



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση Θερμικής Άνεσης σε χώρο γραφείου με το λογισμικό
DesignBuilder»

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΞΕΝΙΚΟΣ

02115070

Επιβλέπων Καθηγητής

ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2021

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής και συνεπώς των σπουδών μου θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους ήταν δίπλα μου και αποτέλεσαν σημαντικά κομμάτια για τον σκοπό αυτόν.

Αρχικά ευχαριστώ τον επιβλέπων καθηγητή κύριο Χρήστο Τζιβανίδη που μου έδωσε την δυνατότητα να αναπτύξω τις γνώσεις μου γύρω από ένα ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης ευχαριστώ τον κύριο Γιώργο Μητσόπουλο που μου πρόσφερε την βοήθεια του στο ξεκίνημα και την πορεία της διπλωματικής μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στην οικογένεια μου, οι οποίοι πάντα ήταν δίπλα μου προσφέροντας μου όλα τα εφόδια για να καταφέρω να πετύχω τον στόχο μου.

Τέλος ένα ευχαριστώ και σε όλους τους φίλους μου και τους συμφοιτητές με τους οποίους μοιράστηκα πολλές εμπειρίες κατά την διάρκεια των σπουδών, εντός και εκτός σχολής

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	5
Abstract	6
Εισαγωγή	7
1. Θερμική Άνεση.....	8
1.1 Περιβαλλοντικές συνθήκες.....	9
1.1.1 Θερμοκρασία αέρα.....	9
1.1.2 Υγρασία	10
1.1.3 Ταχύτητα αέρα	12
1.1.4 Μέση θερμοκρασία από ακτινοβολία	13
1.2 Ατομικοί παράγοντες.....	14
1.2.1 Ένδυση	14
1.2.2 Δραστηριότητα- Μεταβολικός Ρυθμός.....	15
2. Τομείς που επηρεάζονται από την έλλειψη Θερμικής Άνεσης	17
2.1 Θερμική Άνεση και Παραγωγικότητα.....	17
2.2 Θερμική Άνεση και Υγεία.....	18
3. Βασικοί Δείκτες υπολογισμού και αξιολόγησης Θερμικής Άνεσης	20
3.1 Δείκτης PMV (Predicted Mean Vote) – Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου	21
3.2 Δείκτης PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied Vote) – Προβλεπόμενο ποσοστό Δυσανεστών.....	23
4. Υπολογισμός και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης με το λογισμικό DesignBuilder	25
4.1 Το λογισμικό-DesignBuilder	25
4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο DesignBuilder.....	27
4.1.2 Simulation και Υπολογισμοί στο DesignBuilder	27
4.1.3 CFD Simulation στο DesignBuilder.....	29
4.2 Σχεδιασμός μοντέλου για εφαρμογή CFD προσομοίωσης.....	35
4.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Γραφείου	35
4.2.2 Δομικά Υλικά Κατασκευής.....	38
4.2.3 Μοντελοποίηση ανθρώπων και συσκευών	41
4.2.4 Εφαρμογή Simulation για τον ορισμό οριακών συνθηκών	46
4.3 Σενάρια CFD προσομοιώσεων	47
Περίπτωση 1 ^η	48
Περίπτωση 2 ^η	61

Περίπτωση 3 ^η	71
Περίπτωση 4 ^η	78
Περίπτωση 5 ^η	87
Περίπτωση 6 ^η	94
Περίπτωση 7 ^η	102
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	110
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	111
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	112

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται το αντικείμενο της Θερμικής Άνεσης κυρίως σε χώρους γραφείων.

Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική προσέγγιση γύρω από τη θεωρία της θερμικής άνεσης και τους μηχανισμούς που την περιγράφουν, τους τρόπους υπολογισμού και αξιολόγησης της αλλά και τους λόγους που θεωρείται σημαντική η μελέτη της.

Στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας γίνεται χρήση του λογισμικού DesignBuilder και κυρίως του εργαλείου CFD που διαθέτει. Σχεδιάζεται στο λογισμικό ένας τυπικός χώρος γραφείου και πάνω σε αυτό το μοντέλο διεξάγονται διαφορετικές προσομοιώσεις διαφοροποιώντας κάθε φορά τον τρόπο κλιματισμού του χώρου και αξιολογώντας κάθε φορά τα αποτελέσματα με τελικό σκοπό την βέλτιστη επιλογή πάντα με γνώμονα την Θερμική άνεση.

Abstract

This present diploma thesis is dealing with the topic of Thermal Comfort especially in office buildings.

The first part presents a bibliographical approach of Thermal Comfort. In particular the different mechanisms, the calculation methods and the evaluation of Thermal comfort are explained through the theory.

In the second part, a typical office model is designed using the software of DesignBuilder. On this model, using specifically the CFD Simulation tool that DesignBuilder provides, several CFD Simulations are conducted in order to observe the Thermal Comfort Indices, Air Temperature and Air Velocity distribution in different situations.

Εισαγωγή

Η εξοικονόμηση ενέργειας αυτή την στιγμή στον κόσμο, θεωρείται ως ένα από τα βασικότερα εργαλεία για την καταπολέμηση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη καθώς και της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα . Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό γύρω στο 40%, στην κατανάλωση ενέργειας παγκοσμίως, το κατέχουν τα κτίρια [1]. Για αυτό τον λόγο οι μελέτες για αυτόν τον σκοπό απασχολούν πολλούς επιστήμονες.

Σε αντίθεση όμως με την συνεχή μείωση για τις απαιτήσεις ενέργειας που καταναλώνουν τα κτίρια, ίδιες ή ακόμη και αυξανόμενες είναι οι ανάγκες για θερμική άνεση στους εσωτερικούς χώρους, όπου σε αυτούς παρευρίσκονται άνθρωποι.

Η πρόκληση επομένως για έναν μηχανικό είναι να καταφέρει να σχεδιάζει κτίρια και χώρους οι οποίοι θα ισορροπούν μεταξύ της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και της εσωτερικής θερμικής άνεσης. Δηλαδή δεν αρκεί μόνο η σωστή διαστασιολόγηση ενός συστήματος HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) ,το οποίο θα καλύπτει τα απαιτούμενα φορτία αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει αυτό. Συγκεκριμένα δηλαδή, να επιλεγεί ή κατάλληλη τερματική μονάδα για τον χώρο (π.χ fan coils, σύστημα αεραγωγών με στόμια κλπ) αλλά και η σωστή τοποθέτηση της, πάντα με γνώμονα την θερμική άνεση των ατόμων που βρίσκονται στον χώρο αυτό.

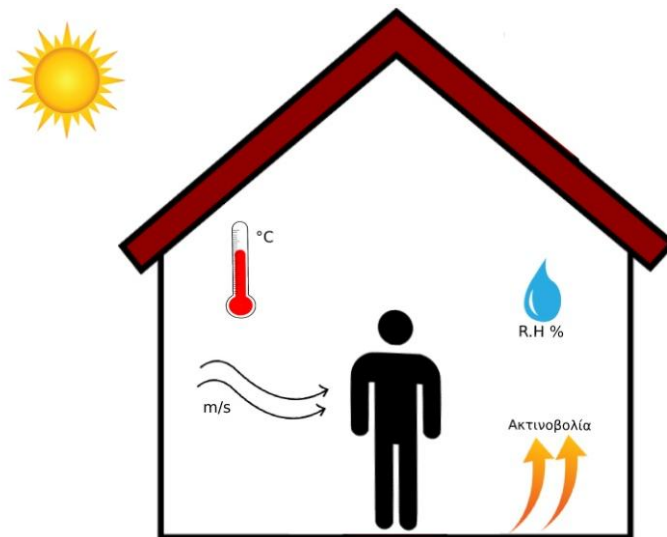
1. Θερμική Άνεση

Με τον όρο Θερμική Άνεση σύμφωνα με την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning) εννοούμε « Την νοητική κατάσταση στην οποία το μυαλό εκφράζει ικανοποίηση σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό χώρο» [2]. Ένας σωστός και ολοκληρωμένος σχεδιασμός εσωτερικών χώρων και κτηρίων πρέπει πάντα να λαμβάνει υπόψη τις σωστές περιβαλλοντικές συνθήκες για την άνεση των ανθρώπων. Γενικά, ενώ η θερμική άνεση είναι πολύ σημαντική στους εσωτερικούς χώρους, είναι ένα φαινόμενο το οποίο δεν μπορούμε εύκολα να το ορίσουμε και να το υπολογίσουμε μαθηματικά, καθώς συνδέεται και με υποκειμενικά κριτήρια. Για παράδειγμα στον ίδιο χώρο 2 άτομα είναι πιθανό να έχουν διαφορετική αντίληψη για την θερμική άνεση. Αυτό εξαρτάται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες που είναι δύσκολο κάποιος να καταφέρει να τους αποτυπώσει σε μια έρευνα. Αναφέρεται σε δημοσίευση του 2010, ότι η θερμική άνεση δεν είναι μόνο αποτέλεσμα περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, αλλά συμβάλουν και παράγοντες ψυχολογικοί, κοινωνικοί, πολιτισμικοί που χαρακτηρίζουν τα άτομα [3].

Οι παράγοντες που διαμορφώνουν την θερμική άνεση σε έναν χώρο μπορούν να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά καθαρά τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στον χώρο αυτόν, ενώ η δεύτερη κατηγορία τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το κάθε άτομο ξεχωριστά μέσα στον εκάστοτε χώρο [2].

1.1 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Συγκεκριμένα αναφερόμαστε στις συνθήκες αέρα που επικρατούν στον χώρο και διαμορφώνουν το περιβάλλον του. Δηλαδή θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα αέρα αλλά και ακτινοβολία (Εικόνα 1) [4].



Εικόνα 1: Περιβαλλοντικοί Παράγοντες που συμβάλλουν στην θερμική άνεση

1.1.1 Θερμοκρασία αέρα

Αναφέρεται στην θερμοκρασία αέρα που επικρατεί σε έναν χώρο και περιβάλλει τον άνθρωπο. Πρόκειται ίσως για το σημαντικότερο στοιχείο καθορισμού της θερμικής άνεσης σε έναν χώρο. Σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη το 2008 είναι ο κυριότερος παράγοντας που συνδέεται με το αίσθημα της θερμικής άνεσης καθώς το ανθρώπινο σώμα είναι αρκετά ευαίσθητο ως προς αυτήν [5]. Ο λόγος που κυριαρχεί είναι διότι επηρεάζει άμεσα όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που συμβαίνουν μεταξύ του περιβάλλοντος και του ανθρώπινου σώματος. Οι παράμετροι που διαμορφώνουν την θερμοκρασία του αέρα σε έναν χώρο ποικίλουν και μπορεί να είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον, ο τρόπος και το είδος κλιματισμού, ο αερισμός, τα δομικά-κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, το είδος δραστηριότητας του

χώρου και πολλά άλλα. Προφανώς δεν είναι δυνατόν να οριστεί μια συγκεκριμένη θερμοκρασία που θα ικανοποιεί όλα τα άτομα, αντιθέτως όμως γίνεται να οριστεί ένα εύρος θερμοκρασιών μέσα στο οποίο η θερμική άνεση μπορεί να επιτευχθεί.

1.1.2 Υγρασία

Η υγρασία είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για την θερμική άνεση. Χωρίζεται σε 2 τύπους, την απόλυτη και την σχετική. Η απόλυτη υγρασία (ή πυκνότητα υδρατμού) εκφράζεται ως τον λόγο της μάζας του υδρατμού προς τον ολικό όγκο του υγρού αέρα. Η σχετική υγρασία είναι ο λόγος τους γραμμομοριακού κλάσματος υδρατμού, σε ένα δείγμα υγρού αέρα, ως προς το γραμμομοριακού κλάσμα υδρατμού σε κορεσμένα αέρα ίδιας πίεσης και θερμοκρασίας [6].

Στους υπολογισμούς και στην μελέτη θερμικής άνεσης μας ενδιαφέρει συνηθέστερα η σχετική υγρασία. Ο λόγος για τον οποία η σχετική υγρασία παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι διότι επιδρά στους μηχανισμούς εξάτμισης του ιδρώτα από τα δέρμα, επηρεάζοντας το θερμικό ισοζύγιο του σώματος. Συγκεκριμένα ένας τρόπος με τον οποίο το ανθρώπινο σώμα καταφέρνει να ρίξει την θερμοκρασία του, είναι μέσω της εφίδρωσης και εξάτμισης του ιδρώτα. Όταν όμως το ποσοστό υγρασίας είναι αρκετά υψηλό, της τάξης του 70%, το φαινόμενο της εξάτμισης δεν είναι δυνατόν να συμβεί. Για παράδειγμα σε ένα ζεστό περιβάλλον η μεγάλη τιμή στην υγρασία αποτρέπει την εξάτμιση του ιδρώτα από το δέρμα, μηχανισμός που βοηθάει το σώμα να δροσιστεί, με συνέπεια την έντονη ενόχληση. Σε πολλές περιπτώσεις η θερμοκρασία του αέρα μπορεί να είναι στα επιθυμητά όρια, αλλά είτε η αυξημένη είτε η μειωμένη υγρασία να προκαλεί μεγάλη δυσφορία στα άτομα που βρίσκονται στον χώρο.

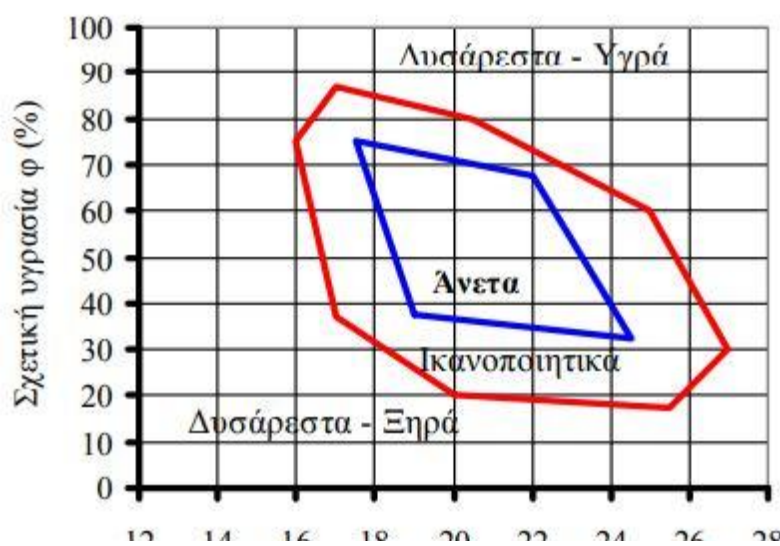
Τα όρια που είναι γενικά αποδεκτά είναι περίπου από 30% έως 70%. Για συγκεκριμένες τιμές υγρασίας ανάλογα και με το είδος του χώρου, τα εύρη θεσπίζονται από τα διάφορα πρότυπα και κανονισμούς.

Ενδεικτικά στον Πίνακα 1, φαίνεται πίνακας από την τεχνική οδηγία του Τ.Ε.Ε (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος), Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, όπου αναφέρονται μερικές τιμές για την επιθυμητή σχετική υγρασία και θερμοκρασία ανάλογα την χρήση του κτιρίου [7].

Χρήση κτηρίων	Θερμοκρασία °C		Σχετική υγρασία (%)	
	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή Περίοδος	Θερινή Περίοδος
Εμπορικό κέντρο	19	25	35	45
Κατάστημα, φαρμακείο	20	26	35	45
Ινστιτούτο γυμναστικής	20	26	35	45
Γραφείο	20	26	35	45
Θέατρο-Κινηματογράφος	20	26	35	50
Χώρος εκθέσεων	20	23	35	50
Τράπεζα	20	26	35	45
Διάδρομοι-βοηθητικοί χώροι	18	26	35	50
Νηπιαγωγείο	20	26	35	45
Σχολείο(Πρωτοβάθμια/Δευτεροβάθμια)	20	26	35	45
Σχολείο (Τριτοβάθμια)	20	26	35	45
Κουρείο, κομμωτήριο	20	26	35	45
Νοσοκομείο (Χειρουργείο)	18	20	35	55
Βιβλιοθήκη	20	26	35	50

Πίνακας 1. Επιθυμητές τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας ανά χώρο [7]

Επίσης στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 1) φαίνονται ενδεικτικά τα εύρη θερμοκρασίας και υγρασίας σε συνάρτηση με το αίσθημα θερμικής άνεσης που προκαλούν [8].



Διάγραμμα 1. Θερμοκρασία και υγρασία σε συνάρτηση με το αίσθημα θερμικής άνεσης [8]

1.1.3 Ταχύτητα αέρα

Συνδέοντας την ταχύτητα αέρα με την θερμική άνεση σε κτίρια γραφείων, έχει δοθεί σαν ορισμός ως: « Η ταχύτητα του αέρα που κινείται γύρω από έναν εργαζόμενο και βοηθάει τον δροσισμό του, εάν αυτή έχει μικρότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον» [4]. Ο αέρας που διέρχεται από ένα αντικείμενο ή έναν άνθρωπο στην συγκεκριμένη περίπτωση, απάγει ή προσδίδει θερμότητα με το φαινόμενο της συναγωγής. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερο και το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας.

Πέρα από την μεταφορά θερμότητας, η ταχύτητα αέρα συμβάλλει και στις εναλλαγές του αέρα σε έναν χώρο. Αυτές οι εναλλαγές είναι πολύ σημαντικές καθώς ανανεώνουν τον αέρα σε έναν χώρο με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται η υγεία ενός ανθρώπου και να αναπνέει όσο το δυνατόν πιο φρέσκο αέρα.

Σε έναν εσωτερικό χώρο που κλιματίζεται, μεγάλη σημασία στην ταχύτητα του αέρα έχουν τα συστήματα που έχουν τοποθετηθεί για τον κλιματισμό. Για παράδειγμα όταν ένα κλιματιστικό ή ένα στόμιο αεραγωγού βρίσκεται πολύ κοντά σε ένα άτομο το αποτέλεσμα θα είναι η έντονη δυσφορία του λόγω της μεγάλης ταχύτητας της ροής που θα δέχεται. Γι' αυτό τον λόγο η σωστή τοποθέτηση των τερματικών μονάδων είναι καθοριστική.

Μερικές ενδεικνυόμενες τιμές για την ταχύτητα αέρα και την αίσθηση που αντιλαμβάνεται ένας μέσος άνθρωπος σε γενικότερο πλαίσιο σύμφωνα με την οδηγία TOTEE 2423/86, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ταχύτητα [m/s]	Αίσθηση
0 – 0.08	Άπνοια- Παράπονα έλλειψης ρεύματος αέρα
0.125	Ιδανική κατάσταση
0.125 – 0.25	Αίσθηση ρεύματος σε ψυχρό κλίμα τον χειμώνα
0.325	Όχι ικανοποιητική για χώρους γραφείων
0.375	Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα για άτομα που κινούνται
0.375 – 1.5	Μόνο για βιομηχανικές εφαρμογές

Πίνακας 2. Ενδεικνυόμενες τιμές ταχύτητας αέρα [8]

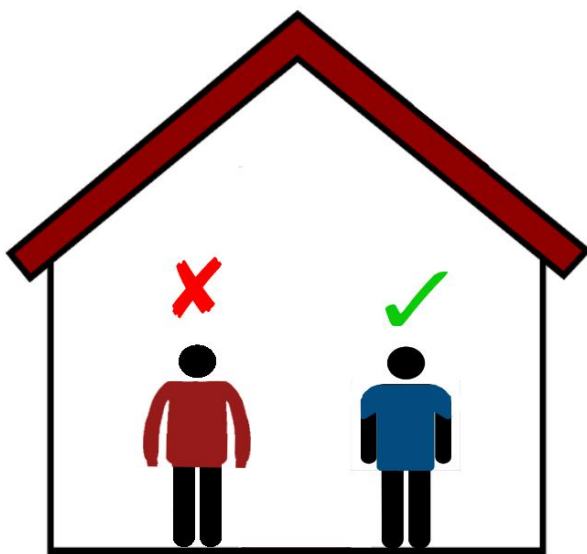
1.1.4 Μέση θερμοκρασία από ακτινοβολία

Πρόκειται για την θερμοκρασία λόγω της θερμότητας που προσδίδεται στον χώρο μέσω θερμότερων επιφανειών και αντικειμένων με την μορφή του φαινομένου της ακτινοβολίας. Σε μερικές περιπτώσεις η θερμότητα αυτή μπορεί να έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα, συνεπώς και στην θερμική άνεση των ατόμων.

Η κυριότερη πηγή θερμότητας από ακτινοβολία είναι ο Ήλιος. Για παράδειγμα κοντά σε υαλοπίνακες οι οποίοι δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία θα είναι αισθητά μεγαλύτερη απ' ότι στον υπόλοιπο χώρο. Άλλες πηγές από όπου μπορεί να προέρχεται η ακτινοβολία είναι ζεστά αντικείμενα όπως μάτια κουζίνας, φούρνοι και στιδήποτε είναι αρκετά θερμό ώστε να ακτινοβολεί θερμότητα στον χώρο [4].

1.2 Ατομικοί παράγοντες

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι παράγοντες που συμβάλλουν στην θερμική άνεση, αλλά αφορούν καθαρά το άτομο που βρίσκεται στον χώρο και όχι τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες παρουσιάστηκαν παραπάνω. Αυτοί οι δύο βασικοί παράγοντες είναι η ατομική ένδυση (Εικόνα 2) και η δραστηριότητα (Εικόνα 3).



Εικόνα 2: Το είδος του ρουχισμού μπορεί συμβάλει στην θερμική άνεση του ατόμου



Εικόνα 3: Ένας άνθρωπος που εργάζεται καθιστός με κάποιον που κινείται συνεχώς έχουν διαφορετική αντίληψη στην θερμική άνεση

1.2.1 Ένδυση

Η ποσότητα και το είδος της ένδυσης ενός ατόμου, μεταφράζεται ως θερμική μόνωση μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος, συνεπώς είναι η αντίσταση στην μετάδοση θερμότητας. Για παράδειγμα σε έναν σχετικά ζεστό χώρο, η ένδυση με χοντρά ρούχα μπορεί να προκαλέσει έντονη δυσφορία, ενώ αντίστοιχα σε ένα κρύο περιβάλλον η έλλειψη επαρκούς ρουχισμού έχει ως αποτέλεσμα πιο έντονη την αίσθηση του κρύου.

Για να ληφθεί υπόψη η ένδυση στους γενικότερους υπολογισμούς της θερμικής άνεσης, εισάγεται από το πρότυπο της ASHRAE, 55-2013 η παράμετρος I_{cl} , όπου εκφράζει την μόνωση από τον ρουχισμό σε μονάδες [clo], για τις οποίες ισχύει η σχέση: $1 clo = 0.155 K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$. Εάν δεν υπάρχει πρόσβαση σε πειραματικά δεδομένα για τις τιμές αυτές, δίνονται πίνακες όπως ο παρακάτω για τον υπολογισμό της παραμέτρου I_{cl} [2]. Σημειώνεται πως αυτή η παράμετρος αποτελεί έναν μέσο όρο, ενώ σε περιπτώσεις όπου τα άτομα στον χώρο διαφέρουν αρκετά ως προς το είδος της ένδυσης δεν είναι μπορεί να γίνει χρήση της τιμής αυτής [2]. Στον Πίνακα 3 φαίνονται ενδεικτικές τιμές για διάφορα είδη ένδυσης.

Είδος Ένδυσης	Τιμή I_{cl} [clo]
Μπλουζάκι κοντομάνικο (T-shirt)	0.08
Εσώρουχο	0.03
Παπούτσι	0.02
Μπότα	0.1
Παντελόνι φόρμας	0.28
Παντελόνι σορτς	0.06
Πουκάμισο Μακρυμάνικο	0.25
Παντελόνι λεπτό	0.15
Φούστα λεπτή	0.14
Φόρεμα με μακρύ μανίκι	0.33
Σακάκι χοντρό	0.44

Πίνακας 3. Ενδεικτικές τιμές της παραμέτρου I_{cl} για διάφορα είδη ένδυσης, από το πρότυπο ASHRAE 55-2013 [2].

1.2.2 Δραστηριότητα- Μεταβολικός Ρυθμός

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την θερμική άνεση είναι η δραστηριότητα ενός ατόμου στον χώρο και συνεπώς ο μεταβολικός του ρυθμός. Ο μεταβολικός ρυθμός δίνεται σαν ορισμός από ASHRAE Standard 55– 2013, ως « Ο ρυθμός μετατροπής της χημικής ενέργειας σε θερμότητα και έργο, μέσω ατομικής δραστηριότητας» [2].

Με τον όρο δραστηριότητα εννοούμε το είδος της εργασίας που λαμβάνει μέρος στον εκάστοτε χώρο. Για παράδειγμα η δουλειά σε ένα γραφείο (καθιστική εργασία) σε σχέση με ένα συνεργείο αυτοκινήτων (συνεχής κίνηση των εργαζομένων) αντιμετωπίζονται διαφορετικά. Κατά τον σχεδιασμό ενός κτιρίου ή συγκεκριμένα κάποιου χώρου ο ορισμός της δραστηριότητας που θα λαμβάνει χώρα σε αυτόν είναι καθοριστικός.

Για την ποσοτικοποίηση αυτής της θερμότητας που εκλύεται στο περιβάλλον από το ανθρώπινο σώμα, γίνεται η παραδοχή ότι ένας μέσος άνθρωπος έχει επιφάνεια σώματος ίση με 1.8 m^2 και κατά την διάρκεια καθιστής δραστηριότητας και ηρεμίας εκλύει θερμότητα ίση με 100 W , το οποίο μεταφράζεται ως 1 Met . Συνεπώς για την μονάδα μέτρησης $[\text{Met}]$ για την οποία ορίζουμε την δραστηριότητα ισχύει ότι: $1 \text{ Met} = 58.2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Στον Πίνακα 4 φαίνονται διάφορες ενδεικτικές τιμές Met ανάλογα το είδος της δραστηριότητας, όπως παρουσιάζονται στο πρότυπο ASHRAE 55-2013 [2].

Είδος Δραστηριότητας	Μονάδες Met	Μονάδες W/m^2
Ύπνος	0.7	40.7
Καθιστός, σε ηρεμία	1.0	60
Όρθιος, σε ηρεμία	1.2	70
Περπάτημα με ταχύτητα $\sim 0.9 \text{ m/s}$	2.0	116.4
Περπάτημα με ταχύτητα $\sim 1.8 \text{ m/s}$	3.8	220
Διάβασμα, καθιστός	1.0	55
Πληκτρολόγηση σε γραφείο	1.1	65
Γράψιμο σε γραφείο	1.0	60
Μετακίνηση μέσα σε κάποιο χώρο	1.7	100
Οδήγηση αυτοκινήτου	1.0 – 2.0	60 - 115
Μαγείρεμα	1.6-2.0	95 - 115
Μπάσκετ	5.0 - 7.6	290 - 440
Χορός	2.4 – 4.4	140 - 255
Ηλεκτρολογική εργασία	2.0-2.4	115 - 140

Πίνακας 4. Τιμές Met για διάφορες δραστηριότητες από ASHRAE 55-2013 [2].

2. Τομείς που επηρεάζονται από την έλλειψη Θερμικής Άνεσης

Έχοντας ορίσει την θερμική άνεση ως φαινόμενο και τις παραμέτρους που την καθορίζουν, το επόμενο ερώτημα που τίθεται είναι για ποιους λόγους πρέπει να θεωρείται σημαντική προς μελέτη κατά τον σχεδιασμό κτηρίων και χώρων. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ένας εργαζόμενος ενήλικας, περνάει το 90% του χρόνου του μέσα σε εσωτερικούς χώρους και το υπόλοιπο σε εξωτερικούς [9]. Σαφώς αυτό το ποσοστό μπορεί να μην ανταποκρίνεται σε όλους του ενήλικες, καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ηλικία, τρόπος ζωής, απαιτήσεις εργασίας, αλλά αντικατοπτρίζει έναν μέσο όρο του σύγχρονου αστού ενήλικα.

Συνεπώς, μιλώντας για εσωτερικούς χώρους και σωστές συνθήκες, η θερμική άνεση βρίσκεται στο προσκήνιο. Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις βασικοί τομείς που συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με την θερμική άνεση. Αυτοί είναι: α) η Παραγωγικότητα της εργασίας, β) η επιπτώσεις στην υγεία, γ) η εξοικονόμηση ενέργειας.

2.1 Θερμική Άνεση και Παραγωγικότητα

Η παραγωγικότητα της εργασίας μπορεί να συνδεθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό με την Θερμική Άνεση. Είναι συνηθισμένο το γεγονός, ένας εργαζόμενος όταν βρίσκεται σε έναν χώρο στον οποίο οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν είναι ικανοποιητικές για εκείνον, τότε η απόδοση στην εργασία του δεν επιβαρύνεται. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή υπάρχει δυσφορία ως προς της περιβαλλοντικές συνθήκες, ο εργαζόμενος δεν μπορεί να νιώσει άνετα και συνεπώς η αποτελεσματικότητα και η παραγωγικότητα επηρεάζονται αρνητικά. Κοιτώντας λοιπόν μακροσκοπικά αυτό το φαινόμενο οι επιπτώσεις έχουν αντίκτυπο και στην γενικότερη επίδοση μια εταιρίας όπου απαρτίζεται από αρκετούς εργαζομένους. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη στην Μεγάλη Βρετανία η δημιουργία ενός εσωτερικού περιβάλλοντος το οποίο ικανοποιεί τους εργαζόμενους, δηλαδή η επίτευξη της Θερμικής Άνεσης, μπορεί να εξοικονομήσει έως και 153 δισεκατομμύρια λίρες τον χρόνο [10].

Επίσης, σε άλλη έρευνα αναφέρεται ότι, ρυθμίζοντας κατάλληλα και σε μικρό βαθμό την θερμοκρασία του αέρα σε έναν χώρο, η αποτελεσματικότητα ενός εργαζομένου σε τυπικές δραστηριότητες όπως η πληκτρολόγηση, η ταχύτητα υπολογισμών ή και η ανάγνωση μπορεί να αυξηθεί από 2 έως 20% [11]. Ακόμα μία συσχέτιση της θερμικής άνεσης και της παραγωγικότητας η οποία έχει προκύψει από εργαστηριακά δεδομένα παρουσιάζει ότι για μία δυσανασχέτηση της τάξης του 10% η παραγωγικότητα μειώνεται κατά 1% [12].

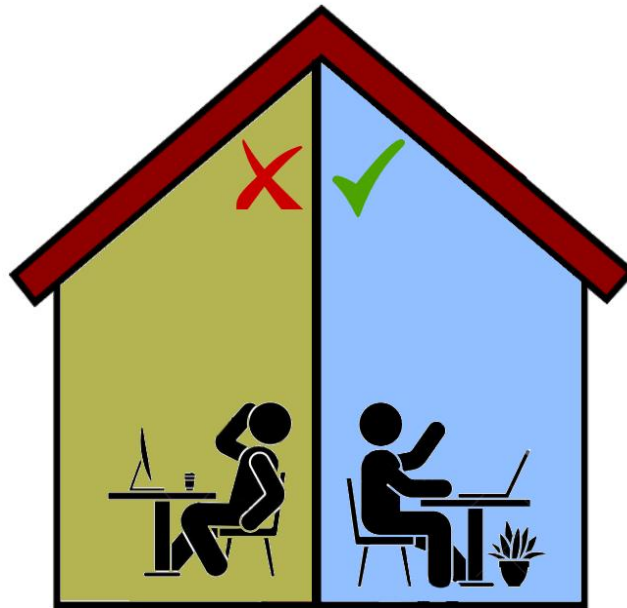
Φαίνεται λοιπόν πόσο σημαντικό ρόλο μπορεί να έχει στην συνολική παραγωγικότητα και αποτελεσματικότητα του εργαζομένου η επίτευξη της θερμικής άνεσης στον εσωτερικό χώρο.

2.2 Θερμική Άνεση και Υγεία

Η δυσφορία που προκαλείται λόγω έλλειψης της θερμικής άνεσης, εκτός από την παραγωγικότητα και την αποτελεσματικότητα του εργαζομένου, όπου παρουσιάστηκαν παραπάνω, μπορεί να έχει άμεσο αντίκτυπο και στην υγεία του. Συχνά σε εργασιακούς χώρους και γραφεία συνήθως σε μεγάλες πόλεις παρατηρείται το φαινόμενο Sick Building Syndrome (SBS). Με τον όρο αυτόν περιγράφεται η κατάσταση στην οποία οι εργαζόμενοι, σε έναν χώρο όπου επικρατούν κακές περιβαλλοντικές συνθήκες, αποκτούν προβλήματα υγείας. Οι συνθήκες που προκαλούν αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι θερμοκρασία και υγρασία, υψηλότερες ή χαμηλότερες από τα όρια της άνεσης αλλά και κακή ποιότητα αέρα, υψηλή συγκέντρωση CO₂ και σωματιδίων κλπ. Τα συμπτώματα του συνδρόμου SBS μπορεί να είναι πολλά και διαφορετικής φύσεως. Συγκεκριμένα υπάρχει ενόχληση στα μάτια, στην μύτη, στον λαιμό, βήχας, ψυχολογική και σωματική κόπωση, πονοκέφαλος, ναυτία, ερεθισμός του δέρματος [12].

Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και έλαβαν μέρος συνολικά 100 γραφεία, ποσοστό 23% των εργαζομένων, και σε απόλυτο νούμερο 64 εκατομμύρια άτομα, συχνά παρουσιάζουν 2 ή και περισσότερα συμπτώματα του συνδρόμου Sick Building Syndrome (SBS). Μια εκτίμηση που έχει γίνει δηλώνει ότι η μείωση της παραγωγικότητας λόγω των προβλημάτων υγείας που δημιουργούνται από το SBS είναι της τάξεων των 60 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως ενώ μείωση των συμπτωμάτων

αυτών κατά 20% - 50% μπορεί να έχει οικονομικά οφέλη 10-30 δισεκατομμυρίων δολαρίων [11].



Εικόνα 4. Η θερμική άνεση του εσωτερικού περιβάλλοντος μπορεί να καθορίσει την αποδοτικότητα της εργασίας

3. Βασικοί Δείκτες υπολογισμού και αξιολόγησης Θερμικής Άνεσης

Για να καταφέρει ένας μηχανικός να αξιολογήσει και να προβλέψει εάν ο χώρος τον οποίο σχεδιάζει δύναται να ικανοποιεί θερμικά μια ομάδα ανθρώπων, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι δείκτες και μοντέλα ως εργαλεία. Βάζοντας στις κατάλληλες εξισώσεις τα δεδομένα και τις παραμέτρους που περιγράφηκαν παραπάνω είναι δυνατόν να προβλεφθεί η Θερμική άνεση των ατόμων στον εκάστοτε χώρο. Είναι προφανές ότι επειδή μιλάμε για ένα φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες είναι δύσκολο να συνδυαστούν όλοι μαζί και να σχεδιαστεί σε απόλυτο βαθμό ένας χώρος στον οποίο θα επιτυγχάνεται αυτός ο σκοπός. Συνεπώς οι προσεγγίσεις αυτές πάντα εμπεριέχουν και μια αβεβαιότητα.

Ο ερευνητής Ρονι ole Fanger ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν εκτενώς με την μελέτη της θερμικής άνεσης και στα τέλη της δεκαετίας του '70, στο πανεπιστήμιο του Kansas, μέσω θεωρητικής, πειραματικής αλλά και στατιστικής ανάλυσης, καθιέρωσε κάποιους δείκτες οι οποίοι συνδυάζουν και τους περιβαλλοντικούς αλλά και τις ατομικούς παράγοντες που έχουν συμβολή στο φαινόμενο. Πρόκειται για τους δείκτες PMV (Predicted Mean Vote) και PPD (Predicted Percentage of People Dissatisfied) [13]. Το μοντέλο του βασίζεται σε ενεργειακή ανάλυση που λαμβάνει υπόψη όλες τις απώλειες θερμότητας του ανθρώπινου σώματος, από όλα τα φαινόμενα που τις αποτελούν, όπως την συναγωγή και ακτινοβολία από την επιφάνεια του δέρματος, τον ρουχισμό, την θερμότητα από εξάτμιση του ιδρώτα, την διάχυση των υδρατμών στο δέρμα αλλά και τις απώλειες θερμότητας λόγω αναπνοής [14]. Οι δείκτες PMV/PPD είναι οι πιο διαδεδομένοι και ευρέως χρησιμοποιημένοι για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη της θερμικής άνεσης ενός χώρου.

Επεκτείνοντας το μοντέλο του Fanger αναπτύχθηκε και το μοντέλο 2 κόμβων του Pierce στο πανεπιστήμιο του Yale, γνωστό ως Pierce Two-Node Model. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει το ανθρώπινο σώμα ως δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Ο εσωτερικός αντικατοπτρίζει την εσωτερική θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος ενώ ο εξωτερικός την θερμοκρασία του δέρματος [14]. Σε αντίθεση με το μοντέλο του Fanger το οποίο χρησιμοποιείται για να προβλεφθεί η θερμική άνεση σε σταθερές συνθήκες, το μοντέλο Pierce

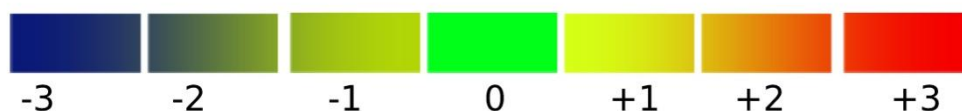
βοηθάει στην πρόβλεψη των αντιδράσεων όταν οι συνθήκες αυτές μεταβληθούν [3].

Επιπλέον ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί, είναι το KSU Two-Node Model από το Kansas State University. Η μόνη διαφοροποίηση του από το μοντέλο Pierce Two-Node έγκειται στο γεγονός ότι το KSU έχει άλλον τρόπο υπολογισμού της θερμικής άνεσης σε ψυχρό περιβάλλον και άλλον σε θερμό περιβάλλον. Σε ένα ψυχρό περιβάλλον ο υπολογισμός γίνεται με βάση την αλλαγή στην θερμική αγωγιμότητα μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου (όπως προαναφέρθηκε στο Pierce Two-Node), ενώ στο θερμό περιβάλλον βασίζεται στην υγρασία του δέρματος [14].

3.1 Δείκτης PMV (Predicted Mean Vote) – Προβλεπόμενης Μέσης Ψήφου

Ο δείκτης PMV είναι μια πρόβλεψη-εκτίμηση της θερμικής αίσθησης για ένα γκρουπ ατόμων που πρόκειται να βρεθούν στον χώρο για τον οποίο γίνεται η μελέτη. Ο δείκτης PMV παίρνει μία αδιάστατη τιμή στο εύρος -3 έως +3 η οποία αντιστοιχεί σε μία κλίμακα θερμικής άνεσης από έντονη ζέστη έως έντονο κρύο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 5).

Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν και σε ένα αίσθημα άνεσης. Συγκεκριμένα έχουμε:



Εικόνα 5. Κλίμακα τιμών PMV

Τιμή	Αίσθηση
+3	Πολύ Έντονη ζέστη
+2	Ζέστη
+1	Όριο άνεσης-δυσφορίας με αίσθημα ζέστης
0	Ικανοποιητική άνεση
-1	Όριο άνεσης-δυσφορίας με αίσθημα κρύου
-2	Κρύο
-3	Πολύ έντονο κρύο

Πίνακας 5. Συσχέτιση τιμών PMV και άνεσης.

Η εξίσωση στην οποία γίνεται η εφαρμογή για τον υπολογισμό, συνδυάζει ποσοτικά τις εξής παραμέτρους:

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| a) δραστηριότητα | d) ταχύτητα αέρα |
| b) ένδυση | e) ακτινοβολούμενη θερμοκρασία |
| c) θερμοκρασία αέρα | f) σχετική υγρασία |

Ο τύπος της εξίσωσης όπως αναφέρεται στο πρότυπο θερμικής άνεσης ISO 7730 φαίνεται παρακάτω [15]:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot M} + 0.028) \cdot [(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot \\
 & [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot \\
 & 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M(34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \\
 & [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)]
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Όπου:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot [3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)] \quad (3.2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \rightarrow h_c = 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} \\ 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \rightarrow h_c = 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} & \rightarrow 1.0 + 1.29 \cdot I_{cl} \\ I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} & \rightarrow 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} \end{cases} \quad (3.4)$$

Για τον κάθε δείκτη έχουμε ότι:

- $M = \text{Μεταβολικός ρυθμός} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$
- $W = \text{Ωφέλιμο μηχανικό έργο} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$
- $I_{cl} = \text{θερμική αντίσταση από ρουχισμό} \left[\text{m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$
- $f_{cl} = \text{Συντελεστής επιφάνειας ρουχισμού}$
- $\bar{t}_r = \text{Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία} [^{\circ}\text{C}]$
- $t_a = \text{Θερμοκρασία αέρα} [^{\circ}\text{C}]$
- $v_{ar} = \text{Σχετική ταχύτητα αέρα} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
- $p_a = \text{Μερική Πίεση κορεσμένου ατμού} [Pa]$
- $h_c = \text{Συντελεστής συναγωγής} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
- $t_{cl} = \text{Θερμοκρασία στην επιφάνεια του ρουχισμού} [^{\circ}\text{C}]$

Σημείωση: Για την επίλυση των εξισώσεων h_c και t_{cl} , ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία.

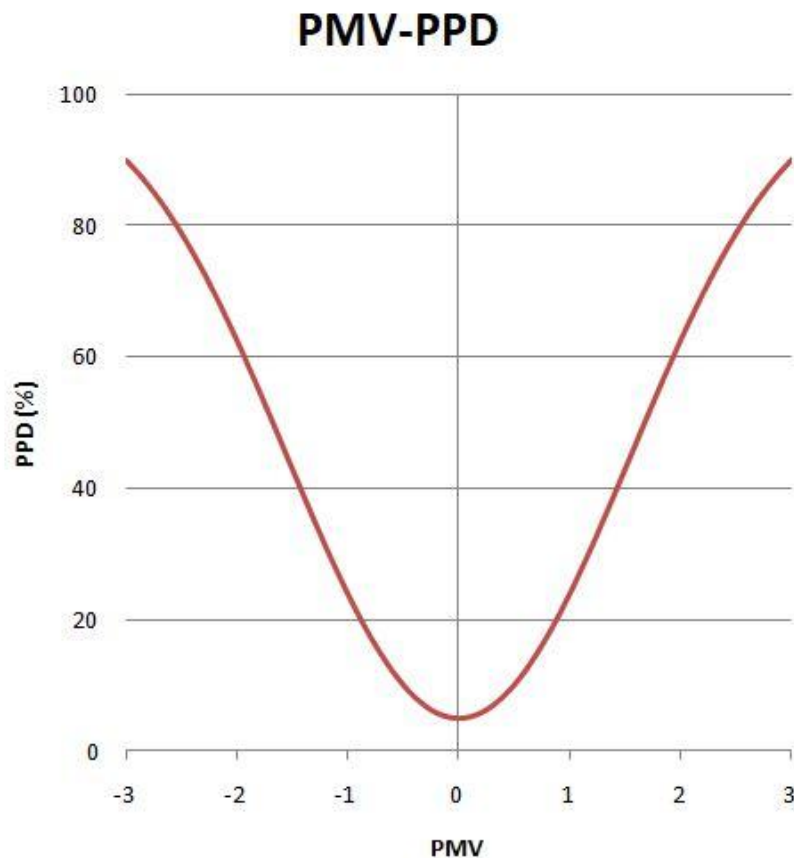
Εισάγοντας λοιπόν όλες τις παραμέτρους στην αρχική εξίσωση παίρνουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρουν για τον δείκτη PMV.

3.2 Δείκτης PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied Vote) – Προβλεπόμενο ποσοστό Δυσανεστημένων

Συγκεκριμένα ο δείκτης PPD προβλέπει το ποσοστό των ατόμων που είναι πιθανόν να εκφράσουν δυσαρέσκεια όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στον χώρο. Ο δείκτης PPD είναι εύκολο να υπολογιστεί έχοντας υπολογίσει προηγουμένων τις τιμές για τον δείκτη PMV αφού συνδέονται με την παρακάτω σχέση[16]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.003353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (3.5)$$

Η σημασία του δείκτη PPD έγκειται στο γεγονός ότι μας ποσοτικοποιεί την πιθανή δυσαρέσκεια που εκφράζει ο PMV. Αυτή η συσχέτιση φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, την λεγόμενη καμπάνα θερμικής άνεσης.



Χαρακτηριστικό σε αυτό το διάγραμμα είναι ότι ακόμα και για την τιμή $PMV=0$ το ελάχιστο ποσοστό δυσαρεστημένων ισούται με $PPD = 5\%$. Δηλαδή και σε συνθήκες απόλυτης θερμικής άνεσης, το μοντέλο αυτό, υποδεικνύει ότι θα υπάρχει πάντα ένα ελάχιστο ποσοστό ατόμων που δεν θα είναι ικανοποιημένο, διότι όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η θερμική άνεση βασίζεται και σε παράγοντες που είναι αδύνατον να τους παραμετροποιήσει κάποιος σε μία εξίσωση (π.χ. ψυχολογικοί, κοινωνικοί κλπ).

4. Υπολογισμός και Βελτίωση Θερμικής Άνεσης με το λογισμικό DesignBuilder

Για την εφαρμογή της θεωρίας θερμικής άνεσης γίνεται χρήση του λογισμικού DesignBuilder. Εφαρμόζονται οι υπολογισμοί σε έναν χώρο γραφείου με τυπικά χαρακτηριστικά, τα οποία περιγράφονται παρακάτω. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είχε ως στόχο να παρατηρηθεί το πώς επηρεάζεται η θερμική άνεση των ατόμων εκτιμώντας τους δείκτες PMV και PPD καθώς και τις κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας στον χώρο, μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους στον χώρο, για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος.

4.1 Το λογισμικό-DesignBuilder



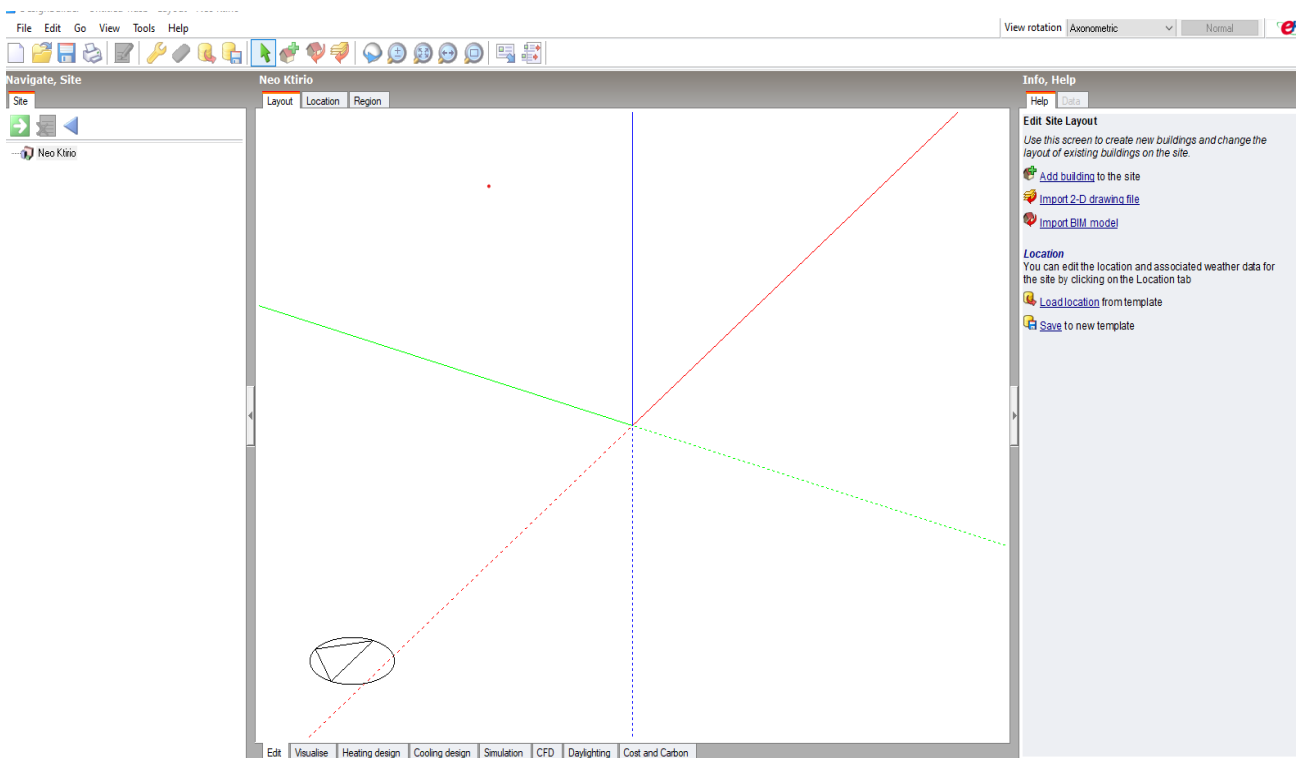
Εικόνα 6. DesignBuilder – Λογότυπο [16]

Το DesignBuilder είναι ένα λογισμικό σχεδίασης το οποίο απευθύνεται κυρίως σε μηχανικούς οι οποίοι ασχολούνται με την κατασκευή και μελέτη κτιρίων και χώρων. Προσφέρει ένα πολύ μεγάλο εύρος εργαλείων τα οποία όταν χειρίζονται κατάλληλα δίνουν στον μηχανικό την δυνατότητα προσομοιώσεων και ανάλυσης σε βάθος για όλα τα κομμάτια που αποτελούν τον σχεδιασμό ενός κτιρίου. Το περιβάλλον εργασίας του χρήστη (Εικόνα 8) είναι απόλυτα φιλικό προς τον αυτόν. Αξιοσημείωτη είναι και η πληρότητα των Οδηγών Βοήθειας που παρέχουν στον χρήστη πληροφορίες για την πλειοψηφία των ερωτημάτων του. Ένα σημαντικό κομμάτι που κάνει το DesignBuilder να ξεχωρίζει από παρόμοιας φύσης λογισμικά είναι ότι δίνει την δυνατότητα υπολογισμών και προσομοιώσεων σε πολύ μικρό χρονικό βήμα, μέχρι και μικρότερο της ώρας. Συνεπώς η υπολογισμοί μπορεί να είναι ακριβέστεροι και πιο κοντά στην πραγματικότητα. Επιπλέον προσφέρει την δυνατότητα σχεδίασης του υπό μελέτη κτιρίου μέσα στο ίδιο το πρόγραμμα και όχι απλά την εισαγωγή του έτοιμου 3D μοντέλου από άλλο σχεδιαστικό εργαλείο [16].

Το DesignBuilder σαν βάση για τους ενεργειακούς υπολογισμούς χρησιμοποιεί το λογισμικό EnergyPlus (Εικόνα 9). Ένα από τα πιο διαδεδομένα και πιστοποιημένα προγράμματα ενεργειακών υπολογισμών, όσον αφορά την μελέτη κτηρίων. Το αρνητικό αυτού το λογισμικού είναι ότι δεν διαθέτει περιβάλλον αρκετά φιλικό ως προς τον χρήστη.



Εικόνα 7. Λογότυπο του EnergyPlus [16]

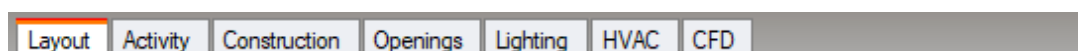


Εικόνα 8. Περιβάλλον Χρήστη στο DesignBuilder [16]

4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο DesignBuilder

Το λογισμικό DesignBuilder σε πρώτο επίπεδο διαθέτει στον χρήστη κάποιες βασικές καρτέλες για την εισαγωγή των δεδομένων που περιγράφουν το υπό μελέτη κτήριο (Εικόνα 9). Συγκεκριμένα αυτές είναι:

- **Activity:** Στην συγκεκριμένη καρτέλα γίνεται η εισαγωγή δεδομένων που αφορούν το προφίλ της δραστηριότητας που περιγράφει τον κάθε χώρο. Για παράδειγμα αν πρόκειται για χώρος γραφείου ή για αίθουσα διδασκαλίας ή για οτιδήποτε άλλο επιλέξουμε από την βιβλιοθήκη του DesignBuilder κλπ.
- **Construction:** Γίνεται εισαγωγή δεδομένων που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του χώρου, όπως είναι οι τοίχοι, τα δάπεδα, οι οροφές κλπ.
- **Openings:** Εισαγωγή δεδομένων για τα χαρακτηριστικά όλων των επιφανειών υαλοπινάκων, κουφωμάτων, πορτών κλπ.
- **Lighting:** Εισαγωγή δεδομένων για το είδος του φωτισμού στον χώρο.
- **HVAC:** Εισαγωγή δεδομένων για το είδος των συστημάτων HVAC στον χώρο.
- **CFD:** Εισαγωγή δεδομένων για τις οριακές συνθήκες που έχουν να κάνουν με τις ροές αέρα από ανοίγματα, στόμια εξαερισμού κλπ.

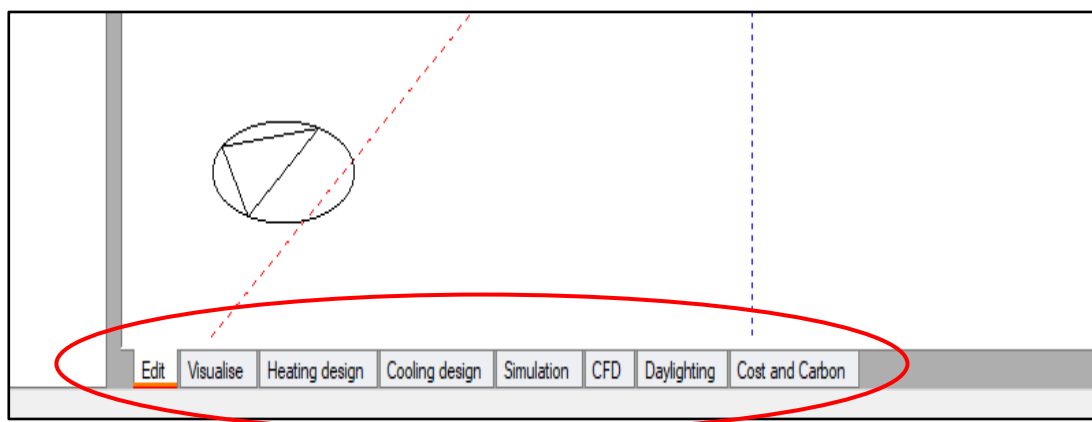


Εικόνα 9. Καρτέλες εισαγωγής δεδομένων μέσα στο DesignBuilder [16]

4.1.2 Simulation και Υπολογισμοί στο DesignBuilder

Σε δεύτερο επίπεδο όταν ο χρήστης έχει διαμορφώσει και σχεδιάσει το κτηριακό του μοντέλο στο λογισμικό του DesignBuilder, προσφέρονται οι εξής βασικές καρτέλες για υπολογισμούς και προσομοιώσεις:

- **Edit:** Πρόκειται για την βασική καρτέλα όπου ο χρήστης έχει οπτική του μοντέλου και μπορεί να σχεδιάζει και να πειράζει οποιαδήποτε παράμετρο.
- **Visualize:** Σε αυτή την καρτέλα απεικονίζεται το κτιριακό μοντέλο σε μια πιο ρεαλιστική μορφή, δίνοντας στον χρήστη μια καλύτερη οπτική.
- **Heating Design:** Γίνεται ο υπολογισμός σε μόνιμη κατάσταση για το απαιτούμενο φορτίο για θέρμανση, για την σωστή διαστασιολόγηση των συστημάτων HVAC.
- **Cooling Design:** Γίνεται ο υπολογισμός σε μόνιμη κατάσταση για το απαιτούμενο φορτίο για κλιματισμό, για την διαστασιολόγηση των συστημάτων HVAC.
- **Simulation:** Μία πολύ σημαντική καρτέλα αφού δίνει την δυνατότητα ενεργειακών προσομοιώσεων σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα μικρότερα και της ώρας. Βάση αυτών των προσομοιώσεων παρέχονται στον χρήστη αναλυτικά δεδομένα για την χρονική στιγμή που τον ενδιαφέρει καθώς και συνοριακές συνθήκες αναφορικά με τις θερμοκρασίες.
- **CFD:** Στην καρτέλα αυτή δύναται να διενεργηθούν προσομοιώσεις για την ροή του αέρα και στο εσωτερικό του κτιρίου αλλά και στο εξωτερικό. Λαμβάνονται υπόψη οι συνοριακές συνθήκες από την χρήση του παραπάνω εργαλείου Simulation.
- **Daylighting:** Υπολογισμοί για πληροφορίες σχετικά με τον φυσικό φωτισμό στο κτήριο.
- **Cost and Carbon:** Δίνονται πληροφορίες για το πιθανό κόστος του κτιριακού μοντέλου καθώς και για το πιθανό αποτύπωμα σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, CO₂.



Εικόνα 10. Βασικές καρτέλες υπολογισμών και προσομοιώσεων [16]

4.1.3 CFD Simulation στο DesignBuilder

Όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση κυρίως του εργαλείου CFD Simulation που προσφέρει το λογισμικό DesignBuilder. Με τον όρο CFD (Computational Fluid Dynamics) ή Υπολογιστική Ρευστομηχανική στα ελληνικά, περιγράφεται η επιστήμη όπου γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων για τον υπολογισμό και την ανάλυση ιδιοτήτων των ρευστών, όπως ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία σε ένα ορισμένο χωρίο.

Στις κτηριακές εφαρμογές όταν μιλάμε για ανάλυση CFD εννοούμε τον υπολογισμό των θερμοκρασιών, ταχύτητας αέρα και πιέσεων σε όλα τα σημεία του χώρου αυτού, για να αντλήσουμε πληροφορίες για την κατανομή των μεγεθών στον χώρο με τελικό σκοπό την ομοιομορφία και βελτίωση του εσωτερικού μικροκλίματος αλλά και της θερμικής άνεσης των ατόμων [17]. Η ανάλυση CFD σε έναν χώρο επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εγκατεστημένου συστήματος HVAC, από την μορφολογία του χώρου, από τα θερμικά κέρδη. Συνεπώς μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την αξιολόγηση και την βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων HVAC που εγκαθίστανται σε έναν χώρο και τελικά για την επίτευξη θερμικής άνεσης.

4.1.3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο υπολογισμών CFD

Η θεωρία που χρησιμοποιεί το λογισμικό DesignBuilder για την επίλυση των εξισώσεων CFD, βασίζεται στην επίλυση ενός σετ εξισώσεων που αφορά τις τρεις αρχές της ρευστομηχανικής α) την διατήρηση Μάζας β) την διατήρηση Ορμής και γ) την διατήρηση Ενέργειας. Αυτό το σετ εξισώσεων αποτελείται από τις εξισώσεις Navier-Stokes, από την εξίσωση ενέργειας εφόσον ληφθεί υπόψη το μοντέλο K-e για την τυρβώδη ροή και εξίσωση τυρβώδους κινητικής ενέργειας [17]. Οι εξισώσεις αυτές είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις, μη γραμμικές, και έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \varphi) + S \quad (4.1)$$

Όπου η μεταβλητή φ αναπαριστά την κάθε εξαρτημένη μεταβλητή όπως θερμοκρασία, την ταχύτητα, την μάζα ενώ για τους υπόλοιπους όρους έχουμε:

- $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi)$: όρος που αναπαριστά τον ρυθμό εναλλαγής της εκάστοτε μεταβλητής.
- $div(\rho u\varphi)$: όρος συναγωγής.
- $div(\Gamma grad \varphi)$: όρος διάχυσης.
- S : Όρος Πηγής.

Για την εξίσωση διατήρησης Ενέργειας καθώς και διατήρησης της ορμής και τυρβώδους κινητικής ενέργειας ροής, οι διαφορικές εξισώσεις που τις περιγράφουν είναι οι εξής [19]:

Εξίσωση ενέργειας

$$div(\rho u T) = div\left(\frac{k}{c_p} grad T\right) + \frac{S}{c_p} \quad (4.2)$$

Όπου:

- h : Ειδική ενθαλπία
- k : θερμική αγωγιμότητα
- T : θερμοκρασία
- c_p : ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- S : ογκομετρικός ρυθμός παραγωγής θερμότητας
- $Div(k grad T)$: όρος που περιγράφει την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής (Νόμος Fourier)

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + div(\rho u v) = div(\mu grad u) - \frac{\partial p}{\partial x} + B_x + V_x \quad (4.3)$$

Όπου:

- u : Ταχύτητα κατά τον άξονα x
- μ : δυναμικό ιξώδες
- p : Πίεση
- $B_x = \rho g_x$: Δύναμη λόγω βαρύτητας κατά x
- $\text{div}(\mu \text{grad} u)$
- $V_x = \mu \Delta u$

Εξίσωση Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho u k) = \text{div}(\Gamma_k \text{grad} k) + G - \rho \varepsilon \quad (4.4)$$

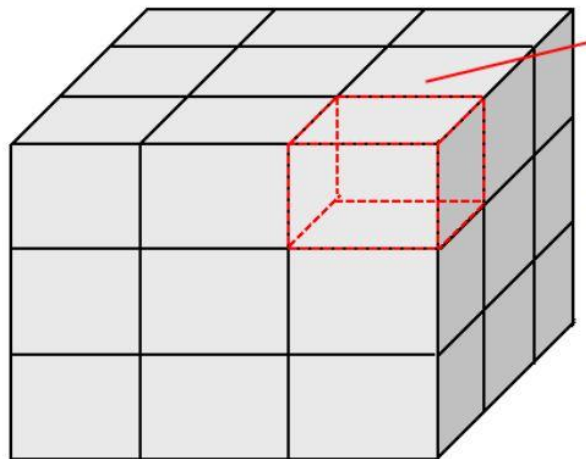
Όπου:

- k : Κινητική ενέργεια
- Γ_k : συντελεστής διάχυσης
- G : ο ρυθμός δημιουργίας τυρβώδους ενέργειας
- ε : κινηματικός ρυθμός διασποράς

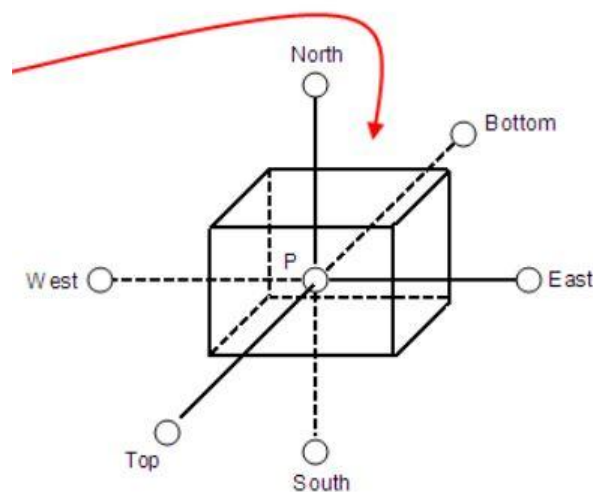
Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων

Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι πρώτα ο χωρισμός το σχεδιασμένου χώρου ή κτηρίου σε πεπερασμένα και διακριτά στοιχεία όγκου, οι λεγόμενοι «Όγκοι ελέγχου» (Εικόνα 11) [18]. Το σύνολο αυτών των στοιχείων συνθέτουν το «πλέγμα» (grid) του χωρίου αυτού.

Συγκεκριμένα κάθε στοιχείο όγκου περιέχει ένα κέντρο ή κόμβο, σημείο P, αλλά και 6 σημεία που αντιστοιχούν σε γειτονικούς όγκους ελέγχου (Εικόνα 12) [18]. Παίρνουν τις ονομασίες East, West, South, North, Top, Bottom λόγω της θέσης και του προσανατολισμού τους. Οι εξαρτημένες μεταβλητές που αναζητάμε κάθε φορά, δηλαδή ταχύτητα θερμοκρασία κλπ. υπολογίζονται για κάθε όγκο στο κέντρο του, σημείο P.



Εικόνα 11. Πλέγμα που αποτελείται από στοιχεία πεπερασμένου όγκου[17]



Εικόνα 12. Στοιχείο όγκου[17]

Επόμενο βήμα είναι η μετατροπή των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρική μορφή. Στην ουσία η καμπύλη που περιγράφει ένα μέγεθος μετατρέπεται σε ευθείες έτσι ώστε η επίλυση να γίνεται από έναν αλγόριθμο. Χρησιμοποιώντας ρητά σχήματα, είναι δυνατόν να λάβουμε απλές αλγεβρικές εξισώσεις κεντρικών διαφορών που μπορούν να επιλυθούν σχετικά εύκολα με έναν αλγόριθμο.

Ρητά σχήματα διακριτοποίησης

Το λογισμικό DesignBuilder προκειμένου να εκτελέσει ο χρήστης μία ανάλυση CFD δίνει την επιλογή τριών ρητών σχημάτων διακριτοποίησης. Αυτά είναι τα α)Upwind β) Hybrid και γ)Power-law.

- Σχήμα Upwind

Αυτό το σχήμα διακριτοποίησης βασίζεται στην υπόθεση ότι η εξαρτημένη μεταβλητή φ στην κοινή επιφάνεια των διπλανών όγκων είναι ίση με την μεταβλητή φ του όγκου αυτού στην πρόσω μεριά [17].

- Σχήμα Hybrid

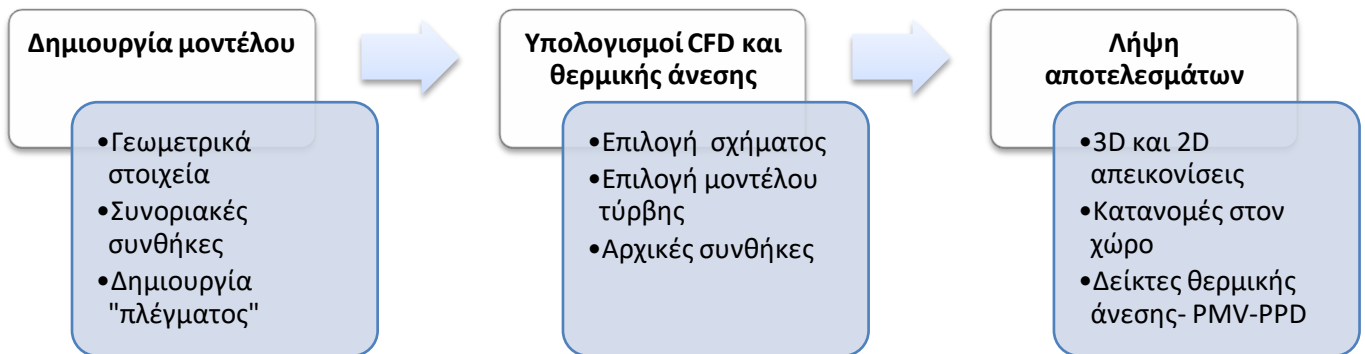
Το σχήμα Hybrid είναι ένας συνδυασμός κεντρικής διαφοράς και του σχήματος Upwind. Παρέχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την διάχυση σε υψηλούς αριθμούς Pe (Peclet), αλλά το υπολογιστικό κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του Upwind σχήματος [17].

- Σχήμα Power-law

Το σχήμα Power-law είναι ένα σχήμα διακριτοποίησης το οποίο είναι ακόμα πιο «ακριβό» όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ, αλλά παρέχει καλύτερα αποτελέσματα για την εκθετική συμπεριφορά, πράγμα που το καθιστά πιο ακριβές για τους υπολογισμούς [17].

4.1.3.2 Ροή εργασιών για CFD Προσομοίωση

Προκειμένου να διεξαχθεί λοιπόν μία ανάλυση CFD για κάποιον χώρο πρέπει να ακολουθείται κάθε φορά ένας συγκεκριμένος συλλογισμός και ροή εργασιών έτσι ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα. Ο συλλογισμός που ακολουθείται περιγράφεται συνοπτικά στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (Εικόνα 13).



Εικόνα 13. Ροή εργασιών για την ανάλυση CFD

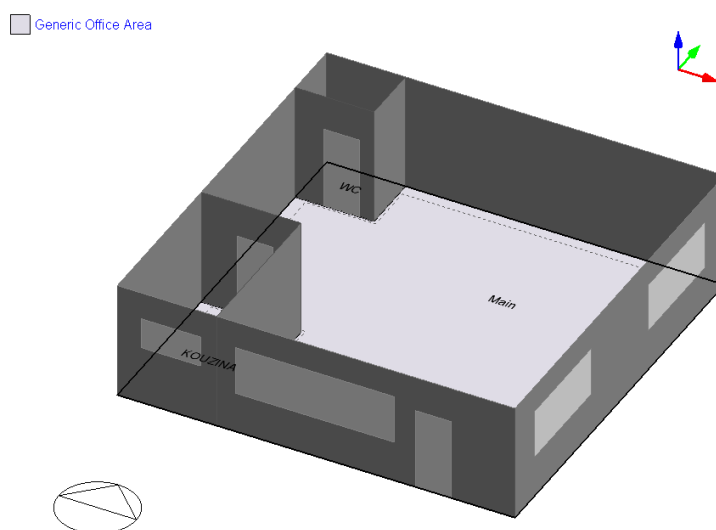
Αναλυτικά η αρχή των εργασιών είναι η σχεδίαση του ζητούμενου χώρου με ότι αυτό συνεπάγεται, όπως το είδος δραστηριότητας του χώρου, τα δομικά χαρακτηριστικά κλπ. Έπειτα σημαντική είναι η προσομοίωση που θα παράξει τα δεδομένα θερμοκρασιών για να εισαχθούν σαν συνοριακές συνθήκες στους υπολογισμούς CFD που θα ακολουθήσουν. Έπειτα επιλέγοντας κατάλληλο σχήμα διακριτοποίησης και μοντέλου τύρβης είμαστε σε θέση να εκκινήσουμε τους υπολογισμούς CFD. Τελικά στην διάθεση μας θα έχουμε απεικονίσεις για τις κατανομές θερμοκρασιών, ταχυτήτων καθώς και των δεικτών Θερμικής Άνεσης που μας ενδιαφέρουν.

4.2 Σχεδιασμός μοντέλου για εφαρμογή CFD προσομοίωσης

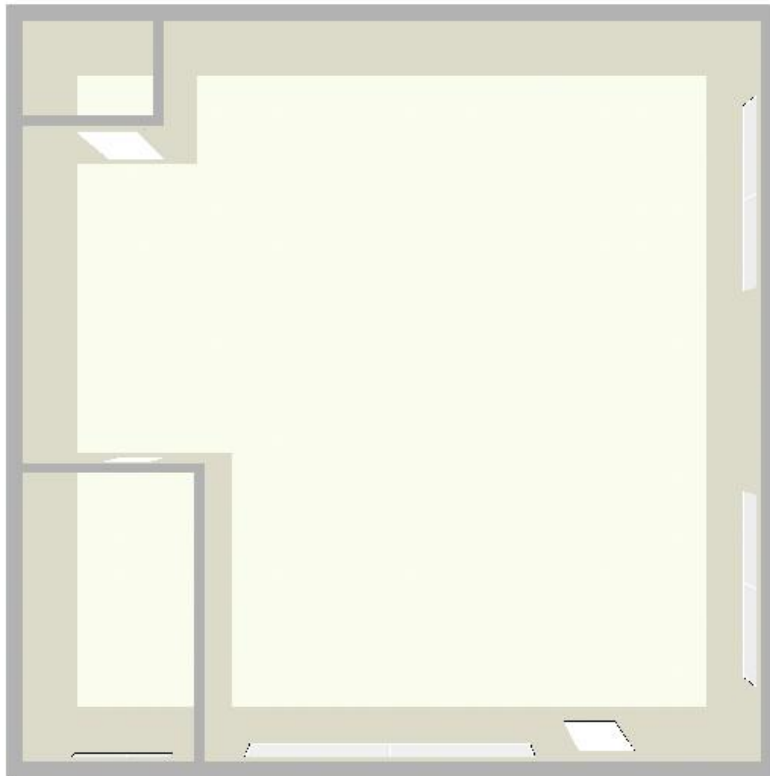
Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κομμάτι της παρούσας εργασίας, μία ανάλυση CFD με σκοπό την επίτευξη θερμικής άνεσης έχει κυρίως νόημα να εφαρμοστεί σε χώρους όπου είναι σημαντικό ο άνθρωπος να μπορεί να είναι παραγωγικός χωρίς επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κυρίως τέτοιοι χώροι είναι τα γραφεία. Συνεπώς επιλέχθηκε να σχεδιαστεί ένας χώρος τυπικού γραφείου στην Αττική, ώστε η εφαρμογή αυτή να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο σε ρεαλιστικές συνθήκες. Με τον όρο τυπικό χώρο γραφείου, εννοείται ένας χώρος ο οποίος αποτελείται από βασικά μέρη και κοινά υλικά κατασκευής χωρίς πολλές ιδιαιτερότητες. Συγκεκριμένα σχεδιάστηκε ένας χώρος με συνολικό εμβαδόν 100 m^2 , ο οποίος διαιρείται σε 3 μέρη τα οποία είναι, ο κύριος χώρος εργασίας, ένα κουζινάκι και ένα WC. Αναλυτικότερες πληροφορίες για το σχέδιο και την κατασκευή ακολουθούν παρακάτω.

4.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Γραφείου

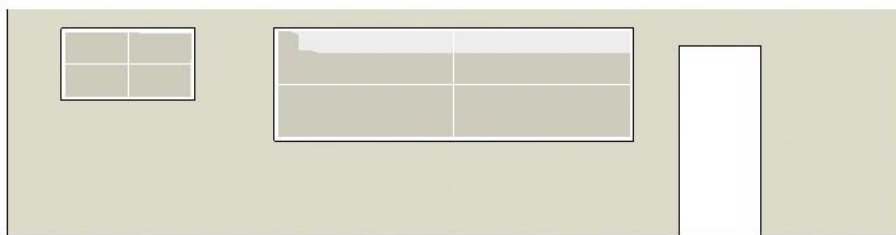
Στα παρακάτω σχέδια φαίνεται το πώς διαμορφώνεται ο χώρος του γραφείου (Εικόνα 14-19). Επίσης η τοποθεσία του είναι η περιοχή της Αττικής με γεωγραφικό πλάτος και μήκος 37.9° και 23.7° αντίστοιχα. Το ύψος όλων των χώρων είναι στα 3m .



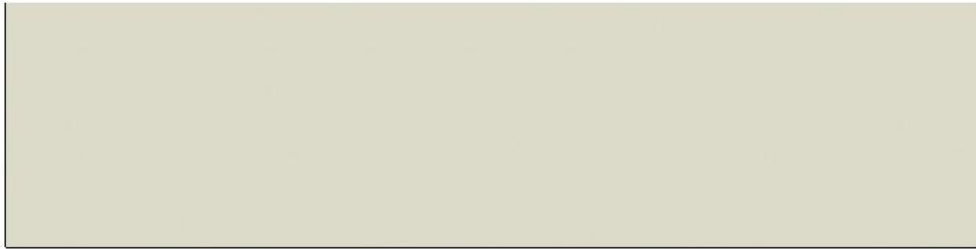
Εικόνα 14. Χώρος γραφείου σε αξονομετρική προβολή [16]



Εικόνα 15. Κάτοψη γραφείου [16]



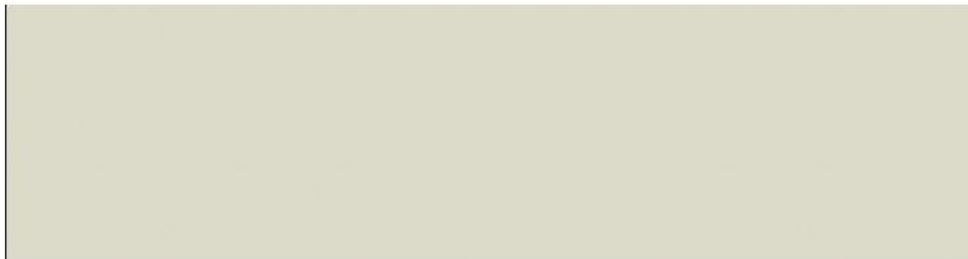
Εικόνα 16. Νότια πλευρά γραφείου [16]



Εικόνα 17. Δυτική πλευρά Γραφείου [16]



Εικόνα 18. Ανατολική πλευρά γραφείου [16]

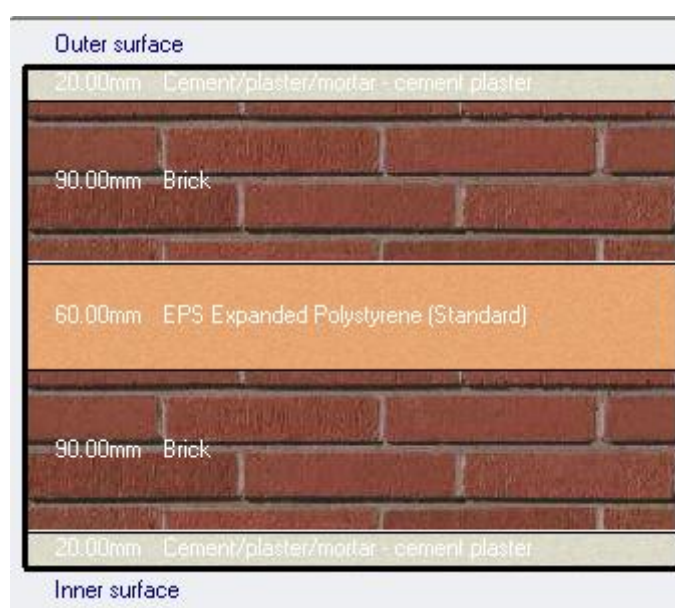


Εικόνα 19. Βόρεια πλευρά γραφείου [16]

4.2.2 Δομικά Υλικά Κατασκευής

Εξωτερική Τοιχοποιία

Για τους εξωτερικούς τοίχους του γραφείου επιλέχθηκε κατασκευή από 2 σειρές τούβλου πάχους 9 cm και στρώμα επιχρίσματος πάχους 2cm στο εξωτερικό και στο εσωτερικό. Για μόνωση επιλέγεται διογκωμένη πολυστερίνη ή EPS (Expanded Polystyrene), όπως και στην οροφή. Στην παρακάτω Εικόνα 20 φαίνονται τα στρώματα των υλικών σε μια εγκάρσια τομή.



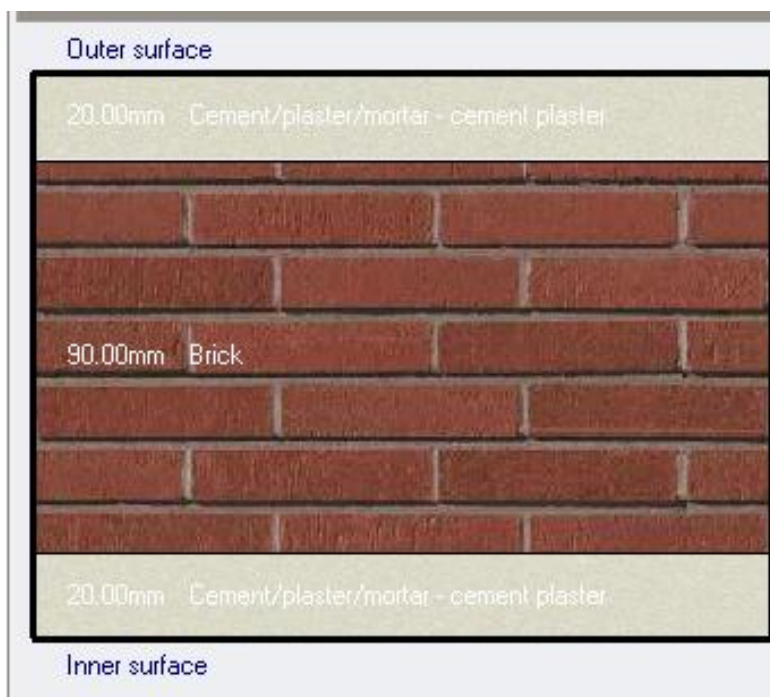
Εικόνα 20. Στρώσεις υλικών εξωτερικών τοίχων [16]

Υλικό	Πάχος (cm)	Πυκνότητα (kg/m ³)	λ (W/mK)	Cp(J/kgK)
Τούβλο	9	1920	0.72	840
Επίχρισμα	2	1760	0.72	840
EPS	6	15	0.04	0.04

Πίνακας 6. Ιδιότητες υλικών εξωτερικού τοίχου

Εσωτερική τοιχοποιία

Για τους εσωτερικούς τοίχους επιλέχθηκε τρόπος κατασκευής από μία στρώση τούβλου 9 cm και στρώσεις σοβά 2 cm και στις δύο πλευρές (Εικόνα 21)



Εικόνα 21. Στρώσεις υλικών εσωτερικών τοίχων [16]

Υλικό	Πάχος (cm)	Πυκνότητα (kg/m ³)	λ (W/mK)	Cp(J/kgK)
Τούβλο	9	1920	0.72	840
Επίχρισμα	2	1760	0.72	840

Πίνακας 7. Ιδιότητες υλικών εσωτερικού τοίχου

Δάπεδο

Για το δάπεδο επιλέχθηκε μία στρώση σκυροδέματος πάχους 15 cm και από πάνω κεραμικό πλακάκι πάχους 0.1 cm



Εικόνα 22. Layers Δαπέδου [16]

Υλικό	Πάχος (cm)	Πυκνότητα (kg/m ³)	λ (W/mK)	Cp (J/kgK)
Σκυρόδεμα	15	2000	1.13	1000
Πλακάκι	0.1	2500	1.4	840

Πίνακας 8. Ιδιότητες υλικών δαπέδου

Οροφή



Εικόνα 23. Layers οροφής [16]

Υλικό	Πάχος (cm)	Πυκνότητα (kg/m ³)	λ (W/mK)	Cp (J/kgK)
Σκυρόδεμα	9	1200	0.38	1000
Επίστρωση υλικών για ταράτσα	2	1000	0.3	1000
EPS	7	15	0.04	0.04

Πίνακας 9. Ιδιότητες υλικών ταράτσας

Υαλοπίνακες

Για τους υαλοπίνακες έχει επιλεγθεί τύπος διπλού γυαλιού πάχους 6mm με διάκενο αέρα 6mm. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα παρακάτω.

Ολική Ηλιακή ακτινοβολία (SHGC)	0.7
Άμεση Ηλιακή ακτινοβολία	0.604
Ακτινοβολία φωτός	0.781
U-Value (ISO 1092/EN673) [W/m²K]	3.157
U-Value) [W/m²K]	3.094

Πίνακας 10. Ιδιότητες υαλοπινάκων

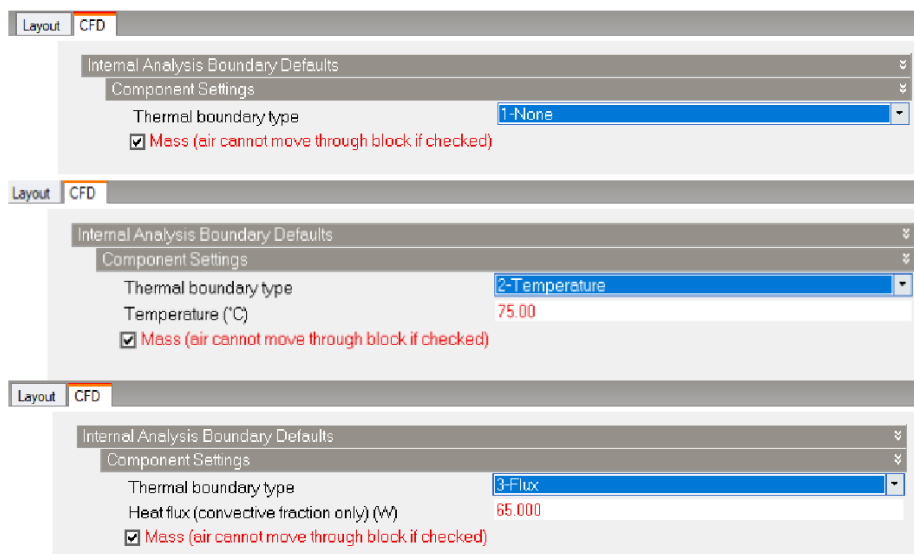
Οι διαστάσεις του κάθε υαλοπίνακα είναι φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Υαλοπίνακας	Εμβαδόν
Main	87 m ²
• Υαλοπίνακας N	5 m ²
• Υαλοπίνακας E1	3.4 m ²
• Υαλοπίνακας E2	3.4 m ²
Κουζίνα	10 m ²
• Υαλοπίνακας	1.2 m ²
WC	3 m ²

Πίνακας 11. Εμβαδά υαλοπινάκων

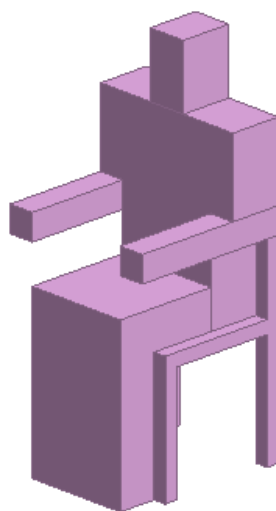
4.2.3 Μοντελοποίηση ανθρώπων και συσκευών

Το λογισμικό DesignBuilder δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει στον χώρο αντικείμενα (Assemblies) τα οποία μπορεί να αναπαριστούν είτε ανθρώπους είτε έπιπλα είτε και τερματικές μονάδες κλιματισμού ώστε σε μια προσομοίωση CFD να έχουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για το κάθε Assembly μέσα στον χώρο πρέπει να οριστεί και το θερμικό κέρδος που θα προσδίδει στον χώρο αυτόν. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες με τις οποίες μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ένα Assembly. Η πρώτη κατηγορία είναι να οριστεί σαν ένα αντικείμενο με σταθερή θερμοκρασία- Temperature. Η δεύτερη είναι να οριστεί σαν ένα αντικείμενο θερμικής πηγής- Heat Flux. Τέλος μπορεί να οριστεί σαν ένα αντικείμενο σκέτο που δεν συμμετέχει ενεργειακά στον χώρο- None.



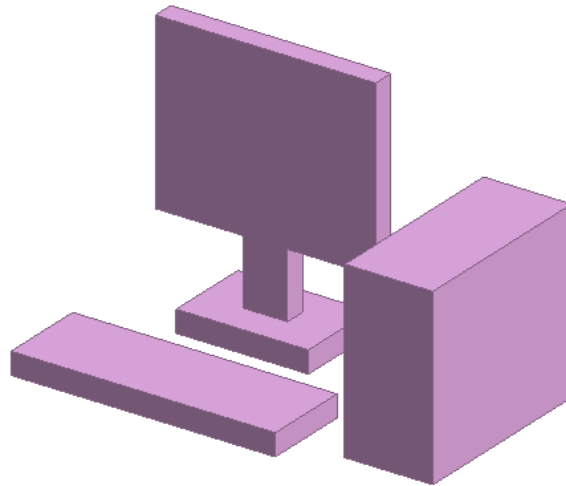
Εικόνα 24. Ορισμός θερμικών συνθηκών για τα Assemblies [16]

Τα άτομα στον χώρο αυτόν μοντελοποιούνται ως σταθερή πηγή θερμότητας. Πρόκειται για άτομα τα οποία κάνουν καθιστική εργασία σε υπολογιστή οπότε από πίνακα λαμβάνουμε μία τιμή ίση με 65W για καθιστική εργασία σε γραφείο [6]. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται οι τρισδιάστατη σχεδίαση στο DesignBuilder.



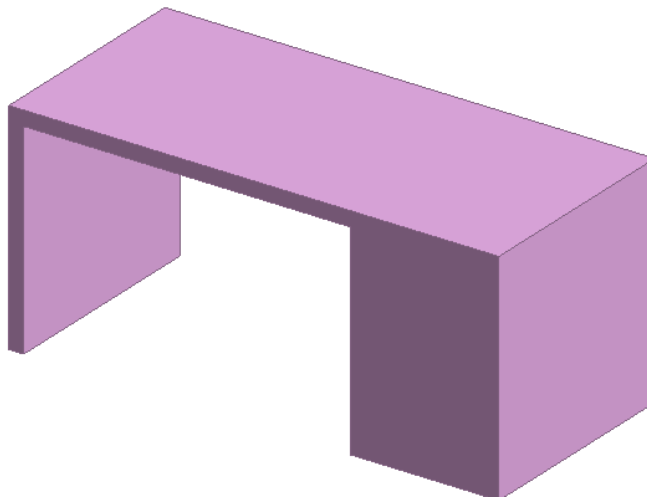
Εικόνα 25. Assembly καθήμενου ατόμου [16]

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και η οθόνη μοντελοποιούνται ως μία σταθερή πηγή θερμότητας 45 Watt.



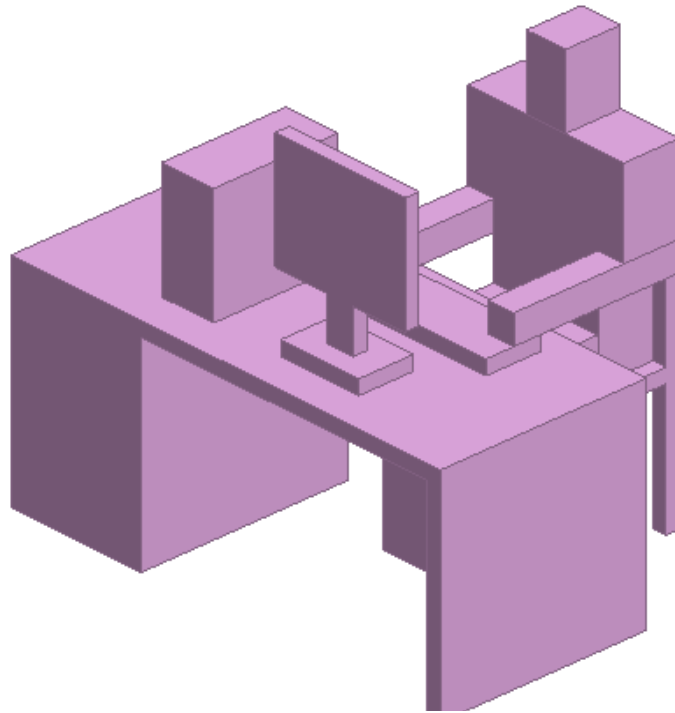
Εικόνα 26. Assembly ηλεκτρονικού υπολογιστή [16]

Τέλος τα γραφεία μοντελοποιούνται σαν αντικείμενα χωρίς καμία θερμική συνθήκη.



Εικόνα 27. Assembly γραφείου [16]

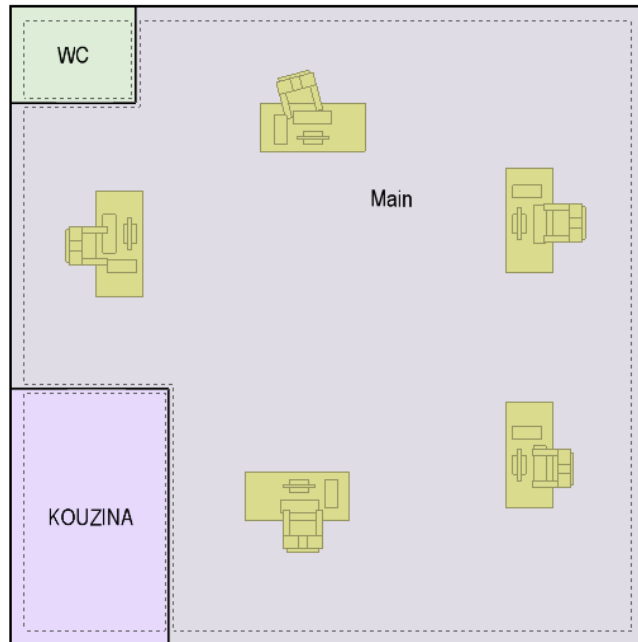
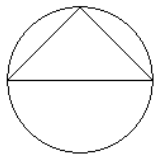
Έτσι καταλήγουμε σε ένα συνολικό Assembly για τον εργαζόμενο (Εικόνα 28), που θα τοποθετηθεί μέσα στον χώρο του γραφείου.



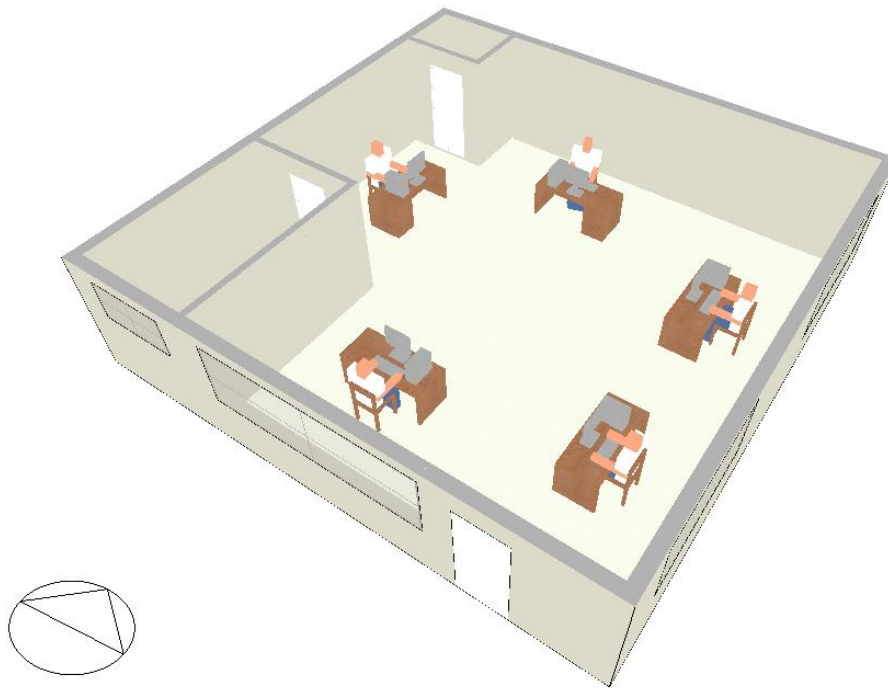
Εικόνα 28. Συνολικό Assembly εργαζόμενου-γραφείου [16]

Έχοντας στην διάθεση μας το συγκεκριμένο Assembly τοποθετούνται μέσα στον υπό μελέτη χώρο, συνολικά 5 εργαζόμενοι, ώστε να έχουμε μια αναπαράσταση ενός κανονικού γραφείου. Έτσι έχει δημιουργηθεί το βασικό μοντέλο για να μεταβούμε σε ανάλυση CFD και υπολογισμό θερμικής άνεσης.

- Eating/drinking area
- Generic Office Area
- Toilet



Εικόνα 29. Κάτοψη γραφείου με τοποθετημένους εργαζόμενους [16]



Εικόνα 30. Rendered απεικόνιση του χώρου [16]

4.2.4 Εφαρμογή Simulation για τον ορισμό οριακών συνθηκών

Όπως έχει αναφερθεί το εργαλείο CFD του DesignBuilder λαμβάνει χώρα σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή που θα ορίσουμε εμείς από τις συνοριακές συνθήκες. Πριν εκκινήσουμε λοιπόν την ανάλυση CFD, πρέπει πρώτα να γίνει μια ενεργειακή προσομοίωση για τον χώρο σε κάποιες ημέρες και ώρες για τις οποίες ζητούνται τα αποτελέσματα. Καθώς στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση για τον κλιματισμό, επιλέγεται προσομοίωση για την ημερομηνία **1 Αυγούστου** και ώρα **12:00**. Οι τιμές των θερμοκρασιών που προέκυψαν από το Simulation για την συγκεκριμένη μέρα φαίνονται στην εικόνα παρακάτω.

Zone /	Object /	Boundary	Boundary Type	Temperature (°C)	Air temperature (°C)
CFD Analysis domain					
Average zone air temperature (°C)				16-2 FCUs (15/100) (**n) (2)	25.89
External temperature (°C)					31.40
Group				3-Zones end surfaces	
Block 1 > Main					
Computer					
Ground floor - 87.010 m2 (Ground)					
Block 1 > Main	Ground floor - 87.010 m2 (Ground)	Ground floor - 87.010 m2 (Ground)	Surface	22.29	
Occupant (seated)					
Partition - 12.019 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)					
Block 1 > Main	Partition - 12.019 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)	Partition - 12.019 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)	Surface	25.20	
Partition - 4.505 m2 (Block 1, WC)					
Block 1 > Main	Partition - 4.505 m2 (Block 1, WC)	Partition - 4.505 m2 (Block 1, WC)	Surface	25.19	
Partition - 5.931 m2 (Block 1, WC)					
Block 1 > Main	Partition - 5.931 m2 (Block 1, WC)	Partition - 5.931 m2 (Block 1, WC)	Surface	25.19	
Block 1 > Main	Partition - 5.931 m2 (Block 1, WC)	Door (Internal) 1.936 m2	Door (within domain)	25.46	25.00
Partition - 7.504 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)					
Block 1 > Main	Partition - 7.504 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)	Door (Internal) 1.857 m2	Door (within domain)	25.40	25.00
Block 1 > Main	Partition - 7.504 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)	Partition - 7.504 m2 (Block 1, ΚΟΥΖΙΝΑ)	Surface	25.09	
Roof - 87.010 m2					
Block 1 > Main	Roof - 87.010 m2	Roof - 87.010 m2	Surface	25.70	
Wall - 13.477 m2 - 270.0°					
Block 1 > Main	Wall - 13.477 m2 - 270.0°	Wall - 13.477 m2 - 270.0°	Surface	25.56	
Wall - 22.496 m2 - 180.0°					
Block 1 > Main	Wall - 22.496 m2 - 180.0°	Window (External) 5.003 m2	Window	34.15	31.40
Block 1 > Main	Wall - 22.496 m2 - 180.0°	Door (External) 1.890 m2	Door	30.83	31.40
Block 1 > Main	Wall - 22.496 m2 - 180.0°	Wall - 22.496 m2 - 180.0°	Surface	25.35	
Wall - 24.069 m2 - 0.0°					
Block 1 > Main	Wall - 24.069 m2 - 0.0°	Wall - 24.069 m2 - 0.0°	Surface	25.38	
Wall - 30.000 m2 - 90.0°					
Block 1 > Main	Wall - 30.000 m2 - 90.0°	Window (External) 3.389 m2	Window	32.13	31.40
Block 1 > Main	Wall - 30.000 m2 - 90.0°	Wall - 30.000 m2 - 90.0°	Surface	25.43	
Block 1 > Main	Wall - 30.000 m2 - 90.0°	Window (External) 3.389 m2	Window	32.13	31.40

Εικόνα 31. Συνοριακές συνθήκες θερμοκρασιών στις 12:00 και 1^η Αυγούστου [16]

4.3 Σενάρια CFD προσομοιώσεων

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Παρακάτω ακολουθεί η εξής μεθοδολογία. Διακρίνουμε διάφορες περιπτώσεις οι οποίες έχουν να κάνουν με την θέση και το είδος της τερματικής μονάδας που τοποθετείται για τον κλιματισμό του χώρου. Αυτό που επιθυμούμε να παρατηρήσουμε είναι το πώς μεταβάλλονται κυρίως οι δείκτες θερμικής άνεσης αλλά και οι κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας στον χώρο αλλάζοντας απλά θέση και είδος τερματικής μονάδας.

Σε όλες τις περιπτώσεις που ελέγχουμε τα χαρακτηριστικά του αέρα τροφοδοσίας είναι ίδια και σταθερά. Συγκεκριμένα, θέτουμε θερμοκρασία 15 °C και παροχή 200 lt/s.

Για κάθε μια περίπτωση διενεργείται ανάλυση CFD στο πρόγραμμα του DesignBuilder και παρατίθενται τα αποτελέσματα μέσω εικόνων.

Σημείωση. Οι παρακάτω προσομοιώσεις αφορούν μόνο το κύριο μέρος του γραφείου και όχι τον χώρο κουζίνας και WC.

Περίπτωση 1^η

Στην πρώτη περίπτωση γίνεται μία προσομοίωση για τις 12:00 της 1^{ης} Αυγούστου χωρίς κανένα εγκατεστημένο σύστημα HVAC στον χώρο. Παρακάτω φαίνονται οι παράμετροι που ορίστηκαν για την ανάλυση CFD καθώς και το πώς συγκλίνει η λύση μετά από κάποιες επαναλήψεις. Συγκεκριμένα έχει επιλεγθεί το σχήμα διακριτοποίησης Urwind.

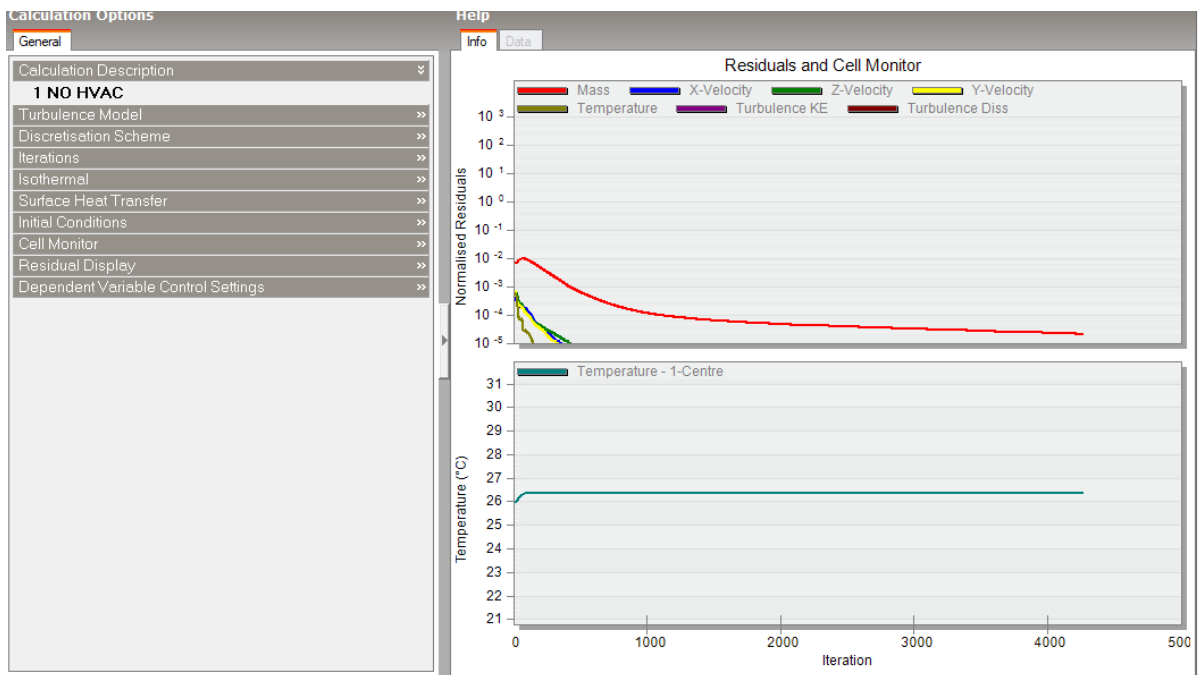
Γίνεται επίσης έλεγχος για το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί αυτόματα. Παρατηρούμε ότι το πλέγμα είναι ικανοποιητικό και οι υπολογιστική ισχύς του συστήματος επαρκεί (Εικόνα 31).

Analysis: **1 NO HVAC**
Domain: **OFFICE, Block 1**
Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	75
Number Y Cells	92
Number Z Cells	19
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	16.9
Available Memory (MB)	912.5
Check	OK

Εικόνα 32. Στατιστικά πλέγματος CFD-Περίπτωση 1^η [16]

Παρατηρούμε ότι μετά από περίπου 4200 επαναλήψεις όλες οι μεταβλητές έχουν συγκλίνει πλήρως πλην της μεταβλητή της μάζας. Καθώς όμως η τάξη της είναι πολύ μικρή, κάτω από 10^{-4} θεωρούμε ότι η γενική λύση έχει συγκλίνει [18].

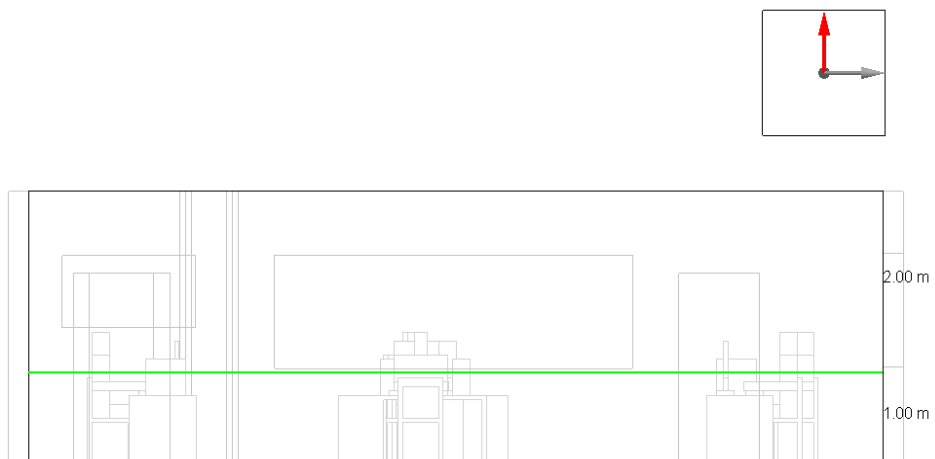


Εικόνα 33. Ανάλυση CFD- Περίπτωση 1^η [16]

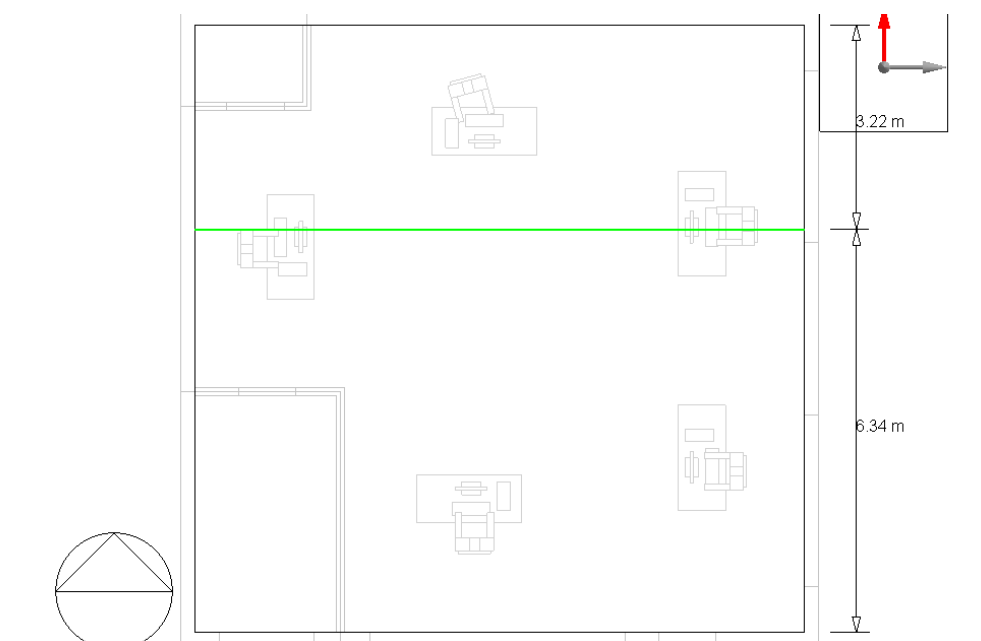
Παρακάτω ακολουθούν slices, δηλαδή «φέτες», κατά μήκος των τριών αξόνων x, y, z , σε συγκεκριμένες θέσεις, οι οποίες δείχνουν τις κατανομές θερμοκρασίας, ταχύτητας καθώς και των δεικτών θερμικής άνεσης PMV, PPD. Οι θέσεις αυτές θα μπορούσε να ήταν και διαφορετικές αλλά επιλέγονται έτσι ώστε να είναι κοντά σε εργαζόμενους για να βλέπουμε τα αποτελέσματα στις θέσεις αυτές. Οι θέσεις που έχουν ληφθεί τα slices ανάλογα τον άξονα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 34. Θέση slice κατά τον X άξονα [16]

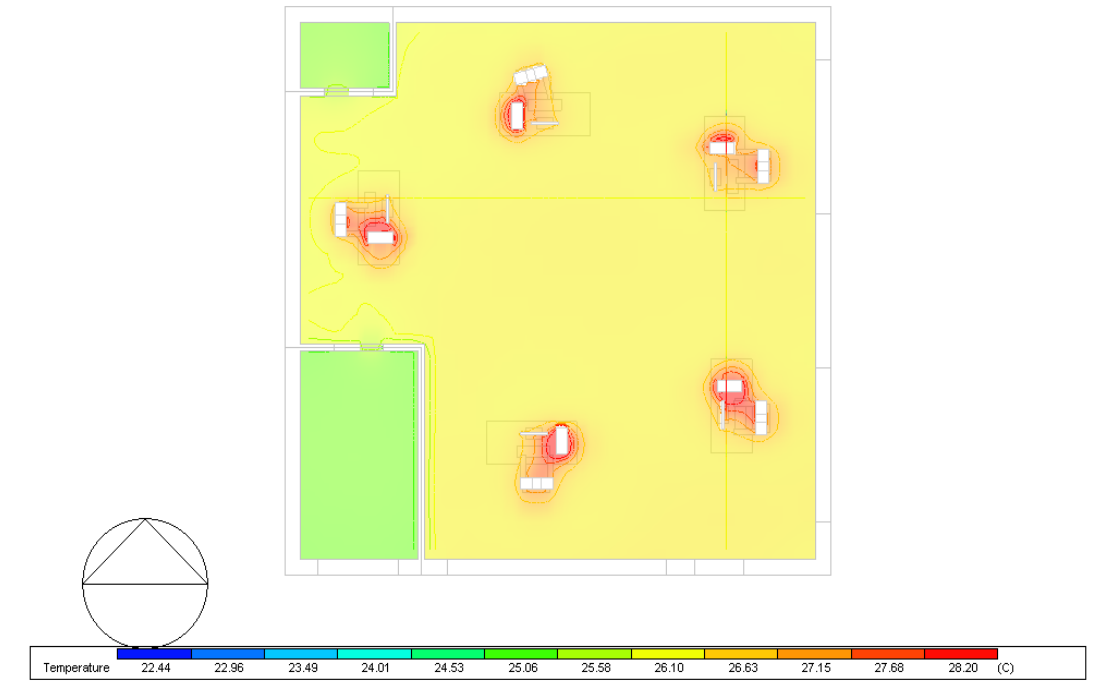


Εικόνα 35. Θέση slice κατά τον Z άξονα [16]

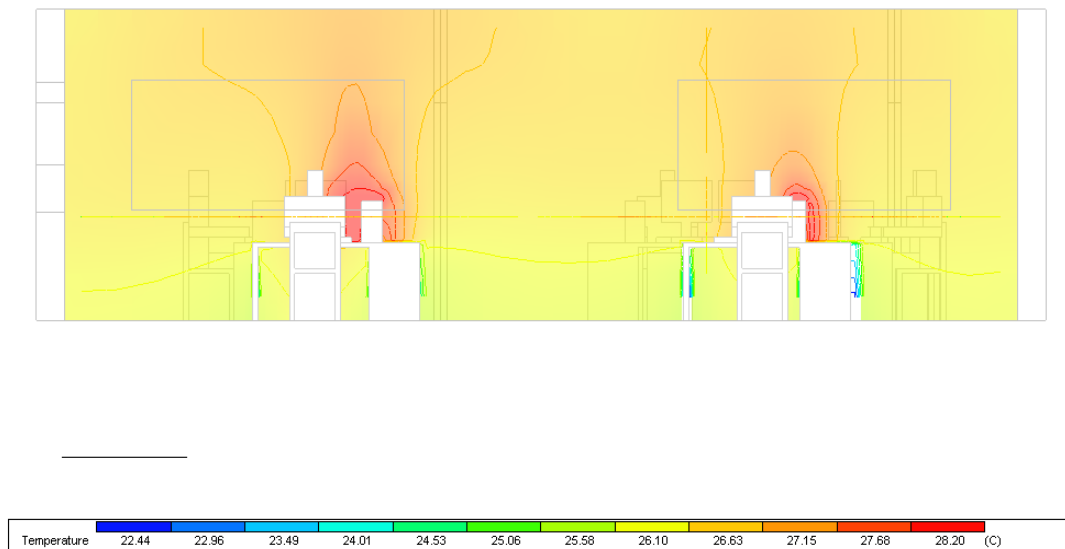


Εικόνα 36. Θέση slice κατά τον Y άξονα [16]

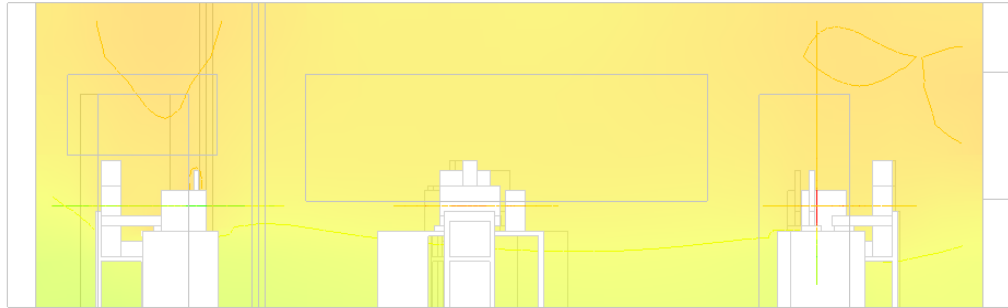
Θερμοκρασία



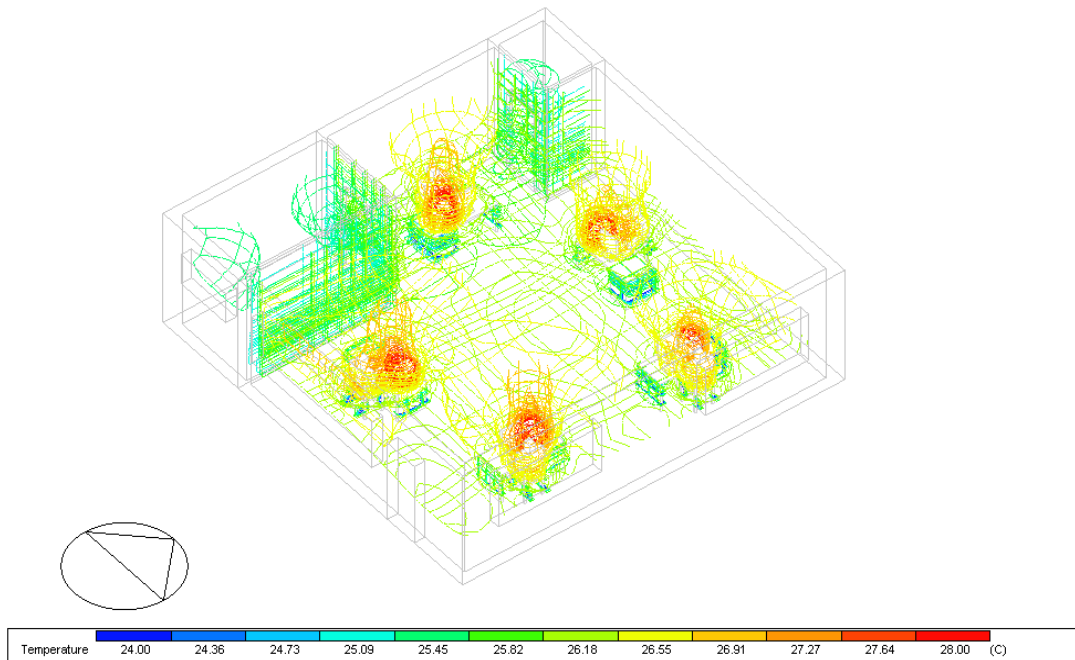
Εικόνα 37. Κάτοψη Θερμοκρασία-Περίπτωση 1^η [16]



Εικόνα 38. Δεξιά όψη- Θερμοκρασία-Περίπτωση 1^η [16]



Εικόνα 39. Εμπρός όψη- Περίπτωση 1^η [16]



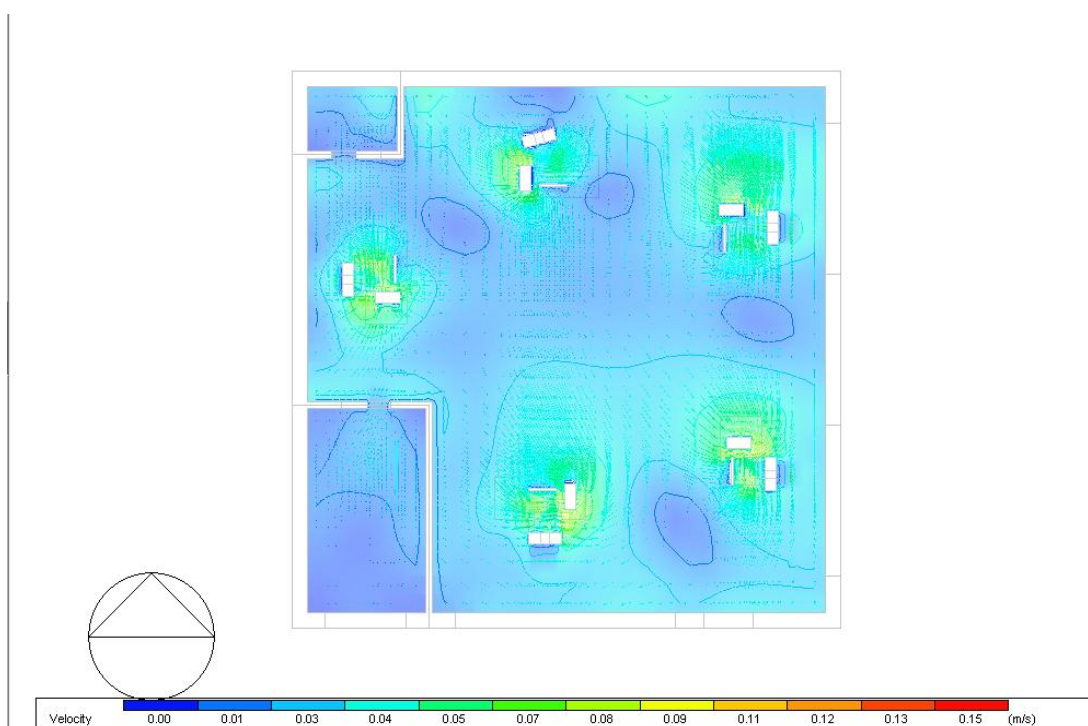
Εικόνα 40. Ισοψείς καμπύλες θερμοκρασίας- Περίπτωση 1^η [16]

Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες στον κυρίως χώρο στο επίπεδο αναφορά; (1 m από το έδαφος) κυμαίνονται από 26 έως 28 °C. Όπως ήταν αναμενόμενο η έλλειψη κλιματισμού στον χώρο δεν αντιμετωπίζει τα φορτία ώστε να ρυθμιστεί η θερμοκρασία.

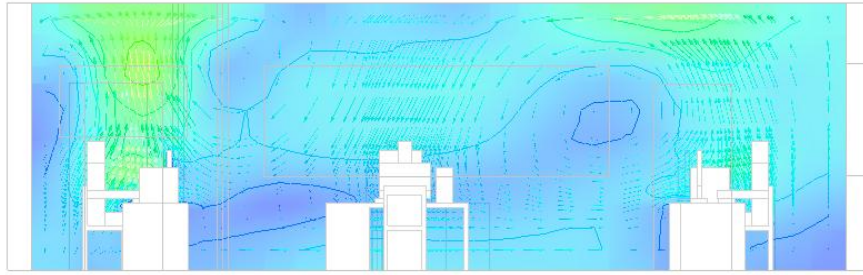
Επίσης παρατηρείται και η διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών καθ' ύψος στον χώρο. Δηλαδή στο χαμηλότερο μέρος του χώρου η θερμοκρασία να βρίσκεται κοντά στους 25 °C ενώ προς το ταβάνι όπως και κοντά στους υαλοπίνακες, τους 28°C.

Στην Εικόνα 40 φαίνονται και οι ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας και δίνουν καλύτερη εικόνα για την κατανομή της θερμοκρασίας στον χώρο.

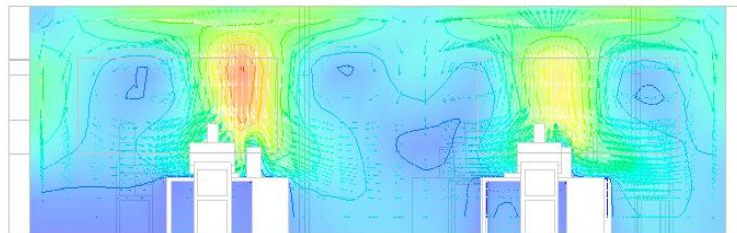
Ταχύτητα αέρα



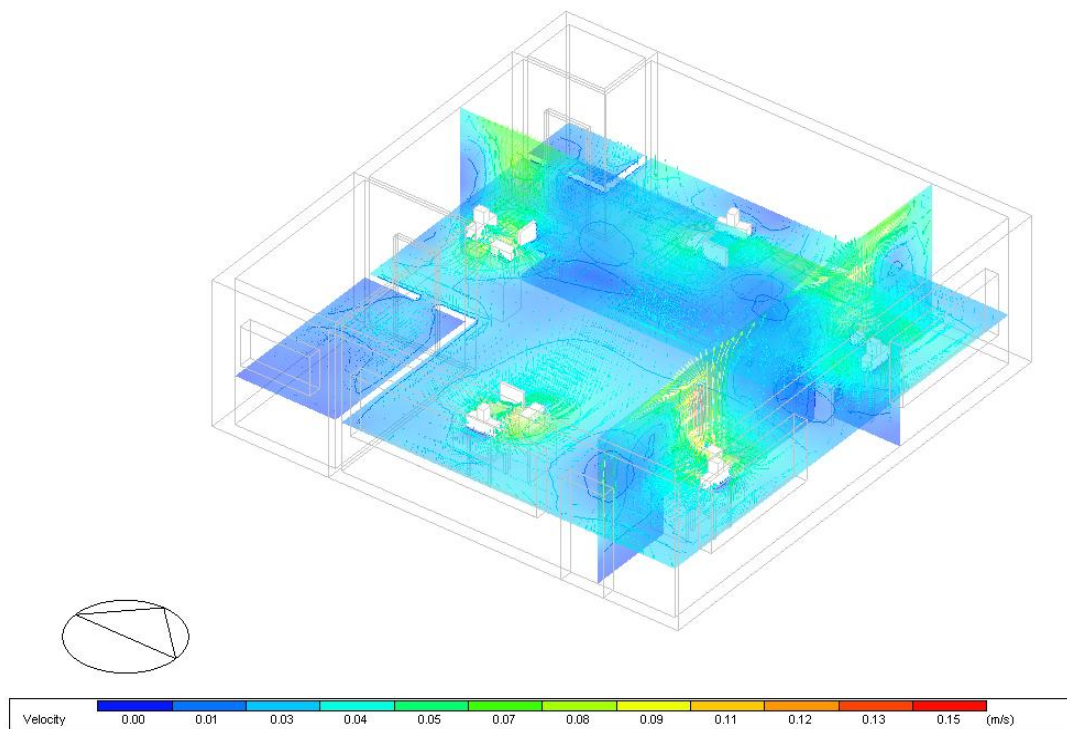
Εικόνα 41. Κάτοψη- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 1^η [16]



Εικόνα 42. Εμπρός όψη – Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 1^η [16]



Εικόνα 43. Δεξιά όψη- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 1^η [16]

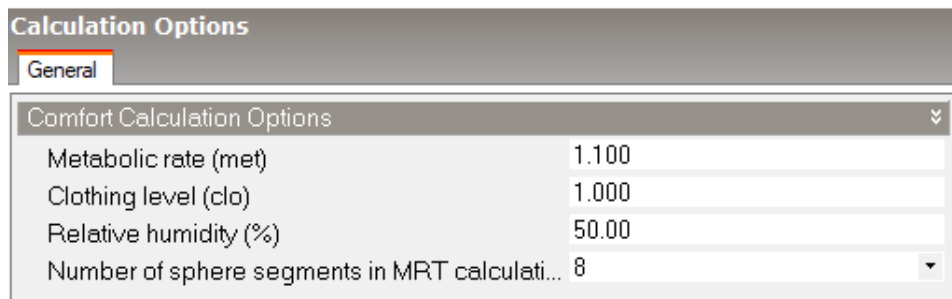


Εικόνα 44. Αξονομετρική προβολή- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 1^η [16]

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητες του αέρα που παρουσιάζονται είναι πάρα πολύ μικρές λόγω της έλλειψης συστήματος HVAC. Ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την ταχύτητα του αέρα μέσα στον χώρο είναι το φαινόμενο της φυσικής κίνησης που προκύπτει όταν ο θερμότερος αέρας πηγαίνει προς τα πάνω και ο ψυχρότερος μένει προς τα κάτω, λόγω διαφοράς της πυκνότητας. Οι τιμές της ταχύτητας στον χώρο είναι μικρότερες από 0.1 m/s.

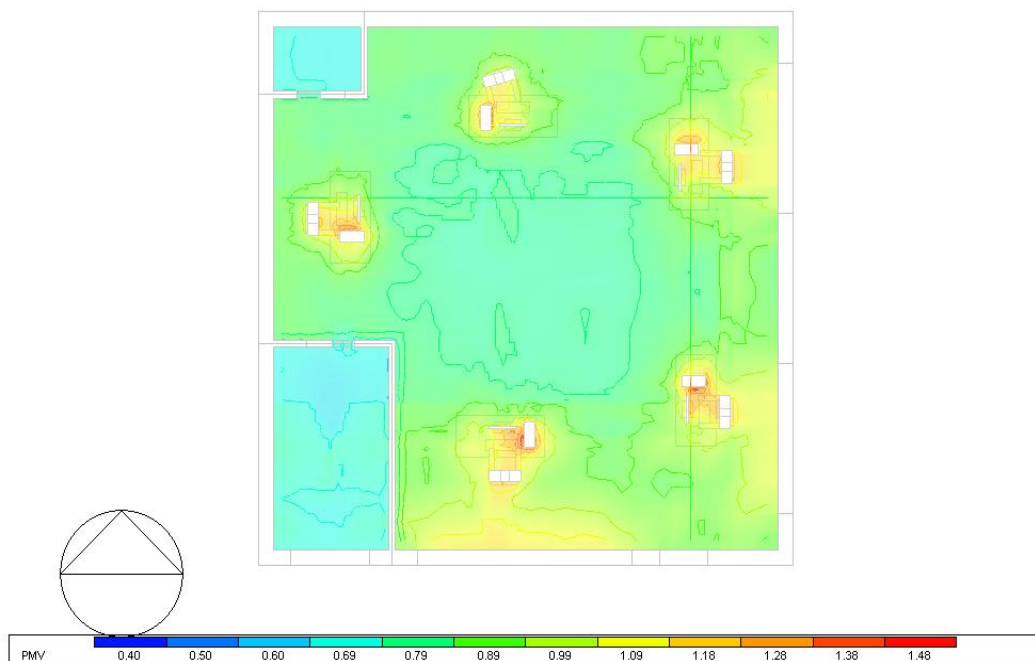
Δείκτης θερμικής άνεσης PMV-PPD

Οι δείκτες θερμικής άνεσης έχουν υπολογιστεί για συνθήκες υγρασίας 50%, για μεταβολικό ρυθμό ίσο με 1.1 Met που αντιστοιχεί σε πληκτρολόγηση σε γραφείο και για αντίσταση από ένδυση ίση με $I_{cl}=1.0$ clo που αντιστοιχεί σε μια τυπική ενδυμασία γραφείου.

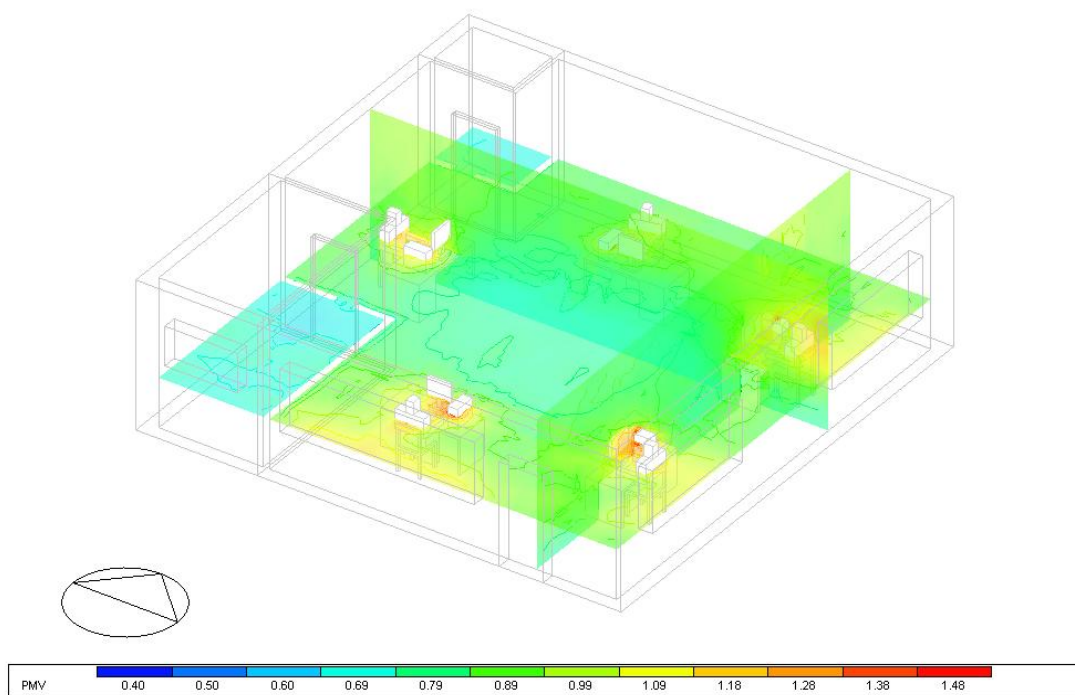


Εικόνα 45. Τιμές δραστηριότητας, ένδυσης και υγρασίας [16]

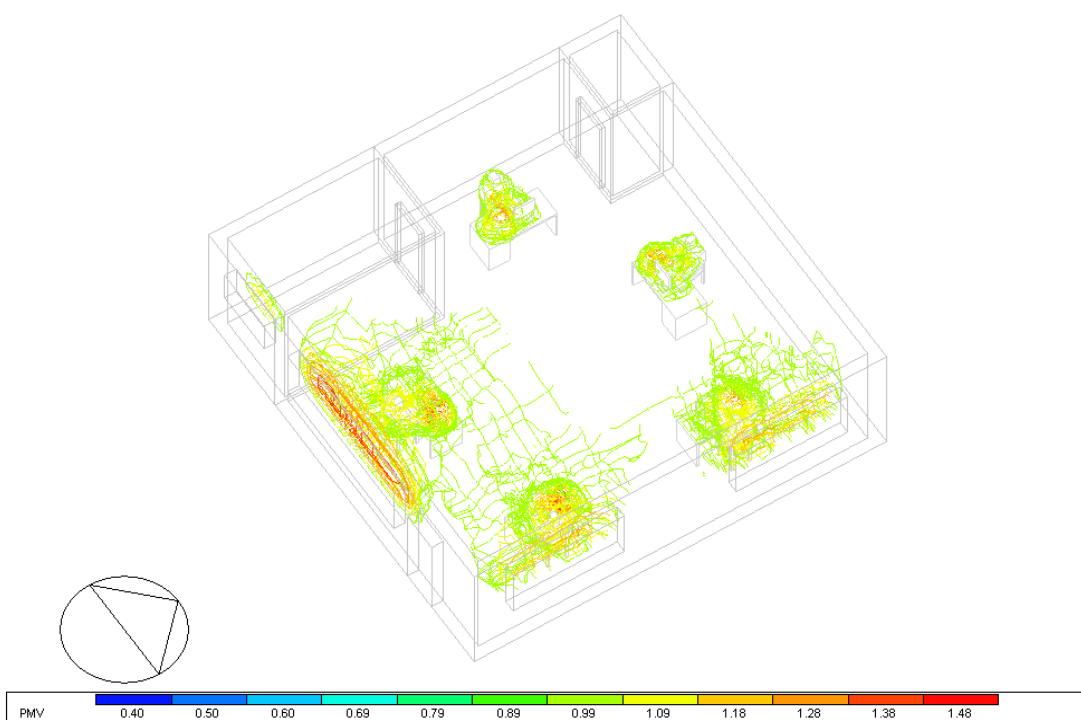
PMV



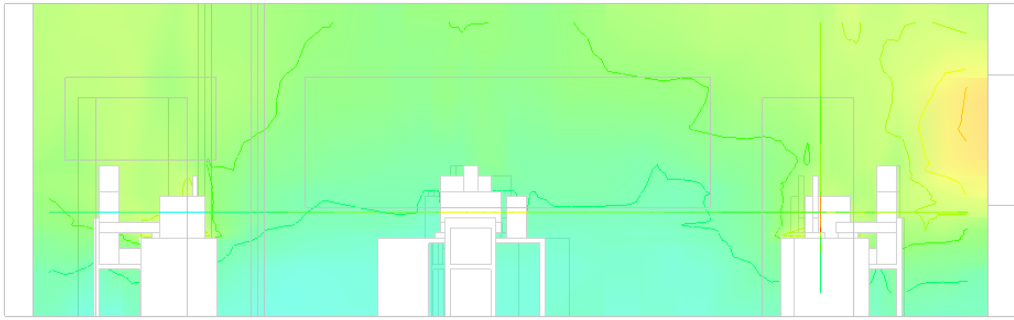
Εικόνα 46. Κάτοψη- PMV- Περίπτωση 1^η [16]



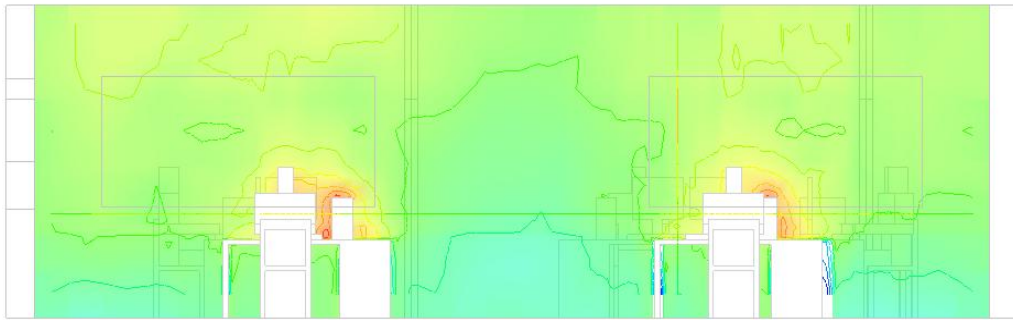
Εικόνα 47. Αξονομετρική προβολή - PMV- Περίπτωση 1η [16]



Εικόνα 48. Ισοψείς καμπύλες PMV - Περίπτωση 1η [16]



Εικόνα 49. Εμπρός όψη- PMV -Περίπτωση 1η [16]

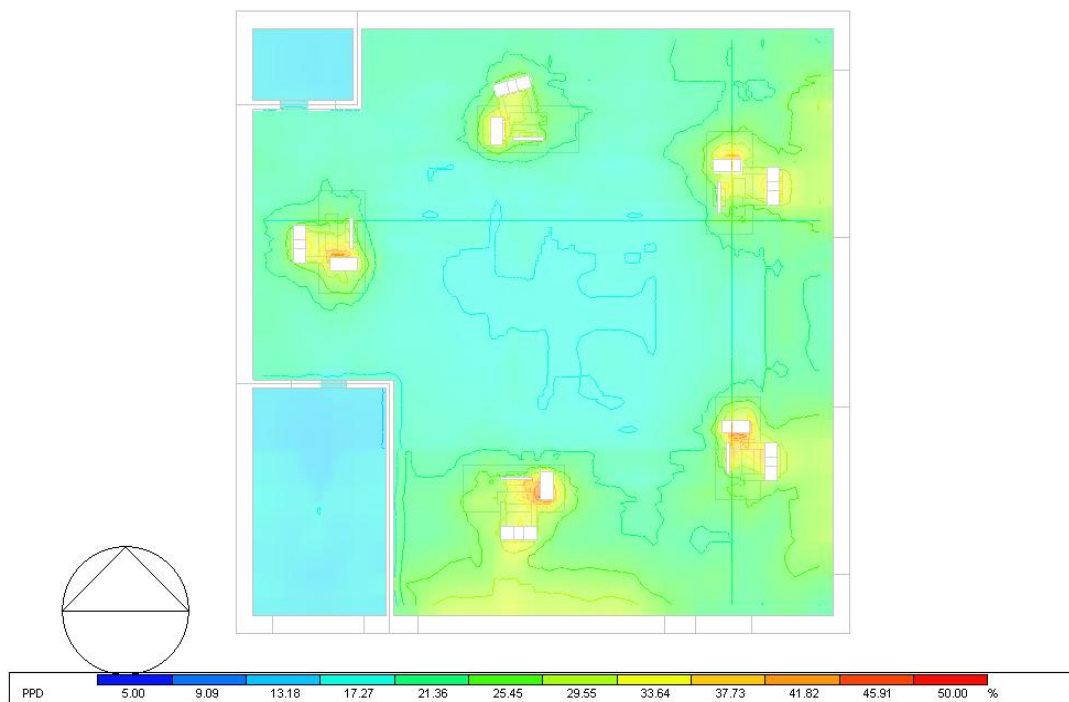


Εικόνα 50. Δεξιά όψη- PMV -Περίπτωση 1η [16]

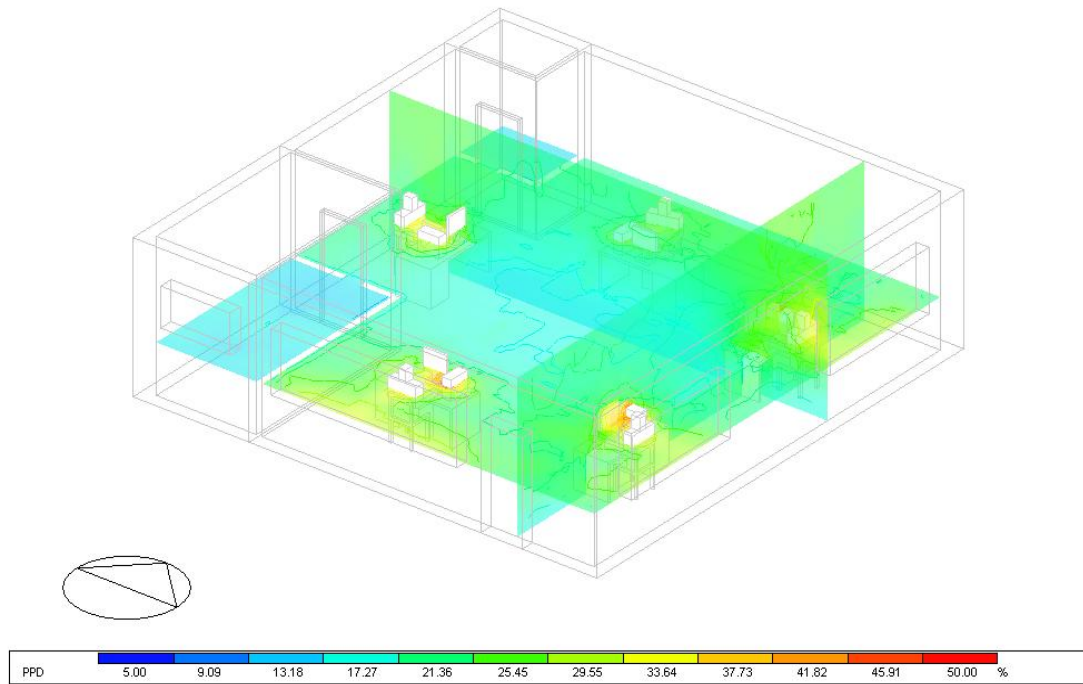
Προφανώς όπως ήταν αναμενόμενο ο χώρος του γραφείου σε συνθήκες μη κλιματισμού παρουσιάζει κακές συνθήκες θερμικής άνεσης. Συγκεκριμένα οι τιμές του δείκτη PMV στα σημεία των εργαζόμενων κυμαίνονται στο εύρος τιμών 0.8 με 1.3 οι οποίες αντιστοιχούν σε αίσθημα ζέστης για τους εργαζόμενους (Πίνακας 5).

Όπως φαίνεται και στις ισουψείς καμπύλες οι τιμές του δείκτη PMV κοντά στους εργαζόμενους είναι γύρω στο 1 όπως και κοντά στους υαλοπίνακες.

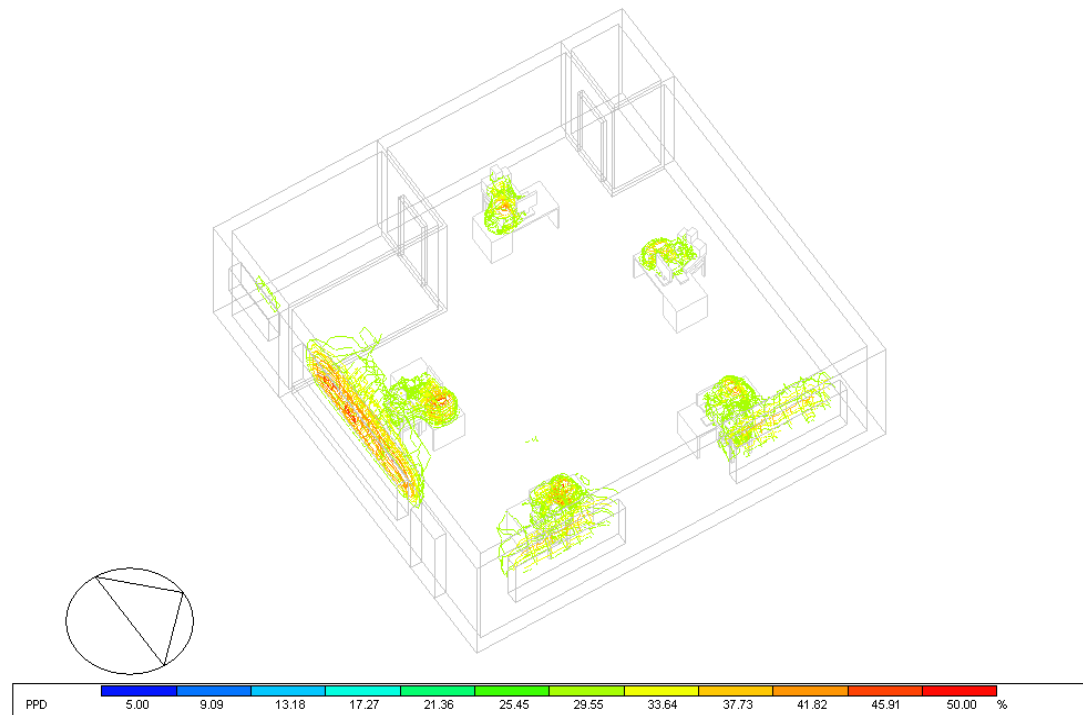
PPD



Εικόνα 51. Κάτοψη- PPD -Περίπτωση 1^η [16]



Εικόνα 52. Αξονομετρική προβολή- PPD -Περίπτωση 1η [16]

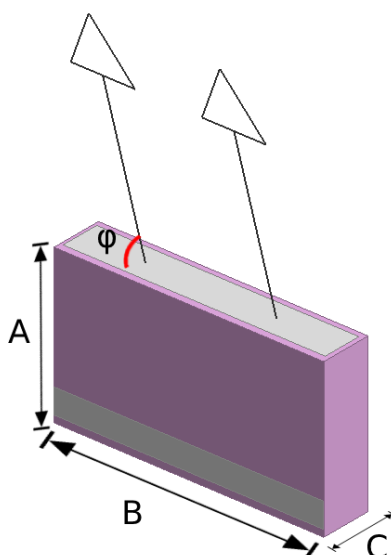


Εικόνα 53. Ισοψείς καμπύλες PPD - Περίπτωση 1η [16]

Περίπτωση 2^η

Στην δεύτερη προσομοίωση επιλέγεται να τοποθετηθούν στον χώρο δύο μονάδες fan coil δαπέδου. Για να τις εντάξουμε στην προσομοίωση πρέπει να μοντελοποιηθούν ως Assemblies. Συγκεκριμένα κατασκευάζονται σαν κουτιά με δύο ανοίγματα. Το ένα άνοιγμα αντιπροσωπεύει την έξοδο του ψυχρού αέρα τροφοδοσίας και το άλλο την αναρρόφηση του αέρα που θα ψυχθεί από την μονάδα. Αυτές τοποθετούνται στον χώρο μία στον βόρειο τοίχο και μία στον ανατολικό όπως φαίνεται στην εικόνα. Επίσης ορίζεται θερμοκρασία αέρα τροφοδοσίας ίση με 15°C και παροχή 100 lt/s ή $360 \text{ m}^3/\text{h}$.

Assembly της μονάδας Fan Coil

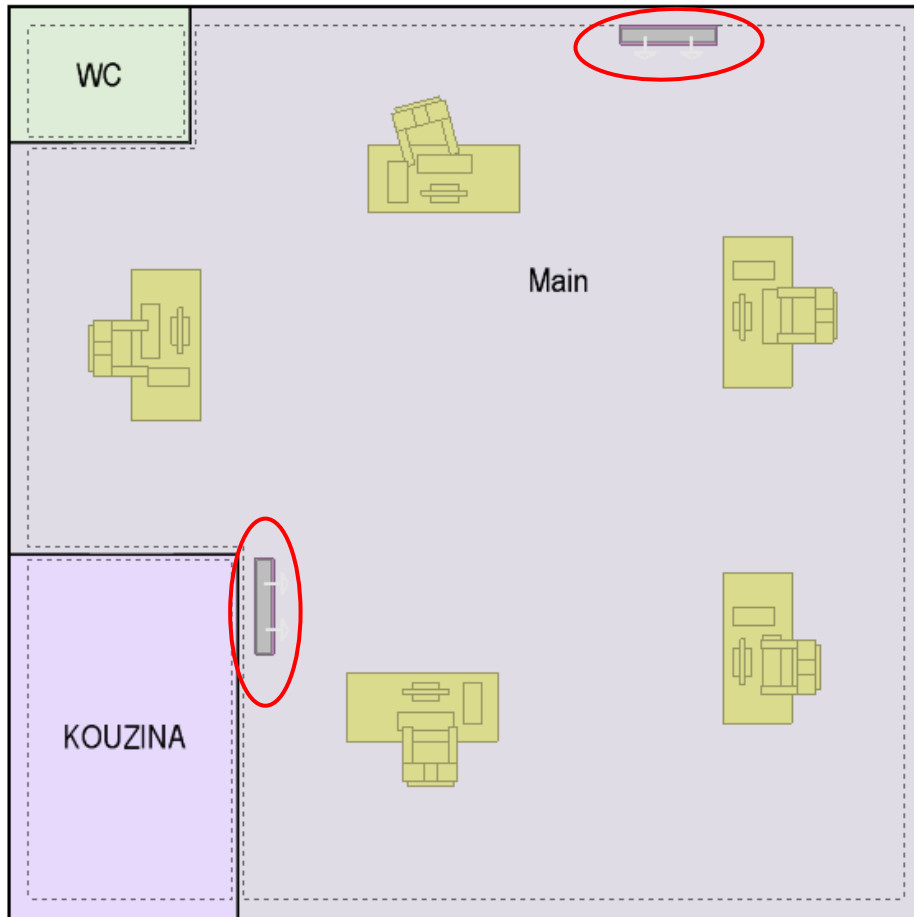


Εικόνα 54. Assembly μονάδας Fan coil [16]

A [cm]	B [cm]	C [cm]	ϕ [°]
60	105	20	75

Πίνακας 12. Διαστάσεις Fan Coil

Τοποθετούνται 2 Fan coils στα σημεία που φαίνονται στην εικόνα.



Εικόνα 55. Θέσεις FCU στον χώρο [16]

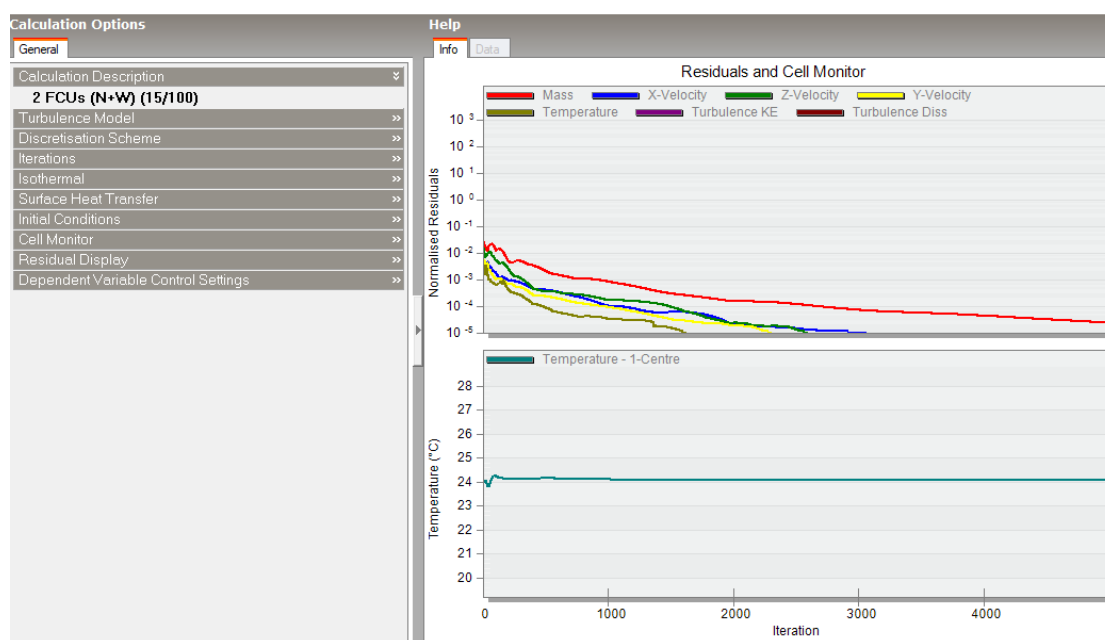
Έπειτα γίνεται ξανά έλεγχος για το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί ώστε να προχωρήσουμε στην ανάλυση CFD.

CFD Grid Statistics
 Analysis: 2 FCUs (N+W) (15/100)
 Domain: OFFICE, Block 1
 Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	79
Number Y Cells	98
Number Z Cells	21
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	21.0
Available Memory (MB)	883.6
Check	OK

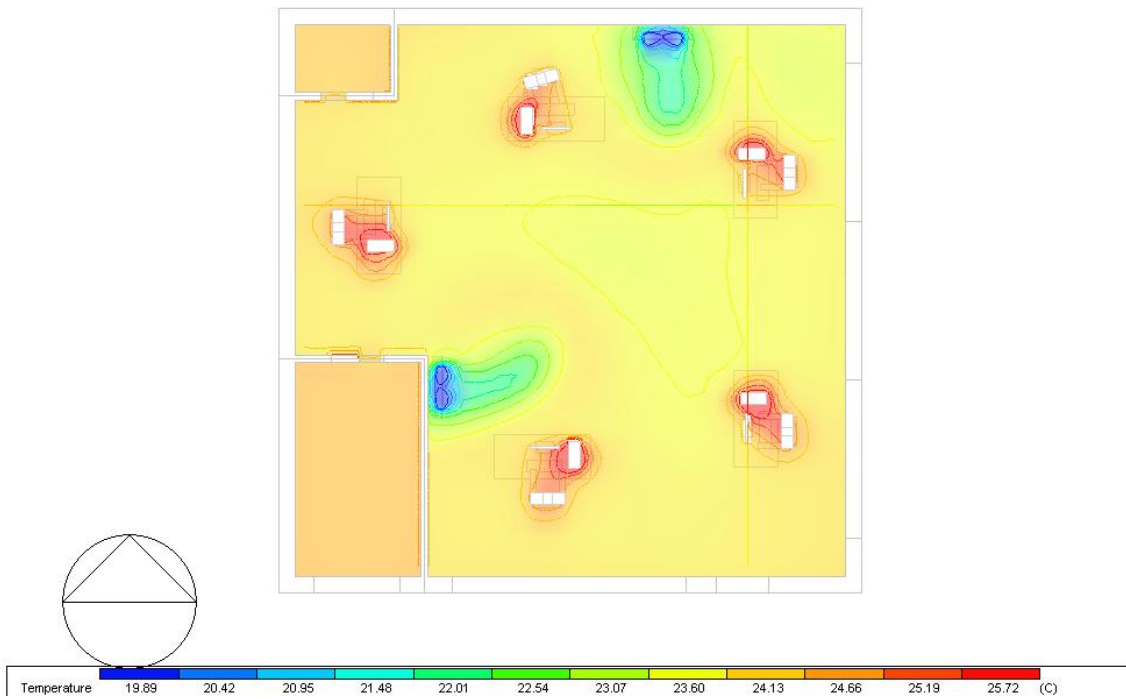
Εικόνα 56. Στατιστικά πλέγματος CFD- Περίπτωση 2^η [16]

Επιλέγεται ξανά το σχήμα διακριτοποίησης Urwind και μετά από περίπου 5000 επαναλήψεις η λύση έχει σταθεροποιηθεί. Παρατηρούμε ότι πάλι η μεταβλητή της μάζας δεν έχει φτάσει στο απόλυτο σημείο σύγκλισης όπως οι υπόλοιπες μεταβλητές, αλλά έχει φτάσει σε μια ικανοποιητική τιμή μικρότερη της τάξεως του 10^{-4} . Συνεπώς μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι η λύση έχει συγκλίνει σύμφωνα και με τον τεχνικό οδηγό για τις CFD προσομοιώσεις του DesignBuilder [18].

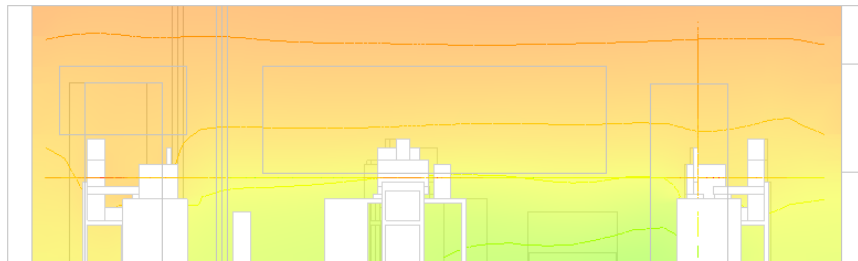


Εικόνα 57. Ανάλυση CFD- Περίπτωση 2^η [16]

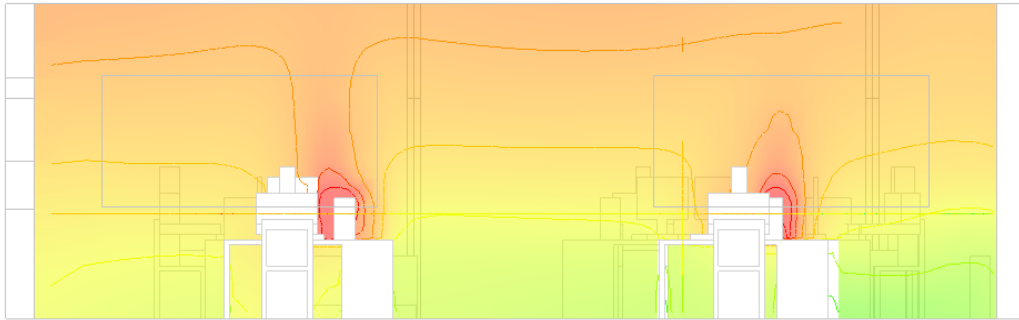
Θερμοκρασία



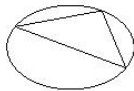
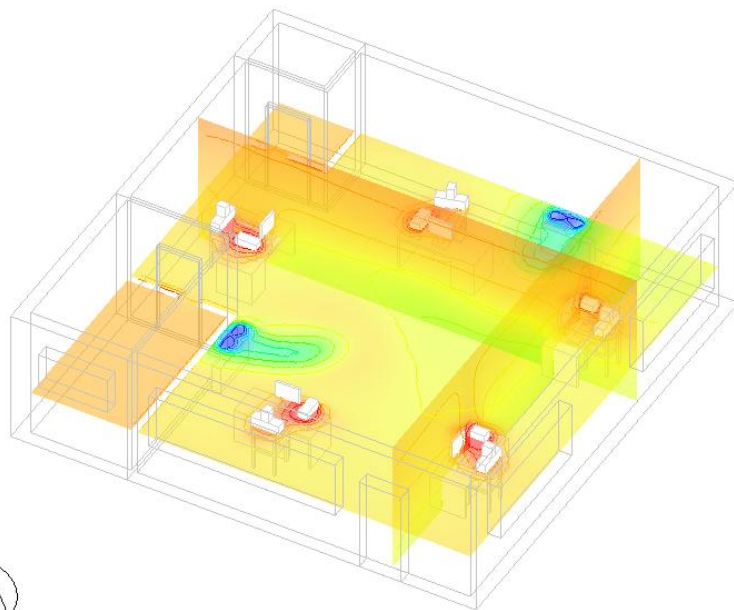
Εικόνα 58. Κάτοψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 2^η [16]



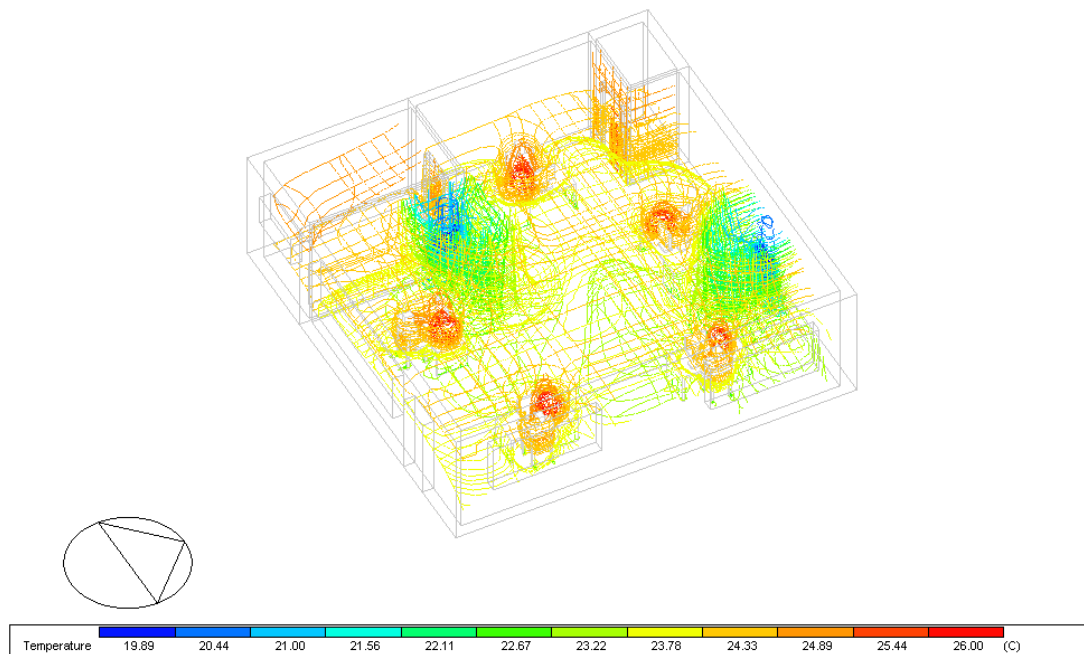
Εικόνα 59. Εμπρός όψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 2^η [16]



Εικόνα 60. Δεξιά όψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 2^η [16]



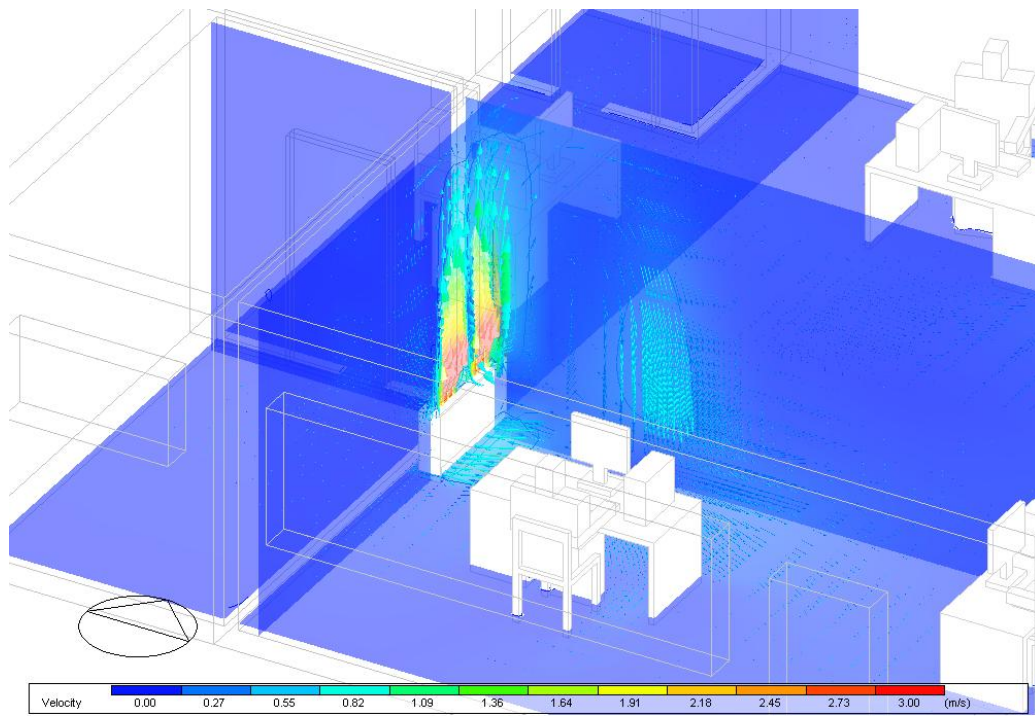
Εικόνα 61. Αξονομετρική προβολή – Θερμοκρασία- Περίπτωση 2^η [16]



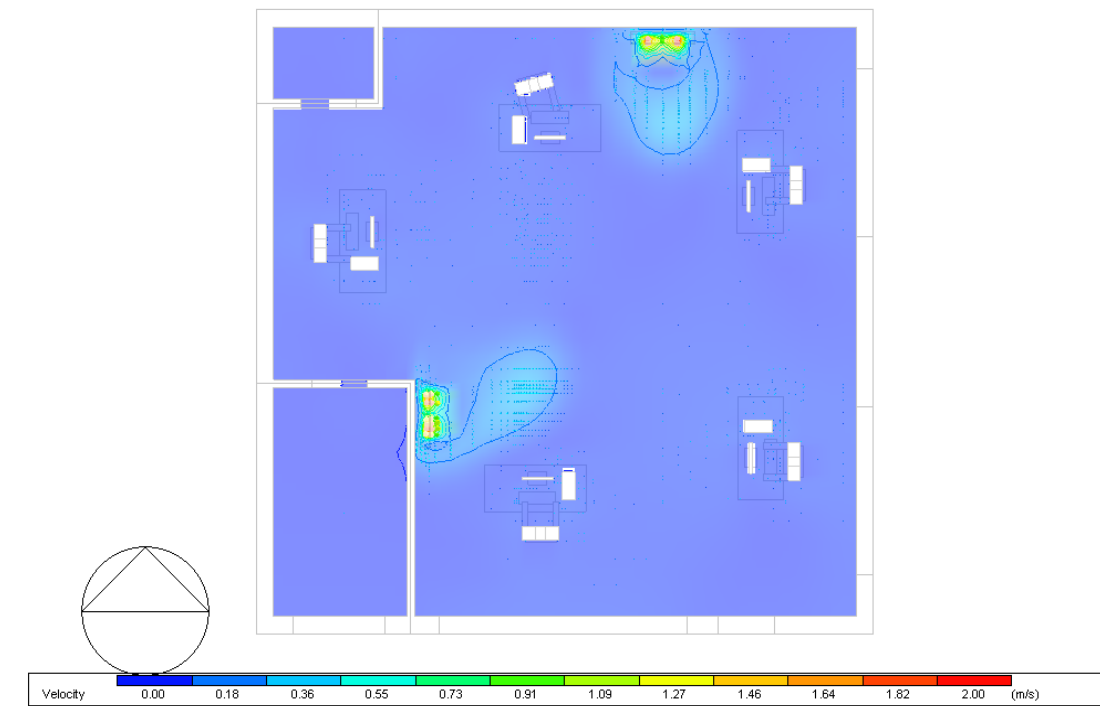
Εικόνα 62. Ισουψείς καμπύλες- Θερμοκρασία- Περίπτωση 2^η [16]

Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την Περίπτωση 1 όπου δεν υπήρχε κανένα σύστημα κλιματισμού, τώρα στον χώρο έχει επιτευχθεί μια καλύτερη κατανομή και τιμή θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα οι τιμές της θερμοκρασίας αέρα που επικρατούν στον χώρο σε ύψος ενός μέτρου από το δάπεδο είναι μεταξύ των 23.5 και 24.5 ° C, μια ικανοποιητική θερμοκρασία. Κοντά στις μονάδες Fan Coil η θερμοκρασία είναι προφανώς μικρότερη γύρω στους 19 με 21 °C. Όπως φαίνεται και στις ισουψείς καμπύλες (Εικόνα 62) υπάρχει ομοιομορφία στις θερμοκρασίες.

Ταχύτητα αέρα



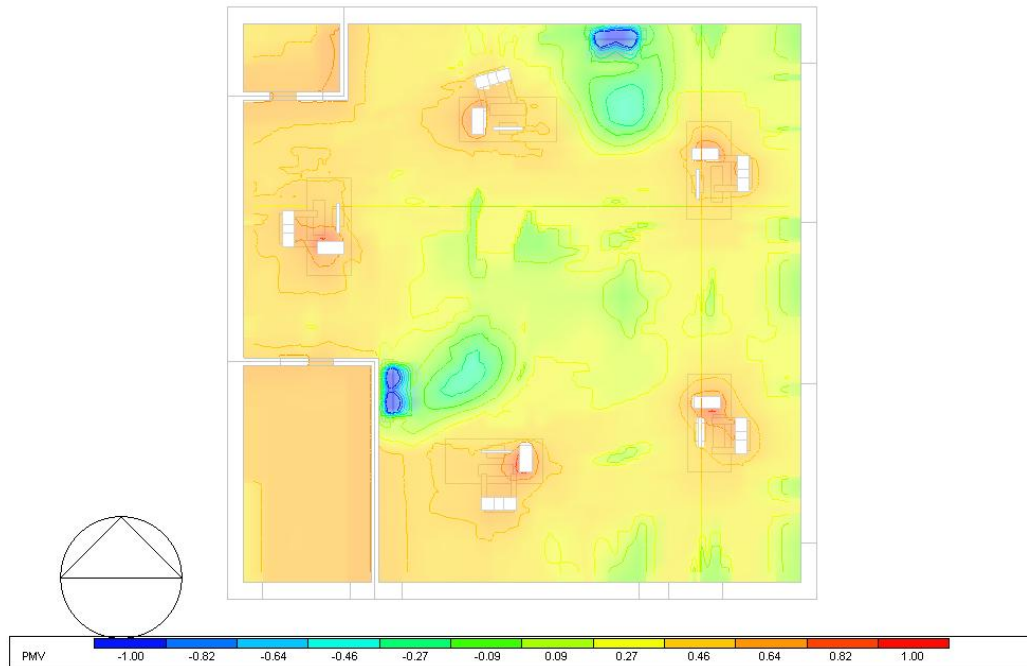
Εικόνα 63. Ταχύτητα αέρα κοντά στην μονάδα fan coil [16]



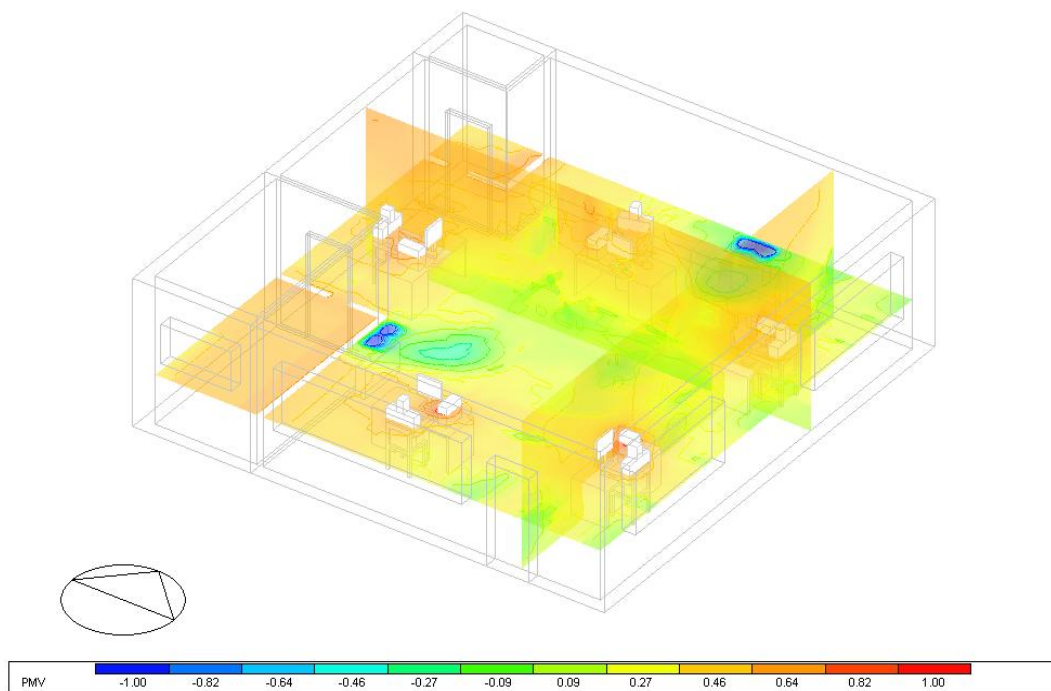
Εικόνα 64. Κάτοψη- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 2^η [16]

Οι τιμές της ταχύτητας του αέρα στο ύψος 1m από το δάπεδο κυμαίνονται γύρω στο 0.18 m/s στον ευρύτερο χώρο ενώ κοντά στις μονάδες FCU αυξάνονται.

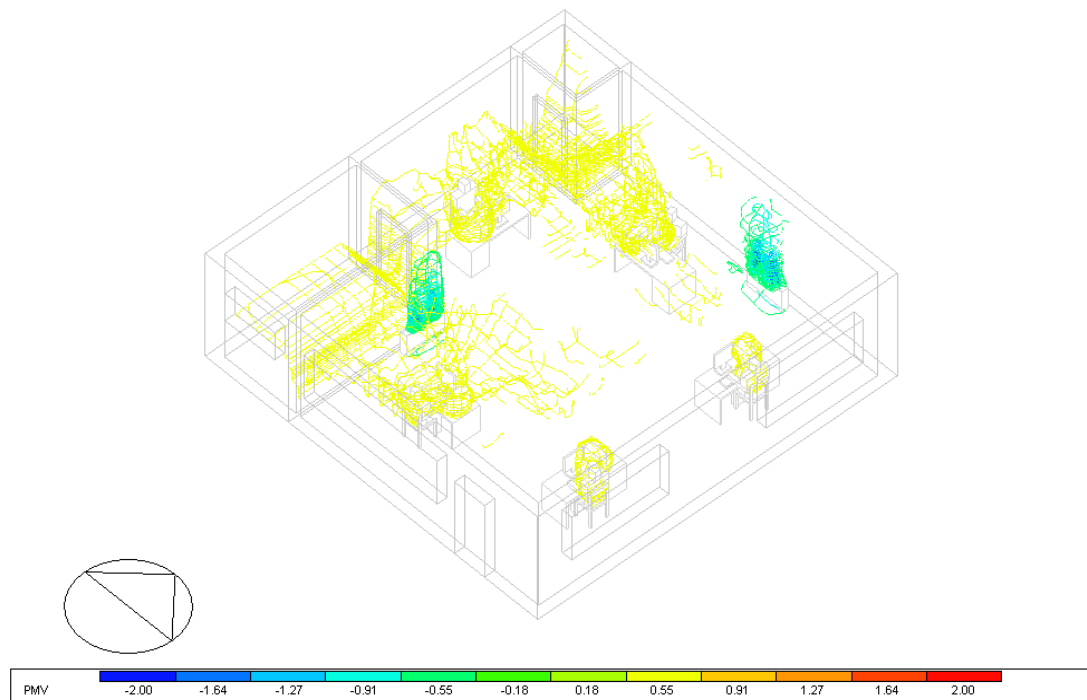
PMV



Εικόνα 65. Κάτοψη- PMV- Περίπτωση 2^η [16]



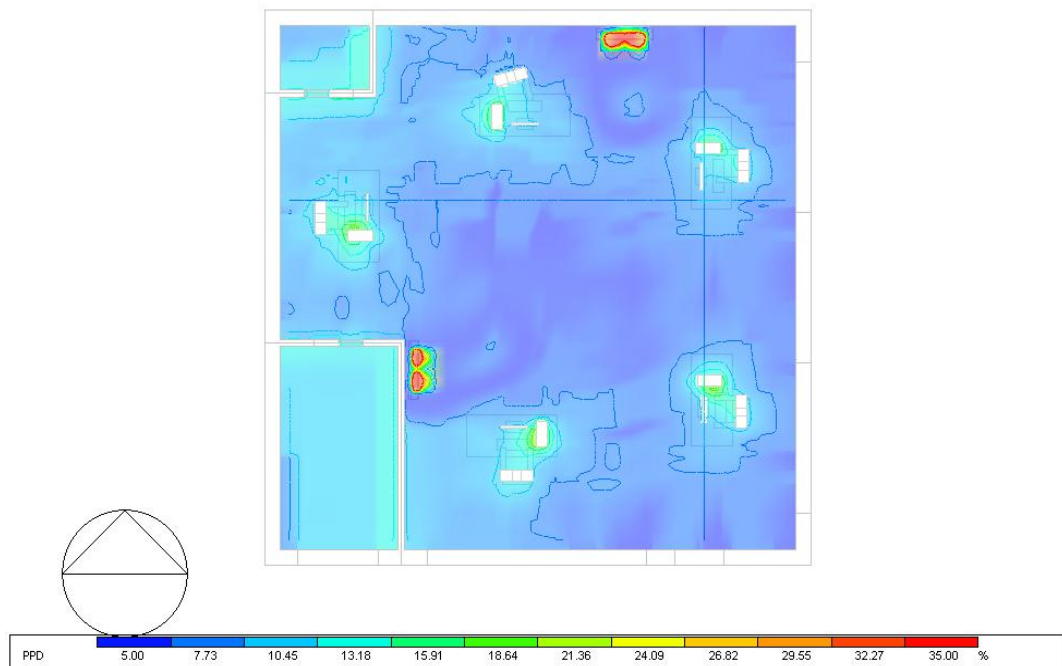
Εικόνα 66. Slices PMV σε αξονομετρική προβολή [16]



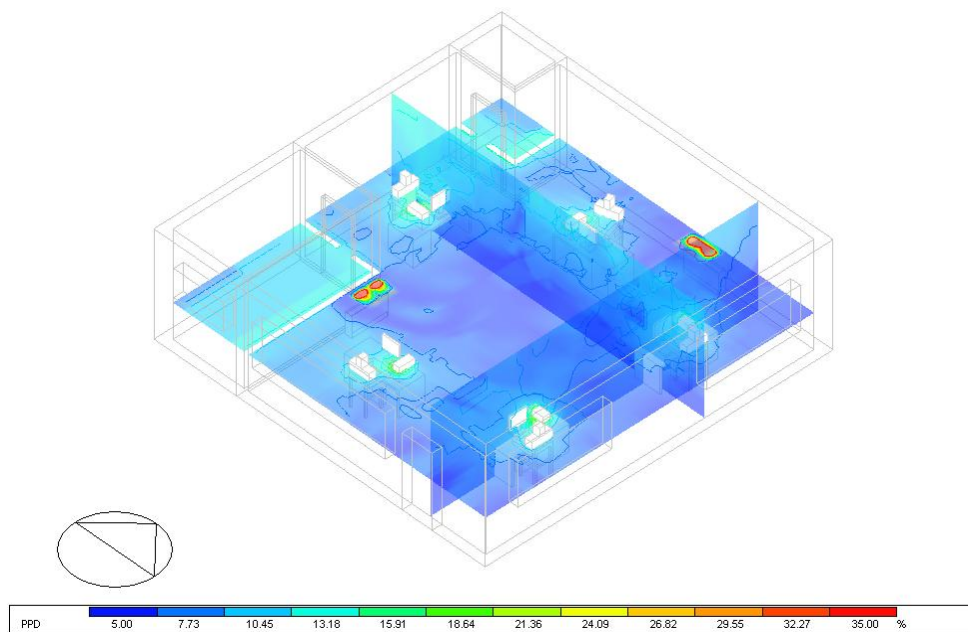
Εικόνα 67. Ισοψείς καμπύλες PMV μεγαλύτερες από ± 0.5 [16]

Οι τιμές του δείκτη PMV στον χώρο κυρίως κυμαίνονται βρίσκονται γύρω στο -0.3 και 0.3 όπου έχουμε συνθήκες πολύς καλής θερμικής άνεσης. Κοντά στις μονάδες Fan coil πλησιάζουμε τιμές μέχρι και -1 δηλαδή αίσθημα κρύου , ενώ κοντά στους εργαζόμενους έχουμε τιμές από 0.6 έως 0.8 όπου πλησιάζουμε τα όρια ζέστης.

PPD



Εικόνα 68. Κάτοψη-PPD- Περίπτωση 2^η [16]

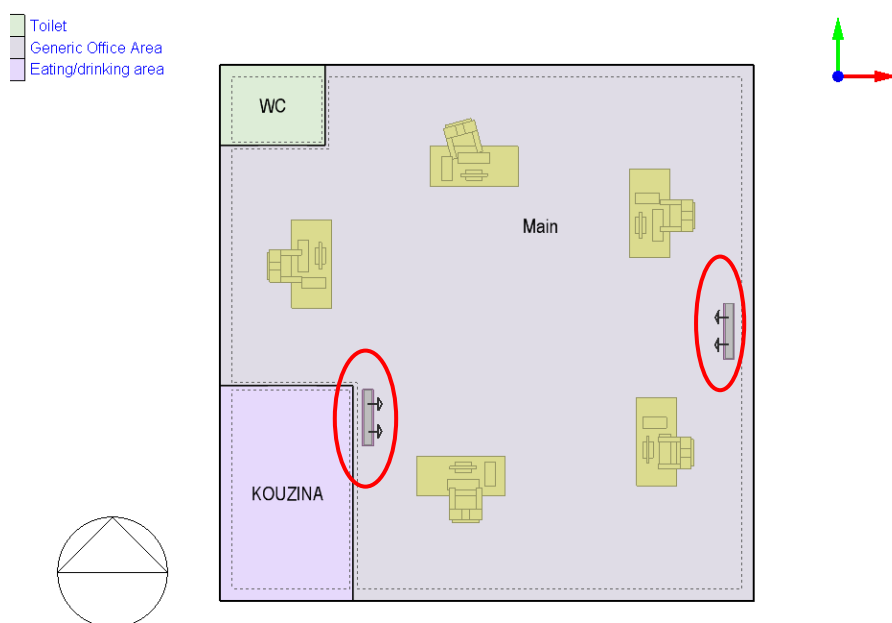


Εικόνα 69. Αξονομετρική προβολή slices PPD- Περίπτωση 2^η [16]

Ίδια εικόνα βλέπουμε και για τον δείκτη PPD. Οι τιμές κυμαίνονται από 5% έως 20% στο επίπεδο αναφοράς.

Περίπτωση 3^η

Στην 3^η περίπτωση κρατάμε ίδιο τύπο (Εικόνα 54) και αριθμό τερματικών μονάδων, δηλαδή δύο, αλλά αλλάζουμε την θέση της μίας εξ αυτών ώστε να παρατηρήσουμε εάν θα μεταβληθούν οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν για την θερμική άνεση.



Εικόνα 70. Θέση μονάδων Fan coil- Περίπτωση 3^η [16]

Έλεγχος πλέγματος

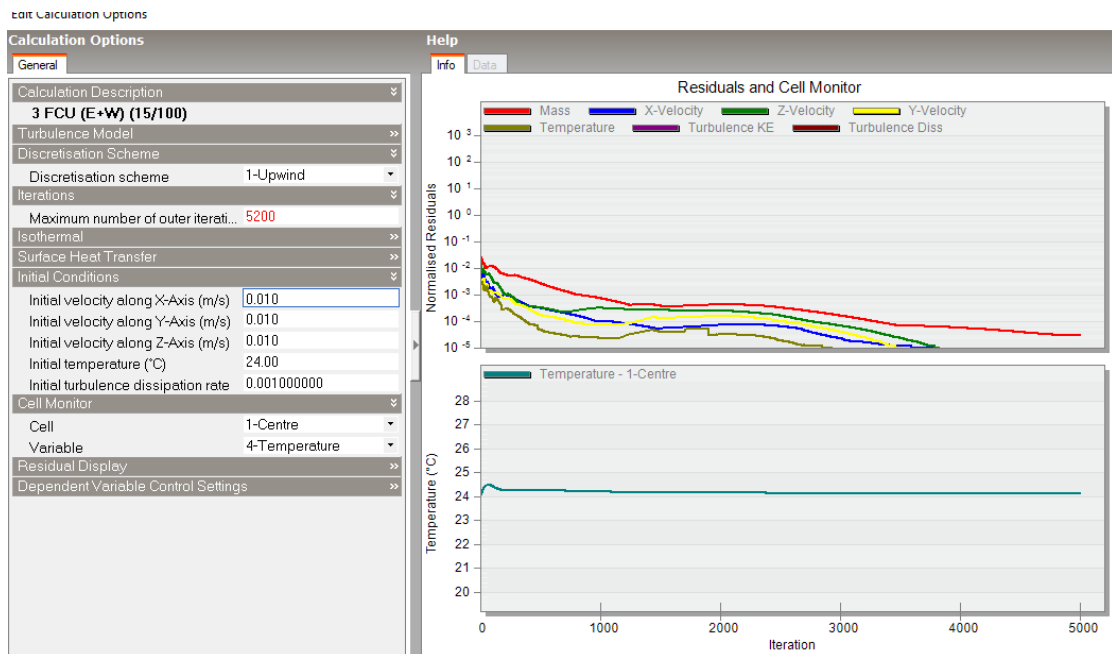
Analysis: 3 F CU (E+W) (15/100)
Domain: OFFICE, Block 1
Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	80
Number Y Cells	99
Number Z Cells	21
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	21.4
Available Memory (MB)	856.2
Check	OK

Εικόνα 71. Στατιστικά πλέγματος CFD- Περίπτωση 3^η [16]

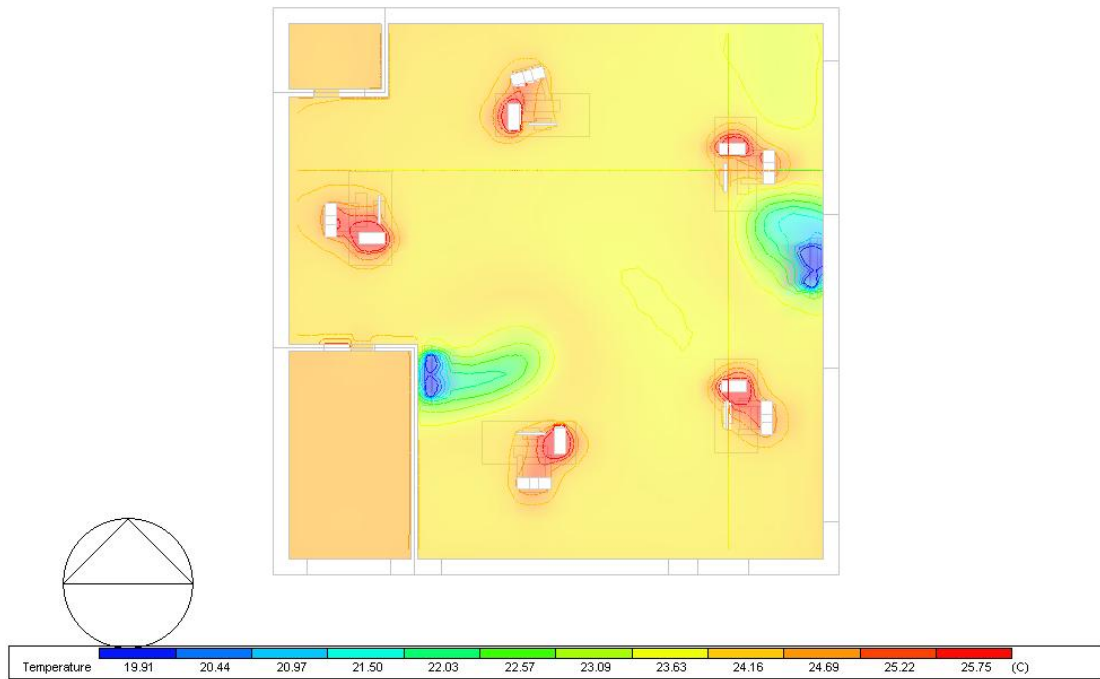
Το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα είναι OK ώστε να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί CFD.

Έπειτα από περίπου 5000 επαναλήψεις η λύση έχει συγκλίνει σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

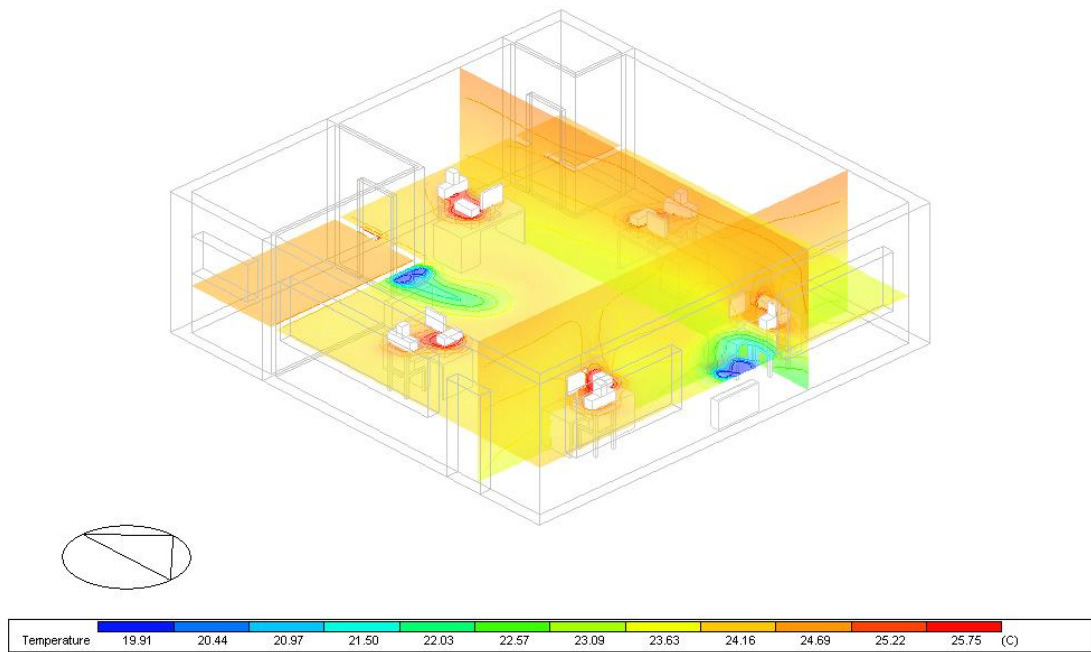


Εικόνα 72. Ανάλυση CFD- Περίπτωση 3^η [16]

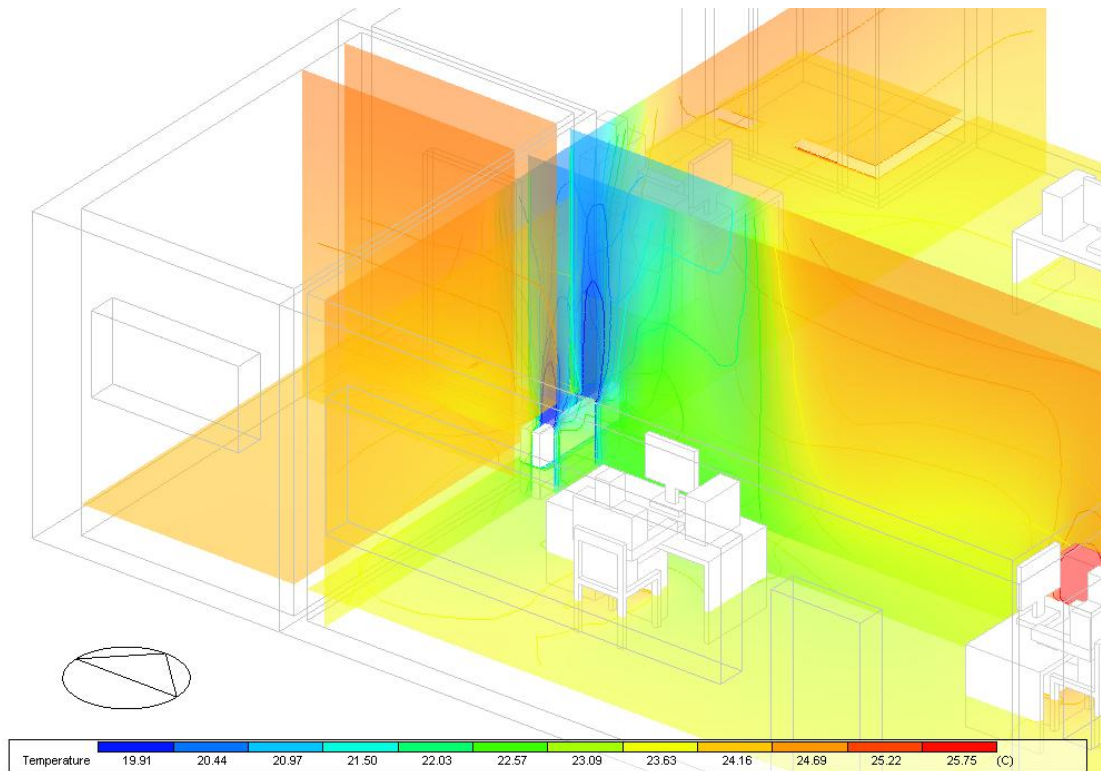
Θερμοκρασία



Εικόνα 73. Κάτοψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 3^η [16]



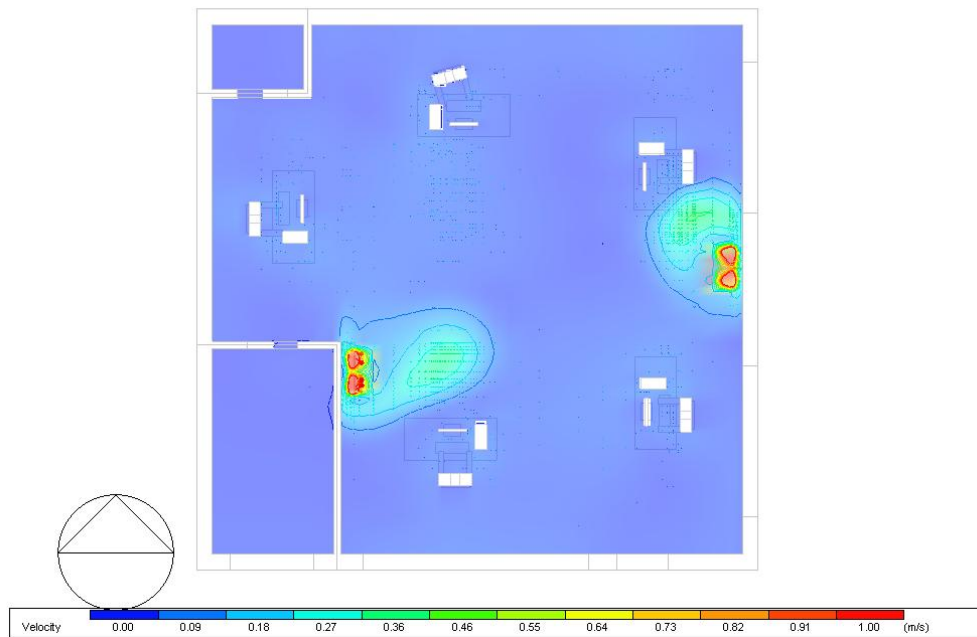
Εικόνα 74. Αξονομετρική προβολή slices Θερμοκρασία- Περίπτωση 3^η [16]



Εικόνα 75. Θερμοκρασία στον Fan coil-- Περίπτωση 3^η [16]

Όσον αφορά την θερμοκρασία σε σχέση με την περίπτωση 2 όπου είχαμε διαφορετική διάταξη δεν βλέπουμε μεγάλη διαφορά στις τιμές . Προφανώς υπάρχει διαφορά στο πως κατανέμεται η θερμοκρασία στον χώρο λόγω της διαφορετικής θέσης της μίας μονάδας FCU. Οι τιμή της θερμοκρασίας στο επίπεδο αναφοράς είναι γύρω στο 23.3 με 24.6 °C.

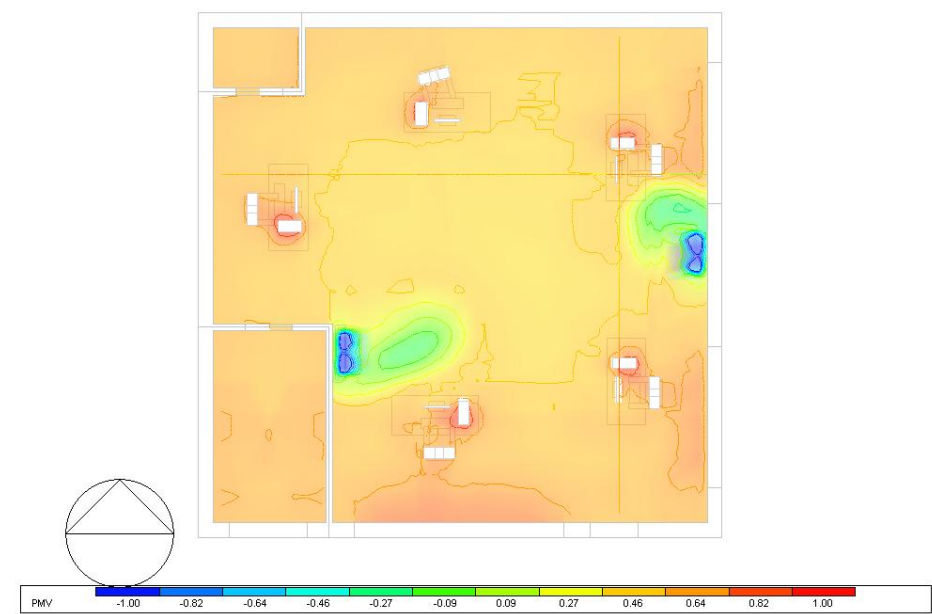
Ταχύτητα



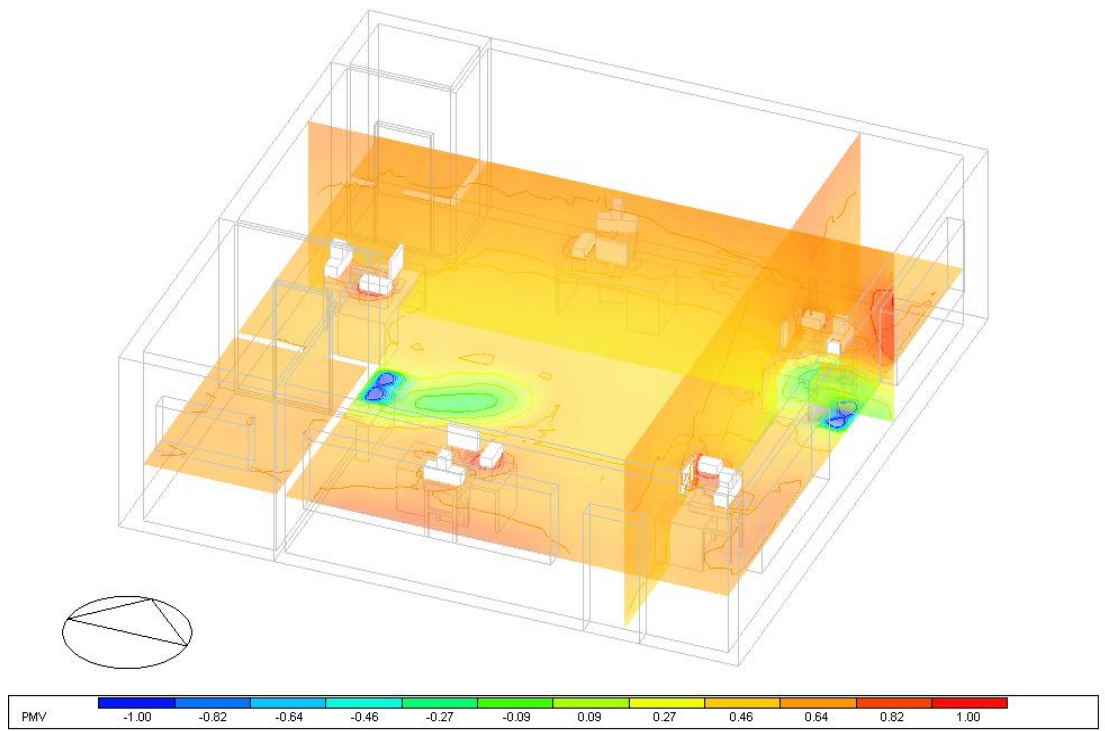
Εικόνα 76. Κάτοψη – Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 3^η [16]

Όμοια εικόνα με την περίπτωση 2 έχουμε και για τις ταχύτητες του αέρα.

PMV



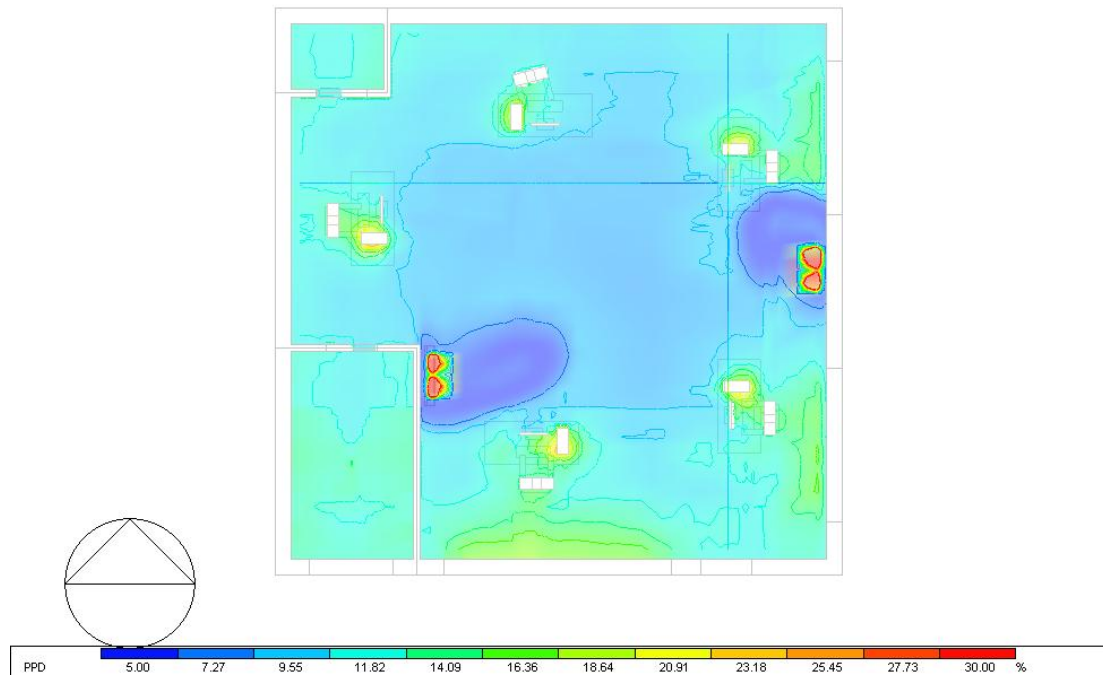
Εικόνα 77. Κάτοψη – PMV –Περίπτωση 3^η [16]



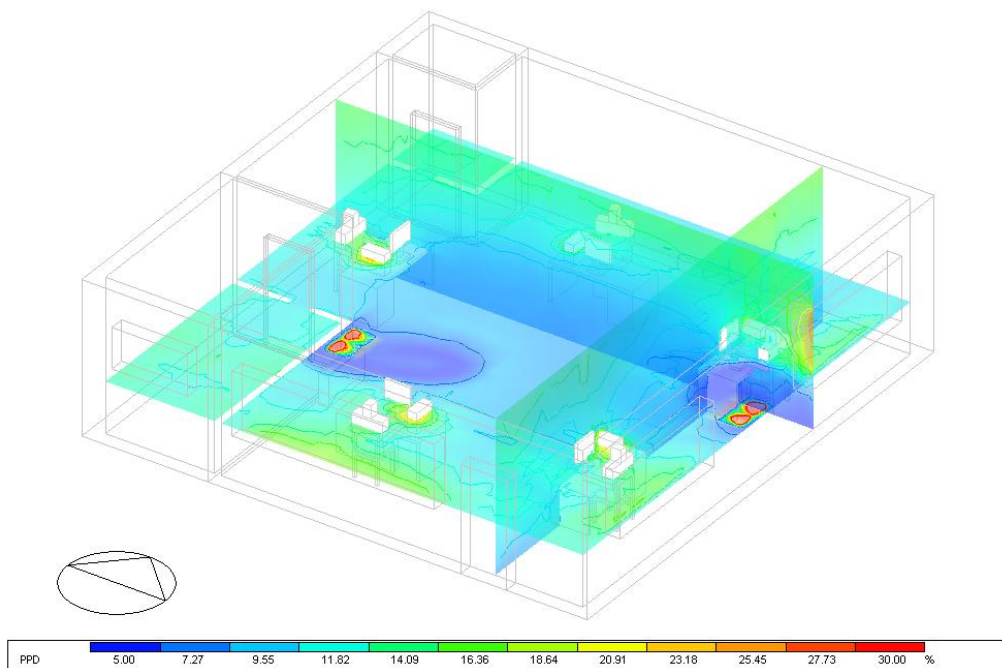
Εικόνα 78. Αξονομετρική προβολή slices – PMV –Περίπτωση 3^η [16]

Για τον δείκτη PMV παρατηρούμε μία καλύτερη ομοιομορφία από την προηγούμενη περίπτωση. Οι τιμές κυμαίνονται κυρίως από 0.2 έως 0.6.

PPD



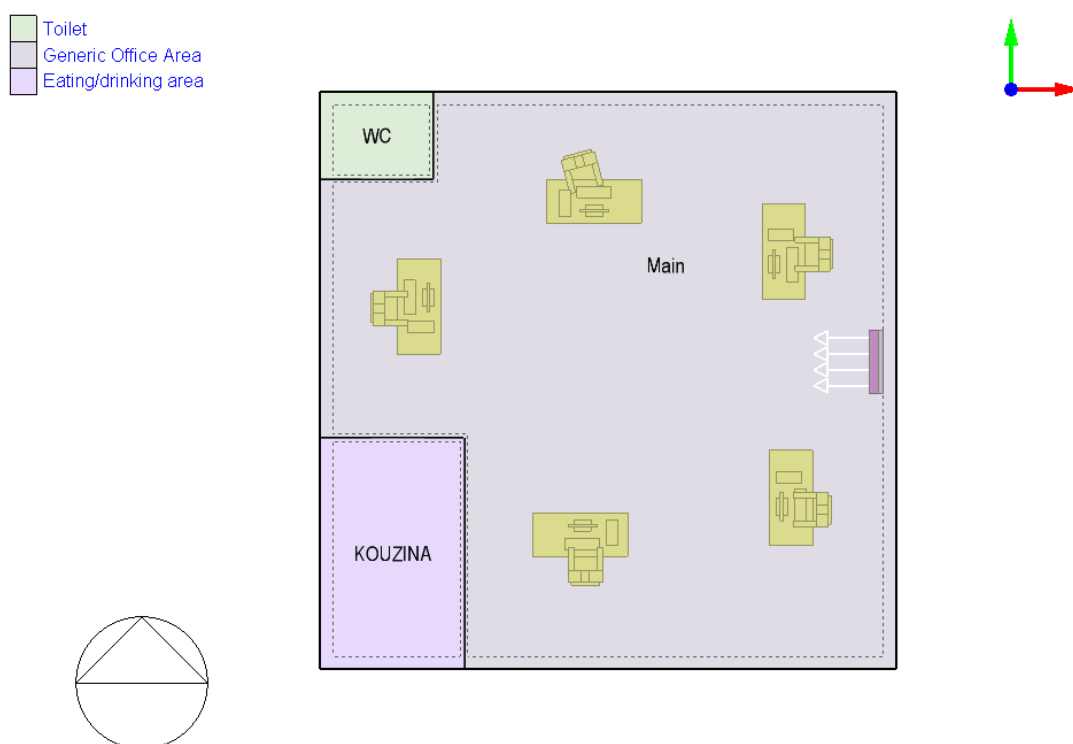
Εικόνα 79. Κάτοψη-PPD- Περίπτωση 3^η [16]



Εικόνα 80. Αξονομετρική προβολή PPD –Περίπτωση 3^η [16]

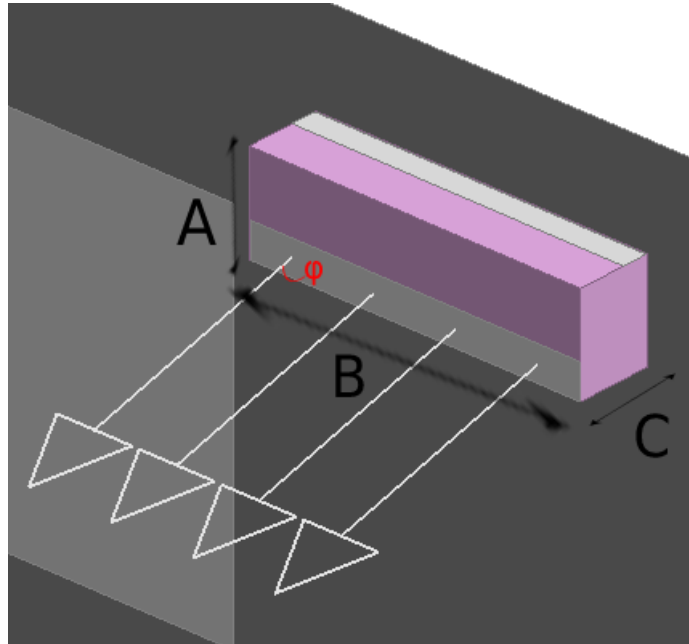
Περίπτωση 4^η

Στην τέταρτη περίπτωση αλλάζουμε τον τύπο της τερματικής μονάδας. Τώρα αντί για fan coil δαπέδου μοντελοποιούμε ένα τυπικό κλιματιστικό που τοποθετείται στον τοίχο σε ύψος 2.5 m. Συγκεκριμένα τοποθετείται στον ανατολικό τοίχο όπως φαίνεται στην κάτοψη παρακάτω.



Εικόνα 81. Κάτοψη- Θέση κλιματιστικού-Περίπτωση 4^η [16]

Για το κλιματιστικό όπως και τα fan coil στις προηγούμενες περιπτώσεις δημιουργείται ένα Assembly. Τοποθετείται σε αυτό μία έξοδος για τον ψυχρό αέρα τροφοδοσίας και μία είσοδος για τον προς ψύξη αέρα. Οι διαστάσεις του φαίνονται στον πίνακα.



Εικόνα 82. Assembly κλιματιστικού [16]

A [cm]	B [cm]	C [cm]	Φ [°]
32	110	25	75

Πίνακας 13. Διαστάσεις κλιματιστικού

Όσον αφορά τον αέρα τροφοδοσίας ορίζεται μία παροχή ίση με 200 l/s και θερμοκρασία 15 °C όπως και τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Έλεγχος πλέγματος

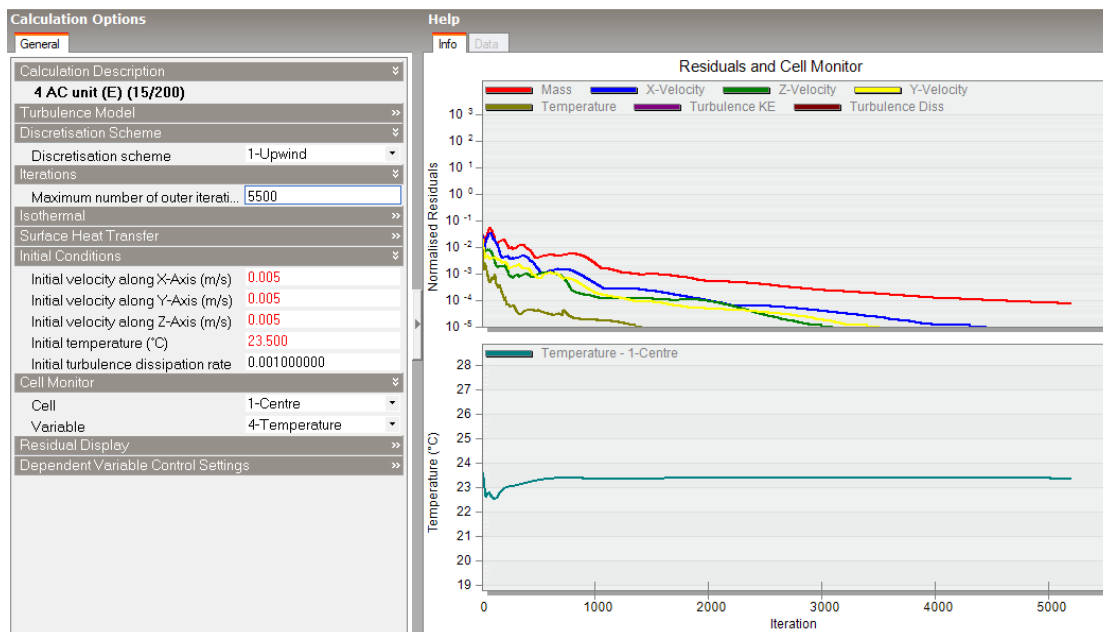
Analysis: 4 AC unit (E) (15/200)
 Domain: OFFICE, Block 1

Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	76
Number Y Cells	99
Number Z Cells	21
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	20.4
Available Memory (MB)	966.7
Check	OK

Εικόνα 83. Στατιστικά πλέγματος CFD [16]

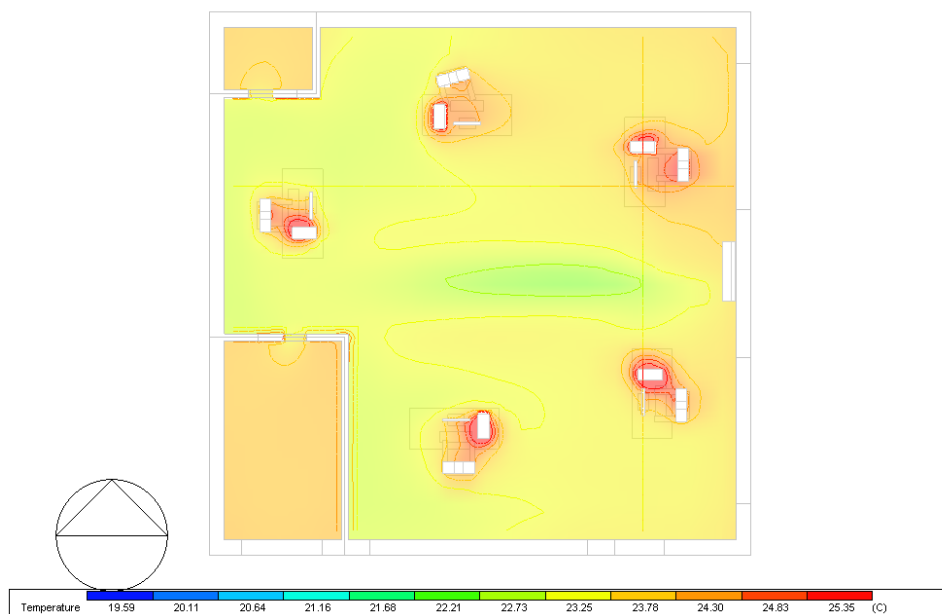
Παρατηρούμε ότι το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί αυτόματα ικανοποιεί τις απαιτήσεις ώστε να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς. Επιλέγεται πάλι σύστημα διακριτοποίησης Upwind.



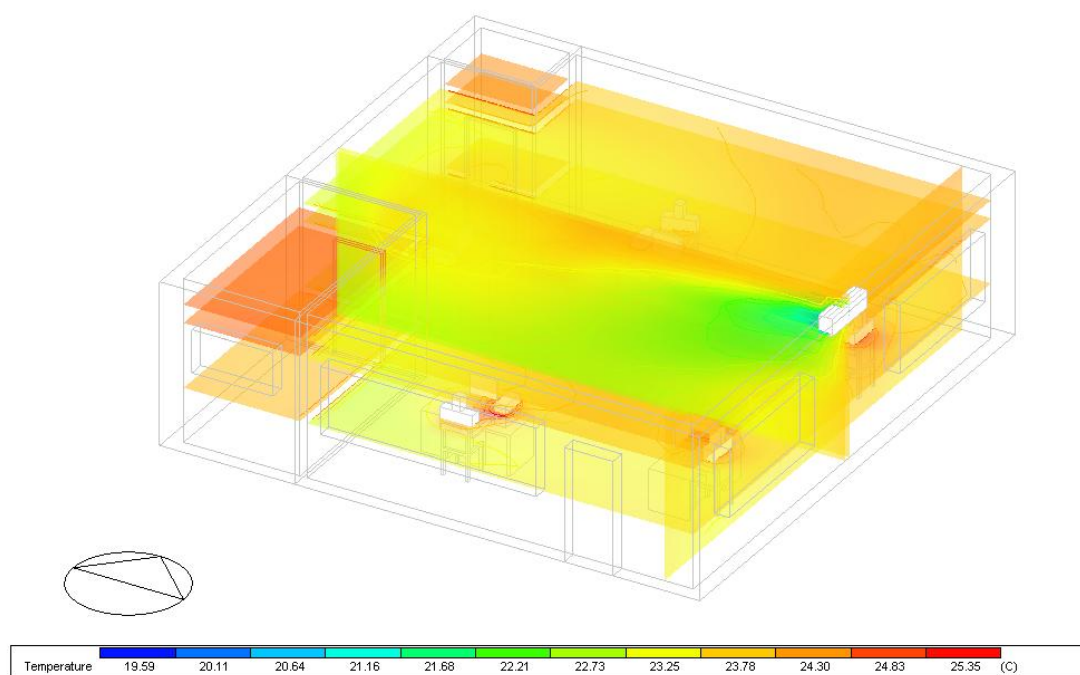
Εικόνα 84. Ανάλυση CFD – Περίπτωση 4^η [16]

Μετά από περίπου 5000 επαναλήψεις η λύση έχει σταθεροποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

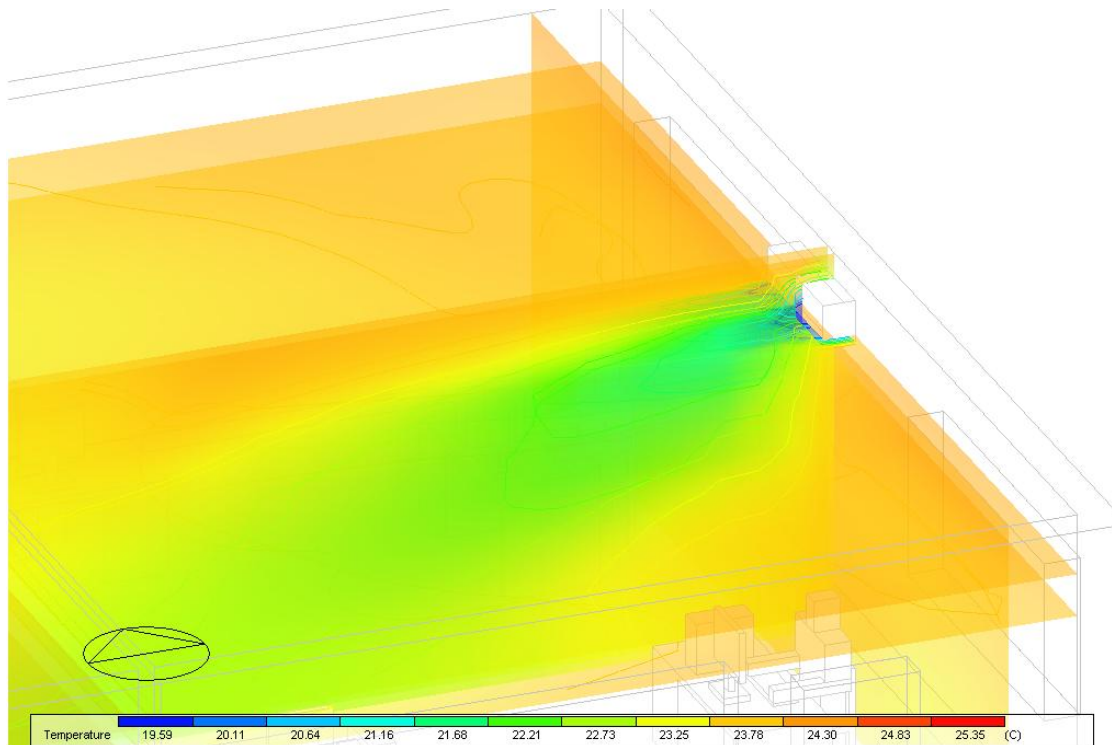
Θερμοκρασία



Εικόνα 85. Κάτοψη – Θερμοκρασία- Περίπτωση 4^η [16]



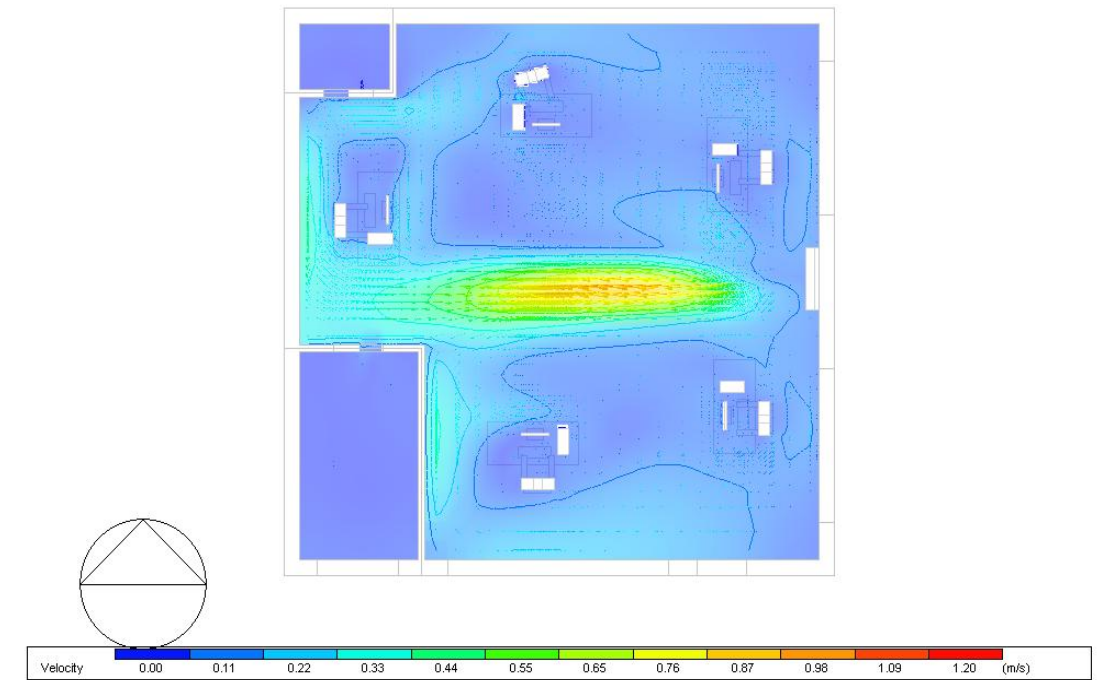
Εικόνα 86. Αξονομετρική προβολή slices - Θερμοκρασία- Περίπτωση 4^η [16]



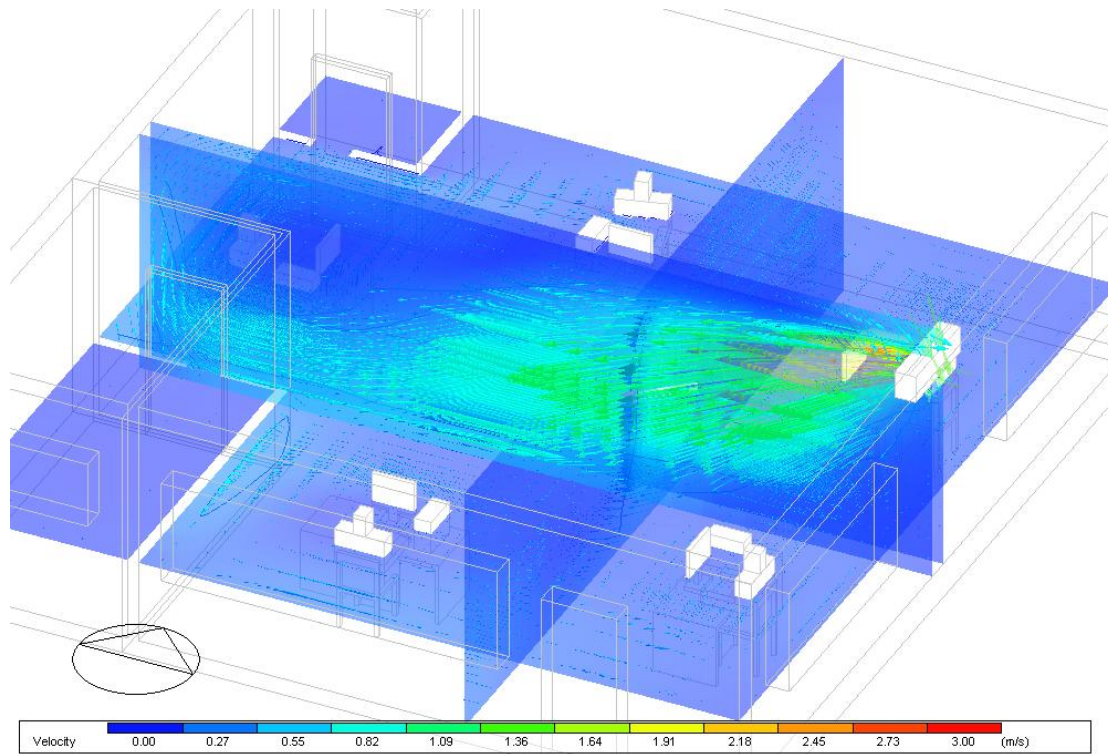
Εικόνα 87. Θερμοκρασία στο κλιματιστικό - Περίπτωση 4^η [16]

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο επίπεδο αναφοράς είναι γύρω στους 23.2 °C. Κοντά στον ανατολικό τοίχο η θερμοκρασία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη λόγω των υαλοπινάκων και λόγω της έλλειψης άμεσης έκθεσης από την δέσμη αέρα του κλιματιστικού.

Ταχύτητα

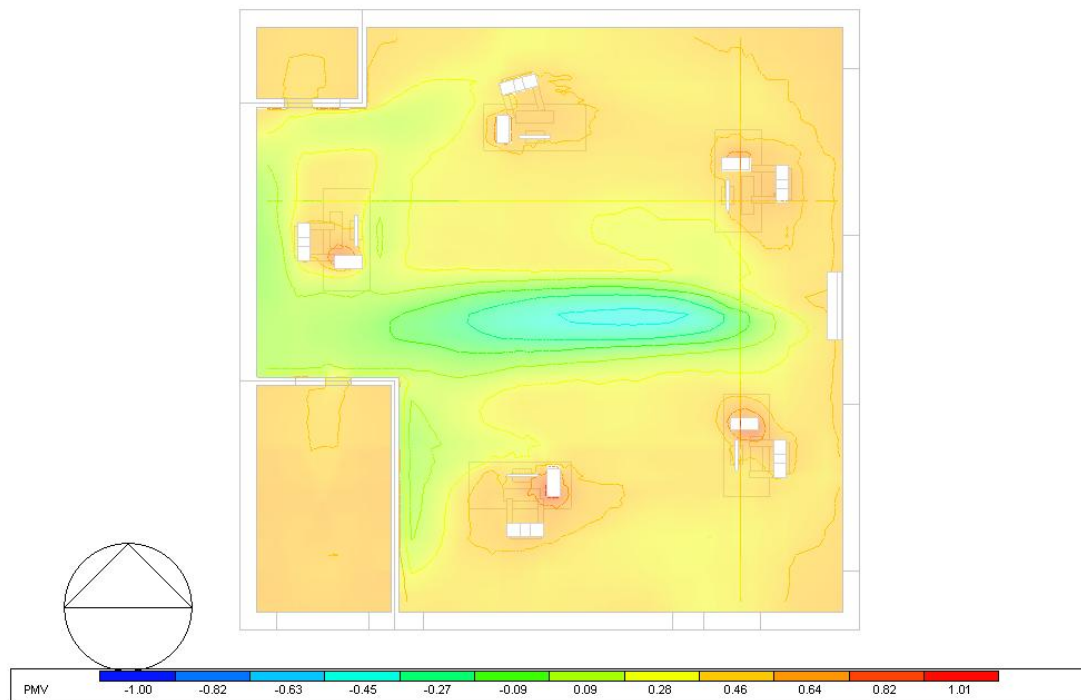


Εικόνα 88. Κάτοψη- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 4^η [16]

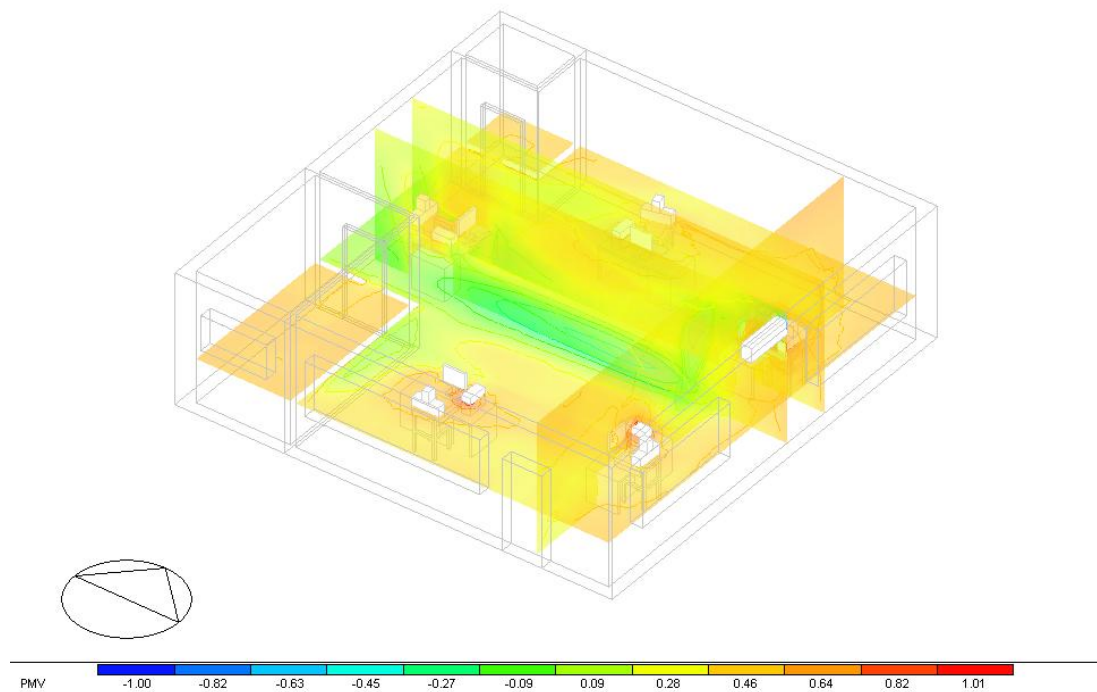


Εικόνα 89. Αξονομετρική προβολή- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 4^η [16]

PMV

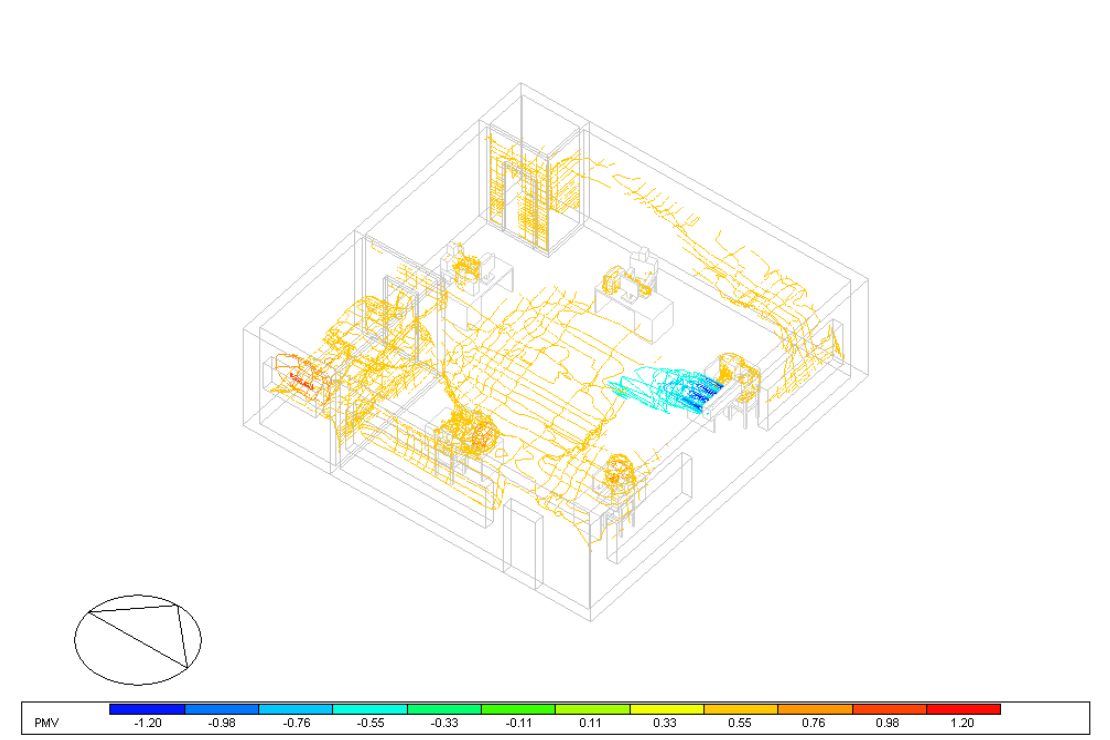


Εικόνα 90. Κάτοψη- PMV- Περίπτωση 4^η [16]



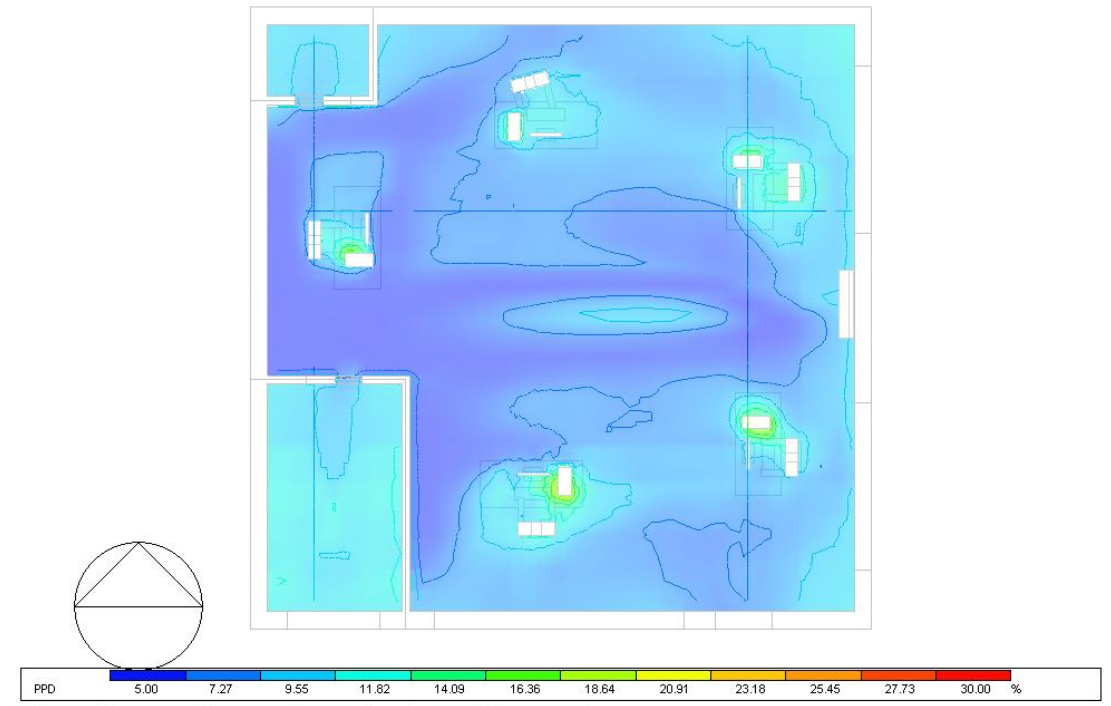
Εικόνα 91. Αξονομετρική προβολή- PMV- Περίπτωση 4^η [16]

Οι τιμές του δείκτη PMV φαίνεται ότι κυμαίνονται από -0.45 έως 0.64 κυρίως. Συγκεκριμένα κοντά στην δέσμη του αέρα του κλιματιστικού παρατηρούμε τιμές από -0.63 έως 0.1. Πλησιάζοντας στις θέσεις των εργαζομένων οι τιμές είναι κυρίως έως 0.64.

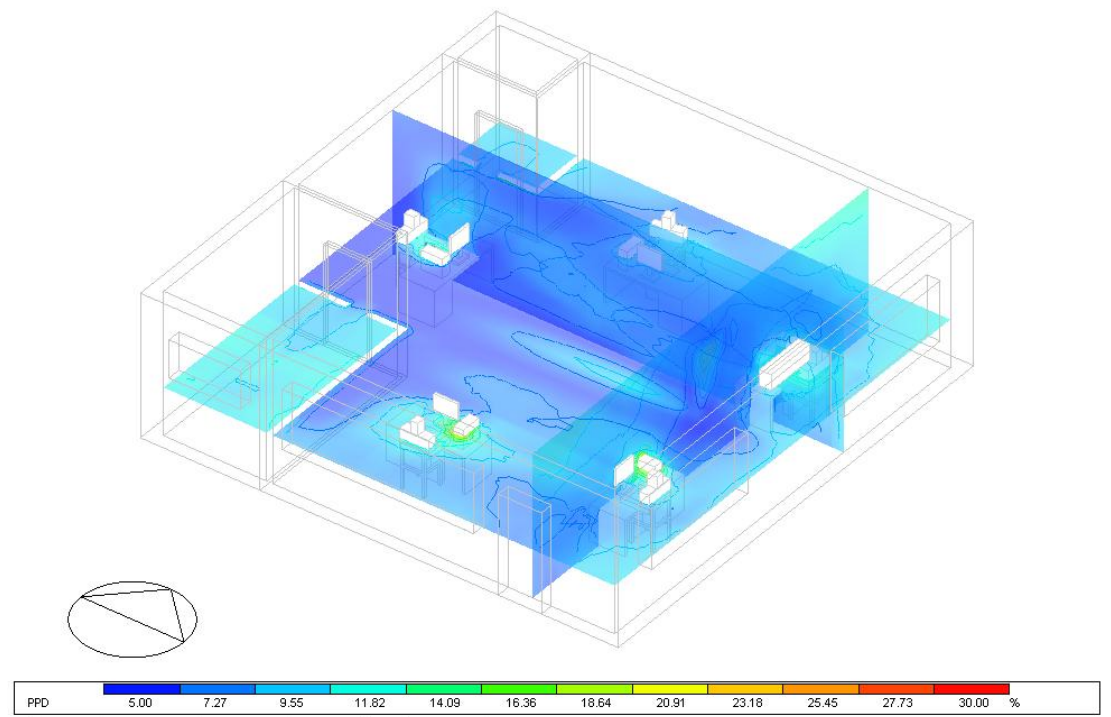


Εικόνα 92. Ισοψείς καμπύλες PMV πάνω από 0.55 Περίπτωση 4^η [16]

PPD



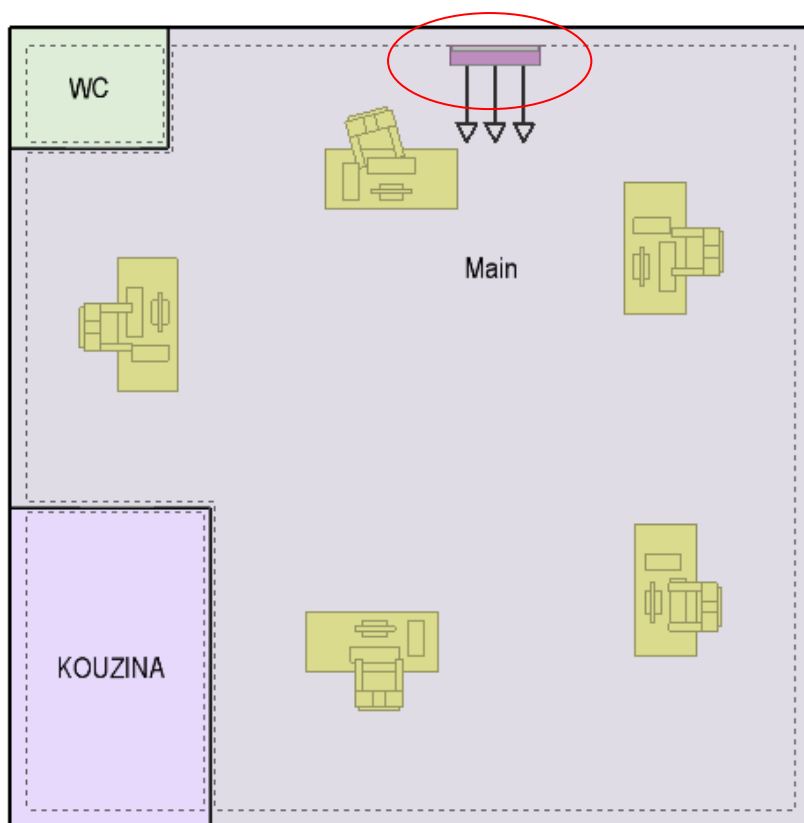
Εικόνα 93. Κάτοψη- PPD- Περίπτωση 4^η [16]



Εικόνα 94. Αξονομετρική προβολή PPD- Περίπτωση 4^η [16]

Περίπτωση 5^η

Στην 5η περίπτωση αλλάζουμε θέση στο κλιματιστικό με σκοπό να παρατηρηθεί κατά πόσο θα μεταβληθούν οι ζητούμενες παράμετροι. Τώρα τοποθετείται στον Βόρειο τοίχο. Παραμένει ίδια η παροχή και η θερμοκρασία του αέρα τροφοδοσίας, 200 l/s και 15 °C αντίστοιχα.



Εικόνα 95. Θέση κλιματιστικού- Περίπτωση 5^η [16]

Έλεγχος πλέγματος

Το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί αυτόματα είναι ικανοποιητικό για να μεταβούμε στο CFD simulation.

Analysis: 5 AC (N) (15/200)

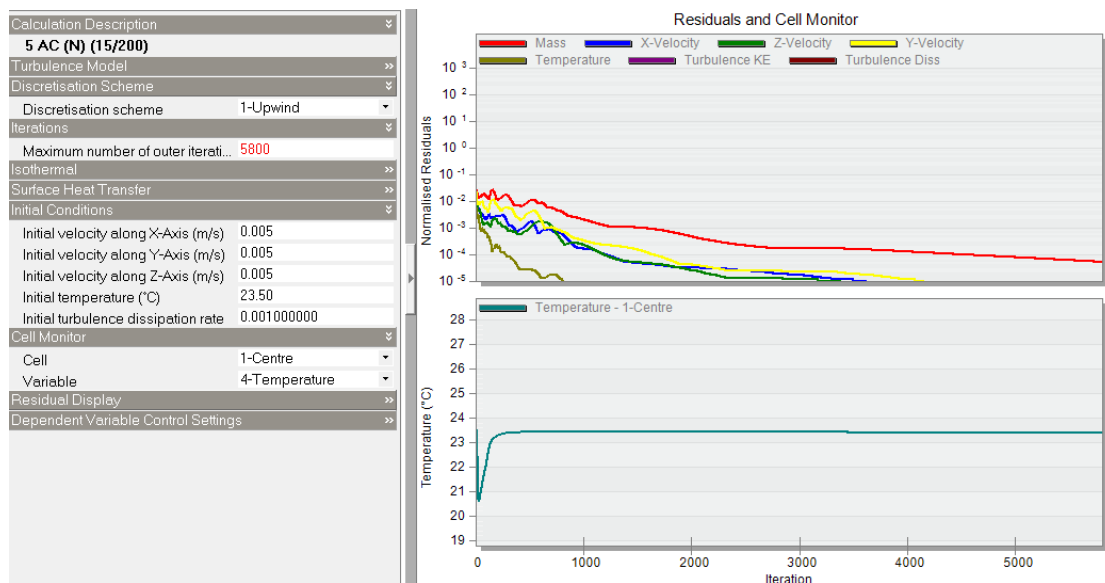
Domain: OFFICE, Block 1

Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	81
Number Y Cells	93
Number Z Cells	21
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	20.4
Available Memory (MB)	950.6
Check	OK

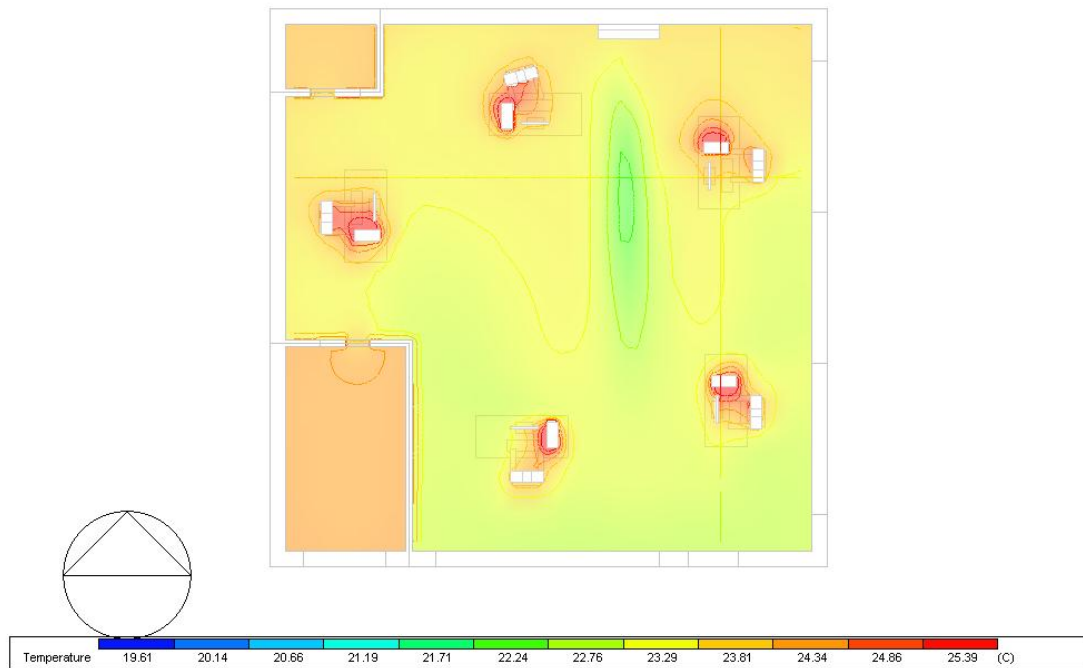
Εικόνα 96. Στατιστικά πλέγματος CFD- Περίπτωση 5^η [16]

Μετά από περίπου 5500 επαναλήψεις όλες οι μεταβλητές έχουν συγκλίνει σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε τα αποτελέσματά μας να είναι ακριβή.



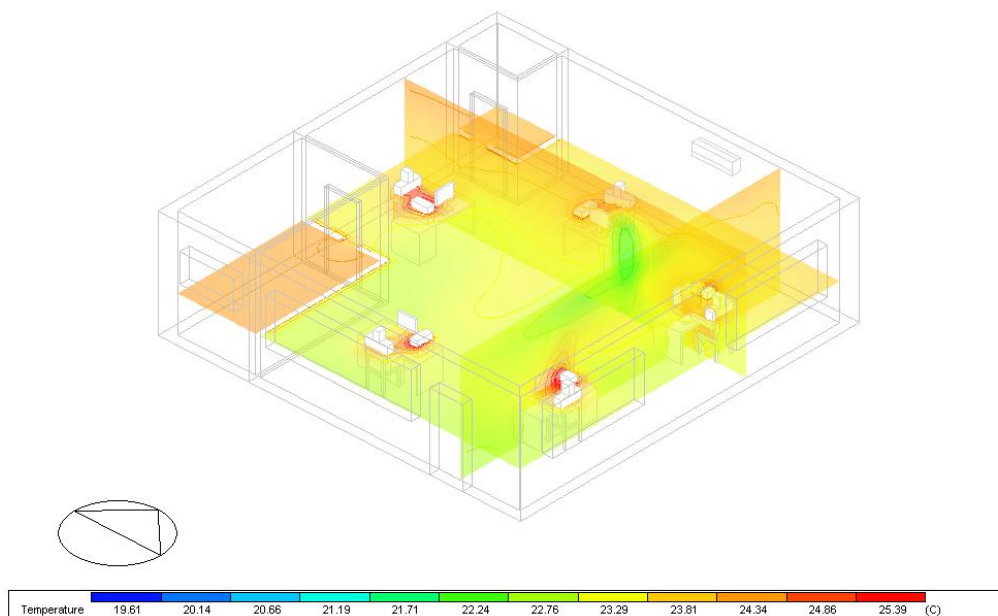
Εικόνα 97. Ανάλυση CFD- Περίπτωση 5^η [16]

Θερμοκρασία

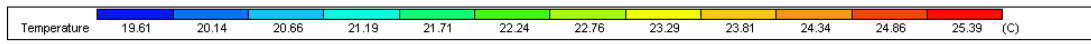
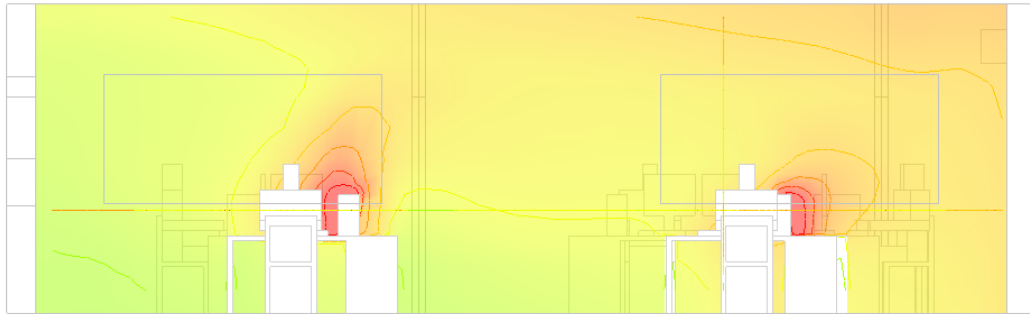


Εικόνα 98. Κάτοψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 5^η

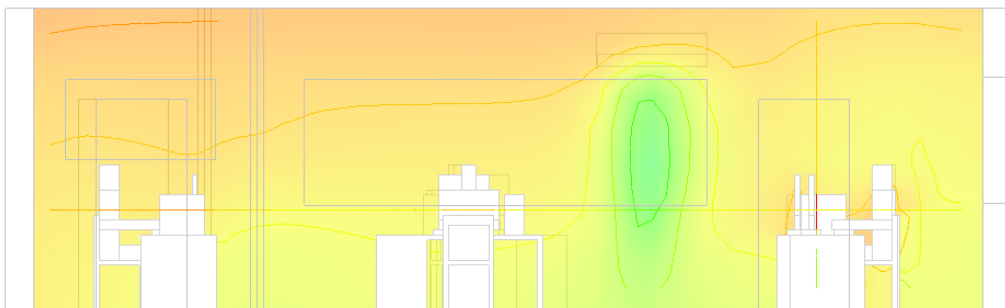
Η τιμές της θερμοκρασίας στον χώρο δεν έχει αλλάξει σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου είχαμε άλλη θέση στο κλιματιστικό. Αυτό που έχει αλλάξει όπως ήταν αναμενόμενο είναι η κατανομή της στον χώρο.



Εικόνα 99. Αξονομετρική προβολή- Θερμοκρασία- Περίπτωση 5^η [16]

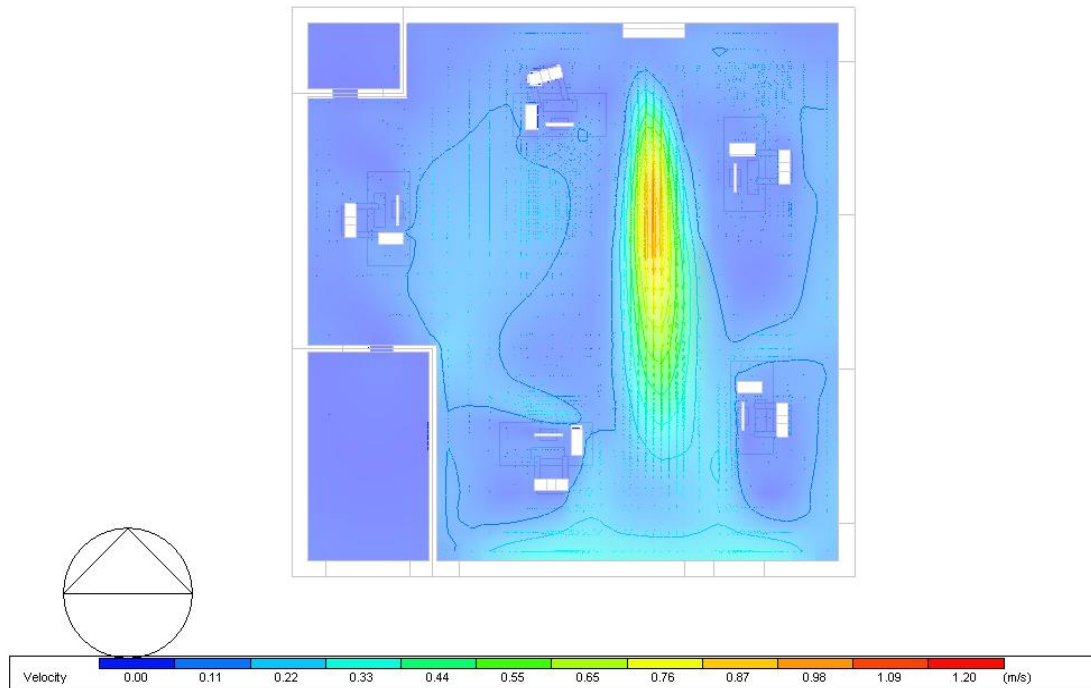


Εικόνα 100. Δεξιά όψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 5^η [16]

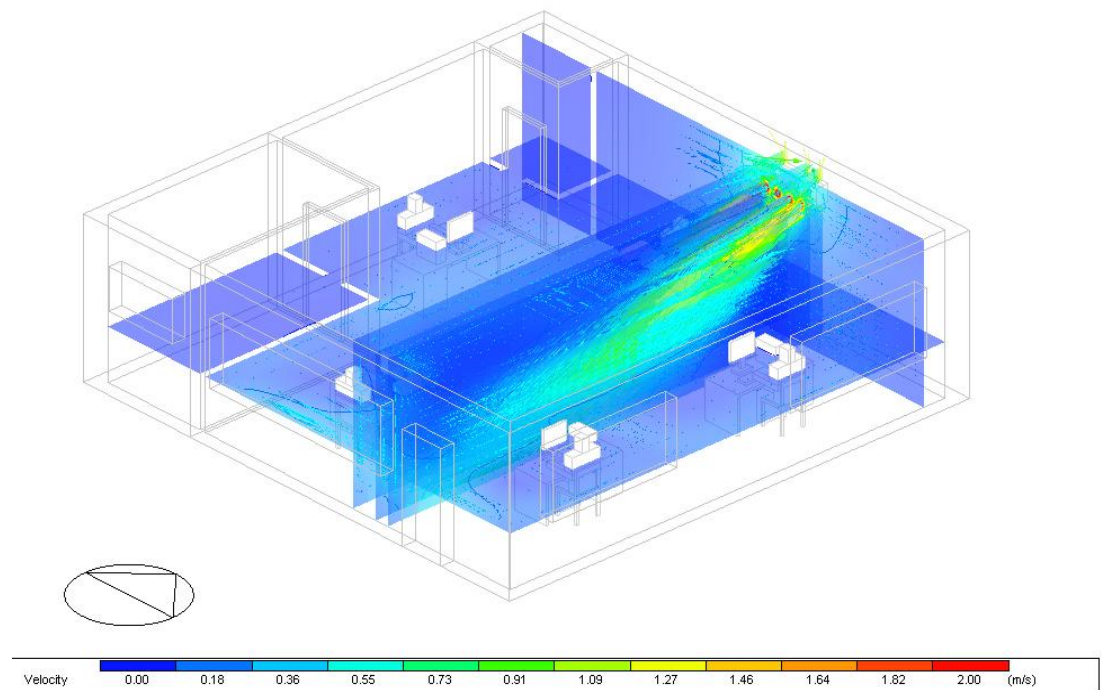


Εικόνα 101. Εμπρός όψη- Θερμοκρασία- Περίπτωση 5^η [16]

Ταχύτητα



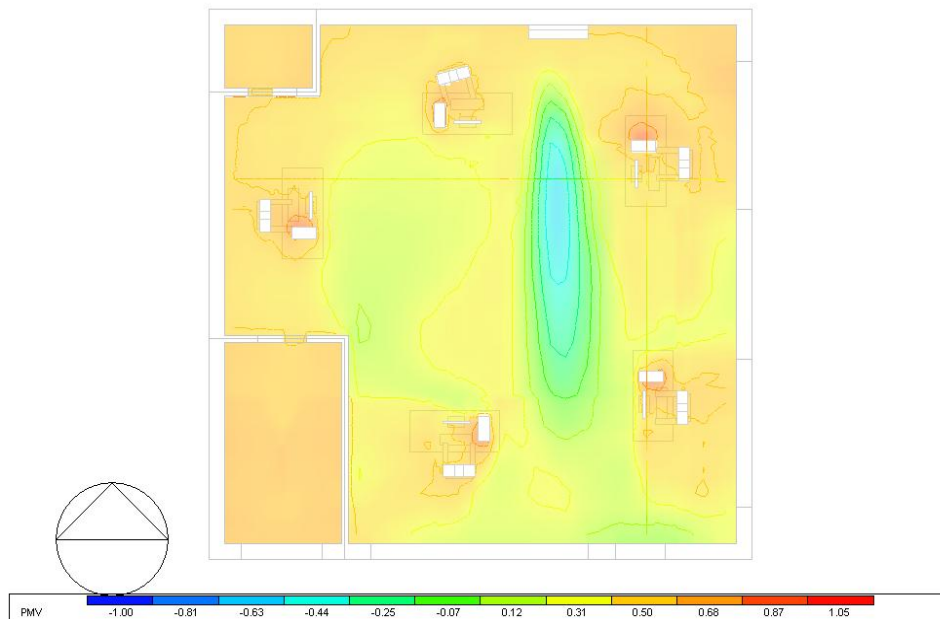
Εικόνα 102. Κάτοψη- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 5^η [16]



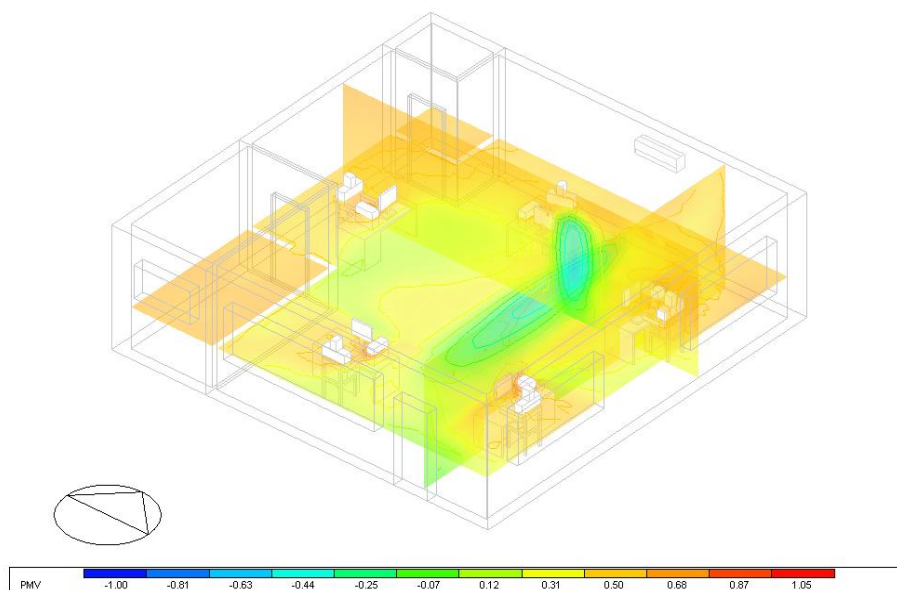
Εικόνα 103. Αξονομετρική προβολή- Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 5^η [16]

Οι ταχύτητες του αέρα στο επίπεδο αναφορά κυμαίνονται από 0.1 έως 0.33. Στην δέσμη αέρα του κλιματιστικού οι τιμές είναι σαφώς μεγαλύτερες έως και 1 m/s.

PMV



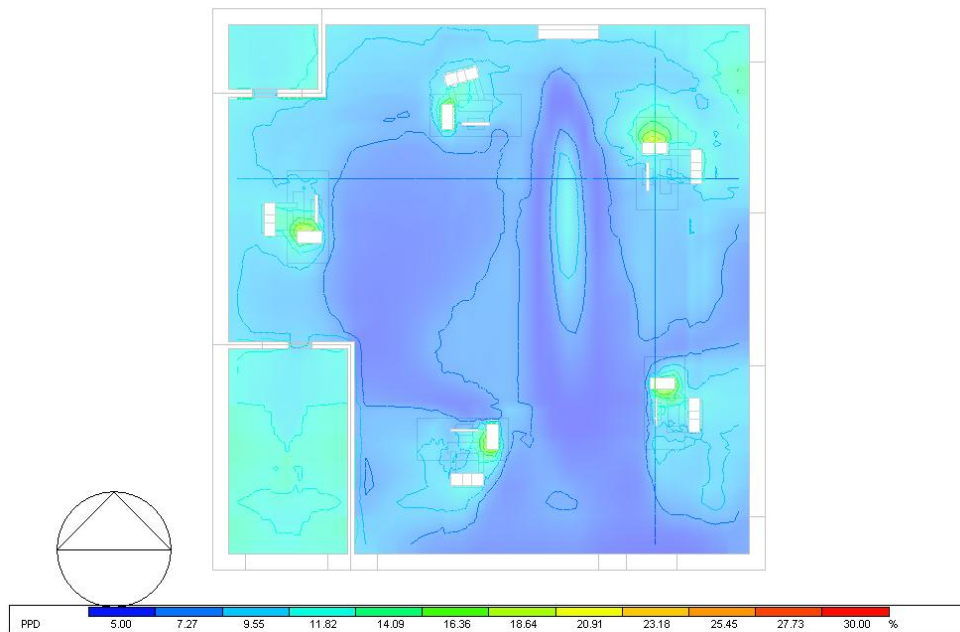
Εικόνα 104. Κάτοψη- PMV- Περίπτωση 5^η [16]



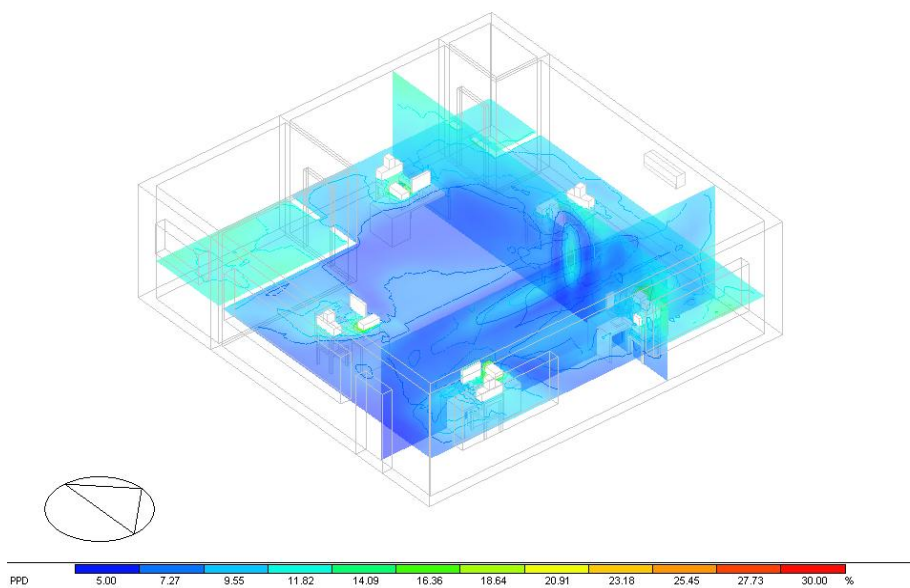
Εικόνα 105. Αξονομετρική προβολή- PMV αέρα- Περίπτωση 5^η [16]

Οι διακύμανση των τιμών του δείκτη PMV είναι σχεδόν ίδια με την Περίπτωση 4 αλλά εδώ παρατηρούμε περισσότερες τιμές να είναι κοντά στο 0.3 (κίτρινες περιοχές) απ'ότι στην Περίπτωση 3.

PPD



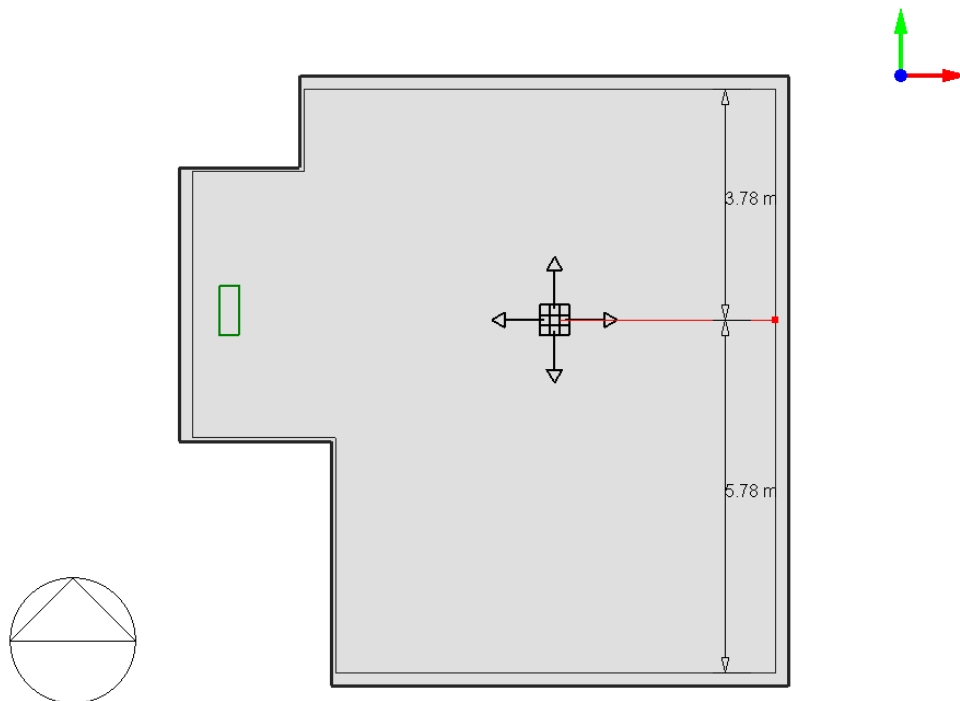
Εικόνα 106. Κάτοψη PPD- Περίπτωση 5^η [16]



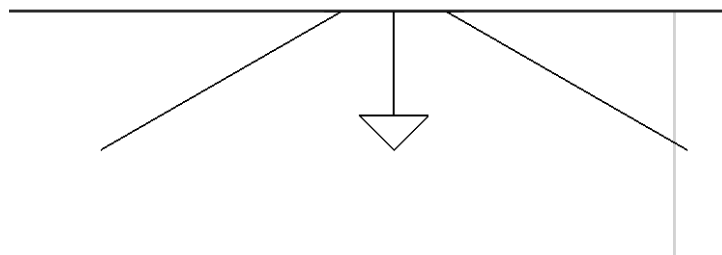
Εικόνα 107. Αξονομετρική προβολή- PPD- Περίπτωση 5^η [16]

Περίπτωση 6^η

Στην 6η περίπτωση ο τρόπος κλιματισμού στον χώρο γίνεται μέσω στομίου προσαγωγής. Συγκεκριμένα τοποθετείται ένα στόμιο προσαγωγής για την τροφοδοσία του αέρα στον χώρο και ένα στόμιο απαγωγής του αέρα. Το στόμιο προσαγωγής πρόκειται για στόμιο τεσσάρων κατευθύνσεων και διαστάσεων 50x50 cm. Ο αέρας εξέρχεται με γωνία 30 μοίρες από το στόμιο και ταχύτητα- παροχή 15 °C-200 l/s, όπως και τις προηγούμενες περιπτώσεις.



Εικόνα 108. Θέση στομίων – Περίπτωση 6^η [16]



Εικόνα 109. Στόμιο 4^{ων} κατευθύνσεων σε πλάγια όψη [16]

Έλεγχος πλέγματος

Analysis: 6 1 4way supp (15/200)

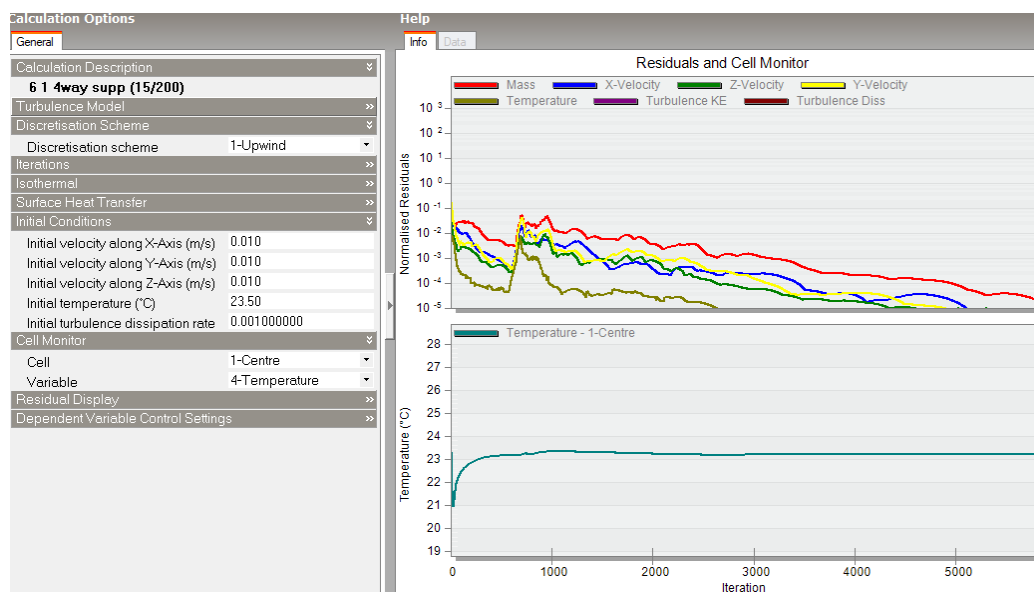
Domain: OFFICE, Block 1

Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	79
Number Y Cells	93
Number Z Cells	19
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	18.0
Available Memory (MB)	935.5
Check	OK

Εικόνα 110. Στατιστικά πλέγματος- Περίπτωση 6^η [16]

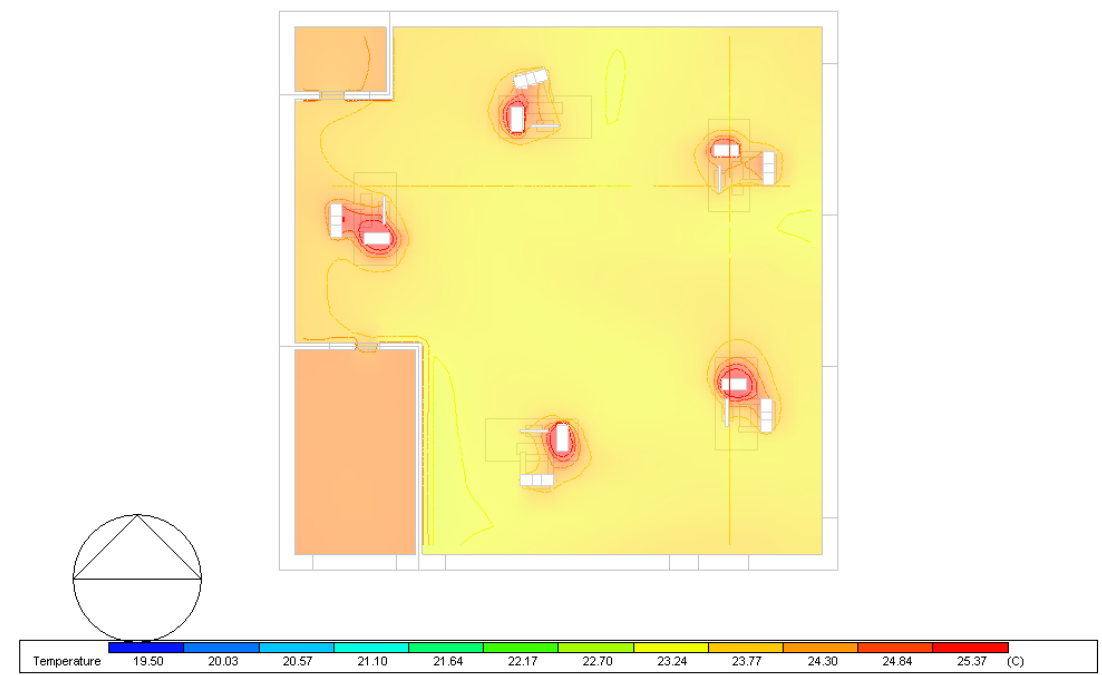
Το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί αυτόματα είναι ικανοποιητικό για να μεταβούμε στο CFD Simulation.



Εικόνα 111. Ανάλυση CFD- Περίπτωση 6^η [16]

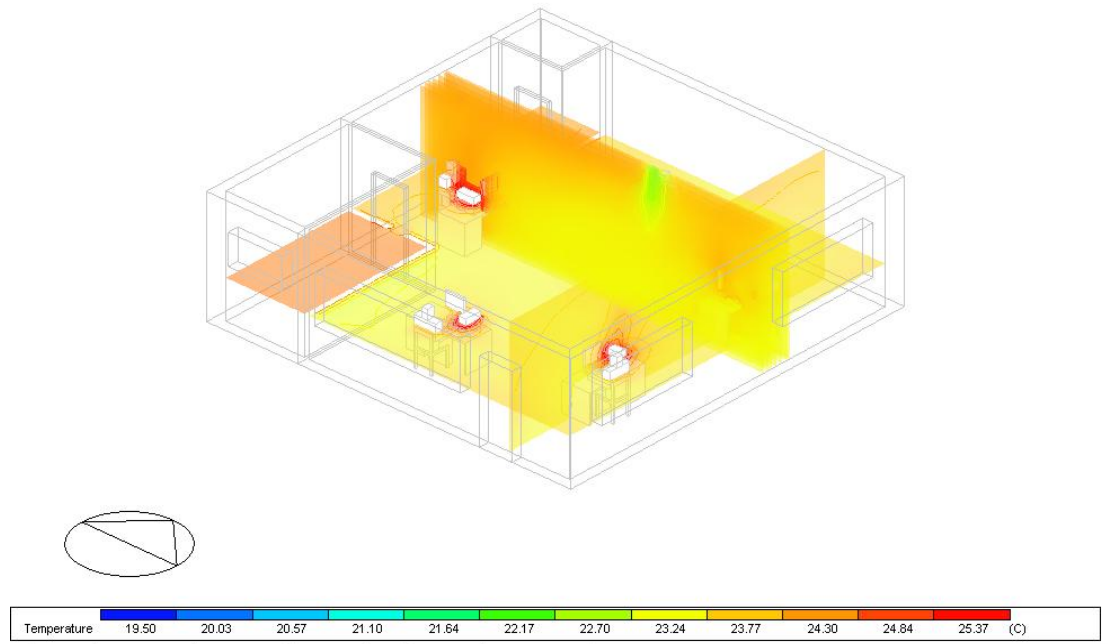
Μετά από περίπου 5500 επαναλήψεις η διαδικασία έχει συγκλίνει ικανοποιητικά ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

Θερμοκρασία

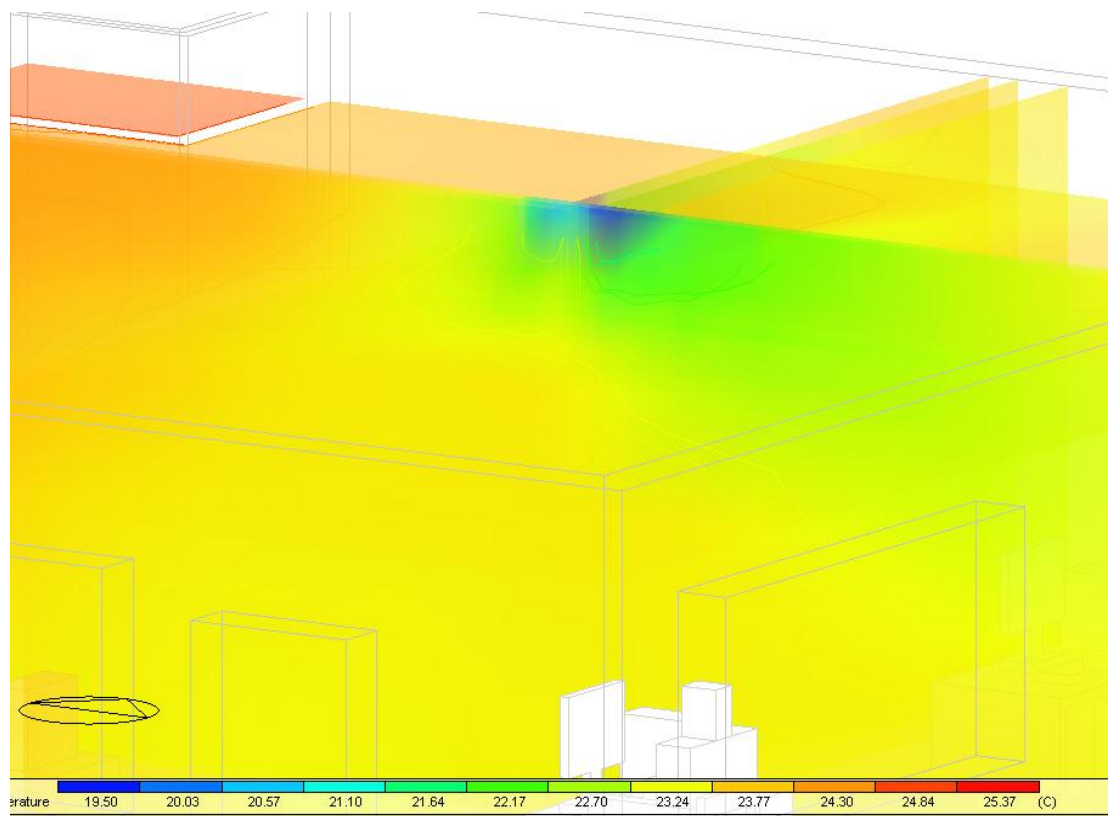


Εικόνα 112. Κάτοψη- Θερμοκρασία – Περίπτωση 6^η [16]

Όσον αφορά την θερμοκρασία στον χώρο παρατηρούμε μια αρκετά ομοιόμορφη κατανομή και τιμές στο εύρος 23.2 με 24.3 °C.

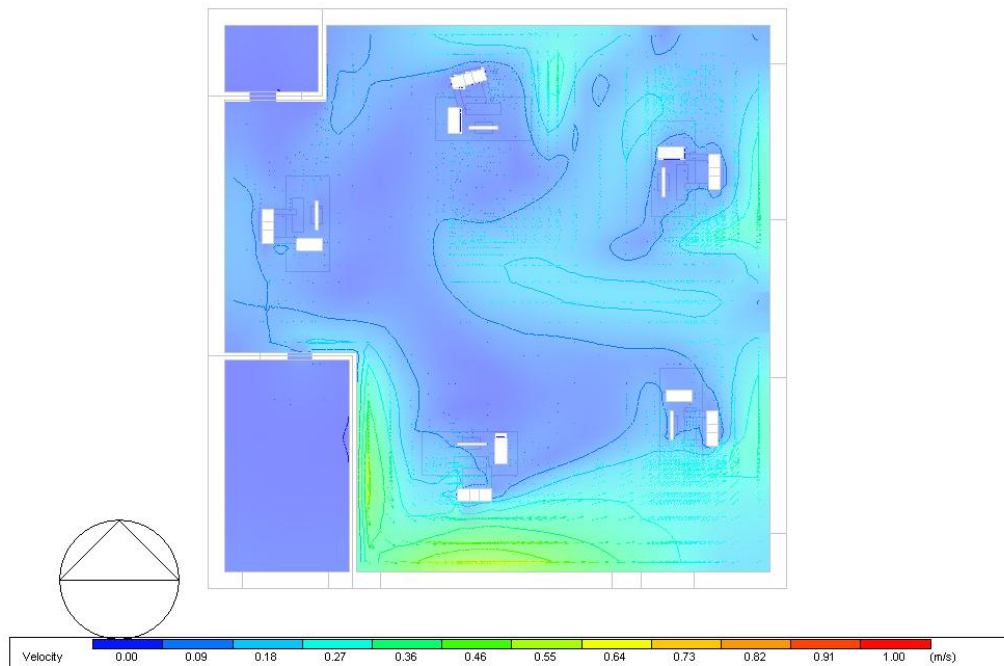


Εικόνα 113. Αξονομετρική προβολή- Θερμοκρασία- Περίπτωση 6^η [16]

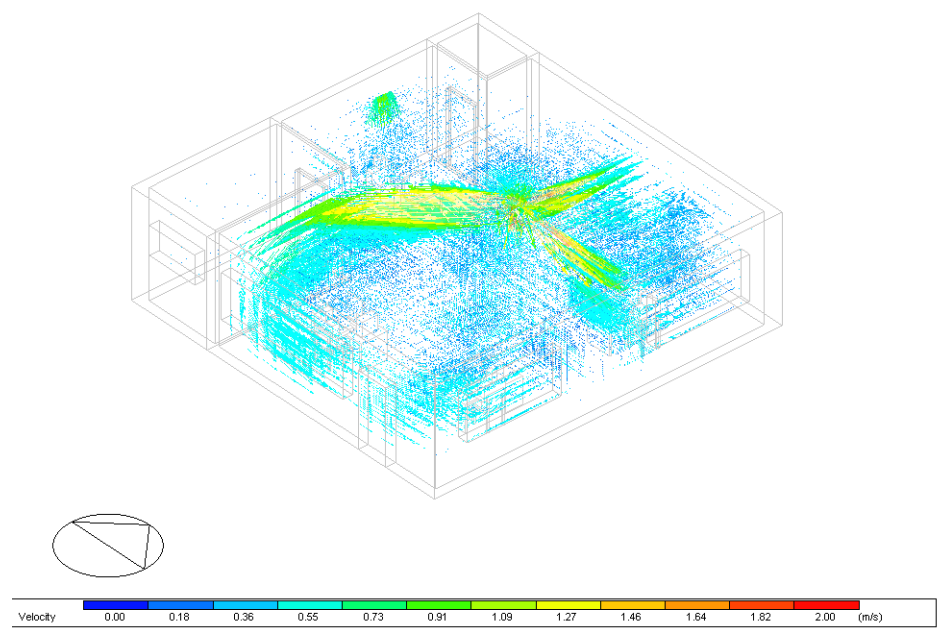


Εικόνα 114. Θερμοκρασία στο στόμιο προσαγωγής- Περίπτωση 6^η [16]

Ταχύτητα



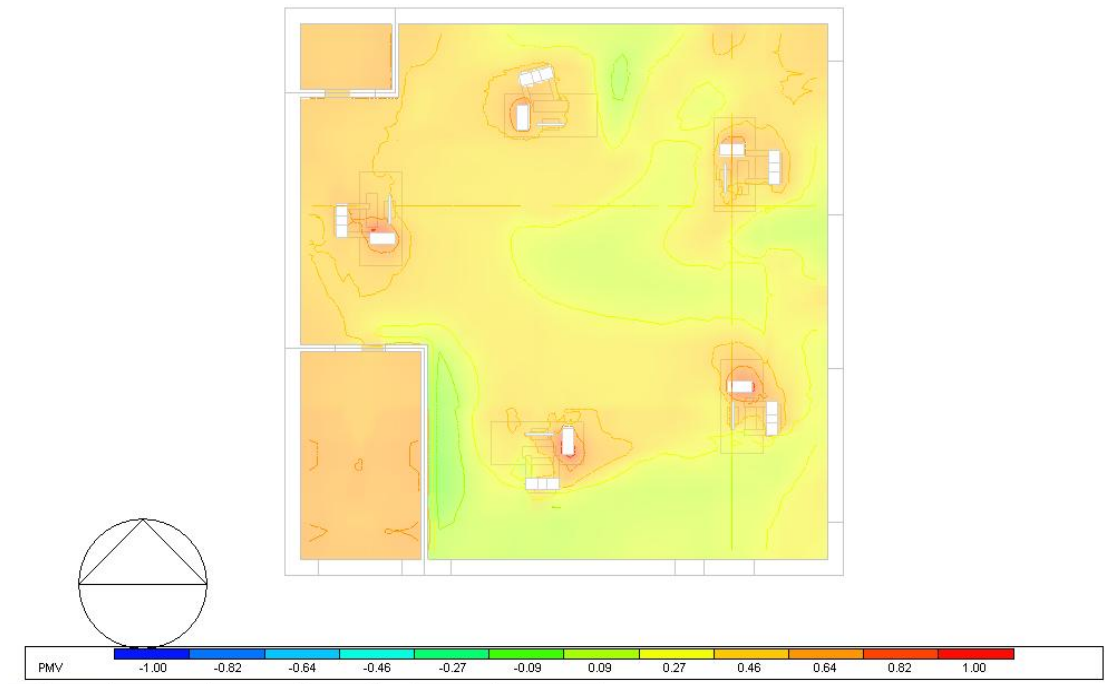
Εικόνα 115. Κάτοψη στο στόμιο προσαγωγής- Περίπτωση 6^η [16]



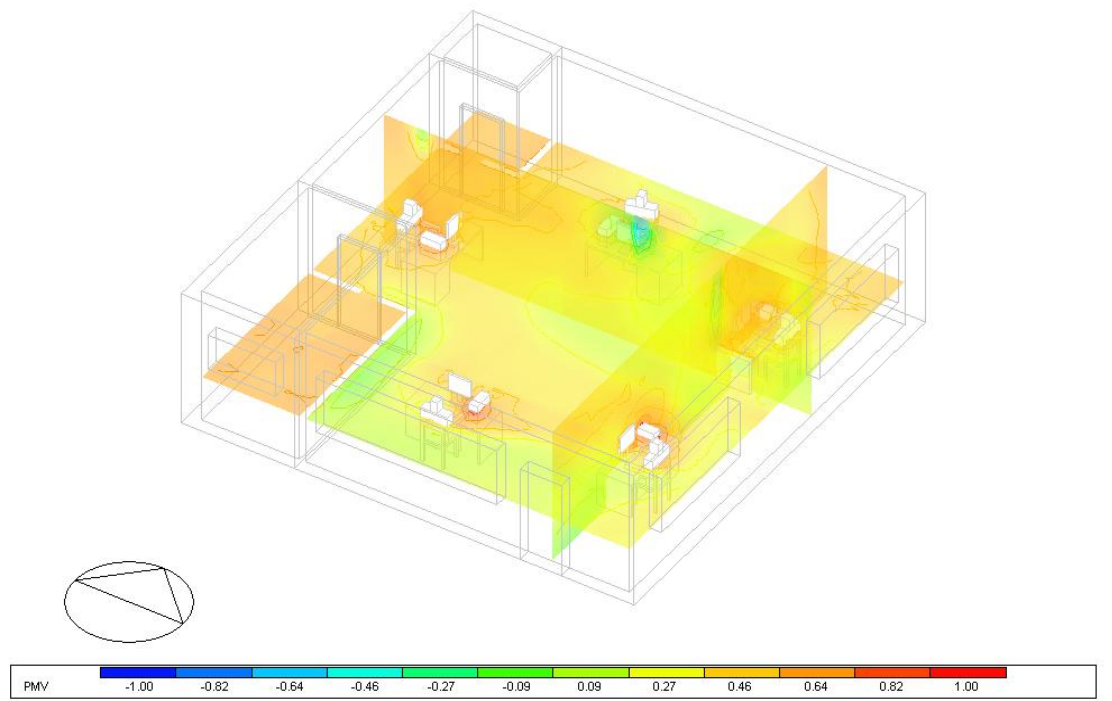
Εικόνα 116. Διευθύνσεις ταχυτήτων - Περίπτωση 6^η [16]

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητες του αέρα σε κάποια σημεία είναι αρκετά μεγάλες για εσωτερικό χώρο γραφείου. Αυτό μπορεί να διορθωθεί αυξάνοντας την διάσταση του στομίου προσαγωγής.

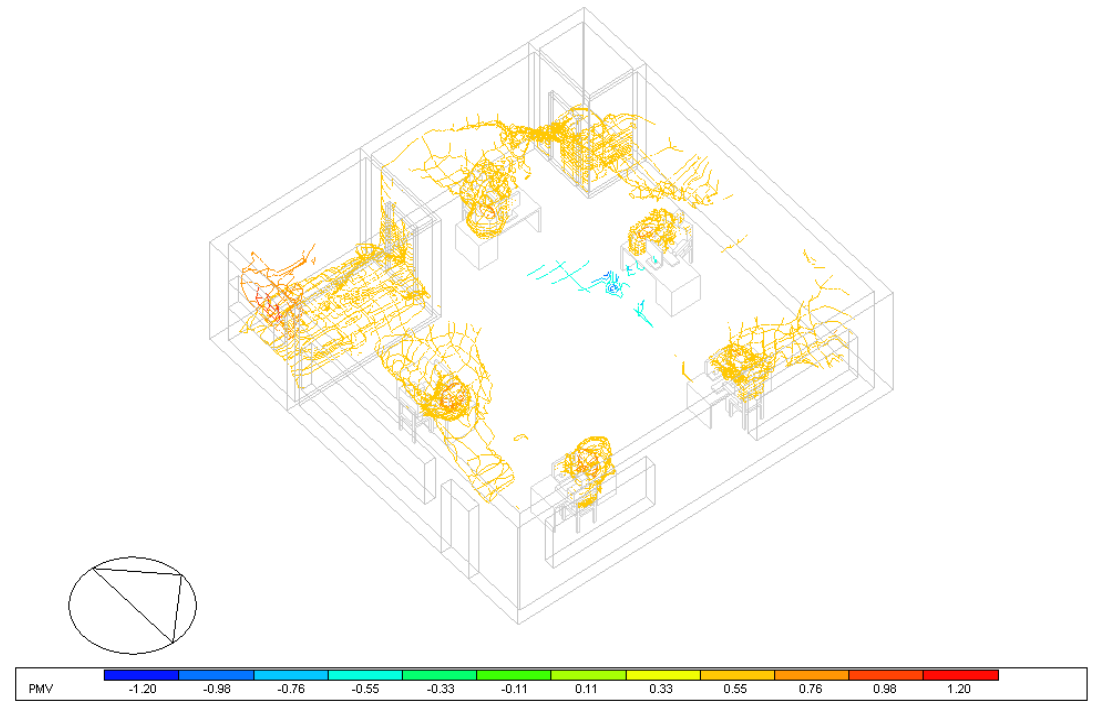
PMV



Εικόνα 117. Κάτοψη –PMV – Περίπτωση 6^η [16]



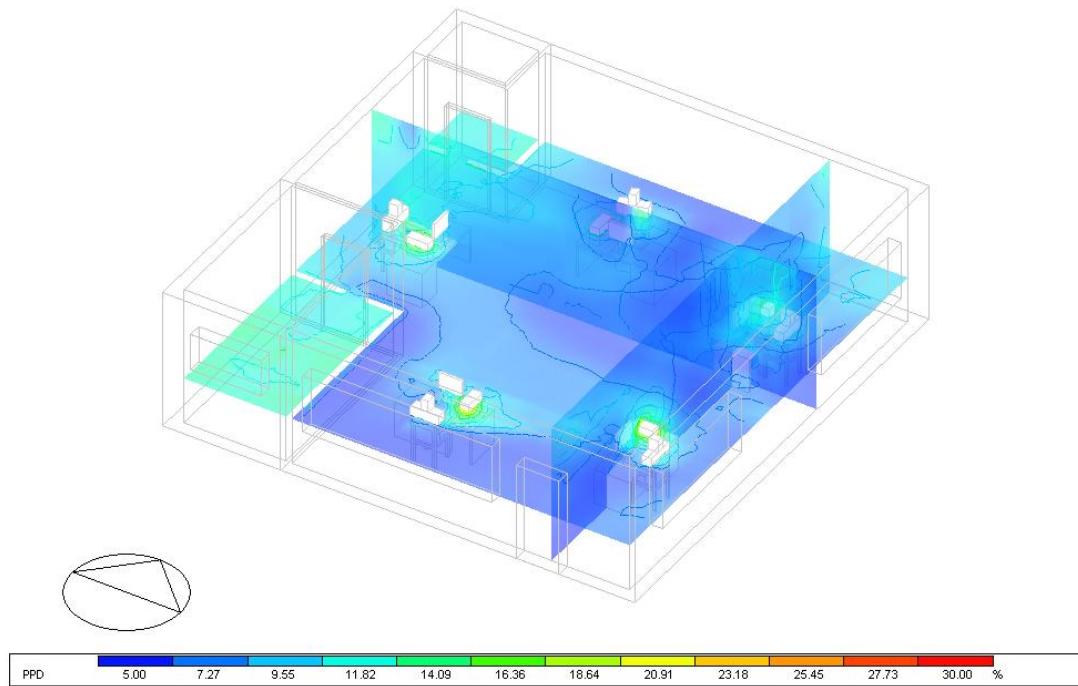
Εικόνα 118. Αξονομετρική προβολή –PMV – Περίπτωση 6^η [16]



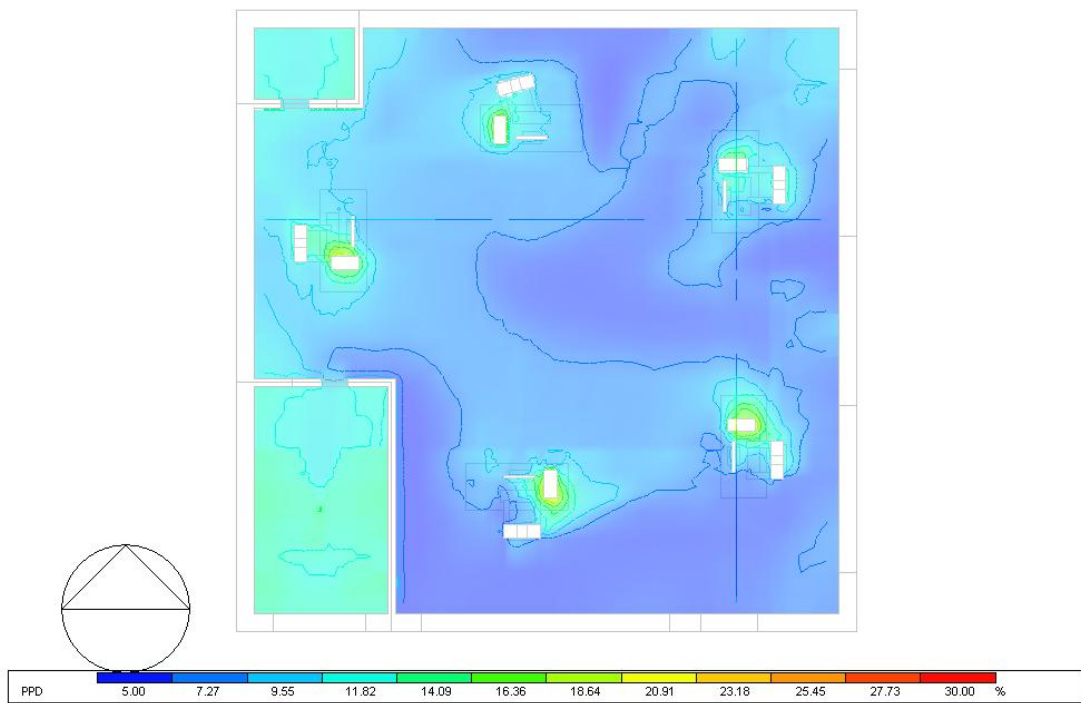
Εικόνα 119. Ισουψείς καμπύλες με τιμή PMV πάνω από 0.55 – Περίπτωση 6^η [16]

Οι τιμές του δείκτη PMV για την περίπτωση 6 κυμαίνονται από 0.27 έως 0.64 σε όλο τον χώρο στο επίπεδο αναφοράς (1m από το έδαφος) αλλά χωρίς πολύ καλή ομοιομορφία στην κατανομή.

PPD



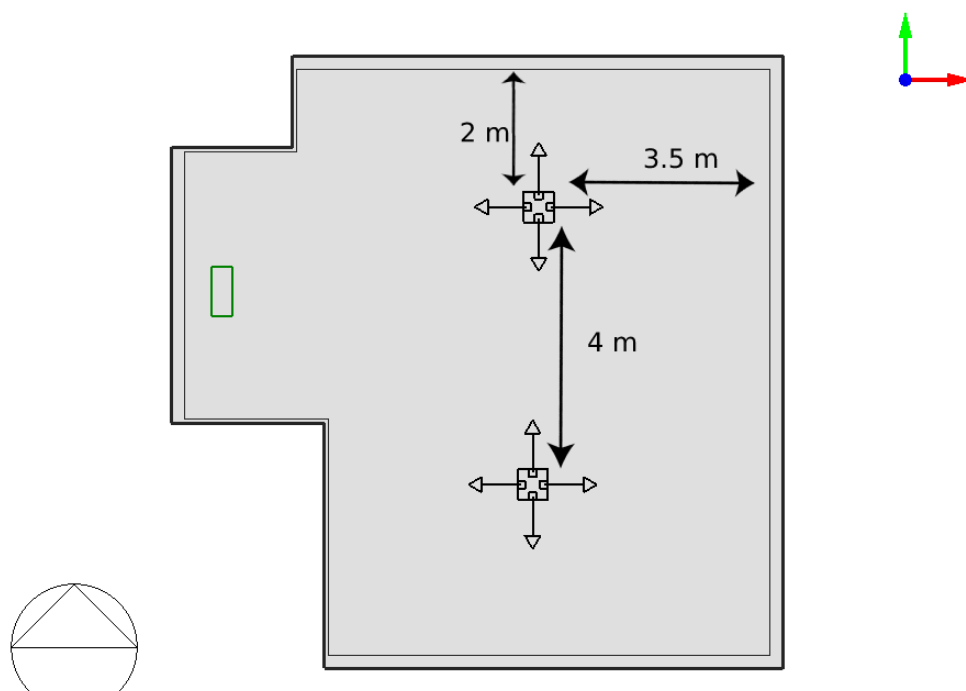
Εικόνα 120. Αξονομετρική προβολή –PPD – Περίπτωση 6^η [16]



Εικόνα 121. Κάτοψη –PPD – Περίπτωση 6^η [16]

Περίπτωση 7^η

Στην 7^η περίπτωση αντί για ένα στόμιο προσαγωγής τοποθετούνται δύο. Τα χαρακτηριστικά τους είναι ίδια με την περίπτωση 6. Παραμένει συνολική παροχή αέρα ίση με 200 l/s δηλαδή 100 l/s από κάθε στόμιο.



Εικόνα 122. Θέσεις στομιών – Περίπτωση 7^η [16]

Έλεγχος πλέγματος

Analysis: 7 2 4way supp (15/100)

Domain: OFFICE, Block 1

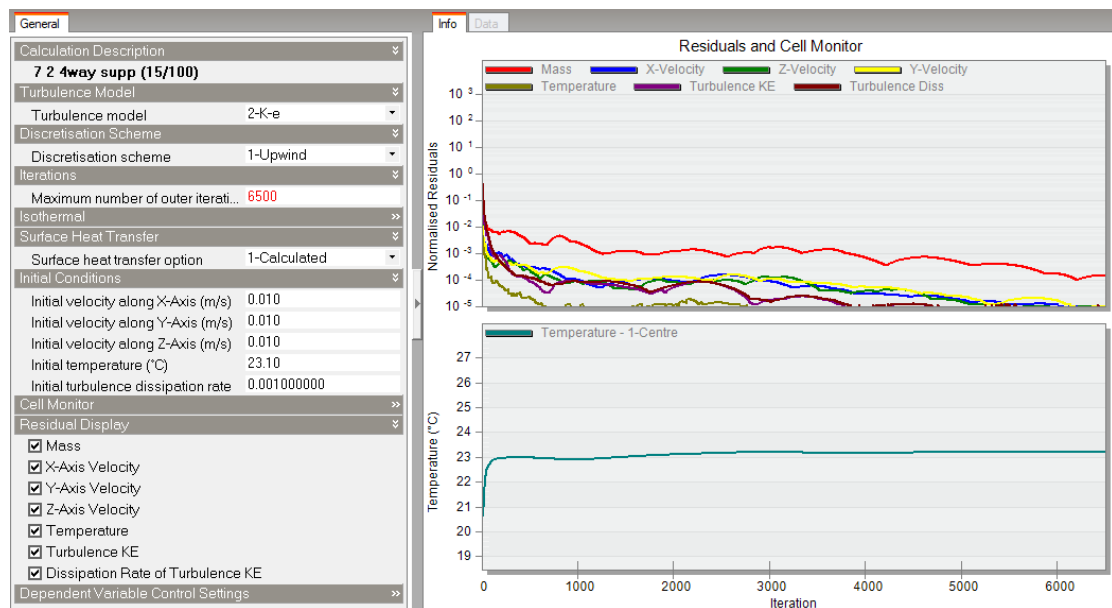
Grid Statistics

Description	Data
Number X Cells	81
Number Y Cells	98
Number Z Cells	19
Max aspect ratio	19.322
Required Memory (MB)	19.4
Available Memory (MB)	919.3
Check	OK

Εικόνα 123. Στατιστικά πλέγματος -Περίπτωση 7^η [16]

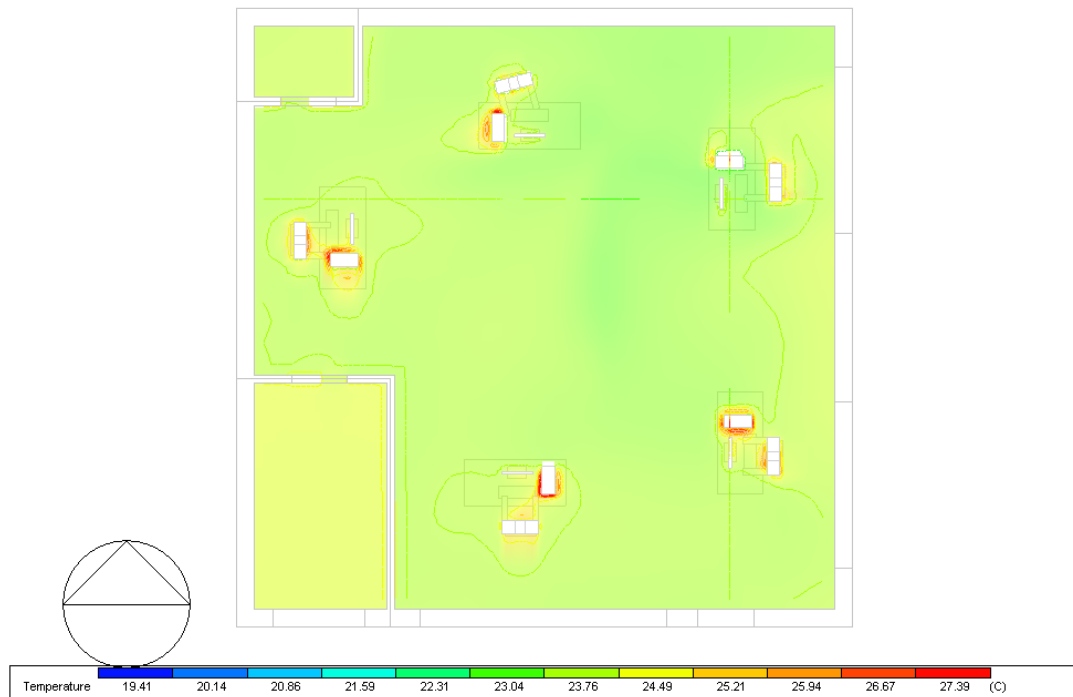
Το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα είναι ικανοποιητικό για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς.

Μετά από περίπου 5000 επαναλήψεις η λύση έχει σταθεροποιηθεί και οι μεταβλητές έχουν συγκλίνει σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

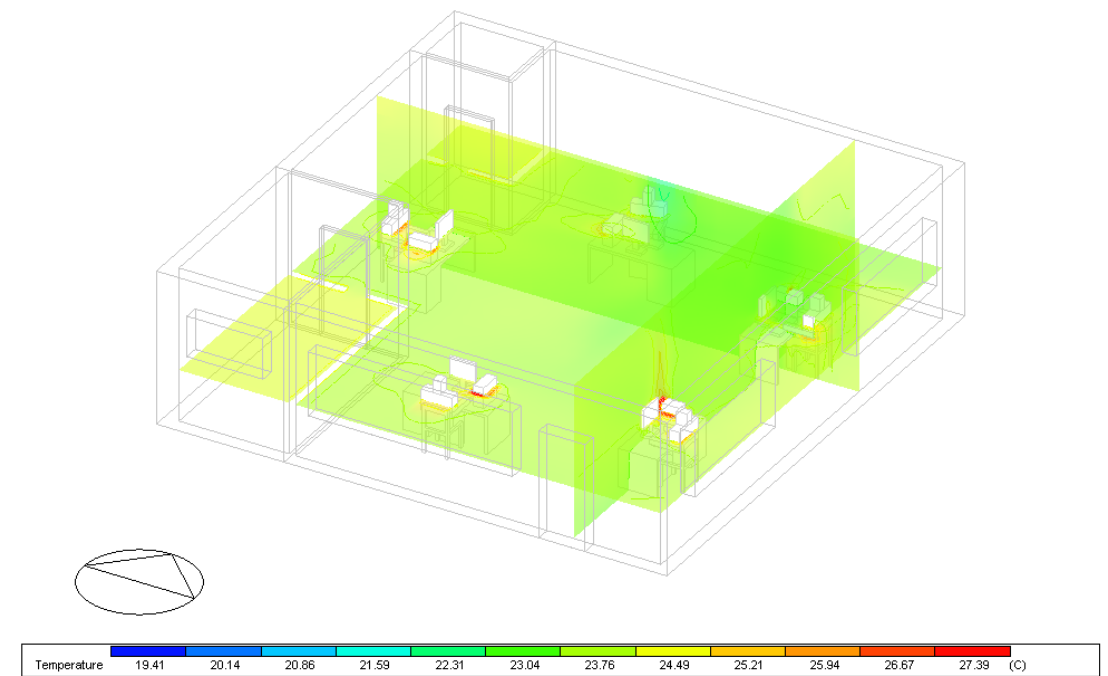


Εικόνα 124. Ανάλυση CFD – Περίπτωση 7^η [16]

Θερμοκρασία



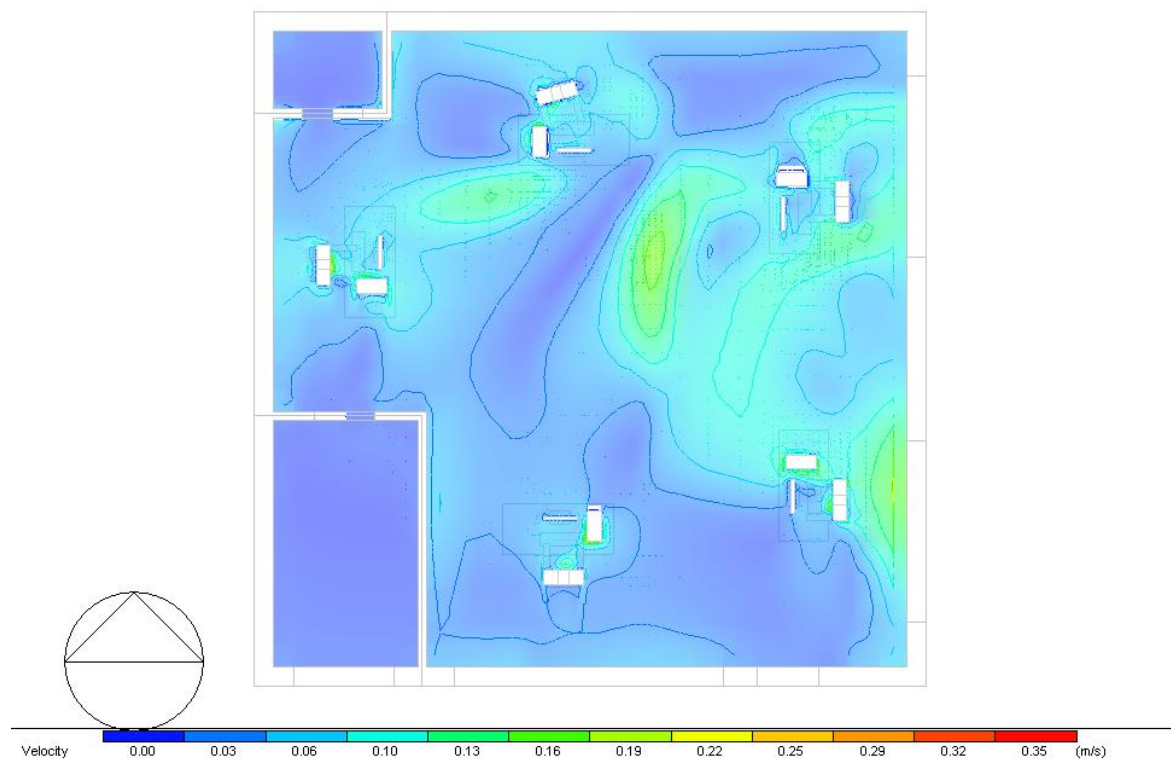
Εικόνα 125. Κάτοψη – Θερμοκρασία- Περίπτωση 7^η



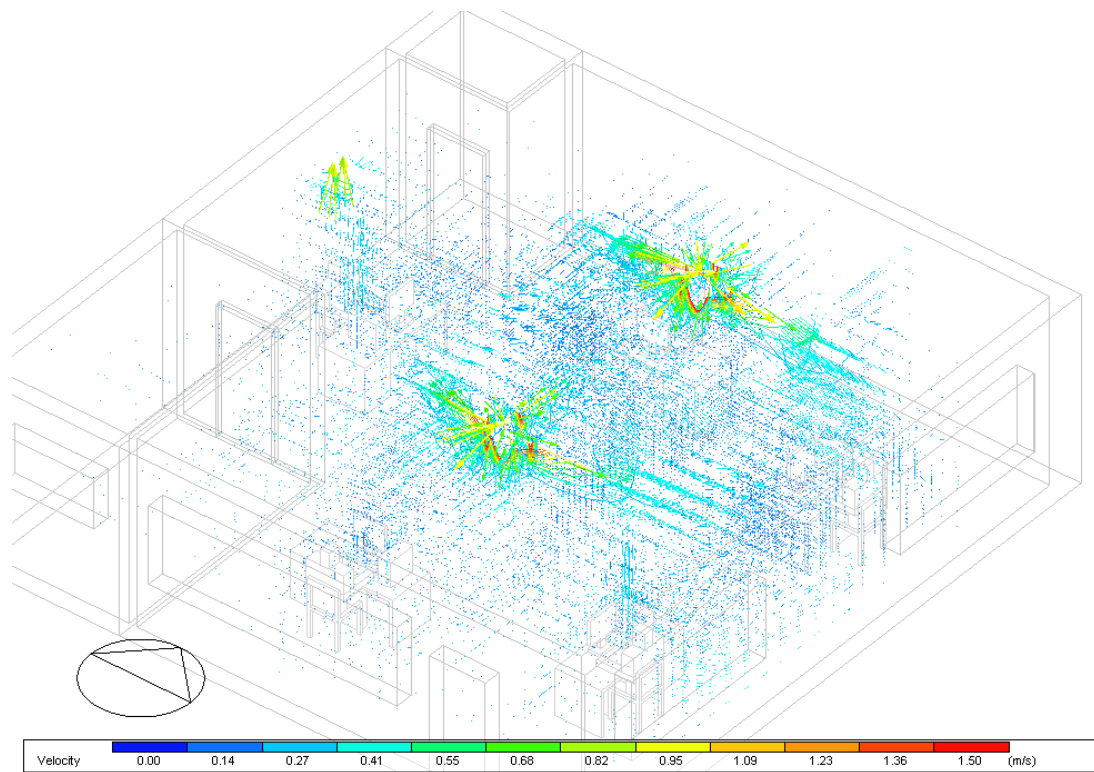
Εικόνα 126. Αξονομετρική προβολή – Θερμοκρασία- Περίπτωση 7^η [16]

Για τις τιμές της θερμοκρασία στο επίπεδο αναφοράς που έχουμε ορίσει (1 m από το έδαφος) παρατηρούμε ένα εύρος τιμών 23 με 23.7 °C. Επίσης παρατηρούμε και μία καλή ομοιομορφία στην κατανομή των θερμοκρασιών στον χώρο σε σχέση με την περίπτωση 6. Αυτό ήταν κάπως αναμενόμενο διότι σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου ο ψυχρός αέρας εξερχόταν από ένα στόμιο, τώρα εξέρχεται από 2 με αποτέλεσμα στον χώρο να διαχέεται καλύτερα.

Ταχύτητα



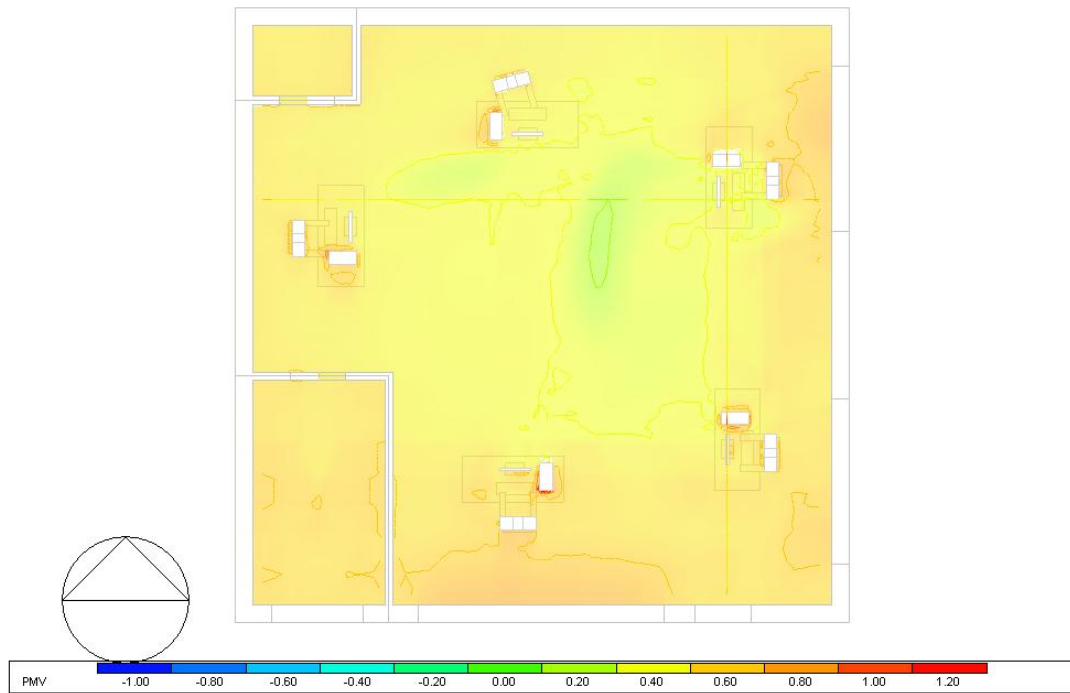
Εικόνα 127. Κάτοψη – Ταχύτητα αέρα- Περίπτωση 7^η [16]



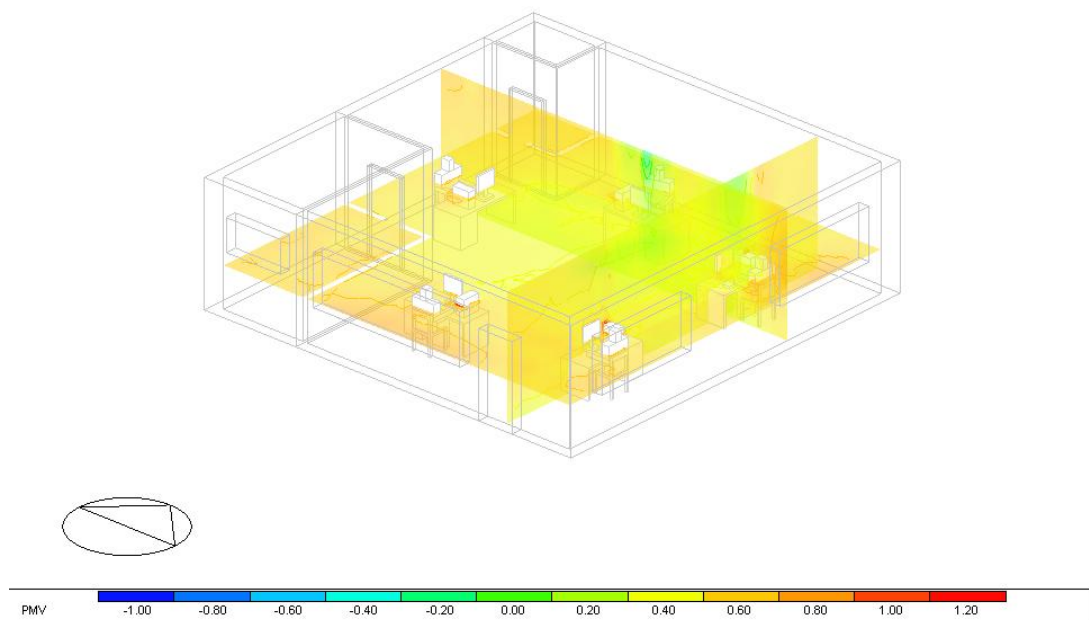
Εικόνα 128. Διευθύνσεις ταχυτήτων - - Περίπτωση 7^η [16]

Οι τιμές της ταχύτητας του αέρα στο επίπεδο αναφοράς (1 m από το έδαφος) είναι έως 0.19 m/s, μια ικανοποιητική τιμή για χώρο γραφείου.

PMV



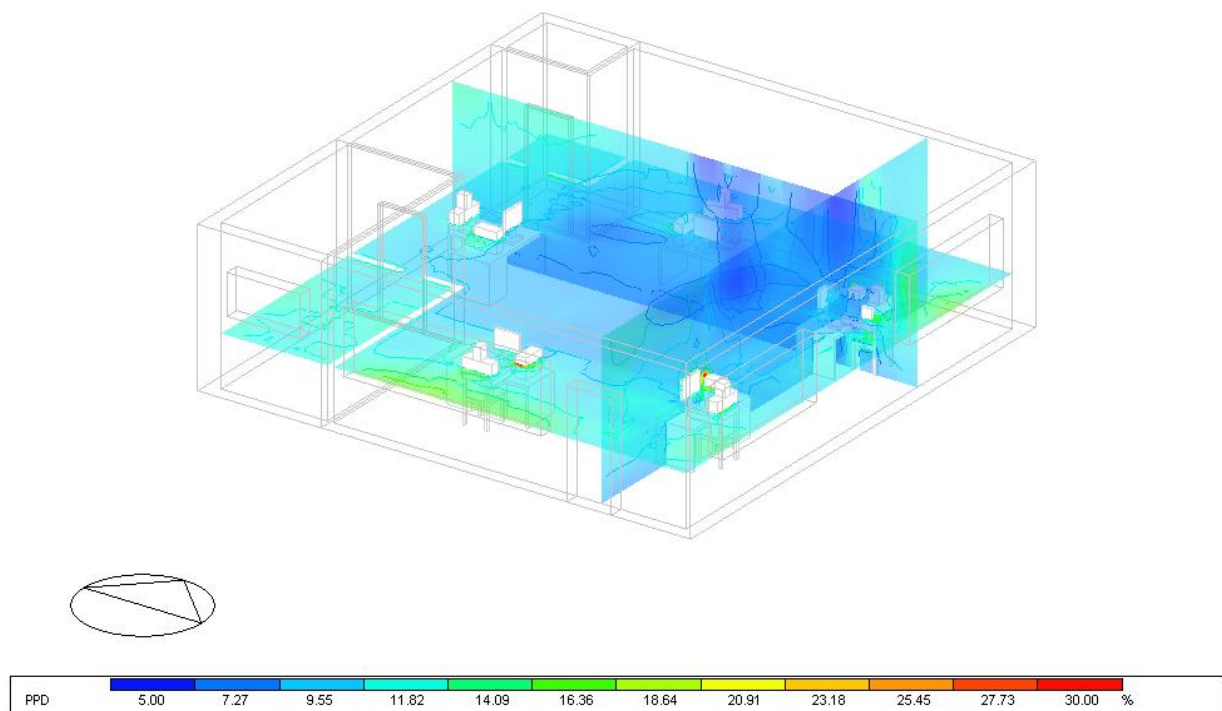
Εικόνα 129. Κάτοψη - PMV - Περίπτωση 7^η [16]



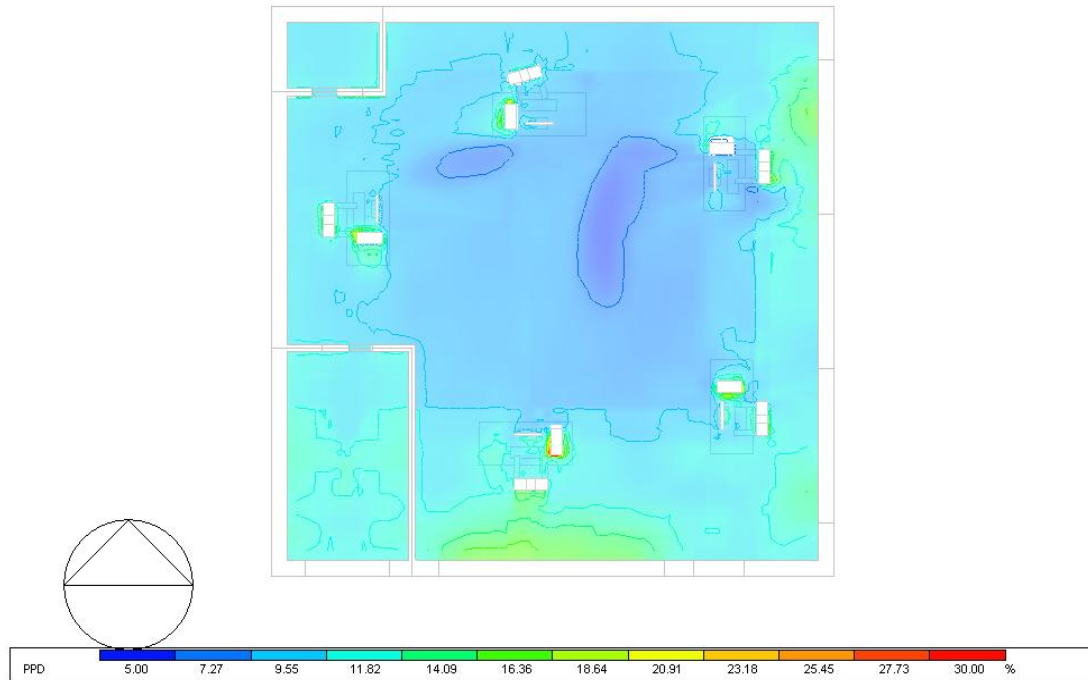
Εικόνα 130. Αξονομετρική προβολή - PMV - Περίπτωση 7^η [16]

Παρατηρούμε μια αρκετά ομοιόμορφη κατανομή του δείκτη PMV στον χώρο με τιμή γύρω στο 0.4 στα περισσότερα σημεία. Ελαφρώς μεγαλύτερη είναι η τιμή κοντά στα παράθυρα, γύρω στο 0.8 και μικρότερη κοντά στα στόμια προσαγωγής του αέρα, γύρω στο 0

PPD



Εικόνα 131. Αξονομετρική προβολή- PPD- Περίπτωση 7^η [16]



Εικόνα 132. Κάτοψη- PPD- Περίπτωση 7^η [16]

Ίδια εικόνα με τον δείκτη PMV παρουσιάζει προφανώς και ο δείκτης PPD, με ποσοστά δυσαρεστημένων που κυμαίνονται από 7% έως 18%

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραπάνω διαδικασία επικεντρώθηκε στην παρατήρηση των δεικτών θερμικής άνεσης PMV και PPD κυρίως μεταβάλλοντας μόνο το είδος της τερματικής μονάδας και την τοποθέτηση της στον χώρο. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας που συγκεντρώνει συνολικά το εύρος τιμών του δείκτη PMV που παρατηρήθηκε σε κάθε περίπτωση αλλά και την ομοιομορφία του στο επίπεδο αναφοράς, δηλαδή στο 1 m από το έδαφος.

	PMV στο επίπεδο αναφοράς	Ομοιομορφία
Περίπτωση 1 ^η	0.7 με 1.4	Κακή
Περίπτωση 2 ^η	-0.3 με 0.6	Κακή
Περίπτωση 3 ^η	-0.1 με 0.6	Μέτρια
Περίπτωση 4 ^η	-0.4 με 0.4	Καλή
Περίπτωση 5 ^η	-0.4 με 0.5	Καλή
Περίπτωση 6 ^η	0.1 με 0.4	Μέτρια
Περίπτωση 7 ^η	0.2 με 0.6	Καλύτερη

Πίνακας 14. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα PMV

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα σε πρώτο επίπεδο η καλύτερη επιλογή όσον αφορά της συνθήκες θερμικής άνεσης είναι η περίπτωση 7 δηλαδή η χρήση δύο στομίων προσαγωγής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν έχουν καθολική ισχύ. Δηλαδή ανταποκρίνονται στο συγκεκριμένο μοντέλο γραφείου που σχεδιάστηκε και για τις συνθήκες που έχουν αναφερθεί. Σε άλλο χώρο που διαθέτει έστω και λίγα διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά θα είχαν προκύψει διαφορετικά αποτελέσματα.

Συνεπώς η παρούσα εργασία είναι μια προσπάθεια ανάδειξης μιας διαδικασίας κατά την οποία ο μηχανικός όταν την ακολουθήσει έχει την δυνατότητα να σχεδιάσει ένα ποιοτικότερο εσωτερικό κλίμα για τον χώρο τον οποίο μελετάει. Προφανώς υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό τον τελικό σκοπό και οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, αλλά σε ένα πρώτο επίπεδο μπορούμε να αποκομίσουμε χρήσιμες πληροφορίες για τον χώρο που μελετάμε και για την προβλεπόμενη θερμική άνεση.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Παρακάτω ακολουθούν μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

- Μία πρόταση είναι να εφαρμοστεί η παραπάνω διαδικασία για ένα πραγματικό γραφείο. Έτσι τα αποτελέσματα που θα πάρουμε θα είναι περισσότερο χρήσιμα και άμεσα εφαρμόσιμα την πράξη
- Άλλη πρόταση είναι να εφαρμοστεί η διαδικασία και σε άλλους χώρους που η θερμική άνεση έχει σημασία, όπως είναι οι σχολικές αίθουσες, αμφιθέατρα.
- Ακόμα μπορεί να επεκταθεί η μελέτη, συμπεριλαμβάνοντας και τον φυσικό αερισμό του χώρου ώστε να παρατηρήσουμε εκ νέου τα αποτελέσματα.
- Επίσης προτείνεται να ακολουθηθεί η διαδικασία επικεντρωμένη σε ένα μόνο τύπο θερματικής μονάδας ελέγχοντας περισσότερες πιθανές θέσεις αλλά και περισσότερες συνθήκες του αέρα.
- Ακόμα μπορεί να επεκταθεί η μελέτη και για την θέρμανση του χώρου και όχι μόνο για την ψύξη του.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Liu Yang, Haiyan Yan, Joseph C.Lam, *Thermal Comfort and building energy consumption implications*, 2014
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, *Thermal Enviromental Conditions for Human Occurance*, 2013
- [3] Noel Djongyang, Rene Tchinda, Donatien Njomo, *Thermal comfort: A review paper*, 2010
- [4] Mamdooh Alwetaishi, *Impact of Building Function on thermal comfort*, 2016
- [5] N. Metje, M. Sterling, C.J. Baker, *Pedestrian comfort using clothing values and body temperatures*, 2008
- [6] Κίμων Αντωνόπουλος , *Κλιματισμός* , Αθήνα, 2015
- [7] Τεχνική Οδηγία TOTEE_20701-1_2017
- [8] Άγις Μ. Παπαδόπουλος, *Θερμική Άνεση στα κτίρια. Νέα Πρότυπα και βελτίωση Θερμικής Άνεσης στα Κτίρια*, 2006
- [9]] Amit Kaushik, Mohammed Arif, Prasad Tumula, Obas Ebohon, *Effect of thermal comfort on occupant productivity in office buildings: Response surface analysis*, 2020
- [10] Derek Clements – Croome, *Creative and productive workplaces a review*, 2015
- [11] William J.Fisk, *How IEQ Affects Health and Productivity* , 2002
- [12] Derek Clements-Croome, *Work performance productivity and indoor air*, 2008
- [13] Can Ekici, *A review of thermal comfort and method of using Fanger’s PMV equation*, 2013
- [14] https://designbuilder.co.uk/helpv6.0/Content/Thermal_Comfort.htm
- [15] ISO 7730:2005 Standard, *Ergonomics of thermal environment- Analytical interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005
- [16] <https://designbuilder.co.uk/>
- [17] DesignBuilder, *CFD Manual document*
- [18] DesignBuilder, *Technical CFD Documentation*
- [19] Exizidou Parthena, *Simulation based auditing*, 2012