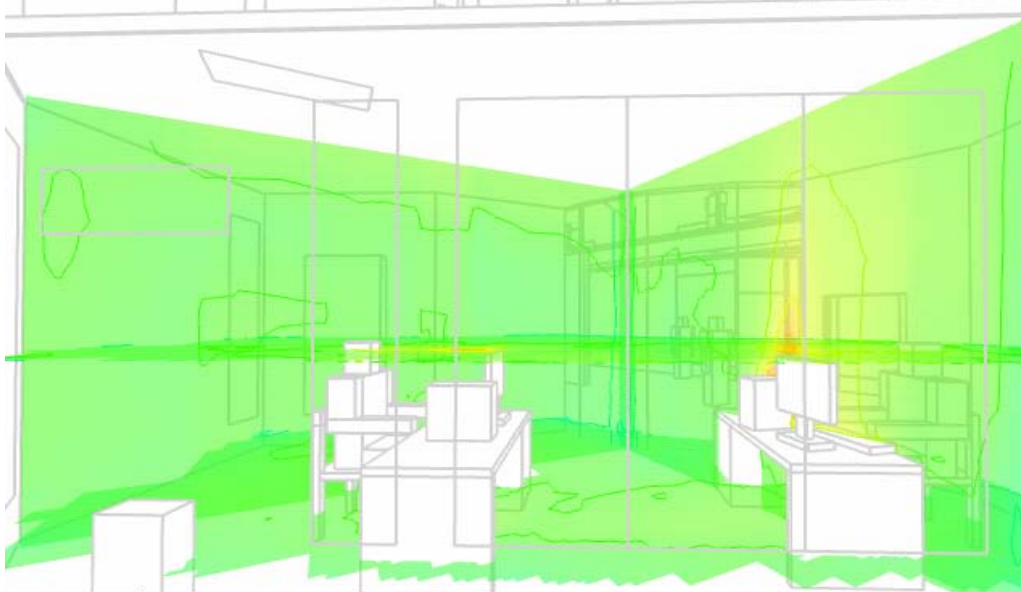
Εικόνα 41: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα-γραφείο 4

Θερμοκρασία αέρα °C												
	26,3	27,0	27,6	28,9	29,2	29,9	30,7	31,4	32,1	32,9	33,6	34,3



Εικόνα 42: Διανομή την θερμοκρασίας ακτινοβολίας στο γραφείο 4

Θερμοκρασία ακτινοβολίας °C	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.4	29.6	29.80	29.9	30.2	30.4	30.5
-----------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------	------	------	------



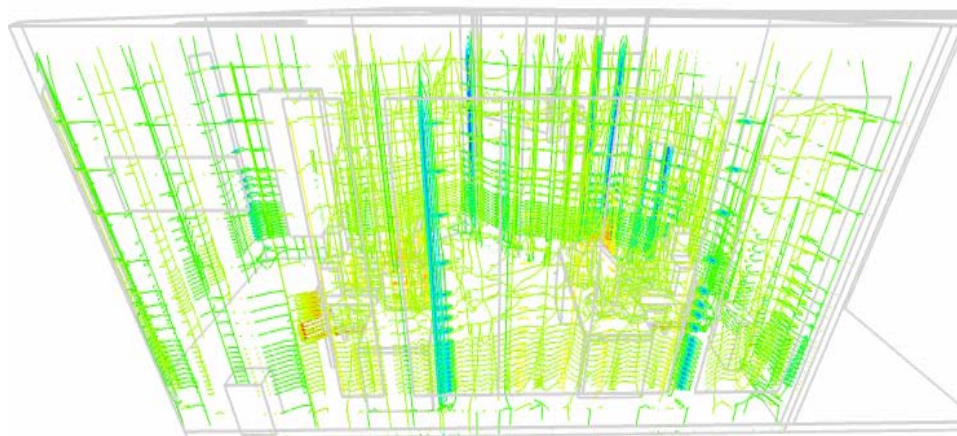
Εικόνα 43: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας-γραφείο 4

Λειτουργική Θερμοκρασία C	26,0	26,7	27,5	28,2	28,9	29,6	30,4	31,1	31,8	32,5	33,3	34,0
---------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

4.2.3 Δείκτες Άνεσης

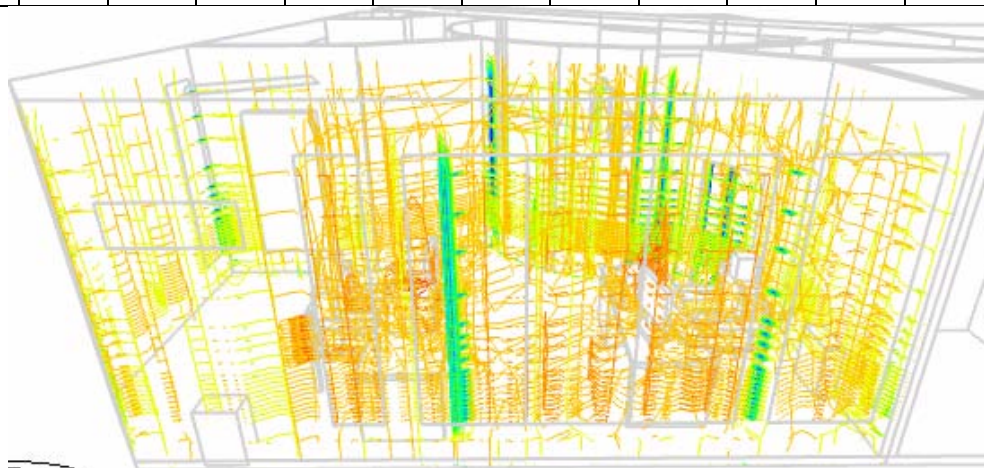
Ο δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger για το γραφείο 4 έχει υπολογιστεί ότι φτάνει από 2.07 έως και 2.38 σε αρκετά σημεία στο χώρο. Το ποσοστό μη ικανοποίησης κυμαίνεται από 85% έως και 90% σχεδόν σε όλο το χώρο, εκτός από τις περιοχές κοντά στις εξωτερικές

επιφάνειες με τα παράθυρα που επικρατούν ελάχιστα καλύτερες συνθήκες. Οι εργαζόμενοι νιώθουν δυσανεξία λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στον εσωτερικό χώρο. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αδυναμία του φυσικού αερισμού να τους παρέχει άνεση. Η κατάσταση αυτή έγινε αντιληπτή ήδη από τα γραφήματα της ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς επικρατούν σχετικά χαμηλές ταχύτητες στο εσωτερικό του γραφείου. Επιπλέον, παρόλο που το γραφείο διαθέτει μεγάλα και αρκετά παράθυρα, την δεδομένη στιγμή, ο άνεμος αν και σχετικά ισχυρός, πνέει με κατεύθυνση διαφορετική από αυτή που βρίσκονται τα παράθυρα, ενώ το ένα παράθυρο που βρίσκεται στην εμβέλεια του ανέμου, δεν είναι αρκετό ώστε να υπάρχει καλή κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό.



Εικόνα 44: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 9

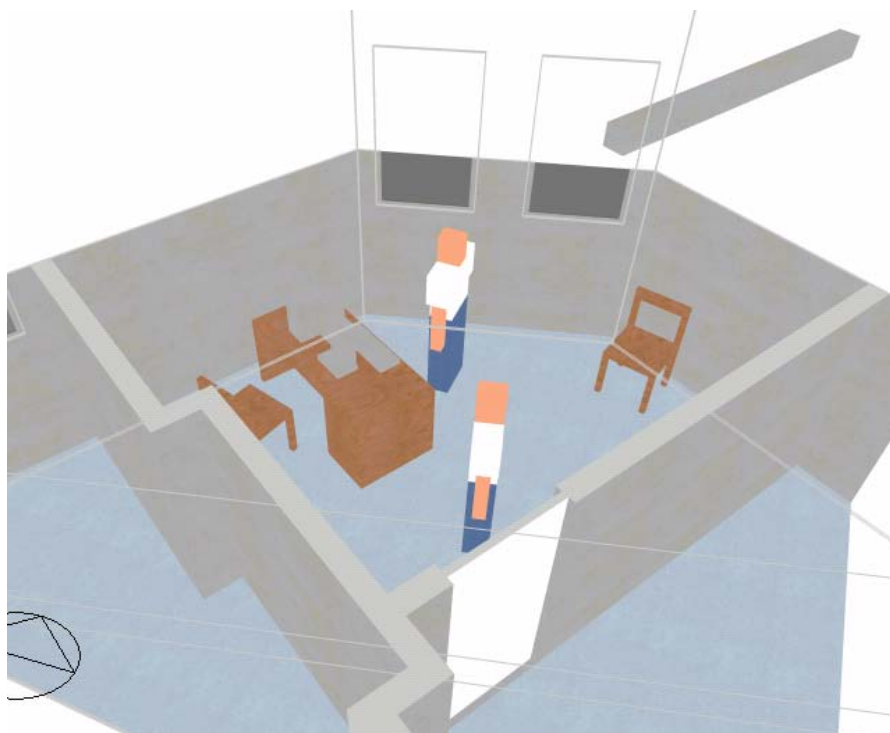
PMV												
	1,30	1,45	1,61	1,76	1,92	2,07	2,23	2,38	2,54	2,69	2,85	3,00



Εικόνα 45: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 4

PPD												
	45,14	50,12	55,11	60,10	65,09	70,07	75,06	80,05	85,04	90,03	95,01	100,00

4.3 Γραφείο 9



Το γραφείο 9 βρίσκεται στην βόρεια πλευρά του κτηρίου στον πρώτο όροφο. Στην εικόνα 29 φαίνεται το γραφείο όπως έχει σχεδιαστεί στο DesignBuilder. Διαθέτει δύο παράθυρα συνολικά και μία εσωτερική πόρτα. Τα παράθυρα έχουν προσανατολισμό 345° από τον βορρά. Το γραφείο είναι εξοπλισμένο με ένα γραφείο, έναν υπολογιστή ενώ η μοντελοποίηση έχει γίνει όταν βρίσκονται δυο εργαζόμενοι.

Γίνεται ανάλυση της εσωτερικής ροής στο γραφείο, ενός χειμερινού μήνα, στις 27 Νοεμβρίου και ώρα 9:00 πμ όπου έπνεαν άνεμοι με ταχύτητα $12,9 \text{ m/s}$ και κατεύθυνση 202° και με εξωτερική θερμοκρασία $14,4^{\circ}\text{C}$. Επίσης στη συγκεκριμένη ανάλυση τα παράθυρα θεωρούνται τελείως κλειστά (0%) ενώ βρίσκονται σε λειτουργία τα συστήματα θέρμανσης.

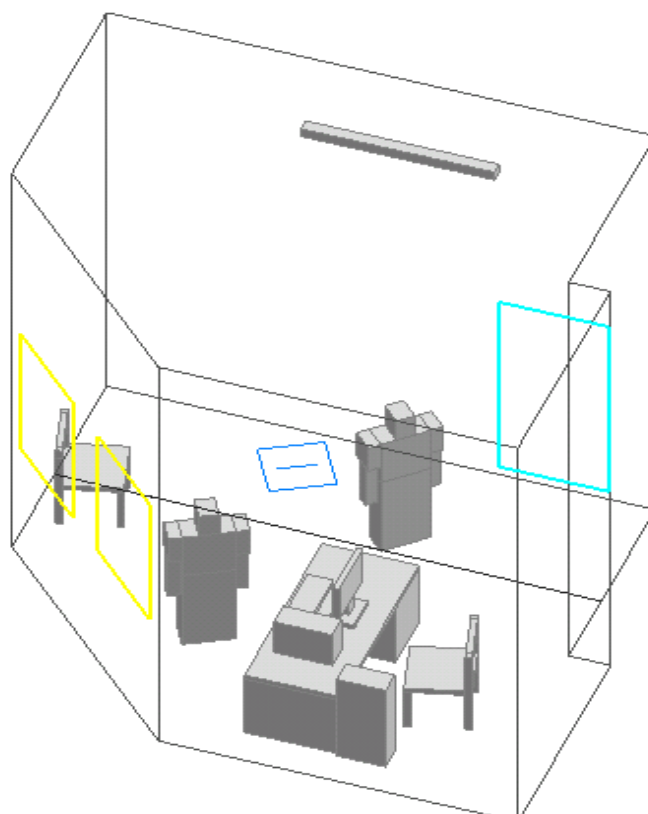
Η εισαγωγή των θερμοκρασιών για όλες τις επιφάνειες του γραφείου, έγινε από το EnergyPlus, όπως επίσης και των παροχών αέρα εισόδου και εξόδου για όλα τα ανοίγματα του γραφείου. Στους πίνακες 22 και 23 παρουσιάζονται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες για τις θερμοκρασίες και τις παροχές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα. Συνολικά προστέθηκαν 24 συνθήκες για την ανάλυση του χώρου. Σε αυτές τις οριακές συνθήκες περιλαμβάνονται και οι συνθήκες που αφορούν τους εργαζόμενους και τον εξοπλισμό γραφείου. Επιπλέον, επιλέχθηκε το k-ε ως μοντέλο τύρβης ενώ χρησιμοποιήθηκε το ανάντι σχήμα. Στον πίνακα 24 συνοψίζονται τα στατιστικά στοιχεία του πλέγματος. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται από το λογισμικό. Ο μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων ορίστηκε στις 1500 επαναλήψεις. Στον πίνακα 25 παρουσιάζεται η ρύθμιση που επιλέχθηκε για τις εξαρτημένες μεταβλητές ώστε να επιτευχθεί ομαλή σύγκλιση.

Zone /	Surface /	Boundary	Boundary Type	Temperature (°C)
Floor - 15.190 m2				
first floor 2 > office 9	Floor - 15.190 m2	Floor - 15.190 m2	Temperature	18.28
Partition - 1.593 m2 (first floor 2, office 10)				
first floor 2 > office 9	Partition - 1.593 m2 (first floor 2, office...	Partition - 1.593 m2 (first floor 2, office...	Temperature	18.42
Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office 8)				
first floor 2 > office 9	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, offic...	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, offic...	Temperature	18.29
first floor 2 > office 9	Partition - 20.845 m2 (first floor 2, offic...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	18.07
Partition - 8.991 m2 (first floor 2, office 10)				
first floor 2 > office 9	Partition - 8.991 m2 (first floor 2, office...	Partition - 8.991 m2 (first floor 2, office...	Temperature	18.39
Partition - 9.627 m2 (first floor 2, office 10)				
first floor 2 > office 9	Partition - 9.627 m2 (first floor 2, office...	Partition - 9.627 m2 (first floor 2, office...	Temperature	18.39
Roof - 15.190 m2				
first floor 2 > office 9	Roof - 15.190 m2	Roof - 15.190 m2	Temperature	17.84
Wall - 12.372 m2 - 345.0°				
first floor 2 > office 9	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Window (External) 1.352 m2	Window	16.74
first floor 2 > office 9	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Temperature	17.45
first floor 2 > office 9	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Window (External) 1.352 m2	Window	16.74
Wall - 13.642 m2 - 300.0°				
first floor 2 > office 9	Wall - 13.642 m2 - 300.0°	Wall - 13.642 m2 - 300.0°	Temperature	17.70
Wall - 9.870 m2 - 30.0°				
first floor 2 > office 9	Wall - 9.870 m2 - 30.0°	Wall - 9.870 m2 - 30.0°	Temperature	17.44

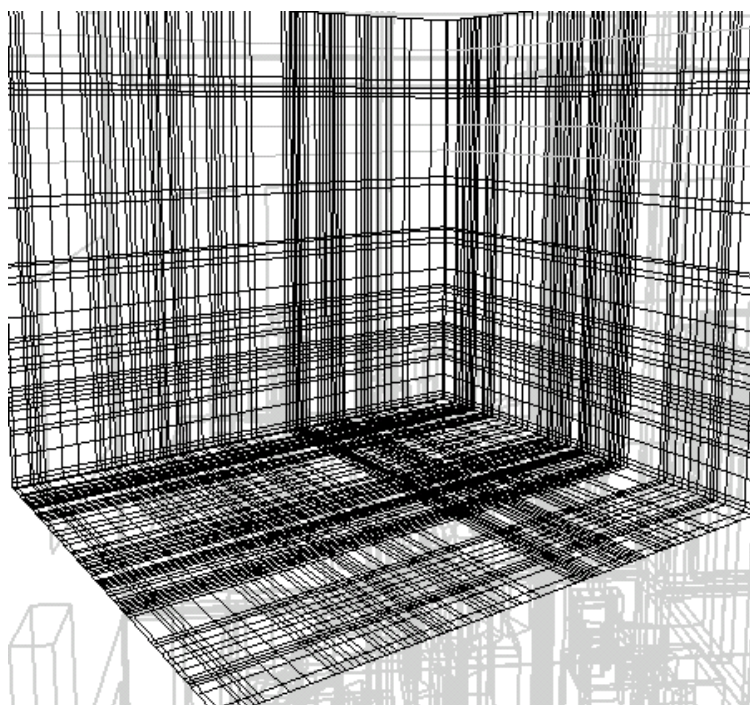
Πίνακας 22: Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας για τις επιφάνειες του γραφείου 9

Partition - 20.845 m2 (first floor 2, office 8)					
first floor 2 > office 9	Partition - 20.845 m2 (first floor ...	Door (Internal) 1.845 m2	Door	3.006000	0.074000
Partition - 8.991 m2 (first floor 2, office 10)					
Partition - 9.627 m2 (first floor 2, office 10)					
Roof - 15.190 m2					
Wall - 12.372 m2 - 345.0°					
first floor 2 > office 9	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Window (External) 1.352 m2	Window	0.000000	2.123
first floor 2 > office 9	Wall - 12.372 m2 - 345.0°	Window (External) 1.352 m2	Window	0.000000	0.809000
Wall - 13.642 m2 - 300.0°					

Πίνακας 23: Οριακές συνθήκες για την παροχή του αέρα στις εισόδους και τις εξόδους του γραφείου 9 όπως εισήχθησαν από το EnergyPlus



Εικόνα 46: Πλάγια όψη του γραφείου 9 όπως σχεδιάστηκε στο DesignBuilder



Εικόνα 47: Πλέγμα πεπερασμένων όγκων για την εσωτερική ανάλυση της ροής του γραφείου 9

Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος	
Αριθμός Κελιών στο X επίπεδο	71
Αριθμός Κελιών στο Y επίπεδο	62
Αριθμός Κελιών στο Z επίπεδο	33
Μέγιστος Λόγος Διάστασης (max aspect ratio)	18,153
Απαιτούμενη Μνήμη (MB)	18,7

Πίνακας 24: Στατιστικά στοιχεία του πλέγματος που δημιουργήθηκε για την εσωτερική ανάλυση της ροής στο γραφείο 9

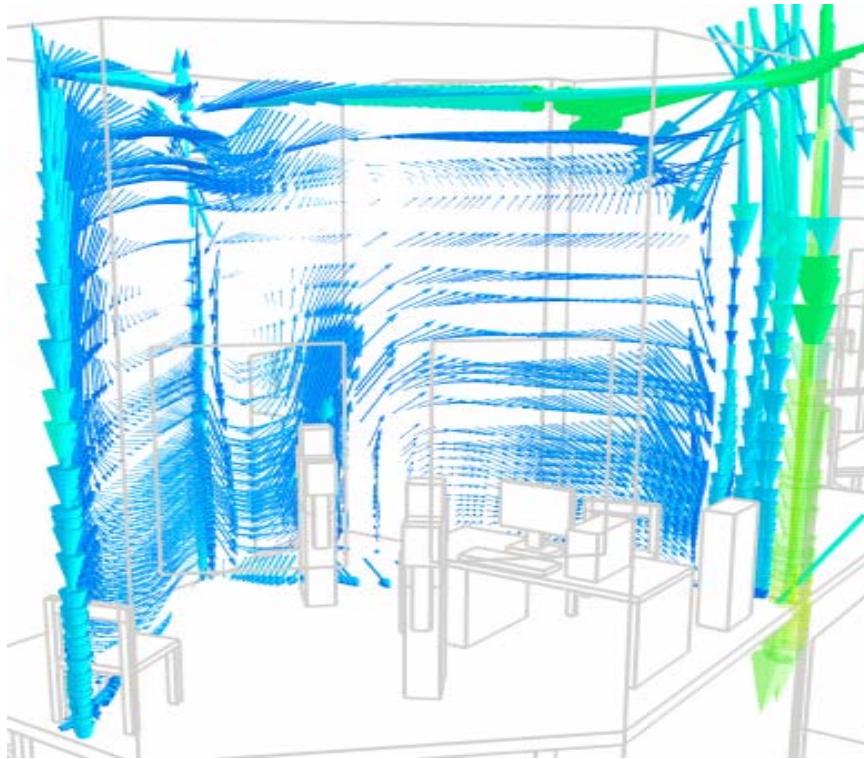
Γραφείο 9	Εσωτερικές Επαναλήψεις	Ψευτο-χρονικό βήμα	Παράγοντας Χαλάρωσης	Υπόλοιπο
X,Y,Z διανύσματα της ταχύτητας	2	η0,2	1,00	0,00001
Θερμοκρασία	6	10,00	1,00	0,00001
Πίεση(Pressure)	6			
Μάζα(mass)				0,00001
Τυρβώδη	4	0,1	1,00	0,00001
Ρυθμός διάχυσης τυρβώδους ροής	4	0,1	1,00	0,00001
Viscosity	1,00			

Πίνακας 25: Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου 9

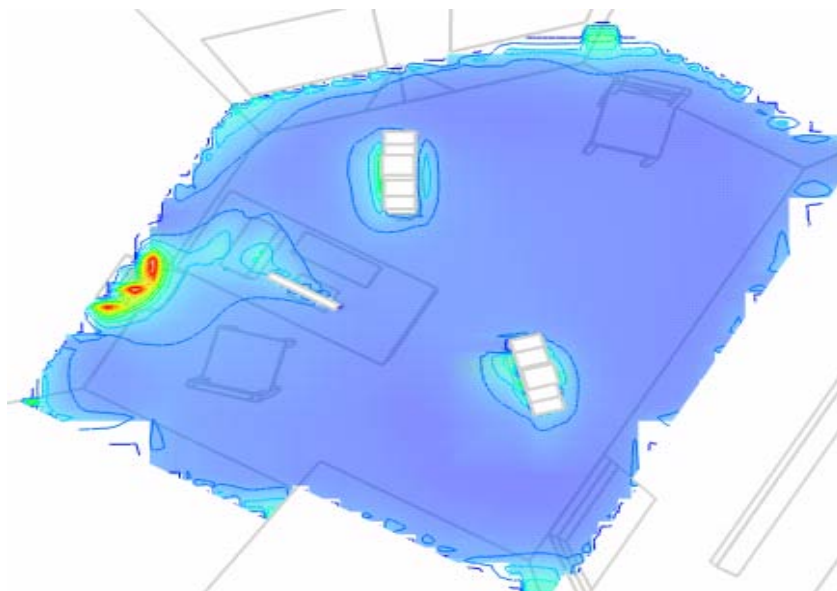
4.3.1 Διάγραμμα ταχύτητας

Στο μεγαλύτερο μέρος του γραφείου επικρατεί ταχύτητα αέρα ίση με 0,10m/s. Στις εσωτερικές επιφάνειες η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη και ίση με 0,20m/s. Επίσης γύρω από την περιοχή που είναι τοποθετημένο το καλοριφέρ έχει αναπτυχθεί ταχύτητα ίση με και 0,70m/s. Το καλοριφέρ παρέχει μια ροή θερμότητας προς το περιβάλλον και λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που αναπτύσσεται ο αέρας κινείται γρηγορότερα.(ο ζεστός αέρας ανεβαίνει ψηλά ενώ ο κρύος πηγαίνει χαμηλά). Επίσης, στην πόρτα όπως και στα παράθυρα παρατηρείται ταχύτητα ίση με 0,24m/s. Από την εικόνα 39 γίνεται αντιληπτό ότι αέρας

εισέρχεται από την πόρτα ενώ εξέρχεται από τα παράθυρα. Αυτό συμπίπτει και με τις οριακές συνθήκες που εισήχθησαν για την εσωτερική ανάλυση του γραφείου. Συγκεκριμένα, στην πόρτα εισέρχεται αέρας με παροχή 3.00l/s ενώ εξέρχεται και ένα μικρό μέρος 0.074 l/s. Ομοίως, από τα παράθυρα εξέρχεται αέρας παροχής-2.123 l/s και 0.809l/s.



Εικόνα 48: Διανύσματα ταχύτητας για το γραφείο 9

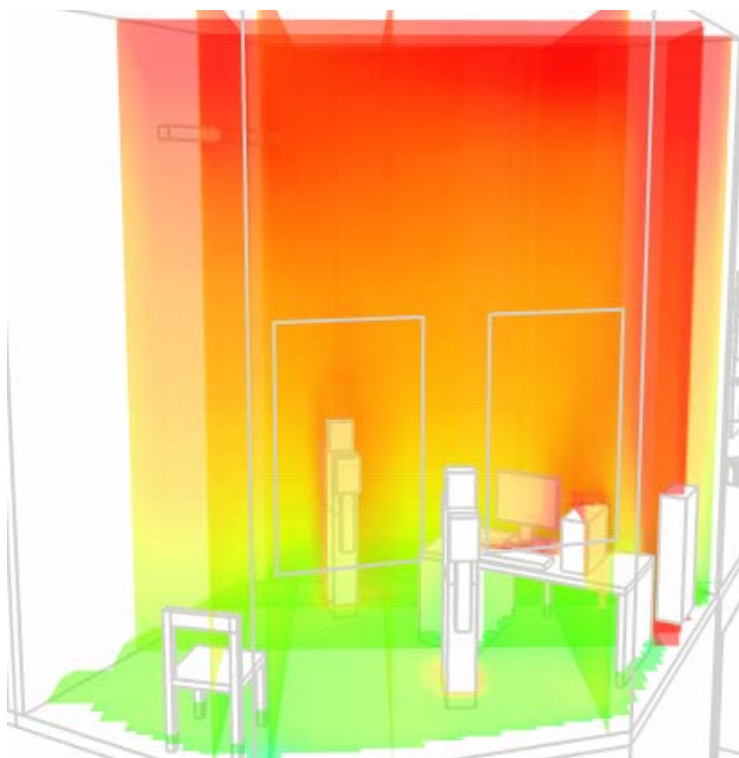


Εικόνα 49: Πεδίο ροής ταχυτήτων όπως φαίνεται από την κάτοψη γραφείου 9

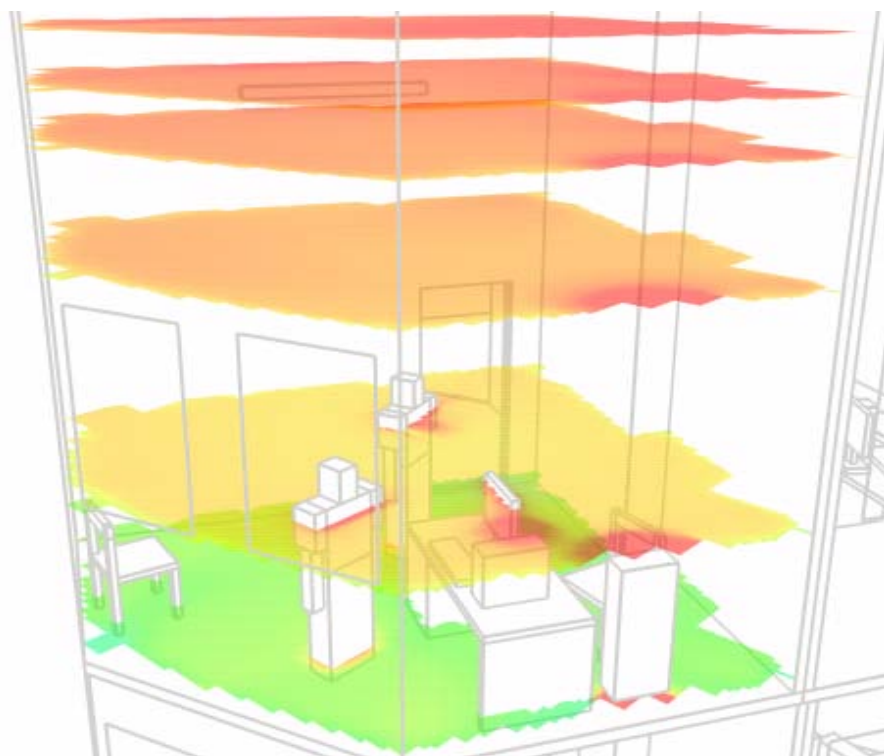
Ταχύτητα m/s	0,01	0,07	0,14	0,20	0,26	0,32	0,39	0,45	0,51	0,57	0,64	0,70

4.3.2 Διάγραμμα Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά από το πάτωμα μέχρι την οροφή. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι γύρω στους 20 °C, ενώ η μέγιστη 23,8 °C. Επίσης, γύρω από τους εργαζόμενους και τον υπολογιστή υπάρχει τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία είναι αναμενόμενη καθώς και τα δυο εκπέμπουν θερμότητα προς τον περιβάλλοντα χώρο. Τα επίπεδα της θερμοκρασίας συμβαδίζουν με τις οριακές συνθήκες που εισήχθησαν. Τέλος, η θερμοκρασία στο εσωτερικό, είναι αυξημένη σε σχέση με την εξωτερική το οποίο είναι εξίσου αναμενόμενο, καθώς γιατί τα παράθυρα είναι κλειστά και το καλοριφέρ σε λειτουργία. Η λειτουργική θερμοκρασία δηλαδή η θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος, κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα, 18,7°C από την θερμοκρασία του αέρα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι και η θερμοκρασία ακτινοβολίας βρίσκεται σε ακόμα χαμηλότερα επίπεδα 17,1°C

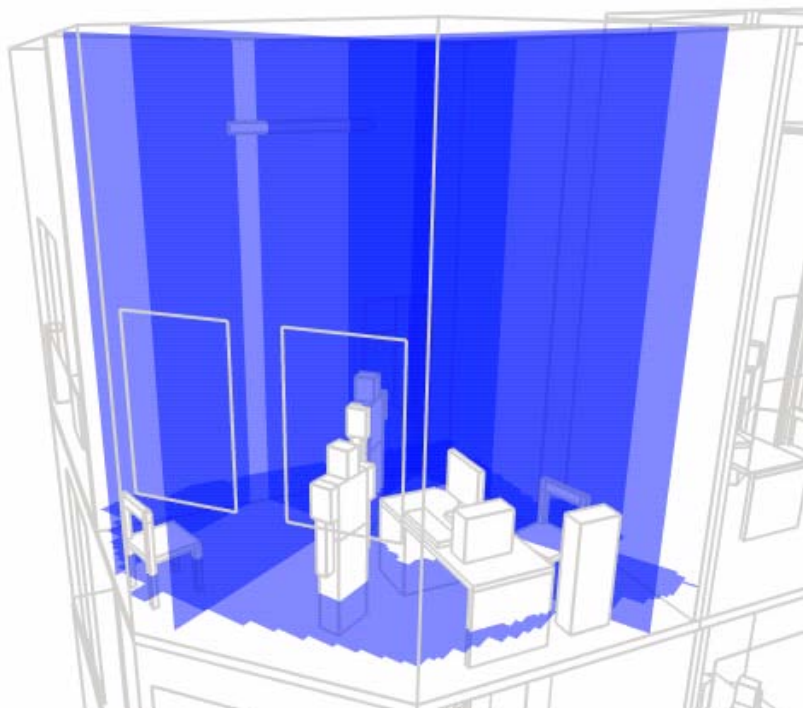


Εικόνα 50: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα στο γραφείο 9



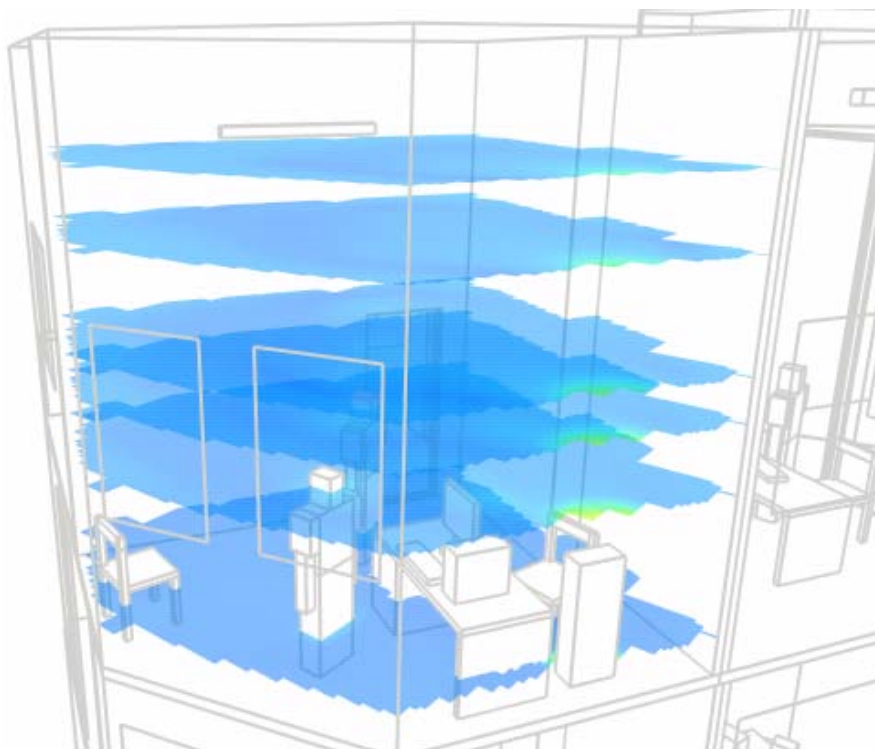
Εικόνα 51: Διανομή της θερμοκρασίας του αέρα καθ' ύψος στο γραφείο 9

Θερμοκρασία °C												
	17,1	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1	20,7	21,4	21,9	22,6	23,2	23,8



Εικόνα 52: Διανομή της θερμοκρασίας ακτινοβολίας στο γραφείο 9

Θερμοκρασία ακτινοβολίας °C												
	17,4	17,5	17,6	17,7	17,7	17,8	17,9	17,9	18,0	18,1	18,2	18,3



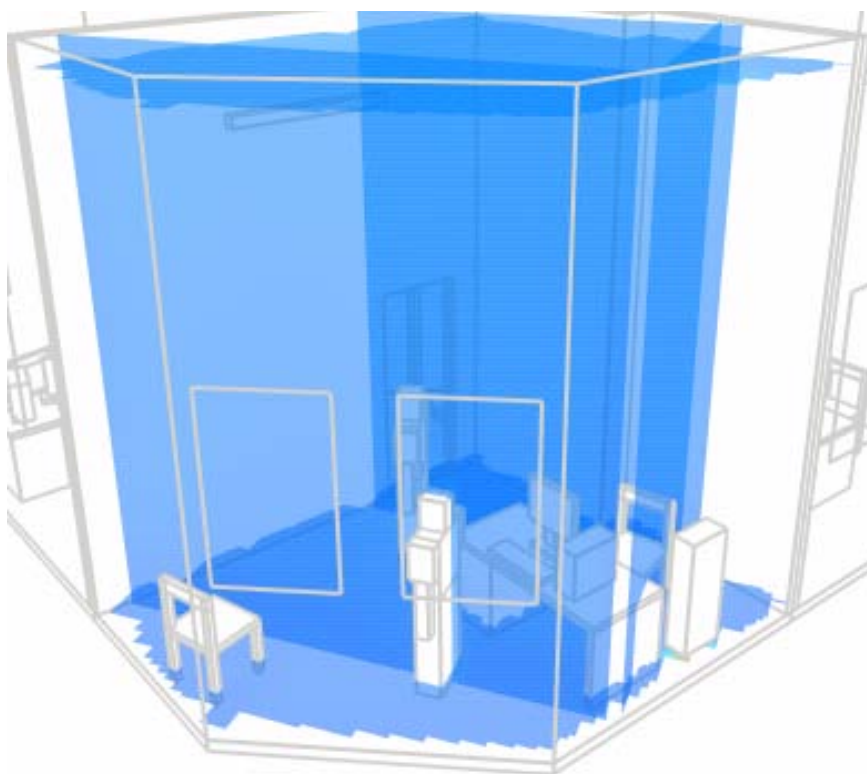
Εικόνα 53: Διανομή της λειτουργικής θερμοκρασίας στο γραφείο 9

Λειτουργική Θερμοκρασία °C	15,8	18,7	21,6	24,5	27,4	30,3	33,2	36,1	38,9	41,8	44,7	47,6
----------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

4.3.3 Δείκτες Άνεσης

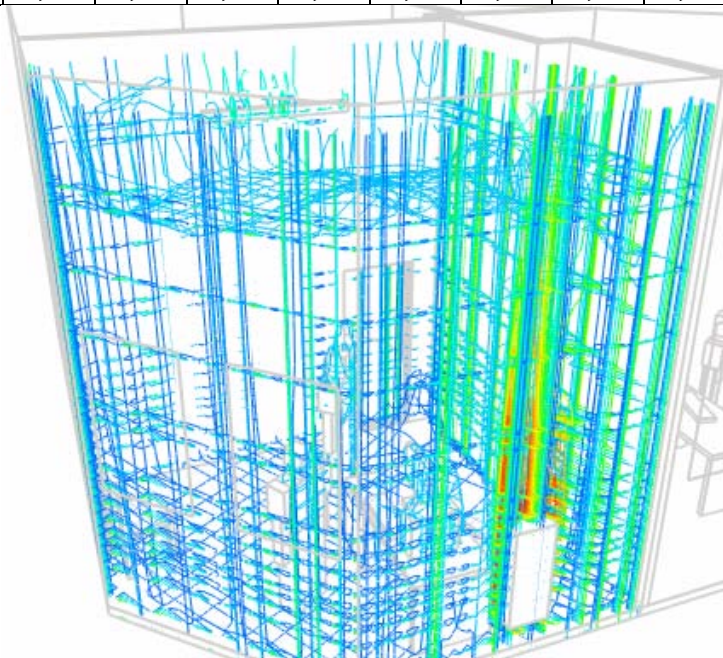
Ο δείκτης Fanger για το γραφείο 9 την δεδομένη στιγμή της ανάλυσης, κυμαίνεται από 0-0,76. Η τιμή είναι πολύ ικανοποιητική που σημαίνει ότι οι εργαζόμενοι νιώθουν πολύ καλά μέσα στο γραφείο. Παρομοίως το ποσοστό μη ικανοποίησης είναι αρκετά χαμηλό 13.6% και 48.2% για την περιοχή που βρίσκεται γύρω από το καλοριφέρ. Οι συνθήκες θερμικής άνεσης είναι πολύ καλές την δεδομένη στιγμή. Υπάρχει σχετικά καλή κυκλοφορία του αέρα στο χώρο λόγω των διαφορών θερμοκρασίας ανά ύψος που παρατηρούνται παρά το γεγονός ότι τα παράθυρα είναι κλειστά.

Τέλος έγινε υπολογισμός της ηλικίας του αέρα για την εκτίμηση του πόσο γρήγορα ανανεώνεται ο αέρας τελικά μέσα στον χώρο. Ο αέρας δεν ανανεώνεται ιδιαίτερα γρήγορα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 53. Στο μεγαλύτερο μέρος του γραφείου παρατηρείται στασιμότητα του αέρα και μη επαρκή ανανέωση με φρέσκο αέρα για τουλάχιστον 30 λεπτά. Κοντά στις εσωτερικές επιφάνειες ο χρόνος είναι μειωμένος στα 13.6 λεπτά. Η ηλικία του αέρα αποτελεί σημαντική ένδειξη για την ποιότητα του αέρα. Μεγάλη τιμή σημαίνει ότι η ποιότητα του αέρα δεν η κατάλληλη για να διασφαλιστούν συνθήκες άνεσης.



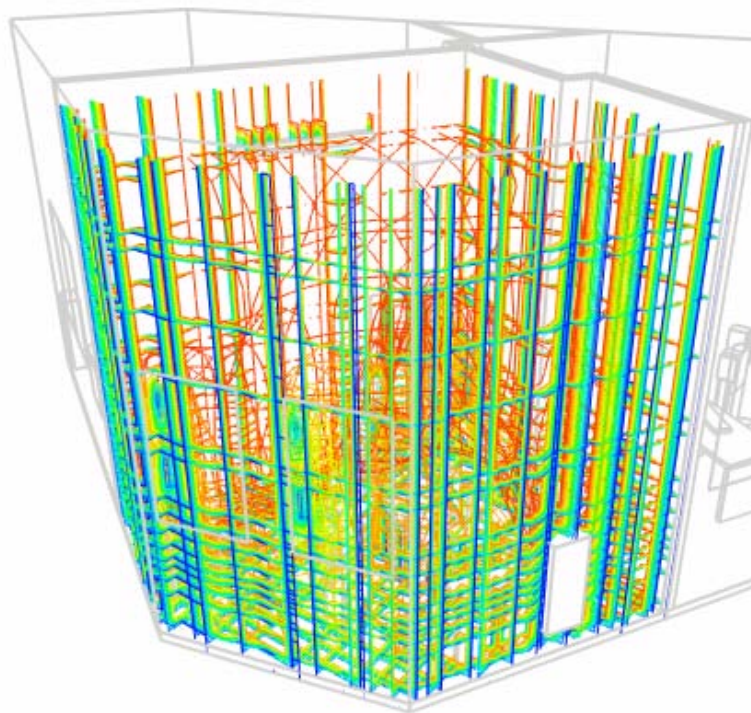
Εικόνα 54: Δείκτης θερμικής άνεσης του Fanger –Predicted Mean Vote-για το γραφείο 9

PMV												
	-0,11	0,76	1,63	2,51	3,38	4,26	5,13	6,00	6,88	7,75	8,63	8,90



Εικόνα 55: Ποσοστό μη ικανοποίησης των εργαζομένων από τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο γραφείο 9

PPD												
	5,03	13,60	22,30	30,93	39,56	48,20	58,83	65,46	74,10	82,73	91,375	100,0



Εικόνα 56: Η ηλικία του αέρα στο γραφείο 9

Age of air (sec)	0	163	326	490	653	816	979	1143	1305	1469	1632	1795
---------------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Εξωτερική Ανάλυση

5.1 Περιγραφή υπολογισμών (Calculation Description)

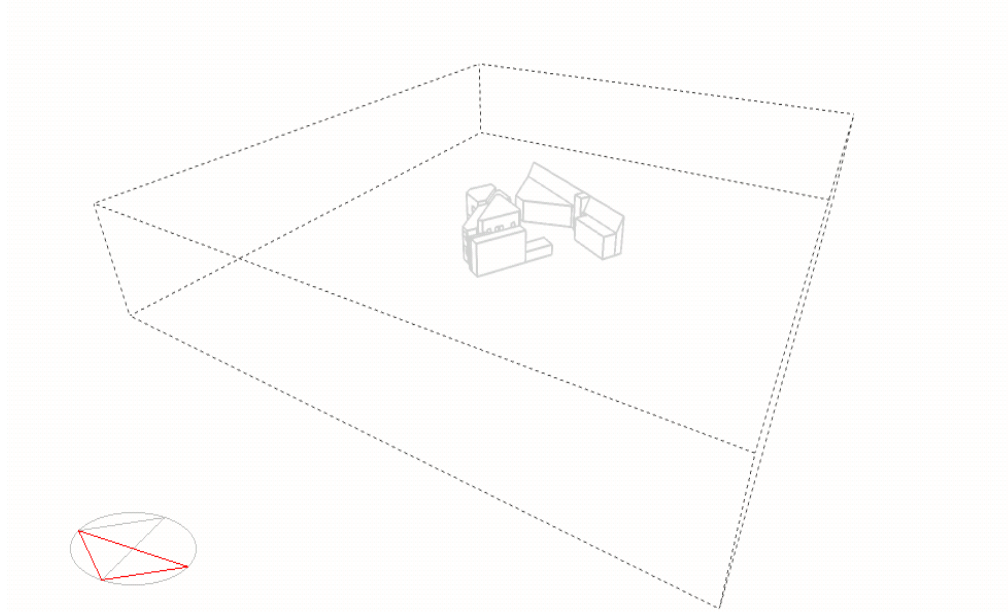
Για την εξωτερική ανάλυση επιλέχθηκε το k-ε μοντέλο τύρβης ως το πλέον αξιόπιστο και το ανάντι σχήμα ως μέθοδος διακριτοποίησης. Ο μέγιστος αριθμός εξωτερικών επαναλήψεων ορίστηκε στις 1600 επαναλήψεις.

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε μη ομοιόμορφο πλέγμα. Αρχικά , δοκιμάστηκε η προεπιλεγμένη διάσταση πλέγματος. Ωστόσο κρίθηκε απαραίτητο η πυκνωση του πλέγματος με τελική διάσταση πλέγματος 0,5m.

Η διάσταση του υπολογιστικού χωρίου(domain) στο οποίο έγινε η ανάλυση CFD επιλέχθηκε μετά από δοκιμές. Απώτερος σκοπός είναι να υπάρξει ανεξαρτησία του πλέγματος για καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό έγινε σταδιακή αύξηση του πλέγματος έως ότου να μην παρουσιάζεται καμία επίδραση στα αποτελέσματα. Οι τελικοί συντελεστές του υπολογιστικού χωρίου είναι 3 για το πλάτος και μήκος και 2 για το ύψος. Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ταχύτητα αέρα 14,5 m/s και διεύθυνση 90° ενώ η έκθεση αέρα suburban καθώς το κτήριο βρίσκεται σε προαστιακή περιοχή.

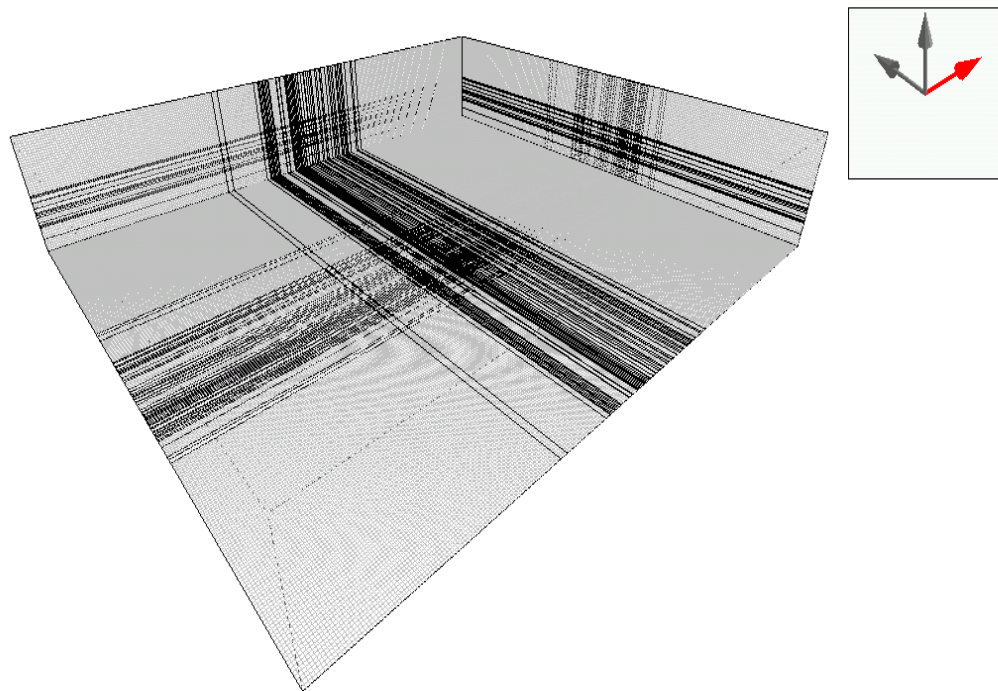
Data Options	
Name	external
CFD External Analysis	
Grid type	1-Non-uniform
Default grid spacing (m)	0.5000
Grid line merge tolerance (m)	0.1000
Wind	
Velocity (m/s)	14.5
Direction (°)	90
Exposure	2-Suburban
Site Domain Factors	
Length factor	3.00
Width factor	3.00
Height factor	2.00

Οι εξαρτημένες μεταβλητές ρυθμίστηκαν ως εξής ώστε να επιτευχθεί ομαλή σύγκλιση:



Εικόνα 57: Υπολογιστικό Χωρίο για την εξωτερική ανάλυση

Το πλέγμα λαμβάνει τελικά την ακόλουθη μορφή με τα εξής στατιστικά στοιχεία:



Εικόνα 58: Τελικό Πλέγμα για την εξωτερική ανάλυση

Στατιστικά Στοιχεία Πλέματος	
Αριθμός Κελιών στο X επίπεδο	282

Αριθμός Κελιών στο Y επίπεδο	254
Αριθμός Κελιών στο Z επίπεδο	49
Μέγιστος Λόγος Διάστασης (max aspect ratio)	9.666
Απαιτούμενη Μνήμη (MB)	452,4

Πίνακας 26: Στατιστικά Στοιχεία Πλέγματος Εξωτερικής ανάλυσης CFD

5.2 Αποτελέσματα εξωτερικής ανάλυσης CFD του κτηρίου

Η πίεση που εξασκεί ο άνεμος στις επιφάνειες ενός κτηρίου εξαρτάται από

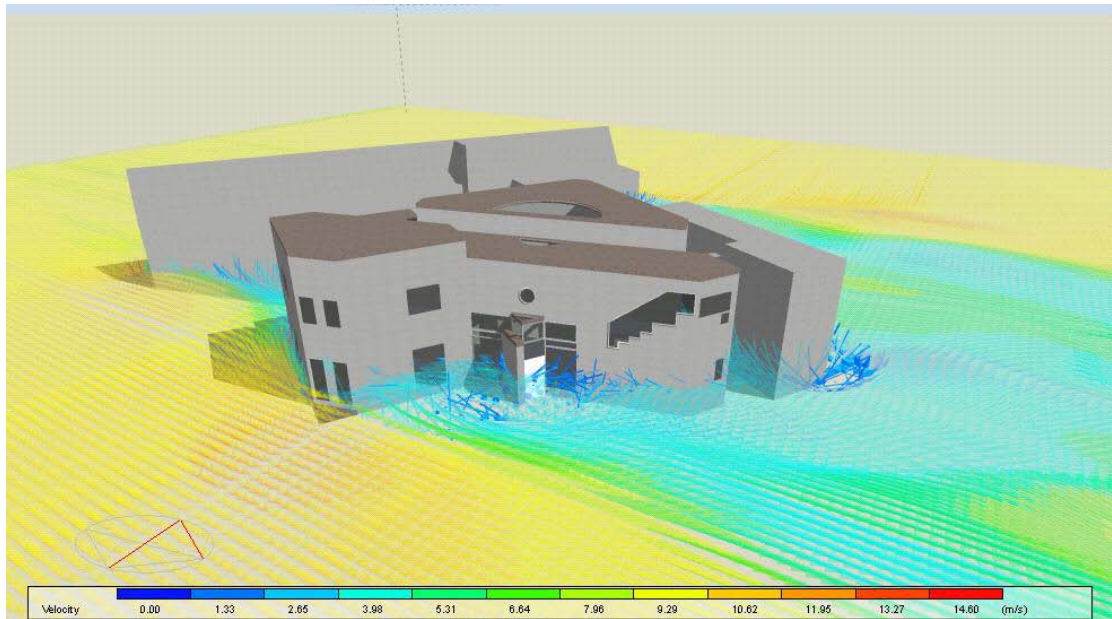
- Την ταχύτητα,
- την διεύθυνση του ανέμου,
- την πυκνότητα του αέρα και
- την μορφή του κτηρίου.

Η ταχύτητα και η διεύθυνση του αέρα εξαρτάται από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και από διάφορα τοπικά δεδομένα, όπως

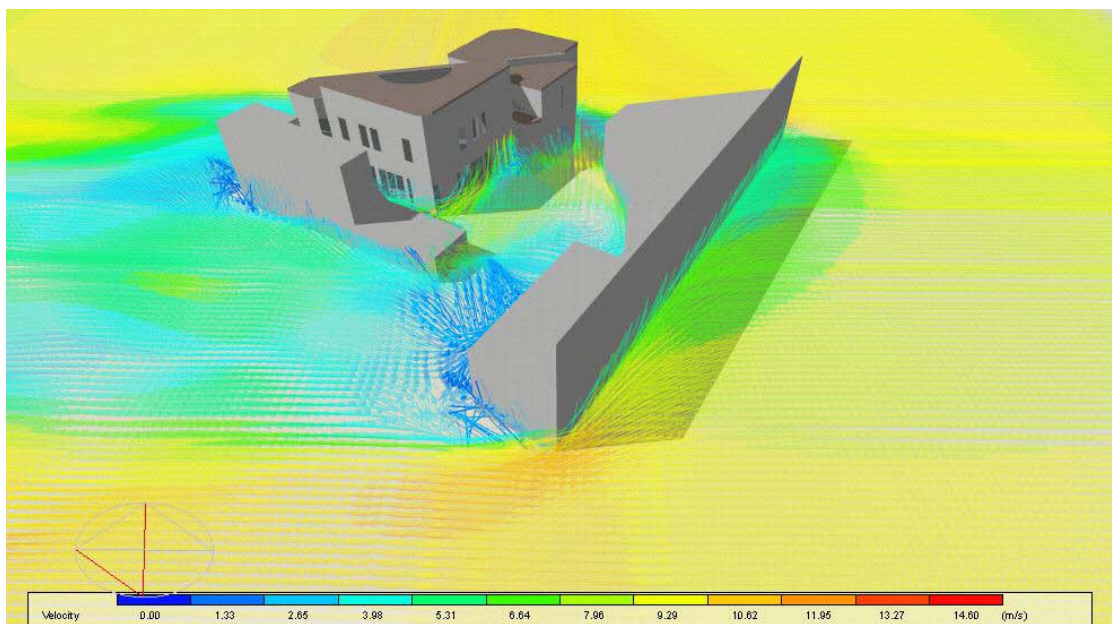
- Μορφολογία εδάφους
- Εμπόδια όπως υψώματα

Ο άνεμος προσπίπτει στην μπροστινή όψη και δημιουργεί υπερπίεση σε σχέση με το εσωτερικό του κτηρίου. Στην προκειμένη περίπτωση ο άνεμος προσπίπτει στην ανατολική πλευρά του οικοδομήματος

Ο αέρας φεύγει από την περιοχή υπερπίεσης αφενός μέσα από το κτήριο(ανοίγματα, αρμοί) αλλά κυρίως διαφεύγει οριζόντια και κάθετα γύρω από το κτήριο. Στην αντίθετη πλευρά του κτηρίου σχηματίζεται μια περιοχή υποπίεσης.



Εικόνα 59: Πρόσωση κτηρίου



Εικόνα 60: Πίσω όψη κτηρίου

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η ροή στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κτηρίων με σκοπό την ακριβή εκτίμηση της θερμικής άνεσης. Με τη βοήθεια του λογισμικού EnergyPlus γίνεται θερμική προσομοίωση των κτηρίων και εξάγονται οριακές συνθήκες απαραίτητες για την ανάλυση. Το DesignBuilder CFD χρησιμοποιήθηκε ως λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής για τον ακριβή υπολογισμό της ροής.

Το λογισμικό DesignBuilder CFD προσφέρει αρκετές ευκολίες και επιλογές για την μοντελοποίηση τόσο της εσωτερικής όσο και της εξωτερικής ροής. Παρέχει αποτελέσματα σε τρισδιάστατη μορφή, που γίνονται εύκολα κατανοητά και από μη ειδικούς. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει με ευκολία δεδομένα που έχουν προκύψει από προγενέστερες θερμικές προσομοιώσεις (EnergyPlus) ως οριακές συνθήκες. Επίσης δημιουργεί αυτόματα κατάλληλο πλέγμα ανάλογα με τον χωρίο υπολογισμού και δίνει την δυνατότητα τροποποίησής του όταν κρίνεται απαραίτητο. Για παράδειγμα όταν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών από σημείο σε σημείο κρίνεται απαραίτητη η μείωση του διαστήματος πλέγματος ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Ωστόσο, το λογισμικό DesignBuilder CFD αδυνατεί να υπολογίσει μη-μόνιμα προβλήματα ροής. Η μέθοδοι που χρησιμοποιεί (μέθοδος χαλάρωσης και των ψεύτικων χρονικών βημάτων) δεν είναι ικανές να αντιμετωπίσουν τέτοιες καταστάσεις. Σε περιπτώσεις όπου τα φαινόμενα τύρβης είναι πολύ έντονα, όπως στην περίπτωση του κλιματιστικού που έχει ρυθμιστεί στην υψηλή ταχύτητα, παρατηρήθηκε αστάθεια στην λύση και το πρόβλημα αδυνατούσε να φτάσει στην κατάσταση ισορροπίας. Παρόμοια περίπτωση παρατηρήθηκε και κατά την εκτίμηση του φυσικού εξαερισμού όταν τα παράθυρα είχαν ρυθμιστεί τελείως ανοικτά και είχε γίνει επιλογή μέρας όπου έπνεαν δυνατοί άνεμοι με κατεύθυνση προς τα παράθυρα. Ένα άλλο μειονέκτημα του λογισμικού είναι ότι το EnergyPlus, που είναι το κύριο λογισμικό θερμικής προσομοίωσης, διαθέτει εμπειρικές τιμές για τους συντελεστές πίεσης τους οποίους χρησιμοποιεί για να υπολογίζει την διήθηση του αέρα και τις παροχές αέρα στα ανοίγματα. Το γεγονός αυτό όμως εισάγει σημαντικές ανακρίβειες στις εσωτερικές αναλύσεις και τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά της κατάστασης.

Μελλοντικά, θα μπορούσε να υπάρξουν βελτιώσεις του λογισμικού για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων όσο αφορά την εκτίμηση των συνθηκών θερμικής άνεσης και σε προβλήματα μη μόνιμης ροής τα οποία συναντώνται συχνά. Επιπλέον, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να υπάρξει άμεση σύνδεση της εξωτερικής ανάλυσης με την εσωτερική. Ενδεικτικά, οι συντελεστές πίεσης θα μπορούσαν να υπολογιστούν από την εξωτερική ανάλυση και να εισαχθούν στην συνέχεια στο EnergyPlus που θα υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια θερμοκρασίες και παροχές αέρα για την εσωτερική ανάλυση. Επίσης, θα μπορούσε να υπάρχει σύζευξη του EnergyPlus και του λογισμικού CFD με παράλληλη και επαναληπτική προσομοίωση καθώς και τα δύο παρέχουν σημαντικές και συμπληρωματικές πληροφορίες για την ενεργειακή σχεδίαση των κτηρίων και την επίτευξη της θερμικής άνεσης [9,10,11]. Το EnergyPlus συχνά υποθέτει ότι ο αέρας είναι ομοιόμορφος (well-mixed) και χρησιμοποιεί τους εμπειρικούς τύπους για να υπολογίσει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών και του αέρα στον χώρο. Από την άλλη το CFD

υπολογίζει με ακρίβεια τη ροή, ενώ παράλληλα χρειάζεται οριακές συνθήκες τις οποίες παρέχει το EnergyPlus.

Βιβλιογραφία

1. Περδίδος, Σ.Δ., *Ενεργειακή απόδοση κτηρίων και κατασκευή κήπων σε δώματα*. 2006.
2. Σανταμούρης, Μ., *Ενεργειακή κατανάλωση κτηρίων και οι νέες τεχνικές για τη μείωσή της*. Available from: www.buildings.gr. 2004.
3. Ευρωπαϊκό Available from <http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm>
4. ΤΕΕ, Τεχνική Οδηγία 2425/86: *Εγκαταστάσεις σε κτήρια. Στοιχεία υπολογισμού φορτίων κλιματισμού κτηριακών χώρων*. 1986.
5. Π. Εξιζίδου, Γ. Βανδουλάκης, *Ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος λήψης αποφάσεων για την ενεργειακή βελτίωση υφιστάμενων κτηρίων*
6. Design Builder Manual. Available from: <http://www.designbuilder.co.uk/helpv1/>
7. Maciej Matyka, Dynamics- Solution to two-dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations with SIMPLE, SIMPLER and Vorticity-Stream Function Approaches Driven-Lid Cavity Problem: Solution and Visualization.
8. ASHRAE Handbook of Fundamentals SI Edition. 2005.
9. Suhas V Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*
10. PEBBLE-Positive energy buildings through better control decisions-report Technical University of Crete-2010
11. Charles Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External Flows, Volume 1, 2nd Edition The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*
12. Zhiqiang Zhai, Qingyan (Yan) Chen *Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs-*
13. Zhiqiang Zhai, Qingyan (Yan) Chen, *Performance evaluation of CFD codes in building energy and environmental analysis*
14. Zhiqiang Zhai and Qingyan Chen Massachusetts Institute of Technology, *Strategies for coupling energy simulation and computational fluid dynamics programs*
15. J. Ferziger, M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed.
16. Frank P.Incropera ,David P.DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*
17. Versteeg H K- W Malalasekera, *Introduction to Computational Fluid Dynamics-the Finite Volume Method*
18. Nasser Ashgriz & Javad Mostaghimi, *An Introduction to Computational Fluid*
19. E. Djunaedy, J.L.M. Hensen,M G L C Loomans, *Comparing internal and external run-time coupling of CFD and building energy simulation software*
20. Ismaul Tosun, *Modelling-in-Transport-Phenomena*
21. A.D.Gosman, *Developments in CFD for industrial and environment applications in wind engineering*
22. Tahershamsi Ahmad, Geranmehr Mahyar, KarimaeeMojtaba, Mahboubi Jamshid, *Effect of Radiator Positions on Heat Distribution in the Building Using Numerical Model*
23. Jonn Are Myhren, Sture Holmberg, *Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators*
24. S. Somarathne, M. Seymour, M. Kolokotroni, *Dynamic thermal CFD simulation of a typical office by efficient transient solution methods*
25. Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, Taichi Shirasawa, *AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*

