ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ (HVAC) ΣΤΗ ΦΑΡΜΑΚΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... - 8 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ..... - 9 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ..... - 13 -

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... - 16 -

ABSTRACT ..... - 17 -

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ..... - 18 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Γενική εισαγωγή στα cleanrooms ..... - 19 -

1.1 Εισαγωγή - Cleanrooms, τυποποιήσεις και νομοθεσία ..... - 19 -

1.2 Γενικές τυποποιήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων αέρα για cleanrooms ..... - 20 -

1.3 Τυποποιήσεις για τη φαρμακοβιομηχανία ..... - 22 -

1.4 Σύγχρονα πρότυπα ..... - 25 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Συστήματα HVAC ..... - 29 -

2.1 Εισαγωγή - Αρχές λειτουργίας HVAC και κριτήρια επιλογής τους ..... - 29 -

2.2 Χρήσεις HVAC ..... - 29 -

2.3 Γενικές αρχές λειτουργίας HVAC ..... - 30 -

2.4 Κριτήρια και περιορισμοί επιλογής HVAC ..... - 40 -

2.4.1 Περιορισμοί Συστήματος ..... - 41 -

2.4.2 Περιορισμοί Εγκατάστασης ..... - 42 -

2.4.3 Επιλογή με βάση τα φορτία ..... - 43 -

2.4.4 Επιλογή με βάση τη ρύθμιση της ψύξης-θέρμανσης χώρου και της υγρασίας ...- 43 -

2.4.5 Επιλογή με βάση τα οικονομικά κριτήρια ..... - 43 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Θέρμανση ..... - 45 -

3.1 Εισαγωγή – Θέρμανση ..... - 45 -

3.2 Θέρμανση νερού ..... - 49 -

3.2.1 Θέρμανση νερού με χρήση καυσίμου ..... - 49 -

3.2.1.1. Λέβητες ..... - 49 -

3.2.1.2 Καυστήρες ..... - 51 -

3.2.2 Θέρμανση νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας..... - 52 -

3.2.2.1 Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού με χρήση δεξαμενής αποθηκεύσεως (Electric storage tank water heater (ESTWH)) ..... - 52 -

3.2.2.2 Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης..... - 53 -

3.2.3 Θέρμανση νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας ..... - 54 -

3.2.3.1 Ηλιακοί θερμοσίφωνες (SWH) ..... - 54 -

3.2.3.2. Υβριδικοί θερμοσίφωνες ηλιακής / ηλεκτρικής ενέργειας με δεξαμενή αποθήκευσης (HSWH) ..... - 58 -

3.2.4 Θέρμανση νερού με χρήση αντλιών θερμότητας..... - 58 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Ψύξη..... - 60 -

4.1 Ψύξη..... - 60 -

4.2 Εξοπλισμός και εξαρτήματα ψύξης ..... - 61 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Αερισμός και διήθηση αέρα ..... - 64 -

5.1 Η κίνηση του αέρα..... - 64 -

5.2 Εφύγρανση αέρα..... - 64 -

5.3 Αφύγρανση ..... - 65 -

5.4 Φιλτράρισμα αέρα..... - 65 -

5.4.1 Σύστημα διήθησης..... - 66 -

5.4.2 Αρχές διήθησης ..... - 68 -

5.4.3 Τυποποίηση φίλτρων ..... - 69 -

5.4.4 HEPA Filters ..... - 70 -

5.4.5 ULPA Filters..... - 71 -

5.4.6 Δοκιμές φίλτρων ..... - 72 -

5.4.7 Σχεδιασμός και εγκατάσταση φίλτρων ..... - 74 -

5.4.8 Ταχύτητα και παροχή αέρα ..... - 75 -

5.4.9 Ροή αέρα βασισμένη στο ρυθμό εναλλαγών αέρα (Air Change Rate)..... - 77 -

5.5 Είδη ροής εισαγόμενου αέρα στα cleanrooms ..... - 78 -

5.5.1 Σχεδιασμός συστημάτων ροής μονής κατεύθυνσης ..... - 79 -

5.5.2 Μη-στρωτή ροή ..... - 83 -

5.5.3 Προσέγγιση αναμειγμένης ροής ..... - 84 -

5.6 Εσωτερική υπερπίεση ..... - 85 -

5.6.1 Όρια πίεσης ..... - 85 -

5.7 Βέλτιστη εισαγωγή φρέσκου αέρα ..... - 86 -

5.8 Διανομή αέρα ..... - 87 -

5.8.1 Σύστημα μονής διέλευσης ..... - 87 -

5.8.2 Τύποι συστημάτων ανακυκλοφορίας αέρα ..... - 88 -

5.9 Σχεδιασμός αεραγωγών και κατασκευή ..... - 91 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^{ο} : Κλιματισμός ..... - 93 -

6.1 Κλιματισμός & Κλιματιστικά συστήματα ..... - 93 -

6.2 Γενική διάταξη συστήματος ..... - 93 -

6.3 Το κλιματιστικό σύστημα ..... - 94 -

6.4 Φορτία ..... - 95 -

6.5 Μέθοδοι υπολογισμού φορτίων ..... - 97 -

6.5.1 Θερμικό κέρδος χώρων – Ψυκτικό και θερμικό φορτίο χώρων ..... - 98 -

6.5.2 Στοιχεία για τον υπολογισμό του ψυκτικού ή του θερμικού φορτίου ..... - 101 -

6.6 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά–κλιματολογικά δεδομένα ..... - 102 -

6.7 Εσωτερικές συνθήκες Cleanroom ..... - 106 -

6.7.1 Εσωτερική θερμοκρασία ..... - 106 -

6.7.2 Ρύθμιση θερμοκρασίας σε cleanroom με αυστηρές προδιαγραφές ..... - 107 -

6.7.3 Ρύθμιση θερμοκρασίας σε cleanroom με λιγότερο αυστηρές προδιαγραφές .....- 108 -

6.7.4 Εσωτερική υγρασία ..... - 108 -

6.7.5 Αφύγρανση..... - 109 -

6.7.6 Εφύγρανση..... - 110 -

6.7.7 Βελτιστοποίηση ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας ..... - 110 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : Οικονομική λειτουργία των cleanrooms ..... - 112 -

7.1 Τρόποι μείωσης εξόδων και εξοικονόμησης ενέργειας για cleanrooms ..... - 112 -

7.2 Άλλα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας ..... - 116 -

7.3 Ελαχιστοποίηση της παροχής αέρα για τη βέλτιστη και οικονομικότερη λειτουργικότητα ..... - 117 -

7.4 Συστήματα για Cleanrooms: Αυτοσχέδια μέτρα προστασίας..... - 117 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο : Υπολογιστικό μέρος ..... - 119 -

8.1 Λογισμικό προσομοίωσης: Energy Plus..... - 119 -

8.1.1 Εισαγωγή ..... - 119 -

8.1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι του Energy Plus και υποπρογράμματα ..... - 119 -

8.2 Εισαγωγή δεδομένων στο Energy Plus ανά κατηγορία ..... - 122 -

8.2.1 Κατηγορία: Παράμετροι προσομοίωσης (Simulation Parameters) ..... - 123 -

8.2.1.1 Υποκατηγορία: Έκδοση (Version) ..... - 123 -

8.2.1.2 Υποκατηγορία: Έλεγχος προσομοίωσης (Simulation Control) ..... - 124 -

8.2.1.3 Υποκατηγορία: Κτίριο (Building) ..... - 125 -

8.2.1.4 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος εσωτερικής επιφανειακής συναγωγής θερμότητας..... - 126 -

8.2.1.5 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος εξωτερικής συναγωγής θερμότητας..... - 127 -

8.2.1.6 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος θερμικής ισορροπίας (Heat Balance Algorithm)..... - 127 -

8.2.1.7 Υποκατηγορία: Χρονικά βήματα (Timestep)..... - 128 -

8.2.2 Κατηγορία: Περιοχή και κλίμα (Location and Climate)..... - 128 -

8.2.2.1 Υποκατηγορία: Τοποθεσία κτιρίου (Site Location) ..... - 128 -
8.2.2.2 Υποκατηγορία: Περίοδος διαστασιολόγησης: Πρότυπη μέρα (Sizing Period: Design Day) ..... - 129 -
8.2.2.3 Υποκατηγορία: Περίοδος διαστασιολόγησης: Ημέρες από αρχείο καιρού (Sizing Period: Weather File Days) ..... - 130 -
8.2.2.4 Υποκατηγορία: Περίοδος εκτέλεσης (Run Period)..... - 131 -
8.2.2.5 Υποκατηγορία: Έλεγχος περιόδου εκτέλεσης: Ειδικές μέρες (Run Period Control: Special days)..... - 131 -
8.2.2.6 Θερμοκρασία δαπέδου κτιρίου (Site Ground Temperature: Building Surface) ..... - 132 -
8.2.3 Κατηγορία: Προγραμματισμοί (Schedules)..... - 132 -
8.2.3.1 Υποκατηγορία: Τύποι και όρια προγραμμάτων (Schedule Type Limits) .....- 133 -
8.2.3.2 Υποκατηγορία: Schedules: Compact..... - 133 -
8.2.4 Κατηγορία: Υλικά κατασκευής επιφανειών (Surface Construction Elements)..- 134 -
8.2.4.1 Υποκατηγορία: Υλικά (Materials)..... - 135 -
8.2.4.2 Υποκατηγορία: Υλικά: Διάκενο αέρα (Air Gap)..... - 135 -
8.2.4.3 Υποκατηγορία: Υλικά υαλοπινάκων (Window Material: Simple glazing system)..... - 136 -
8.2.4.4 Υποκατηγορία: Κατασκευή..... - 136 -
8.2.5 Κατηγορία: Θερμικές ζώνες και επιφάνειες (Thermal Zones and Surfaces).....- 137 -
8.2.5.1 Υποκατηγορία: Γεωμετρικές παραδοχές (Global Geometry Rules) ... - 137 -
8.2.5.2 Υποκατηγορία: Θερμική ζώνη (Zone) ..... - 138 -
8.2.5.3 Υποκατηγορία: Επιφάνειες κτιρίου αναλυτικά (Building Surface Detailed)- 139 -
8.2.5.4 Υποκατηγορία: Παράθυρα (Windows) ..... - 140 -
8.2.5.5 Υποκατηγορία: Πόρτες (Doors)..... - 140 -
8.2.5.6 Υποκατηγορία: Σκιάσεις λόγω προεξοχών (Shading: Overhang)..... - 141 -
8.2.6 Κατηγορία: Εσωτερικά θερμικά κέρδη (Internal gains) ..... - 141 -

8.2.6.1 Υποκατηγορία: Φορτία λόγω ανθρώπων (People)..... - 142 -
8.2.6.2 Υποκατηγορία: Φορτία λόγω φωτισμού (Lights) ..... - 143 -
8.2.7 Κατηγορία: Ροή αέρα εντός ζώνης (Zone Airflow) ..... - 143 -
8.2.7.1 Υποκατηγορία: Εισαγωγή αέρα εντός ζώνης : Παροχή αέρα σχεδιασμού ...- 144 -
8.2.8 Κατηγορία HVAC Templates..... - 144 -
8.2.8.1 Υποκατηγορία: HVAC Template: Thermostat ..... - 144 -
8.2.8.2 Υποκατηγορία: HVAC Template: Zone: Constant Volume ..... - 145 -
8.2.8.3 Υποκατηγορία: HVAC Template: System Costant Volume ..... - 146 -
8.2.8.4 Υποκατηγορία: Κύκλωμα ψυχρού νερού (HVAC Template: Plant: Chilled Water Loop)..... - 148 -
8.2.8.5 Υποκατηγορία: Ψύκτης-Chiller (HVAC Template: Plant Chiller)..... - 151 -
8.2.8.5 Υποκατηγορία: Πύργος Ψύξης (HVAC Template: Plant tower)..... - 152 -
8.2.8.6 Υποκατηγορία: Κύκλωμα θερμού νερού (HVAC Template: Plant: Hot Water Loop)..... - 152 -
8.2.8.7 Υποκατηγορία: Λέβητας (HVAC Template: Plant Boiler) ..... - 153 -
8.2.9 Κατηγορία HVAC Design Objects ..... - 154 -
8.2.9.1 Υποκατηγορία: Παράμετροι διαστασιολόγησης συστήματος HVAC (HVAC Sizing Parameters) ..... - 154 -
8.2.10 Κατηγορία Output Reporting..... - 155 -
8.2.10.1 Υποκατηγορία: Παράμετροι ονομασίας μεταβλητών (Output: Variable Dictionary) ..... - 155 -
8.2.10.2 Υποκατηγορία: Μορφή αναφοράς λεπτομερειών επιφανειών (Output Surfaces List) ..... - 156 -
8.2.10.3 Υποκατηγορία: Εξαγωγή σχεδίου κτιρίου (Output: Surfaces Drawing)....- 157 -
8.2.10.4 Υποκατηγορία: Μορφοποίηση γενικού πίνακα (Output: Table Summary Reports)..... - 159 -
8.2.10.5 Υποκατηγορία: Μορφοποίηση πινάκων και διαχωρισμός στηλών (Output Control: Table Style)..... - 159 -
8.2.10.6 Υποκατηγορία: Ονομασία μεταβλητών (Output: Variable)..... - 160 -

8.2.10.7 Υποκατηγορία: Συχνότητα μετρήσεων περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων (Output: Environmental Impact Factors)..... - 160 -

8.2.10.8 Υποκατηγορία: Περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις (Environmental Impact Factors)..... - 161 -

8.2.10.9 Υποκατηγορία: Συντελεστές εκπομπών ρύπων καυσίμου (Fuel Factors) ..- 162 -

8.2.10.10 Υποκατηγορία: Αναφορές σφαλμάτων (Output Diagnostics)..... - 164 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο : Διεξαγωγή προσομοίωσης ..... - 164 -

9.1 Διαγραμματική παρουσίαση αποτελεσμάτων..... - 164 -

9.2 Συμπεράσματα..... - 170 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... - 172 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Περιγραφή κλάσεων αποστείρωσης ..... - 20 -

Πίνακας 2: Όρια σύμφωνα με τα Federal Standards..... - 21 -

Πίνακας 3: Όρια σύμφωνα με τα British Standards 5295..... - 21 -

Πίνακας 4: Δυτικό Γερμανικό Πρότυπο: VDI 2083..... - 22 -

Πίνακας 5: EC GMP τυποποίηση αέρα παρασκευής αποστειρωμένων φαρμακευτικών προϊόντων..... - 23 -

Πίνακας 6: Πρότυπα cleanrooms κατά ISO 14644-1 ..... - 25 -

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας των πρότυπων των cleanrooms. ..... - 26 -

Πίνακας 8: FS-209E & ISO-14644..... - 26 -

Πίνακας 9: Αντιστοίχιση κλάσεων φαρμακοβιομηχανίας με αυτές του ISO-14644 ... - 28 -

Πίνακας 10: Κλάσεις χρήσης φίλτρων HEPA..... - 75 -

Πίνακας 11: Εναλλαγές αέρα ανά κλάση ..... - 76 -

Πίνακας 12: Είδη ροής ανά κλάση..... - 79 -

Πίνακας 13: Μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για την Ελλάδα ..... - 103 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σύγκριση προτύπου FS-209E με ISO-14644 ..... - 27 -

Εικόνα 2: Τυπική διάταξη HVAC φαρμακοβιομηχανίας..... - 30 -

Εικόνα 3: Τυπική διάταξη HVAC φαρμακοβιομηχανίας..... - 31 -

Εικόνα 4: Γενική διάταξη Dampers ..... - 32 -

Εικόνα 5: 100% Εισαγωγή Εξαγωγή φρέσκου αέρα ..... - 33 -

Εικόνα 6: 80% Εισαγωγή - 20% Ανακυκλοφορία ..... - 33 -

Εικόνα 7: 100% Ανακυκλοφορία..... - 34 -

Εικόνα 8: Πανελόφιλτρο..... - 34 -

Εικόνα 9: Σακόφιλτρο..... - 35 -

Εικόνα 10: Τυπικός εναλλάκτης θέρμανσης-ψύξης ..... - 36 -

Εικόνα 11: Τυπική διάταξη κινητήρα-ανεμιστήρα..... - 37 -

Εικόνα 12: Εξωτερική όψη FCU ..... - 37 -

Εικόνα 13: Εσωτερική όψη FCU..... - 38 -

Εικόνα 14: Πτερύγια FCU..... - 38 -

Εικόνα 15: FCU Fans Εξωτερική όψη ..... - 39 -

Εικόνα 16: Διαχύτης αέρα ..... - 40 -

Εικόνα 17: Εξοπλισμός θέρμανσης για συμβατικά και καινοτόμα συστήματα [26] ... - 48 -

Εικόνα 18: Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού με δεξαμενή αποθήκευσης (Electric storage tank water heater - ESTWH) [25] ..... - 53 -

Εικόνα 19: Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης (Electric tankless water heater - ETWH) [25]..... - 54 -

Εικόνα 20: Επίπεδος συλλέκτης (Συλλέκτης Flat plate - FPC) [25]..... - 56 -

Εικόνα 21: Συλλέκτης κενών σωλήνων (Evacuated tube - ETC) [25] ..... - 56 -

Εικόνα 22: Παραβολικός συλλέκτης (Parabolic dish - PDC) [25]..... - 57 -

Εικόνα 23: Συλλέκτης παραβολικής σκάφης (Parabolic trough - PTC) [25]..... - 57 -

Εικόνα 24: Υβριδικό ηλιακό-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης νερού (Hybrid solar/electric water heating system-HSWH) [25] ..... - 58 -

Εικόνα 25: Θερμαντήρας νερού με αντλία θερμότητας (Heat pump water heater - HPWH) [25] ..... - 59 -

Εικόνα 26: Εξοπλισμός ψύξης για συμβατικά και καινοτόμα συστήματα [26]..... - 63 -

Εικόνα 27: Σακόφιλτρο [27] ..... - 66 -

Εικόνα 28: HEPA Filter [28] ..... - 67 -

Εικόνα 29: ULPA Filter [29] ..... - 67 -

Εικόνα 29: Σύστημα κατακόρυφου αερισμού [30] ..... - 80 -

Εικόνα 30: Διάτρητοι πάγκοι εργασίας [31] ..... - 81 -

Εικόνα 31: Clean Work Station [31] ..... - 82 -

Εικόνα 32: Cleanroom σχεδιασμού τύπου σήραγγας..... - 83 -

Εικόνα 33: Συνήθης σχεδιασμός cleanrooms Class 100 & 10000 [30]..... - 85 -

Εικόνα 34: Σύστημα μονής διέλευσης [30] ..... - 87 -

Εικόνα 35: Σύστημα Ανακυκλοφορίας Αέρα [30] ..... - 89 -

Εικόνα 36: Φιλτρομονάδα με ανεμιστήρα [30]..... - 90 -

Εικόνα 37: Τυπική διάταξη βιομηχανικού κλιματιστικού συστήματος [5] ..... - 94 -

Εικόνα 38: Διάγραμμα Θερμικού Κέρδους & Ψυκτικού Φορτίου [32] ..... - 100 -

Εικόνα 39: Διακύμανση θερμοκρασίας χώρου μέσα στη μέρα [33]..... - 101 -

Εικόνα 40: Ημερήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας στην περιοχή της Αθήνας την 21η Ιουλίου [33]..... - 104 -

Εικόνα 41: Ημερήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας (R.H), στην περιοχή της Αθήνας την 21 Ιουλίου [33] ..... - 105 -

Εικόνα 42: Ετήσια μεταβολή μέγιστης μεγίστων, μέσης μέγιστης, μέσης, μέσης ελάχιστης και ελάχιστης ελαχίστων, θερμοκρασίας ημέρας για την περιοχή Αθήνα [42] .- 105 -

Εικόνα 43:Ετήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας για τις 2 μμ. στην περιοχή της Αθήνας [33] ..... - 106 -

Εικόνα 44: Τυπικός σχεδιασμός αερισμού cleanroom [30] ..... - 107 -

Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση θερμικής ισορροπίας στο εξωτερικό και εσωτερικό επιφάνειας [35]..... - 121 -

Εικόνα 45: Έκδοση Energy Plus..... - 123 -

Εικόνα 46: Έλεγχος προσομοίωσης (Simulation Control) ..... - 124 -

Εικόνα 47: Υποκατηγορία «Κτίριο» (Building) ..... - 125 -

Εικόνα 47: Μορφή κτιρίου και προσανατολισμός ..... - 126 -

Εικόνα 48: Υποκατηγορία εσωτερικής συναγωγής θερμότητας ..... - 126 -

Εικόνα 49: Υποκατηγορία εξωτερικής συναγωγής θερμότητας..... - 127 -

Εικόνα 50: Υποκατηγορία αλγορίθμου θερμικής ισορροπίας..... - 127 -

Εικόνα 51: Υποκατηγορία βημάτων χρόνου ..... - 128 -

Εικόνα 52: Καθορισμός ημερών αναφοράς για χειμώνα και καλοκαίρι ..... - 129 -

Εικόνα 53: Παράμετροι ημερών και μηνών κάθε έτους ..... - 130 -

Εικόνα 54: Περίοδος εκτέλεσης (Run Period)..... - 131 -

Εικόνα 55: Ειδικές μέρες (Πρωτοχρονιά, Χριστούγεννα) ..... - 132 -

Εικόνα 56: Θερμοκρασία δαπέδου κτιρίου..... - 132 -

Εικόνα 57: Όρια προγραμματισμών (Schedule Type Limits) ..... - 133 -

Εικόνα 58: Καθορισμός προγραμμάτων λειτουργίας και απασχόλησης (1) ..... - 133 -

Εικόνα 59: Καθορισμός προγραμμάτων και απασχόλησης (2) ..... - 134 -

Εικόνα 60: Δομικά υλικά και ιδιότητες..... - 135 -

Εικόνα 61: Διάκενο αέρα ..... - 135 -

Εικόνα 62: Υαλοπίνακες ..... - 136 -

Εικόνα 63: Υλικά επιστρώσεων ..... - 136 -

Εικόνα 64: Γεωμετρικές παραδοχές ..... - 137 -

Εικόνα 65: Παράμετροι θερμικής ζώνης..... - 138 -

Εικόνα 66: Επιφάνειες κτιρίου..... - 139 -

Εικόνα 67: Παράθυρα κτιρίου ..... - 140 -

Εικόνα 68: Διαστάσεις πορτών ..... - 140 -

Εικόνα 69: Σκιάσεις λόγω προεξοχών ..... - 141 -

Εικόνα 70: Φορτία λόγω ανθρώπων..... - 142 -

Εικόνα71: Φορτία λόγω φωτισμού..... - 143 -

Εικόνα 72: Παράμετροι αερισμού χώρου..... - 144 -

Εικόνα 73: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω θερμοστάτη ..... - 145 -

Εικόνα 74: Παράμετροι της μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: Zone Constant Volume)..... - 145 -

Εικόνα 75: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (1)..... - 146 -

Εικόνα 75: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (2)..... - 147 -

Εικόνα 76: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (3)..... - 148 -

Εικόνα 77: Παράμετροι κυκλώματος ψυχρού νερού (1)..... - 149 -

Εικόνα 78: Παράμετροι κυκλώματος ψυχρού νερού (2)..... - 150 -

Εικόνα 79: Παράμετροι ελέγχου του ψύκτη-chiller..... - 151 -

Εικόνα 80: Παράμετροι πύργου ψύξης..... - 152 -

Εικόνα 81: Παράμετροι κυκλώματος θερμού νερού ..... - 153 -

Εικόνα 82: Παράμετροι ρύθμισης λέβητα ..... - 154 -

Εικόνα 83: Παράμετροι διαστασιολόγησης συστημάτων HVAC..... - 155 -

Εικόνα 84: Μορφές ονομασιών μεταβλητών ..... - 156 -

Εικόνα 85: Μορφή αναφοράς λεπτομερειών επιφανειών ..... - 156 -

Εικόνα 86: Εξαγωγή τρισδιάστατου σχεδίου κτιρίου ..... - 157 -

Εικόνα 87: Σχέδιο κτιριακής εγκατάστασης από EnergyPlus ..... - 158 -

Εικόνα 88: Αναπαράσταση κτιριακής εγκατάστασης ..... - 158 -

Εικόνα 89: Μορφοποίηση γενικού πίνακα ..... - 159 -

Εικόνα 90: Διαχωρισμός στηλών πινάκων ..... - 160 -

Εικόνα 91: Ονομασία μεταβλητών ..... - 160 -

Εικόνα 92: Συχνότητα μετρήσεων περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων ..... - 160 -

Εικόνα 93: Παράμετροι ρύπων καύσης φυσικού αερίου ..... - 161 -

Εικόνα 94: Συντελεστές εκπομπών ρύπων (1) ..... - 162 -

Εικόνα 95: Συντελεστές ρύπων (2) ..... - 163 -

Εικόνα 96: Επιλογή αναφοράς σφαλμάτων ..... - 164 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιανουαρίου ..... - 165 -

Διάγραμμα 2: Ενεργειακά φορτία 21ης Φεβρουαρίου ..... - 165 -

Διάγραμμα 3: Ενεργειακά φορτία 21ης Μαρτίου ..... - 166 -

Διάγραμμα 4: Ενεργειακά φορτία 21ης Απριλίου ..... - 166 -

Διάγραμμα 5: Ενεργειακά φορτία 21ης Μαΐου ..... - 166 -

Διάγραμμα 6: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιουνίου ..... - 167 -

Διάγραμμα 7: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιουλίου ..... - 167 -

Διάγραμμα 8: Ενεργειακά φορτία 21ης Αυγούστου ..... - 167 -

Διάγραμμα 9: Ενεργειακά φορτία 21ης Σεπτεμβρίου ..... - 168 -

Διάγραμμα 10: Ενεργειακά φορτία 21ης Οκτωβρίου ..... - 168 -

Διάγραμμα 11: Ενεργειακά φορτία 21ης Νοεμβρίου ..... - 168 -

Διάγραμμα 12: Ενεργειακά φορτία 21ης Δεκεμβρίου ..... - 169 -

Διάγραμμα 13: Μέση ενεργειακή κατανάλωση φαρμακοβιομηχανίας ανά μήνα..... - 169 -

Διάγραμμα 14: Μέσο κόστος (€) ενεργειακών καταναλώσεων φαρμακοβιομηχανίας ανά μήνα ..... - 170 -

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία και τη φοίτησή μου στο Πολυτεχνείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Κορωνάκη Ειρήνη, η οποία δέχθηκε να με εμπιστευθεί και να συνεργαστούμε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Νίτσα Μιχαήλ, ο οποίος με βοήθησε όσες φορές δυσκολεύτηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Πύρρο και Μαρία, οι οποίοι αν και χώρια κατάφεραν να με αναθρέψουν σωστά και με τις καλύτερες παροχές. Τη θεία μου την Ελένη και το θείο μου τον Μανώλη που με στηρίζουν ανελλιπώς ειδικά όταν απορρίφθηκα από την Ικάρων ιπταμένων για λόγους υγείας. Τους φίλους μου και συγκεκριμένα τον Νίκο Λουκά ο οποίος πάντα θα έβρισκε τρόπο να με βγάζει από αδιέξοδα. Και τη γυναίκα εκείνη, που με στήριξε όταν το χρειαζόμουν περισσότερο, αλλά η μοίρα δεν επέτρεψε να παραμείνει στη ζωή μου και στην οποία οφείλω την αιώνιά μου αγάπη και ευγνωμοσύνη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση των συστημάτων HVAC και της εφαρμογής τους σε αποστειρωμένους χώρους παραγωγής και συσκευασίας φαρμάκων, οι οποίοι είναι γνωστοί κυρίως ως cleanrooms. Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται επεξήγηση του όρου “cleanroom” και ανάπτυξη του συνόλου των τυποποιήσεων καθώς επίσης και όλων των σύγχρονων προτύπων που υπάρχουν γύρω από αυτά. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μια γενική παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν τα συστήματα HVAC στη φαρμακοβιομηχανία. Κατόπιν γίνεται μια αναφορά στις παραμέτρους που πρέπει να λάβει ο μηχανικός υπόψιν, πριν επιλέξει τα συστήματα HVAC και τους περιορισμούς που υπάρχουν για την εγκατάστασή τους. Ακολούθως εξετάζεται αρχικά η διεργασία της θέρμανσης και της ψύξης ως φυσικά φαινόμενα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνονται στη φαρμακοβιομηχανία, προκειμένου να ανταποκρίνεται στο εκάστοτε φορτίο. Στο 5^{ο} κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες περί του αερισμού του χώρου παραγωγής, τον κύκλο που ακολουθεί ο αέρας και την επεξεργασία στην οποία υπόκειται προκειμένου να υπακούει στα σημερινά πρότυπα. Εν συνεχεία επεξηγείται αρχικά η έννοια του κλιματισμού, η διεργασία του και η ψυχρομετρία του αέρα. Κατόπιν γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη σημερινή αγορά. Στο 6^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των συστημάτων HVAC, μέσω «εξυπνότερης» διανομής του αέρα, τη χρήση τεχνολογίας INVERTER, ή μέσω χρήσης ηλιακών συλλεκτών. Το τελευταίο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους περιέχει προτεινόμενους τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας για τη λειτουργία των cleanrooms. Στο υπολογιστικό μέρος της εργασίας διεκπεραιώνεται ένας υπολογισμός των ενεργειακών καταναλώσεων μιας βιομηχανίας 450 τετραγωνικών μέτρων κατά τη διάρκεια ενός μέσου έτους στην Αθήνα, χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης EnergyPlus, καθώς και μια αναλυτική παρουσίαση των κόστων που προκύπτουν για τη λειτουργία της βιομηχανίας.

ABSTRACT

This diploma thesis analyzes HVAC systems and their application in sterile production and packaging areas of medicines, which are known mainly as “cleanrooms”. Initially, the first chapter explains the term "cleanroom" and develops all the modern standards around them. The following chapter provides a general overview of how HVAC systems operate in the pharmaceutical industry. Then a reference is made to the parameters to be taken by the engineer before selecting the HVAC systems and the limitations that exist for their installation. The process of heating and cooling is then considered as natural phenomena and also the techniques to apply heat and cooling are described. Chapter 4 provides information on the aeration of the production area, the cycle of the air and the treatment it undergoes in order to obey current standards. Then the concept of air conditioning, its process and air psychometry is first explained and also reference is made to the equipment used in the current market. Chapter 6 presents several ways to improve the performance of HVAC systems through "smarter" air distribution, the use of INVERTER technology, or through the use of solar collectors. The final chapter of the theoretical part of the thesis contains suggested ways of saving energy for the operation of cleanrooms. In the calculative part of this thesis, a simulation is conducted using the simulation software ‘EnergyPlus’, for a 450 square meter industry, in order to present a report of the industry’s energy consumption throughout an average year in Athens. A cost analysis is also included, in order to prove how expensive it is for a sterile environment to be maintained in a cleanroom.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία επικεντρώνεται στα συστήματα HVAC των αποστειρωμένων χώρων παραγωγής και συσκευασίας φαρμάκων, γνωστοί κυρίως ως cleanrooms.

Η ποιότητα του αέρα εντός της βιομηχανίας φαρμάκων χρήζει προτεραιότητας, όχι μόνο για τους εργαζόμενους, αλλά κυρίως για το περιβάλλον στο οποίο θα παρασκευασθούν τα φάρμακα. Η παρασκευή των φαρμάκων απαιτεί συνθήκες τέτοιες, που θα υπακούουν σε αυστηρά πρότυπα, προκειμένου να διατηρείται ο περιβάλλον χώρος στείρος από μικρόβια και να αποτελεί έναν άνετο χώρο εργασίας. Τα κύρια μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ποιότητα του αέρα σε ένα χώρο είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η συγκέντρωση σωματιδίων και η σχετική του υγρασία. Ο αέρας πρέπει συνεχώς να ανανεώνεται, πλήρως ή μερικώς, με αέρα περιβάλλοντος και πριν εισέλθει στο χώρο εργασίας, πρέπει να έχει υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, στην οποία θα ρυθμίζονται τα προαναφερθέντα μεγέθη. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, επιστρατεύεται ο κατάλληλος εξοπλισμός όπως αντλίες, συμπιεστές, φίλτρα, εναλλάκτες θερμότητας (heating-cooling coils) και άλλα, συγκροτώντας έτσι τα λεγόμενα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation & Air Conditioning). Τα συστήματα HVAC ελέγχονται από την FDA (Food & Drug Administration) για την Αμερική και την EMA (European Medicines Agency) για την Ευρώπη και πρέπει να πληρούν τα παγκόσμια πρότυπα περί αποστειρωμένων χώρων, όπως ορίζουν οι πρακτικές cGMP’s (current Good Manufacturing Practices).

Οι διεργασίες στις οποίες μπορεί να υποβληθεί ο εισερχόμενος από το περιβάλλον αέρας είναι οι εξής: Διήθηση (φιλτράρισμα), θέρμανση ή ψύξη, ύγρανση, αφύγρανση και πρόσδοση θερμότητας. Πριν εισέλθει ο αέρας στο χώρο εργασίας ή έρθει σε επαφή με τα συστατικά των φαρμάκων, θα πρέπει να υπακούει σε συγκεκριμένα πρότυπα της EU PHARMACOPOEIA και της ISO.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Γενική εισαγωγή στα cleanrooms

1.1 Εισαγωγή - Cleanrooms, τυποποιήσεις και νομοθεσία

Το cleanroom ορίζεται ως ένας ειδικά περιορισμένος χώρος, του οποίου τα σωματίδια και τα μικρόβια διατηρούνται κάτω από αυστηρά όρια. Οι ελεγχόμενες παράμετροι εντός του cleanroom συνήθως είναι οι:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Ήχος και δονήσεις
- Φωτισμός και άλλα

Πρόσθετες εξεταζόμενες παράμετροι είναι οι:

- Τύπος ροής εισαγόμενου αέρα
- Πίεση αέρα δωματίου
- Συγκέντρωση σωματιδίων (Εναέρια, επί επιφανειών και σε υγρά)
- Μικροβιακή συγκέντρωση (Εναέρια, επί επιφανειών και σε υγρά)
- Ηλεκτροστατικά φορτία και άλλα

Τα cleanrooms διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με τον κόσμο που υπάρχει μέσα σε αυτά:

- Όπως κτίστηκε (As Built): Η εγκατάσταση είναι ολοκληρωμένη με όλο τον εξοπλισμό συνδεδεμένο και εν λειτουργία, αλλά χωρίς υλικά και χωρίς εργατικό προσωπικό.
- Σε ανάπαυση (At Rest): Η εγκατάσταση είναι ολοκληρωμένη με όλο τον εξοπλισμό συνδεδεμένο και εν λειτουργία, αλλά χωρίς εργατικό προσωπικό.
- Σε λειτουργία (In Operation): Η εγκατάσταση λειτουργεί κανονικά, με συγκεκριμένο τρόπο και με συγκεκριμένο αριθμό εργατικού προσωπικού.

1.2 Γενικές τυποποιήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων αέρα για cleanrooms

Τα καθαρά δωμάτια τυποποιούνται από το επίπεδο καθαριότητας του αέρα τους. Η πιο κατανοητή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι αυτή που προτείνει το πρότυπο Federal Standard 209, κατά το οποίο ο αριθμός σωματιδίων που έχουν διάμετρο ίση και μεγαλύτερη από 0,5 μm μετράται σε ένα κυβικό πόδι αέρα και ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται για την τυποποίηση του δωματίου. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας στον οποίο καθίσταται κατανοητό σε ποια χρήση αντιστοιχεί κάθε κλάση τυποποίησης.

Πίνακας 1: Περιγραφή κλάσεων αποστείρωσης

Class 1	Τα δωμάτια αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
Class 10	Τα δωμάτια αυτά χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκληρωμένων (Very Large Scale Integrated VLSI) κυκλωμάτων με πλάτη γραμμών κάτω από 2 μικρά
Class 100	Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ένα περιβάλλον απαλλαγμένο από βακτήρια και μικρόβια, για την κατασκευή ασηπτικών ενέσιμων φαρμάκων που χρησιμοποιούνται σε χειρουργεία μεταμοσχεύσεων ή σε ανοσοκατεσταλμένους ασθενείς (π.χ ύστερα από μεταμόσχευση μυελού των οστών)
Class 1000	Κατασκευή οπτικού εξοπλισμού υψηλής ποιότητας. Συναρμολόγηση και δοκιμή μικροσκοπίων ακριβείας. Συναρμολόγηση μικροσκοπικών εδράνων
Class 10000	Συναρμολόγηση υδραυλικού ή πνευματικού εξοπλισμού ακριβείας, χρονοσυσκευές ακριβείας, γρανάζια υψηλού βαθμού
Class 100000	Γενική εργασία, συναρμολόγηση ηλεκτρονικού, υδραυλικού ή πνευματικού εξοπλισμού

Είναι σαφές, ότι όσο μικρότερη η κλάση, τόσο λιγότερα σωματίδιά με διάμετρο ≥ 0,5 μm επιτρέπεται να υπάρχουν στον αέρα του δωματίου.

Κατά το Federal Standard 209D τα όρια συγκέντρωσης σωματιδίων με διαφορετική διάμετρο είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 2: Όρια σύμφωνα με τα Federal Standards

Class	Measured particle size (μm)				
	0.1	0.2	0.3	0.5	5.0
1	35	7.5	3	1	NA
10	350	75	30	10	NA
100	NA	750	300	100	NA
1000	NA	NA	NA	1000	7
10 000	NA	NA	NA	10 000	70
100 000	NA	NA	NA	100 000	700

NA = Not applicable

Παρακάτω παρατίθενται τα όρια του British Standard 5295

Πίνακας 3: Όρια σύμφωνα με τα British Standards 5295

Class of environmental cleanliness	Maximum permitted number of particles per m^3 (equal to, or greater than, stated size)				
	0.3 μm	0.5 μm	5 μm	10 μm	25 μm
C	100	35	0	NS	NS
D	1000	350	0	NS	NS
E	10 000	3500	0	NS	NS
F	NS	3500	0	NS	NS
G	100 000	35 000	200	0	NS
H	NS	35 000	200	0	NS
J	NS	350 000	2000	450	0
K	NS	3 500 000	20 000	4500	500
L	NS	NS	200 000	45 000	5000
M	NS	NS	NS	450 000	50 000

NS = No specified limit.

Στο British Standard χρησιμοποιείται το μετρικό σύστημα, ωστόσο για διάμετρο σωματιδίων 5μm , τα όρια δε βολεύουν τον αναγνώστη, για αυτό το λόγο προτιμάται η χρήση των ορίων Federal Standard.

Η ένωση Γερμανών μηχανικών, γνωστή ως Vereinigte Deutsche Ingenieure (VDI), δημιούργησε το δικό της πρότυπο τυποποίησης των ορίων περιεκτικότητας σωματιδίων στον αέρα και είναι το παρακάτω.

Πίνακας 4: Δυτικό Γερμανικό Πρότυπο: VDI 2083

Class	Particle concentrations/m^3						
	≥ 0.1 μm	≥ 0.2 μm	≥ 0.3 μm	≥ 0.5 μm	≥ 1.0 μm†	≥ 5.0 μm	≥ 10.0 μm
0‡	150	33	14	-	10^0		
1	1500	330	140	45	10^1		
(1)*	(35)*	(8)*	(3)*	(1)*			
2	15 000	3300	1400	450	10^2		
(10)*	(350)*	(75)*	(30)*	(10)*			
3		33 000	14 000	4500	10^3		
(100)*		(750)*	(300)*	(100)*			
4				45 000	10^4	300	
(1000)*				(1000)*		(7)*	
5				450 000	10^5	3000	
(10 000)*				(10 000)*		(70)*	
6				4 500 000	10^6	30 000	
(100 000)*				(100 000)*		(700)*	
7					10^7	300 000	70 000

* Cleanroom and particle concentration per ft^3 from FS 209
† Size chosen for classification
‡ This class should be considered when cleanroom unoccupied

1.3 Τυποποιήσεις για τη φαρμακοβιομηχανία

Η ανάπτυξη προτύπων για τα cleanrooms της φαρμακοβιομηχανίας ξεκίνησε στις αρχές του 1960 για την αντιμετώπιση προβλημάτων μόλυνσης των στείρων φαρμακευτικών προϊόντων τα οποία είχαν προκαλέσει ασθένειες και θανάτους σε ασθενείς. Είχε διαπιστωθεί, καθώς μόνο ένα μικρό δείγμα φαρμάκων μπορούσε να δοκιμαστεί, ότι κανένας τελικός έλεγχος δε θα μπορούσε να καθορίσει την ασφάλεια κατανάλωσής τους. Ήταν λοιπόν επιτακτική η ανάγκη να θεσπιστούν πρότυπα ασφαλείας. Τα πρότυπα αυτά είναι γνωστά διεθνώς ως Guides to Good Manufacturing Practices (GMPs). Βασίζονταν στα πρότυπα FS 209 , BS 5295 και άλλα πρότυπα που σχετίζονται με τη φαρμακευτική παραγωγή. Ο σκοπός του GMPs είναι να προσδιορίζει τη σωστή μέθοδο παρασκευής αποστειρωμένων προϊόντων μέσω της

εξουδετέρωσης μικροβιακής και σωματιδιακής μόλυνσης, δημιουργώντας έτσι την απαραίτητη ασφάλεια ποιότητας.

Τα πρότυπα GMPs καθορίζουν επίσης το σχεδιασμό της εγκατάστασης, τα δομικά υλικά, τη φροντίδα του εργατικού προσωπικού και άλλα. Δίνουν επίσης τις κλάσεις των cleanrooms όχι μόνο για τη συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα, αλλά και για μικροοργανισμούς, φίλτρα αέρα και εναλλαγές αέρα. Τα διαφορετικά πρότυπα ανά χώρα έχουν κυρίως συμβουλευτικό χαρακτήρα παρά νομοθετικό, καθώς υπάρχουν παραπάνω από ένας τρόποι για την επίτευξη του σωστού αποτελέσματος. Για τον έλεγχο της σωστής εφαρμογής των προτύπων GMPs, κάθε χώρα έχει κυβερνητικούς επιθεωρητές οι οποίοι επισκέπτονται τις βιομηχανίες για να ελέγξουν ότι χρησιμοποιούν τα σωστά cleanrooms, το σωστό εξοπλισμό και τις σωστές μεθόδους. Κάθε φαρμακευτικός παρασκευαστής πρέπει να υπακούει στα πρότυπα GMPs των χωρών για τις οποίες προορίζονται τα φάρμακα.

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρότυπα GMPs για cleanrooms είναι τα εξής:

- PIC: GMP & Guidelines (1983): Ισχύει για τις περισσότερες χώρες της Δυτικής Ευρώπης συμπεριλαμβανομένων μερικών χωρών της Ανατολικής Ευρώπης
- FDA: GMP: Ισχύει για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
- ‘Orange Guide’: GGPMP 1983: Ισχύει για το Ηνωμένο Βασίλειο
- EEC GGMP 1989: Ισχύει για τις Ευρωπαϊκές κοινότητες (European Communities)

Παρακάτω παρατίθεται το EC GMP πρότυπο τυποποίησης αέρα για την παρασκευή στείρων φαρμακευτικών προϊόντων.

Πίνακας 5: EC GMP τυποποίηση αέρα παρασκευής αποστειρωμένων φαρμακευτικών προϊόντων

Grade	*Max. permitted no. of particles/m^3 equal to or above*		*Max. permitted no. of viable microorganisms/m^3*
	0.5 μm	5 μm	
A Laminar air flow work station	3500	none	< 1
B	3500	none	5
C	350 000	2000	100
D	3 500 000	20 000	500

Υποσημειώσεις:

- Τα συστήματα στρωτής ροής αέρα πρέπει να παρέχουν ομογενώς τον αέρα με ταχύτητα 0,30 m/s για κατακόρυφη ροή και 0,45 m/s για οριζόντια ροή.
- Προκειμένου να επιτευχθούν οι βαθμοί αέρα B,C και D ο αριθμός εναλλαγών αέρα πρέπει γενικά να είναι υψηλότερος από 20 ανά ώρα σε ένα δωμάτιο με καλό σχεδιασμό αερισμού και τα κατάλληλα φίλτρα τύπου HEPA.

Κατά το πρότυπο EC, η παρασκευή φαρμάκων χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Η προετοιμασία είναι σφραγισμένη στο τελευταίο της δοχείο και λαμβάνει την τελευταία της απολύμανση
- Η προετοιμασία πρέπει να γίνεται με ασηπτικό τρόπο σε μερικά ή όλα τα στάδια.

Η προετοιμασία των διαλυμάτων των τελικώς αποστειρωμένων προϊόντων πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης C προκειμένου να υπάρχει χαμηλός αριθμός μικροβίων και σωματιδίων και πρέπει να γίνεται καλή αποστείρωση και φιλτράρισμα. Είναι γενικά επιτρεπτό, το περιβάλλον αυτό να είναι κλάσης D, αρκεί να λαμβάνονται περαιτέρω μέτρα ασφαλείας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το ποσοστό μόλυνσης, όπως με τη χρήση κλειστών δοχείων (vessels).

Η προετοιμασία και το γέμισμα των αλοιφών, κρεμών και γαλακτωμάτων πρέπει γενικά να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης C πριν την τελική αποστείρωση.

Ασηπτικές προετοιμασίες: Η επεξεργασία των πρώτων υλών πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης C, εάν αποστειρώνονται μέσω φιλτραρίσματος αργότερα κατά την επεξεργασία. Εάν όχι, θα πρέπει να γίνεται σε ζώνη κλάσης A.

Η προετοιμασία διαλυμάτων το οποία πρόκειται να αποστειρωθούν μέσω φιλτραρίσματος, θα πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης C. Εάν δεν φιλτράρονται θα πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης A.

Η επεξεργασία και το γέμισμα των ασηπτικώς προετοιμασμένων προϊόντων, θα πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης A.

Η προετοιμασία και το γέμισμα αλοιφών, κρεμών, και γαλακτωμάτων πρέπει να γίνεται σε περιβάλλον κλάσης A, εάν η προετοιμασία γίνεται σε ανοιχτό δοχείο και χωρίς φιλτράρισμα.

1.4 Σύγχρονα πρότυπα

Από το 2001 και μετά, ισχύουν νέα πρότυπα για την τυποποίηση των cleanrooms. Τα νέα αυτά πρότυπα είναι κατά ISO 14644-1 τα οποία αντικατέστησαν τα πρότυπα Federal Standard 209E. Κατά το FS 209E μετρούνταν σωματίδια διαμέτρου 0,5 μm και άνω, ενώ το πρότυπο ISO 14644-1 μετρούνται ακόμα και τα μικρότερα σωματίδια, παρέχοντας έτσι ασφαλέστερες μετρήσεις. Κατά το πρότυπο ISO 14644-1, ένα cleanroom τυποποιείται με βάση τον αριθμό σωματιδίων που υπάρχουν στον αέρα, με μέγεθος από 0,1 μm έως 5 μm ανά κυβικό μέτρο αέρα.

Πίνακας 6: Πρότυπα cleanrooms κατά ISO 14644-1

CLASS	**Μέγιστος αριθμός σωματιδίων/m^3**					
	≥0,1μm	*≥0,2μm*	*≥0,3μm*	*≥0,5μm*	*≥1μm*	*≥5μm*
ISO 1	10	2,37	1,02	0,35	0,083	0,0029
ISO 2	100	23,7	10,2	3,5	0,83	0,029
ISO 3	1.000	237	102	35	8,3	0,29
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	2,9
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.0×10^6	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7	1.0×10^7	$2,37 \times 10^6$	1.020.000	352.000	83.200	2.930
ISO 8	1.0×10^8	$2,37 \times 10^7$	$1,02 \times 10^7$	3.520.000	832.000	29.300
ISO 9	1.0×10^9	$2,37 \times 10^8$	$1,02 \times 10^8$	35.200.000	8.320.000	293.000

Συγκεντρωτικά κάτωθι παρατίθενται τα πρότυπα των cleanrooms:

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας των πρότυπων των cleanrooms.

U.S. Federal Standard 209E	Airborne particulate cleanliness classes in cleanrooms and clean zones (former US standard, canceled in November 2001)

ISO Document	ISO-14644: Cleanrooms and Associated Controlled Environments
ISO-14644-1	Classification of Air Cleanliness
ISO-14644-2	Cleanroom Testing for Compliance
ISO-14644-3	Methods for Evaluating & Measuring Cleanrooms & Associated Controlled Environments
ISO-14644-4	Cleanroom Design & Construction
ISO-14644-5	Cleanroom Operations
ISO-14644-6	Terms, Definitions & Units
ISO-14644-7	Enhanced Clean Devices
ISO-14644-8	Molecular Contamination
ISO-14698-1	Biocontamination: Control General Principles
ISO-14698-2	Biocontamination: Evaluation & Interpretation of Data
ISO-14698-3	Biocontamination: Methodology for Measuring Efficiency of Cleaning Inert Surfaces

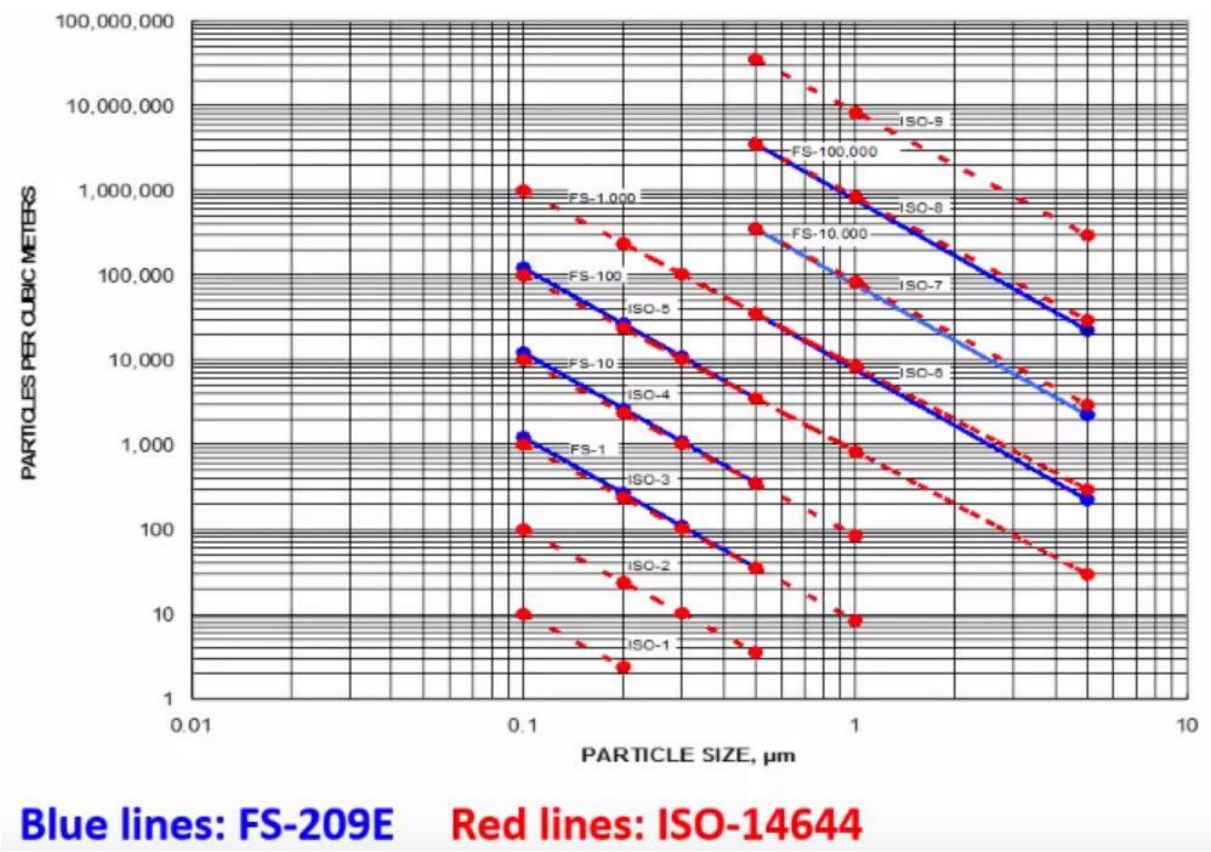
Και συγκριτικά τα πρότυπα FS 209 και ISO 14644:

Πίνακας 8: FS-209E & ISO-14644

FS 209 Class	ISO 14644 Class	0.1 µm		0.2 µm		0.3 µm		0.5 µm		1 µm		5.0 µm	
		FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3	FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3	FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3	FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3	FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3	FS 209 Particles/ft^3	ISO 14644 Particles/m^3
	1		10		2								
	2		100		24		10		4				
1	3	35	1,000	7.5	237	3	102	1	35		8		
10	4	350	10,000	75	2,370	30	1,020	10	352		83		
100	5		100,000	750	23,700	300	10,200	100	3,520		832		29
1000	6		1,000,000		237,000		102,000	1,000	35,200		8,320	7	293
10,000	7							10,000	352,000		83,200	70	2,930
100,000	8							100,000	3,520,000		832,000	700	29,300
	9								35,200,000		8,320,000		293,000

Λόγω της διαφορετικών μονάδων μέτρησης μεταξύ του αμερικανικού και ευρωπαϊκού προτύπου, είναι δύσκολο να συγκριθούν οι παραπάνω περιεκτικότητες του αέρα. Κατόπιν

μετατροπής των κυβικών ποδιών σε κυβικά μέτρα και παριστάνοντας τα όρια σε κοινό διάγραμμα προκύπτει το παρακάτω:



Εικόνα 1: Σύγκριση προτύπου FS-209E με ISO-14644

Συγκεκριμένα για τη φαρμακοβιομηχανία, οι τυποποιήσεις αντιστοιχούν στις τυποποιήσεις ISO-146441 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Αντιστοίχιση κλάσεων φαρμακοβιομηχανίας με αυτές του ISO-14644

Maximum Permitted Number of Particles Per m^3 (equal to or above)								
Pharmaceutical Cleanliness Grade					Cleanliness Classification			
Grade	At Rest		In Operation		FS 209	ISO 14644		
	0.5 µm	5.0 µm	0.5 µm	5.0 µm			0.5 µm	5.0 µm
A	3,500	0	3,500	0	**100**	**5**	3,520	29
B	3,500	0	350,000	2,000	**1,000**	**6**	35,200	293
C	350,000	2,000	3,500,000	20,000	**10,000**	**7**	352,000	2,930
D	3,500,000	20,000	Not defined	Not defined	**100,000**	**8**	3,520,000	29,300

Παρατηρούμε ότι η κλάση A στη φαρμακοβιομηχανία, ισοδυναμεί με την κλάση 100 του FS-209 και με την κλάση 5 του ISO-14644. Ομοίως η B αντιστοιχεί με την 1.000 και την 6, η C με την 10.000 και την 7, η D με την 100.000 και την 8.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2º : Συστήματα HVAC

2.1 Εισαγωγή - Αρχές λειτουργίας HVAC και κριτήρια επιλογής τους.

Ο όρος HVAC αποτελείται από τα αρχικά γράμματα των εννοιών:

- Heating
- Ventilation
- Air Conditioning

Τα συστήματα αυτά αφορούν το σύνολο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τις διεργασίες υπό τις οποίες πρέπει να διέλθει ο αέρας για να δημιουργείται ένα υγιές και ευχάριστο περιβάλλον. Ο όρος HVAC δε χρησιμοποιείται τόσο σε οικιακές χρήσεις, αλλά κυρίως στο βιομηχανικό τομέα και σε μεγάλα κτίρια. Η λειτουργία τους και η συντήρησή τους είναι ιδιαίτερα ακριβή, για αυτό το λόγο λοιπόν χρησιμοποιούνται σε χώρους μεγάλης κλίμακας. Στα σπίτια είναι πιο συμφέρον να χρησιμοποιούνται μικρές κλιματιστικές μονάδες, καθώς τα θερμικά-ψυκτικά φορτία είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με της βιομηχανίας.

2.2 Χρήσεις HVAC

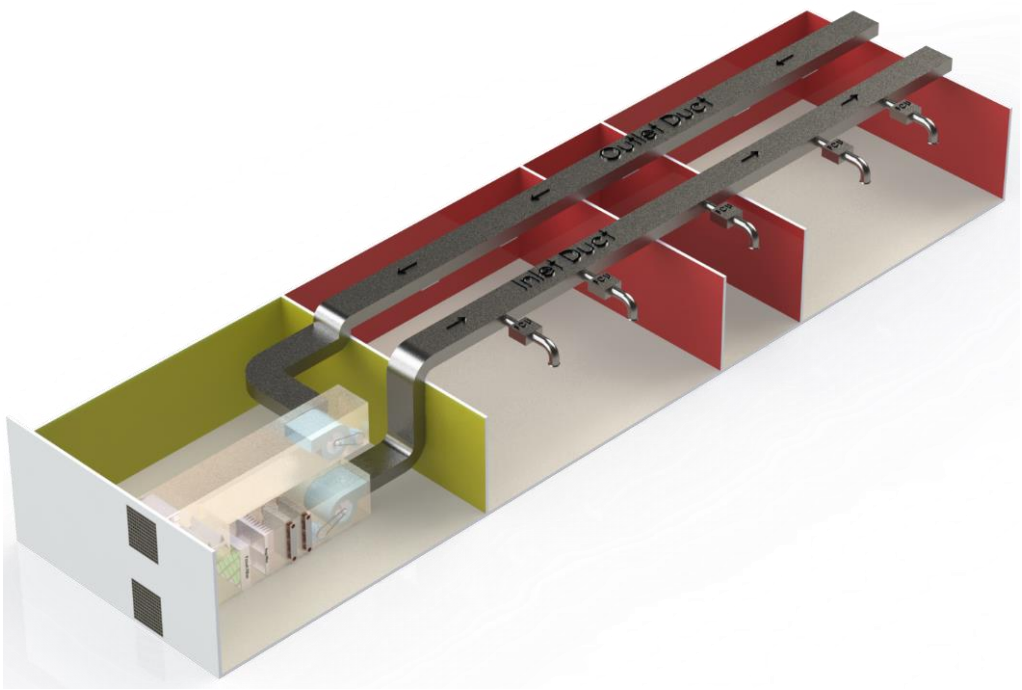
Οι βασικές λειτουργίες των HVAC μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Ρύθμιση και διατήρηση θερμοκρασίας χώρου. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή άμεσα ή έμμεσα, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη μικροβίων στο χώρο εργασίας. Η θέρμανση του νερού γίνεται μέσα σε ειδικούς θαλάμους, όπως θα περιγραφεί στο κεφάλαιο 4 και μέσω εναλλακτών θερμότητας και του αέρα μέσω των heating coils.
2. Διατήρηση σχετικής υγρασίας χώρου (Relative Humidity RH). Η υγρασία ελέγχεται μέσω της ψύξης αέρα μέχρι το σημείο δρόσου, ψεκασμό νερού, ή μέσω χρήσης αφυγραντικών υλικών. Η υγρασία επηρεάζει την αποτελεσματικότητα και τη δράση των φαρμάκων και μπορεί να δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη μικροοργανισμών.

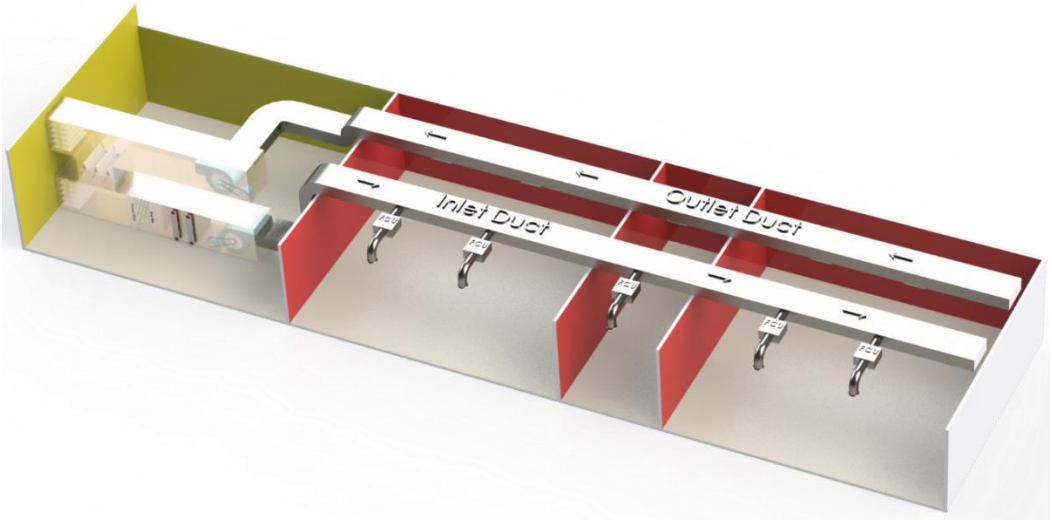
3. Δημιουργία και διατήρηση σταθερής διαφοράς πίεσης μεταξύ δωματίου και περιβάλλοντος. Στους τομείς όπου χρειάζονται αποστειρωμένα περιβάλλοντα (clean rooms), όπως στη φαρμακοβιομηχανία και τα νοσοκομεία, πρέπει να επικρατεί στο εσωτερικό των χώρων μια υπερπίεση, ώστε να αποτρέπεται ο εξωτερικός αέρας από το να εισέρχεται αφιλτράριστος στον «καθαρό» χώρο εργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται από το σύστημα HVAC με το να παρέχει μεγαλύτερο όγκο αέρα στον καθαρό χώρο, από αυτόν που χάνεται από τα διάφορα ανοίγματα του ίδιου χώρου.
4. Έλεγχος αιωρούμενων σωματιδίων, σκόνης και μικροοργανισμών. Η απαλλαγή του εισερχόμενου αέρα από διάφορα σωματίδια, επιτυγχάνεται με τη χρήση φίλτρων αέρα υψηλής απόδοσης (High Efficiency Particulate Air Filters, HEPA).

2.3 Γενικές αρχές λειτουργίας HVAC

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή μια τυπική διάταξη HVAC σε φαρμακοβιομηχανία, σχεδιάστηκε μία με το λογισμικό Solidworks. Κατόπιν της σχεδίασης και για λόγους αισθητικής, τα σχέδια έγιναν render μέσω του Photoview 360 του Solidworks, προκειμένου να φαίνονται πιο ρεαλιστικά.



Εικόνα 2: Τυπική διάταξη HVAC φαρμακοβιομηχανίας



Εικόνα 3: Τυπική διάταξη HVAC φαρμακοβιομηχανίας

Η θέρμανση, ψύξη, αερισμός και κλιματισμός στη φαρμακοβιομηχανία και σε άλλες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας (γραφεία, νοσοκομεία, βιβλιοθήκες, γυμναστήρια, πανεπιστήμια) συνήθως προέρχεται από μία κεντρική μονάδα που ονομάζεται μονάδα διαχείρισης αέρα (Air Handling Unit AHU). Στη συνέχεια ο επεξεργασμένος αέρας μοιράζεται μέσω αεραγωγών (ducts) σε κάθε δωμάτιο.

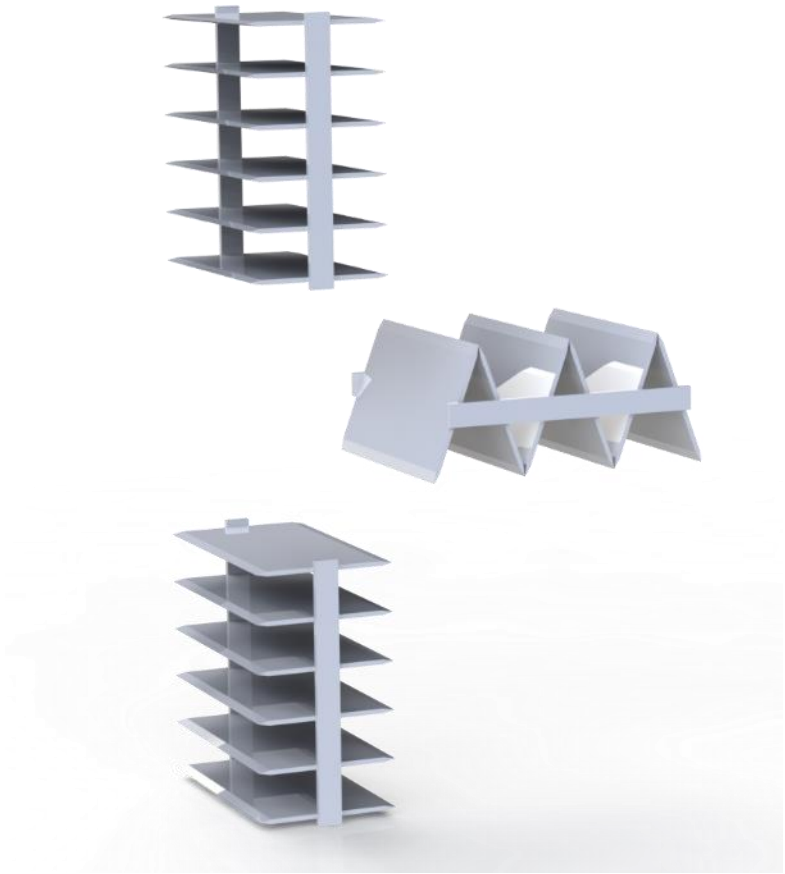
Είναι σύνηθες, πριν την είσοδο του αέρα στα δωμάτια εργασίας, να διέρχεται από περαιτέρω επεξεργασία μέσω των μονάδων ανεμιστήρα-στοιχείου γνωστά κυρίως ως Fan Coil Units (FCU), προκειμένου να επιτευχθεί διαφορετική ποιότητα αέρα σε κάθε δωμάτιο. Ο χρησιμοποιημένος αέρας, ή αλλιώς ο ήδη υπάρχων αέρας του δωματίου, εξέρχεται μέσω ξεχωριστού συστήματος αεραγωγών, φιλτράρεται και ένα μέρος του ανακυκλώνεται, ή αποβάλλεται εξ ολοκλήρου στο περιβάλλον, αναλόγως τις ανάγκες της εκάστοτε εγκατάστασης.

Παρακάτω περιγράφεται σύντομα η επεξεργασία του αέρα:

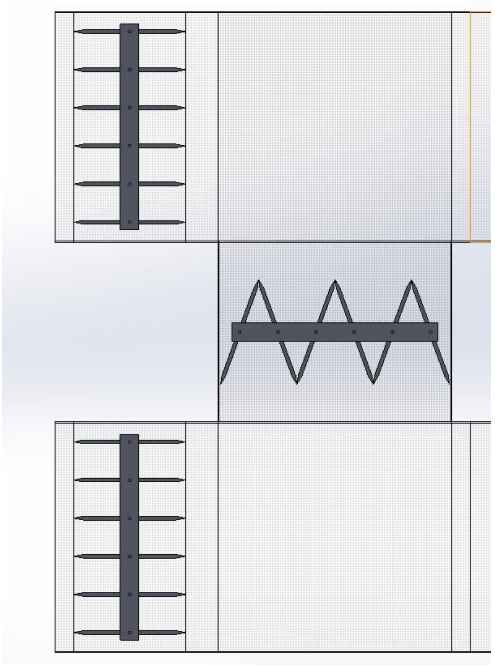
1. Ο αέρας περιβάλλοντος εισέρχεται στην AHU διερχόμενος μέσα από φίλτρα τα οποία συγκρατούν τυχόν ακαθαρσίες, φύλλα, σκουπίδια και λοιπά.

2. Ρυθμίζεται η παροχή αέρα με τη χρήση των dampers. Συνήθως υπάρχουν 3 αγωγοί κυκλοφορίας αέρα: α) Αγωγός εισαγωγής , β) Αγωγός εξαγωγής και γ) Αγωγός ανακυκλοφορίας. Τα dampers τοποθετούνται στην είσοδο του αγωγού εισόδου, στην

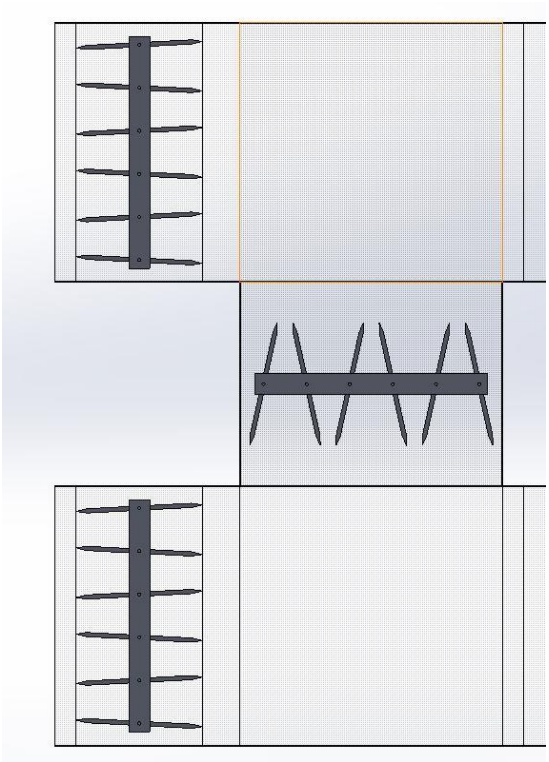
έξοδο του αγωγού εξαγωγής και στον αγωγό ανακυκλοφορίας. Τα 3 αυτά υποσυστήματα συνεργάζονται μηχανικά μεταξύ τους, ώστε η ανακυκλοφορία να ρυθμίζεται σε σχέση με το άνοιγμα της εισαγωγής. Η εξαγωγή ρυθμίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με την εισαγωγή. Για παράδειγμα, όταν η εισαγωγή είναι ανοιχτή 100% , η εξαγωγή είναι επίσης ανοιχτή 100% , ενώ η ανακυκλοφορία είναι εντελώς κλειστή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη απαίτηση φρέσκου αέρα. Αυτή η περίπτωση συναντάται συνήθως στα cleanrooms, καθώς πρέπει να αποφεύγεται η επαναχρησιμοποίηση του ίδιου αέρα. Σε περιπτώσεις όμως, όπου δεν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες φρέσκου αέρα, όπως για παράδειγμα όταν δεν υπάρχουν πολλοί εργαζόμενοι στο χώρο, ή έχει πάψει η παραγωγή φαρμάκων, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω χρήσης της ανακυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει επεξεργασία αέρα περιβάλλοντος αποκλειστικά και μόνο, αλλά επίσης ήδη επεξεργασμένου αέρα.



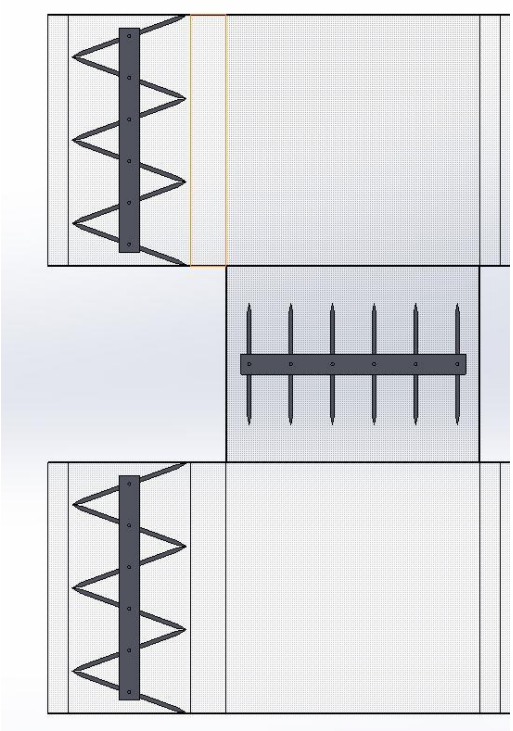
Εικόνα 4: Γενική διάταξη Dampers



Εικόνα 5: 100% Εισαγωγή Εξαγωγή φρέσκου αέρα

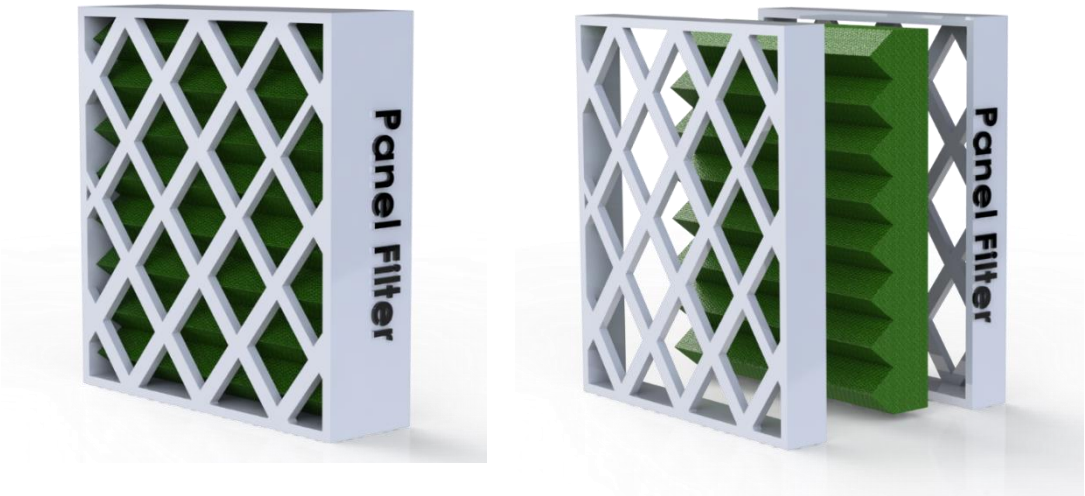


Εικόνα 6: 80% Εισαγωγή - 20% Ανακυκλοφορία



Εικόνα 7: 100% Ανακυκλοφορία

3. Ο αέρας διέρχεται μέσα από δύο φίλτρα. Το πρώτο ονομάζεται πανελόφιλτρο ή αλλιώς panel filter και το δεύτερο ονομάζεται σακόφιλτρο ή αλλιώς bag filter.

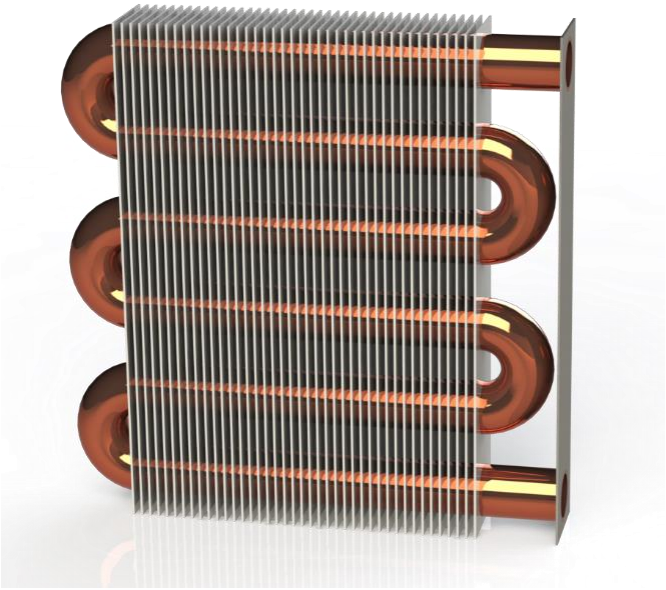


Εικόνα 8: Πανελόφιλτρο

Εικόνα 9: Σακόφιλτρο

4. Σε περίπτωση που υπάρχουν θερμικά φορτία, κυρίως το χειμώνα, ο αέρας θερμαίνεται διερχόμενος από τον εναλλάκτη θέρμανσης (heating coil). Το heating coil περιέχει νερό θέρμανσης (heating water), το οποίο στις περισσότερες εγκαταστάσεις παράγεται στο βραστήρα (boiler). Οι σωληνώσεις του heating coil περιβάλλονται από πολύ λεπτά ελάσματα γνωστά ως πτερύγια (fins), προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ του θερμού νερού εντός των σωληνώσεων και του αέρα που διέρχεται ανάμεσα από τις σωληνώσεις και τα fins.

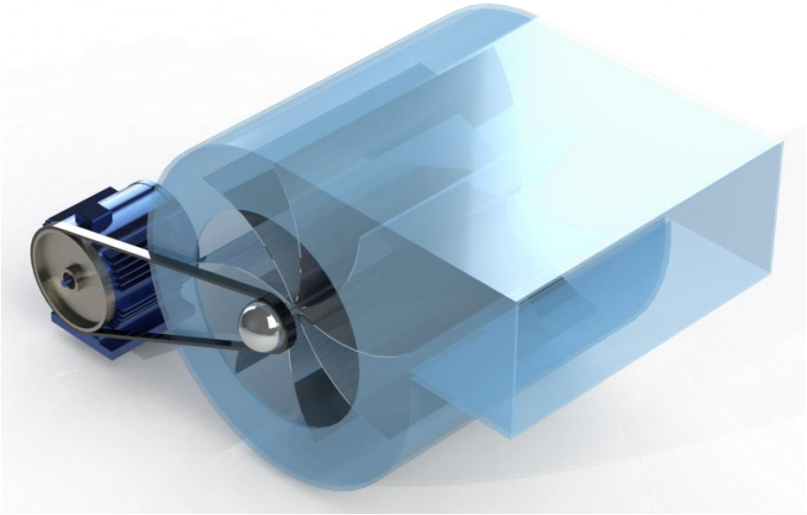
5. Αμέσως μετά το heating coil ακολουθεί το cooling coil, το οποίο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που υπάρξουν ψυκτικά φορτία, κυρίως το καλοκαίρι. Το cooling coil περιέχει ψυχρό νερό (chilled water), το οποίο έχει παραχθεί στον ψύκτη νερού (water chiller), ο οποίος είναι ο πιο κοστοβόρος μεταξύ των συστημάτων HVAC. Το cooling coil έχει παρόμοιο σχεδιασμό με αυτό του heating coil, με τη διαφορά ότι στο κάτω μέρος του υπάρχει ένας συλλέκτης νερού, ο οποίος συλλέγει τα συμπυκνώματα που δημιουργούνται κατά την ψύξη του υγρού αέρα περιβάλλοντος.



Εικόνα 10: Τυπικός εναλλάκτης θέρμανσης-ψύξης

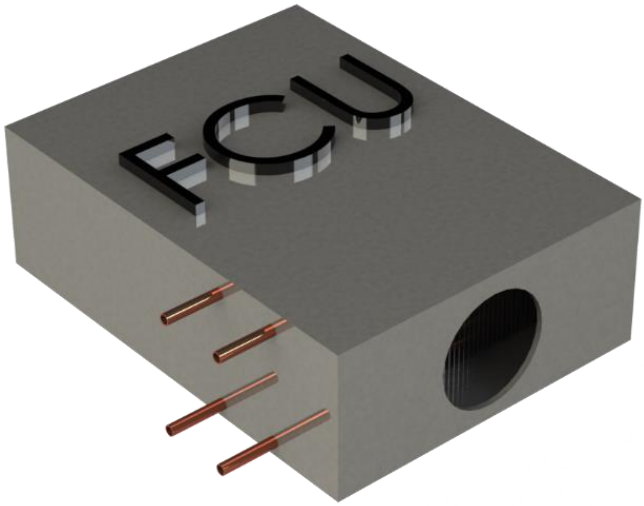
6. Συνηθίζεται, αμέσως μετά από το cooling coil, να προστίθεται ένας υγραντήρας, ο οποίος θα προσθέτει υγρασία στον αέρα μέχρι το επιθυμητό σημείο, καθώς ούτε ο υπερβολικά ξηρός, αλλά ούτε ο υπερβολικά υγρός αέρας είναι ιδανικός για ένα άνετο και υγιές περιβάλλον.

7. Ο αέρας προωθείται στους αεραγωγούς προς διανομή σε κάθε δωμάτιο, λαμβάνοντας κινητική ενέργεια από τους ανεμιστήρες. Οι ανεμιστήρες περιστρέφονται μέσω επαγωγικών κινητήρων και συνδέονται μέσω ιμάντα. Η παροχή αέρα ρυθμίζεται επίσης από την ταχύτητα περιστροφής των ανεμιστήρων.

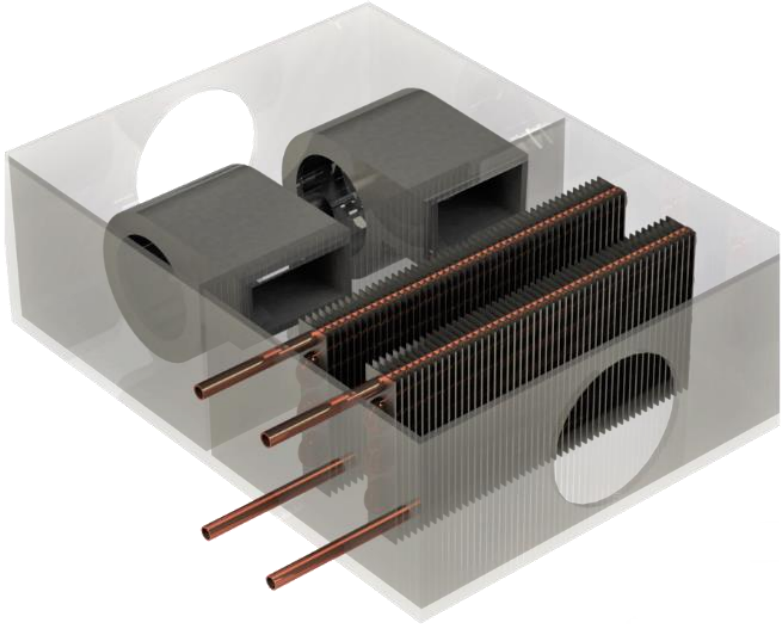


Εικόνα 11: Τυπική διάταξη κινητήρα-ανεμιστήρα

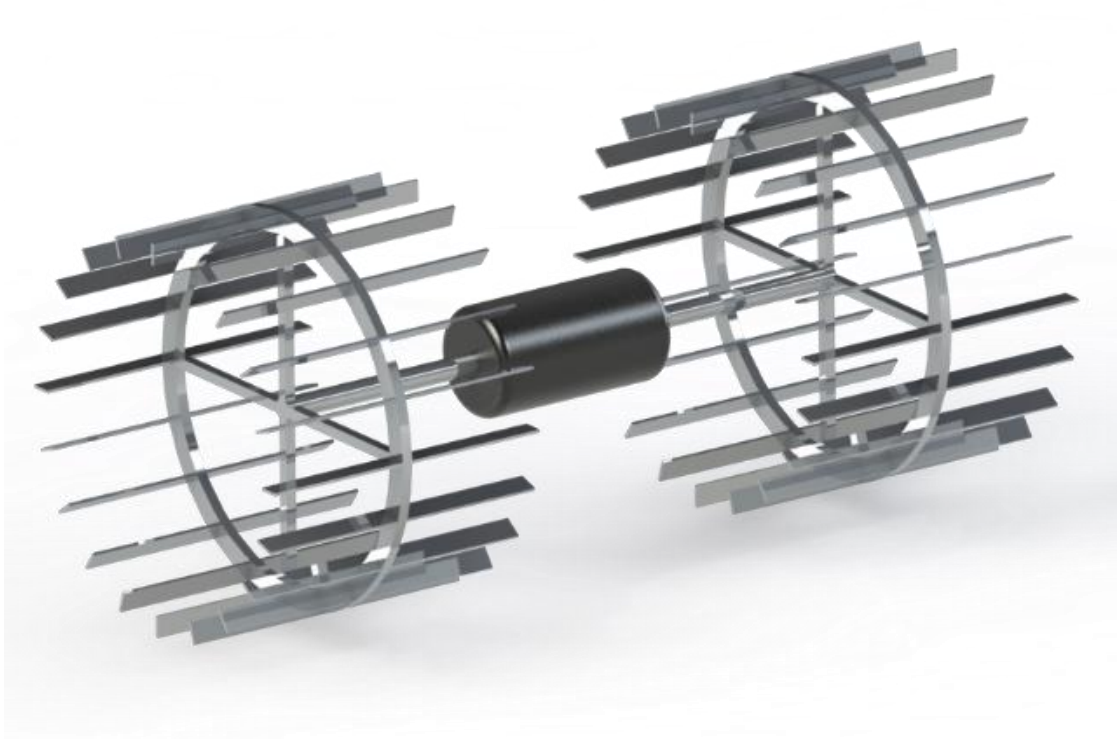
8. Ο επεξεργασμένος πλέον αέρας εισέρχεται στα FCU, τα οποία συνήθως έχουν διάταξη ανεμιστήρα και εναλλάκτες θερμότητας κατάντι ή ανάντι αυτών. Η σειρά διάταξης δεν έχει ιδιαίτερη σημασία και εξαρτάται από τον κατασκευαστή. Στις μονάδες αυτές ο αέρας θα υποστεί επιπλέον επεξεργασία, προς την κάλυψη των αναγκών του εκάστοτε δωματίου, καθώς μπορεί να υπάρχει διαφορετικός αριθμός εργαζομένων ή μηχανημάτων ανά δωμάτιο, συνεπώς διαφορετικά φορτία.



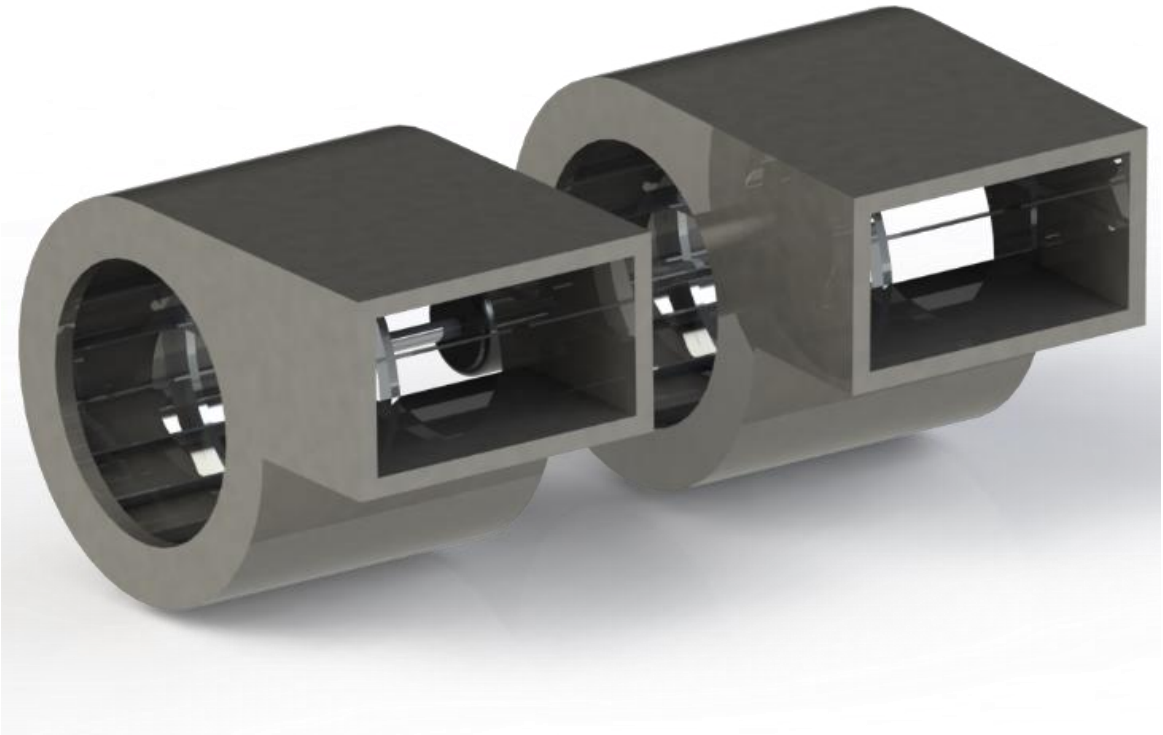
Εικόνα 12: Εξωτερική όψη FCU



Εικόνα 13: Εσωτερική όψη FCU



Εικόνα 14: Πτερύγια FCU



Εικόνα 15: FCU Fans Εξωτερική όψη

9. Η ομοιόμορφη και ομαλή είσοδος του αέρα στα δωμάτια επιτυγχάνεται μέσω ειδικών διαχυτών (diffusers) προκειμένου να υπάρχει ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή εντός του δωματίου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διανομής του αέρα εντός των δωματίων οι οποίοι θα περιγραφούν αναλυτικά σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Στον παρακάτω διαχύτη, ο αέρας εισέρχεται αξονικά και εξέρχεται σχεδόν ακτινικά.

Εικόνα 16: Διαχύτης αέρα

10. Ο χρησιμοποιημένος αέρας θα εξέλθει από το κάθε δωμάτιο μέσω ξεχωριστού συστήματος αεραγωγών που οδηγούν σε έναν κεντρικό αεραγωγό εξόδου. Σε αυτόν υπάρχει ένας επιπλέον ανεμιστήρας, ο οποίος κινεί τον αποβάλλοντα αέρα προς το περιβάλλον, ή επαναπροωθεί μέρος του στον αγωγό παροχής φρέσκου αέρα, όπου θα υποστεί εκ νέου την επεξεργασία που περιεγράφηκε παραπάνω. Η ανακυκλοφορία μέρους του χρησιμοποιημένου αέρα γίνεται κυρίως για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, χωρίς ωστόσο να παραβιάζονται οι κανόνες υγιεινής.

2.4 Κριτήρια και περιορισμοί επιλογής HVAC

Πριν την εγκατάσταση ενός συστήματος HVAC σε οποιαδήποτε βιομηχανία, είναι κρίσιμης σημασίας, να προηγηθεί σωστή μελέτη από το μηχανικό και να ληφθούν υπόψιν όλα τα κριτήρια κατά το πρότυπο ASHRAE 55 όσον αφορά τη θέρμανση στο process, τη θέρμανση & ψύξη χώρου και τον αερισμό. Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:

- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Κίνηση αέρα

- Ποιότητα αέρα
- Εναλλαγές αέρα ανά ώρα
- Παροχή αέρα και νερού
- Τοπικό κλίμα
- Πίεση εσωτερικού χώρου
- Φορτία
- Αναπλήρωση χαμένου αέρα
- Απαιτήσεις σε χώρο
- Θέματα ασφάλειας
- Πρωτεύοντα κόστη
- Ενεργειακά κόστη
- Κόστη προσωπικού HVAC
- Κόστη συντήρησης
- Αξιοπιστία
- Ευελιξία στα εκάστοτε φορτία
- Εύκολος χειρισμός
- Ανάλυση κύκλου ζωής
- Δονήσεις και θόρυβος

Εφόσον οι παραπάνω παράγοντες σχετίζονται μεταξύ τους, ο ιδιοκτήτης, ο σχεδιαστής μηχανικός, ο χειριστής και ο τεχνικός εγκατάστασης, οφείλουν να εξετάσουν το πως αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Η βαρύτητα κάθε κριτηρίου διαφέρει ανά βιομηχανία, αναλόγως το μέγεθος παραγωγής φαρμάκων, τον αριθμό προσωπικού, το διαθέσιμο budget ή το χρονικό περιθώριο για διακοπή της λειτουργίας για συντήρηση (shutdown). Μόλις καταγραφούν τα κριτήρια και οι στόχοι της επιχείρησης, θα επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα HVAC, συνυπολογίζοντας τους παρακάτω περιορισμούς:

2.4.1 Περιορισμοί Συστήματος

Οι περιορισμοί που αφορούν το σύστημα είναι οι κάτωθι:

- Όρια επιδόσεων (όπως θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης χώρου)

- Πρότυπα
- Διαθέσιμο δυναμικό συστήματος
- Διαθέσιμος χώρος εγκατάστασης
- Διαθέσιμες υποδομές
- Αρχιτεκτονική κτιρίου
- Αποτελεσματικότητα συστήματος έναντι στα ενεργειακά κόστη
- Γνώσεις και ικανότητες χειριστών

Ο σχεδιαστής μηχανικός θα πρέπει να επιλέξει το κατάλληλο σύστημα HVAC σε συνεννόηση με την υπόλοιπη ομάδα σχεδιαστών, καθώς επίσης και με τον επιχειρηματία, προκειμένου να ανταπεξέλθει σε τυχόν εμπόδια που σχετίζονται με τα συστήματα HVAC υπό θεώρηση.

2.4.2 Περιορισμοί Εγκατάστασης

Ο σχεδιαστής μηχανικός πρέπει να λάβει υπόψιν τους περιορισμούς εγκατάστασης του συστήματος HVAC, πριν φτάσει το project στη φάση αυτή. Μερικοί από τους περιορισμούς αυτούς μπορούν να επηρεάσουν έντονα την αποτελεσματικότητα του συστήματος, ωστόσο δεν πρέπει να παραληφθεί κανένας τους από τη μελέτη του μηχανικού.

- Υπάρχουσες συνθήκες (όπως φορτίο πατώματος, πρόσβαση εντός και εκτός του κτιρίου)
- Περίφραξη κτιρίου
- Διατήρηση υπάρχουσας λειτουργίας και εργασίας κατά την εγκατάσταση
- Προϋπολογισμός εγκατάστασης
- Προγραμματισμός εγκατάστασης
- Διαθεσιμότητα εξοπλισμού
- Προσαρμογή εξοπλισμού στον προοριζόμενο χώρο
- Δυνατότητα συντήρησης εξοπλισμού

Ελάχιστα project επιτρέπουν τη λεπτομερή ποσοτική αξιολόγηση όλων των εναλλακτικών επιλογών. Η κοινή λογική, η εμπειρία του μηχανικού και παλαιότερες εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιορίσουν τις διαθέσιμες επιλογές σε ένα ή δύο εναλλακτικές.

2.4.3 Επιλογή με βάση τα φορτία

Οι κύριες παράμετροι που συμβάλλουν στο επιλεγόμενο μέγεθος συστήματος, είναι τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία, ή με λίγα λόγια η απαίτηση ισχύος. Τα φορτία διαφέρουν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, με βάση τις περιόδους απασχόλησης, τις αλλαγές στον καιρό, δραστηριότητες εντός του χώρου, εσωτερικά φορτία όπως (λάμπες, λειτουργία εξοπλισμού, προσωπικό), ο προσανατολισμός του κτιρίου και η έκθεσή του στον ήλιο. Κάθε χώρος με διαφορετική χρήση και έκθεση στον ήλιο, μπορεί να χρειαστεί δική του, ξεχωριστή ζώνη ελέγχου, προκειμένου να διατηρηθεί η άνεση στο χώρο. Μερικοί χώροι με ειδικές απαιτήσεις (π.χ απαιτήσεις αερισμού) μπορεί να χρειάζονται ξεχωριστά συστήματα. Επομένως η έκταση των ζωνών και ο βαθμός ελέγχου κάθε ζώνης μπορούν να περιορίσουν τις εναλλακτικές επιλογές συστήματος.

2.4.4 Επιλογή με βάση τη ρύθμιση της ψύξης-θέρμανσης χώρου και της υγρασίας

Οι απαιτήσεις αερισμού ενός βιομηχανικού χώρου μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το μέγεθος των συστημάτων HVAC, καθώς ρυθμίζεται έτσι η θερμοκρασία και η υγρασία του χώρου. Για παράδειγμα, εάν απαιτείται μεγάλη παροχή όγκου φρέσκου αέρα, για να αντικαταστήσει τον εξερχόμενο αέρα, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει συστήματα που ικανοποιούν αποκλειστικά αυτές τις ανάγκες. Η μετάδοση της θερμότητας ή και η αφαίρεσή της, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των κατάλληλων συστημάτων HVAC. Συνεπώς είναι εξίσου σημαντική, η αποτελεσματική μεταφορά του αέρα (θερμού η ψυχρού) μέσα στο χώρο. Ο στόχος αυτός θα επιτευχθεί με τον κατάλληλο εξοπλισμό αερισμού.

2.4.5 Επιλογή με βάση τα οικονομικά κριτήρια

Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται σε μια φαρμακοβιομηχανία, οφείλεται στα συστήματα HVAC. Συνεπώς, είναι πρωτεύουσας σημασίας, να επιλεγούν συστήματα, με υψηλό βαθμό απόδοσης, ώστε να μη ζημιώνεται η επιχείρηση.

Πριν την επιλογή του κατάλληλου συστήματος HVAC, λαμβάνεται υπόψιν ο γενικός κανόνας, ότι όσο αυξάνεται η απόσταση που πρέπει να διανύσει η μεταφερόμενη ενέργεια, αυξάνονται

και τα πρωτεύοντα κόστη αλλά και τα λειτουργικά κόστη, σε σημείο που θεωρούνται συγκρίσιμα με τα λειτουργικά κόστη των βραστήρων και των chillers. Συνεπώς για μικρές εγκαταστάσεις, είναι προτιμότερο να γίνεται η μεταφορά της ενέργειας όσο πιο άμεσα γίνεται. Για παράδειγμα, ο αέρας θα πρέπει να θερμαίνεται άμεσα στο βραστήρα και όχι σε ξεχωριστούς εναλλάκτες θερμότητας. Ομοίως κατά την ψύξη θα πρέπει να γίνεται άμεση ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και ψυκτικού. Από την άλλη μεριά, σε εγκαταστάσεις όπου η ενέργεια πρέπει να διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις, πρέπει να χρησιμοποιείται ένα μεγάλο σύστημα μεταφοράς ρευστών με επιπρόσθετα στάδια ανταλλαγής θερμότητας σε εναλλάκτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Θέρμανση

3.1 Εισαγωγή – Θέρμανση

Θερμότητα, είναι η μεταφορά ενέργειας που σχετίζεται με την κινητική ενέργεια των ατόμων ή μορίων και μεταδίδεται στα στερεά σώματα μέσω αγωγής, στα υγρά και τα αέρια μέσω συναγωγής ή γενικά μέσω ακτινοβολίας. Η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω της θερμοκρασιακής διαφοράς των σωμάτων και συγκεκριμένα από τα θερμά σώματα στα ψυχρότερα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θέρμανση. Μεταφορά θερμότητας παρατηρείται επίσης κατά την αλλαγή φάσης ενός υλικού. Η θερμότητα αυτή ονομάζεται λανθάνουσα, ενώ η θερμότητα λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς ονομάζεται αισθητή. Ο ρυθμός αισθητής θερμότητας που προκαλεί αύξηση θερμοκρασίας ενός ρεύματος αέρα εκφράζεται από τον τύπο:

$$\dot{q}_s = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})$$

Όπου:

- $\dot{q}_s$ = ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας, [W]
- $\dot{m}$ = παροχή μάζας αέρα, [kg/s]
- C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, [J/kgK]
- T_{out} = θερμοκρασία εξόδου, [ºC]
- T_{in} = θερμοκρασία εισόδου, [ºC]

Στα συστήματα HVAC παρατηρούνται συχνά διεργασίες θέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, το οποίο συνήθως είναι η 1,2 αιθανοδιόλη ή γλυκόλη, λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητάς της, δηλαδή της μεγάλης ικανότητάς του να αποθηκεύει και να μεταφέρει θερμική ενέργεια, της ασφάλειας χρήσης της, της αντιψυκτικής της ικανότητας και του υψηλού σημείου βρασμού της. Για λόγους διευκόλυνσης, η γλυκόλη καλείται εμπειρικά ως «νερό». Το θερμό αυτό ρεύμα νερού θα χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του αέρα μέσω των heating coils. Η ιδανική θερμοκρασία του αέρα σε έναν χώρο για άνετη εργασία είναι μεταξύ 20 με 25 βαθμούς Κελσίου

(^oC) με σημείο ελέγχου στους 22 βαθμούς Κελσίου (^oC). Θέρμανση παρατηρείται επίσης και κατά την παραγωγή ατμού, για την ύγρανση του αέρα πριν εισέλθει στο χώρο παραγωγής.

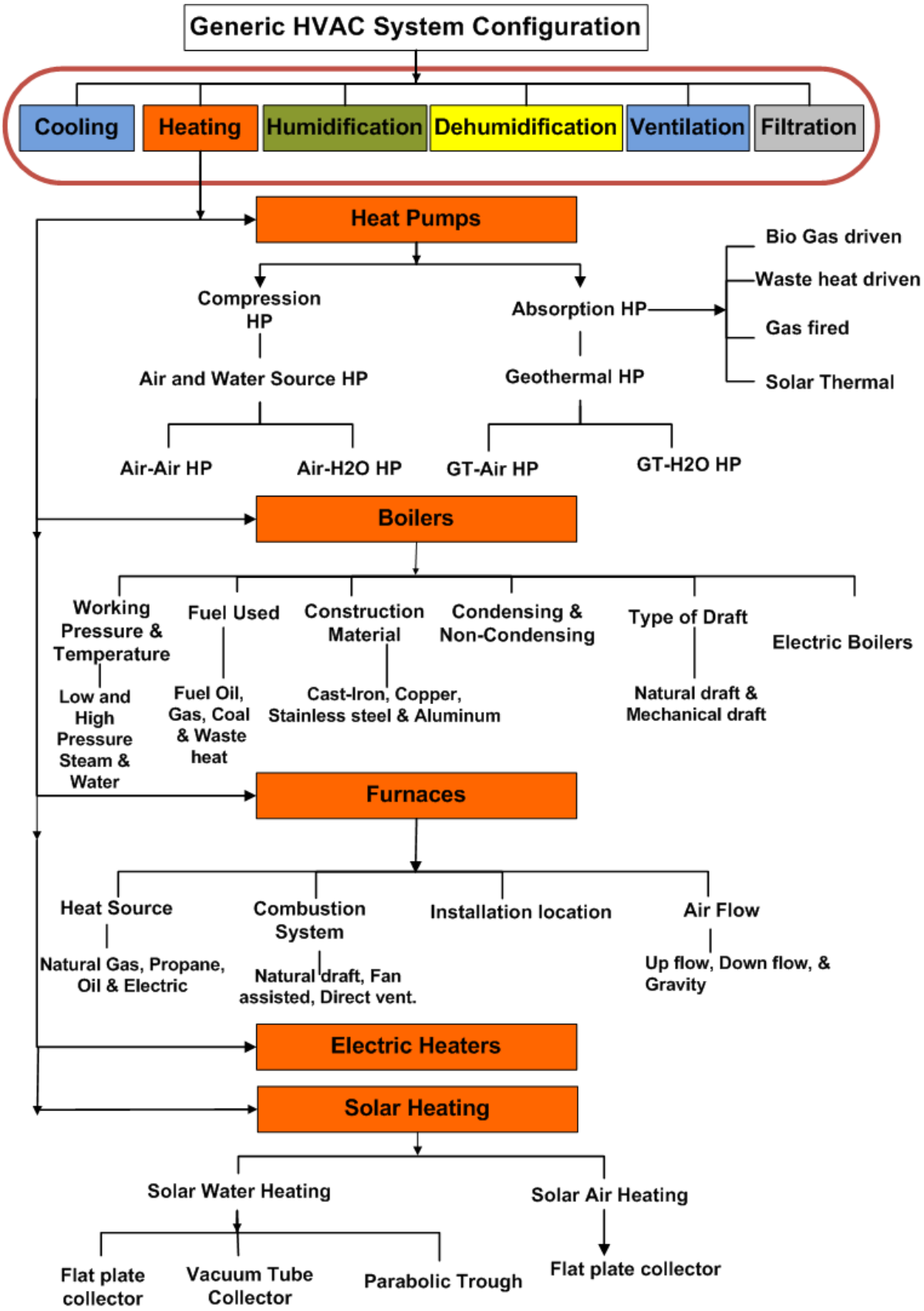
Τα συστήματα HVAC λειτουργούν όλο το χρόνο εξασφαλίζοντας συνθήκες άνεσης σε έναν συγκεκριμένο χώρο τόσο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όσο και του χειμώνα. Η ζώνη άνεσης αλλάζει λίγο για τη χειμερινή περίοδο για να παρέχει την επιθυμητή θερμοκρασία μέσω θέρμανσης. Η συνηθής θερμοκρασία για το χειμώνα είναι περίπου μεταξύ 21^oC και 24° C [*ASHRAE, ASHARE Handbook: Fundamentals.: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2005, vol. SI Edition*.]. Η απόφαση που πρέπει να παρθεί σχετικά με τον τρόπο θέρμανσης κεντρική θέρμανση ή ύπαρξη τοπικού εξοπλισμού θέρμανσης εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Συνήθως, μια κεντρική εγκατάσταση στην οποία γίνεται καύση καυσίμου είναι πιο επιθυμητή για τη θέρμανση μεγάλων εγκαταστάσεων. Σε μικρές εγκαταστάσεις, η ηλεκτρική θέρμανση αποτελεί βιώσιμη επιλογή και είναι συχνά πιο οικονομική λύση.

Οι αντλίες θερμότητας, οι λέβητες και οι κλίβανοι αποτελούν τον σημαντικότερο εξοπλισμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται σε μονάδες κεντρικής θέρμανσης. Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους, τις αντλίες θερμότητας συμπίεσης ατμού και τις αντλίες θερμότητας απορρόφησης. Οι αντλίες θερμότητας συμπίεσης ατμού περιλαμβάνουν αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα και αέρα-νερού. Οι αντλίες θερμότητας απορρόφησης χρησιμοποιούν διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως το βιοαέριο, το φυσικό αέριο, ακόμη και την ηλιακή θερμική ενέργεια. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται επίσης τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη.

Στα συμβατικά συστήματα, οι λέβητες και οι κλίβανοι αποτελούν τα βασικά στοιχεία για την ικανοποίηση των απαιτήσεων θέρμανσης των κτιρίων. Γενικά, οι λέβητες ποικίλλουν ανάλογα με τις διαφορετικούς περιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι λέβητες μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση την πίεση εργασίας και τη θερμοκρασία (χαμηλή πίεση, υψηλή πίεση), το καύσιμο (πετρέλαιο, αέριο, κάρβουνο),τα υλικά κατασκευής (χυτοσίδηρος, χαλκός, ανοξείδωτος χάλυβας) και τον τύπο σχεδιασμού τους (φυσικοί ή μηχανικοί). Οι λέβητες μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το σχήμα, το μέγεθος και την εφαρμογή. Ομοίως, οι κλίβανοι μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με τις πηγές θερμότητας (φυσικό αέριο, πετρέλαιο), το σύστημα καύσης (φυσικό ρεύμα, επιβαλλόμενο ρεύμα), την τοποθέτηση (κατακόρυφη) και

την ροή του αέρα [up-flow, downflow] [*P. Haves, "A study on energy savings and measure cost effectiveness of existing building commissioning," 2009*].

Η ηλιακή θέρμανση εμφανίζεται επίσης ως πιθανή τεχνολογία. Η ηλιακή θερμική ενέργεια εφαρμόζεται μέσω της ηλιακής θέρμανσης του νερού και της ηλιακής θέρμανσης του αέρα. Οι επίπεδες πλάκες, οι σωλήνες κενού και οι συλλέκτες παραβολικών κοιλοτήτων χρησιμοποιούνται συνήθως για τη θέρμανση νερού. Για την ηλιακή θέρμανση αέρα, οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας είναι πιο συνηθισμένοι. Διάφορες δυνατότητες για σκοπούς θέρμανσης φαίνονται στην Εικ. 17 [*Mukhtar Hussain Sahir, "Automated optimization of HVAC system configurations," , 2010*.].



Εικόνα 17: Εξοπλισμός θέρμανσης για συμβατικά και καινοτόμα συστήματα [26]

3.2 Θέρμανση νερού

Η θέρμανση του νερού στη φαρμακοβιομηχανία είναι απαραίτητη για τη θέρμανση του αέρα που πρόκειται να καλύψει τα θερμικά φορτία του χώρου στον οποίο θα εισέλθει. Παρακάτω φαίνονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η θέρμανση.

3.2.1 Θέρμανση νερού με χρήση καυσίμου

3.2.1.1. Λέβητες

Με τον όρο λέβητας χαρακτηρίζουμε το συγκρότημα ενεργειακής μονάδας στο οποίο γίνεται η καύση του καυσίμου υγρού, αερίου ή στερεού και η μετάδοση της εγκλωβισμένης σε αυτό χημικής ενέργειας στο νερό για θέρμανση ή ατμοποίηση του στη κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση ή μετάδοση της στον αέρα για τη θέρμανση του.

Αναλόγως του υλικού κατασκευής τους οι λέβητες διακρίνονται σε:

- Χυτοσιδήρους λέβητες
- Χαλύβδινους λέβητες
- Χάλκινους λέβητες.

Αναλόγως του καυσίμου οι λέβητες διακρίνονται σε:

- Λέβητες στερεών καυσίμων
- Λέβητες αερίων καυσίμων
- Λέβητες υγρών καυσίμων.

Αναλόγως της θερμικής τους ισχύος διακρίνονται σε:

- Μεσαίους και μεγάλους λέβητες (θερμική ισχύς > 350 KW ή 300.000 kcal/h)
- Κανονικούς λέβητες (θερμική ισχύς από 60 kW έως 350 ή 52.000 - 300.000kcal/h)
- Μικρούς λέβητες (θερμική ισχύς < 60 KW ή 52.000 kcal/h).

Επί τη βάσει του φορέως θερμότητας διακρίνονται σε:

- Λέβητες ατμού χαμηλής πίεσης
- Λέβητες ατμού υψηλής πίεσης
- Λέβητες αέρος (αερολέβητες)
- Λέβητες νερού

Κύρια στοιχεία λέβητα:

Κάθε λέβητας αποτελείται από τον θερμαντήρα ή φλογοθάλαμο, τους φλογαυλούς ή αεραυλούς και τον υδροθάλαμο, ή τον ατμοθάλαμο για λέβητες ατμού, ή αεροθάλαμο για αερολέβητες.

Φλογοθάλαμος είναι ο χώρος όπου γίνεται η καύση. Υδροθάλαμος είναι ο χώρος που υπάρχει το νερό για την μεταφορά θερμότητας. Φλογαυλοί είναι διαδρομές του λέβητα, μέσα από τις οποίες οδηγούνται τα καυσαέρια προς την καπνοδόχο. Οι φλογαυλοί σε λέβητες χαλύβδινους, είναι συνήθως σωλήνες μεγάλου μήκους και περιβάλλονται από το προς θέρμανση νερό ή αέρα ή ατμό. Ορισμένοι κατασκευαστές τοποθετούν μειωτήρες καυσαερίων μέσα στους φλογαυλούς.

Βαθμός Απόδοσης Λέβητα**:**

Τον βαθμό απόδοσης ενός λέβητα μπορούμε να τον βρούμε κατά προσέγγιση από την ακόλουθη σχέση:

$$BA = 100 \cdot \frac{Q_A}{B \cdot HK}$$

Όπου:

- BA : Βαθμός απόδοσης
- QA: Η ονομαστική ισχύς του λέβητα σε Kcal/h
- B : Η ωριαία κατανάλωση καυσίμου σε Kg/h
- HK : Κατώτερη θερμική δύναμη καυσίμου σε Kcal/Kg (για πετρέλαιο 10.500)

3.2.1.2 Καυστήρες

Καυστήρες ονομάζουμε, τα μηχανήματα εκείνα που αναμειγνύουν το καύσιμο υλικό με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και με διάφορους αυτοματισμούς και λειτουργίες, προκαλούν την καύση για παραγωγή θερμότητας. Οι καυστήρες ανάλογα με το καύσιμο υλικό διακρίνονται σε καυστήρες υγρών, στερεών και αερίων καυσίμων. Επίσης υπάρχουν και μικτοί καυστήρες (υγρών και αερίων συγχρόνως).

Οι καυστήρες υγρών καυσίμων διακρίνονται σε καυστήρες πετρελαίου, καυστήρες μαζούτ ή λαδιού. Οι καυστήρες πετρελαίου διακρίνονται σε εξατμιστικούς, σε διασκορπισμού και σε περιστροφικούς. Οι εξατμιστικοί καυστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται στις θερμάστρες πετρελαίου, σε μικρές εγκαταστάσεις κεντρικών θερμάνσεων με λέβητα τύπου τζάκι και σε μικρά αερόθερμα. Οι διασκορπισμού διακρίνονται σε καυστήρες υψηλής πίεσης, χαμηλής πίεσης και σε καυστήρες γαλακτώματος και οι περιστροφικοί με ποτήρι ή χωρίς ποτήρι. Οι καυστήρες πετρελαίου διασκορπισμού υψηλής πίεσης, μονοβάθμιοι ή διαβάθμιοι, με ένα ή με δύο μπεκ, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σήμερα στις εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης.

Οι καυστήρες στερεών καυσίμων. Αυτοί χρησιμοποιούνται σε μεγάλες βιομηχανίες και εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν καύσιμο υλικό χρησιμοποιούν σκόνη κάρβουνου. Επιτρέπεται η χρήση του σε χώρες όπου η ρύπανση του περιβάλλοντος δεν αποτελεί κίνδυνο και σε χώρες που ο άνθρακας είναι οικονομικός.

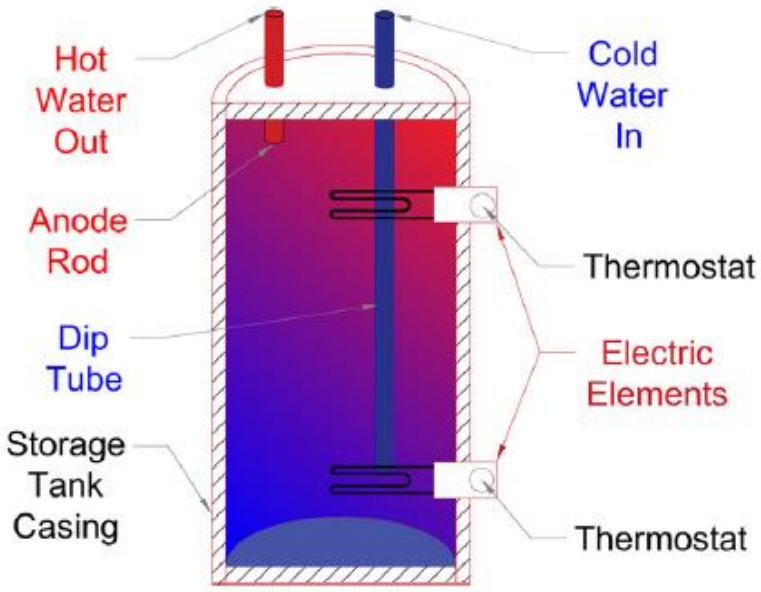
Οι καυστήρες αερίων καύσιμων διακρίνονται σε : Ατμοσφαιρικούς καυστήρες, σε Καυστήρες αερίου με φυσητήρα (Υψηλής Πίεσης) και σε Καυστήρες διπλού καυσίμου. Οι καυστήρες υψηλής πίεσης διακρίνονται σε μονοβάθμιους και διβάθμιους καυστήρες. Στην περίπτωση των αερίων καυσίμων, δεν έχουμε διαδικασίες αεριοποιήσεως του καυσίμου, όπως πρέπει αναγκαστικά να συμβεί για την καύση πετρελαίου. Έτσι κύριος στόχος των καυστήρων καύσεως αερίων είναι να φέρουν σε επαφή το αέριο και τον αέρα της καύσεως.

3.2.2 Θέρμανση νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας

3.2.2.1 Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού με χρήση δεξαμενής αποθηκεύσεως (Electric storage tank water heater (ESTWH))

Ο ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού με χρήση δεξαμενής αποθηκεύσεως έχει δύο λειτουργίες: τη θέρμανση του νερού χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια και την αποθήκευση του ζεστού νερού για το χρόνο που απαιτείται. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται σε ηλεκτρικά στοιχεία αντίστασης εντός της δεξαμενής αποθήκευσης. Το ρεύμα ρέει μέσω των στοιχείων για να δημιουργήσει θερμότητα και αυτή η θερμική ενέργεια ανταλλάσσεται με το περιβάλλον νερό. Η διαδικασία αυξάνει σταδιακά τη θερμική στάθμη ολόκληρης της μάζας νερού εντός της δεξαμενής αποθήκευσης.

Ένας θερμοστάτης διατηρεί ένα ορισμένο θερμικό επίπεδο που έχει ορίσει ο χρήστης. Το ηλεκτρικό στοιχείο ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του νερού πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα ζεστού νερού. Άλλες δεξαμενές αποθήκευσης ηλεκτρικού τύπου διαθέτουν δύο ηλεκτρικά στοιχεία, καθένα από τα οποία ελέγχεται από ανεξάρτητο θερμοστάτη. Ένα στοιχείο που βρίσκεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης, όπως φαίνεται στην Εικ. 18, βοηθά στην αντικατάσταση της χαμένης ενέργειας, λόγω της κλίσης της θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του περιβάλλοντος και του νερού (Lutz et al., 2002). Το άνω στοιχείο παρέχει θερμική ενέργεια στο νερό όταν η ζήτηση είναι υψηλή, εξασφαλίζοντας ότι η δεξαμενή αποθήκευσης διπλών στοιχείων είναι πιο αποδοτική από τα συμβατικά συστήματα μεμονωμένων στοιχείων (Delport, 2005, Sowmy and Prado, 2008).

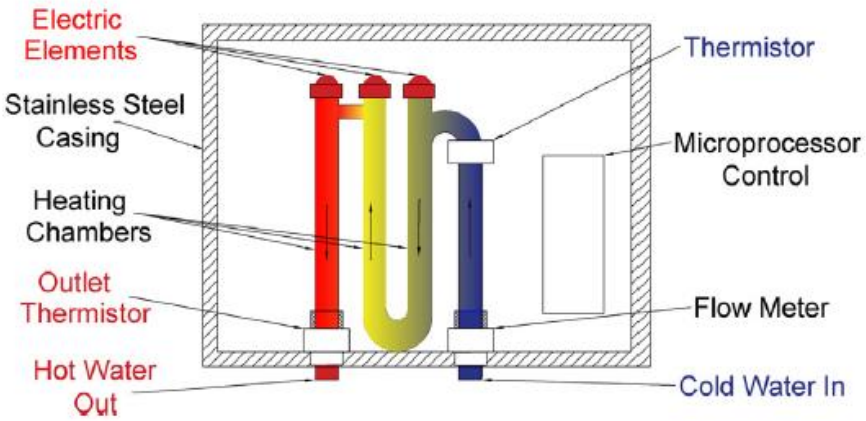


Εικόνα 18: Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού με δεξαμενή αποθήκευσης (Electric storage tank water heater - ESTWH) [25]

3.2.2.2 Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης

Αυτός ο θερμαντήρας νερού (Electric tankless water heater (ETWH)) λειτουργεί με την ίδια αρχή όπως ο ESTWH. Πολλαπλά στοιχεία θερμαίνουν το νερό για να εξασφαλίζεται άμεση παροχή όπου απαιτηθεί. Αυτό το σύστημα είναι ένας θερμοσίφωνας τύπου «απαίτησης», που σημαίνει ότι το νερό θερμαίνεται μόνο όταν απαιτείται. Δεν υπάρχει κάπου αποθηκευμένο ζεστό νερό, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης ποσότητας ζεστού νερού που απαιτείται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η στιγμιαία θέρμανση του νερού καταναλώνει σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος. Αναφερόμενοι στην Εικ. 19, την στιγμή που απαιτείται ζεστό νερό, το ψυχρό νερό ρέει μέσα στον θερμαντήρα, όπου θερμαίνεται από τρία ξεχωριστά ηλεκτρικά στοιχεία. Η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται καθώς διέρχεται από κάθε τμήμα θέρμανσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η τελική επιθυμητή θερμοκρασία στο τρίτο και τελικό στοιχείο. Η πλακέτα ελέγχου με μικροεπεξεργαστές ρυθμίζει την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση του νερού στη θερμοκρασία που έχει ορίσει ο χρήστης. Η θερμοκρασία του ψυχρού νερού εισόδου, η θερμοκρασία του ζεστού νερού εξόδου και η ροή του νερού παρακολουθούνται και η ισχύς προσαρμόζεται αναλόγως. Λόγω της απουσίας δεξαμενής αποθήκευσης, ο θερμαντήρας

απαιτεί μικρότερο χώρο, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στη θέση ζήτησης ζεστού νερού. Αυτό, με τη σειρά του, μειώνει τις απώλειες θερμότητας (*Milward, R., Prijyanonda, J., 2005.*).



Εικόνα 19: Ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης (Electric tankless water heater - ETWH) [25]

3.2.3 Θέρμανση νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας

3.2.3.1 Ηλιακοί θερμοσίφωνες (SWH)

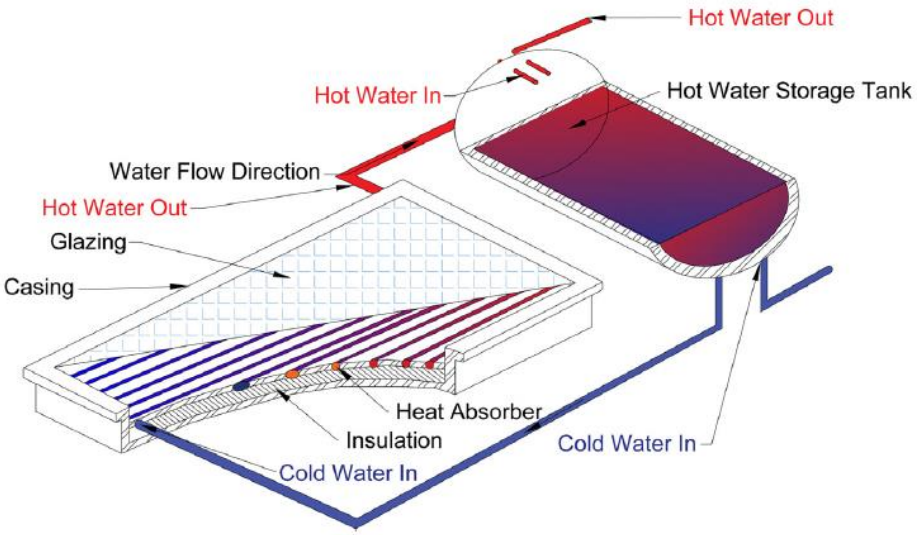
Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες απορροφούν θερμική ενέργεια από τον ήλιο και την προσδίδουν στο νερό. Αυτή η μέθοδος θέρμανσης νερού έχει πλεονεκτήματα, λόγω του γεγονότος ότι η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι ελεύθερη, άφθονη και απεριόριστα ανανεώσιμη. Η τοποθέτηση στον χώρο του ηλιακού συλλέκτη διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ποσότητα ενέργειας που απορροφά. Οι βέλτιστες γωνίες κλίσης του συλλέκτη εξαρτώνται από συγκεκριμένες συντεταγμένες της θέσης όπου είναι εγκατεστημένος ο συλλέκτης. Επιπλέον, αυτές οι γωνίες αλλάζουν σημαντικά ανάλογα τις διάφορες εποχές. Οι περισσότεροι χρήστες συλλεκτών προτιμούν να αποκτούν τη βέλτιστη γωνία κλίσης για τη χειμερινή περίοδο και να εξασφαλίζουν μόνιμα τον συλλέκτη σε αυτή τη θέση, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή παροχή ζεστού νερού κατά τους ψυχρότερους μήνες του έτους (Roux και Gabriel, 2016).

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι ο συλλέκτης σε οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας, δεν πρέπει να καλύπτεται από τον ήλιο. Αυτό σημαίνει ότι οι περισσότεροι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται στις στέγες των κτιρίων. Οι περισσότεροι ηλιακοί θερμοσίφωνες διαθέτουν θερμικές δεξαμενές αποθήκευσης σε θέση υψηλότερη από αυτή του ίδιου του συλλέκτη. Αυτό γίνεται έτσι ώστε η κυκλοφορία να μπορεί να πραγματοποιηθεί φυσικά μέσω του φαινομένου του θερμοσιφώνου. Το φαινόμενο αυτό είναι ένα φυσικό φαινόμενο, όπου το ψυχρό νερό υψηλότερης πυκνότητας μετατοπίζει το λιγότερο πυκνό ζεστό νερό μέσω της φυσικής μεταφοράς. Το νερό κυκλοφορεί μέσω του συστήματος συλλέκτη και της δεξαμενής, για να διατηρεί συνεχώς την επιθυμητή θερμοκρασία (Joubert et al., 2016).

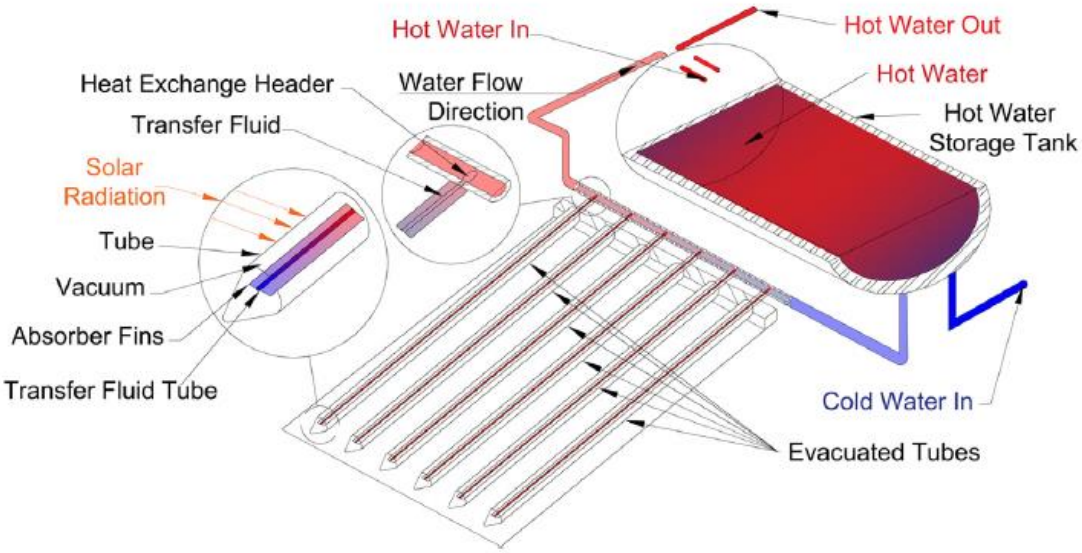
Τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού μπορούν να υποδιαιρεθούν σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα. Το ενεργό σύστημα χρησιμοποιεί αναγκαστική κυκλοφορία για να προκαλέσει ροή του υγρού στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι το ρευστό αντλείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη κυκλοφορία. Επιπλέον, τα ενεργά συστήματα μπορεί να έχουν ανοικτό βρόχο (άμεση θέρμανση οικιακής ύδρευσης) ή κλειστού βρόχου (έμμεση θέρμανση του νερού, μέσω υγρού μεταφοράς θερμότητας) (Jamar et al., 2016). Το παθητικό σύστημα χρησιμοποιεί μια φυσική μέθοδο για την επαγωγή κυκλοφορίας μέσω του φαινομένου του θερμοσιφώνου όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποθήκευσης συλλεκτών (ICS) είναι ένα παράδειγμα του παθητικού συστήματος, όπου λαμβάνει χώρα η φυσική κυκλοφορία.

Τέσσερις παραλλαγές των συλλεκτών είναι επί του παρόντος διαθέσιμες σε τεχνολογίες ηλιακής θέρμανσης νερού.

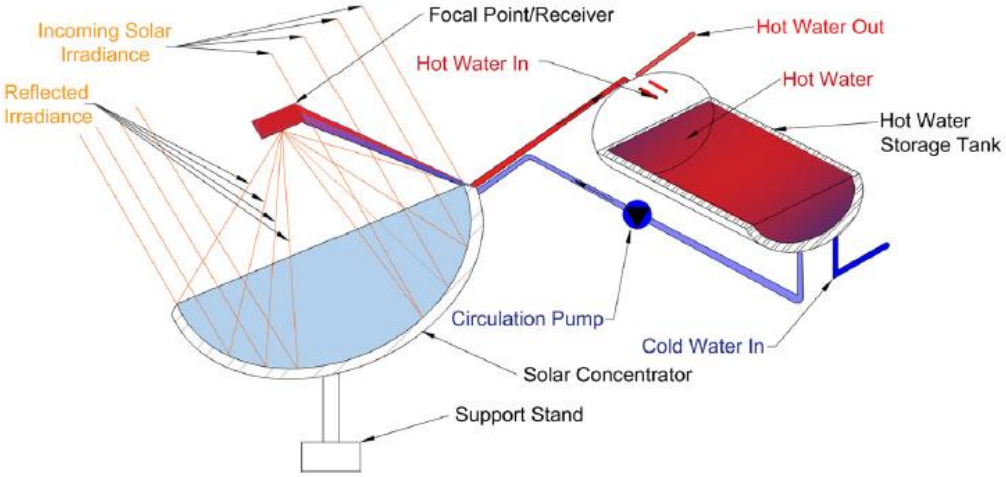
- Οι *Flat plate* συλλέκτες (Εικ. 20)
- Οι *evacuated tube* συλλέκτες, (Εικ. 21)
- Οι *concentrated solar* συλλέκτες (parabolic collectors (Εικ. 22)
- Και οι *Parabolic trough* συλλέκτες (Εικ. 23).



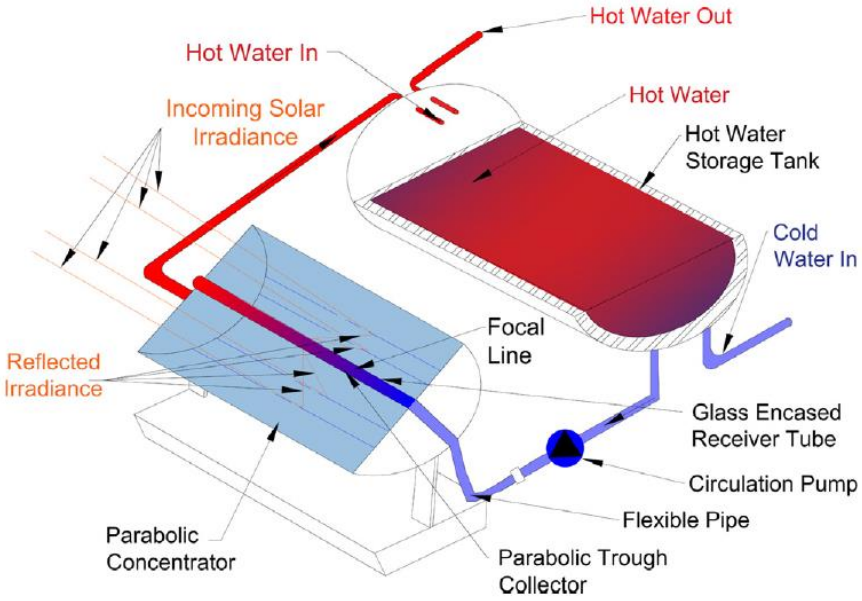
Εικόνα 20: Επίπεδος συλλέκτης (Συλλέκτης Flat plate - FPC) [25]



Εικόνα 21: Συλλέκτης κενών σωλήνων (Evacuated tube - ETC) [25]



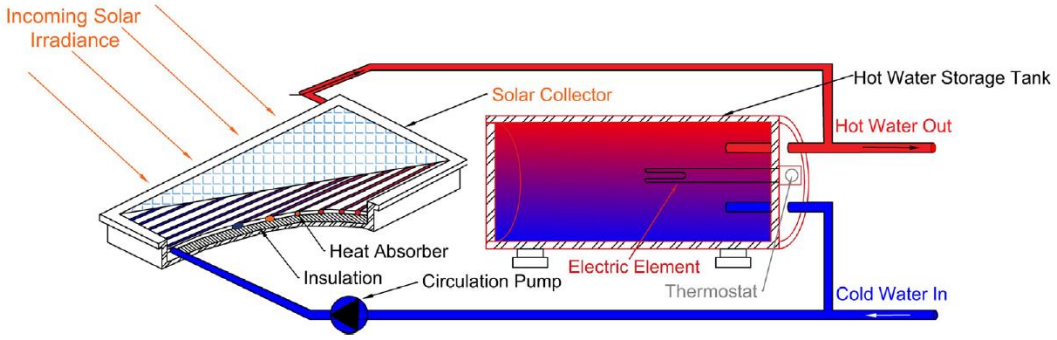
Εικόνα 22: Παραβολικός συλλέκτης (Parabolic dish - PDC) [25]



Εικόνα 23: Συλλέκτης παραβολικής σκάφης (Parabolic trough - PTC) [25]

3.2.3.2. Υβριδικοί θερμοσίφωνες ηλιακής / ηλεκτρικής ενέργειας με δεξαμενή αποθήκευσης (HSWH)

Οι αυτόνομοι ηλιακοί θερμοσίφωνες μπορεί μερικές φορές να αποδειχθούν ανεπαρκείς για τη θέρμανση του νερού. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι αποκλειστικά διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποτελεί σημαντική πρόκληση για την ικανοποίηση της ζήτησης ζεστού νερού. Όταν απαιτείται ζεστό νερό καθ 'όλη τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, οι SWH μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα υπάρχον σύστημα ESTWH, έτσι ώστε το νερό να μπορεί να θερμανθεί όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής.



Εικόνα 24: Υβριδικό ηλιακό-ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης νερού (Hybrid solar/electric water heating system-HSWH) [25]

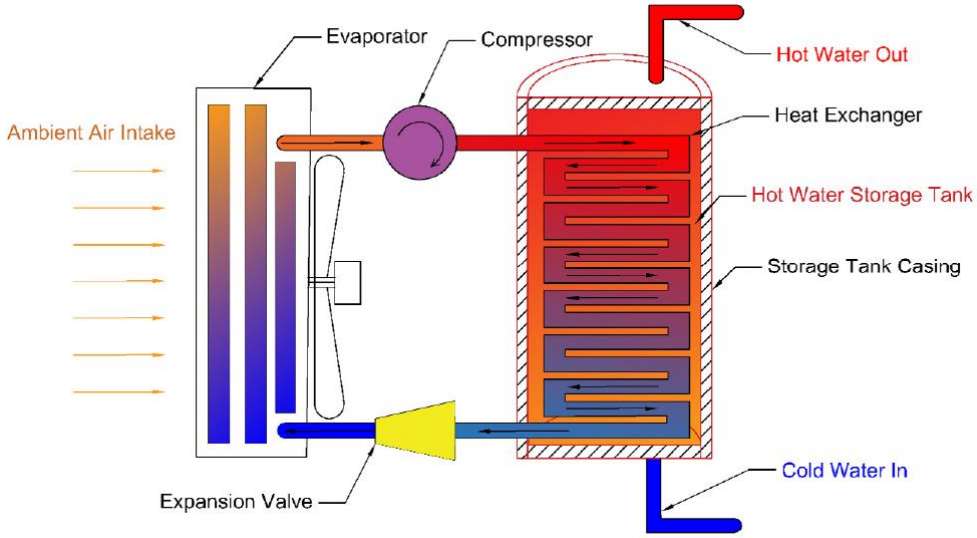
3.2.4 Θέρμανση νερού με χρήση αντλιών θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας εξάγουν την ενέργεια του περιβάλλοντος για να θερμάνουν το νερό. Αυτή η μέθοδος θέρμανσης νερού είναι πιο αποδοτική από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο θέρμανσης νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θερμαντήρες νερού που βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική ενέργεια, ενώ η αντλία θερμότητας μεταφέρει τη θερμική ενέργεια από το ένα μέρος σε κάποιο άλλο.

Μια αντλία θερμότητας έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας η οποία είναι περίπου τα δύο τρίτα σε σχέση με τους ηλεκτρικούς θερμαντήρες νερού, λόγω του συντελεστή απόδοσης (COP) που αυτές έχουν. Ο COP περιγράφει την αναλογία της χρήσιμης θέρμανσης (ή ψύξης) που παρέχεται προς το έργο που απαιτείται.

Οι θερμοκρασίες τις οποίες μπορούν να επιτύχουν οι αντλίες θερμότητας όσο αφορά την θέρμανση νερού, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, οι μέγιστες θερμοκρασίες που μπορούν να φτάσουν αυτά τα συστήματα συνήθως κυμαίνονται από 45 έως 50 ° C, με ευνοϊκές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Liu et al., 2017b).

Τα κύρια μέρη των αντλιών θερμότητας είναι ο συμπιεστής, ο εξατμιστήρας, η βαλβίδα εκτόνωσης και ο συμπυκνωτής. Το ψυκτικό μέσο περιέχεται μέσα σε κλειστό βρόχο, όπου απορροφά θερμική ενέργεια από το περιβάλλον. Το ψυκτικό μέσο συμπιέζεται για να ανταλλάξει θερμότητα με το νερό, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 25, συμπυκνώνεται ενώ η θερμότητα ανταλλάσσεται και στη συνέχεια εκτονώνεται, προκειμένου να επιστρέψει πίσω στον εξατμιστήρα για να υπάρξει επαναπορρόφηση της ενέργειας από το περιβάλλον.. Η συνιστώσα που καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια είναι ο συμπιεστής, αλλά αυτή είναι μια πολύ μικρή ποσότητα σε σύγκριση με την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τους συμβατικούς ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες (Hepbasli and Kalinci, 2009).



Εικόνα 25: Θερμαντήρας νερού με αντλία θερμότητας (Heat pump water heater -HPWH) [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Ψύξη

4.1 Ψύξη

Ψύξη είναι η μεταφορά ενέργειας από τα θερμά στα ψυχρότερα σώματα λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς. Σε συνήθεις εφαρμογές ψύξης, αέρας προσδίδει θερμότητα σε μία επιφάνεια που διατηρείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Η επιφάνεια μπορεί να βρίσκεται στον ψυχόμενο χώρο, ή σε κάποιο απομακρυσμένο χώρο από τον οποίο θα προωθείται ο ψυχρός αέρας. Συνήθως το ψυκτικό μέσο είναι το νερό ή ένα πτητικό ψυκτικό. Ο όρος ψύξη συνήθως υποδηλώνει αισθητή μεταφορά θερμότητας, με μία μείωση της θερμοκρασίας του αέρα.

Η απλούστερη και συγχρόνως η πλέον διαδεδομένη μέθοδος ψύξης βασίζεται στο φαινόμενο της αλλαγής φάσεως ενός σώματος συνήθως πτητικού και των θερμικών συναλλαγών που συνοδεύουν τη μεταβολή αυτή. Συνήθως αξιοποιείται η μετάβαση ενός πτητικού ρευστού από την υγρή στην αέρια φάση (ατμοποίηση), με πρόσδοση της εκάστοτε απαιτούμενης θερμότητας ατμοποιήσεως. Κατά την αντίστροφη διεργασία δηλαδή τη μετάβαση από την αέρια στην υγρή φάση (συμπύκνωση), πρέπει να αποβληθεί αντίστοιχα, η θερμότητα συμπυκνώσεως.

Όπως είναι γνωστό, η μετάβαση ενός σώματος από την υγρή στην αέρια φάση, εντός χώρου στον οποίο δεν υπάρχουν άλλα αέρια εκτός από την αέρια φάση του υπόψη σώματος καλείται ατμοποίηση. Ατμοποίηση έχουμε π.χ. στον ατμοποιητή όλων των γνωστών ψυκτικών εγκαταστάσεων μηχανικής συμπιέσεως ατμού ψυκτικού μέσου. Εδώ το ψυκτικό μέσο ατμοποιείται και παράγει την εκάστοτε επιθυμητή ψύξη, π.χ. του αέρα ενός κλιματιζόμενου χώρου. Αντίθετα μετάβαση ενός σώματος από την υγρή στην αέρια φάση, σε ένα χώρο ή γενικά εντός περιβάλλοντος όπου εκτός από την αέρια φάση του υπόψη σώματος συνυπάρχουν επιπλέον ένα ή και περισσότερα αέρια, καλείται εξάτμιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της εξατμίσεως αποτελούν οι πύργοι ψύξεως. Εντός των πύργων αυτών διασκορπίζεται σε ρεύμα ατμοσφαιρικού αέρα νερό κατ' αντιρροή, για υποβοήθηση της επιδιωκόμενης ψύξης των συμπυκνωμάτων των σταθμών αυτών. Το διασκορπιζόμενο νερό δεχόμενο την αναγκαία θερμότητα ατμοποιήσεως μεταβαίνει στην αέρια φάση, παρουσία όμως αέρα ήτοι εξατμίζεται. Οι πύργοι αυτοί καλούνται και εξατμιστικοί πύργοι ψύξεως.

Η αλλαγή φάσεως και στις δύο πιο πάνω περιπτώσεις της ατμοποιήσεως και της εξατμίσεως απαιτεί πάντοτε την πρόσδοση προς το εργαζόμενο σώμα της εκάστοτε απαιτούμενης θερμότητας ατμοποιήσεώς του. Η θερμότητα ατμοποιήσεως λαμβάνεται γενικά από το άμεσο περιβάλλον, στο οποίο πραγματοποιείται η αλλαγή φάσεως του υπόψη πτητικού ρευστού, με

4.2 Εξοπλισμός και εξαρτήματα ψύξης

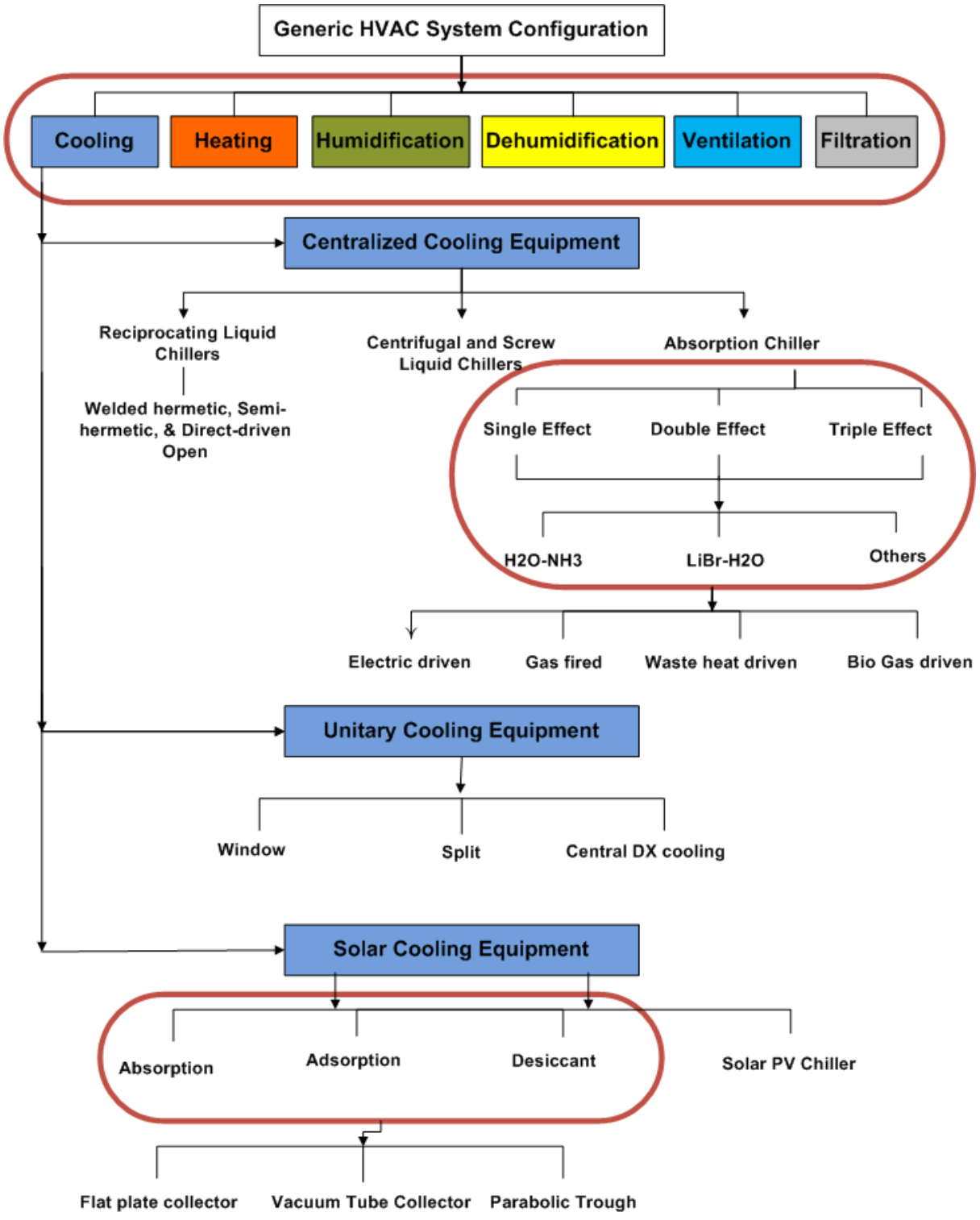
Η ψύξη είναι ένας βασικός παράγοντας, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία του κλιματιζόμενου χώρου για την άνεση των χρηστών. Η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία ποικίλλει ανάλογα με την καθορισμένη εφαρμογή. Αλλά κανονικά η θερμοκρασία της ζώνης άνεσης του καλοκαιριού κυμαίνεται μεταξύ 22 oC και 26°C. [*ASHRAE, ASHARE Handbook: Fundamentals.: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2005, vol. SI Edition.]*

Διάφορες εναλλακτικές λύσεις εξοπλισμού ψύξης χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του στόχου. Στα συστήματα HVAC, διάφοροι τύποι ψυκτικών συγκροτημάτων είναι τα βασικά στοιχεία για την ικανοποίηση του απαιτούμενου φορτίου ψύξης. Για την ψύξη χώρων, τα ψυκτικά συγκροτήματα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κρύου νερού που τροφοδοτείται στα εξαρτήματα χειρισμού του αέρα για την επίτευξη της επιθυμητής θερμικής κατάστασης του αέρα τροφοδότησης. Τα ψυκτικά συγκροτήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριους τύπους, τις μηχανικές ψυκτικές εγκαταστάσεις και τις εγκαταστάσεις απορρόφησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το σύστημα HVAC μπορεί να είναι συνδυασμός και των δύο τύπων.

Η διαθέσιμη χωρητικότητα των παλινδρομικών ψυκτικών εγκαταστάσεων και των ψυκτικών συγκροτημάτων με βαλβίδες είναι από περίπου από 7 έως 1600 kW και από 100 έως 4400 kW αντίστοιχα. Ωστόσο, οι φυγοκεντρικές ψυκτικές εγκαταστάσεις είναι διαθέσιμες για μεγαλύτερο εύρος από 280 kW έως 14 MW σε σύγκριση με προηγούμενους τύπους. [*ASHRAE, ASHARE Handbook: HVAC Systems and Equipment.: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2008, vol. SI Edition.*]

Στις εφαρμογές ηλιακού κλιματισμού χρησιμοποιούνται συχνά ψυκτικές μονάδες απορρόφησης μαζί με συστήματα ψύξης ξηραντικού. Ο ηλιακός συλλέκτης είναι το βασικό

συστατικό για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας στη θερμική ενέργεια που οδηγεί στην ηλιακή ψύξη. Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι ο συνηθέστερος τύπος συλλέκτη που χρησιμοποιείται. Οι συλλέκτες σωλήνων κενού είναι πιο αποδοτικοί σε σύγκριση με τις επίπεδες πλάκες, αλλά είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος [Hans-Martin Henning 2003, vol. 1]. Η εικόνα 26 δείχνει μερικά παραδείγματα διαθέσιμων επιλογών εξοπλισμού για την ψύξη κεντρικών, αποκεντρωμένων και ηλιακών συστημάτων [Mukhtar Hussain Sahir, 2010.].



Εικόνα 26: Εξοπλισμός ψύξης για συμβατικά και καινοτόμα συστήματα [26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Αερισμός και διήθηση αέρα

5.1 Η κίνηση του αέρα

Η κίνηση του αέρα εντός των αεραγωγών πρέπει να έχει αρκετή ενέργεια ώστε να υπερνικά τις απώλειες που αναπτύσσονται εντός των αγωγών, αλλά ταυτόχρονα να είναι χαμηλή προκειμένου να μη δημιουργείται θόρυβος και όχληση. Η επιθυμητή ροή αέρα επιτυγχάνεται με τη χρήση και την σωστή τοποθέτηση ειδικών διαφραγμάτων (dampers) και τη χρήση διαφόρων συσκευών κυκλοφορίας αέρα. Η ποιότητα διανομής αέρα είναι άκρως σημαντική, ειδικά για τη φαρμακοβιομηχανία και τα clean rooms όπου πρέπει να διατηρείται εσωτερική υπερπίεση σε σχέση με το περιβάλλον.

5.2 Εφύγρανση αέρα

Η μεταφορά υδρατμού προς τον ατμοσφαιρικό αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσής του αέρα σε νερό, ορίζεται ως εφύγρανση. Η μεταφορά θερμότητας συνδέεται με αυτή τη μεταφορά μάζας. Ωστόσο η μεταφορά μάζας και ενέργειας εκδηλώνονται σε μία αύξηση της συγκέντρωσης νερού στο μίγμα αέρα-υδρατμού. Εδώ χρησιμοποιείται ο όρος της λανθάνουσας θερμότητας. Η διαδικασία της εφύγρανσης συνήθως επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό σταγονιδίων νερού τα οποία εξατμίζονται μέσα στο διερχόμενο ρεύμα αέρα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν υγρά πανιά και πλάκες για την εξυπηρέτηση του ίδιου σκοπού.

Η λανθάνουσα ενέργεια που απαιτείται κατά τη διαδικασία εφύγρανσης μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστός ο ρυθμός ατμοποίησης του νερού και η ενθαλπία ατμοποίησης (λανθάνουσα ενθαλπία). Η σχέση είναι:

$$\dot{q}_l = i_{fg}\, \dot{m}_w$$

Όπου:

- $\dot{q}_l$ = ρυθμός πρόσδοσης λανθάνουσας θερμότητας, [W]
- i_{fg} = ενθαλπία ατμοποίησης, [J/kg]

- $\dot{m}_w$ = ρυθμός ατμοποίησης νερού, [kg/s]

Η παραπάνω σχέση δε δίνει απαραίτητα τη συνολική ενέργεια που ανταλλάσσεται με το ρεύμα αέρα κατά την εφύγρανσή του. Εάν το ρευστό που εγχύεται είναι σε οποιαδήποτε κατάσταση εκτός από κορεσμένος ατμός στην ίδια θερμοκρασία με τον αέρα, τότε θα αλλάξει η θερμοκρασία του λόγω αισθητής θέρμανσης ή ψύξης.

5.3 Αφύγρανση

Η αφαίρεση υδρατμού από ένα ρεύμα ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται αφύγρανση. Σε αυτή τη διαδικασία εμπλέκεται θερμότητα υπό λανθάνουσα μορφή. Η αφύγρανση επιτυγχάνεται συνήθως με την κυκλοφορία του υγρού αέρα πάνω σε μια επιφάνεια η οποία διατηρείται σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία, ώστε να προκληθεί συμπύκνωση του υδρατμού του μίγματος. Ο ίδιος σκοπός μπορεί να επιτευχθεί με τον ψεκασμό κρύου νερού στο ρεύμα αέρα, ή με τη χρήση αφυγραντικών υλικών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (3.2) για να προβλεφθεί η λανθάνουσα μεταφορά θερμότητας, με αρνητικό πρόσημο το οποίο υποδεικνύει ότι η ενέργεια μεταφέρεται από το ρεύμα αέρα.

5.4 Φιλτράρισμα αέρα

Ο καθαρισμός του αέρα συνήθως επιτυγχάνεται με φίλτρα. Επιπροσθέτως μπορεί μερικές φορές να χρειάζεται να αφαιρεθούν ρυπογόνα αέρια από το ρεύμα αέρα. Το φιλτράρισμα επί των πλείστων επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας, κατά την οποία τα ανεπιθύμητα σωματίδια συγκρατούνται από ένα πορώδες μέσο. Για την αφαίρεση σωματιδίων πολύ μικρής διαμέτρου χρησιμοποιούνται ηλεκτροστατικά φίλτρα. Τα ρυπογόνα αέρια μπορούν να αφαιρεθούν με μεθόδους απορρόφησης, φυσικής προσρόφησης και άλλες.

5.4.1 Σύστημα διήθησης

Ο αέρας που πρόκειται να εισέλθει στην ελεγχόμενη ζώνη πρέπει να φιλτραριστεί. Η διήθηση του αέρα αφορά το διαχωρισμό των σωματιδίων από αυτόν. Οι μέθοδοι διήθησης διαφέρουν αναλόγως με τα εύρη μεγεθών των σωματιδίων που πρόκειται να διαχωριστούν. Όσο τα σωματίδια αυτά μικραίνουν σε μέγεθος, παύουν να συμπεριφέρονται σαν σωματίδια και αποκτούν ιδιότητες αερίου. Είναι δύσκολο να διακρίνει κανείς εάν τόσο μικρά σωματίδια είναι διαλυμένα στον αέρα (σωματίδια) ή διαχυμένα σε αυτόν. Το κατώτερο όριο στο οποίο τα σωματίδια δρουν ως αληθινά σωματίδια, είναι τα 0,01 μm. Η θεωρία της διήθησης δεν ισχύει για μεγέθη μικρότερα από το 0,01μm και ο διαχωρισμός τους απαιτεί ειδικές τεχνικές για διαχωρισμό αερίων.

Όλος ο αέρας που πρόκειται να εισέλθει στο cleanroom θα πρέπει να διηθηστεί από ένα ή και περισσότερα φίλτρα. Τα πιο κοινά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στα cleanrooms είναι τα:

- Προ-φίλτρα (Pre Filters) ή Σακόφιλτρα (Sack Filters)

Εικόνα 27: Σακόφιλτρο [27]

- HEPA Filters (High Efficiency Particulate Air Filters)

Εικόνα 28: HEPA Filter [28]

- ULPA Filters (Ultra Low Penetration Air Filters)

Εικόνα 29: ULPA Filter [29]

Τα φίλτρα αέρα συγκροτούνται από το μέσο διήθησης, το πλαίσιο και μερικές φορές από την τσιμούχα (gasket)

- Το μέσο διήθησης συνήθως είναι από υάλινο νήμα, συνθετικό νήμα, μη υφασμένο νήμα και PTFE. Τα φίλτρα υψηλής απόδοσης χρησιμοποιούν υπο-μικρό υάλινο νήμα καλυπτόμενο από αλουμινένιο πλαίσιο.
- Το σφραγιστικό είναι το κολλώδες μέσο το οποίο δημιουργεί ένα στεγανό σφράγισμα μεταξύ του μέσο διήθησης και του πλαισίου.
- Το πλαίσιο μπορεί να είναι από διάφορα υλικά όπως: Αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι, πλαστικό.
- Τσιμούχα είναι ένα πλαστικό ή σπογγώδες υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για να εμποδίζει τυχόν διαρροές αέρα μεταξύ του φίλτρου και του καλύμματος.

Ο αέρας εισέρχεται στο φίλτρο από την ανάντι μεριά. Ρέει μέσα από αυτό, τα επιβλαβή σωματίδια διαχωρίζονται και ο καθαρός πλέον αέρας εξέρχεται από την κατάντι μεριά. Το επίπεδο καθαριότητας του αέρα εξαρτάται από την απόδοση του φίλτρου.

5.4.2 Αρχές διήθησης

Η διήθηση του αέρα βασίζεται σε 4 βασικές αρχές:

1. Αδρανειακή πρόσκρουση: Συμβαίνει όταν ένα σωματίδιο αποκλίνει από το ρεύμα αέρα (λόγω αδράνειας) και συγκρούεται με ένα νήμα. Γενικά τα φίλτρα «πρόσκρουσης» μπορούν να συγκρατήσουν ικανοποιητικά σωματίδια πάνω από 10 μm σε διάμετρο, επομένως χρησιμοποιούνται ως προ-φίλτρα σε συστήματα με πολλά φίλτρα. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του ρεύματος αέρα, τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια που αποκτούν τα σωματίδια και τόσο μεγαλύτερη η αποτελεσματικότητα της αρχής πρόσκρουσης.

2. Συγκράτηση: Συμβαίνει όταν ένα μεγάλο σωματίδιο, λόγω του μεγέθους του, συγκρούεται με ένα νήμα του φίλτρου μέσα από το οποίο διέρχεται το ρεύμα αέρα. Σε αυτή την αρχή, τα σωματίδια έρχονται σε επαφή με τα νήματα και παραμένουν «κολλημένα» στα νήματα λόγω αδύναμων μοριακών δυνάμεων γνωστές ως δυνάμεις Van-der-Waals.

3. Διάχυση: Συμβαίνει όταν η τυχαία κίνηση ενός μορίου (Brown Theory) προκαλεί την επαφή του με το νήμα του φίλτρου. Η διάχυση παρατηρείται στα πολύ μικρά σωματίδια και στα φίλτρα HEPA και ULPA. Τα σωματίδια είναι τόσο μικρά που η τυχαία τους κίνηση μοιάζει με δόνηση. Εξαιτίας αυτής της δόνησης, τα σωματίδια έχουν αρκετά μεγάλες πιθανότητες να έρθουν σε επαφή με τα νήματα. Όσο μικρότερο το σωματίδιο, τόσο πιο έντονο το φαινόμενο. Για μεγάλα σωματίδια, διαμέτρου άνω του 1μm , αυτός ο μηχανισμός διήθησης δεν έχει αποτέλεσμα.

4. Ηλεκτροστατική έλξη: Ο μηχανισμός αυτός παίζει πολύ μικρό ρόλο στη μηχανική διήθηση. Εάν ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο περάσει μέσα από ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, έλκεται από το αντίθετα φορτισμένο σώμα. Τέτοιου είδους φορτία μπορούν να δημιουργηθούν στα σωματίδια εντός του ρεύματος αέρα λόγω της τριβής τους με τα νήματα. Τα τυπικά ηλεκτροστατικά φίλτρα αποτελούνται από νήματα πολυεστέρα ή πολυπροπυλενίου τα οποία φορτίζονται καθώς ο αέρας τα διαπερνά. Παρόλο που ο μηχανισμός αυτός έχει πολύ μικρή επίδραση στη μηχανική διήθηση, δεν παύει να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την περαιτέρω αύξηση της απόδοσης διήθησης.

5.4.3 Τυποποίηση φίλτρων

Τα φίλτρα αέρα περιγράφονται και αξιολογούνται με βάση την αποδοτικότητα συλλογής σωματιδίων, την πτώση πίεσης (ή αντίσταση διέλευσης αέρα) και την ικανότητα συγκράτησης σωματιδίων. Η ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) έχουν δημιουργήσει τα πρότυπα 52.1-1992 και 52.2-1999 τα οποία τυποποιούν τα φίλτρα σχετικά με τη «Σύλληψη» και την «Αποδοτικότητα».

Το πρότυπο 52.1-1992 μετρά τη σύλληψη, αποδοτικότητα εντοπισμού σκόνης και την ικανότητα συγκράτησης σκόνης. Η σύλληψη σε ένα φίλτρο μεταφράζεται στην ικανότητα ενός φίλτρου να συγκρατεί σκόνη και να περιγράφει πόσο καλά ένα φίλτρο αέρα αφαιρεί μεγαλύτερα σωματίδια όπως ακαθαρσίες, τρίχες και σκόνη. Η ικανότητα συγκράτησης σκόνης του φίλτρου είναι η ποσότητα σκόνης που μπορεί να συγκρατήσει το φίλτρο χωρίς να υπερβεί την αντίσταση 0,18 ίντσες-w.c (water column) για φίλτρα χαμηλής αντίστασης, 0,50 ίντσες-w.c για φίλτρα μεσαίας αντίστασης και 1,0 ίντσα-w.c για φίλτρα υψηλής αντίστασης. Η αποδοτικότητα εντοπισμού σκόνης μετρά την ικανότητα ενός φίλτρου να αφαιρεί μεγάλα

σωματίδια, εκείνα που τείνουν να φθείρουν τα εσωτερικά δομικά υλικά ενός κτιρίου. Η ικανότητα συγκράτησης σκόνης είναι μία μέτρηση της συνολικής ποσότητας σκόνης που μπορεί να συγκρατήσει ένα φίλτρο κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής αντοχής σε σκόνη.

Η σύλληψη σκόνης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mu_a = 1 - \frac{C_a}{C_b}$$

Όπου:

- μ_a : Η σύλληψη σκόνης
- C_a : Η συγκέντρωση αέρα σε σκόνη μετά το φίλτρο
- C_b : Η συγκέντρωση του αέρα σε σκόνη πριν το φίλτρο

Εφόσον τα μεγάλα σωματίδια αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του βάρους ενός δείγματος αέρα, ένα φίλτρο θα μπορούσε να αφαιρέσει ένα αρκετά μεγάλο μέρος αυτών των σωματιδίων χωρίς να επιδρά στα πολυάριθμα μικρά σωματίδια του δείγματος. Έτσι, τα φίλτρα με βαθμό σύλληψης 90% δεν παρατηρούνται συχνά στα cleanrooms.

Το πρότυπο της ASHRAE 52.2-1999 ποσοτικοποιεί την αποδοτικότητα διήθησης για διαφορετικά εύρη μεγεθών σωματιδίων και τυποποιεί τα αποτελέσματα ως MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) μεταξύ 1 και 16. Αυτό στο σύστημα αρίθμησης διευκολύνει την αξιολόγηση και τη σύγκριση μηχανικών φίλτρων αέρα. Όσο υψηλότερο είναι το MERV τόσο πιο αποτελεσματικό το φίλτρο.

5.4.4 HEPA Filters

Τα φίλτρα HEPA λειτουργούν κυρίως βάσει της αρχής διάχυσης για την αφαίρεση σωματιδίων και είναι εξαιρετικά σημαντικά για τη διατήρηση του επιπέδου καθαριότητας του cleanroom. Τα φίλτρα αυτά συγκρατούν σωματίδια μέχρι και 0,3 μm με αποδοτικότητα 99,97%. Το ποσοστό αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό εάν αναλογιστεί κανείς ότι ο εξωτερικός αέρας που

εισπνέουμε μπορεί να περιέχει μέχρι 5 εκατομμύρια διαλυμένα σωματίδια σκόνης, ρύπων και γύρης σε ένα κυβικό πόδι.

Τα φίλτρα HEPA συνήθως χρησιμοποιούν υάλινα νήματα ως μέσο διήθησης και διατίθενται σε πάχη 6 ή 12 ιντσών. Όταν είναι καθαρισμένα προκαλούν πτώση πίεσης στη ροή κατά 1 ίντσα στήλης ύδατος και γενικά πρέπει να αντικαθίστανται όταν η πτώση πίεσης ξεπερνά τις 2 ίντσες στήλης ύδατος.

Τα φίλτρα HEPA δεν έχουν τυποποίηση MERV καθώς υπερβαίνουν το πρωτόκολλο δοκιμών της ASHRAE. Πιο συγκεκριμένα, τα φίλτρα HEPA είναι τα μόνα μηχανικά φίλτρα που ελέγχονται και πιστοποιούνται στην εκάστοτε περίπτωση για ειδική αποδοτικότητα και μέγεθος σωματιδίων. Όλα τα φίλτρα HEPA πρέπει να έχουν ελάχιστη αποδοτικότητα ίση με 99,7% για σωματίδια μεγέθους 0,3 μm.

Προ-φίλτρα: Προκειμένου να επεκταθεί η αντοχή των φίλτρων HEPA, συνίσταται η χρήση προ-φίλτρων, τα οποία συγκρατούν την πλειοψηφία των σωματιδίων με μέγεθος άνω του 1 μm. Τα προ-φίλτρα η αλλιώς σακόφιλτρα τοποθετούνται πριν τα φίλτρα HEPA και έχουν ξεχωριστή πρόσβαση για συντήρηση, προκειμένου να μη διακόπτεται η ροή του αέρα σε περίπτωση βλάβης, αντικατάστασης ή συντήρησης.

Διατίθενται σε διάφορα μεγέθη με πάχη 6 και 12 ίντσες και με πτώση πίεσης από 0,2 έως 0,25 ίντσες στήλης ύδατος. Η ικανότητα συγκράτησης σκόνης ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα καλή. Οι εφαρμογές που απαιτούν σύστημα διήθησης με καλή ικανότητα συγκράτησης σκόνης, προτείνονται τα σακόφιλτρα με ύφασμα από υαλοβάμβακα. Τα φίλτρα αυτά έχουν αποδοτικότητα από 85% έως 99,97% (5μm).

5.4.5 ULPA Filters

Η αυξανόμενη ζήτηση της αγοράς από την εξελιγμένη επιστήμη και τεχνολογία, οδήγησε στο σχεδιασμό των φίλτρων ULPA (Ultra Low Particulate Air) τα οποία παρέχουν αποδοτικότητα πάνω από 99,999% (μέγιστη διαπερατότητα 0,001%) για σωματίδια μεγέθους 0,3 μm, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερες κλάσεις αποστείρωσης και καθαρότητα περιβάλλοντα εργασίας. Χρησιμοποιούνται στα ultra-cleanrooms, όπου τα επίπεδα αποστείρωσης πρέπει να είναι υψηλότερα από ότι στα cleanrooms που χρησιμοποιούν φίλτρα HEPA.

Τα φίλτρα ULPA (χωρίς βόριο) αποδοτικότητας 99,997% χρησιμοποιούνται για σωματίδια μεγέθους 0,12 μm για cleanrooms κλάσης 10 και κλάσης 1. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες ηλεκτρονικών, όπου το επίπεδο αποστείρωσης πρέπει να είναι κάτω από 0,12 μm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί μαθηματικά οι αριθμοί 99,97% των φίλτρων HEPA και 99,997% των φίλτρων ULPA να φαίνονται σχετικά ίσοι, ωστόσο στην τεχνολογία των cleanrooms έχουν μεγάλη διαφορά. Σε φίλτρα αποδοτικότητας 99,97%, ο βαθμός διαπερατότητας είναι 0,03% ενώ σε φίλτρα αποδοτικότητας 99,99% η διαπερατότητα ισούται με 0,01%. Αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο με αποδοτικότητα 99,99% είναι τρεις φορές πιο αποδοτικό στο να αφαιρεί σωματίδια μεγέθους 0,3 μm.

5.4.6 Δοκιμές φίλτρων

Η αποδοτικότητα των φίλτρων είναι πρώτιστης σημασίας και πρέπει να υπολογίζεται με κατάλληλο τρόπο. Τυπικά ελέγχονται και πιστοποιούνται κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο μετά την εγκατάστασή τους απαιτείται έλεγχος των σφραγισμάτων σε βάση 90 ημερών και ένας πλήρης έλεγχος των φίλτρων 2 φορές το χρόνο. Υπάρχουν γενικά 5 διαφορετικές μέθοδοι για την εκτίμηση της αποδοτικότητας:

1. <u>Η μέθοδος προσμέτρησης σωματιδίων</u>: Σε αυτή τη μέθοδο, προσδιορίζεται ο πραγματικός αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα, μέσω μικροσκοπικής ανάλυσης ενός δείγματος αέρα. Αυτή η διαδικασία είναι υπερβολικά χρονοβόρα και μπορεί εύκολα να γίνει ανθρώπινο λάθος. Η συγκέντρωση της σκόνης πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, καθώς αν ξεπερνά κάποια όρια η μέτρηση σταματά αυτόματα.

2. <u>Η μέθοδος βάρους</u>: Η μέθοδος βάρους υπολογίζει το βάρος της σκόνης που αφαιρείται από το φίλτρο ως ποσοστό του συνολικού βάρους της σκόνης του αέρα πριν υποστεί διήθηση. Η δοκιμή σύλληψης βάρους είναι μια απλή δοκιμή κατά την οποία τροφοδοτείται συνθετική σκόνη στο φίλτρο και υπολογίζεται η ποσοστιαία συγκέντρωσή της στην έξοδο του φίλτρου προς τη συγκέντρωση πριν το φίλτρο. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως γνωστή και εύκολη προς εφαρμογή. Ωστόσο έχει μερικά μειονεκτήματα, καθώς οι μετρήσεις βάρους δίνουν κατά κόρον το βάρος των

μεγαλύτερων σωματιδίων του δείγματος. Δεδομένου ότι τα μικρά σωματίδια έχουν μικρή μάζα, η μέθοδος αυτή δεν παρέχει ασφαλή αποτελέσματα για τη συγκράτησή τους. Οι περισσότεροι κατασκευαστές φίλτρων πρόσκρουσης ισχυρίζονται ότι τα προϊόντα τους έχουν αποδοτικότητα μεγαλύτερη από 80%. Εάν μετρηθεί το βάρος των σωματιδίων που συλλέγονται από τα φίλτρα και συγκριθεί με το συνολικό βάρος σωματιδίων πριν τη διήθηση, τότε όντως θα μετρηθεί αποδοτικότητα 80%. Ωστόσο μπορεί το φίλτρο να έχει συγκρατήσει μόνο τα μεγάλα σε μέγεθος σωματίδια, τα οποία αποτελούν το 80% του βάρους του συνόλου.

3. Η μέθοδος εντοπισμού ατμοσφαιρικής σκόνης: Όταν η αποδοτικότητα συγκράτησης μικρών σωματιδίων είναι κρίσιμη, χρησιμοποιείται συχνά η δοκιμή εντοπισμού σκόνης. Κατά τη δοκιμή αυτή, ατμοσφαιρικός αέρας διέρχεται μέσα από το φίλτρο το οποίο έχει ειδικά φίλτρα δοκιμής εκατέρωθεν του φίλτρου για την παρακολούθηση παρουσίας αιωρούμενων σωματιδίων. Με το πέρασμα του χρόνου, τα φίλτρα αυτά φράσσονται. Αναλόγως με το πόσο γρήγορα φράσσονται, μπορούν να αξιολογηθούν και να τυποποιηθούν. Το θετικό με αυτό το τεστ είναι ότι είναι οφθαλμοφανείς οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο φράξιμο του φίλτρου. Ένα μειονέκτημά του ωστόσο, είναι ότι χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα, του οποίου η σύσταση είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη. Συνεπώς είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα του φαινομένου. Ως αποτέλεσμα, είναι αναγκαίο να διεξαχθούν πολλές δοκιμές και να ελεγχθεί η εγκυρότητά των αποτελεσμάτων με τη χρήση στατιστικών τεστ.

4. Η ψυχρή δοκιμή DOP (dioctyl-phtalate): Για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος της δοκιμής εντοπισμού σκόνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δοκιμή (διοκτυλ-φθαλικού εστέρα). Οι ψυχροί διοκτυλ-φθαλικοί παραγωγοί παράγουν αεροζόλ σε θερμοκρασία δωματίου, με τα σωματίδια να διαφέρουν σε μέγεθος από 0,2 μm έως 1,2 μm και με μέση διάμετρο 0,7 μm. Το αεροζόλ εισάγεται στη μονάδα που πρόκειται να ελεγχθεί και προσμετράτε η διάθλαση του φωτός, λόγω της συγκέντρωσης σωματιδίων, στην είσοδο και την έξοδο της μονάδας. Η διάθλαση του φωτός συνδέεται άμεσα με τη συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα. Συνεπώς η αποδοτικότητα του φίλτρου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διαφοράς διάθλασης του φωτός μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του φίλτρου.

5. Η θερμή δοκιμή DOP: Στη δοκιμή αυτή, εξατμίζεται η ουσία DOP με την παροχή θερμότητας και συμπυκνώνεται για να σχηματίσει σωματίδια διαμέτρου 0,3 μm με πολύ μικρή απόκλιση μεγέθους. Τα σωματίδια αυτού του μεγέθους είναι πολύ δύσκολο να συλλεχθούν για οποιοδήποτε φίλτρο και για αυτό το λόγο η θερμή μέθοδος DOP είναι λιγότερο αποτελεσματική από την ψυχρή. Τα φίλτρα HEPA δοκιμάζονται με τη χρήση της θερμής μεθόδου DOP. Το DOP φτάνει το σημείο ζέσεως και ο ατμός που παράγεται εισάγεται στο ρεύμα αέρα ανάντι του φίλτρου που δοκιμάζεται. Καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται υπό τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, σχηματίζει πολύ ομοιόμορφα σταγονίδια διαμέτρου 0,3 μm. Με τη χρήση της διάθλασης του φωτός που προαναφέρθηκε, ανάντι και κατάντι του φίλτρου, μπορούν να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων. Στην ουσία εάν εισαχθούν 10.000 σωματίδια μεγέθους 0,3 μm σε ένα φίλτρο HEPA, μόνο 3 σωματίδια θα μπορέσουν να περάσουν. Έτσι επιτυγχάνεται η τυποποίηση 99,97% στα 0,3μm. Εάν χρησιμοποιούσε κανείς το τεστ αυτό σε ένα φίλτρο ASHRAE 95% απόδοσης, θα υπολόγιζε ότι έχει 50% απόδοση σε σωματίδια σκόνης 0,3 μm. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα φίλτρα HEPA είναι σχεδόν 50% πιο αποδοτικά στο να αφαιρούν σωματίδια εισπνεόμενου μεγέθους, από οποιοδήποτε άλλο φίλτρο ASHRAE στην αγορά.

5.4.7 Σχεδιασμός και εγκατάσταση φίλτρων

Τα φίλτρα HEPA και ULPA που χρησιμοποιούνται στα cleanrooms τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του δωματίου και μπορούν να εγκατασταθούν κατά ομάδες καλυμμένες με ένα ανεξάρτητο σύστημα ανάκτησης πίεσης. Μπορούν επίσης να τοποθετηθούν ως ξεχωριστές μονάδες, με ξεχωριστή παροχή αέρα με στήριγμα τύπου ανάστροφου ‘Τ’ και να είναι στεγανά ώστε να εμποδίζουν την αφιλτράριστη παράκαμψη αέρα και την είσοδό του στο cleanroom.

Όσον αφορά το σχεδιασμό εγκατάστασης φίλτρων σε cleanrooms, ακολουθείται η παρακάτω οδηγία:

Πίνακας 10: Κλάσεις χρήσης φίλτρων HEPA

ISO Class	Fed 208	Controls	HEPA Coverage as % of Ceiling
1	-	Stringent	100
2	-	Stringent	100
3	1	Stringent	100
4	10	Stringent	100
5	100	Stringent	100
6	1,000	Intermediate	33 - 40
7	10,000	Intermediate	10 - 15
8	100,000	Less Stringent	05 -10

Η ανάγκη για την εγκατάσταση των φίλτρων HEPA και ULPA απευθείας στην οροφή του δωματίου, δημιουργείται από την απαίτηση της ελαχιστοποίησης των επιφανειών που είναι εν δυνάμει εστίες συσσώρευσης σκόνης, όπως το εσωτερικό των αεραγωγών, ή τα ίδια τα τοιχώματα του δωματίου. Η απομακρυσμένη τοποθέτηση των φίλτρων HEPA είναι συνήθης σε εφαρμογές όπου τα όρια αποστείρωσης δεν είναι τόσο αυστηρά.

Το μέσο φίλτρο HEPA, με σωστή εγκατάσταση και με συχνές αλλαγές του προ-φίλτρου, μπορεί να λειτουργήσει από 5 έως 8 χρόνια. Υπάρχουν φυσικά και εξαιρέσεις όπως για παράδειγμα εάν το φίλτρο χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση επιβλαβών ή παθογόνων ουσιών θα πρέπει να αντικαθίστανται πιο συχνά.

5.4.8 Ταχύτητα και παροχή αέρα

Η ταχύτητα του αέρα στην επιφάνεια των φίλτρων μπορεί να ισούται γενικά από 0,25 m/s έως 0,70 m/s , αναλόγως το σχεδιασμό του συστήματος. Εφόσον κατάντι των φίλτρων-οροφών βρίσκονται τα στηρίγματα τύπου Τ, τα οποία μπορεί να καταλαμβάνουν έως και 20% της επιφάνειας της οροφής, μία ταχύτητα των 0,5 m/s, θα μεταφραστεί σε μέση ταχύτητα

εισαγωγής στο cleanroom 0,4 m/s. Ένα τυπικό, καθαρό φίλτρο οροφής είναι σχεδιασμένο για πτώση πίεσης της τάξης 0,5 ίντσες στήλης ύδατος με ταχύτητα αέρα 0,5 m/s.

Τα φίλτρα HEPA που χρησιμοποιούνται στις μονάδες διαχείρισης αέρα (AHU), μπορούν να διαχειριστούν μεγάλες ταχύτητες αέρα της τάξης 2,54 m/s, με πτώση πίεσης αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των φίλτρων οροφής. Ένα καθαρό φίλτρο HEPA διαστάσεων 0,6 m x 0,6 m μπορεί να έχει πτώση πίεσης 1,5 ίντσες στήλης ύδατος με ταχύτητα αέρα 2,54 m/s.

Η παροχή αέρα συνήθως τυποποιείται ως η μέση ταχύτητα αέρα εντός του δωματίου ή ως εναλλαγές αέρα ανά ώρα.

Πίνακας 11: Εναλλαγές αέρα ανά κλάση

ISO Class	Fed 208	Controls	Air Velocity at Table level in m/s	Air Changes rate per hour
1	-	Stringent	0,36 – 0,66	>750
2	-	Stringent	0,36 – 0,66	>750
3	1	Stringent	0,36 – 0,56	>750
4	10	Stringent	0,36 – 0,46	500-600
5	100	Stringent	0,13 – 0,20	150-400
6	1.000	Intermediate	0,13 – 0,20	60-100
7	10.000	Intermediate	0,05 – 0,08	25-40
8	100.000	Less Stringent	0,02 – 0,03	10-15

Η μετωπική ταχύτητα συνήθως καθορίζεται από το επίπεδο αποστείρωσης που επιθυμούμε να πετύχουμε. Ως γενικός κανόνας ισχύει ότι όσο πιο υψηλό επίπεδο αποστείρωσης θέλουμε να πετύχουμε σε ένα cleanroom, τόσο πιο μεγάλη ταχύτητα θα πρέπει να έχει ο εισερχόμενος αέρας. Η παροχή αέρα λοιπόν είναι η υψηλότερη για cleanrooms κλάσης 1 και μειώνεται καθώς ανεβαίνουμε κλάσεις.

Για χρόνια η τιμή 0,46 m/s ± 20% χρησιμοποιείται για τα πιο καθαρά cleanrooms. Ο κύριος στόχος είναι διττός:

- Να διαλύει τις συσσωρεύσεις σωματιδίων που μπορεί να έχουν σχηματιστεί πάνω σε επιφάνειες λόγω του προσωπικού ή της διαδικασίας παραγωγής
- Να απομακρύνει τα σωματίδια και τα μικρόβια που δημιουργούνται μέσα στο δωμάτιο.

Αν και η υψηλότερη ταχύτητα αέρα είναι επιθυμητή για την απομάκρυνση σωματιδίων, θα χρειαστεί συνάμα μεγαλύτερη εγκατάσταση και εξοπλισμός, γεγονός που μπορεί να μειώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος.

Η πιο ευρέως αποδεκτή ταχύτητα αέρα είναι η 0,46 m/s. Δεν προέκυψε από επιστημονικές μελέτες, αλλά εμπειρικά, ύστερα από τις εφαρμογές των τελευταίων 20 χρόνων. Τα τελευταία χρόνια οι βιομηχανίες έχουν πειραματιστεί με χαμηλότερες ταχύτητες και έχουν ανακαλύψει ότι οι ταχύτητες από 0,36 έως 0,51 m/s ±20% θα μπορούσαν να εφαρμοστούν επιτυχώς, αναλόγως τις δραστηριότητες και τον εξοπλισμό εντός του δωματίου. Για παράδειγμα σε ένα άδειο δωμάτιο χωρίς εμπόδια για τη ροή αέρα, ακόμα και με ταχύτητα 0,36 m/s θα μπορούσε να απομακρύνει τυχόν μικρόβια αποτελεσματικά από το χώρο. Δεν υπάρχει μία αποκλειστική μέση τιμή ταχύτητας αέρα που χρησιμοποιείται στα cleanrooms για δεδομένη κλάση ISO. Γενικά οι υψηλότερες ταχύτητες χρησιμοποιούνται σε δωμάτια με μεγαλύτερη δραστηριότητα εργατικού προσωπικού και περισσότερο εξοπλισμό για την παραγωγική διαδικασία.

5.4.9 Ροή αέρα βασισμένη στο ρυθμό εναλλαγών αέρα (Air Change Rate)

Ο ρυθμός εναλλαγών αέρα είναι ένα μέγεθος το οποίο εκφράζει πόσο γρήγορα αντικαθίσταται ο εσωτερικός αέρας από τον εξωτερικό (επεξεργασμένο) αέρα. Για παράδειγμα, εάν η ποσότητα του αέρα που εισέρχεται και εξέρχεται σε ένα δωμάτιο σε μία ώρα ισούται με το συνολικό όγκο του δωματίου, λέμε τότε ότι έχουμε μία εναλλαγή αέρα ανά ώρα. Ο ρυθμός εναλλαγών αέρα δίνεται από τον τύπο:

$$AFR\left[\frac{m^3}{min}\right] = AC \cdot \frac{V_{room}}{60}$$

Όπου:

- AFR: Air Flow Rate
- AC: Air Changes
- Vroom: Όγκος δωματίου

Τα cleanrooms με ενδιάμεσο επίπεδο αποστείρωσης συνήθως σχεδιάζονται με 20 με 100 εναλλαγές αέρα ανά ώρα, ενώ σε μικρότερα επίπεδα αποστείρωσης παρατηρούνται μέχρι 15 εναλλαγές αέρα ανά ώρα. Η επιλογή των επιθυμητών εναλλαγών ανά ώρα είναι στην κρίση του σχεδιαστή μηχανικού και το εκάστοτε δυναμικό παραγωγής μικροβίων εντός του δωματίου.

Υψηλότερο ACR ισοδυναμεί με υψηλότερες παροχές αέρα και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Στα περισσότερα cleanrooms, η κύρια πηγή παραγωγής μικροβίων είναι οι εργαζόμενοι. Όταν εκκενώνουν το cleanroom, είναι εφικτή η μείωση του ACR και η διατήρηση των επιθυμητών επιπέδων αποστείρωσης. Οι οδηγοί μεταβλητών ταχυτήτων (Variable speed drives) πρέπει να χρησιμοποιούνται σε όλα τα συστήματα κυκλοφορίας αέρα, επιτρέποντας έτσι την κατάλληλη ρύθμιση της παροχής αέρα και ελαχιστοποιώντας τα φορτία διήθησης για τα φίλτρα. Τα πλεονεκτήματα της βέλτιστης παροχής αέρα είναι τα παρακάτω:

1. Μειωμένα κεφαλαιουχικά έξοδα: Μειωμένες εναλλαγές αέρα συντελούν στη χρήση μικρότερων ανεμιστήρων, οι οποίοι μειώνουν και το αρχικό κόστος επένδυσης και το κόστος κατασκευής. Μία μείωση 20% του ACR επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους των ανεμιστήρων κατά 50%!
2. Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας – Οι ευκαιρίες εξοικονόμησης ενέργειας είναι συγκρίσιμες με τις μειώσεις του μεγέθους των ανεμιστήρων. Σύμφωνα με νόμους που αφορούν τους ανεμιστήρες, η ισχύς του ανεμιστήρα είναι ανάλογη στον κύβο του αριθμού εναλλαγών αέρα. Μια μείωση του ρυθμού εναλλαγών αέρα κατά 30% επιφέρει μείωση στην κατανάλωση ισχύος κατά 66%. Μία μείωση της ροής κατά 50% θα επιφέρει μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος κατά περίπου 87,5%.

Ο σχεδιασμός ενός αξιόπιστου συστήματος με μεταβλητή παροχή αέρα μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των cleanrooms.

5.5 Είδη ροής εισαγόμενου αέρα στα cleanrooms

Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη αποστείρωση των cleanrooms, ο αέρας πρέπει να εισέρχεται σε αυτά με προμελετημένο τρόπο και όχι τυχαίο. Μέχρι σήμερα έχουν επικρατήσει τρεις κύριοι τύποι ροών εισαγωγής αέρα:

1. Ροή μονής κατεύθυνσης (Στρωτή ροή) , όπου οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους
2. Ροή πολλών κατευθύνσεων (Τυρβώδης ροή) , όπου οι γραμμές ροής δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους.
3. Αναμειγμένη ροή, όπου οι γραμμές ροής μπορεί να είναι παράλληλες μεταξύ τους σε ένα μέρος του cleanroom και μη παράλληλες σε άλλα μέρη.

Στον πίνακα που ακολουθεί, αναφέρονται τα είδη ροής που χρησιμοποιούνται ανά κλάση

Πίνακας 12: Είδη ροής ανά κλάση

Cleanroom Class	Airflow Type
1	Unidirectional
10	Unidirectional
100	Unidirectional
1.000	Non-Unidirectional
10.000	Non-Unidirectional
100.000	Non-Unidirectional

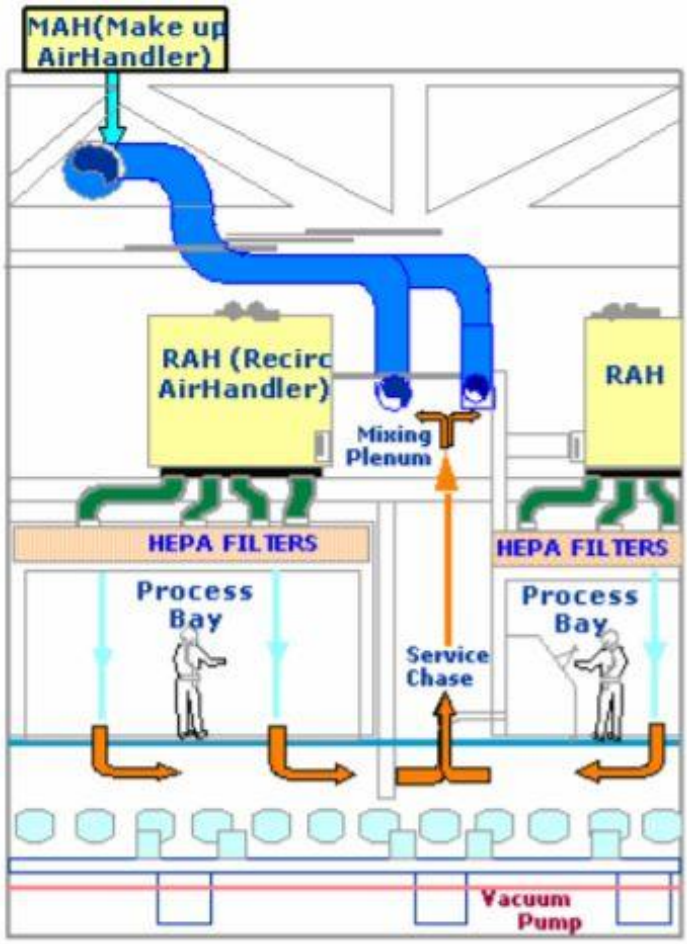
5.5.1 Σχεδιασμός συστημάτων ροής μονής κατεύθυνσης

Στα cleanrooms με μεγάλα επίπεδα αποστείρωσης και συγκεκριμένα με κλάση 100 και κάτω, οφείλουν να είναι σχεδιασμένα για παροχή αέρα στρωτής ροής. Ένα σύστημα στρωτής ροής αποτελείται από 3 βασικά στοιχεία:

- Ανεμιστήρα
- Φίλτρο υψηλής αποδοτικότητας
- Επιστροφή

Μπορεί να υπάρχουν παραλλαγές, αλλά όλα τα συστήματα έχουν τουλάχιστον ένα από αυτά τα στοιχεία.

Η στρωτή ροή επιτυγχάνεται με την παροχή αέρα μέσα από φίλτρα HEPA/ULPA και ύστερα μέσα από όλη την επιφάνεια της οροφής του δωματίου. Ο αέρας κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω και στη συνέχεια εισέρχεται στους αγωγούς επιστροφής και ύστερα στο χώρο αποβολής ο οποίος συνήθως βρίσκεται μεταξύ της οροφής και της ψευδοροφής του δωματίου. Αυτή η προσέγγιση αναγκάζει τα μικρόβια και τα σωματίδια που δημιουργούνται κατά την παραγωγή να συσσωρευτούν στο δάπεδο και κατόπιν να οδηγηθούν στο περιβάλλον μέσω των αντλιών κενού που βρίσκονται στο ύψος του δαπέδου.



Εικόνα 29: Σύστημα κατακόρυφου αερισμού [30]

Στο σύστημα που απεικονίζεται παραπάνω, φαίνεται ένα σύστημα κατακόρυφου αερισμού με παροχή αέρα μέσω φίλτρων HEPA που καλύπτουν όλη την οροφή. Η μονάδα συμπλήρωσης αέρα (Make-up air handler MAH) είναι μία μονάδα που παρέχει στο δωμάτιο φρέσκο αέρα και είναι σχεδιασμένη για τη διαχείριση του λανθάνοντος και το αισθητού θερμικού φορτίου του εξωτερικού αέρα. Η μονάδα RAH (Recirculation Air Handler) είναι συνήθως σχεδιασμένη για το αισθητό θερμικό φορτίο που παράγεται στο εσωτερικό του δωματίου από τον εξοπλισμό της παραγωγής και το εργατικό προσωπικό. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος μονής κατεύθυνσης είναι τα παρακάτω:

- Το σύστημα μονής κατεύθυνσης αέρα είναι σχεδιασμένο για ταχύτητες αέρα 0,3 έως 0,46 m/s. Οι ταχύτητες αυτές είναι αρκετές για να απομακρύνει τα μικρόβια και να τα παρασύρει προτού συσσωρευτούν πάλι σε άλλες επιφάνειες.

- Για ευρύτερα δωμάτια (>4,88 m), είναι καλύτερο να παρέχεται επιστροφή υψωμένου δαπέδου ώστε η ροή του αέρα να παραμένει παράλληλη. Για στενότερα δωμάτια, της τάξης 4,3-4,88 m από τοίχο σε τοίχο, το υψωμένο δάπεδο μπορεί να αμεληθεί και να προτιμηθούν πλευρικές σχάρες επιστροφής αέρα που τοποθετούνται κοντά στο δάπεδο. Για την περίπτωση του υψωμένου δαπέδου, ο εξερχόμενος αέρας θα κινηθεί 0,6 με 0,9 m κάτω από το έδαφος, όπου θα αλλάξει πορεία και θα κινηθεί προς τους πλευρικούς αγωγούς.

- Η στρωτή ροή τείνει να γίνει τυρβώδης εάν προσκρούει σε εμπόδια όπως ανθρώπους, εξοπλισμό και πάγκους. Η τοποθέτηση αυτών των εμποδίων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μην δημιουργούνται σημεία ανακοπής του αέρα. Επίσης συνίσταται η χρήση πάγκων εργασίας με διάτρητες επιφάνειες και την ελαχιστοποίηση των απωλειών της ροής κατά τη διέλευσή της.

Εικόνα 30: Διάτρητοι πάγκοι εργασίας [31]

- Στη διάταξη τύπου στρωτής ροής, θα πρέπει να ελέγχονται τυχόν διαρροές αέρα μέσω των gaskets, των υποστηρικτικών πλαισίων και μέσων στεγανοποίησης και του μέσου διήθησης.

- Σε μερικές εφαρμογές, ο παρεχόμενος αέρας μπορεί να παρέχεται από τα κάτω προς τα πάνω, δηλαδή από το κενό χώρο μεταξύ του δαπέδου και του υψωμένου δαπέδου προς την οροφή. Ο σχεδιασμός αυτός είναι αποτελεσματικός για εφαρμογές όπου ο εξοπλισμός παράγει μεγάλα ποσά θερμότητας. Συνεπώς είναι πιο εύκολη η μεταφορά του θερμού αέρα προς τα πάνω, από ότι θα ήταν προς τα κάτω, λόγω της μείωσης της πυκνότητας του θερμού αέρα.

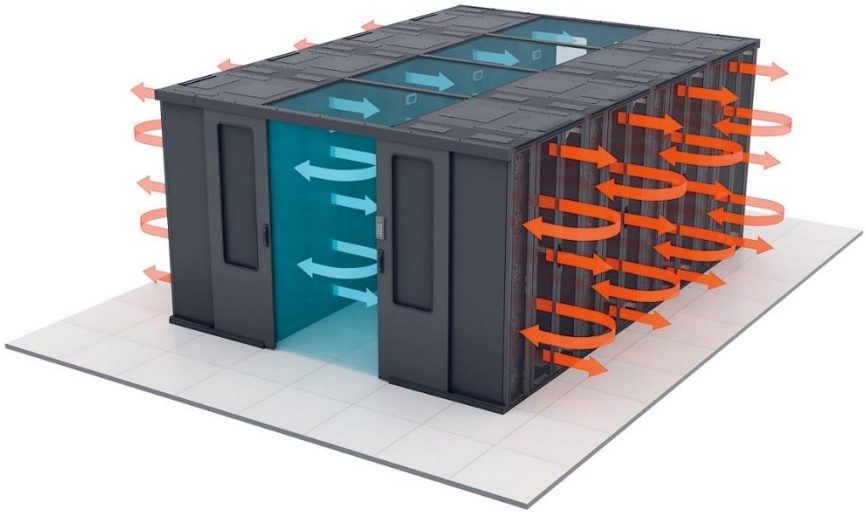
Στις βιομηχανίες που έχουν cleanrooms, η στρωτή ροή έχει εφαρμογές τριών τύπων:

1. Σταθμοί Αποστειρωμένης Εργασίας (Clean Work Stations): Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται αποστείρωση σε μεμονωμένες περιοχές της βιομηχανίας και τοποθετούνται ανεξάρτητες μονάδες με φίλτρα HEPA. Τέτοιου τύπου πάγκοι παρατηρούνται σε εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα.

Εικόνα 31: Clean Work Station [31]

2. Cleanroom τύπου «σήραγγα»: Ο σχεδιασμός αυτός είναι τύπου στρωτής ροής, χρησιμοποιείται επίσης σε περιοχές της βιομηχανίας όπου απαιτείται πρόσθετη αποστείρωση και εφαρμόζεται κυρίως στα air showers όπου εκεί εισέρχονται οι

εργαζόμενοι για να αποστειρωθούν πριν εισέλθουν στο χώρο εργασίας. Στα πλάγια των θαλάμων αυτών είναι εγκατεστημένοι ανεμιστήρες και φίλτρα HEPA.



Εικόνα 32: Cleanroom σχεδιασμού τύπου σήραγγας

3. Πλήρες Clean-room (Ανοιχτού τύπου): Αυτοί οι τύποι cleanroom χρησιμοποιούν φίλτρα HEPA τα οποία καλύπτουν ολόκληρη την οροφή έχει τις σχάρες εξόδου αέρα κοντά στο δάπεδο και η έξοδος του αέρα από την οροφή είναι στρωτού τύπου. Ο σχεδιασμός αυτός είναι κατάλληλος για μεγάλους χώρους έως 50.000 τετραγωνικά πόδια ή 4.645 τετραγωνικά μέτρα, δηλαδή με λίγα λόγια περίπου 4,5 στρέμματα, με εσωτερικούς τοίχους αναλόγως τις ανάγκες της βιομηχανίας. Τα δωμάτια αυτά είναι πιο ακριβά για την κατασκευή και τη συντήρησή τους αλλά παρέχουν διαλλακτικότητα όσον αφορά την αλλαγή του τύπου παραγωγής (αλλαγή τύπου φαρμάκων) ή του εξοπλισμού ή σε περίπτωση ανακαίνισης του χώρου.

5.5.2 Μη-στρωτή ροή

Αυτός ο τύπος ροής αέρα χρησιμοποιείται σε cleanrooms κλάσης 1000 και άνω. Τα cleanrooms των φαρμακοβιομηχανιών συνήθως έχουν τυποποίηση κλάσης 100 ή 1000. Κατά τον τύπο αυτό, οι γραμμές ροής αέρα είναι τυχαίες με καμία συγκεκριμένη μορφή. Ο αέρας διέρχεται μέσα από φίλτρα HEPA που είναι εγκατεστημένα στην οροφή και παρέχεται με ομοιόμορφο

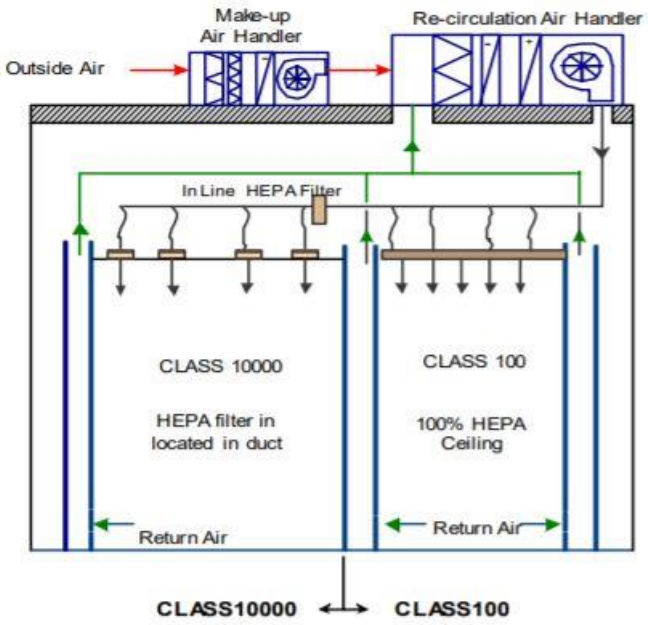
τρόπο. Τα φίλτρα HEPA πολλές φορές τοποθετούνται απευθείας στον αεραγωγό ή εντός τους μονάδας επεξεργασίας αέρα (AHU) όπως σχεδιάστηκε στο Solidworks στο Κεφάλαιο 2. Η επιστροφή του αέρα γίνεται μέσα από τις πλευρικές σχάρες που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην περιφέρεια του χώρου.

Μια καλή πρακτική είναι να περιορίζεται η απόσταση που πρέπει να ταξιδέψει ο αέρας που πρόκειται να εξέλθει από το χώρο. Συνήθως δεν πρέπει να ξεπερνά τα 4,3 με 4,8 μέτρα. Για μεγάλους χώρους, όπου ξεπερνάται αυτή η απόσταση, συνιστάται η κατασκευή κολώνων εντός των οποίων θα υπάρχουν αεραγωγοί επιστροφής και φυσικά οι σχάρες επιστροφής επί των πλευρών τους.

5.5.3 Προσέγγιση αναμειγμένης ροής

Η προσέγγιση αυτή γίνεται σε βιομηχανίες όπου οι κρίσιμες και οι μη-κρίσιμες διεργασίες είναι στον ίδιο χώρο. Ο χώρος αυτός χωρίζεται σε ζώνες ρυθμίζοντας τον τρόπο διήθησης του αέρα στην οροφή κάθε ζώνης. Στους χώρους με αυξημένο επίπεδο αποστείρωσης τοποθετούνται περισσότερα φίλτρα στην οροφή και σε αυτούς με χαμηλότερο επίπεδο αποστείρωσης τοποθετούνται λιγότερα φίλτρα. Ο επεξεργασμένος αέρας πολλές φορές οδηγείται μέσω κατακόρυφων αεραγωγών στο επιθυμητό ύψος της κρίσιμης ζώνης προτού εισαχθεί στο χώρο. Ο διαχωρισμός μεταξύ των ζωνών μπορεί να γίνεται, αναλόγως το ύψος του cleanroom, είτε μέσω προστατευτικού Plexiglas, ή με ελαστικές πλαστικές κουρτίνες.

Οι αεραγωγοί επιστροφής τοποθετούνται καταλλήλως προκειμένου οι διάφορες ροές αέρα να μην διασταυρώνονται και μεταφερθούν ανεπιθύμητα μικρόβια. Ένα υψωμένο δάπεδο όπου οι αεραγωγοί επιστροφής θα περνούν κάτω από αυτό είναι συνήθως πιο αποδοτικό.



Εικόνα 33: Συνήθης σχεδιασμός cleanrooms Class 100 & 10000 [30]

5.6 Εσωτερική υπερπίεση

Η θετική πίεση των ευαίσθητων χώρων είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος περιορισμού των μικροβίων και της αποτροπής εισχώρησής τους στο cleanroom μέσω διαφόρων ανοιγμάτων που μπορεί να βρίσκονται περιφερειακά του δωματίου. Η εσωτερική υπερπίεση επιτυγχάνεται, παρέχοντας στο δωμάτιο περισσότερο αέρα από αυτόν που εξέρχεται από αυτό. Είναι ωστόσο πολύ σημαντικό, ο εισαγόμενος αέρας να είναι επεξεργασμένος όπως αναφέρθηκες παραπάνω.

5.6.1 Όρια πίεσης

Γενικά στο cleanroom πρέπει να επικρατεί εσωτερική πίεση αυξημένη κατά 0,05 ίντσες στήλης ύδατος (12 Pascal), σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Σε καθαρούς χώρους με πολλά δωμάτια, οι πιο ευαίσθητες περιοχές πρέπει να έχουν μεγαλύτερη υπερπίεση. Συνήθως διατηρείται υπερπίεση με τιμή 0,02 ίντσες στήλης ύδατος (5 Pa) σε σχέση με γειτονικούς χώρους με διαφορετικές τυποποιήσεις. Έτσι εξασφαλίζεται η μη μεταφορά αέρα από λιγότερο καθαρά δωμάτια στα πιο καθαρά (μεγαλύτερο επίπεδο αποστείρωσης).

5.7 Βέλτιστη εισαγωγή φρέσκου αέρα

Στο ελεγχόμενο περιβάλλον πρέπει να εισάγεται μόνο ένα μικρό ποσό φρέσκου αέρα. Η εισαγωγή φρέσκου αέρα είναι μια κοστοβόρα διαδικασία, καθώς ο αέρας αυτός πρέπει να επεξεργασθεί, να ρυθμιστεί η υγρασία του και να καθαριστεί προτού εισαχθεί στο cleanroom. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στο να μην εισαχθεί υπερβολική ποσότητα αέρα στο δωμάτιο, για να αποφευχθεί η υπερβολική αύξηση πίεσης του δωματίου. Με την αύξηση της υπερπίεσης, αυξάνονται και οι διαρροές του αέρα προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Η θετική υπερπίεση μπορεί να διατηρηθεί μόνο μέσω της συντήρησης των συστημάτων στεγανοποίησης του δωματίου. Στη βιομηχανία υπάρχουν οι ελεγχόμενες και οι μη ελεγχόμενες διαρροές αέρα. Οι ελεγχόμενες διαρροές είναι οι οιοδήποτε τύποι εξαερισμού που μπορεί να χρειάζονται στην εγκατάσταση και έχουν σταθερές τιμές. Οι μη ελεγχόμενες διαρροές αέρα παρατηρούνται κυρίως στις χαραμάδες των πορτών, στις οροφές, στη συνδεσμολογία των αεραγωγών και άλλα. Οι διαρροές αυτές πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένες.

Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι η ποσότητα του αναπληρωτικού αέρα μπορεί να καθοριστεί προσθέτοντας όλους τους εξερχόμενους όγκους αέρα συν δύο πρόσθετες εναλλαγές αέρα ανά ώρα. Αυτή η ημι-εμπειρική τιμή έχει αποδειχτεί ότι είναι μια ασφαλής ποσότητα για χρήση για τη μονάδα αναπλήρωσης αέρα (Makeup Air Handler). Ο πραγματικός φρέσκος αέρας που εισέρχεται ανά πάσα στιγμή, διαφέρει αναλόγως με τις φορές που ανοίγουν οι πόρτες, τις διαρροές και τους εξαερισμούς. Έτσι διατηρούνται σε ισορροπία τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου και διαλύονται τυχόν συγκεντρώσεις φορμαλδεΰδης και άλλων αερίων που εκκρίνονται από τα δομικά υλικά, βαφές τοίχων, έπιπλα και άλλα και ότι οι εναλλαγές αέρα συμβαίνουν με ικανοποιητική συχνότητα για την ελαχιστοποίηση των εναέριων ρύπων στο κτίριο.

5.8 Διανομή αέρα

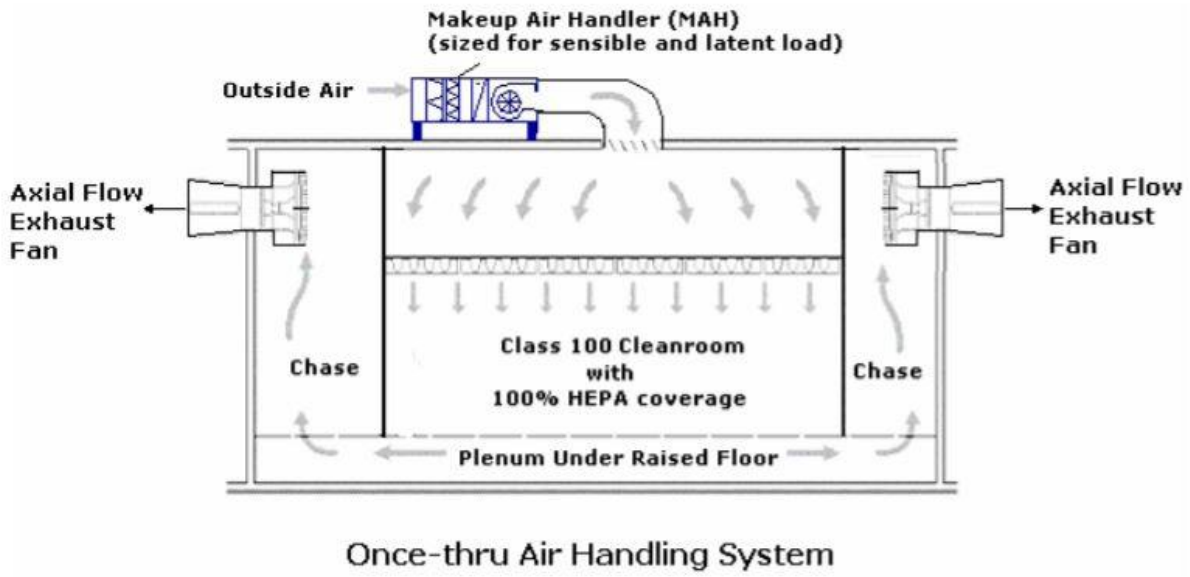
Με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι για την παροχή και την ανακυκλοφορία του αέρα σε cleanrooms. Δύο συνήθεις τρόποι είναι:

1. Το σύστημα μονής διέλευσης (Single Pass System or Once Thru System)
2. Το σύστημα ανακυκλοφορίας

Η επιλογή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως: τον τύπο του προϊόντος που παρασκευάζεται, την παραγωγική διαδικασία, τον εξοπλισμό παραγωγής, την τοξικότητα του προϊόντος που παρασκευάζεται και την κατανάλωση ενέργειας.

5.8.1 Σύστημα μονής διέλευσης

Ο φιλτραρισμένος αέρας εισέρχεται στο δωμάτιο και δεν ανακυκλοφορεί. Όλη η ποσότητά του εξέρχεται στο περιβάλλον. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σε cleanrooms όπου η παραγωγική διαδικασία απαιτεί 100% φρέσκο αέρα και φυσικά, όταν οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ευνοϊκές. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει το ενδεχόμενο δημιουργίας σκόνης ή αεροζόλ, συνιστάται η χρήση συστήματος HVAC τύπου “once-through”.



Εικόνα 34: Σύστημα μονής διέλευσης [30]

5.8.2 Τύποι συστημάτων ανακυκλοφορίας αέρα

Τα συστήματα ανακυκλοφορίας αέρα είναι πιο δημοφιλή όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων.

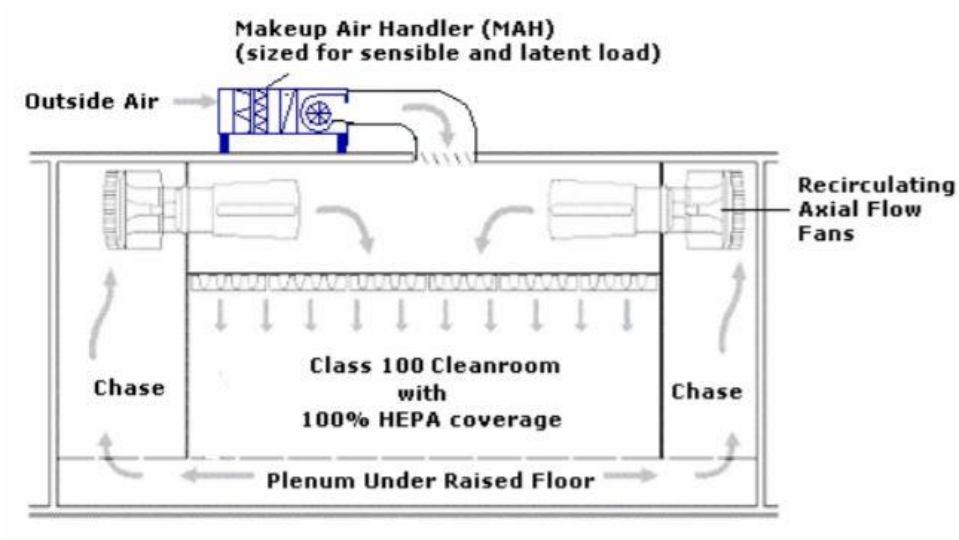
Ο φιλτραρισμένος αέρας εισέρχεται στο δωμάτιο, εξέρχεται μέσω των αεραγωγών , προωθείται μέσω ανεμιστήρων και διέρχεται ξανά μέσω των φίλτρων HEPA. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ανακυκλοφορίας αέρα:

1. Κεντρικές μονάδες διαχείρισης αέρα (Central Recirculation Air-Handling Units)
2. Φιλτρομονάδες με ανεμιστήρα κατανεμημένες στην οροφή (Ceiling distributed fan-filter units)

Η επιλογή του συστήματος συνήθως επιβάλλεται από τη μορφή του κτιρίου, το αρχικό κόστος επένδυσης και την ευκολία κατασκευής.

- **Κεντρικές μονάδες διαχείρισης ανακυκλοφορούμενου αέρα (RAHs)**

Το σύστημα αυτό συνήθως χρησιμοποιεί μονάδες αέρα που είναι τοποθετημένες στην οροφή του κτιρίου, για την αναπλήρωση αέρα. Η μονάδα αναπλήρωσης αέρα (MAH) παρέχει προφιλτραρισμένο αέρα για τη δημιουργία υπερπίεσης. Ο εξωτερικός αέρας αναμειγνύεται με τον αέρα ανακυκλοφορίας, καταλήγει σε αεραγωγό που διανέμει τον αέρα σε όλη την επιφάνεια της οροφής του cleanroom, η οποία καλύπτεται από φίλτρα HEPA και στη συνέχεια διανέμεται ομοιόμορφα και στρωτά σε όλο το δωμάτιο.



Εικόνα 35: Σύστημα Ανακυκλοφορίας Αέρα [30]

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί σχεδιασμοί για το σύστημα ανακυκλοφορίας αέρα. Στην παραπάνω διάταξη ο ανακυκλοφορούμενος αέρας δεν δέχεται περαιτέρω επεξεργασία (θερμοκρασία, υγρασία, η αφαίρεση σκόνης).

Εάν κατά την παραγωγική διαδικασία παράγεται αρκετή σκόνη και θερμότητα, συνίσταται η χρήση των μονάδων ανακυκλοφορίας αέρα (RAH). Οι μονάδες αυτές αποτελούνται από φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, coils θέρμανσης και ψύξης και προ-φίλτρα για την ελαχιστοποίηση του φορτίου σκόνης στα φίλτρα HEPA των οροφών.

Χρησιμοποιούνται και αξονικοί και φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες.

- Οι αξονικοί ανεμιστήρες έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προωθήσουν μεγάλους όγκους αέρα με σχετικά χαμηλή στατική πίεση. Οι αξονικοί ανεμιστήρες είναι σχετικά στιβαροί και αρκετά φθηνοί. Ένα μειονέκτημα των ανεμιστήρων αυτών είναι ότι ένα μεγάλο μέρος της πίεσης που δημιουργείται είναι δυναμική πίεση (ταχύτητα). Η δυναμική πίεση είναι ένας σημαντικός παράγοντας επιλογής ανεμιστήρα. Οι αξονικοί ανεμιστήρες παράγουν περισσότερο θόρυβο και χρειάζονται πρόσθετα μέτρα περιορισμού του θορύβου.

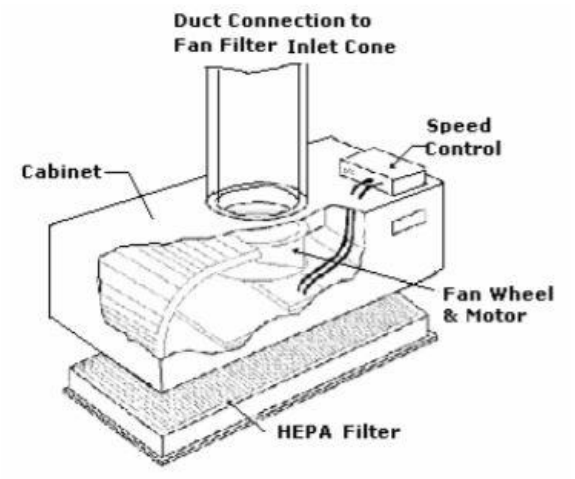
- Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες μπορούν να δημιουργήσουν όση στατική πίεση χρειάζεται για να ωθήσει τον αέρα μέσα από τα διάφορα εξαρτήματα του συστήματος ανακυκλοφορίας. Ωστόσο, μαζί με την αύξηση της ροής αέρα, αυξάνεται και το μέγεθος του ανεμιστήρα, το κόστος του και ο θόρυβος που δημιουργεί. Επομένως, προτιμάται

η χρήση πολλαπλών, μικρότερων μονάδων επεξεργασίας αέρα, εγκατεστημένα εν παραλλήλω.

- **Φιλτρομονάδες με ανεμιστήρα κατανεμημένες στην οροφή (Ceiling Distributed Fan-filter Units)**

Οι μονάδες αυτές αποτελούνται από ένα φυγοκεντρικό ανεμιστήρα κινούμενος από μοτέρ, το controller και ένα HEPA/ULPA φίλτρο, εντός ενός κουτιού το οποίο χωράει σε κοινά δικτυώματα οροφών και συνήθως έχει διαστάσεις 0,6 x 1,2 m ή 1,2 x 1,2 m.

Ο αέρας εισέρχεται στο δωμάτιο μέσω μιας μονάδας fan filter (Fan Filter Unit) όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω:



Εικόνα 36: Φιλτρομονάδα με ανεμιστήρα [30]

Η FFU έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Ο αέρας ωθείται από μικρούς ανεμιστήρες. Οι μονάδες έχουν συχνά ρυθμιζόμενη ταχύτητα περιστροφής και γενικά έχουν ενεργειακή κατανάλωση σε πλήρες φορτίο 190-250 Watt.
2. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι η απλότητά του και τα συστήματα αυτά είναι πολύ δημοφιλή στον τομέα των μικρών cleanrooms. Ωστόσο η FFU ωθεί μικρή ποσότητα αέρα σε σχέση με μία οροφή 0,6x1,2 m. Επομένως σε μεγάλα δωμάτια οι FFU δεν είναι τόσο αποτελεσματικές.

3. Οι FFU στο σύνολό τους είναι αρκετά ακριβές. Κάθε μονάδα FFU ξεχωριστά είναι αρκετά φθηνή, ωστόσο ένα τυπικό cleanroom χρειάζεται πολλές μονάδες FFU για την ορθή λειτουργία του και το κόστος του υπερβαίνει αυτό ενός κεντρικού συστήματος RAH (Recirculation Air Handler).
4. Οι FFU χρειάζονται μεγαλύτερους αεραγωγούς, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες στατικής πίεσης. Απαιτείται λοιπόν μεγαλύτερος όγκος κτιρίου.
5. Οι FFU συνήθως ενώνονται με την οροφή απευθείας ή λιγότερο συχνά με plenum το οποίο είναι ενωμένο με την οροφή.
6. Η διανομή ηλεκτρικού ρεύματος είναι ακριβότερη για τις μονάδες FFU λόγω του γεγονότος ότι κάθε μία από αυτές έχουν από έναν ανεμιστήρα και ένα controller.
7. Οι FFU από μόνες τους δεν δημιουργούν αρκετή στατική πίεση. Επομένως πολύ συχνά χρειάζεται η χρήση είτε αυτοσχέδιων μονάδων είτε ανεμιστήρες ενίσχυσης ροής.
8. Το επίπεδο θορύβου μιας τυπικής FFU είναι χαμηλό, στα 53 db για 0,46 m/s μετωπικής ταχύτητας. Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών FFU (σε μερικές περιπτώσεις εκατοντάδες αυτών), μπορεί να συντελέσει σε μεγάλα επίπεδα θορύβου.
9. Η χρήση πολλαπλών ανεμιστήρων απαιτεί τη χρήση πολλαπλών ηλεκτρονικών monitors για να ελέγχουν την κατάσταση κάθε μοτέρ.

5.9 Σχεδιασμός αεραγωγών και κατασκευή

Τα cleanrooms εξοπλίζονται συνήθως με αεραγωγούς αλουμινίου ή από ανοξείδωτο ατσάλι (SS304) για την παροχή αέρα εντός του δωματίου, την ανακυκλοφορία του και την ώθησή του προς το περιβάλλον. Κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω μέτρα:

1. Οι αεραγωγοί πρέπει να σφραγίζονται με σιλικόνη και επιμηκυνόμενους συνδέσμους προκειμένου να είναι αεροστεγείς.
2. Στις διασταυρώσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται λαστιχένιες τσιμούχες.
3. Οι φλαντζωτές συνδέσεις πρέπει να αποφεύγονται και να χρησιμοποιούνται αντ' αυτών συνδέσεις τύπου pocket slips ή φλαντζωτές συνδέσεις από σίδερο.
4. Δεν πρέπει να υπάρχει ηχομόνωση εντός των αεραγωγών.
5. Τα dampers του συστήματος πρέπει να είναι από αλουμίνιο.

6. Η ταχύτητα επιστροφής του αέρα πρέπει να βρίσκεται εντός της περιοχής των 6,1 – 9,14 m/s ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η αποτελεσματική μεταφορά των σωματιδίων. Ωστόσο, η ταχύτητα εισαγωγής στις σχάρες επιστροφής πρέπει να είναι 1,52 με 2,03 m/s και να αυξηθεί σταδιακά στα 6,1 με 9,14 m/s.
7. Οι σχάρες επιστροφής πρέπει να είναι είτε από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο ατσάλι.
8. Οι αεραγωγοί επιστροφής πρέπει να καθαρίζονται τακτικά. Σήμερα υπάρχει ειδικός εξοπλισμός για το σκοπό αυτό.
9. Οι σχάρες επιστροφής πρέπει να τοποθετούνται χαμηλά και κοντά στο δάπεδο και να έχουν μεγάλη επιφάνεια για την αύξηση της συλλογής σωματιδίων.
10. Πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση των σχαρών επιστροφής κοντά σε πόρτες που οδηγούν σε δωμάτια με χαμηλότερη πίεση. Αυτό γίνεται για την αποφυγή δημιουργίας ζώνης χαμηλής πίεσης κοντά στην πόρτα, εμποδίζοντας έτσι τη διαρροή αέρα από το δωμάτιο υψηλής προς το δωμάτιο χαμηλής πίεσης κατά το άνοιγμα της πόρτας.
11. Για την προμήθεια αέρα κατάλληλης παροχής, πρέπει να τοποθετούνται dampers στα κρίσιμα σημεία διανομής όπως για παράδειγμα πάνω από κάθε φίλτρο HEPA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6º : Κλιματισμός

6.1 Κλιματισμός & Κλιματιστικά συστήματα

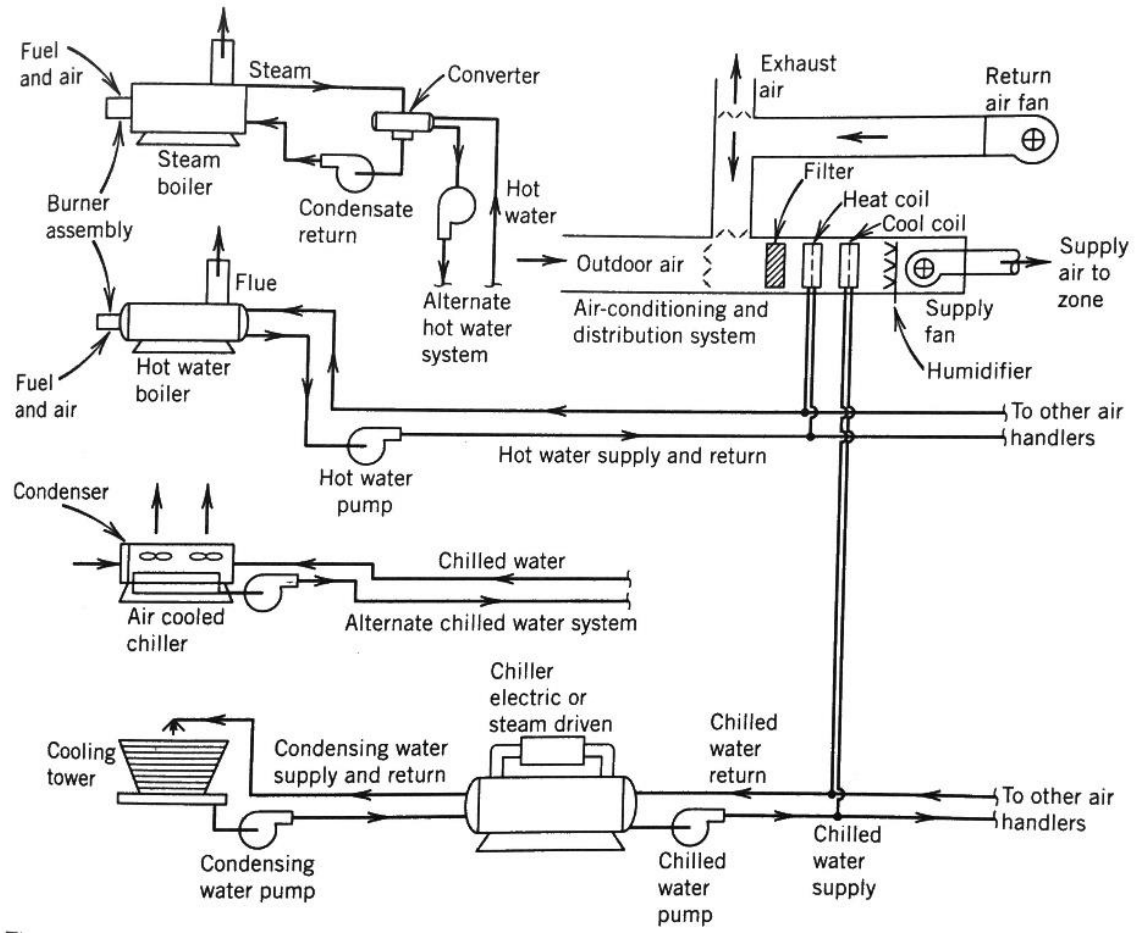
Τα κλιματιστικά συστήματα έχουν συνήθως, συγκεκριμένα στοιχεία. Ωστόσο, μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους δραματικά, σε φυσική εμφάνιση και διάταξη. Ακόμα και με τον ίδιο εξοπλισμό, ο τρόπος με τον οποίο ελέγχονται τα συστήματα μπορεί να είναι διαφορετικός.

Τα πρώτα κεντρικά κλιματιστικά συστήματα παρείχαν θερμό αέρα για θέρμανση και αερισμό. Η πρόσθεση του ψυκτικού και αφυγραντικού εξοπλισμού, επέτρεψε την επίτευξη άνεσης σε χώρους όπου τα κέρδη (gains) και οι απώλειες (losses) ήταν σχετικά ομοιόμορφες μέσα στον κλιματιζόμενο χώρο. Γι' αυτό το λόγο, ο κλιματιζόμενος χώρος χωρίζεται σε ζώνες με ξεχωριστές απαιτήσεις. Το γεγονός αυτό απαιτεί την ανάπτυξη πρόσθετου και πιο εξειδικευμένου εξοπλισμού με ευέλικτο έλεγχο. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην ποιότητα του εσωτερικού αέρα και στη διατήρηση και εξοικονόμηση ενέργειας, επηρεάζοντας άμεσα το σχεδιασμό και τον έλεγχο των συστημάτων HVAC.

6.2 Γενική διάταξη συστήματος

Γενικά τα κλιματιστικά συστήματα μεγάλης κλίμακας έχουν σχεδόν ίδια διάταξη και εξοπλισμό, με παραλλαγές που ικανοποιούν τις εκάστοτε ανάγκες.

Ένα ψυκτικό υγρό πρέπει να παρέχεται στον εναλλάκτη ψύξης (cooling coil) , ο οποίος βρίσκεται εντός της μονάδας AHU (Air Handling Unit). Το ψυκτικό μέσο μπορεί να είναι ένα υγρό ή καλύτερα μία πτητική ουσία η οποία κοινώς ονομάζεται ψυκτικό. Το ψυκτικό συνήθως ψύχεται μέσω συσκευών που ονομάζονται Chillers. Τα chillers είναι ψυκτικές μηχανές που λειτουργούν σε κύκλους συμπίεσης ατμού ή κύκλους απορρόφησης. Η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον με τη χρήση του πύργου ψύξης. Είναι επίσης δυνατό, το chiller να έχει έναν αερόψυκτο συμπυκνωτή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το ψυκτικό προωθείται εντός των σωληνώσεων μέσω αντλιών, ενώ ο εξοπλισμός ψύξης του ψυκτικού είναι απομακρυσμένος από την κλιματιστική μονάδα.



Εικόνα 37: Τυπική διάταξη βιομηχανικού κλιματιστικού συστήματος [5]

Για την παροχή θέρμανσης, απαιτείται η παροχή ενός ρευστού θέρμανσης στον εναλλάκτη θέρμανσης (heating coil), ο οποίος επίσης βρίσκεται εντός του AHU. Το ρευστό είναι συνήθως θερμό νερό ή ατμός. Το θερμό αυτό ρευστό παράγεται από το βραστήρα (boiler), ο οποίος είναι απομακρυσμένος από την κλιματιστική μονάδα, και προωθείται εντός των σωληνώσεων μέσω αντλιών. Οι βραστήρες χρησιμοποιούν συνήθως ως καύσιμο το φυσικό αέριο, ή LPG, ή Fuel Oil. Ο υγραντήρας παρέχεται με υδρατμό ο οποίος έχει παραχθεί στο βραστήρα.

6.3 Το κλιματιστικό σύστημα

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για το σχεδιασμό του κεντρικού συστήματος HVAC, είναι ο καθορισμός των κλιματιζόμενων ζωνών και ο τύπος και η τοποθεσία του εξοπλισμού

HVAC. Κανονικά ο εξοπλισμός τοποθετείται έξω από το κλιματιζόμενο χώρο, σε ένα υπόγειο ή στην οροφή, ή σε έναν ειδικό χώρο της φαρμακοβιομηχανικής εγκατάστασης.

Ζώνη, ορίζεται ως ο κλιματιζόμενος χώρος υπό τον έλεγχο ενός θερμοστάτη. Ο θερμοστάτης είναι μία συσκευή ελέγχου που αισθάνεται τη θερμοκρασία του χώρου και στέλνει σήματα διόρθωσης, εάν η θερμοκρασία δε βρίσκεται εντός των επιθυμητών ορίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υγρασία κάθε ζώνης μετράται με τη χρήση ενός υγροστάτη. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε κάθε ζώνη, η θερμοκρασία πρέπει να είναι κατανεμημένη όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα, προκειμένου να έχει σωστές μετρήσεις ο θερμοστάτης. Ο θερμοστάτης πρέπει να τοποθετηθεί σε θέση τέτοια, ώστε να μην επηρεάζεται από τοπικές διαταραχές της θερμοκρασίας και να βρίσκεται σχεδόν στη μέση θερμοκρασία της ζώνης. Οι χώροι με αυστηρές απαιτήσεις καθαριότητας, υγρασίας, ρύθμισης θερμοκρασίας και διανομής αέρα, συνήθως απομονώνονται ως ξεχωριστές ζώνες εντός της εγκατάστασης και λειτουργούν με επιπρόσθετα, ξεχωριστά συστήματα με μεγάλη ακρίβεια ρύθμισης και ελέγχου. Συγκεκριμένα οι χώροι αυτοί, όπου απαιτείται ασηπτικό περιβάλλον, εξυπηρετούνται από συστήματα τύπου all-air. Οι χώροι αυτοί περιλαμβάνουν εργαστήρια φαρμάκου, χημειοβιομηχανίες, χειρουργεία, πτέρυγες νοσοκομείων (εντατική) και άλλους τομείς.

6.4 Φορτία

Υπό τον όρο φορτίο, ορίζεται το ποσό θερμότητας, αισθητό και λανθάνον, που πρέπει να αφαιρεθεί ή να προστεθεί σε ένα χώρο με σκοπό της να διατηρηθεί ή να οδηγηθεί της επιθυμητές συνθήκες άνεσης.

Η ύπαρξη των φορτίων μπορεί να οφείλεται:

1. Σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως
    - Η θερμοκρασία περιβάλλοντος και
    - Η ηλιακή ακτινοβολία
2. Σε εσωτερικούς παράγοντες όπως
    - Οι δραστηριότητες που αναπτύσσονται στο χώρο,
    - Η ύπαρξη φωτισμού
    - Εξοπλισμός, μηχανήματα, κινητήρες

- Ο όγκος του χώρου και τα δομικά του υλικά

Για συνήθη κτίρια, καθοριστικός παράγοντας στην ανάπτυξη των φορτίων είναι το περιβάλλον το οποίο δρα με δύο τρόπους στις συνθήκες του κτιρίου, καταρχάς με την ανάπτυξη θερμοκρασιακού δυναμικού που προέρχεται από τη θερμοκρασιακή του κατάσταση και από το μέγεθος της ηλιοφάνειας και κατά δεύτερον από την απαίτηση εισόδου αέρα περιβάλλοντος στους χώρους για την ανανέωσή του. Στη φαρμακοβιομηχανία απαιτείται μεγάλο ποσοστό ανανέωσης του αέρα (συνήθως 100%), προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη βακτηρίων και μικροοργανισμών στο χώρο.

Κατά την περίοδο του χειμώνα γίνεται αναφορά στην έννοια 'θερμικό φορτίο' που ορίζει την απαίτηση του χώρου σε θερμική ενέργεια για την κάλυψη των θερμικών διαρροών που δημιουργούνται λόγω του ψυχρού περιβάλλοντος. Αντίθετα κατά την περίοδο του θέρους γίνεται αναφορά στον όρο 'ψυκτικό φορτίο', το οποίο ορίζεται από την απαίτηση αφαίρεσης θερμότητας από τον χώρο με σκοπό την κάλυψη των εισροών θερμότητας που δημιουργούνται λόγω του θερμού περιβάλλοντος αλλά και των αναπτυσσόμενων και παραγόμενων εντός του χώρου ποσοτήτων θερμότητας. Η διάκριση αυτή ουσιαστικά δεν ορίζει ούτε ορίζεται από τη διαδικασία υπολογισμού των φορτίων κάθε εποχής, αλλά ορίζει την εικόνα και τα αίτια ύπαρξης των φορτίων.

Χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία συντελούν στην ανάπτυξη των φορτίων ορίζονται τα παρακάτω:

- **Θερμικό κέρδος**, ορίζεται το ποσό θερμότητας που εισέρχεται ή παράγεται μέσα στο χώρο στη μονάδα του χρόνου από οποιαδήποτε πηγή και είναι το αίτιο της δημιουργίας των ψυκτικών φορτίων κατά το θέρος ή της μείωσης των θερμικών φορτίων κατά το χειμώνα.
- **Θερμικό φορτίο**, ορίζεται ως ο ρυθμός παραγωγής ή διάθεσης θερμότητας στο χώρο με σκοπό τη δημιουργία των επιθυμητών συνθηκών εντός του κλιματιζόμενου χώρου.
- **Ψυκτικό φορτίο**, ορίζεται ως ο ρυθμός αφαίρεσης θερμότητας από το χώρο με σκοπό τη δημιουργία και διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών εντός του κλιματιζόμενου χώρου.
- **Φορτίο στοιχείου (συσκευής)**, ορίζεται η θερμική (αντίστοιχα ψυκτική κατά το θέρος) ισχύς της συσκευής που θα χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των φορτίων του χώρου και η οποία λαμβάνει υπόψη της, πέραν των φορτίων του χώρου, την αδράνεια του χώρου και της εγκατάστασης κλιματισμού και τη γήρανση της εγκατάστασης με στόχο την επί

μακρό χρονικό διάστημα (τουλάχιστον 20 χρόνια) αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

6.5 Μέθοδοι υπολογισμού φορτίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να εκφρασθούν με απλά και κατανοητά λόγια, μέθοδοι για τον υπολογισμό των φορτίων κλιματισμού χώρων, έτσι ώστε να δύνανται να αποκτηθούν τα απαραίτητα εφόδια για τον υπολογισμό και την εκλογή του μεγέθους της κλιματιστικής εγκατάστασης.

Παρατηρείται συχνή αναφορά στο μέγεθος, επιθυμητές συνθήκες και συνθήκες περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο χώρος. Το περιβάλλον όπως προαναφέρεται είναι από τις βασικές αιτίες δημιουργίας φορτίων στο χώρο και η επίδραση του είναι ανάλογη του τόπου και της θέσης. Φορτία επίσης στο χώρο αναπτύσσονται και από άλλους παράγοντες, όπως η χρήση του χώρου (οικία, γραφείο, κατάστημα, εργοστάσιο κ.λ.π) και όλοι αυτοί οι παράγοντες που εμφανίζονται από αυτή. Η χρήση του χώρου δεν επηρεάζει μόνο στην ύπαρξη των φορτίων αλλά και σε αυτή των επιθυμητών συνθηκών που έχουν ήδη αναφερθεί. Οι παράγοντες που επιδρούν στον υπολογισμό των φορτίων είναι πολλοί και συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο που συχνά ο ακριβής υπολογισμός των φορτίων που δημιουργούνται είναι δύσκολος. Πολλοί από τους παράγοντες των φορτίων μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και μάλιστα με τρόπο ώστε ο υπολογισμός της συνισταμένης τιμής για κάθε χώρο ή και για όλο το κτίριο να χρειάζεται εφαρμογή ειδικής μεθοδολογίας.

Ο κλιματισμός επεμβαίνει στον χώρο (ή στους χώρους) κάθε χρονική στιγμή για όλη τη διάρκεια του έτους και πρέπει να έχει την ικανότητα η εγκατάστασή του να ελέγχει και να δημιουργεί κάθε στιγμή τις επιθυμητές συνθήκες. Σε συστήματα με ζώνες (συστήματα που κλιματίζουν περιοχές των κτιρίων) η κάθε ζώνη έχει ανεξάρτητο έλεγχο της θερμοκρασίας και είναι δυνατόν την ίδια στιγμή, κάποιες ζώνες να θερμαίνουν τους χώρους στους οποίους επιδρούν ενώ άλλες να τους ψύχουν.

Μπορεί να γίνει διάκριση στους ρυθμούς θερμότητας οι οποίοι μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του έτους.

1. Θερμικό κέρδος χώρου

2. Ψυκτικό φορτίο χώρου
3. Ρυθμός απομάκρυνσης της θερμότητας από τον χώρο
4. Φορτίο ψυκτικού στοιχείου (συσκευής).

Για ακριβή εξέταση των στοιχείων του χώρου που πρόκειται να κλιματιστεί, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι εξής συνιστώσες:

1. Ο προσανατολισμός του κτιρίου και η θέση του χώρου σ' αυτό.
2. Οι διαστάσεις του χώρου.
3. Τα υλικά κατασκευής του χώρου, το μέγεθος και η σχετική θέση τους στον χώρο.
4. Η χρήση του χώρου.
5. Το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ο χώρος (τρόπος με τον οποίο είναι τοποθετημένο το κτίριο στην περιοχή).
6. Τα ανοίγματα που έχει ο χώρος.
7. Οι συσκευές που υπάρχουν στο χώρο ή τον επηρεάζουν.
8. Ο αερισμός του χώρου.

6.5.1 Θερμικό κέρδος χώρων – Ψυκτικό και θερμικό φορτίο χώρων

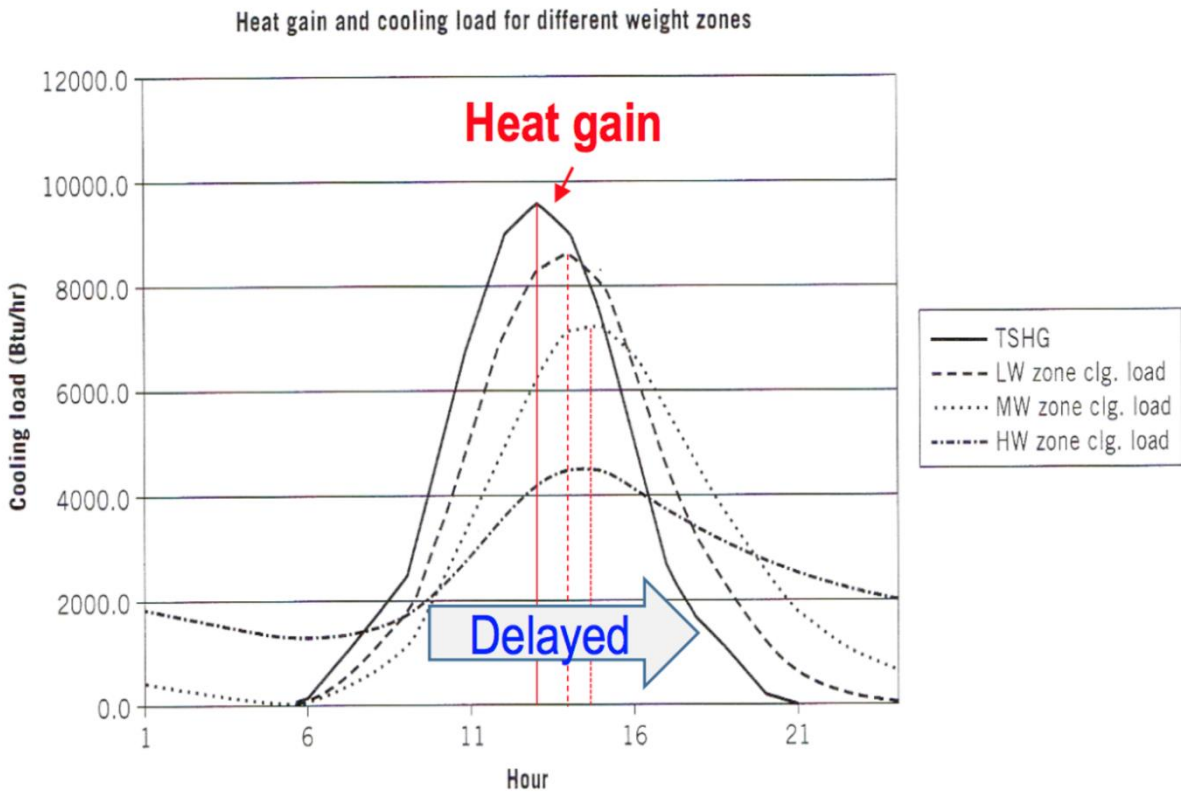
Θερμικό κέρδος (HG) είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα εισέρχεται στον χώρο ή παράγεται σ' αυτόν για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το θερμικό κέρδος μπορεί να προέρχεται από :

1. Αγωγή θερμότητας από εξωτερικά ή εσωτερικά τοιχώματα.
2. Ηλιακή ακτινοβολία μέσα από ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα κλπ).
3. Παραγωγή θερμότητας μέσα στον χώρο (φωτισμός, συσκευές και άνθρωποι που κατοικούν στον χώρο).
4. Φορτίο από ανανέωση και διείσδυση του αέρα περιβάλλοντος στον χώρο.

Για ακριβέστερη ανάλυση, εφαρμόζεται ο διαχωρισμός του θερμικού κέρδους σε αισθητό και λανθάνον. Όταν πρόκειται για άμεση πρόσδοση θερμότητας στον χώρο, με τους γνωστούς τρόπους μετάδοσης θερμότητας, το αναπτυσσόμενο φορτίο χαρακτηρίζεται αισθητό, ενώ στην περίπτωση πρόσθεσης υδρατμών στον χώρο, χαρακτηρίζεται ως

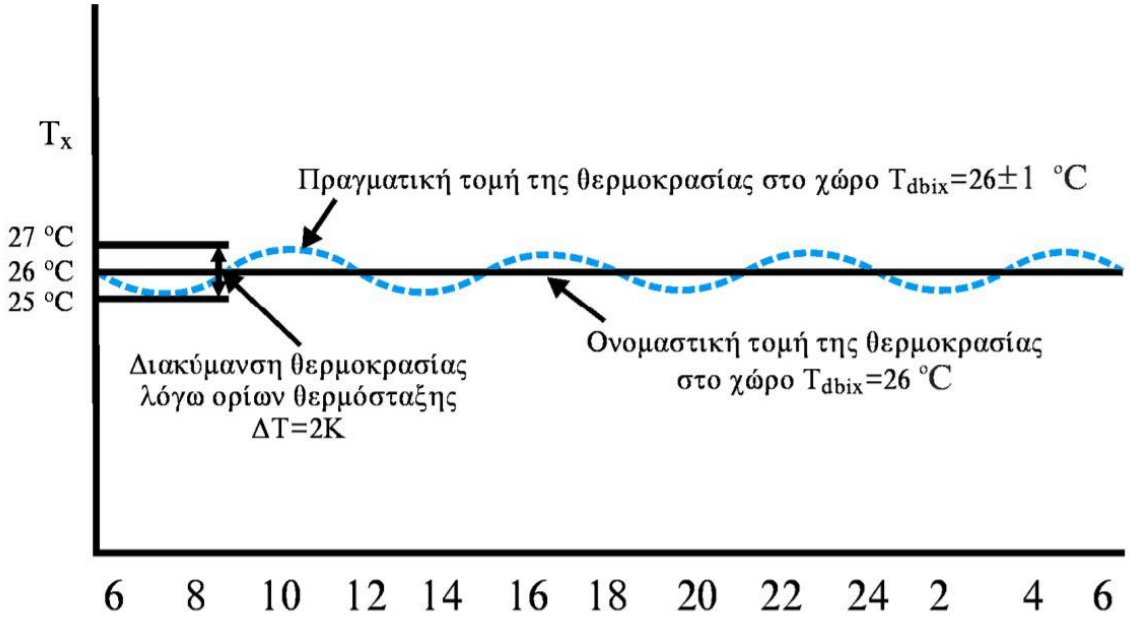
λανθάνον. Σαν θερμικό φορτίο (HL, Heat Load) χώρου καθορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο προσδίδεται η θερμότητα στον χώρο ώστε η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Η τιμή του θερμικού κέρδους και του θερμικού φορτίου κατά την περίοδο του χειμώνα (όπου αναφέρεται κυρίως το θερμικό φορτίο) λειτουργούν συμπληρωματικά και υποστηρίζει η μία την άλλη.

Σαν ψυκτικό φορτίο χώρου, ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο πρέπει να απομακρύνεται η θερμότητα από τον χώρο ώστε η θερμοκρασία του να παραμένει σταθερή. Η τιμή του ψυκτικού φορτίου και του θερμικού κέρδους διαφέρουν μεταξύ τους. Η τιμή του θερμικού κέρδους και του ψυκτικού φορτίου κατά την περίοδο του θέρους λειτουργούν "αντιδραστικά" μεταξύ τους. Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζεται αυτή η συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως, λ.χ. όταν το θερμικό κέρδος οφείλεται σε ακτινοβολία τότε απορροφάται ένα τμήμα του από τα δομικά στοιχεία και το περιεχόμενο του χώρου και έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας αυτών. Όταν η θερμοκρασία τους γίνει μεγαλύτερη από τον χώρο, τότε τμήμα της θερμότητάς τους μεταφέρεται με συναγωγή στον χώρο. Ο μηχανισμός της αποθήκευσης και της αποβολής θερμότητας με κάποια χρονική καθυστέρηση, δημιουργεί διαφορά φάσης μεταξύ του μεγίστου θερμικού κέρδους και του μεγίστου ψυκτικού φορτίου. Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ θερμικού κέρδους και ψυκτικού φορτίου. Το άθροισμα των δυο μεγεθών σε 24ωρη βάση είναι το ίδιο, δηλαδή η ενέργεια σε 24ωρη βάση και των δύο μεγεθών παραμένει ίση.



Εικόνα 38: Διάγραμμα Θερμικού Κέρδους & Ψυκτικού Φορτίου [32]

Η διαδικασία εκλογής μεγέθους κλιματιστικής συσκευής επηρεάζεται από το φαινόμενο της συσσώρευσης θερμότητάς. Στο τελευταίο σχήμα επίσης φαίνεται η διαφορά μεγέθους μεταξύ μέγιστου ψυκτικού φορτίου και θερμικού κέρδους. Ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η απορρόφηση θερμότητας από τον χώρο είναι ίσος με το προς αντιμετώπιση ψυκτικό φορτίο, μόνο όταν η θερμοκρασία του αέρα στον χώρο παραμένει σταθερή. Συνήθως ο θερμοστάτης χώρου (συσκευή ελέγχου της θερμοκρασίας στον χώρο) σε συνδυασμό με την διακοπτόμενη λειτουργία της εγκατάστασης προκαλεί ταλάντωση στη θερμοκρασία του χώρου, και έτσι παρουσιάζεται διαφορά μεταξύ του ρυθμού απορρόφησης θερμότητας από τον χώρο και του ψυκτικού φορτίου του χώρου.



Εικόνα 39: Διακύμανση θερμοκρασίας χώρου μέσα στη μέρα [33]

6.5.2 Στοιχεία για τον υπολογισμό του ψυκτικού ή του θερμικού φορτίου

Για να ξεκινήσει η διαδικασία υπολογισμού των (Ψ.Φ) ψυκτικών φορτίων των χώρων απαιτούνται τα εξής:

1. Χαρακτηριστικά του κτιρίου όπως σχέδια, υλικά και χρώματα κατασκευής, του κτιρίου.
2. Προσανατολισμός, θέση και εξωτερική σκίαση αυτού.
3. Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής που ανήκει το κτίριο και στοιχεία για την εκτίμηση των εξωτερικών συνθηκών (περιβάλλοντος), όπως θερμοκρασία και σχετική υγρασία, ρυθμός ανανέωσης αέρος.
4. Εσωτερικές συνθήκες του χώρου (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, κλπ), επιθυμητό Τες=25.5 ºC, προδιαγραφές στα βιβλία της ASHRAE.
5. Εκλογή των δυσμενέστερων συνθηκών για τον υπολογισμό όλων των συνιστωσών των φορτίων, δηλαδή εκλογή του μήνα, της μέρας και της ώρας που παρουσιάζονται αυτές από τα στατιστικά στοιχεία παίρνοντας υπόψη της της δυνατές παραμέτρους. Είναι συνηθισμένο ο υπολογισμός να γίνεται για διάφορες ώρες της μέρας που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των φορτίων. Είναι φυσικό ο υπολογισμός της να γίνει με τέτοιο τρόπο (τμηματικό), ώστε να καλύπτεται το πλήθος και η μορφή των φορτίων που

αναπτύσσονται σε ένα χώρο. Συνήθως ο υπολογισμός γίνεται για διάφορες ώρες της μέρας και επιλέγεται η τελικά δυσμενέστερη τιμή των υπολογισμών. Π.χ για ψυκτική εγκατάσταση παίρνω την 21η Ιουλίου και βρίσκω τα ωριαία φορτία και τα προσθέτω ώστε να βρω τα συνολικά ημερήσια φορτία.

6. Υπολογισμός Ψ.Φ που προκύπτει από το Θ.Κ (Θερμικό Κέρδος) λόγω αγωγής μέσω εξωτερικών τοίχων και οροφών.(Πρώτα υπολογίζω Θ.Κ και μετά Ψ.Φ).
7. Υπολογισμός Ψ.Φ που προκύπτει από το Θ.Κ μέσω εσωτερικών τοίχων δαπέδων και οροφών.
8. Υπολογισμός Ψ.Φ που προκύπτει από το Θ.Κ (Θερμικό Κέρδος) δι' αγωγής και ηλιακής ακτινοβολίας μέσω υαλοπινάκων.
9. Υπολογισμός Ψ.Φ λόγω εσωτερικών πηγών θερμότητας.
10. Υπολογισμός Ψ.Φ λόγω ανανέωσης και διείσδυσης αέρος.

6.6 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά–κλιματολογικά δεδομένα

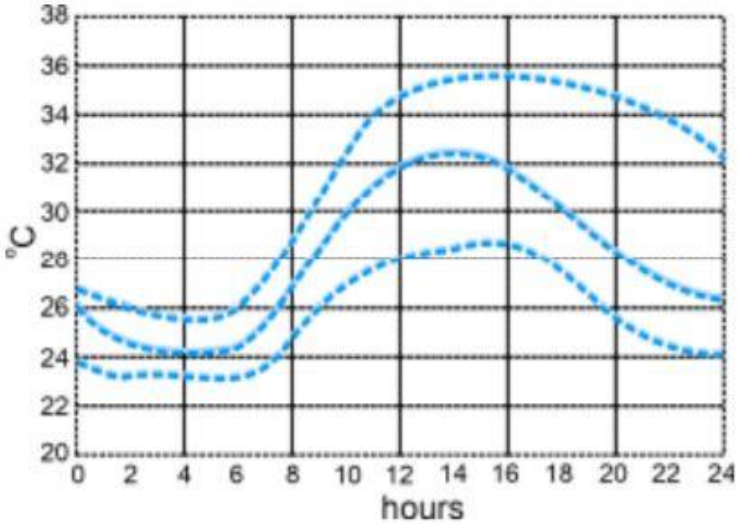
Στο τμήμα αυτό περιγράφεται η επιλογή των κλιματολογικών δεδομένων για την εξέταση της θερμικής συμπεριφοράς των διαφόρων τύπων κτιρίων. Αυτοί εξετάστηκαν για τους μήνες με τα πιο ακραία κλιματολογικά δεδομένα κατά το χειμώνα και το θέρος. Για την Ελλάδα υπάρχουν δημοσιευμένες οι εμπειρικά υπολογισμένες τιμές μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα καθώς και οι τιμές μέσης και απόλυτης θερμοκρασίας αέρα, της σχετικής υγρασίας και του ανέμου από μεγάλο αριθμό μετεωρολογικών σταθμών. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας για όλη την Ελλάδα και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Όπως προαναφέρθηκε, για την εφαρμογή και μελέτη των συστημάτων κλιματισμού ή την εξέταση του βιοκλιματικού χάρτη κτιρίων, χρησιμοποιούνται οι δύο κλιματολογικά ακραίοι μήνες του χρόνου. Αυτοί είναι ο Ιανουάριος και ο Ιούλιος - Αύγουστος οι λόγοι δε εκλογής τους για την δημιουργία του κλιματικού μοντέλου, περιγράφονται παρακάτω.

Πίνακας 13: Μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για την Ελλάδα

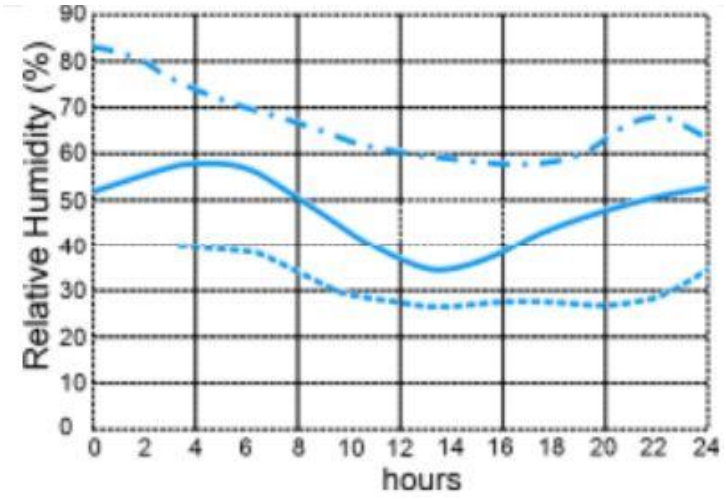
ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ			ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ			ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	
	Β W/m^2	Ν W/m^2	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ W/m^2	ΜΕΓΙΣΤΗ °C	ΕΛΑΧΙΣΤΗ °C	ΔΤ K	ΜΕΓΙΣΤΗ %	ΕΛΑΧΙΣΤΗ %
ΙΑΝ	85	716	675	19	0	19	90	39
ΦΕΒ	95	606	786	20	-1	21	89	38
ΜΑΡ	107	432	868	22	1	21	86	37
ΑΠΡ	117	237	893	25	3	22	78	32
ΜΙΑ	136	145	890	31	8	23	69	28
ΙΟΥΝ	174	136	880	35	13	22	62	26
ΙΟΥΛ	142	145	877	37	15	22	58	25
ΑΥΓ	120	227	874	38	18	20	58	26
ΣΕΠ	110	423	839	36	16	20	63	28
ΟΚΤ	98	590	770	33	12	21	72	32
ΝΟΕ	85	707	672	27	7	20	80	37
ΔΕΚ	82	748	628	23	4	19	88	40

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο Ιανουάριος εκτός του ότι είναι ο ψυχρότερος μήνας του χρόνου, είναι ο μήνας κατά τον οποίο η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε νότιες επιφάνειες λαμβάνει την μικρότερη τιμή του χρόνου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί συνήθως η ηλιακή ακτινοβολία στις νότιες επιφάνειες του κτιρίου έχει μεγάλη επίδραση στις εσωτερικές συνθήκες. Επιπλέον, η μέση ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο τον Ιανουάριο, είναι πολύ κοντά στην μικρότερη τιμή του χρόνου (Δεκέμβριος Πίνακας 1). Η εκλογή του αντιπροσωπευτικού θερινού μήνα είναι πιο πολύπλοκη. Η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία σε νότιες επιφάνειες έχει την μεγαλύτερη τιμή τον Σεπτέμβριο, η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο έχει την μεγαλύτερη τιμή της τον Ιούνιο και Ιούλιο. Ο Αύγουστος δε, είναι ο θερμότερος μήνας του χρόνου. Κατά την διάρκεια του θέρους, η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο και σε κατακόρυφο επίπεδο είναι σημαντικές γιατί το θερμικό κέρδος από την οροφή και τους τοίχους επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου. Τελικά, θεωρήθηκε καλό να επιλεγεί ο Ιούλιος σαν αντιπροσωπευτικός θερινός μήνας για τον υπολογισμό των εγκαταστάσεων κλιματισμού, γιατί είναι αρκετά θερμός μήνας του χρόνου και

οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας είναι στο πλέον υψηλό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται οι τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση του βιοκλιματικού χάρτη κτιρίων. Όσον αφορά τη διεύθυνση και την ταχύτητα του άνεμου, είναι γνωστό ότι διαφορετικές τιμές δίνουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικές τιμές διείσδυσης του αέρα και ρυθμούς αερισμού στα κτίρια, κάτι που επηρεάζει την θερμική τους ισορροπία. Για το λόγο αυτό, επειδή ο σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση της εκτροπής της θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας σε φαρμακοβιομηχανίες, ο άνεμος διατηρείται σταθερός σε όλες τις περιπτώσεις. Η ταχύτητα που επιλέχθηκε είναι 2,0 m/s και αντιπροσωπεύει την μέση τιμή για το χειμώνα και το θέρος στην Ελλάδα, η διεύθυνση του δε είναι από βορρά που αντιπροσωπεύει την διεύθυνση ανέμου στην πλειοψηφία των μετεωρολογικών σταθμών. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε μερικά από τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη για μελέτες εγκαταστάσεων κλιματισμού και ισχύουν για περιοχές με συνθήκες όμοιες με αυτές της Ελλάδας. Στην περιοχή της Αθήνας η δυσμενέστερη μέρα θεωρείται η 21η Ιούλη. Στα παρακάτω σχήματα διακρίνονται οι διακυμάνσεις διαφόρων μεγεθών για την ημέρα αυτή.

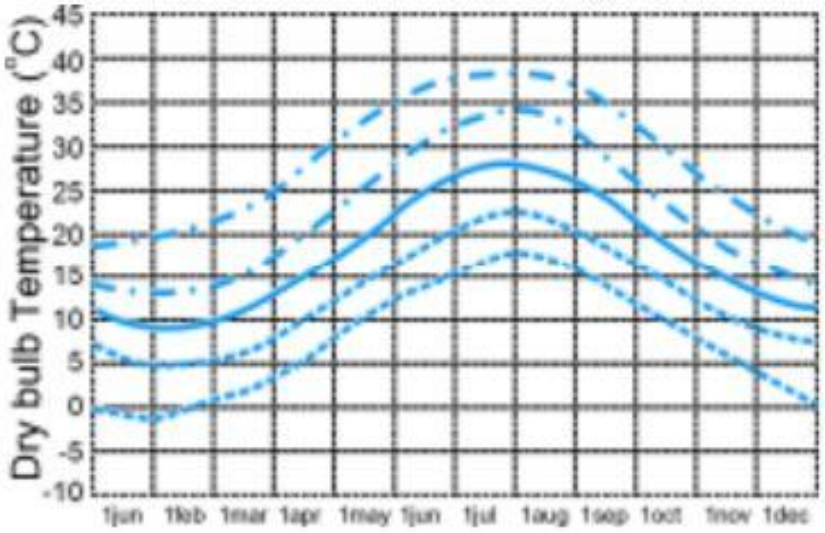


Εικόνα 40: Ημερήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας στην περιοχή της Αθήνας την 21η Ιουλίου [33]

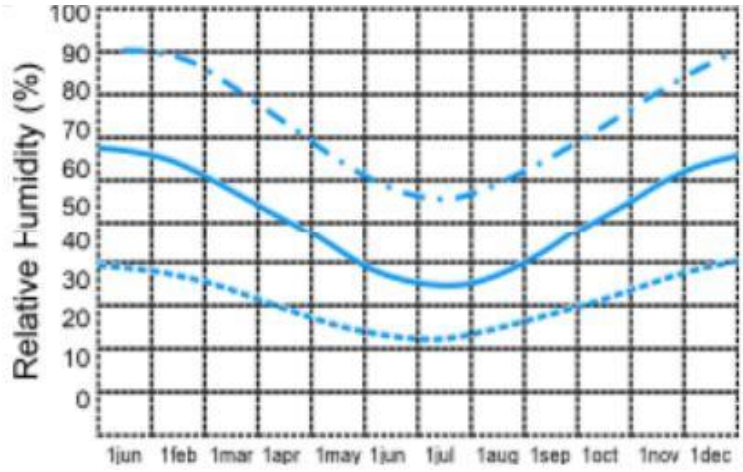


Εικόνα 41: Ημερήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας (R.H), στην περιοχή της Αθήνας την 21 Ιουλίου [33]

Στις εικόνες παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή διαφόρων μεγεθών για την περιοχή της Αθήνας, από στατιστικά στοιχεία, της περιόδου 1950-1976. Στις τιμές των ανωτέρω σχημάτων υπάρχει σχετική απόκλιση ±1%.



Εικόνα 42: Ετήσια μεταβολή μέγιστης μεγίστων, μέσης μέγιστης, μέσης, μέσης ελάχιστης και ελάχιστης ελαχίστων, θερμοκρασίας ημέρας για την περιοχή Αθήνα [42]



Εικόνα 43:Ετήσια μεταβολή μέγιστης, μέσης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας για τις 2 μμ. στην περιοχή της Αθήνας [33]

6.7 Εσωτερικές συνθήκες Cleanroom

Η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος εντός του cleanroom είναι ένας από τους πρωτεύοντες παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά το σχεδιασμό ενός cleanroom. Κάθε σχεδιασμός cleanroom είναι εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε βιομηχανίας και πρέπει να αναλύεται προσεχτικά προκειμένου να επιβεβαιωθεί το συνολικό ψυκτικό φορτίο.

6.7.1 Εσωτερική θερμοκρασία

Για τα cleanroom, η θερμοκρασία συνήθως διατηρείται στους 20 ^{o}C για άνεση εργασίας ή χαμηλότερα, αναλόγως το επίπεδο αποστείρωσης του δωματίου.

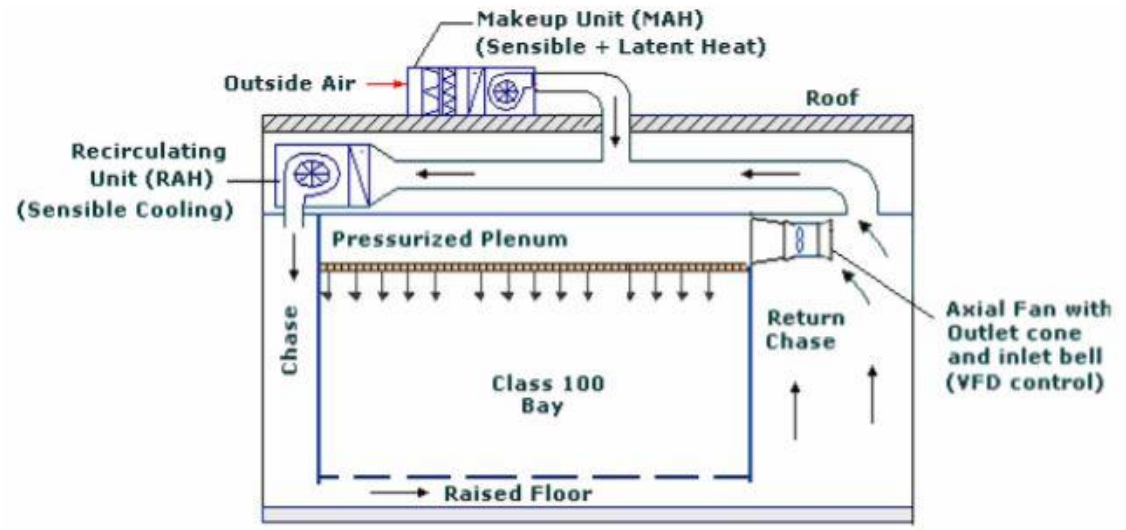
Σε ένα σύστημα μονής διέλευσης (single pass), το οποίο χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες φρέσκου αέρα, πρέπει να ρυθμίζεται και το αισθητό φορτίο (λόγω της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος) και το λανθάνον φορτίο (λόγω της υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος) του, προτού εισέλθει στο σύστημα ανακυκλοφορίας. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κάτω από 4 ^{o}C , συνήθως ο αέρας προθερμαίνεται.

Για τις μονάδες ανακυκλοφορίας, η πλειοψηφία του ψυκτικού φορτίου προέρχεται από την έκλυση θερμότητας από τον εξοπλισμό της παραγωγής, επομένως στις περισσότερες περιπτώσεις, το ποσοστό του αισθητού ψυκτικού φορτίου ξεπερνά το 95%. Το μικτό λανθάνον φορτίο δημιουργείται από το προσωπικό εργασίας.

$$Q_{sensible}[\%] = \frac{Q_{sensible}}{Q_{sensible} + Q_{latent}} \cdot 100\%$$

6.7.2 Ρύθμιση θερμοκρασίας σε cleanroom με αυστηρές προδιαγραφές

Σε cleanrooms με αυστηρά επίπεδα αποστείρωσης (<Class 1000) , δεν κλιματίζεται όλη η ποσότητα του εισερχόμενου αέρα. Ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ροής αποσπάται από το ρεύμα επιστροφής από τη μονάδα ανακυκλοφορίας (RAH) και κλιματίζεται με τη χρήση sensible cooling coils. Ο εξωτερικός αέρας που χρειάζεται για τη δημιουργία υπερπίεσης εντός του δωματίου, κλιματίζεται από τη μονάδα αναπλήρωσης αέρα (MAH) ως προς το αισθητό και λανθάνον φορτίο του. Στη συνέχεια αναμειγνύεται με τον αέρα ανακυκλοφορίας, εισέρχεται στο cleanroom, και επιστρέφει μέσω των αεραγωγών επιστροφής.



Εικόνα 44: Τυπικός σχεδιασμός αερισμού cleanroom [30]

6.7.3 Ρύθμιση θερμοκρασίας σε cleanroom με λιγότερο αυστηρές προδιαγραφές

Σε cleanrooms με λιγότερο αυστηρές προδιαγραφές (>Class 1000), η συνολική ροή αέρα μερικές φορές προσεγγίζει μία κανονική εφαρμογή κλιματισμού. Μπορεί να μην υπάρχουν καθόλου ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας, παρά μόνο μία ή πολλές μονάδες επεξεργασίας αέρα οι οποίες κλιματίζουν και ανακυκλοφορούν όλο τον αέρα που χρειάζεται το cleanroom.

Οι αναλογίες ανάμειξης ρευμάτων αέρα ρυθμίζονται από τα dampers ανάμειξης. Καθώς η εσωτερική πίεση του cleanroom πέφτει, το damper του αέρα περιβάλλοντος ανοίγει και το damper ανακυκλοφορίας κλείνει αναλογικά. Η θερμοκρασία του εισαγόμενου αέρα μπορεί να είναι από 8,3 έως 11 ^{o}C πιο ψυχρός από το ρεύμα ανακυκλοφορίας, ωστόσο ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ειδικούς διαχύτες ώστε να περιορίζει τα άβολα ρεύματα αέρα.

6.7.4 Εσωτερική υγρασία

Η σχετική υγρασία είναι η ποσότητα νερού που περιέχεται σε ένα δείγμα αέρα, σε δεδομένη θερμοκρασία σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να περιέχεται στην ίδια θερμοκρασία.

Τα ιδανικά επίπεδα σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον, για άνετη εργασία και καλή παραγωγή φαρμάκων, είναι μεταξύ του 45% - 50%. Υπό ορισμένες περιπτώσεις, ο περισσότερος εξοπλισμός των cleanrooms μπορεί να λειτουργήσει σε σχετική υγρασία από 20% έως 70%, αλλά ο βέλτιστος στόχος σχετικής υγρασίας είναι μεταξύ 45% και 50% για τους παρακάτω λόγους:

1. Η σχετική υγρασία του δωματίου επηρεάζει την επιδερμίδα του προσωπικού (παραγωγή νιφάδων δέρματος), εάν η σχετική υγρασία είναι πολύ χαμηλή. Εάν είναι πολύ υψηλή, ευνοείται η ανάπτυξη τοξικής συσσώρευσης (μούχλα) και άλλες μορφές βιολογικών μικροβίων.
2. Τα υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας επιταχύνουν τη διαβρωσιμότητα διαφόρων υλικών ειδικά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ημιαγωγών.

3. Η υψηλή σχετική υγρασία μπορεί να είναι επιβλαβής για κονιοποιημένα φάρμακα, τα οποία είναι ευαίσθητα στην υψηλή υγρασία. Στις φαρμακοβιομηχανίες χρησιμοποιούνται πολλά χημικά σε μορφή σκόνης κατά την παραγωγή.
4. Η χαμηλή σχετική υγρασία συμβάλλει σε προβλήματα στατικού ηλεκτρισμού. Δημιουργείται ευκολότερα ηλεκτροστατικό φορτίο και διαλύεται δυσκολότερα σε περιοχές του δωματίου όπου η σχετική υγρασία είναι χαμηλότερη από 35% και γίνεται κρίσιμη όταν πέφτει κάτω από 30%.

Το εύρος σχετικής υγρασίας 5% μπορεί να φαίνεται δύσκολο να επιτευχθεί, αλλά δεν είναι, λόγω των υψηλής αποτελεσματικότητας φίλτρων, της υπερπίεσης που επικρατεί στο δωμάτιο και της μηδενικής εισχώρησης αέρα στο δωμάτιο. Τα συστήματα HVAC των cleanrooms είναι επίσης εξοπλισμένα καταλλήλως για την εφύγρανση και την αφύγρανση του αέρα, προκειμένου να λειτουργεί στην ανοχή σχετικής υγρασίας 5%.

6.7.5 Αφύγρανση

Η αφύγρανση ως επί των πλείστων επιτυγχάνεται ψύχοντας τον αέρα κάτω από το σημείο δρόσου (Dew Point D.P). Κατά την ψύξη του αέρα στο cooling coil, δημιουργούνται συμπυκνώματα τα οποία συσσωρεύονται σε μια μικρή λεκάνη κάτω από το cooling coil και στη συνέχεια απομακρύνονται. Η ταχύτητα του αέρα κατά τη διέλευσή του από το cooling coil δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2,03 m/s, προκειμένου να μεγιστοποιείται η επαφή του αέρα με την επιφάνεια του cooling coil και για να μειωθεί το ποσοστό αέρα που παρακάμπτει την ψύξη του από το cooling coil. Στη συνέχεια απαιτείται αναθέρμανση του αέρα προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία του η οποία μειώνεται κατά την αφύγρανση. Οι θερμοστάτες πρέπει να τοποθετούνται σε περιοχές όπου διεξάγονται κρίσιμες παραγωγικές διαδικασίες και έχουν αυστηρές προδιαγραφές.

Εάν η παραγωγική διαδικασία απαιτεί υψηλότερο επίπεδο αφύγρανσης (RH<40%), το οποίο δε μπορεί να επιτευχθεί μέσω του cooling coil, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αφυγραντήρας με αποξηραντικό υλικό.

6.7.6 Εφύγρανση

Για τη γενική εφύγρανση μιας περιοχής, εγκαθίσταται ένας υγραντήρας ατμού στη μονάδα επεξεργασίας αέρα (AHU). Εάν απαιτείται ειδική διατήρηση υγρασίας σε συγκεκριμένο χώρο-ζώνη, τότε ο υγραντήρας τοποθετείται στον αεραγωγό εισαγωγής αέρα της εκάστοτε ζώνης.

Για τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας ζωνών, των οποίων ο αέρας κλιματίζεται από την AHU, ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας τοποθετείται είτε στον αεραγωγό εισαγωγής αέρα, είτε στον αεραγωγό εξόδου αέρα. Ωστόσο για την ξεχωριστή διατήρηση σχετικής υγρασίας ανά ζώνη, οι αισθητήρες τοποθετούνται είτε μέσα σε κάθε ζώνη, είτε στον αεραγωγό εξόδου κάθε ζώνης.

6.7.7 Βελτιστοποίηση ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας

Οι παραγωγικές διαδικασίες εντός των cleanroom απαιτούν στενά όρια θερμοκρασίας και υγρασίας, συνήθως ±0,5 ^{o}C και ±2% R.H. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ο ψυκτικός εξοπλισμός χρησιμοποιείται επίσης για την αφύγρανση. Η αφύγρανση επιτυγχάνεται με την ψύξη αναμειγμένου αέρα κάτω από το σημείο δρόσου σε cooling coil το οποίο διαρρέεται από ψυχρό νερό (θερμοκρασία εισόδου νερού στο cooling coil: 4,5 ^{o}C) και αναθερμαίνοντάς τον εν συνεχεία.

Σε περιπτώσεις όπου η ρύθμιση της υγρασίας είναι κρίσιμη, η ρύθμιση της θερμοκρασίας έρχεται δεύτερη. Σε αυτή την περίπτωση το cooling coil λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, ψύχοντας έτσι τον αέρα περισσότερο από το επιθυμητό. Κατόπιν ρυθμίζεται η θερμοκρασία, αναθερμαίνοντας τον αέρα στο επιθυμητό σημείο. Αυτή η προσέγγιση είναι αξιόπιστη αλλά κοστοβόρα, καθώς ξοδεύεται πρόσθετη ενέργεια για την υπόψυξη του αέρα και πρόσθετη ενέργεια για την αναθέρμανσή του. Εάν το θερμικό κέρδος του αναπληρωμένου αέρα είναι μεγάλο, το κόστος της αναθέρμανσής του θα είναι υψηλό. Μία ενεργειακά αποτελεσματική λύση σε αυτή την περίπτωση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν δύο cooling coils.

- Το πρώτο θα τοποθετείται στη μονάδα αναπλήρωσης αέρα (MAH) για την κάλυψη του αισθητού θερμικού φορτίου και του φορτίου αφύγρανσης του εξωτερικού αέρα.

- Το δεύτερο θα είναι σχεδιασμένο για την κάλυψη του αισθητού θερμικού φορτίου που δημιουργείται από τον εξοπλισμό της παραγωγικής διαδικασίας.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του λανθάνοντος θερμικού φορτίου (λόγω υγρασίας) οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες του αέρα αναπλήρωσης. Το εσωτερικό λανθάνον θερμικό φορτίο είναι αμελητέο. Ωστόσο το μεγαλύτερο ποσοστό του αισθητού θερμικού φορτίου προέρχεται από τον εξοπλισμό.

Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στο δεύτερο cooling coil, το οποίο βρίσκεται στη μονάδα ανακυκλοφορίας, να λειτουργεί σε μερικό φορτίο, μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία και η ανάγκη για αναθέρμανση θα μειωθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : Οικονομική λειτουργία των cleanrooms

7.1 Τρόποι μείωσης εξόδων και εξοικονόμησης ενέργειας για cleanrooms

Η λειτουργία των cleanrooms είναι μία ιδιαίτερη κοστοβόρα διαδικασία. Ο κύριος λόγος είναι επειδή παρέχεται σε αυτά, παροχή αέρα από 10 έως και 100 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με ένα κανονικά αεριζόμενο δωμάτιο. Επίσης τα κόστη κεφαλαίου και τα λειτουργικά κόστη είναι πολύ υψηλά. Ωστόσο υπάρχουν αρκετοί τρόποι για την εξοικονόμηση ενέργειας, οι περισσότεροι εκ των οποίων αφορούν τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων HVAC. Οι καλύτερες πρακτικές είναι οι παρακάτω:

1. Σωστή τυποποίηση του cleanroom

Πριν την εφαρμογή οποιουδήποτε μέτρου αποστείρωσης του χώρου, πρέπει να αποφασίζεται το επίπεδο κρισιμότητας της συγκέντρωσης σωματιδίων. Αυτό γίνεται μέσω της τυποποίησης του δωματίου στην κατάλληλη κλάση. Για παράδειγμα δεν είναι συνετό να σχεδιαστεί ολόκληρο το κτίριο σε κλάση 100, όταν ένα μεγάλο μέρος του θα μπορούσε να τυποποιηθεί σε κλάση 10.000. Με άλλα λόγια, η λιγότερο κρίσιμη ζώνη δεν πρέπει να τυποποιείται με χαμηλή κλάση για συντηρητικούς λόγους. Ο ειδικός του process πρέπει να διαχωρίσει τις κρίσιμες από τις μη κρίσιμες ζώνες, βάσει των απαιτήσεων και των συστάσεων του κατασκευαστή.

2. Χρήση μικρών δωματίων (mini-environments) όπου είναι δυνατό.

Μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, με τον περιορισμό των ζωνών χαμηλότερης κλάσης από αυτές υψηλότερης κλάσης, με τη χρήση ειδικών κουρτινών και ξεχωριστής παροχής αέρα με φίλτρα HEPA που καλύπτουν την οροφή του κρίσιμου δωματίου. Αντί να καλύπτεται ολόκληρη η οροφή του κτιρίου με φίλτρα HEPA, είναι δυνατό να δημιουργούνται και να διαχωρίζονται οι ζώνες κλάσης 100 από τις ζώνες κλάσης 10.000.

3. Περιορισμός του χώρου κάθε cleanroom

Είναι γενικά επιθυμητό να μη χρησιμοποιείται περισσότερος χώρος από ότι χρειάζεται για τη λειτουργία κάθε cleanroom εντός της βιομηχανίας. Έτσι μειώνονται οι απαιτήσεις αερισμού κάθε δωματίου και οι ενεργειακές καταναλώσεις

4. Βελτιστοποιώντας το ρυθμό εναλλαγών αέρα

Ο ρυθμός εναλλαγών αέρα είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή και διαστασιολόγηση του συστήματος επεξεργασίας αέρα και των μοτέρ. Για τα ISO 5 (Class 100) cleanrooms, συνίσταται ρυθμός εναλλαγών αέρα ίσος με 250 με 700.

Μειώνοντας τις εναλλαγές αέρα, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας (για παράδειγμα 30% μείωση του ρυθμού εναλλαγών αέρα, μειώνει την κατανάλωση ισχύος κατά 66%) και μπορεί να βελτιωθεί η αποστείρωση του χώρου με την ελαχιστοποίηση της τύρβης. Μειώνοντας το ρυθμό εναλλαγής αέρα, μειώνεται και το μέγεθος των ανεμιστήρων, των μοτέρ και άλλων, συμβάλλοντας έτσι στην εξοικονόμηση πρωταρχικών εξόδων.

Η ανακυκλοφορία του αέρα μπορεί να ελεγχθεί με διάφορους τρόπους:

- Μείωση της υπερπίεσης του δωματίου, κατά τις ώρες που δεν παράγονται σωματίδια.
- Χρήση χρονοδιακοπτών ή ειδικού λογισμικού, για τη μείωση της ροής αέρα κατά τις ώρες μειωμένης παραγωγής.
- Χρήση ειδικών αισθητήρων για τη μείωση της ροής αέρα όταν δεν υπάρχουν άνθρωποι στο χώρο.
- Χρήση μετρητών σωματιδίων, ώστε να ελέγχεται η ροή αέρα ανάλογα με την καθαριότητά του. Το σήμα εξόδου από τους μετρητές αυτούς θα καθορίζει απευθείας την ταχύτητα περιστροφής των ανεμιστήρων.

5. Χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη διαστασιολόγηση εξοπλισμού

Η ενέργεια του ανεμιστήρα είναι ανάλογη του όγκου αέρα και της συνολικής στατικής πίεσης που χρησιμοποιείται.

- Οι περισσότεροι μηχανικοί διαστασιολογούν τις μονάδες επεξεργασίας αέρα εμπειρικά στα 2,54 m/s. Ο κανόνας αυτός γλιτώνει χρόνο, αλλά δεν είναι πάντα ο βέλτιστος. Η πτώση πίεσης αέρα σε έναν αεραγωγό ή μια μονάδα είναι σχεδόν ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητάς του. Η απαίτηση ισχύος ανεμιστήρα μειώνεται, όσο μειώνεται η ταχύτητα. Για να μειωθεί η πτώση πίεσης, πρέπει να επιλεγεί μονάδα που θα προσδίδει στον αέρα ταχύτητα από 1,27 έως 2,29 m/s.
- Η ισχύς του ανεμιστήρα είναι ανάλογη του κύβου του ρυθμού παροχής αέρα ή της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα. Μία μείωση του παρεχόμενου όγκου αέρα

κατά 10% θα αποτελέσει σε μία μείωση ισχύος κατά περίπου 27%. Παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας κάθε μονάδας, μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του συστήματος HVAC.

- Χρήση οδηγών μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drives ή Inverter) για την εξοικονόμηση ενέργειας από ανεμιστήρες, αντλίες, πύργους ψύξης και μερικούς τύπους chillers. Ο εξοπλισμός με VFDs καταναλώνει 15% με 30% λιγότερη ενέργεια από ότι όταν έχουν οδηγούς συνεχούς ταχύτητας (Constant Speed Drives).

6. Βελτιστοποιώντας τη διανομή αέρα και μειώνοντας την πτώση πίεσης

Η κατανάλωση ενέργειας από τους ανεμιστήρες είναι απευθείας ανάλογη με την πτώση πίεσης του αέρα που ωθούν. Συνεπώς πρέπει να επιδιώκεται ο βέλτιστος σχεδιασμός ανεμιστήρων για την ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης του αέρα. Ορισμένες μέθοδοι για την ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης είναι οι παρακάτω:

- Ελαχιστοποίηση των εμποδίων της ροής, χρήση ευθείων αεραγωγών και αλλαγή πορείας μόνο όταν είναι απαραίτητο. Η πτώση πίεσης στους αεραγωγούς είναι αντιστρόφως ανάλογη της πέμπτης δύναμης της διαμέτρου του αεραγωγού. Αυτό σημαίνει ότι αντικαθιστώντας έναν αεραγωγό 16 ιντσών με έναν των 12 ιντσών, μειώνεται η πτώση πίεσης κατά 75%.
- Επιλογή cooling coils, ηχομονωτικών συστημάτων και φίλτρων με χαμηλή πτώση πίεσης.
- Διατήρηση χαμηλής ταχύτητας.
- Επιλογή φίλτρων υψηλής αποδοτικότητας. Τα φίλτρα με υψηλότερη αποδοτικότητα, παρέχουν τον αέρα πιο αποτελεσματικά, με μικρότερη πτώση πίεσης, συντελώντας έτσι στη μείωση κατανάλωσης ενέργειας.
- Αποφυγή υπερβολικών μέτρων ασφαλείας.

Οι σχεδιασμοί χαμηλής πίεσης μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα συστήματα με ανεμιστήρες (μονάδες επεξεργασίας, ανακυκλοφορίας, αναπλήρωσης και εξαγωγής αέρα). Τα συστήματα χαμηλής πίεσης επιτρέπουν την επιλογή μικρότερων μοτέρ ανεμιστήρων, λιγότερο θόρυβο, αποτελεσματικότερη αφύγρανση και διήθηση και σε μερικές περιπτώσεις, χαμηλότερα πρωτεύοντα κόστη.

7. Με τη σωστή τοποθέτηση του εξοπλισμού.

Οι κινητήρες των ανεμιστήρων πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλο σημείο. Οι περισσότεροι κινητήρες είναι μονοφασικοί, οι οποίοι έχουν υψηλό δείκτη ισχύος αλλά χαμηλή απόδοση. Κατά τη λειτουργία τους οι κινητήρες αυτοί εκλύουν θερμότητα, συνεπώς είναι προτιμότερο ενεργειακά να τοποθετούνται εκτός αεραγωγού, μειώνοντας έτσι το θερμικό κέρδος που θα υπήρχε σε περίπτωση που τοποθετούνταν εντός αεραγωγού. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ευκολότερη πρόσβαση από τους τεχνικούς συντήρησης.

8. Εισάγοντας την κατάλληλη ποσότητα φρέσκου αέρα

Το μεγαλύτερο θερμικό φορτίο που πρέπει να καλύψει το σύστημα HVAC ενός cleanroom είναι αυτό του αέρα περιβάλλοντος. Χρειάζεται μεγάλη ποσότητα εξωτερικού αέρα για την αναπλήρωση των απωλειών και των διαρροών καθώς επίσης και για τη δημιουργία υπερπίεσης εντός της καθαρής ζώνης. Ο αέρας αναπλήρωσης θα πρέπει να είναι το 125% του εξερχόμενου αέρα. Για παράδειγμα, εάν ο εξερχόμενος αέρας ήταν 0,10 m^3/min τότε ο αέρας αναπλήρωσης θα έπρεπε να ήταν 0,125 m^3/min.

9. Επιλέγοντας εξοπλισμό υψηλής απόδοσης

- Επιλογή κινητήρων, ανεμιστήρων, chiller υψηλής απόδοσης
- Οι κοχλιωτοί και οι ακτινικοί συμπιεστές βελτιώνουν την αξιοπιστία των chillers. Οι σύγχρονοι φυγοκεντρικοί chillers καταναλώνουν περίπου 0,60 kW ανά τόνο ψυχόμενου μέσου και οι μηχανές που είναι εξοπλισμένες με την τεχνολογία inverter συντελούν στην περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.
- Το έργο των chillers, είναι ανάλογο με το έργο συμπίεσης ατμού στο συμπιεστή. Το έργο αυτό μειώνεται εάν αυξηθούν οι θερμοκρασίες του ψυχόμενου νερού και μειωθούν οι θερμοκρασίες του συμπυκνωμένου νερού. Η πλειοψηφία των cleanrooms εξυπηρετείται βέλτιστα με θερμοκρασία του ψυχόμενου νερού ίση με 12,5 με 20 ^oC.

10. Αναθεώρηση σχεδιασμού cleanroom

Ο σχεδιασμός του cleanroom πρέπει να αναθεωρείται εάν υπερβαίνονται τα παρακάτω όρια:

- Στατική πίεση στις μονάδες αναπλήρωσης αέρα ίση με 10,15 cm στήλης ύδατος.
- Στατική πίεση στις μονάδες ανακυκλοφορίας αέρα ίση με 5,08 cm στήλης ύδατος.
- Βαθμός απόδοσης μεγαλύτερος από 85%.
- Βαθμός απόδοσης κινητήρων ανεμιστήρων μεγαλύτερος από 94%.

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα cleanroom είναι ο σωστός σχεδιασμός αερισμού.

7.2 Άλλα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας

Ο σχεδιασμός των cleanrooms καθοδηγείται από τις ακόλουθες προτεραιότητες:

1. Αποτελεσματικότητα στην επίτευξη των προβλεπόμενων συνθηκών και της προβλεπόμενης κλάσης αποστείρωσης.
2. Λειτουργική ασφάλεια και αξιοπιστία.
3. Χαμηλά λειτουργικά κόστη και κεφάλαιο επένδυσης.

Αυτή η σειρά προτεραιότητας είναι μια συνέπεια της φύσης των δραστηριοτήτων που εκτελούνται στα cleanrooms και λόγω του γεγονότος ότι λειτουργούν με υπερβολικά ακριβό εξοπλισμό και συσκευές ελέγχου, των οποίων η λειτουργία πρέπει να παραμένει αξιόπιστη. Είναι επίσης μια συνέπεια του γεγονότος ότι ύστερα από κάθε δυσλειτουργία, όπως για παράδειγμα ένα κρούσμα μόλυνσης που μπορεί να προκύψει, θα χρειαστεί μία διαδικασία επανελέγχου και επανεπιβεβαίωσης της ασφάλειας χρήσης του ελαττωματικού εξοπλισμού.

7.3 Ελαχιστοποίηση της παροχής αέρα για τη βέλτιστη και οικονομικότερη λειτουργικότητα

Η στρωτή ροή αέρα από την πάνω προς στην κάτω μεριά, η οποία ονομάζεται ροή μετατόπισης χαμηλής τυρβότητας, έχει δείξει σε πολλούς και διάφορους τομείς ότι παρέχει το υψηλότερο επίπεδο καθαριότητας, σε σχέση με άλλα είδη ροών.

Δυστυχώς η υψηλή αυτή απόδοση επιτυγχάνεται με ένα τίμημα: Εάν χρησιμοποιείται ταχύτητα αέρα 0,45 m/s, όπως προτείνεται στα πρότυπα τεχνολογίας cleanroom, θα παρέχεται ισοδύναμα αέρας 1620 m^3/h ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας φίλτρου. Η στρωτή ροή λοιπόν συνδέεται με υψηλή παροχή όγκου αέρα. Επομένως το κόστος λειτουργίας των συστημάτων που απαιτούν αέρα στρωτής ροής είναι αρκετά μεγάλο, καθώς αυτό συνδέεται με την παροχή όγκου αέρα. Συνεπώς μία αρχική λύση για τη μείωση των λειτουργικών εξόδων, είναι η μείωση της παροχής αέρα μέσω των παρακάτω τρόπων:

- Μειώνοντας στο ελάχιστο τον αριθμό δωματίων επεξεργασίας που απαιτούν ομοιόμορφη στρωτή ροή αέρα
- Μειώνοντας την ταχύτητα της ροής, συνεπώς μειώνοντας τις στροφές των ανεμιστήρων που προωθούν τον αέρα
- Περιορίζοντας τις περιοχές που χρειάζονται αέρα ομοιόμορφης στρωτής ροής με κατάλληλες ειδικές κουρτίνες ή διαχωριστικούς τοίχους, διαχωρίζοντας τες έτσι από το ευρύτερο περιβάλλον και τις απώλειες που μπορεί να προκαλέσει στη ροή αέρα

7.4 Συστήματα για Cleanrooms: Αυτοσχέδια μέτρα προστασίας

Η βάση σχεδιασμού οποιουδήποτε σχεδίου προστασίας από μόλυνση, είναι η ίδια διαδικασία παραγωγής, όπως για παράδειγμα η αλληλουχία λειτουργιών, η διάταξη του εξοπλισμού και των μηχανημάτων και οι ειδικές απαιτήσεις καθαριότητας για τις διεργασίες, την επεξεργασία των πρώτων υλών και των περιοχών κυκλοφορίας αέρα. Όσο καλύτερα έχουν κατανοηθεί, τόσο πιο ειδικά μπορεί να προσαρμοστεί ο σχεδιασμός του cleanroom στην εκάστοτε κατάσταση. Συνεπώς απαιτείται καλή συνεργασία μεταξύ του σχεδιαστή και του κατασκευαστή του κάθε συστήματος με τον τελικό χρήστη.

Εάν απαιτείται μόνο ορισμένες μικρές περιοχές να προστατευθούν με καθαρό αέρα, όπως για παράδειγμα σε ένα εργαστήριο ερευνών, οι καθαροί πάγκοι μπορούν να αποτελέσουν μία απλή εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους. Οι πάγκοι αυτοί δημιουργούν αυτόνομα το δικό τους καθαρό αέρα, ανεξάρτητα από το σύστημα κλιματισμού του cleanroom.

Εάν απαιτείται έντονη προστασία καθαρού αέρα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται μια κεντρική μονάδα παροχής καθαρού αέρα. Έτσι μπορούν να σχεδιαστούν πιο ευέλικτοι και ωφέλιμοι οικονομικά τρόποι παροχής καθαρού αέρα. Ειδικά όταν οι χώροι που τον απαιτούν είναι μεγάλοι.

Για τη βέλτιστη προσαρμογή σε μια διάταξη παραγωγής, είναι συχνά χρήσιμο να διαχωρίζονται οι εξής δύο λειτουργίες:

- Διήθηση αέρα
- Εγκατάσταση του πεδίου ομοιόμορφης ροής

Το πρώτο βήμα είναι το φιλτράρισμα του αέρα στο επιθυμητό επίπεδο καθαριότητας, μέσω των φίλτρων HEPA ή ULPA. Η ομοιόμορφη στρωτή ροή εγκαθίσταται ανεξάρτητα, κατάντι των φίλτρων και παρέχεται μέσω ειδικών στοιχείων τα οποία είναι ικανά να δημιουργήσουν ροή με χαμηλή τυρβότητα. Ένα από τα αυτά τα στοιχεία είναι η χρήση διαχύτη με διπλό στρώμα πολυεστερικού υφάσματος. Το σχήμα των διαχυτών μπορεί να προσαρμοστεί καταλλήλως ώστε να διανέμει αέρα αποτελεσματικά στην εκάστοτε επιφάνεια. Άλλοι τρόποι για την εξοικονόμηση ενέργειας και τα λειτουργικά κόστη ενός cleanroom είναι οι παρακάτω:

- Μεταβλητά ποσοστά εισαγωγής εξωτερικού αέρα και ανακυκλοφορίας του αέρα του cleanroom προκειμένου να μειωθούν τα θερμικά φορτία
- Χρήση της αποβληθείσας θερμότητας για τις ανάγκες της βιομηχανίας
- Ανακόμιση της θερμότητας από το εξερχόμενο ρεύμα αέρα με τη βοήθεια αντλιών θερμότητας αντίστροφου κύκλου
- Ελαχιστοποίηση της υγροποίησης του αέρα
- Κατάλληλος διαχωρισμός του cleanroom σε κλιματιζόμενες ζώνες, αναλόγως με τις ανάγκες της βιομηχανίας
- Εφαρμογή μεταβλητής παροχής αέρα αναλόγως με τις ανάγκες της βιομηχανίας
- Μείωση της παροχής αέρα για τις ώρες που σταματά η παραγωγή
- Αυστηρή και προσεκτικά προμελετημένη επιλογή των συνιστωσών του συνολικού συστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8º : Υπολογιστικό μέρος

8.1 Λογισμικό προσομοίωσης: Energy Plus

8.1.1 Εισαγωγή

Για το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός cleanroom στο λογισμικό Energy Plus, με σκοπό την προσέγγιση των φορτίων που εμφανίζονται σε αυτό κατά τη διάρκεια του χρόνου για την περιοχή της Αθήνας.

Το Energy Plus είναι ένα πρόγραμμα ενεργειακής προσομοίωσης, που χρησιμοποιείται από μηχανικούς, αρχιτέκτονες και ερευνητές για τη μοντελοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης για θερμικά ψυκτικά φορτία, φορτία αερισμού, φορτία λόγω φωτισμού, φορτία λόγω μηχανημάτων βιομηχανικής επεξεργασίας, καθώς επίσης και για τη χρήση νερού σε κτίρια. λογισμικό προσομοίωσης των θερμικών-ψυκτικών φορτίων που αναπτύσσονται σε ένα κτίριο και της ενεργειακής του ανάλυσης, αναλόγως τις παραμέτρους και τις παραδοχές που θα κάνει ο χρήστης.

8.1.2 Υπολογιστικές μέθοδοι του Energy Plus και υποπρογράμματα

Η δημιουργία του προγράμματος προσομοίωσης Energy Plus έγινε με βάση τη γλώσσα προγραμματισμού Fortran, το οποίο εκδόθηκε από το τμήμα ενέργειας της Αμερικανικής κυβέρνησης. Το Energy Plus βασίζεται σε 2 προηγούμενα προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων:

- Το BLAST (Building Loads and System Thermodynamic) και
- Το DOE-2 (Department of Energy-2)

Τα προγράμματα αυτά σχεδιάστηκαν και αναβαθμίστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, δεδομένης της ραγδαίας ανάπτυξης των υπολογιστικών μεθόδων.

Για την κτιριακή προσομοίωση το Energy Plus παρέχει μεταξύ άλλων και τα υποπρογράμματα: IDF Editor και EP-Launch. Τα προγράμματα αυτά εξυπηρετούν στη δημιουργία και επεξεργασία αρχείων εισόδου και την εκτέλεση προσομοιώσεων. Το κτιριακό μοντέλο προσομοιώνεται κατόπιν πιο ρεαλιστικά επειδή τα αποτελέσματα των υποπρογραμμάτων συνδέονται μεταξύ τους με αναδράσεις και καταλήγουν τελικώς σε μια λειτουργία ταυτόχρονης λύσης. Η διαδικασία επίλυσης είναι μια επαναληπτική δομή διαδοχικών αντικαταστάσεων τύπου Gauss – Seidell. Όλα τα στοιχεία ενσωματώνονται και ελέγχονται από το διαχειριστή

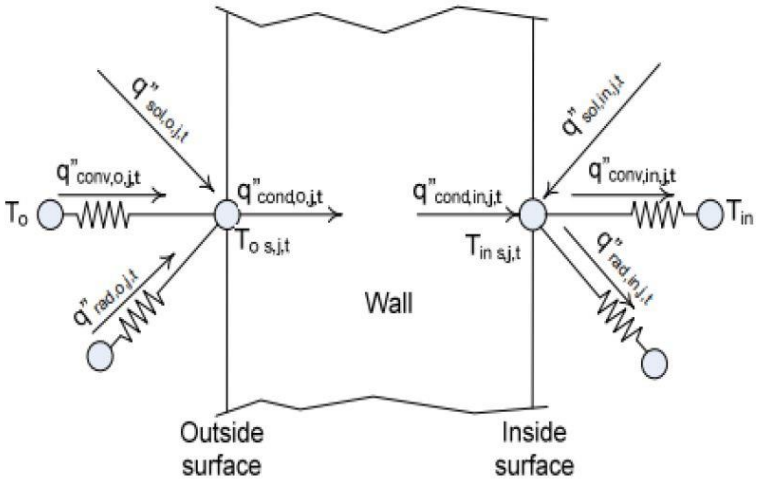
της προσομοίωσης. Τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες του Energy Plus μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Ολοκληρωμένη και ταυτόχρονη επίλυση της συμπεριφοράς του κτιρίου και των πρωτευόντων και δευτερευόντων συστημάτων, όταν αυτά είναι άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους.
- Χρονικά βήματα μικρότερα της μίας ώρας για την αλληλεπίδραση μεταξύ θερμικών ζωνών και περιβάλλοντος, καθώς και μεταβλητά χρονικά βήματα για την αλληλεπίδραση των συστημάτων θέρμανσης, κλιματισμού και αερισμού (HVAC Systems).
- ASCII αρχεία κειμένου για τα κλιματολογικά και τα δεδομένα εισόδου, που περιλαμβάνουν ωριαίες, ή και συντομότερες καταγραφές καθώς και αποτελέσματα με τύπο και μορφή που καθορίζονται από το χρήστη.
- Τεχνική επίλυση βασισμένη στη θερμική ισορροπία των φορτίων του κτιρίου, που επιτρέπει τον ταυτόχρονο υπολογισμό των επιδράσεων της ακτινοβολίας και της συναγωγής, τόσο για την εσωτερική, όσο και για την εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου.
- Συναρτήσεις θερμικής αγωγιμότητας για τον υπολογισμό αυτής στα διάφορα μέρη του κτιρίου, όπως τοίχοι, οροφές, δάπεδα και άλλα.
- Βελτιωμένη προσομοίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω εδάφους, βασισμένη σε τρισδιάστατα μοντέλα εδάφους και απλοποιημένες μεθόδους ανάλυσης.
- Συνδυασμένο μοντέλο διάδοσης θερμότητας και μάζας για τον υπολογισμό της απορρόφησης και της αποβολής υγρασίας από κάθε στρώμα επιφανειών του κτιρίου. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω συναρτήσεων θερμικής αγωγιμότητας ή με το μοντέλο EMPD (Effective Moisture Penetration Depth Model).
- Μοντέλα θερμικής άνεσης που λαμβάνουν υπόψη τους τη δραστηριότητα των εργαζομένων-ενοίκων, την υγρασία και άλλα.
- Ανισοτροπικό μοντέλο ουρανού για τον καλύτερο υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες.
- Σύνθετοι υπολογισμοί ανοιγμάτων που περιλαμβάνουν ελεγχόμενες περσίδες παραθύρων, ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες και άλλα.
- Έλεγχοι της ημερήσιας ηλιακής φωτεινότητας, συμπεριλαμβανομένων και των υπολογισμών του εσωτερικού φωτισμού, της προσομοίωσης και του ελέγχου και του τεχνητού φωτισμού.

- Υπολογισμοί της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τις ποσότητες των εκπεμπόμενων ρύπων CO_2 , SO_X , NO_X , CO και μικροσωματιδίων, οι οποίοι παράγονται κατά τις μετατροπές της ενέργειας ώστε να μπορεί να καταναλωθεί από το κτίριο και τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού που αυτό διαθέτει. [34]

Το Energy Plus ακολουθεί τη μέθοδο θερμικής ισορροπίας (Heat Balance Method) της ASHRAE για τους υπολογισμούς των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Αυτή βασίζεται στην εξισορρόπηση όλων των ενεργειακών ροών σε μια θερμική ζώνη και περιλαμβάνει την επίλυση ενός συνόλου εξισώσεων, οι οποίες είναι οι εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου για την εξωτερική και την εσωτερική επιφάνεια για κάθε στοιχείο του κτιρίου (τοίχο, οροφή, δάπεδο κλπ) καθώς και για τον αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου.

Η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων του κτιρίου, συνδέεται με το σύνολο των ενεργειακών εξισώσεων συνδυάζοντας έτσι τις εξωτερικές και εσωτερικές ενεργειακές ζυγοσταθμίσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μοντελοποιώντας τη θερμότητα με συναρτήσεις θερμικής μεταφοράς (CTF-Conduction Transfer Functions) οι οποίες τελικά συσχετίζουν τις θερμικές ροές με τις τρέχουσες και τις προηγούμενες τιμές θερμοκρασιών των επιφανειών.



Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση θερμικής ισορροπίας στο εξωτερικό και εσωτερικό επιφάνειας [35]

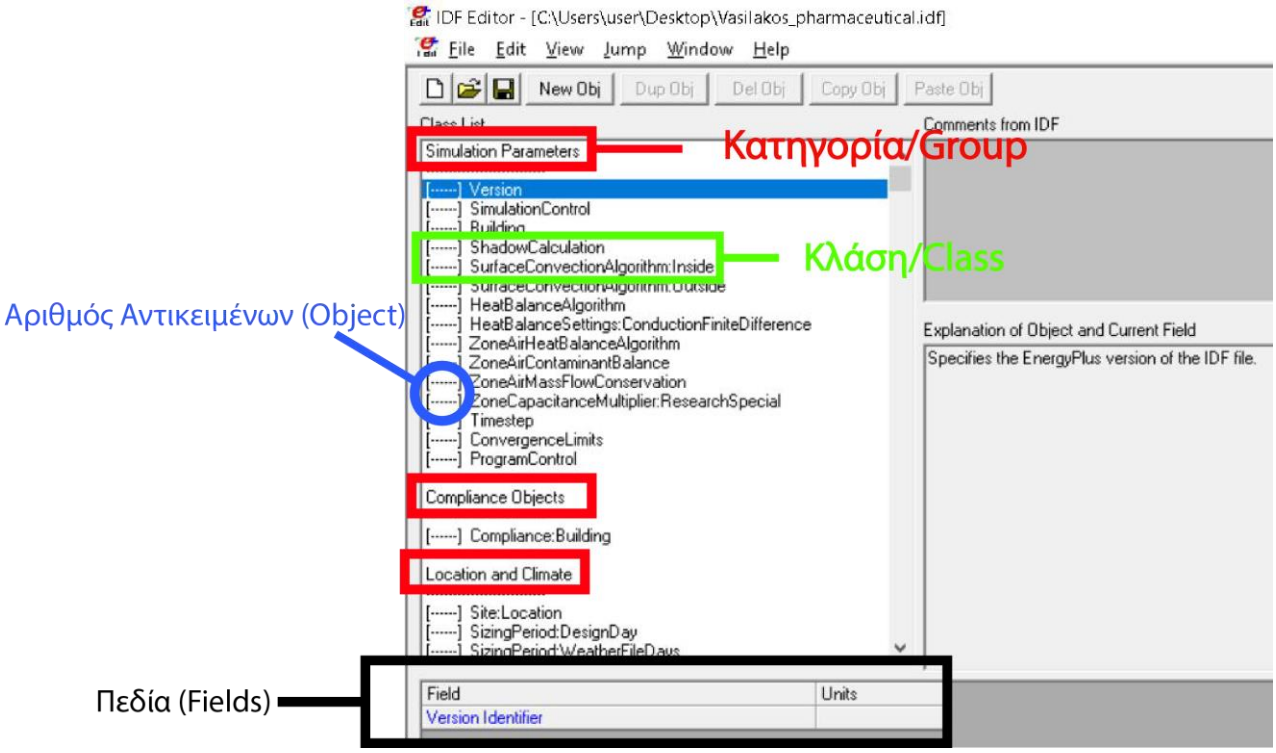
Το πλεονέκτημα της μεδόθου CTF είναι ότι μετατρέπει τις πολύπλοκες εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας σε απλές γραμμικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές, οι οποίες επιλύονται εύκολα για εσωτερικές και εξωτερικές θερμοκρασίες επιφανειών. Οι συντελεστές που εμπλέκονται σε αυτές τις γραμμικές εξισώσεις υπολογίζονται μόνο μία φορά για κάθε

κατασκευή. Αυτή η απλούστευση κάνει τη μέθοδο ικανή να προσομοιώνει εύκολα τα κτίρια που περιλαμβάνουν υλικά τα οποία έχουν σταθερές ιδιότητες.

8.2 Εισαγωγή δεδομένων στο Energy Plus ανά κατηγορία

Σκοπός του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, είναι να υπολογιστούν οι ενεργειακές καταναλώσεις σε ένα cleanroom (μία ενεργειακή ζώνη) κατά τη διάρκεια ενός μέσου έτους. Η διαδικασία προσομοίωσης ξεκινάει λοιπόν μέσω των υποπρογραμμάτων IDF Editor και EP-Launch, του Energy Plus. Για να μπορέσει το EP-Launch να «τρέξει» την προσομοίωση, είναι απαραίτητο να δημιουργήσουμε ένα αρχείο idf όπου θα περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους του cleanroom και ένα αρχείο το οποίο θα περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικά αρχεία καιρικών δεδομένων για την πόλη της Αθήνας. Το αρχείο καιρού υπάρχει στο site της Energy Plus.

1) Ανοίγω αρχικά το IDF Editor για να προσδιορίσω τις παραμέτρους του θερμοδυναμικού συστήματος που θέλω να σχεδιάσω.
2) Αποθηκεύω το αρχείο .idf με όνομα: Vasilakos_pharmaceutical.idf
3) Ξεκινώ την καταχώρηση των παραμέτρων που επιθυμώ ανά κατηγορία (Group).



Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, τα στοιχεία που μπορεί να επεξεργαστεί ο χρήστης ανήκουν σε κλάσεις (Classes), οι οποίες ομαδοποιούνται σε ευρύτερες κατηγορίες (Groups). Πατώντας 'New Obj' , δημιουργείται μία νέα στήλη δεξιά από τα 'Units' στην κατηγορία 'Fields'. Ο χρήστης μπορεί να επέμβει στη στήλη των 'Obj' για την εκάστοτε κλάση. Αριστερά

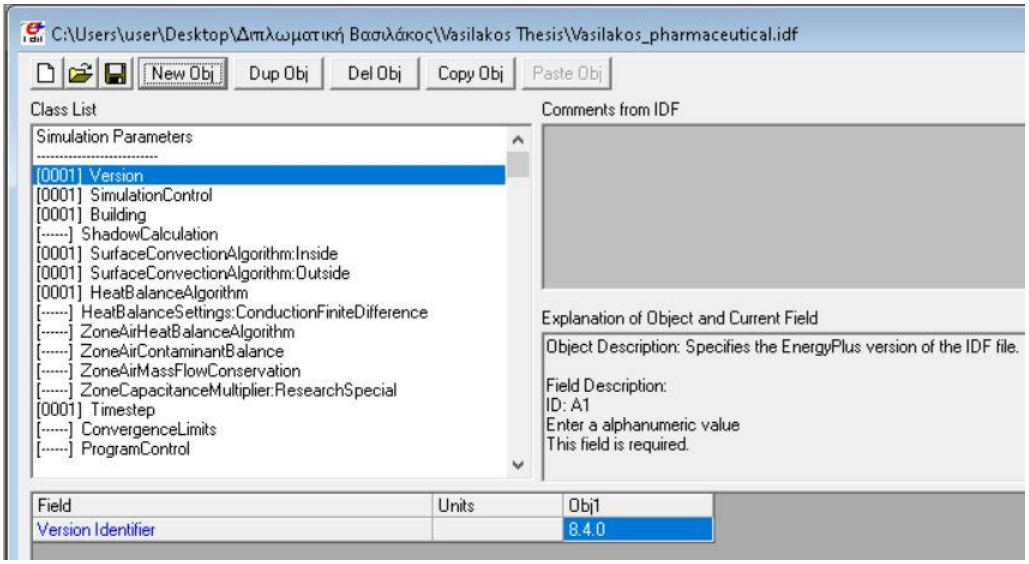
από κάθε κλάση αναγράφεται ο αριθμός των αντικειμένων που εμπεριέχει. Για παράδειγμα αν αριστερά αναγράφεται [------] σημαίνει ότι η συγκεκριμένη κλάση δεν έχει αντικείμενο (object).

8.2.1 Κατηγορία: Παράμετροι προσομοίωσης (Simulation Parameters)

Στην κατηγορία αυτή εισάγονται γενικά δεδομένα που σχετίζονται με τον τρόπο που θέλει ο χρήστης να προσεγγίσει την προσομοίωση του κτιρίου που μελετά.

8.2.1.1 Υποκατηγορία: Έκδοση (Version)

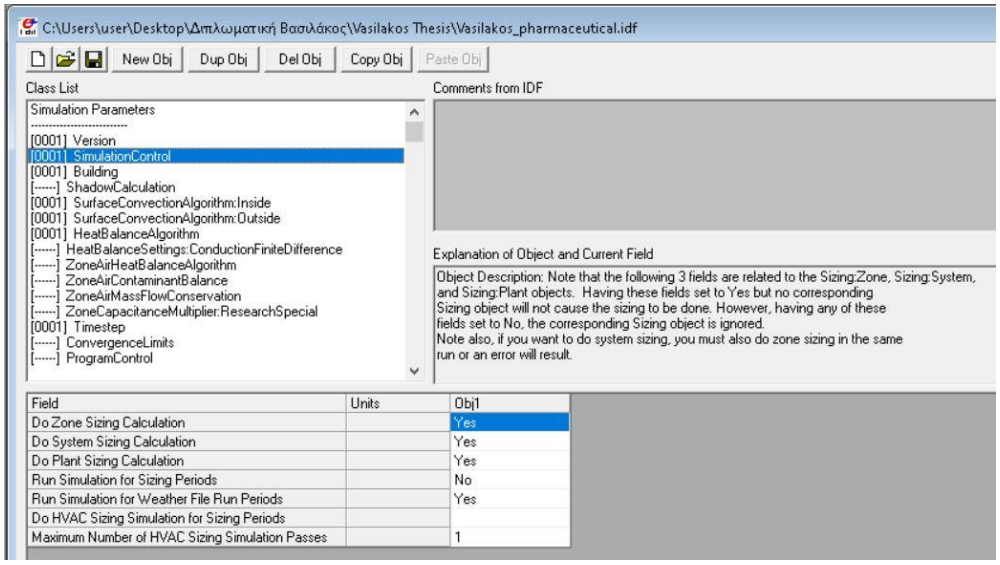
Στην υποκατηγορία **Version** αναφέρεται η έκδοση του Energy Plus η οποία χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη μελέτη είναι η **8.4.0**.



Εικόνα 45: Έκδοση Energy Plus

8.2.1.2 Υποκατηγορία: Έλεγχος προσομοίωσης (Simulation Control)

Στην υποκατηγορία **Simulation Control** καθορίζεται το είδος υπολογισμών που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση:

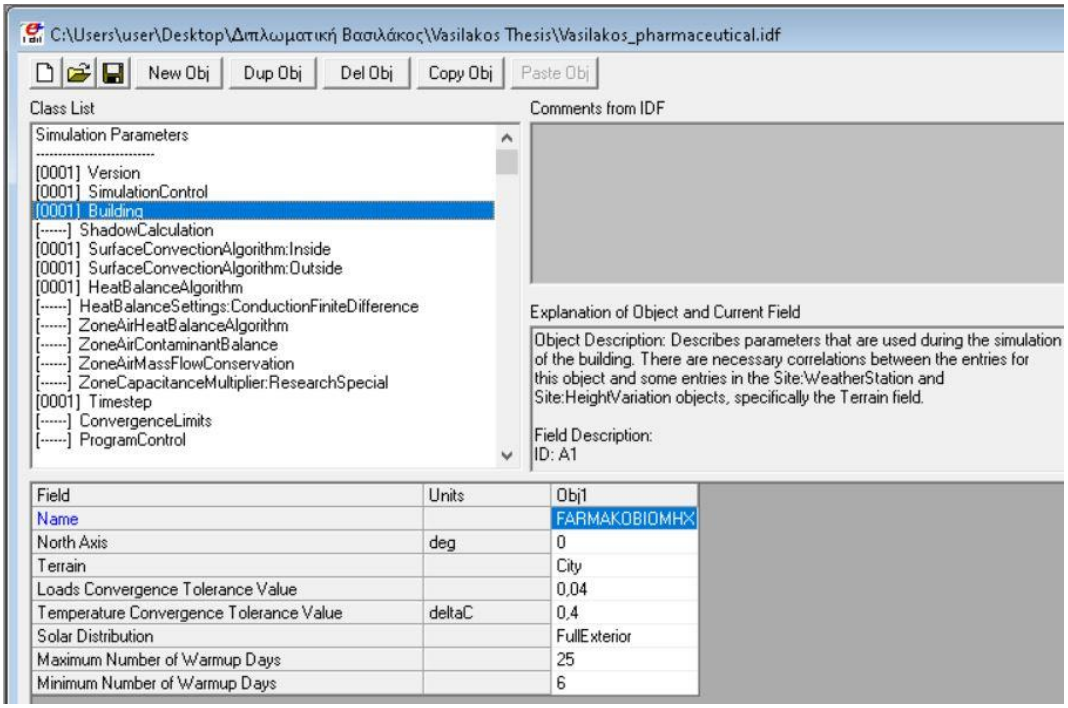


Εικόνα 46: Έλεγχος προσομοίωσης (Simulation Control)

- *Do Zone Sizing Calculation: Yes.* Η μέθοδος αυτή υπολογίζει θερμικά και ψυκτικά φορτία με βάση ένα ιδανικό θεωρητικό μοντέλο.
- *Do System Sizing Calculation: Yes.* Υπολογίζονται τα συνολικά θερμικά και ψυκτικά φορτία με βάση ένα απλοποιημένο μοντέλο.
- *Do Plant Sizing Calculation: Yes.* Υπολογισμός δυναμικότητας των συστημάτων θέρμανσης ψύξης.
- *Run Simulation for Sizing Periods: No.* Θα χρησιμοποιηθεί αρχείο καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του έτους και όχι πρότυπες μέρες.
- *Run Simulation for Weather File Run Periods: Yes.* Στη συνέχεια θα δηλωθούν περίοδοι του έτους για τις οποίες μας ενδιαφέρει η προσομοίωση. Οι καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του έτους θα ληφθούν από την ιστοσελίδα της Energy Plus για την περιοχή της Αθήνας ως αρχείο καιρού (weather file).

Ακολουθεί η υποκατηγορία ‘Building’.

8.2.1.3 Υποκατηγορία: Κτίριο (Building)

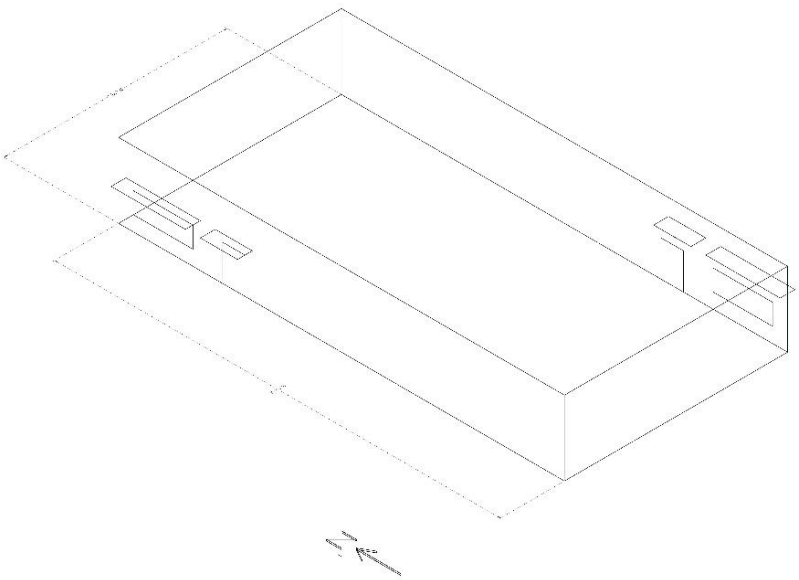


Εικόνα 47: Υποκατηγορία «Κτίριο» (Building)

Στην υποκατηγορία Building δηλώνεται το όνομα του κτιρίου ως ‘FARMAKOBIOMHXANIA’.

Δηλώνονται επίσης οι παρακάτω παράμετροι:

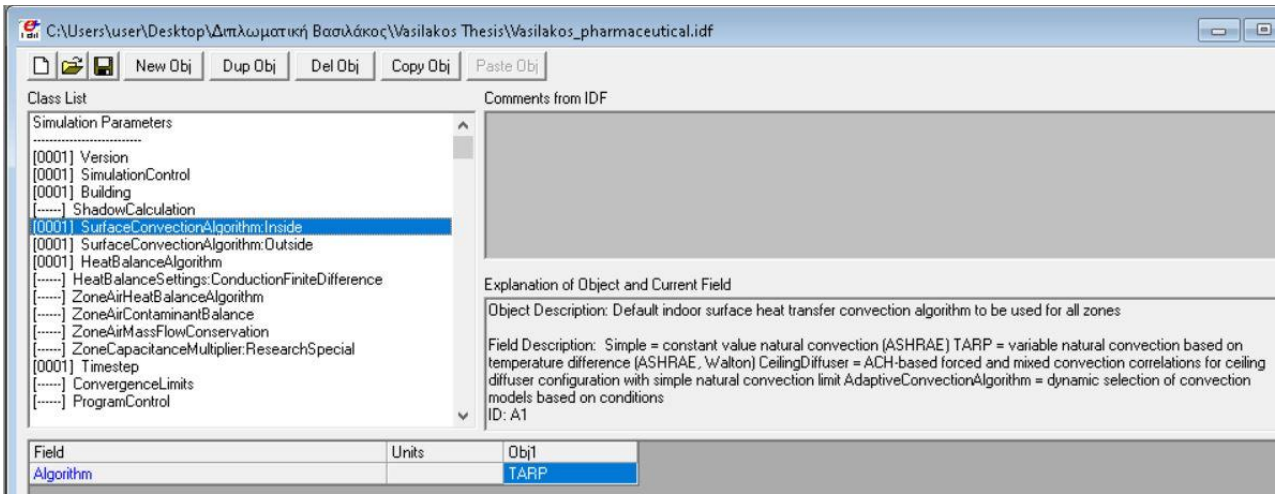
1. Προσανατολισμός κτιρίου ως προς το Βορρά σε μοίρες. Στην περίπτωσή μας 0° και το κτίριο έχει διαστάσεις 30 x 15 x 5 m όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 47: Μορφή κτιρίου και προσανατολισμός

2. Terrain: Ο τύπος περιοχής όπου είναι χτισμένο το κτίριο. Επελέγη ‘City’
3. Δείκτης σύγκλισης ανοχής φορτίων (Loads Convergence Tolerance Value): Από βιβλιογραφία βρέθηκε ότι η προεπιλεγμένη τιμή είναι ίση με 0,04.
4. Δείκτης σύγκλισης ανοχής θερμοκρασιών: Ομοίως βρέθηκε ότι η προεπιλεγμένη τιμή ισούται με 0,4.
5. Ηλιακή διανομή (Solar distribution): Δηλώνεται πού προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία. Επελέγη πλήρως το εξωτερικό του κτιρίου (Full Exterior).
6. Μέγιστος αριθμός ημερών προθέρμανσης: Επελέγη 25, καθώς το λογισμικό συνιστά τουλάχιστον 25 μέρες για την προθέρμανση του κτιρίου.
7. Ελάχιστος αριθμός προθέρμανσης: Επελέγη 6.

8.2.1.4 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος εσωτερικής επιφανειακής συναγωγής θερμότητας

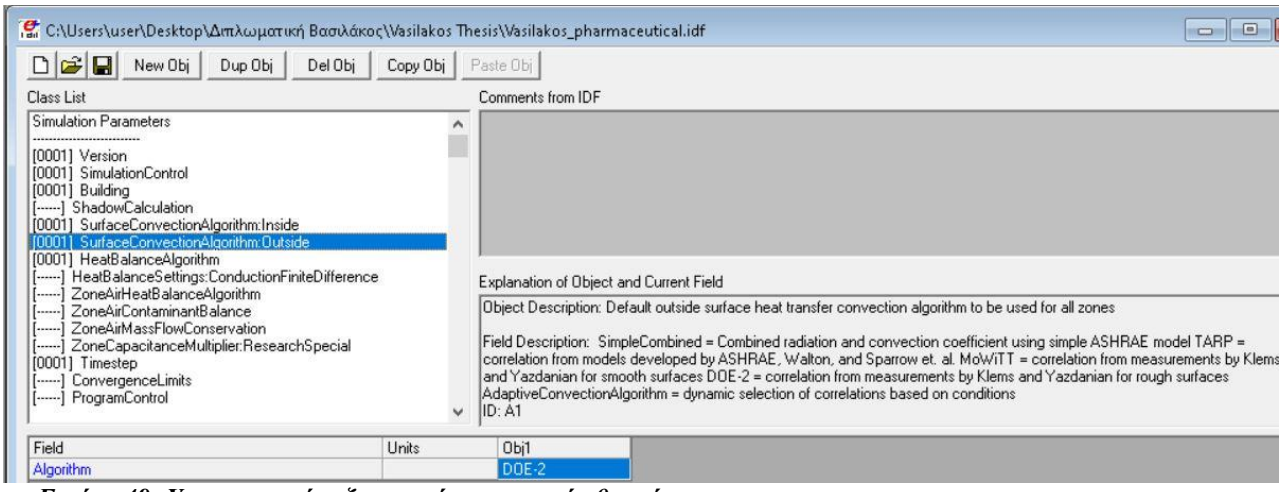


Εικόνα 48: Υποκατηγορία εσωτερικής συναγωγής θερμότητας

Στην υποκατηγορία αυτή επιλέγεται η μέθοδος με την οποία θα υπολογιστεί η θερμική ισορροπία λόγω αγωγής στο εσωτερικό του κτιρίου.

Επελέγη ο αλγόριθμος ‘TARP’ (Thermal Analysis Research Program) ο οποίος είναι συνήθης για θερμοδυναμικές αναλύσεις και ο προεπιλεγμένος για το λογισμικό. Το μοντέλο TARP συσχετίζει το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με τη διαφορά θερμοκρασίας για διάφορους προσανατολισμούς. Αυτό το μοντέλο βασίζεται σε πεχιράματα επίπεδης πλάκας.

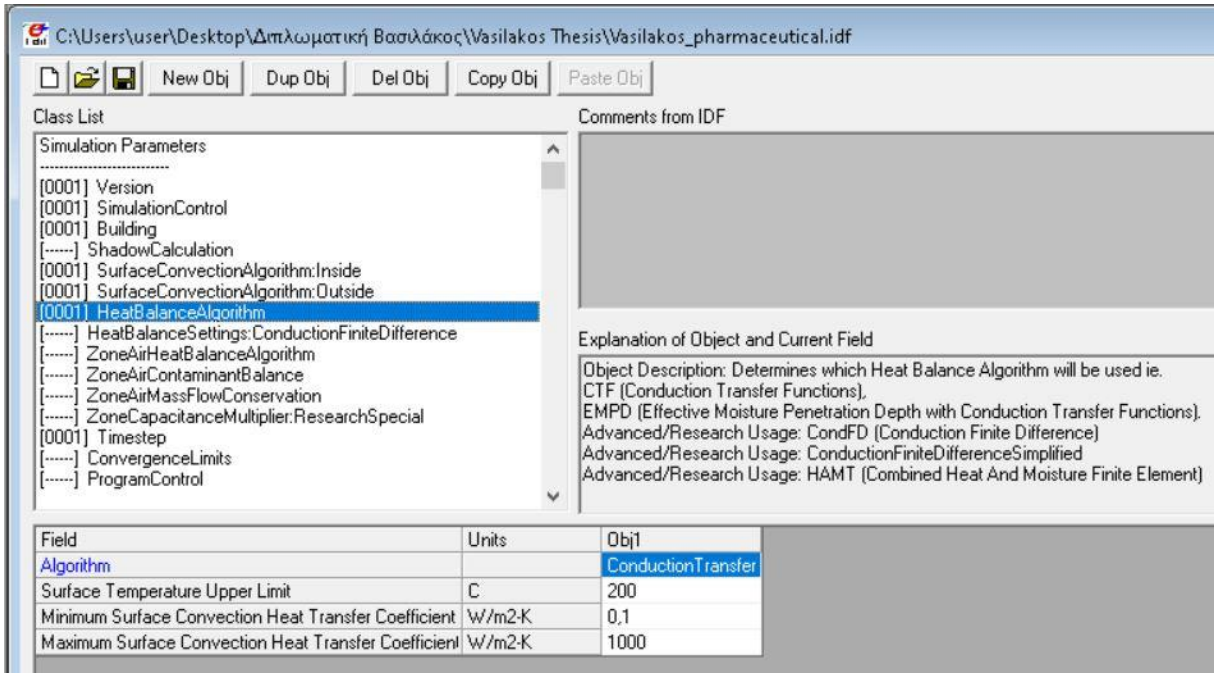
8.2.1.5 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος εξωτερικής συναγωγής θερμότητας



Εικόνα 49: Υποκατηγορία εξωτερικής συναγωγής θερμότητας

Ομοίως με την προηγούμενη κατηγορία, ωστόσο εδώ επελέγη η μέθοδος 'DOE-2', η οποία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη μοντελοποίηση της ηλιοφάνειας. Ο αλγόριθμος DOE-2 προέρχεται από μετρήσεις πεδίου και χρησιμοποιεί μια συσχέτιση από τις μετρήσεις των ερευνητών Klems και Yazdanian για τραχιές επιφάνειες.

8.2.1.6 Υποκατηγορία: Αλγόριθμος θερμικής ισορροπίας (Heat Balance Algorithm)

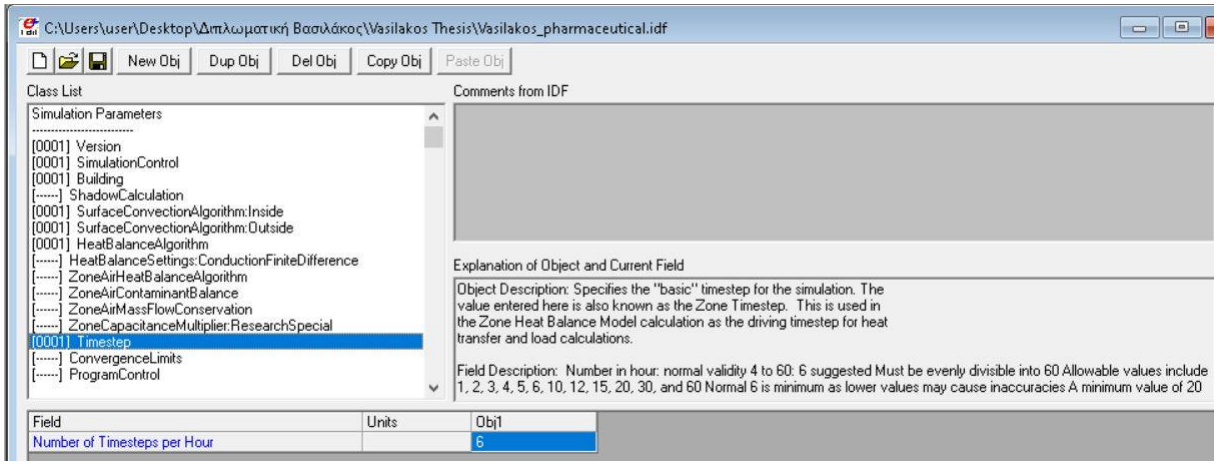


Εικόνα 50: Υποκατηγορία αλγορίθμου θερμικής ισορροπίας

Στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται οι εξής παράμετροι:

1. Ο αλγόριθμος θερμικής ισορροπίας που θα χρησιμοποιηθεί. Επελέγη ο CTF (Conduction Transfer Functions).
2. Ανώτατο όριο θερμοκρασίας επιφάνειας: Επιλέχθηκαν οι 200 ^{o}C (Προεπιλογή). Αυτό το πεδίο χρησιμοποιείται αν το πρόγραμμα αποτυγχάνει και μας υποδεικνύει σαν λάθος την θερμοκρασία σε κάποια επιφάνεια.
3. Συντελεστής ελάχιστης συναγωγής θερμότητας: 0,1 W/m2·K (Προεπιλογή).
4. Συντελεστής μέγιστης συναγωγής θερμότητας: 1000 W/m2·K (Προεπιλογή).

8.2.1.7 Υποκατηγορία: Χρονικά βήματα (Timestep)



Εικόνα 51: Υποκατηγορία βημάτων χρόνου

Στο λογισμικό είναι προεπιλεγμένη η τιμή 6. Με λίγα λόγια είναι ο αριθμός των επαναλήψεων των υπολογισμών που θα πραγματοποιηθούν ανά ώρα για τον αλγόριθμο θερμικής ισορροπίας που έχει επιλεγεί. Συνεπώς το χρονικό βήμα βάσει του οποίου θα γίνουν οι υπολογισμοί μεταφοράς της θερμότητας και των φορτίων ισούται με 60/6 = 10 λεπτά.

8.2.2 Κατηγορία: Περιοχή και κλίμα (Location and Climate)

Αυτή η ομάδα αντικειμένων περιγράφει τις συνθήκες περιβάλλοντος για την προσομοίωση με βάση την τοποθεσία του κτιρίου.

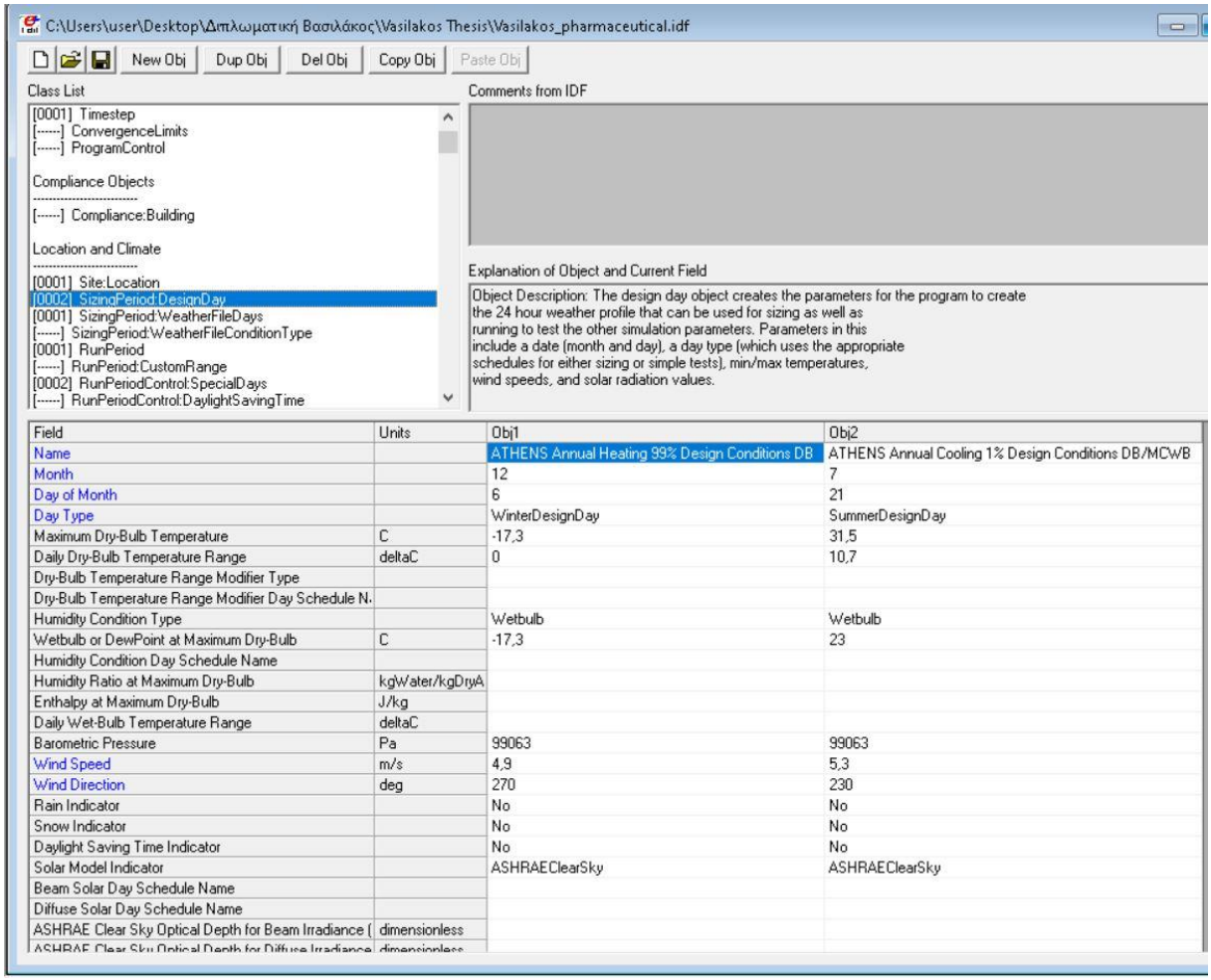
8.2.2.1 Υποκατηγορία: Τοποθεσία κτιρίου (Site Location)

Οι παράμετροι που εισήχθησαν στην υποκατηγορία αυτή είναι οι παρακάτω:

- Όνομα περιοχής: ‘ATHINA’
- Γεωγραφικό πλάτος: 37,58^{o}
- Γεωγραφικό μήκος: 23,43^{o}
- Ζώνη ώρας: -2

- Ανύψωση από έδαφος: 0 m

8.2.2.2 Υποκατηγορία: Περίοδος διαστασιολόγησης: Πρότυπη μέρα (Sizing Period: Design Day)

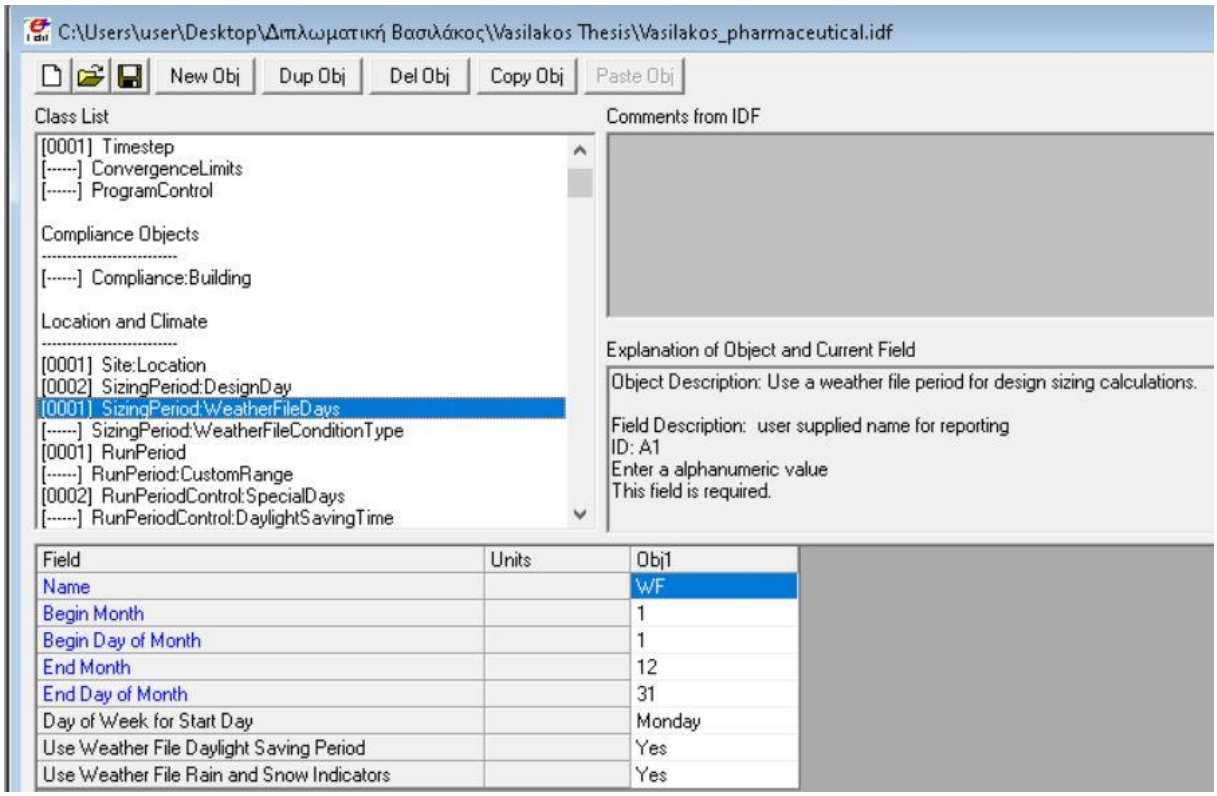


Field	Units	Obj1	Obj2
Name		ATHENS Annual Heating 99% Design Conditions DB	ATHENS Annual Cooling 1% Design Conditions DB/MCWB
Month		12	7
Day of Month		6	21
Day Type		WinterDesignDay	SummerDesignDay
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	-17,3	31,5
Daily Dry-Bulb Temperature Range	deltaC	0	10,7
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type			
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Day Schedule N			
Humidity Condition Type		Wetbulb	Wetbulb
Wetbulb or DewPoint at Maximum Dry-Bulb	C	-17,3	23
Humidity Condition Day Schedule Name			
Humidity Ratio at Maximum Dry-Bulb	kgWater/kgDryA		
Enthalpy at Maximum Dry-Bulb	J/kg		
Daily Wet-Bulb Temperature Range	deltaC		
Barometric Pressure	Pa	99063	99063
Wind Speed	m/s	4,9	5,3
Wind Direction	deg	270	230
Rain Indicator		No	No
Snow Indicator		No	No
Daylight Saving Time Indicator		No	No
Solar Model Indicator		ASHRAEClearSky	ASHRAEClearSky
Beam Solar Day Schedule Name			
Diffuse Solar Day Schedule Name			
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Beam Irradiance (	dimensionless		
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Diffuse Irradiance	dimensionless		

Εικόνα 52: Καθορισμός ημερών αναφοράς για χειμώνα και καλοκαίρι

Στην υποκατηγορία αυτή πρέπει να καθοριστούν δύο πρότυπες μέρες, μία θερμή και μία ψυχρή, με βάση τις οποίες θα υπολογιστούν τα ψυκτικά και θερμικά φορτία αντίστοιχα. Για το χειμώνα, ως αντιπροσωπευτική ημέρα επιλέχτηκε η 6^{η} Δεκέμβρη, ενώ για το καλοκαίρι επιλέχτηκε η 21^{η} Ιουλίου. Οι υπόλοιπες επιλογές είναι προεπιλεγμένες.

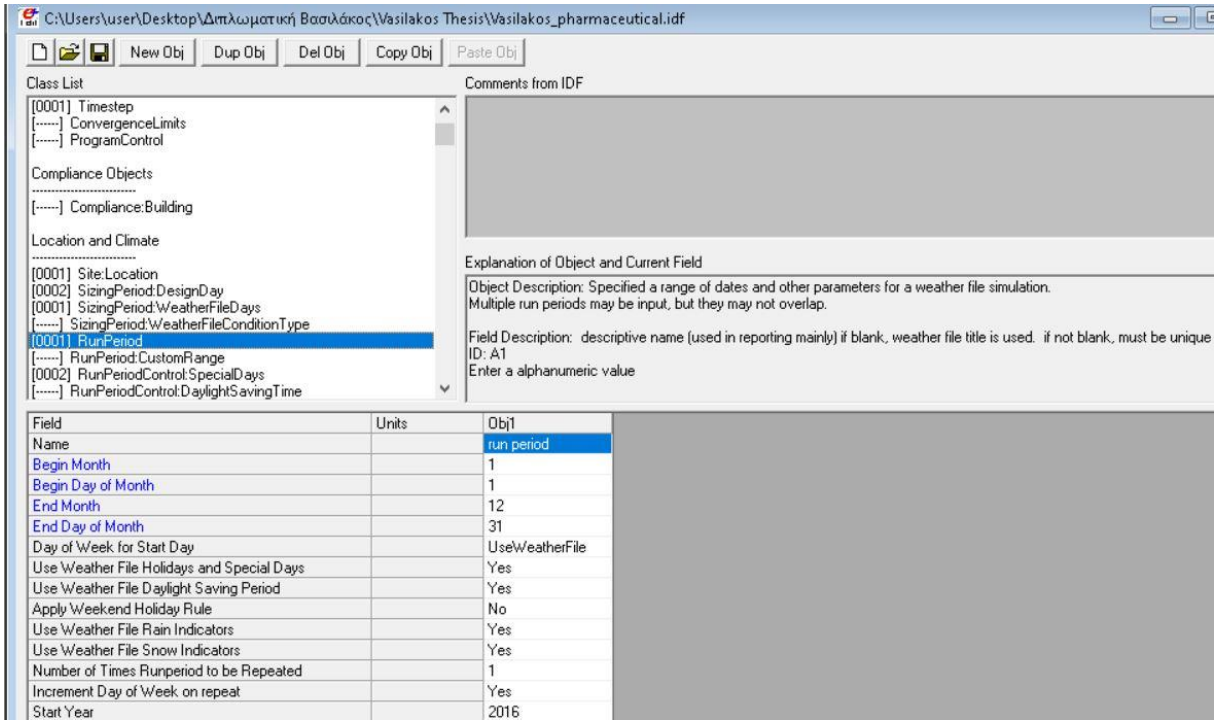
8.2.2.3 Υποκατηγορία: Περίοδος διαστασιολόγησης: Ημέρες από αρχείο καιρού (Sizing Period: Weather File Days)



Εικόνα 53: Παράμετροι ημερών και μηνών κάθε έτους

Στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται κάποιες παράμετροι για τις ημέρες του χρόνου του για το αρχείο καιρού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωσή μας οι επιλογές είναι αυτονόητες.

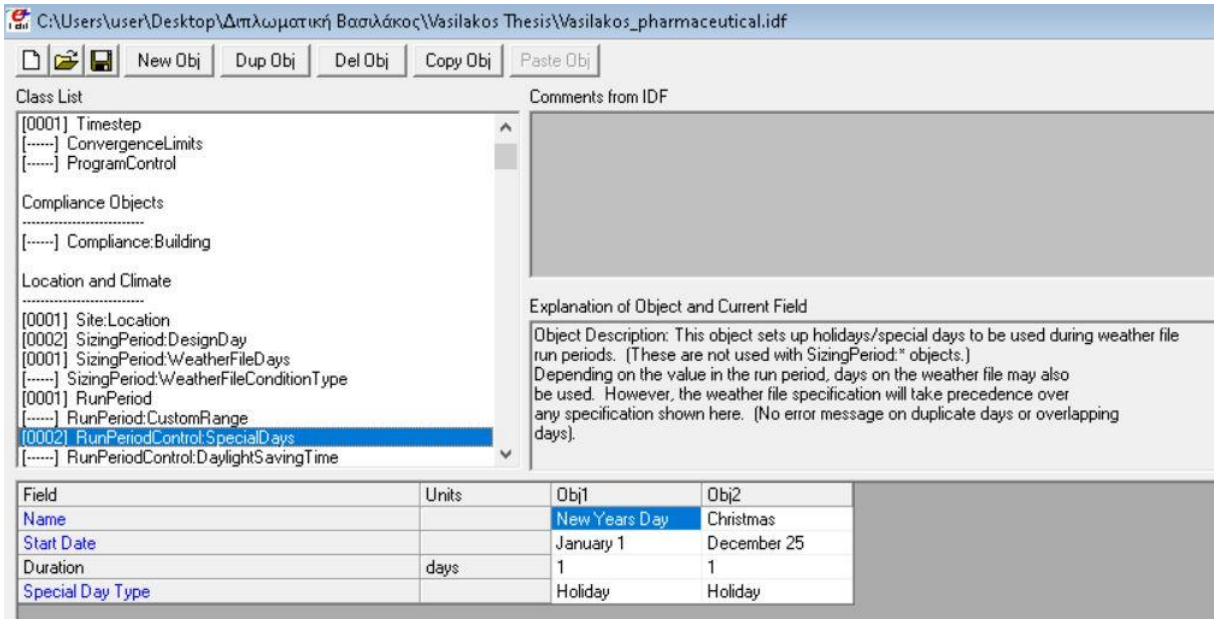
8.2.2.4 Υποκατηγορία: Περίοδος εκτέλεσης (Run Period)



Εικόνα 54: Περίοδος εκτέλεσης (Run Period)

Όπως φαίνεται στην εικόνα παραπάνω, στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται πάλι παράμετροι ημερών του χρόνου, από τις οποίες θα συλλέξει καιρικά δεδομένα ο αλγόριθμος. Ωστόσο οι επιλογές αυτές δε δρουν σημαντικά στην προσομοίωση.

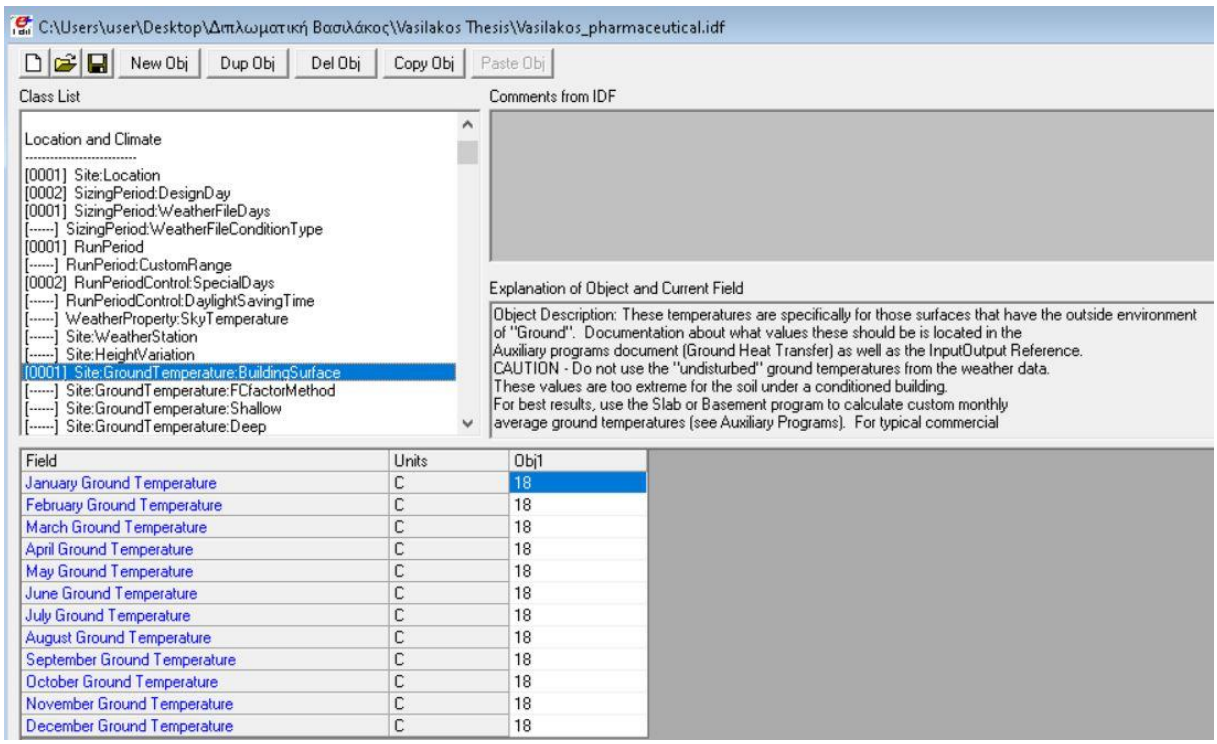
8.2.2.5 Υποκατηγορία: Έλεγχος περιόδου εκτέλεσης: Ειδικές μέρες (Run Period Control: Special days)



Εικόνα 55: Ειδικές μέρες (Πρωτοχρονιά, Χριστούγεννα)

Ομοίως με την προηγούμενη κατηγορία, εδώ προστίθενται λεπτομέρειες για τις ειδικές μέρες του χρόνου όπως για παράδειγμα της Πρωτοχρονιάς και των Χριστουγέννων.

8.2.2.6 Θερμοκρασία δαπέδου κτιρίου (Site Ground Temperature: Building Surface)



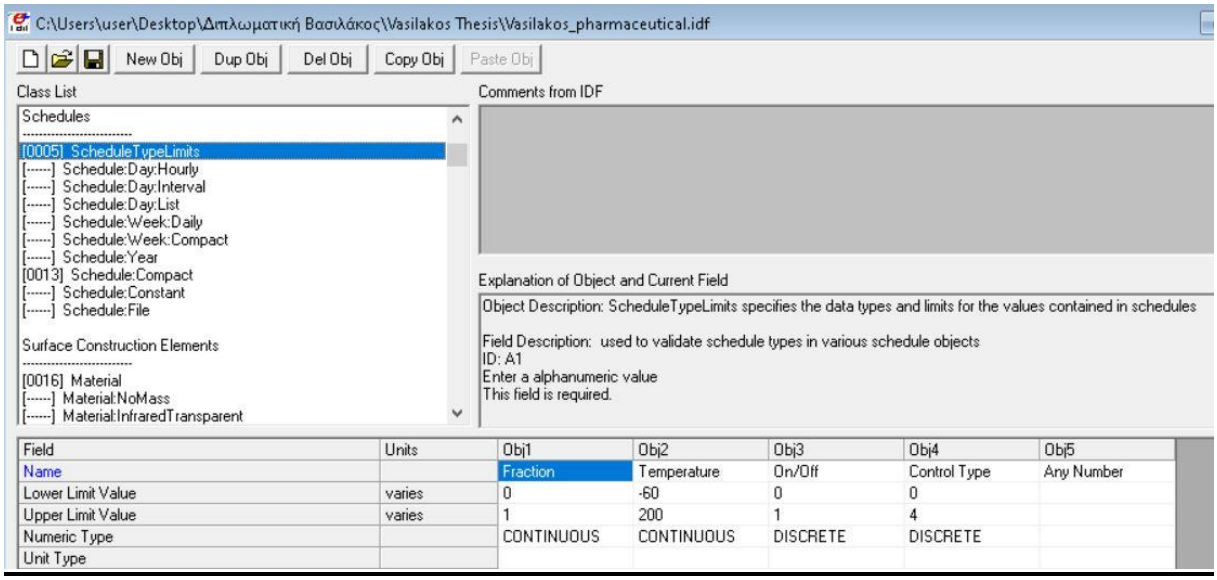
Εικόνα 56: Θερμοκρασία δαπέδου κτιρίου

Στην υποκατηγορία αυτή η προεπιλεγμένη τιμή θερμοκρασίας δαπέδου ισούται για κάθε μήνα με 18°C.

8.2.3 Κατηγορία: Προγραμματισμοί (Schedules)

Σε αυτή την κατηγορία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τον προγραμματισμό πολλών παραμέτρων όπως την πυκνότητα απασχόλησης του χώρου, το φωτισμό, τον έλεγχο των θερμοστατών, τη δραστηριότητα των ανθρώπων εντός του κτιρίου και άλλα. Επιπροσθέτως μπορεί να καθοριστεί η επισκίαση του κτιρίου.

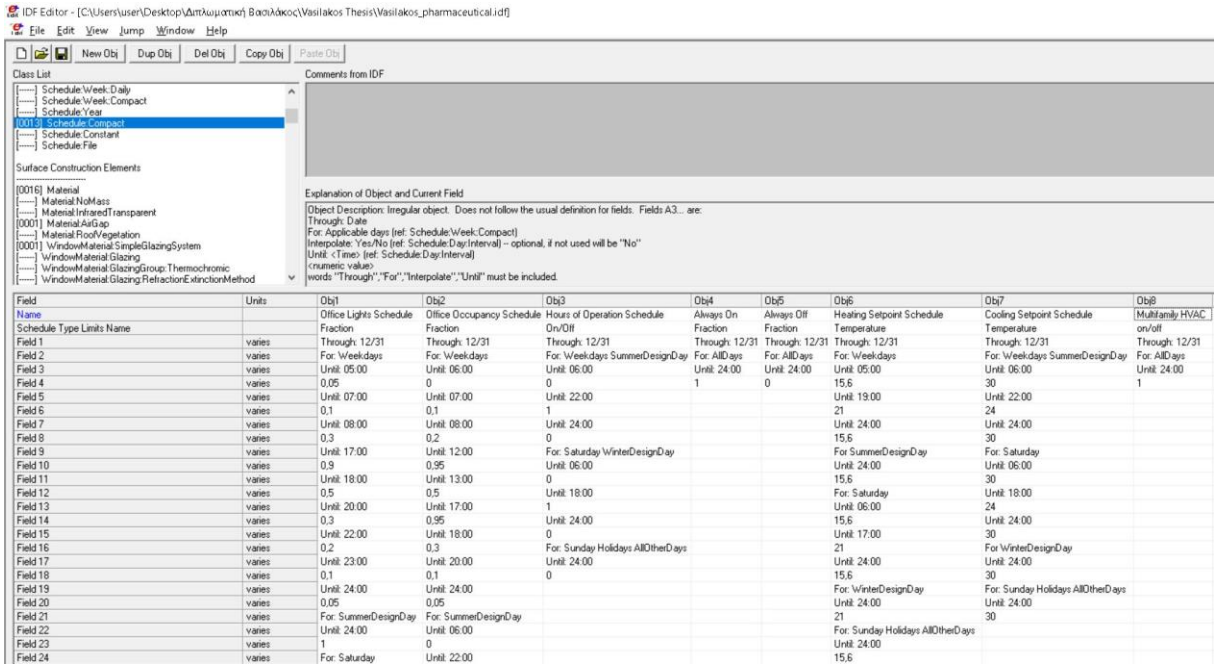
8.2.3.1 Υποκατηγορία: Τύποι και όρια προγραμμάτων (Schedule Type Limits)



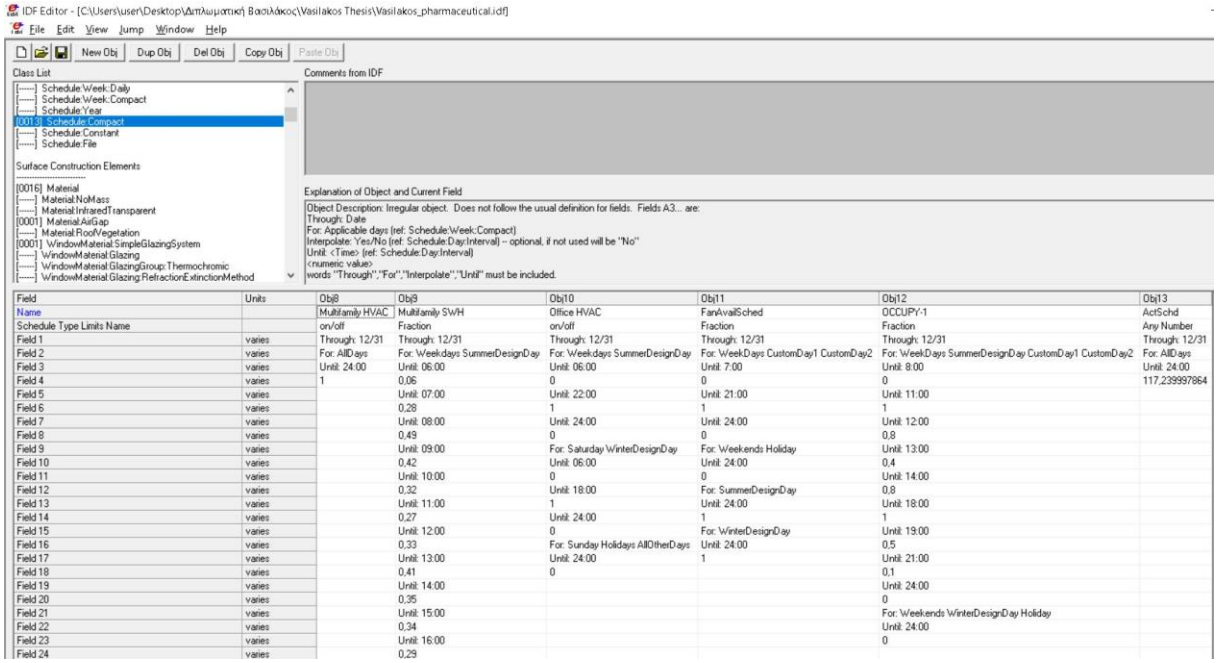
Εικόνα 57: Όρια προγραμματισμών (Schedule Type Limits)

Οι ρυθμίσεις στην υποκατηγορία αυτή χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της επόμενης υποκατηγορίας.

8.2.3.2 Υποκατηγορία: Schedules: Compact



Εικόνα 58: Καθορισμός προγραμμάτων λειτουργίας και απασχόλησης (1)



Εικόνα 59: Καθορισμός προγραμμάτων και απασχόλησης (2)

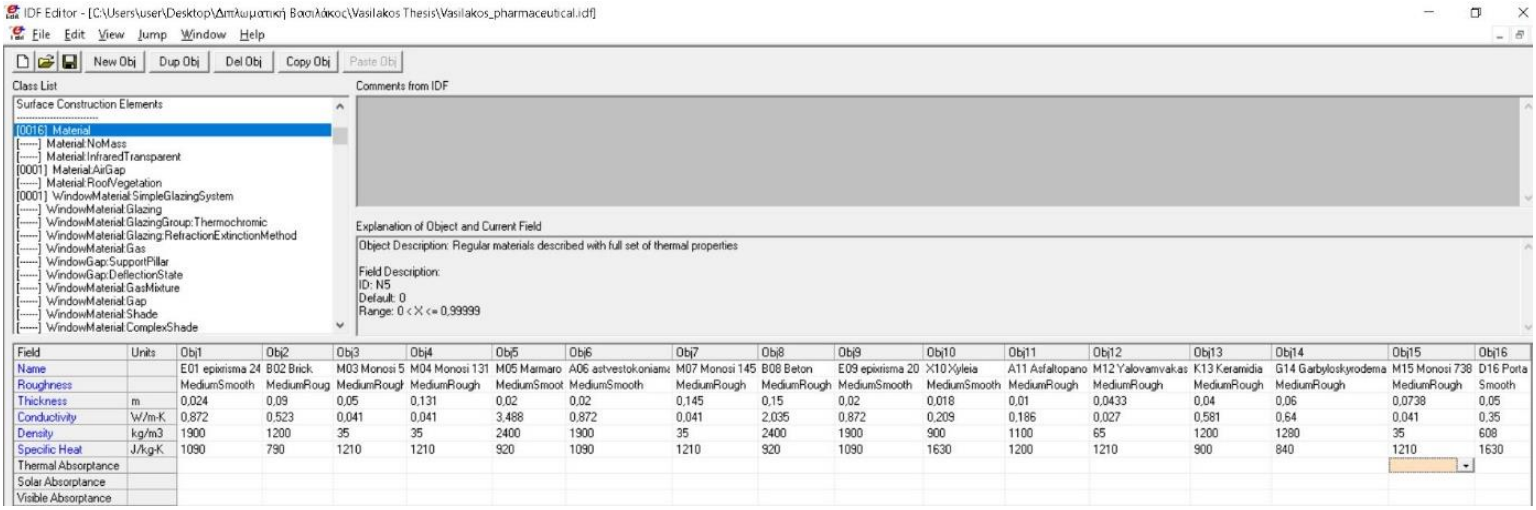
Στην υποκατηγορία αυτή καταχωρούνται με δείκτες οι εξής παράμετροι:

- Η λειτουργία του φωτισμού της φαρμακοβιομηχανίας
- Η απασχόληση του εργατικού προσωπικού
- Οι ώρες λειτουργίας του εξοπλισμού της βιομηχανίας
- Οι θερμοκρασίες ρύθμισης της θέρμανσης και ψύξης, προκειμένου να διατηρηθεί η θερμοκρασία όσο το δυνατόν πιο σταθερή στην τιμή των 20-25 ^{o}C
- Η ένταση λειτουργίας του αερισμού

8.2.4 Κατηγορία: Υλικά κατασκευής επιφανειών (Surface Construction Elements)

Στην κατηγορία αυτή, κάθε object περιγράφει τις φυσικές ιδιότητες των στοιχείων του κτιρίου όπως για παράδειγμα για τους τοίχους, οροφές, δάπεδα, παράθυρα, πόρτες και άλλα.

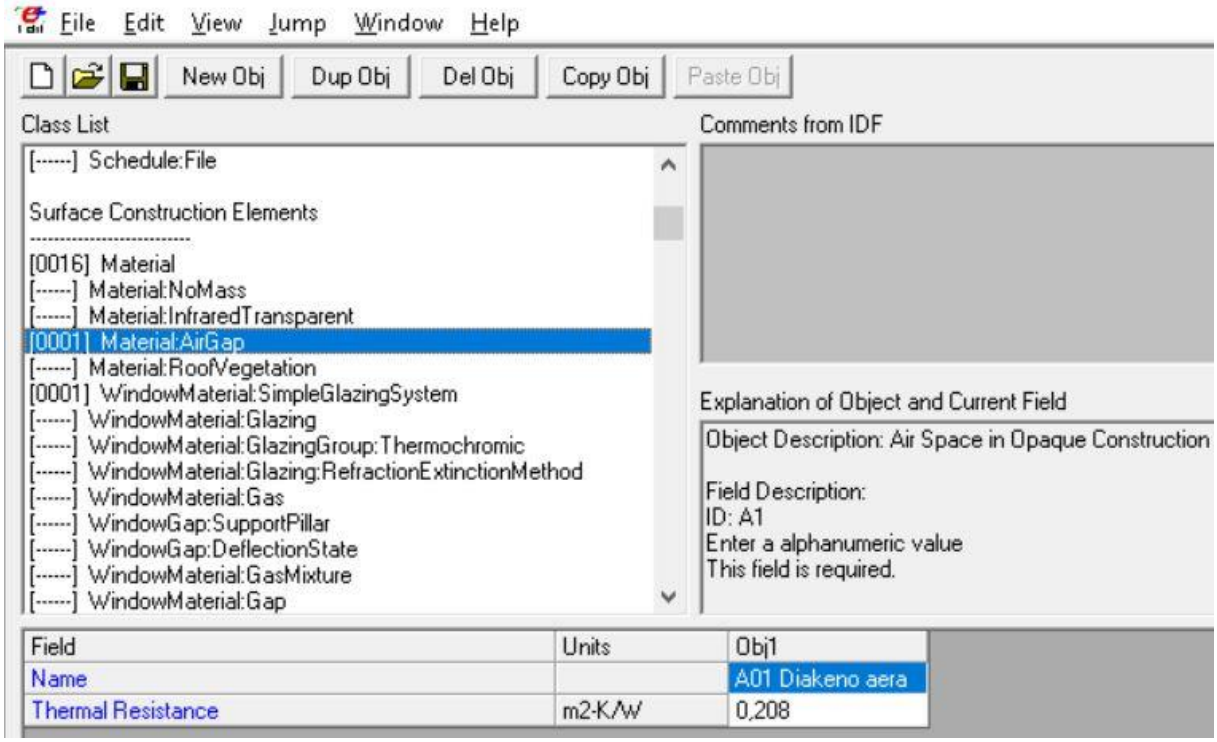
8.2.4.1 Υποκατηγορία: Υλικά (Materials)



Εικόνα 60: Δομικά υλικά και ιδιότητες

Όπως φαίνεται παραπάνω, στην υποκατηγορία αυτή καταχωρούνται τα δομικά υλικά των τοίχων της βιομηχανίας μαζί με τις μονώσεις τους. Οι ιδιότητες των υλικών είναι ευρέως διαδεδομένες στο διαδίκτυο.

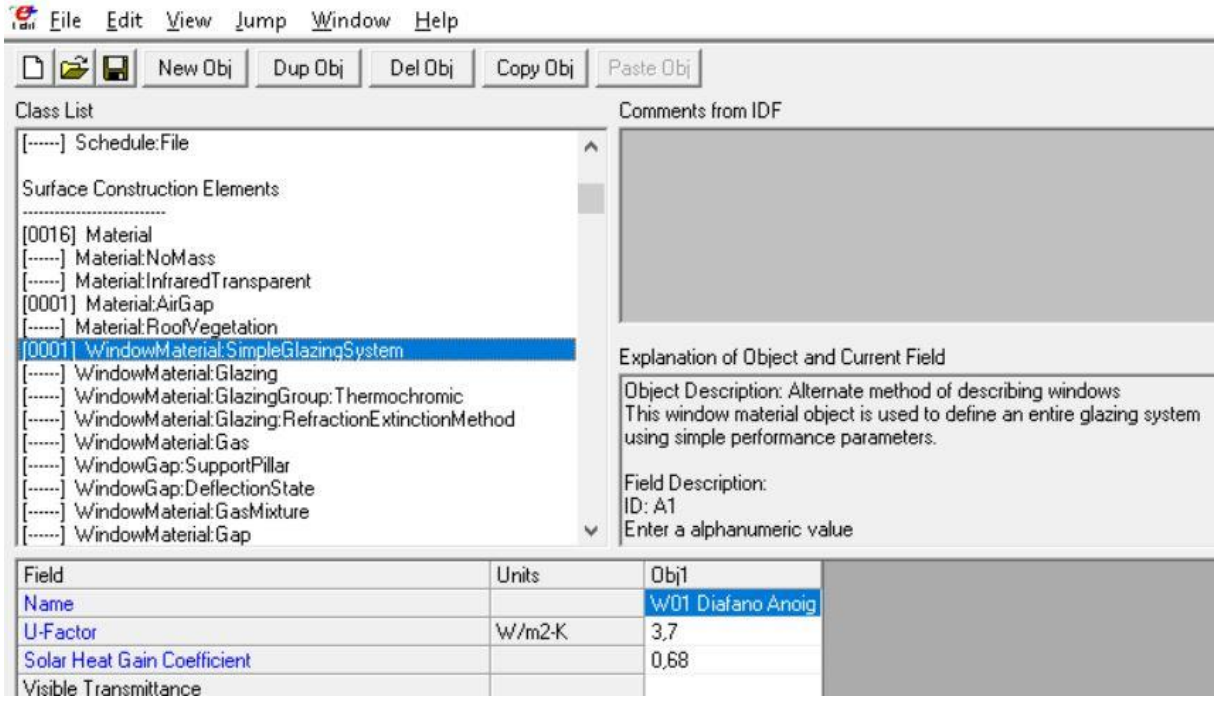
8.2.4.2 Υποκατηγορία: Υλικά: Διάκενο αέρα (Air Gap)



Εικόνα 61: Διάκενο αέρα

Στην υποκατηγορία αυτή δίνεται η θερμομονωτική ικανότητα του διάκενου που υπάρχει ανάμεσα από τους δύο υαλοπίνακες των παραθύρων.

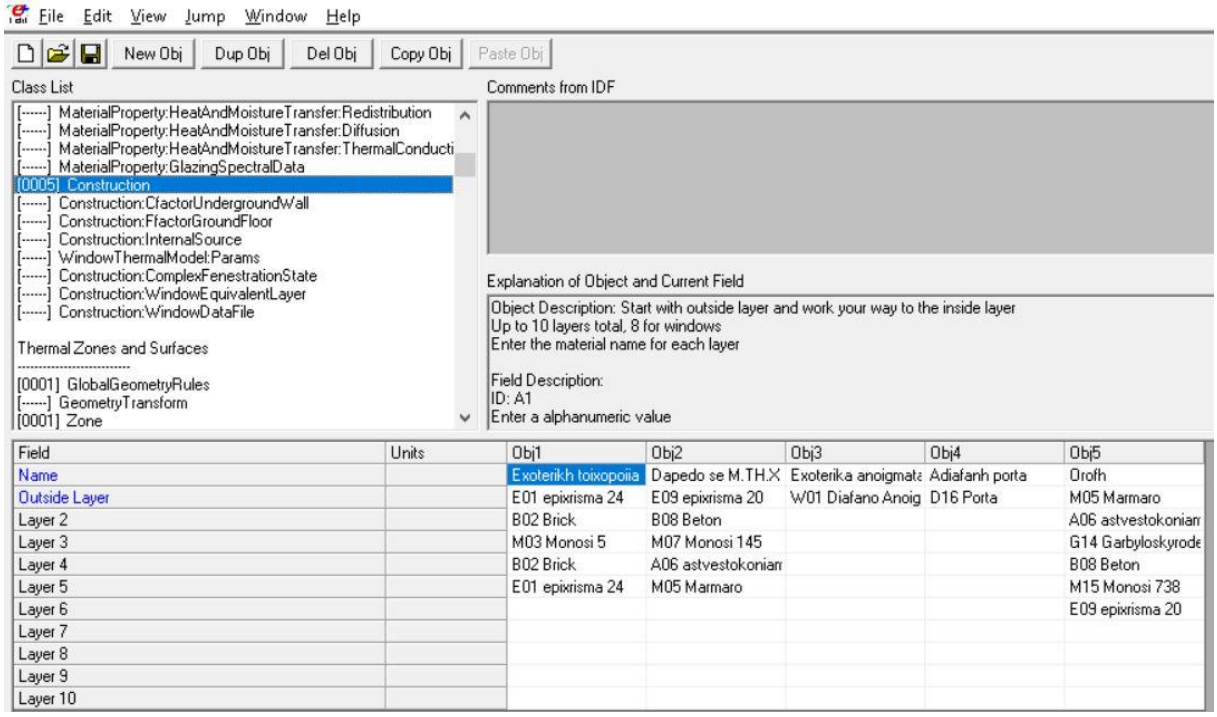
8.2.4.3 Υποκατηγορία: Υλικά υαλοπινάκων (Window Material: Simple glazing system)



Εικόνα 62: Υαλοπίνακες

Εδώ καταχωρείται ο συντελεστής U και ο συντελεστής θερμικού κέρδους λόγω ηλιοφάνειας.

8.2.4.4 Υποκατηγορία: Κατασκευή

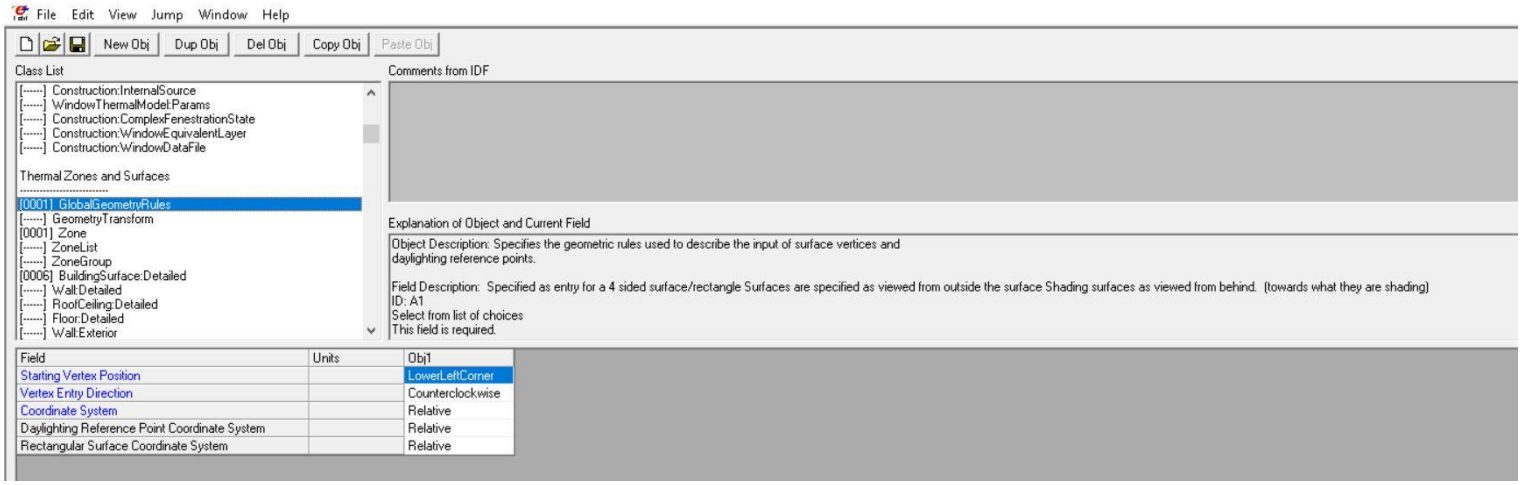


Εικόνα 63: Υλικά επιστρώσεων

Στην υποκατηγορία αυτή, ο χρήστης καθορίζει το υλικό κάθε επίστρωσης για τους τοίχους, το δάπεδο, τα εξωτερικά ανοίγματα, τους υαλοπίνακες και την οροφή, από το εξωτερικό τους προχωρώντας στο εσωτερικό τους.

8.2.5 Κατηγορία: Θερμικές ζώνες και επιφάνειες (Thermal Zones and Surfaces)

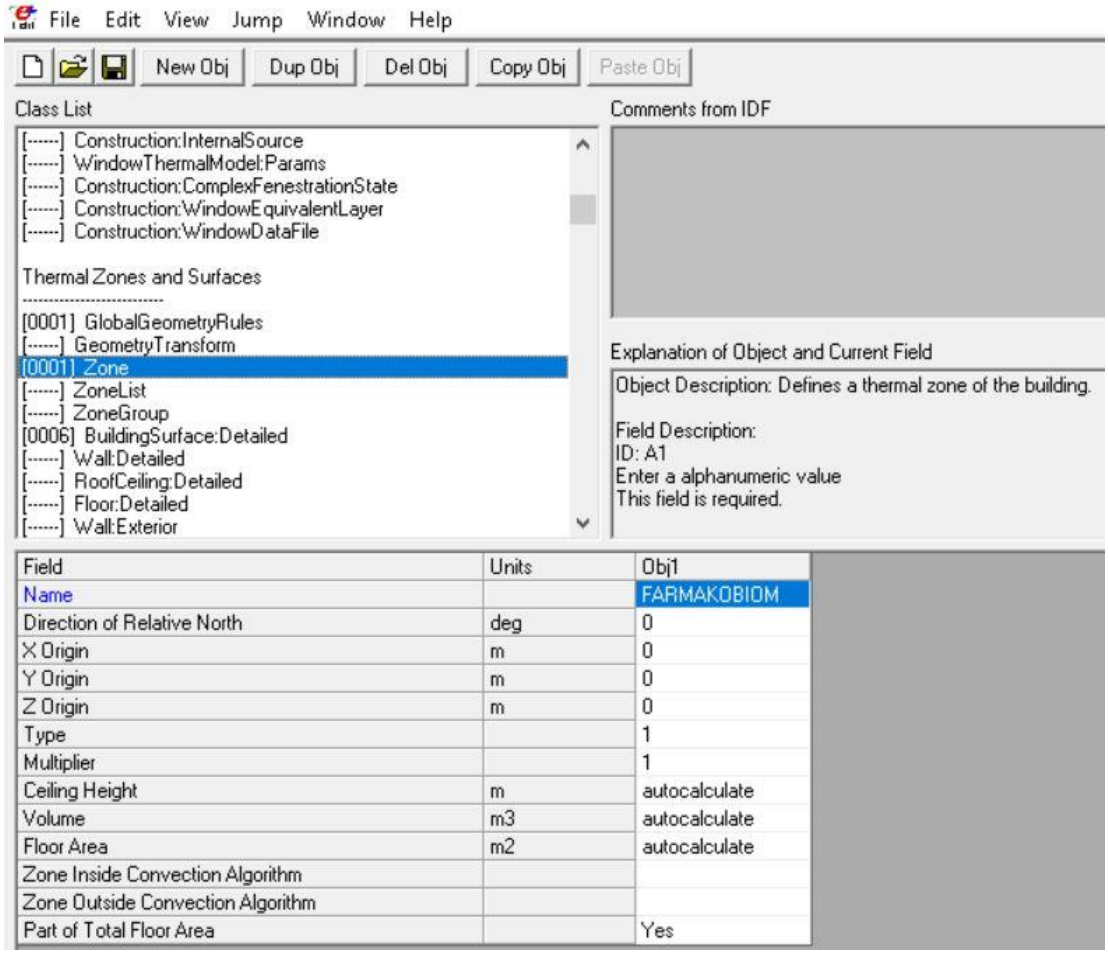
8.2.5.1 Υποκατηγορία: Γεωμετρικές παραδοχές (Global Geometry Rules)



Εικόνα 64: Γεωμετρικές παραδοχές

Στις γεωμετρικές παραδοχές καθορίζονται οι διευθύνσεις και φορές των μοναδιαίων διανυσμάτων του καρτεσιανού συστήματος που θα χρησιμοποιηθούν για τη διαστασιολόγηση του κτιρίου και άλλων παραμέτρων.

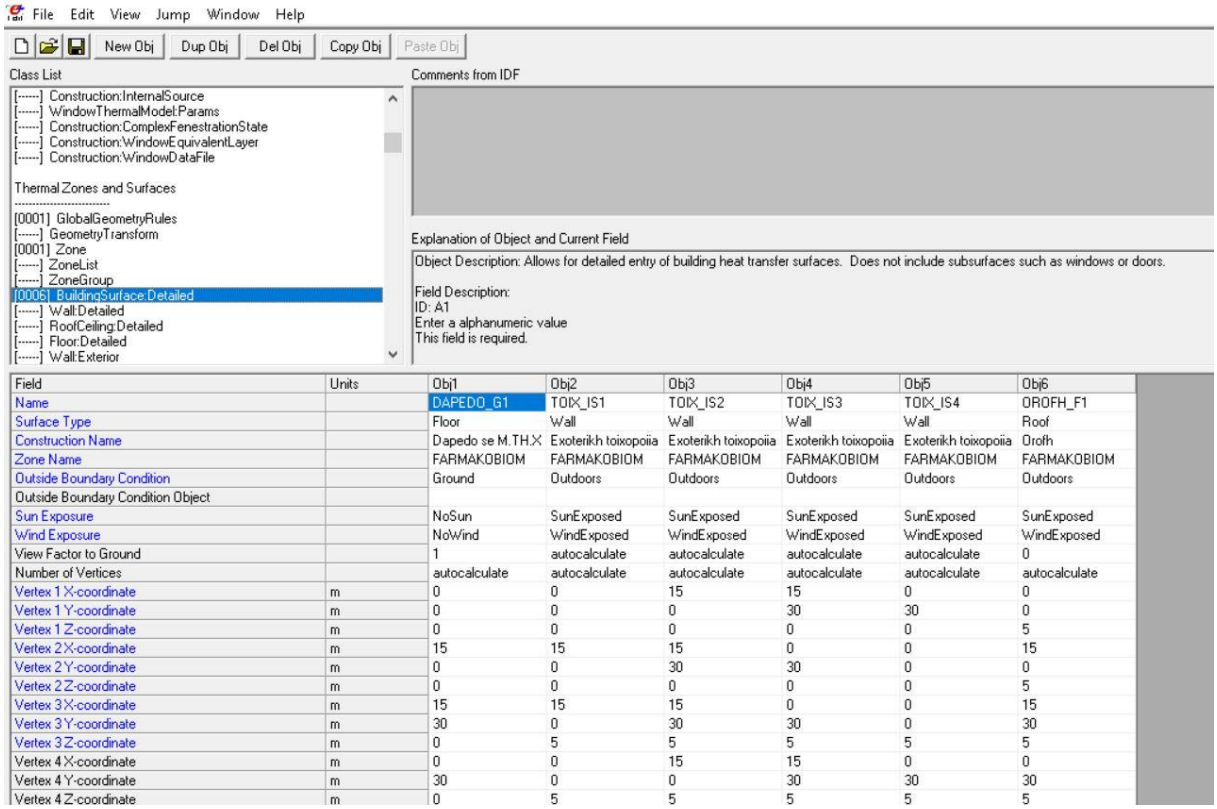
8.2.5.2 Υποκατηγορία: Θερμική ζώνη (Zone)



Εικόνα 65: Παράμετροι θερμικής ζώνης

Η διαστασιολόγηση της θερμικής ζώνης είναι περιττή, καθώς μπορεί να γίνει αυτόματα από το EnergyPlus μέσω των διαστάσεων του κτιρίου. Φυσικά αν επιθυμούσαμε άλλες διαστάσεις, θα μπορούσαμε να τις καθορίσουμε στην υποκατηγορία αυτή.

8.2.5.3 Υποκατηγορία: Επιφάνειες κτιρίου αναλυτικά (Building Surface Detailed)

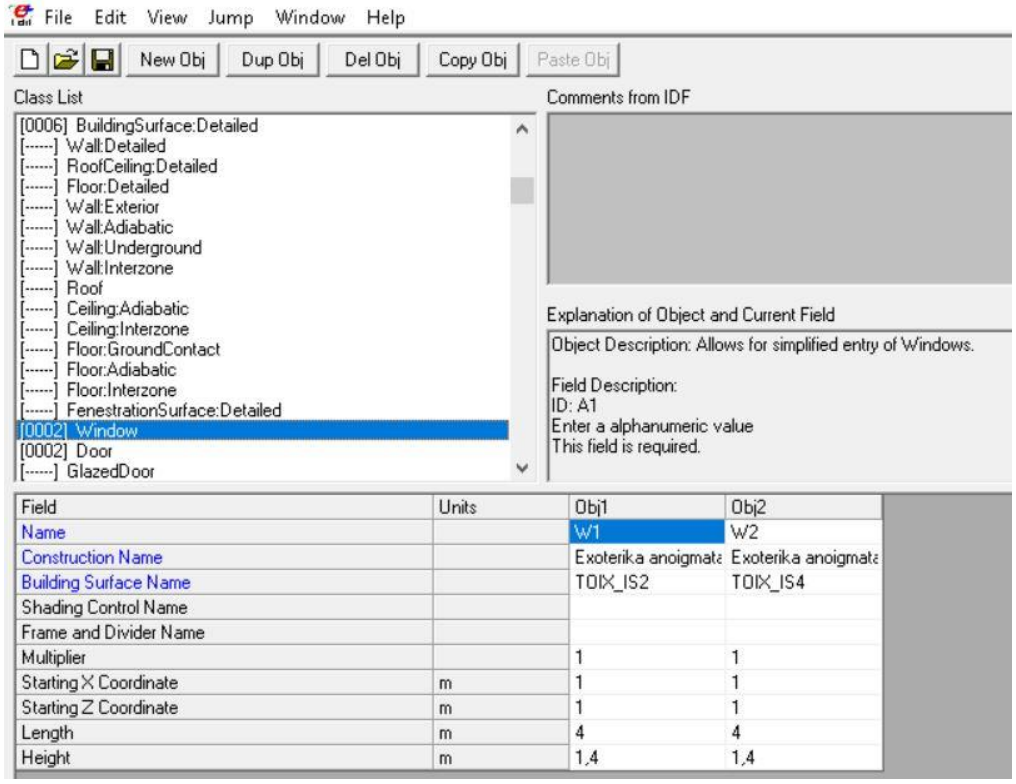


Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		DAPEDO_G1	TOIX_IS1	TOIX_IS2	TOIX_IS3	TOIX_IS4	OROFH_F1
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof
Construction Name		Dapedo se M.TH.X	Exoterikh toixopoiia	Exoterikh toixopoiia	Exoterikh toixopoiia	Exoterikh toixopoiia	Orofh
Zone Name		FARMAKOBIOM	FARMAKOBIOM	FARMAKOBIOM	FARMAKOBIOM	FARMAKOBIOM	FARMAKOBIOM
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground		1	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	0
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	0	0	15	15	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0	0	30	30	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	5
Vertex 2 X-coordinate	m	15	15	15	0	0	15
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	30	30	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	5
Vertex 3 X-coordinate	m	15	15	15	0	0	15
Vertex 3 Y-coordinate	m	30	0	30	30	0	30
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	5	5	5	5	5
Vertex 4 X-coordinate	m	0	0	15	15	0	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	30	0	0	30	30	30
Vertex 4 Z-coordinate	m	0	5	5	5	5	5

Εικόνα 66: Επιφάνειες κτιρίου

Εδώ γίνεται η διαστασιολόγηση των τοίχων και του δαπέδου του κτιρίου καθώς και ο καθορισμός του αν είναι εκτεθειμένες στον ήλιο ή όχι. Όπως φαίνεται από την εικόνα παραπάνω, η βιομηχανία έχει διαστάσεις 30x15x5 m.

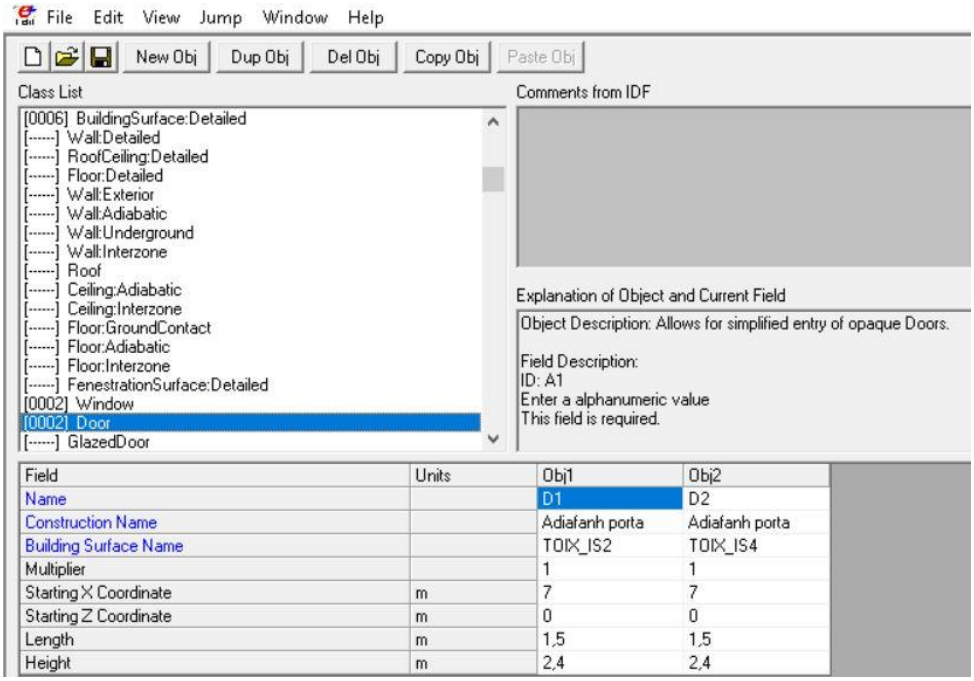
8.2.5.4 Υποκατηγορία: Παράθυρα (Windows)



Εικόνα 67: Παράθυρα κτιρίου

Εδώ καθορίζονται οι διαστάσεις των παραθύρων που ισούνται με 4 x 1,4.

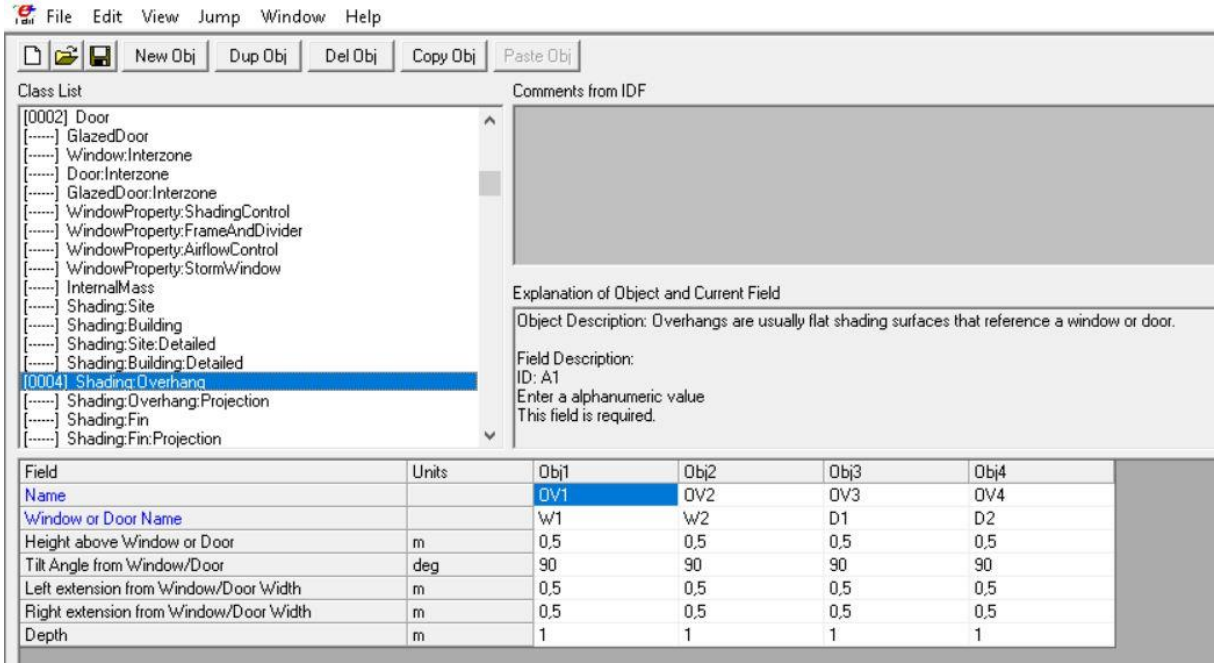
8.2.5.5 Υποκατηγορία: Πόρτες (Doors)



Εικόνα 68: Διαστάσεις πορτών

Ομοίως εδώ καθορίζονται οι διαστάσεις των πορτών που ισούνται με 1,5 x 2,4 m.

8.2.5.6 Υποκατηγορία: Σκιάσεις λόγω προεξοχών (Shading: Overhang)



Εικόνα 69: Σκιάσεις λόγω προεξοχών

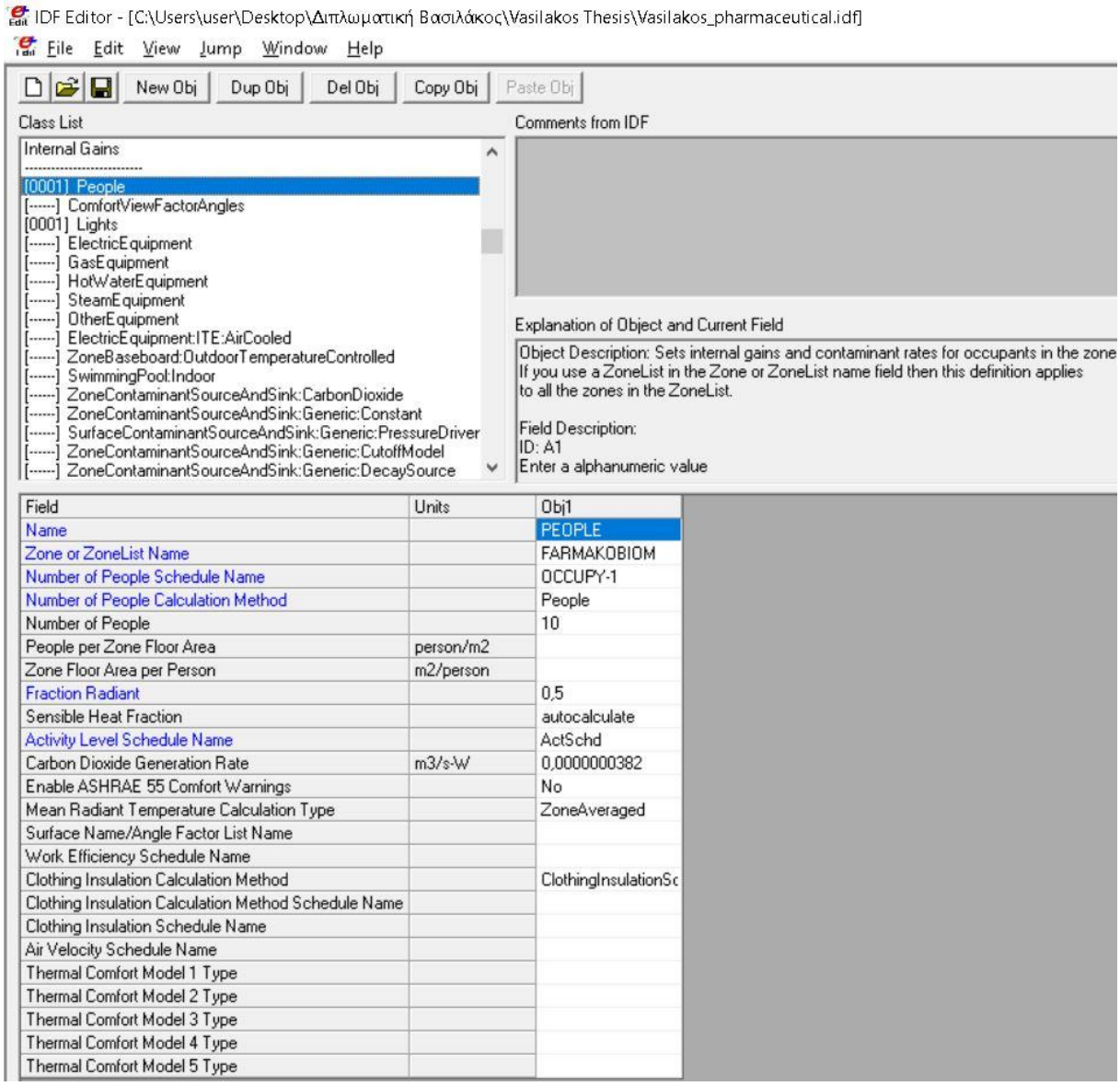
Προαιρετικά, προστέθηκαν μικρές προστατευτικές σκεπές πάνω από τα ανοίγματα της βιομηχανίας (πόρτες και παράθυρα). Στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται οι διαστάσεις τους, καθώς συνδράμουν στον υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων λόγω της σκίασης που παρέχουν από τον ήλιο.

8.2.6 Κατηγορία: Εσωτερικά θερμικά κέρδη (Internal gains)

Τα θερμικά κέρδη ενός κτιρίου εξαρτώνται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

- Τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν
- Τον εξοπλισμό που λειτουργεί εντός του κτιρίου
- Τον αριθμό των εργαζομένων
- Το φωτισμό του κτιρίου και το είδος των λαμπτήρων που τον παρέχουν
- Τον εισαγόμενο αέρα

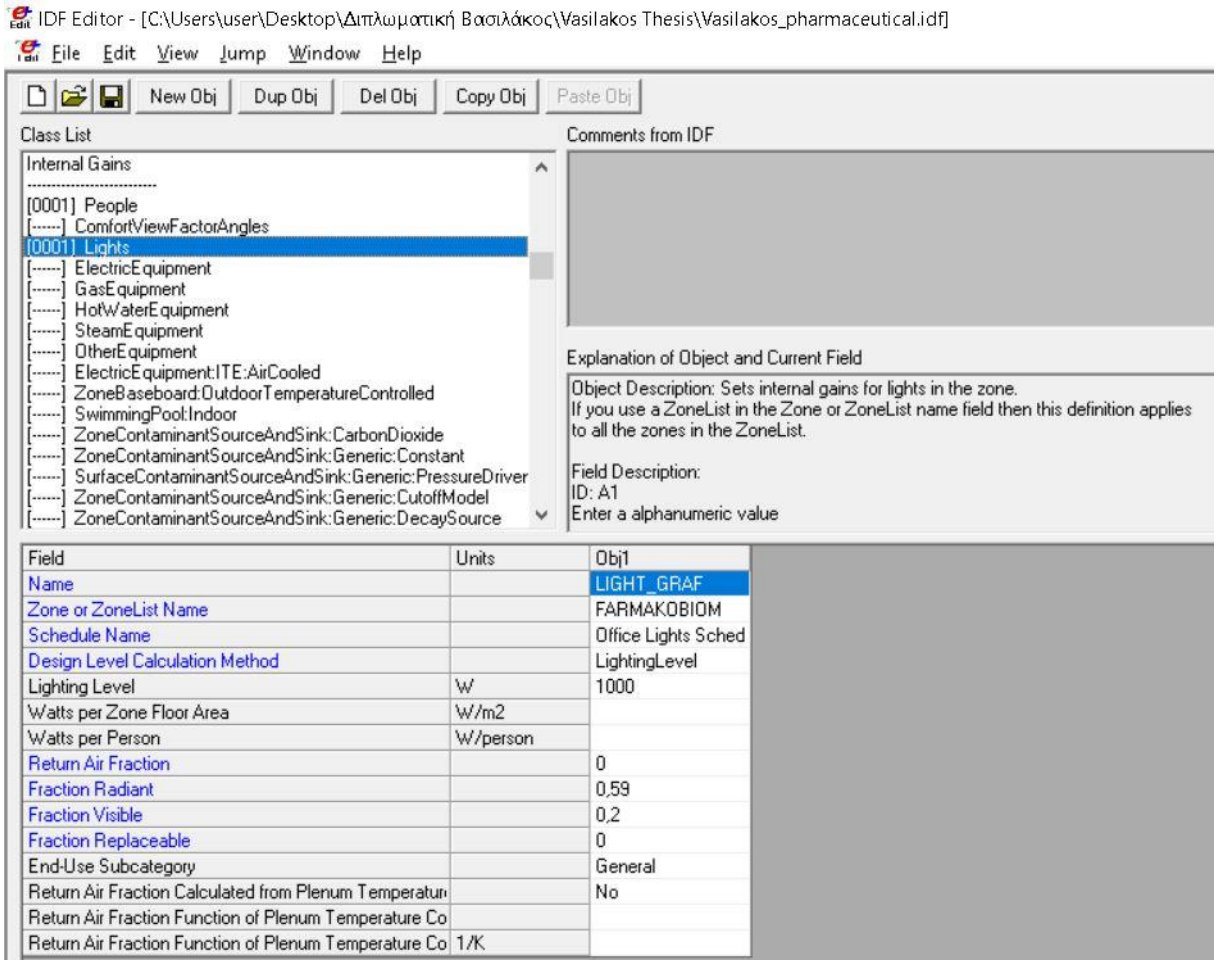
8.2.6.1 Υποκατηγορία: Φορτία λόγω ανθρώπων (People)



Εικόνα 70: Φορτία λόγω ανθρώπων

Στην υποκατηγορία των ανθρώπων δόθηκε μόνο ο αιρθμός των εργαζομένων. Οι υπόλοιπες επιλογές είναι αυτόματες.

8.2.6.2 Υποκατηγορία: Φορτία λόγω φωτισμού (Lights)

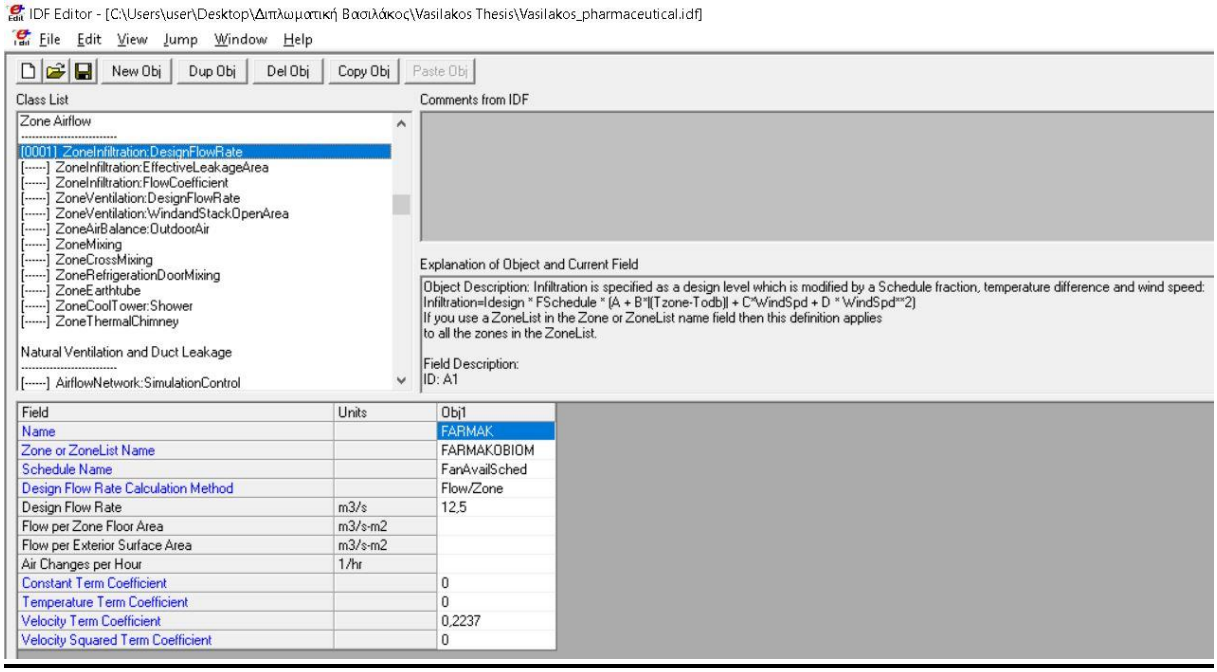


Εικόνα71: Φορτία λόγω φωτισμού

Στην υποκατηγορία αυτή δόθηκε η ισχύς των λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται εντός της βιομηχανίας και ισούται με 1000 Watt. Ο προγραμματισμός και η ένταση λειτουργίας τους δίνεται στην υποκατηγορία των ‘Schedules’.

8.2.7 Κατηγορία: Ροή αέρα εντός ζώνης (Zone Airflow)

8.2.7.1 Υποκατηγορία: Εισαγωγή αέρα εντός ζώνης : Παροχή αέρα σχεδιασμού

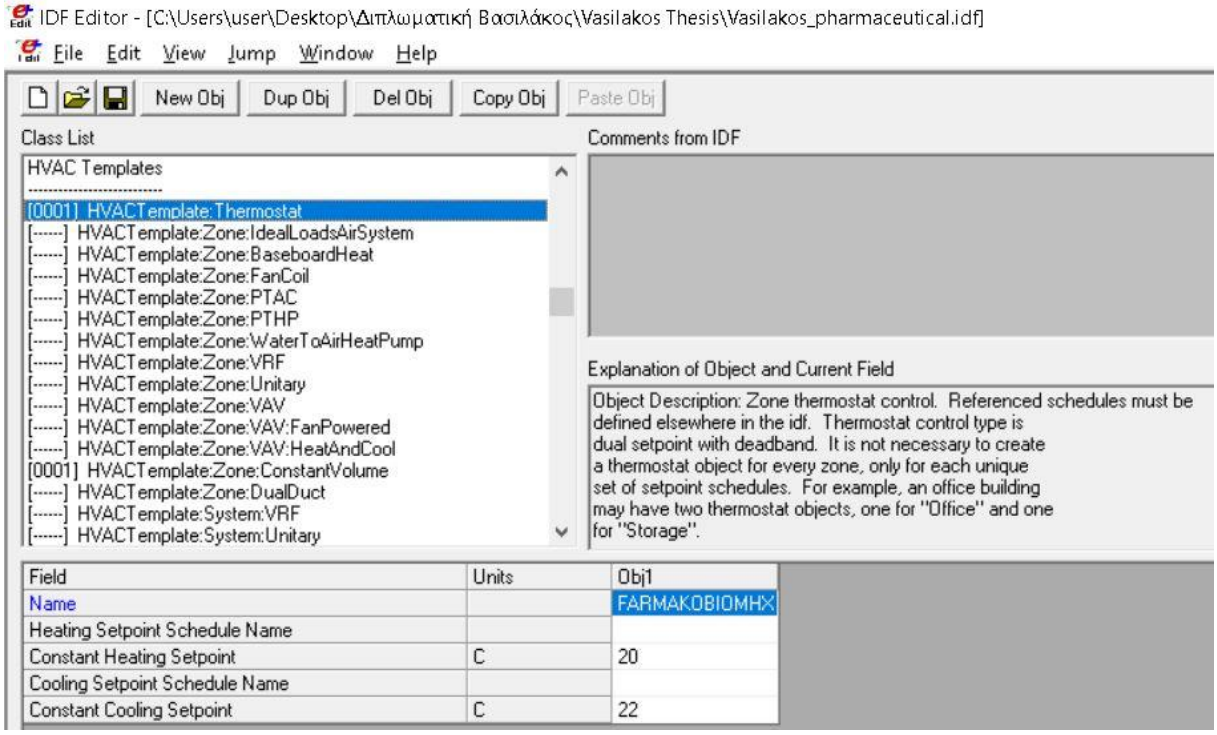


Εικόνα 72: Παράμετροι αερισμού χώρου

Η εισαγόμενη ποσότητα αέρα καταχωρήθηκε ίση με 12,5 m^3/s.

8.2.8 Κατηγορία HVAC Templates

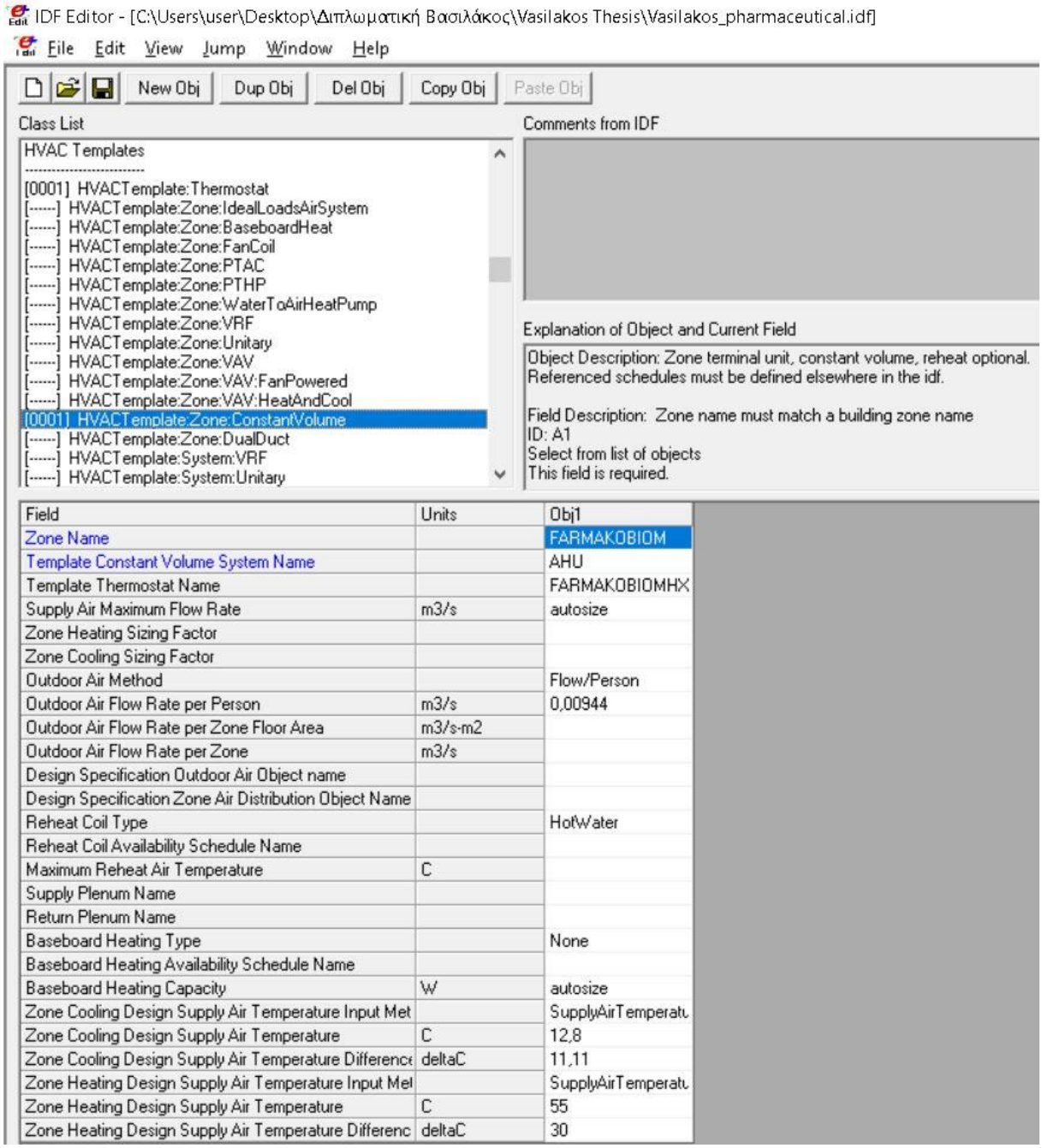
8.2.8.1 Υποκατηγορία: HVAC Template: Thermostat



Εικόνα 73: Έλεγχος θερμοκρασίας μέσω θερμοστάτη

Το σύστημα HVAC της φαρμακοβιομηχανίας προγραμματίζεται να διατηρεί τη θερμοκρασία μεταξύ των 20 και 22 ºC.

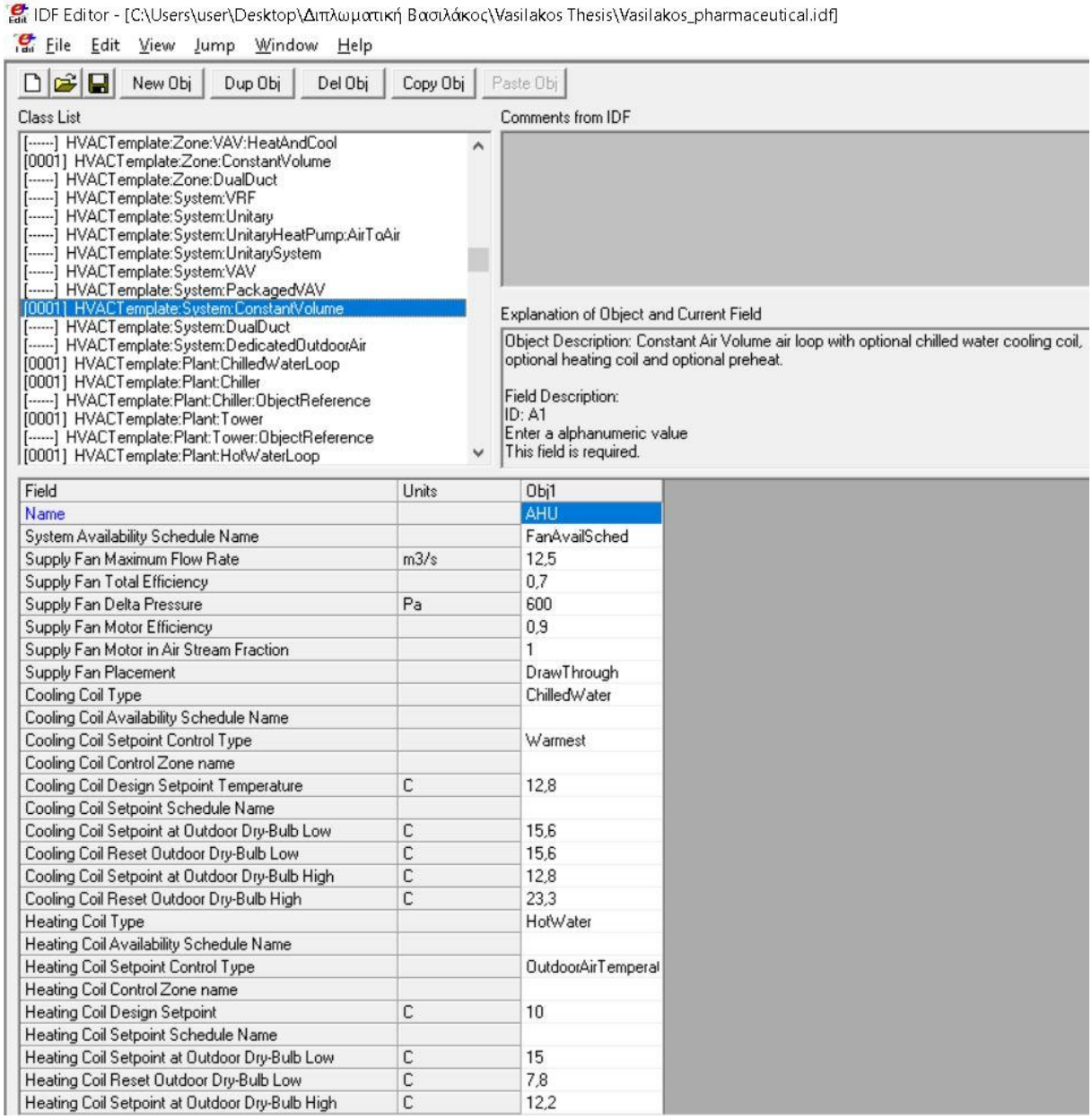
8.2.8.2 Υποκατηγορία: HVAC Template: Zone: Constant Volume



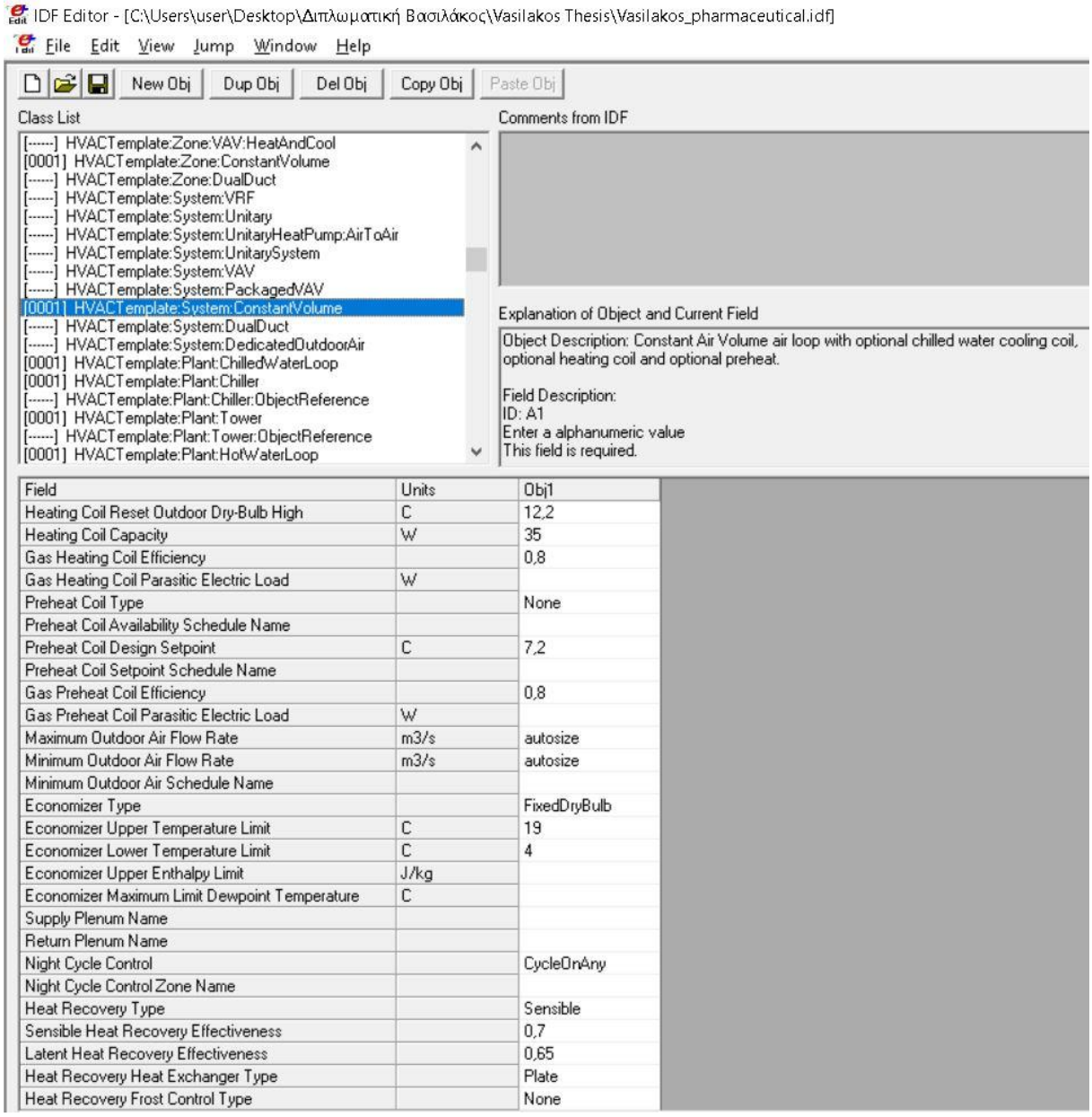
Εικόνα 74: Παράμετροι της μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: Zone Constant Volume)

Σε αυτές τις ρυθμίσεις ρυθμίζεται η θερμοκρασία σχεδιασμού του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη και θέρμανση η οποία ισούται αντίστοιχα με 12,8 και 55 ^{o}C, καθώς και η διαφορά που πρέπει να έχουν με την εκάστοτε θερμοκρασία εντός της εγκατάστασης.

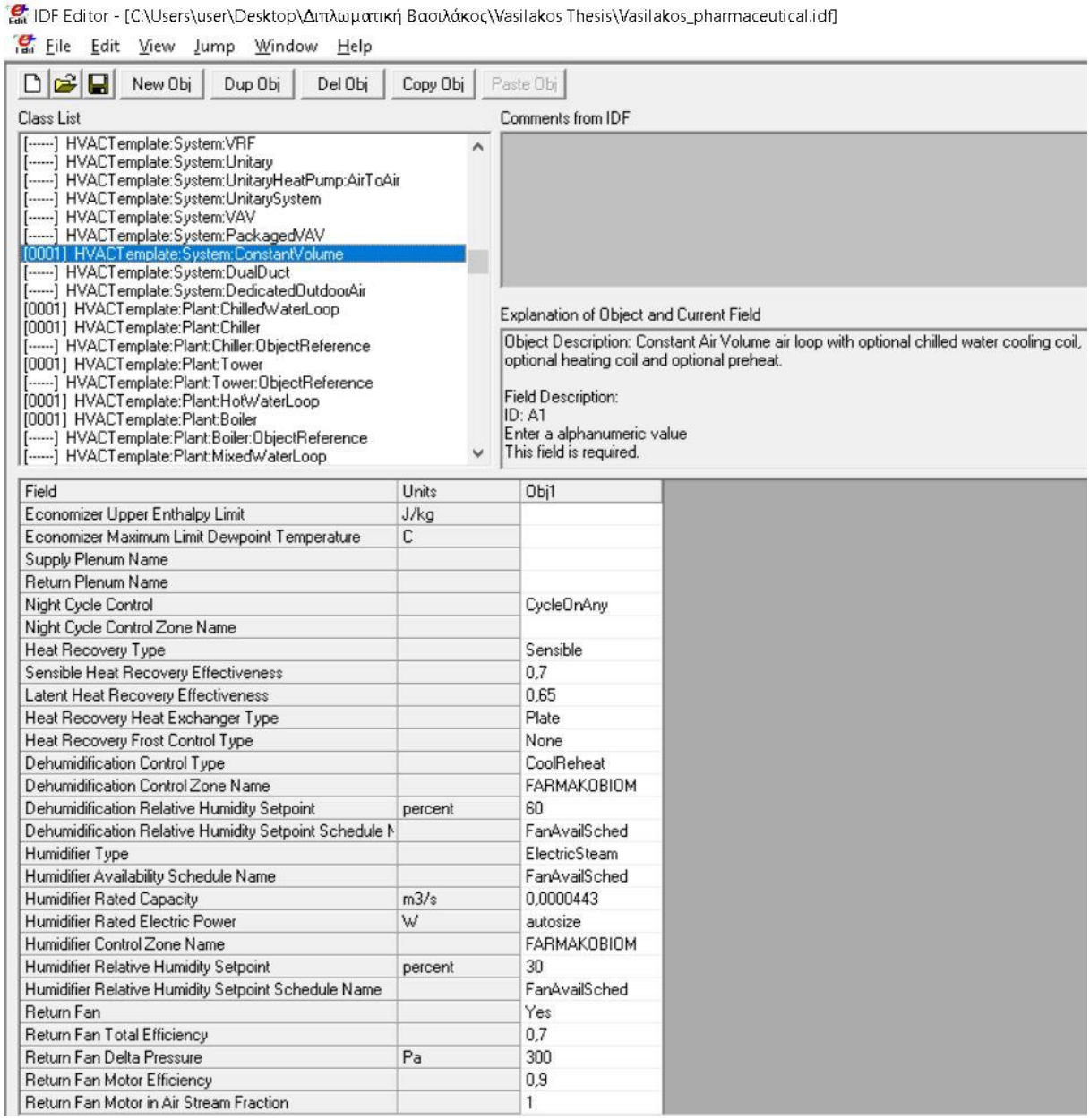
8.2.8.3 Υποκατηγορία: HVAC Template: System Costant Volume



Εικόνα 75: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (1)



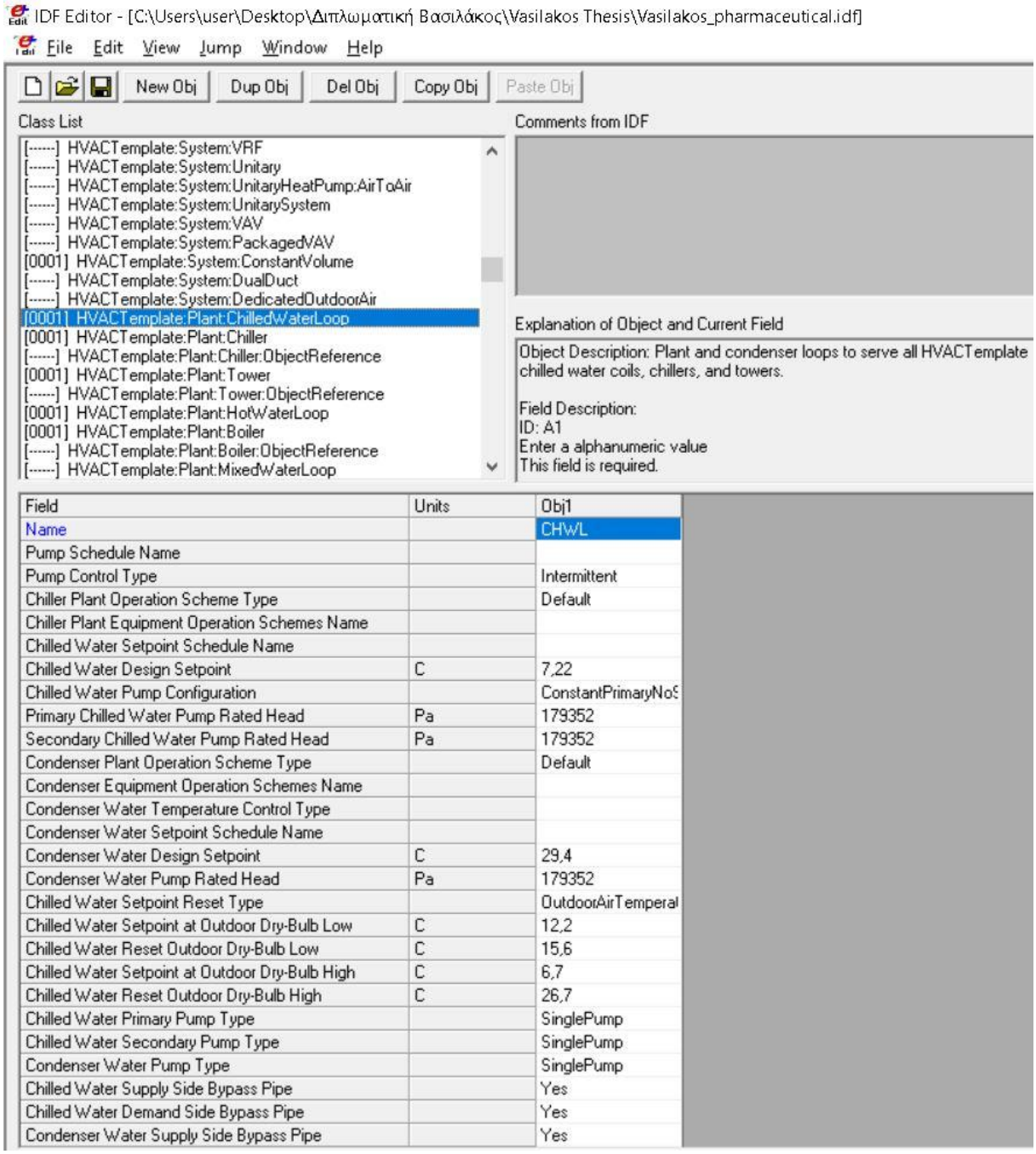
Εικόνα 75: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (2)



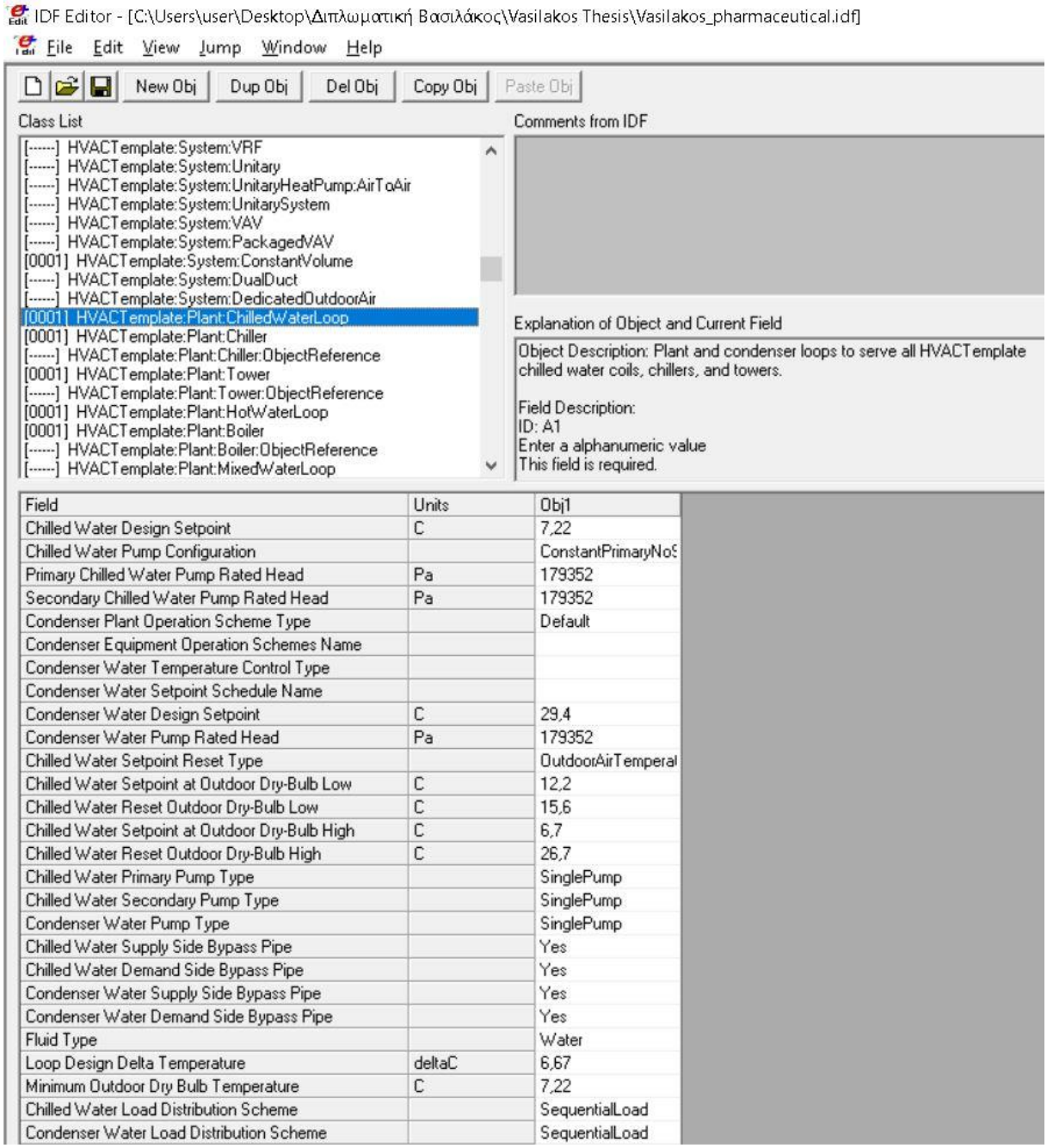
Εικόνα 76: Παράμετροι μονάδας διαχείρισης αέρα AHU (HVAC Template: System Constant Volume) (3)

Στην υποκατηγορία αυτή, καθορίζονται οι ρυθμίσεις λειτουργίας του ανεμιστήρα παροχής αέρα. Οι περισσότερες επιλογές είναι οι προεπιλεγμένες από το EnergyPlus.

8.2.8.4 Υποκατηγορία: Κύκλωμα ψυχρού νερού (HVAC Template: Plant: Chilled Water Loop)



Εικόνα 77: Παράμετροι κυκλώματος ψυχρού νερού (1)



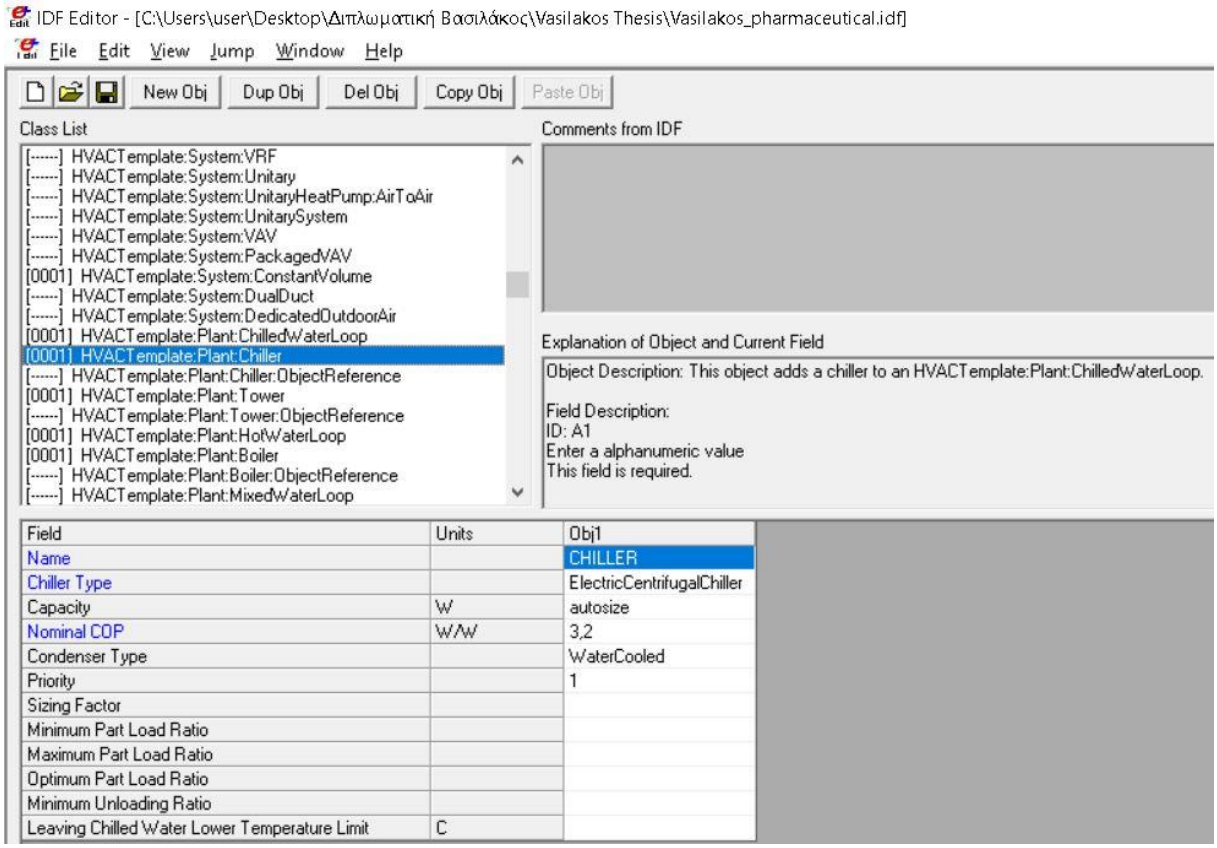
Εικόνα 78: Παράμετροι κυκλώματος ψυχρού νερού (2)

Στη ρύθμιση του κυκλώματος του ψυκτικού μέσου (γλυκόλη) καθορίζονται οι εξής παράμετροι:

- Η θερμοκρασία του μέσου ψύξης ίση με 7,22 ^{o}C
- Προεπιλεγμένη πίεση τροφοδοσίας ψυκτικού μέσου
- Η θερμοκρασία συμπυκνωτή

- Τα εύρη θερμοκρασιών του ψυκτικού μέσου για υψηλή και χαμηλή εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού
- Το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου εντός του κυκλώματος
- Όλες οι υπόλοιπες τιμές είναι οι προεπιλεγμένες από το EnergyPlus

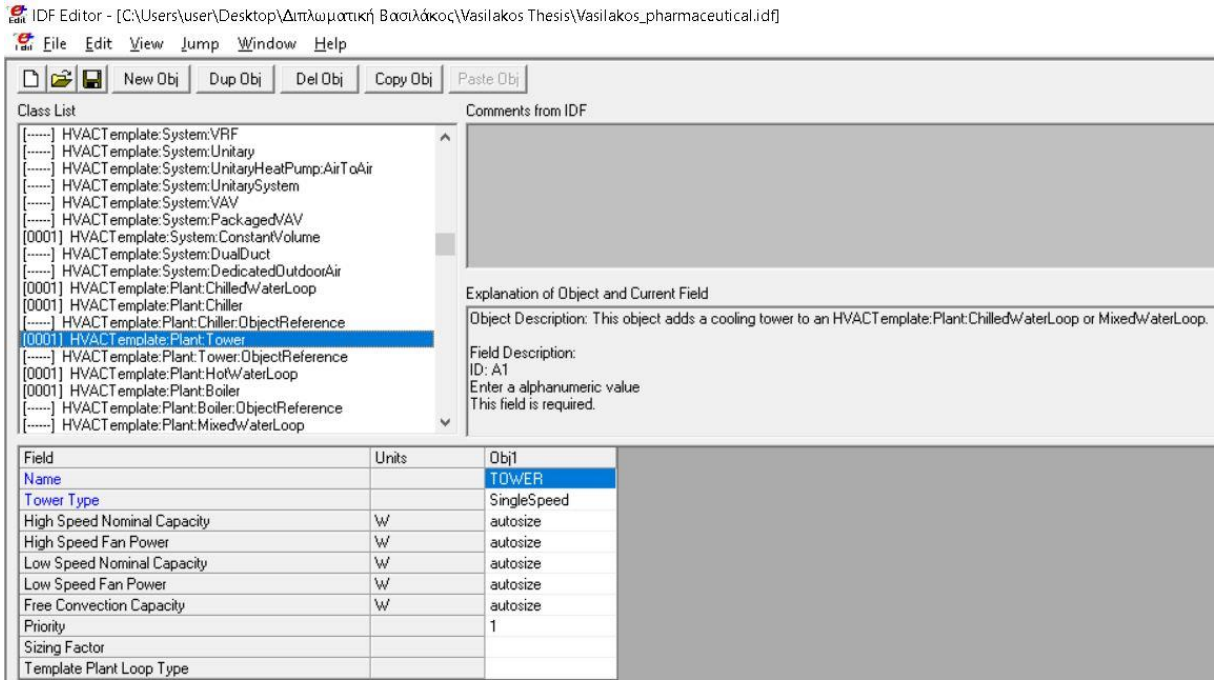
8.2.8.5 Υποκατηγορία: Ψύκτης-Chiller (HVAC Template: Plant Chiller)



Εικόνα 79: Παράμετροι ελέγχου του ψύκτη-chiller

Για τον ψύκτη νερού (chiller) επελέγη ο τύπος του εξοπλισμού (με ηλεκτρικό φυγοκεντρικό συμπιεστή), ο συντελεστής COP (Coefficient of Performance) ίσος με 3,2 και ο τύπος του συμπυκνωτή είναι υδρόψυκτος.

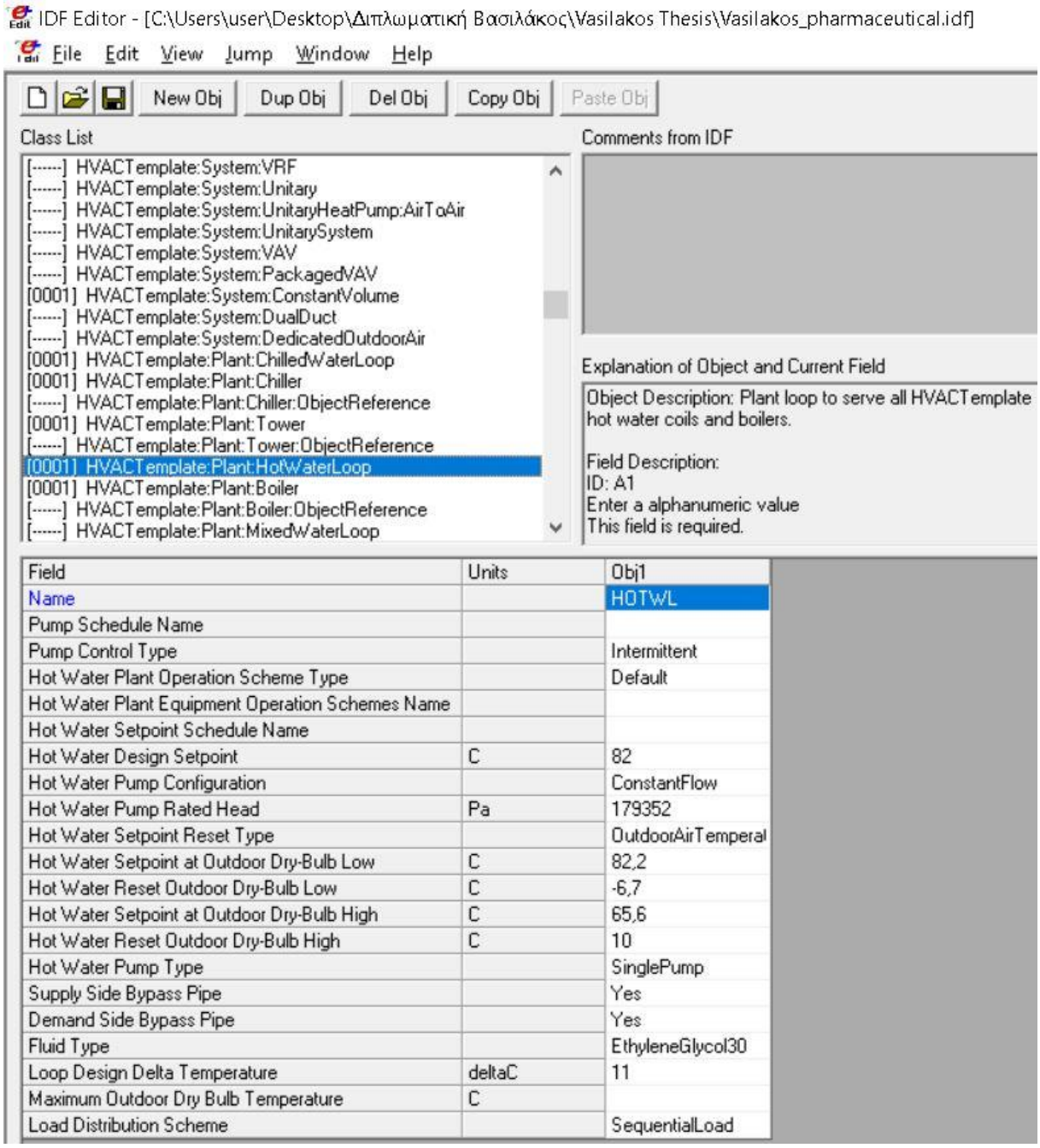
8.2.8.5 Υποκατηγορία: Πύργος Ψύξης (HVAC Template: Plant tower)



Εικόνα 80: Παράμετροι πύργου ψύξης

Οι παράμετροι του πύργου ψύξης επελέγησαν αυτόματα από το EnergyPlus.

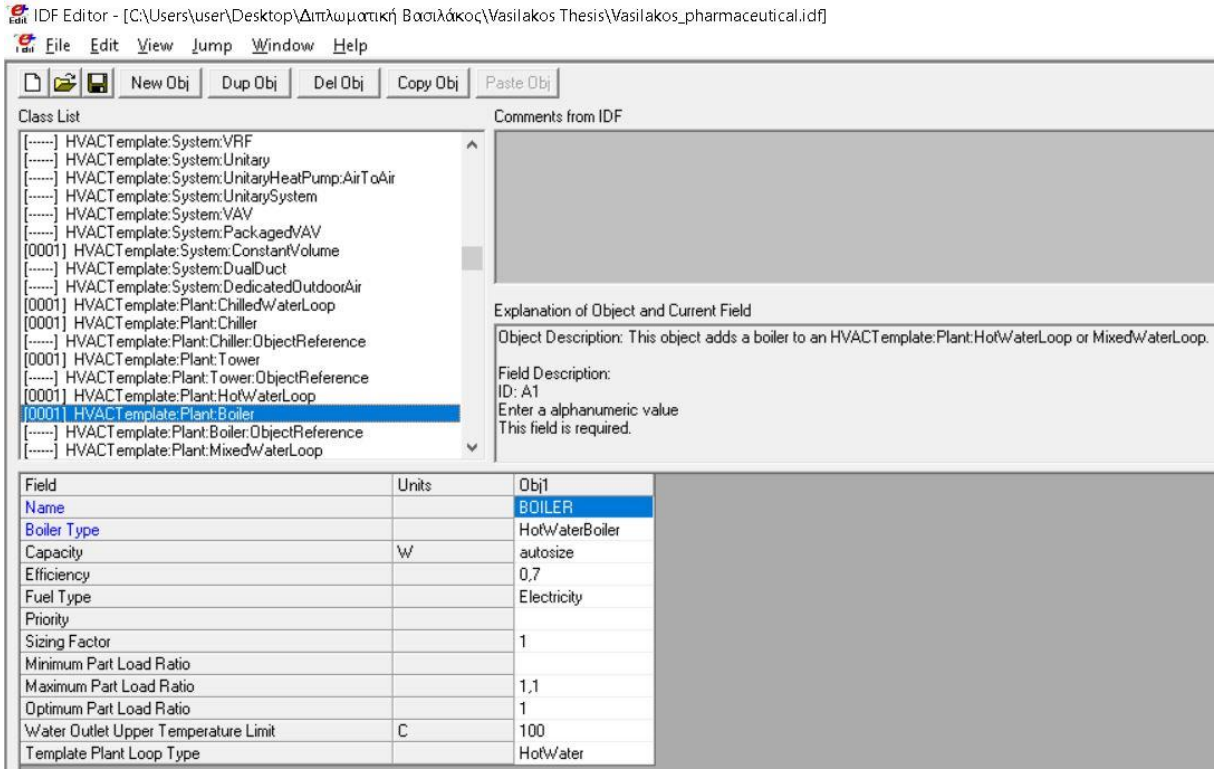
8.2.8.6 Υποκατηγορία: Κύκλωμα θερμού νερού (HVAC Template: Plant: Hot Water Loop)



Εικόνα 81: Παράμετροι κυκλώματος θερμού νερού

Ομοίως με το κύκλωμα του ψυκτικού μέσου, στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται οι παράμετροι του κυκλώματος του μέσου θέρμανσης το οποίο θα οδηγηθεί στο λέβητα και ύστερα στους εναλλάκτες. Όπως φαίνεται στην εικόνα παραπάνω, ο τύπος του μέσου που επιλέχτηκε είναι η γλυκόλη.

8.2.8.7 Υποκατηγορία: Λέβητας (HVAC Template: Plant Boiler)

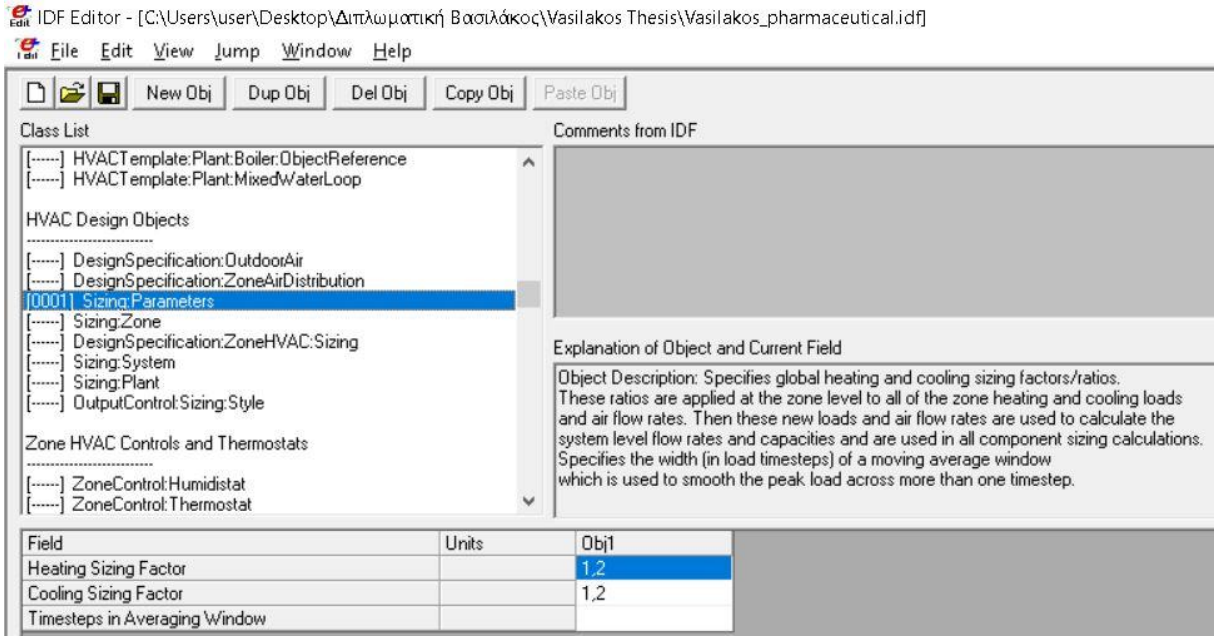


Εικόνα 82: Παράμετροι ρύθμισης λέβητα

Η διαστασιολόγηση του λέβητα επιλέχτηκαν αυτόματα από το EnergyPlus..

8.2.9 Κατηγορία HVAC Design Objects

8.2.9.1 Υποκατηγορία: Παράμετροι διαστασιολόγησης συστήματος HVAC (HVAC Sizing Parameters)

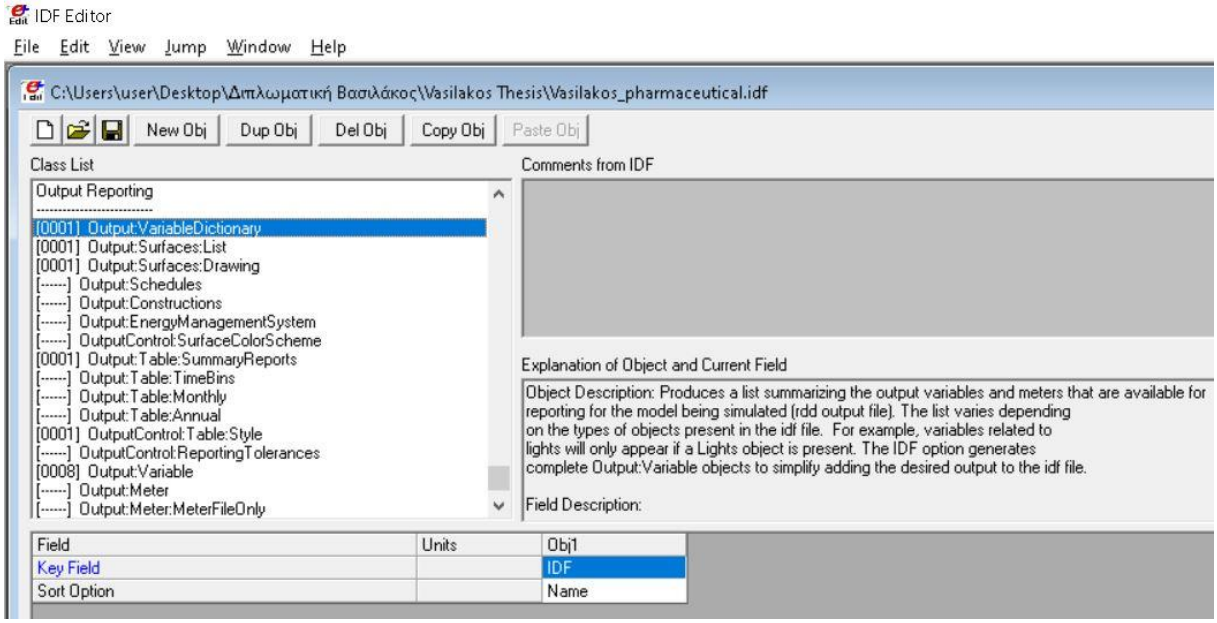


Εικόνα 83: Παράμετροι διαστασιολόγησης συστημάτων HVAC

Στην υποκατηγορία αυτή καθορίζονται οι τιμές των λόγων θέρμανσης και ψύξης που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων

8.2.10 Κατηγορία Output Reporting

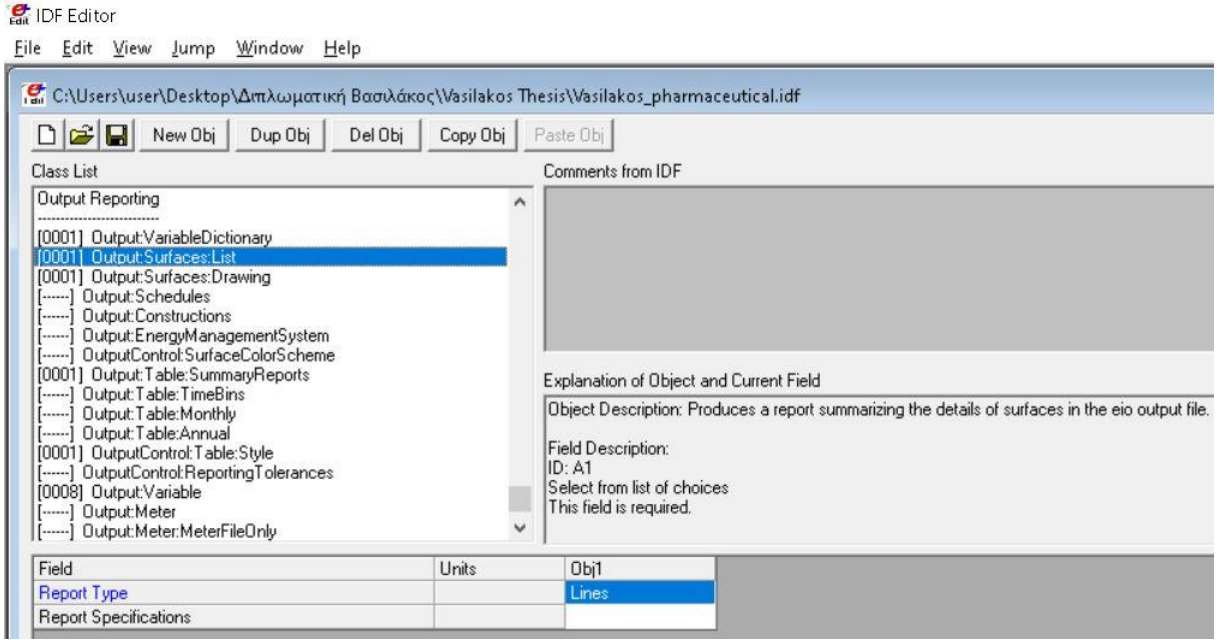
8.2.10.1 Υποκατηγορία: Παράμετροι ονομασίας μεταβλητών (Output: Variable Dictionary)



Εικόνα 84: Μορφές ονομασιών μεταβλητών

Η υποκατηγορία αυτή χρησιμοποιείται για την επιλογή του τύπου του αρχείου που θα εξαχθεί μετά την προσομοίωση, με όλες τις μεταβλητές που καταχωρήθηκαν στις παραπάνω υποκατηγορίες.

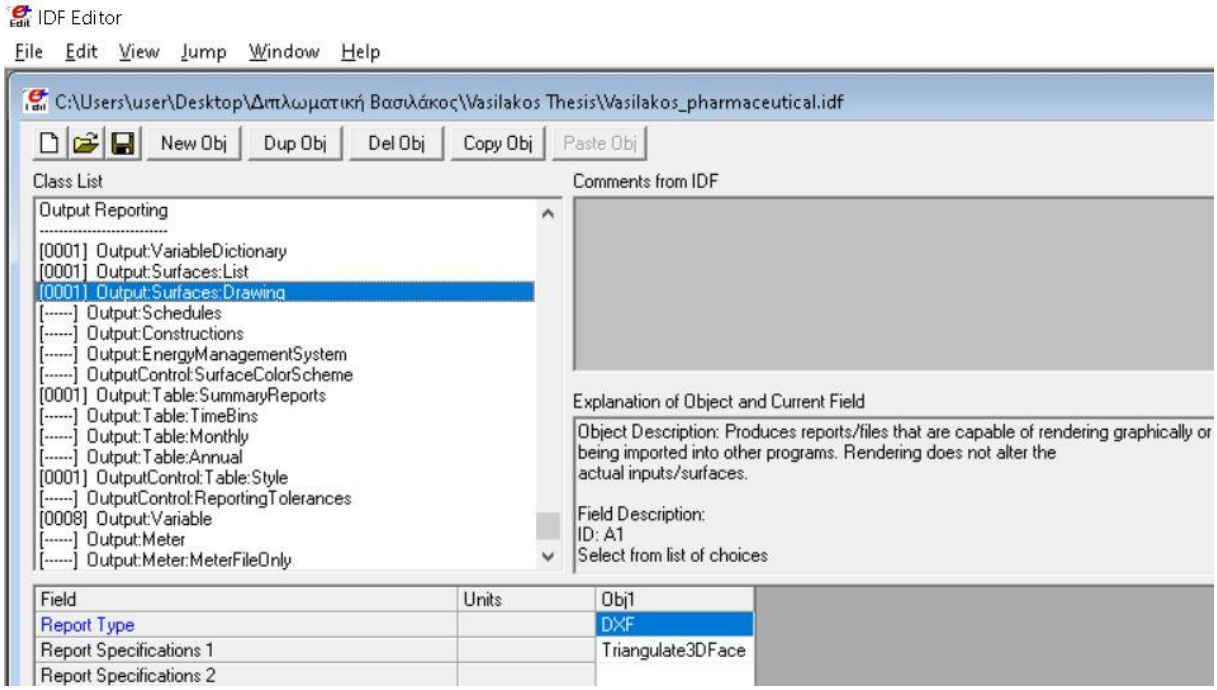
8.2.10.2 Υποκατηγορία: Μορφή αναφοράς λεπτομερειών επιφανειών (Output Surfaces List)



Εικόνα 85: Μορφή αναφοράς λεπτομερειών επιφανειών

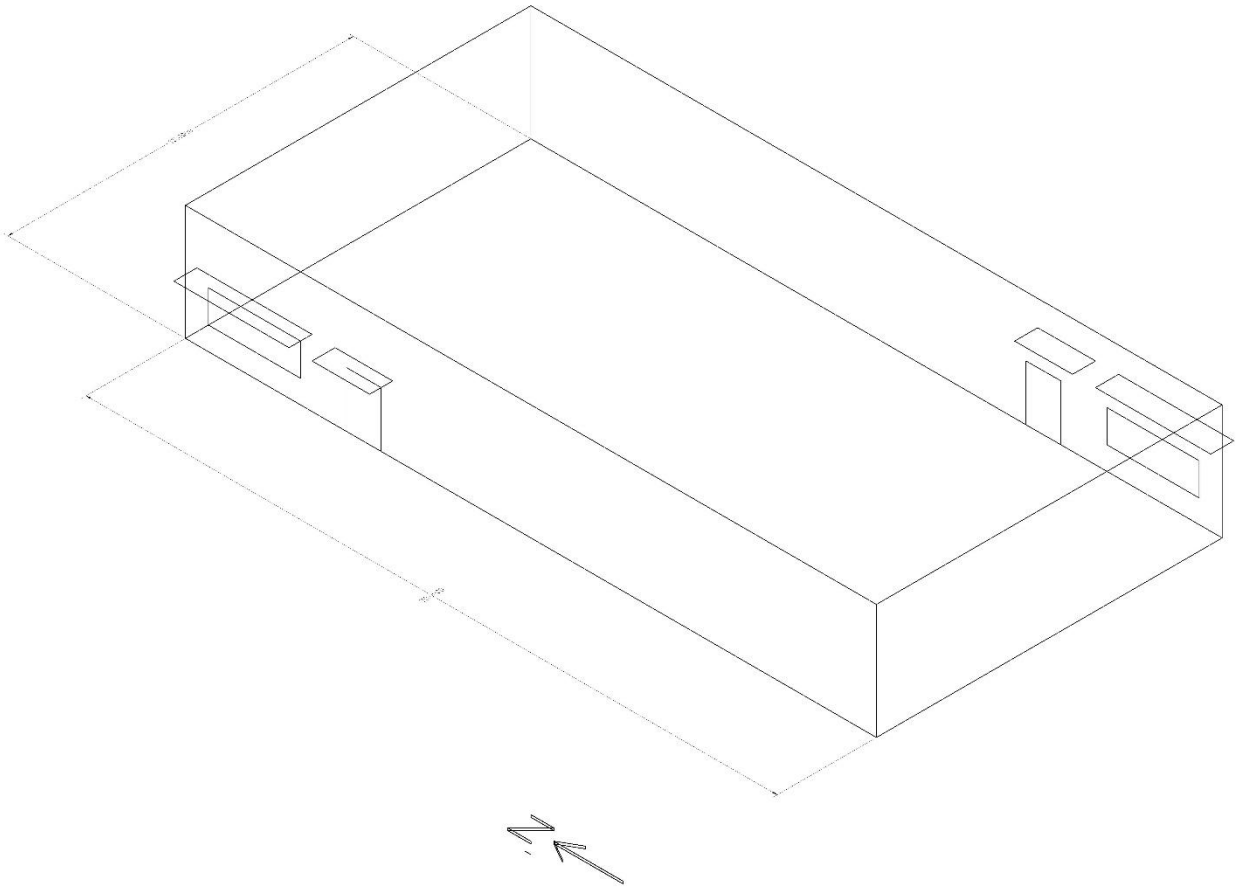
Εδώ επιλέγεται η μορφοποίηση της αναφοράς λεπτομερειών των επιφανειών του κτιρίου. Η επιλογή αυτή έγινε καθαρά προς διευκόλυνση του χρήστη.

8.2.10.3 Υποκατηγορία: Εξαγωγή σχεδίου κτιρίου (Output: Surfaces Drawing)



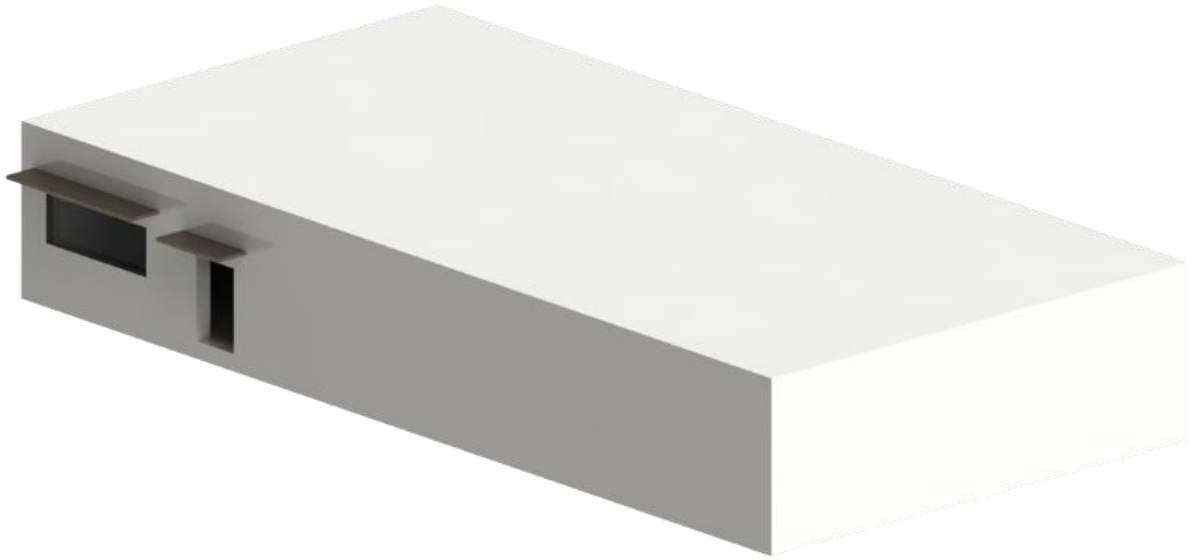
Εικόνα 86: Εξαγωγή τρισδιάστατου σχεδίου κτιρίου

Στην υποκατηγορία αυτή επιλέγεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του σχεδίου της κτιριακής εγκατάστασης και εξάγεται όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 87: Σχέδιο κτιριακής εγκατάστασης από EnergyPlus

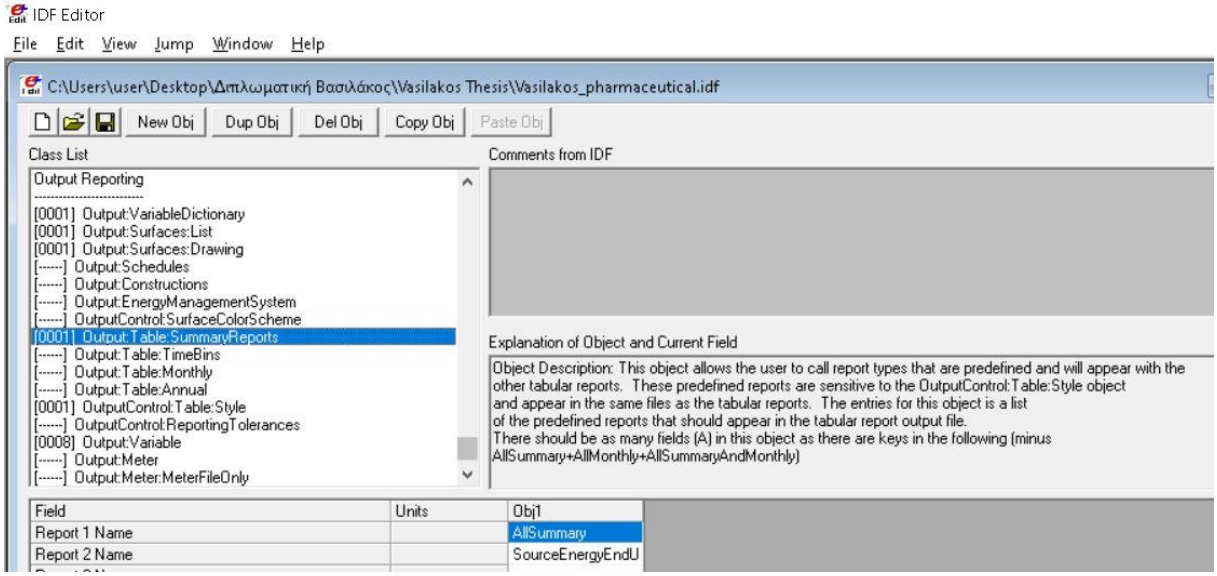
Για μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της εγκατάστασης, παρατίθεται παρακάτω και ένα σχέδιο που πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks και το βοήθημα PhotoView 360.



Εικόνα 88: Αναπαράσταση κτιριακής εγκατάστασης

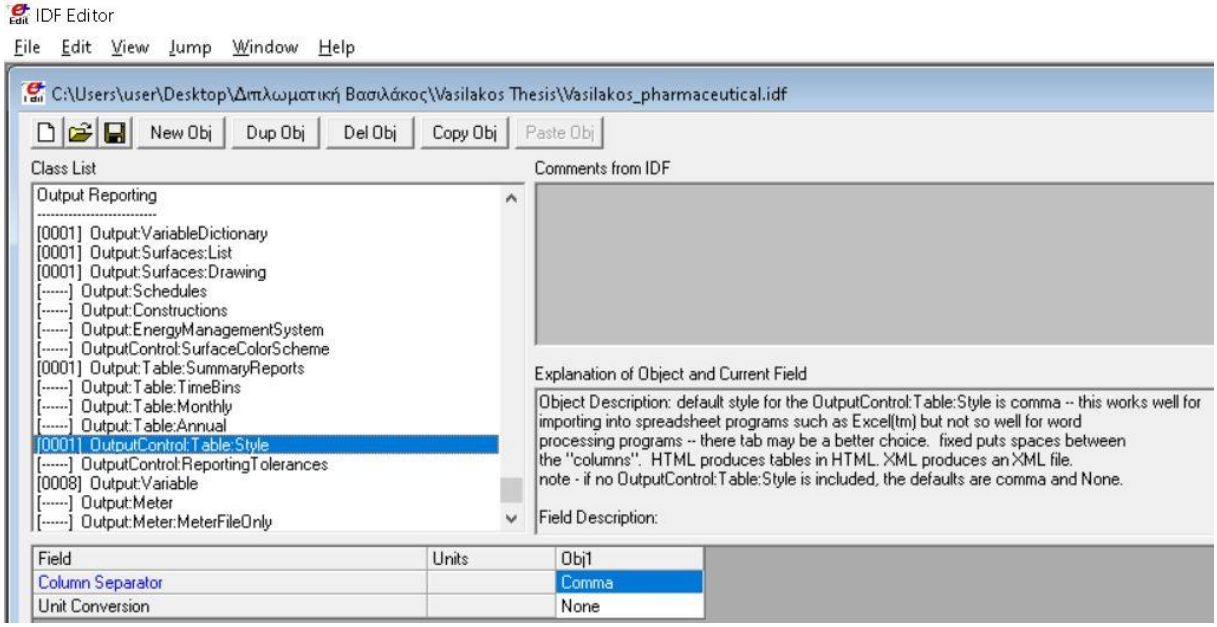
8.2.10.4 Υποκατηγορία: Μορφοποίηση γενικού πίνακα (Output: Table Summary Reports)

Οι υπόλοιπες υποκατηγορίες χρησιμοποιήθηκαν καθαρά για τη μορφοποίηση των αποτελεσμάτων των ενδείξεων προς διευκόλυνση του χρήστη. Συνεπώς δεν καθίσταται αναγκαίο η επεξήγησή τους.



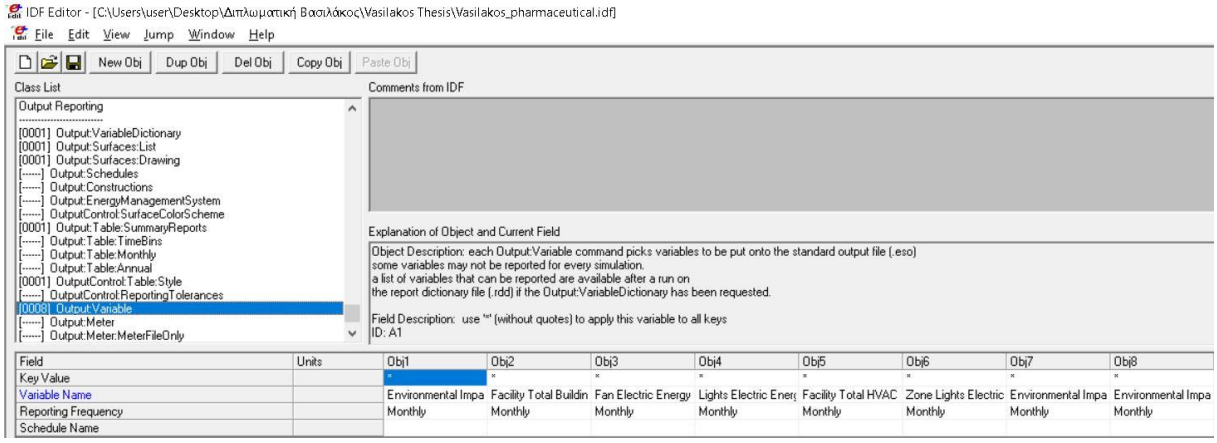
Εικόνα 89: Μορφοποίηση γενικού πίνακα

8.2.10.5 Υποκατηγορία: Μορφοποίηση πινάκων και διαχωρισμός στηλών (Output Control: Table Style)



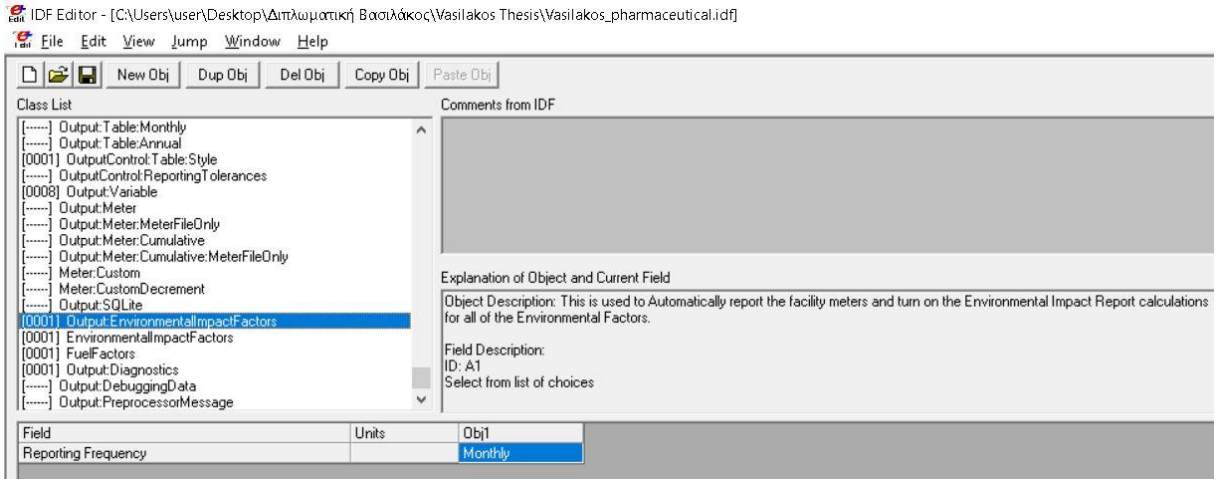
Εικόνα 90: Διαχωρισμός στηλών πινάκων

8.2.10.6 Υποκατηγορία: Ονομασία μεταβλητών (Output: Variable)



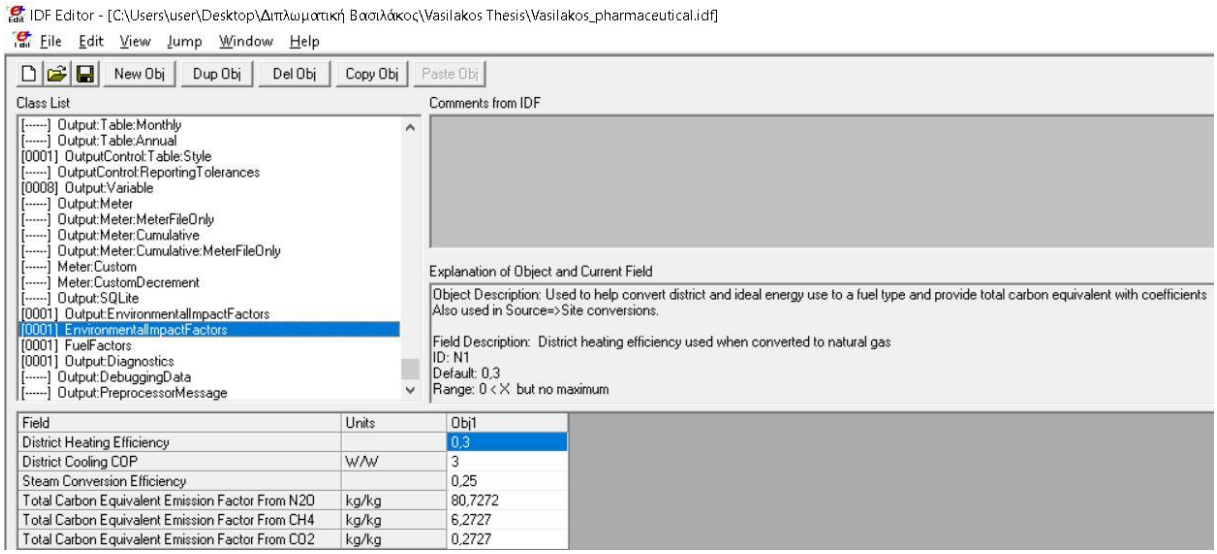
Εικόνα 91: Ονομασία μεταβλητών

8.2.10.7 Υποκατηγορία: Συχνότητα μετρήσεων περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων (Output: Environmental Impact Factors)



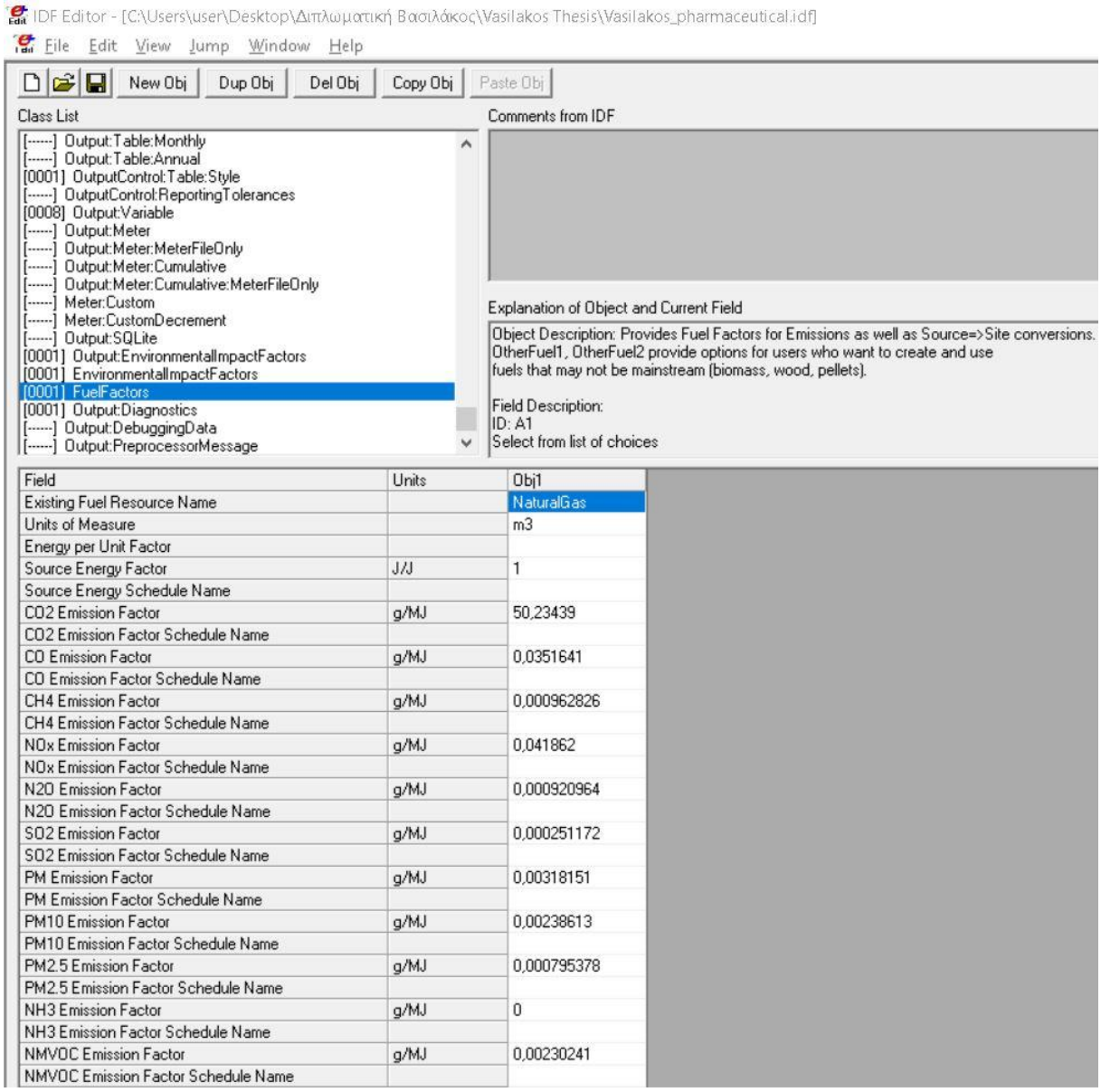
Εικόνα 92: Συχνότητα μετρήσεων περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων

8.2.10.8 Υποκατηγορία: Περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις (Environmental Impact Factors)

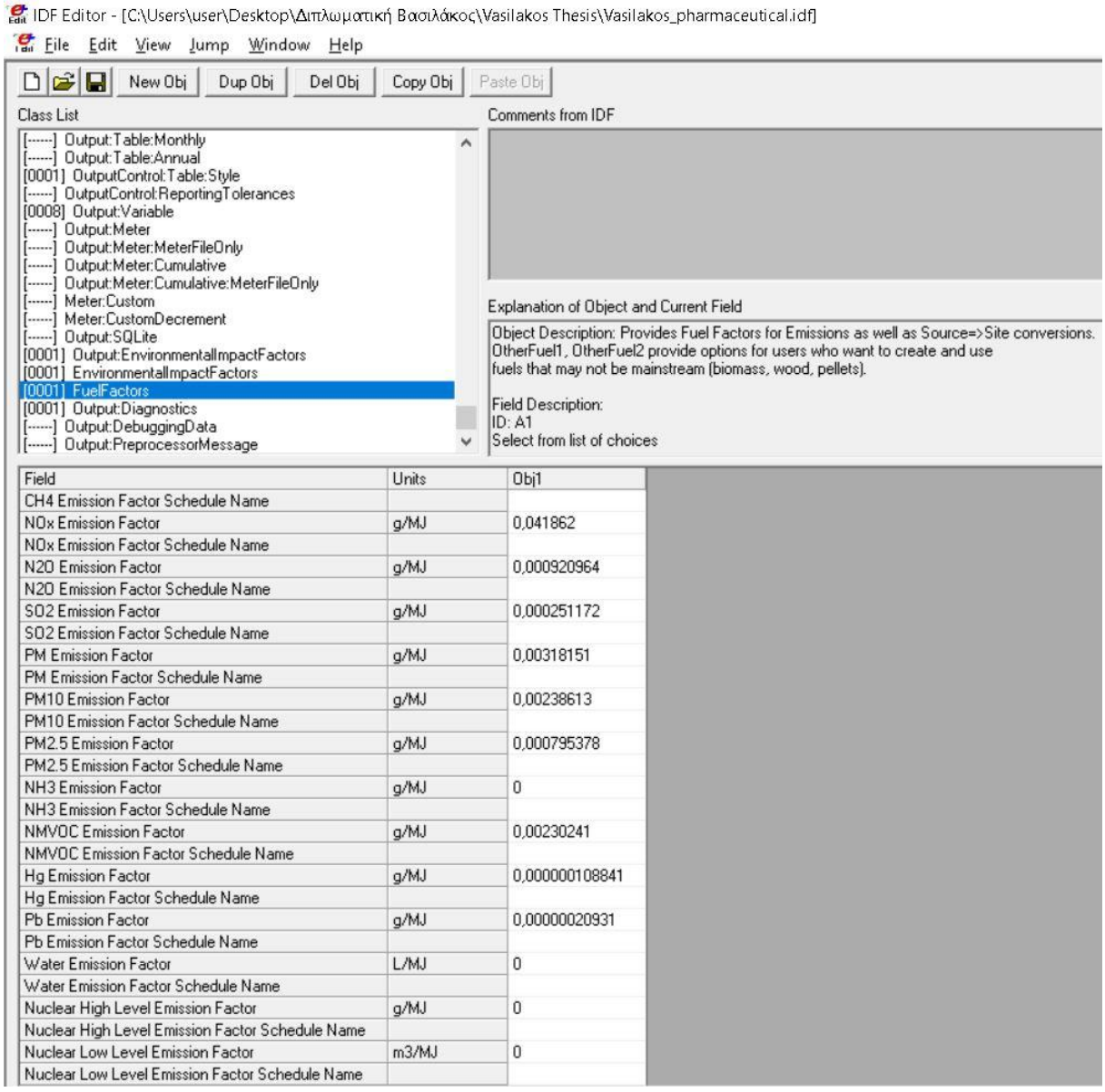


Εικόνα 93: Παράμετροι ρύπων καύσης φυσικού αερίου

8.2.10.9 Υποκατηγορία: Συντελεστές εκπομπών ρύπων καυσίμου (Fuel Factors)

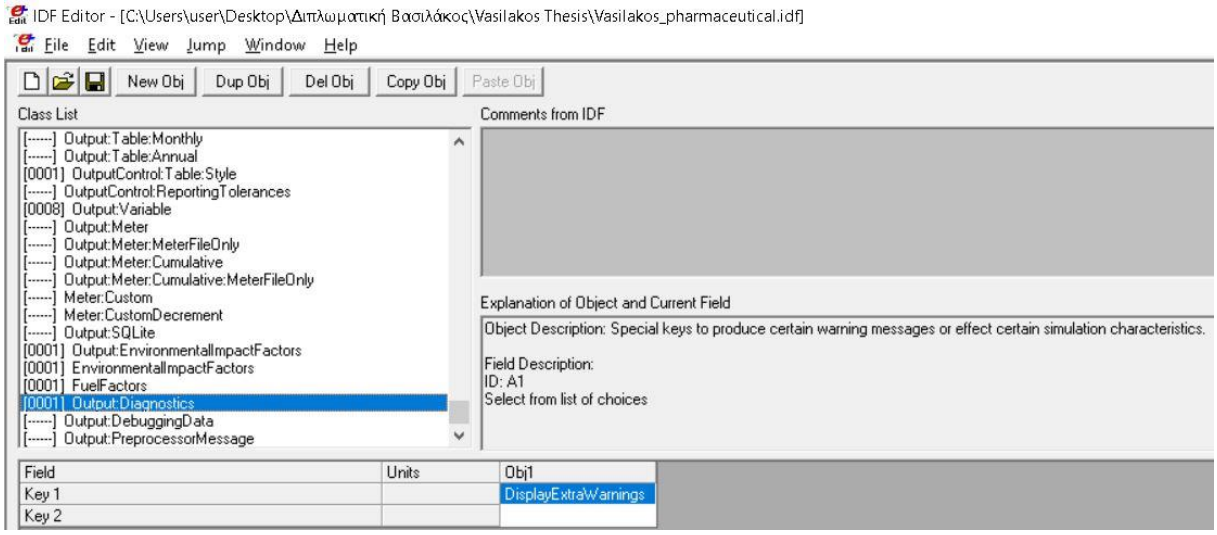


Εικόνα 94: Συντελεστές εκπομπών ρύπων (1)



Εικόνα 95: Συντελεστές ρύπων (2)

8.2.10.10 Υποκατηγορία: Αναφορές σφαλμάτων (Output Diagnostics)



Εικόνα 96: Επιλογή αναφοράς σφαλμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο : Διεξαγωγή προσομοίωσης

9.1 Διαγραμματική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με την ASHRAE είναι αποδεκτό να θεωρηθεί, ότι η 21η μέρα του κάθε μήνα αποτελεί μια αντιπροσωπευτική μέρα για τις μέσες καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του εκάστοτε μήνα. Συνεπώς με τη χρήση του EnergyPlus υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος ανά ώρα για κάθε 21η ημέρα για κάθε μήνα. Επίσης στο EnergyPlus καταχωρήθηκαν συνοπτικά οι παρακάτω παραδοχές:

- Ώρες λειτουργίας εξοπλισμού φαρμακοβιομηχανίας: 6:00 – 22:00
- Ώρες εργασίας προσωπικού: 08:00-17:00
- Ώρες λειτουργίας φωτισμού: Όλη μέρα αλλά με διαφορετική ένταση όπως φαίνεται στην επεξήγηση παραπάνω

Επίσης, οι ενδείξεις που πάρθηκαν ήταν σε μονάδες Joule (J). Συνεπώς ήταν αναγκαία η αναγωγή τους σε kW και στη συνέχεια σε kWh και αντίστοιχα MWh.

Αρχικά παρατίθενται τα διαγράμματα των απαιτήσεων ισχύος (kW) ανά ώρα για κάθε 21η του κάθε μήνα.

Διάγραμμα 1: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιανουαρίου

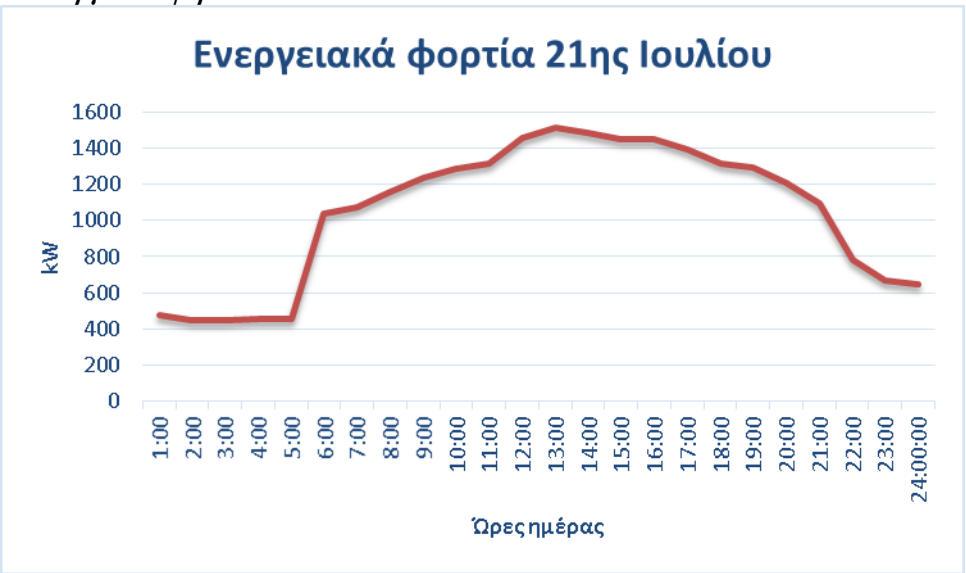
Διάγραμμα 2: Ενεργειακά φορτία 21ης Φεβρουαρίου

Διάγραμμα 3: Ενεργειακά φορτία 21ης Μαρτίου

Διάγραμμα 4: Ενεργειακά φορτία 21ης Απριλίου

Διάγραμμα 5: Ενεργειακά φορτία 21ης Μαΐου

Διάγραμμα 6: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιουνίου



Διάγραμμα 7: Ενεργειακά φορτία 21ης Ιουλίου

Διάγραμμα 8: Ενεργειακά φορτία 21ης Αυγούστου

Διάγραμμα 9: Ενεργειακά φορτία 21ης Σεπτεμβρίου

Διάγραμμα 10: Ενεργειακά φορτία 21ης Οκτωβρίου

Διάγραμμα 11: Ενεργειακά φορτία 21ης Νοεμβρίου

Διάγραμμα 12: Ενεργειακά φορτία 21ης Δεκεμβρίου

Τα αποτελέσματα των ενδείξεων θα σχολιαστούν στο Κεφάλαιο 9.2.

Παρακάτω παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται γραφικά οι μέσες ενεργειακές καταναλώσεις της φαρμακοβιομηχανίας (MWh) ανά μήνα για ένα έτος..

Διάγραμμα 13: Μέση ενεργειακή κατανάλωση φαρμακοβιομηχανίας ανά μήνα

Τέλος, παρατίθεται το ιστόγραμμα του μέσου κόστους (€) των ενεργειακών καταναλώσεων της φαρμακοβιομηχανίας ανά μήνα, έχοντας πρώτα υπολογίσει τις μέσες ενεργειακές καταναλώσεις ανά μήνα μέσω των ωριαίων ενδείξεων.

Διάγραμμα 14: Μέσο κόστος (€) ενεργειακών καταναλώσεων φαρμακοβιομηχανίας ανά μήνα

9.2 Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα των ωριαίων ενεργειακών καταναλώσεων ανά 21η του μηνός και τα κόστη των μέσων ενεργειακών καταναλώσεων ανά μήνα συμπεραίνονται τα εξής:

1. Οι μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι εντός του κτιρίου υπάρχουν θερμικά κέρδη προκαλούμενα κυρίως από τον εξοπλισμό, το εργαζόμενο προσωπικό, το φωτισμό και την ηλιοφάνεια. Συνεπώς τα θερμικά αυτά κέρδη προστίθενται στα ψυκτικά φορτία της βιομηχανίας.

   Από την άλλη κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται μια μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων, ακριβώς επειδή ένα μέρος των θερμικών φορτίων που προκύπτουν, καλύπτονται από τα θερμικά κέρδη της κτιριακής εγκατάστασης, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

   Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα τις ώρες που ξεκινά η παραγωγική διαδικασία από τις 6:00 έως τις 22:00 και τις ώρες που προσέρχεται το εργαζόμενο προσωπικό από τις 8:00 έως τις 17:00.

   Το συμπέρασμα αυτό είναι οφθαλμοφανές στο διάγραμμα 13 και 14.

2. Στα διαγράμματα 1 έως 12 παρατηρείται ότι κατά τους θερινούς μήνες, οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται ραγδαία γύρω από το μεσημέρι και μειώνονται το βράδυ. Αντιθέτως για τους χειμερινούς μήνες οι ενεργειακές καταναλώσεις μειώνονται γύρω από τις μεσημεριανές ώρες και αυξάνονται τις βραδινές ώρες. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κάθε μέρα, η θερμοκρασία αυξάνεται κατά τη διάρκεια της μέρας και μειώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Συνεπώς το φορτίο που πρέπει να καλύψουν τα συστήματα HVAC, τα ψυκτικά για το καλοκαίρι και τα θερμικά για το χειμώνα, αυξάνονται και μειώνονται αναλόγως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που επικρατεί.
3. Όπως προαναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος, οι ενεργειακές καταναλώσεις για την αποστείρωση ενός χώρου είναι πολύ μεγαλύτερες, από αυτές για ένα συνηθισμένο χώρο με τις ίδιες διαστάσεις. Συγκεκριμένα, η ένταση ενεργειακής χρήσης (EUI Energy Usage Intensity) για ένα τυπικό χώρο με γραφεία ισούται με 257 kWh/m^2 ετησίως, ενώ για μια τυπική φαρμακοβιομηχανία ισούται κατά μέσο όρο με 3.819 kWh/m^2 [36]. Συμπεραίνει λοιπόν κανείς εύκολα ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις για ένα φαρμακευτικό cleanroom είναι κατά 15 περίπου φορές μεγαλύτερες από αυτές ενός τυπικού χώρου.

Ύστερα από τη διεξαγωγή της προσομοίωσης και την κατάλληλη διόρθωση των τιμών και την αναγωγή τους σε kW, kWh και έχοντας υπόψιν ότι η τιμή της κάθε kWh στην Ελλάδα για βιομηχανική χρήση ισούται με 0,08 €/kWh, συγκεντρώθηκαν οι παρακάτω τιμές:

	Μέση ενεργειακή απαίτηση ισχύος (kW)	MW	Μέση κατανάλωση (MWh) ανά μήνα	Μέσο κόστος καταναλώσεων (€ ανά MWh)
Ιανουάριος	334,8136379	0,334813638	241,0658193	19285,26554
Φεβρουάριος	493,7356296	0,49373563	355,4896533	28439,17227
Μάρτιος	199,8655646	0,199865565	143,9032065	11512,25652
Απρίλιος	157,4103764	0,157410376	113,335471	9066,83768
Μάιος	750,0928015	0,750092801	540,0668171	43205,34537
Ιούνιος	995,183747	0,995183747	716,5322978	57322,58383
Ιούλιος	1046,878643	1,046878643	753,752623	60300,20984
Αύγουστος	1196,254372	1,196254372	861,3031476	68904,25181
Σεπτέμβριος	723,1904256	0,723190426	520,6971064	41655,76851
Οκτώβριος	163,151414	0,163151414	117,4690181	9397,521448
Νοέμβριος	186,1155646	0,186115565	134,0032065	10720,25652
Δεκέμβριος	258,921489	0,258921489	186,4234721	14913,87777
			ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ/ΧΡΟΝΟ	374723,3471

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι για μια τυπική φαρμακοβιομηχανία 450 τετραγωνικών μέτρων το συνολικό κόστος για τις ενεργειακές της απαιτήσεις ανά έτος ισούται με 374723,35 €.

Τέλος, η μέση ετήσια ένταση χρήσης ενέργειας (EUI) προέκυψε ίση με 3,799 MWh/m^2.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ASHRAE, 2015. 2015 ASHRAE HANDBOOK: Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications. SI επιμ. Atlanta,USA: ASHRAE.
2. ASHRAE, 2016. 2016 ASHRAE HANDBOOK: HVAC Systems and Equipment. Atlanta: W. Stephen Comstock.
3. D.R. Oughton, S. H., 2002. Faber and Kell's Heating and Air-Conditioning of Builidings. Ninth επιμ. Oxford, England: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
4. Dorman, R. G., 1974. Dust Control and Air Cleaning. First επιμ. New York, USA: Pergamon Press Ltd..
5. Faye C. McQuiston, J. D. P., 1994. Heating Ventilating and Air Conditioning: Analysis and Design. Fourth επιμ. New York: John Wiley & Sons, Inc..
6. Swarbrick, J., 2007. Environmental Monitoring for Cleanrooms and Controlled Environments. Nevada, USA: Informa Healthcare USA, Inc..
7. Whyte, W., 1991. Cleanroom Design. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd..
8. Αντωνόπουλος, Κ. Α., 2015. Κλιματισμός Μέρος Πρώτο. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
9. Χατζηδάκης, Σ., 20003. Σημειώσεις Ψύξης Α' και Β' Μέρος. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
10. P. Haves, "A study on energy savings and measure cost effectiveness of existing building commissioning," 2009
11. Mukhtar Hussain Sahir, "Automated optimization of HVAC system configurations," , 2010.
12. Milward, R., Prijyanonda, J., 2005. Electric tankless water heating: competitive assessment. Global Energy Partners, LLC, Lafayette, CA. 1285-5
13. Delport, G.J., 2005. The Geyser Gadgets that work/do not work. In: Proceedings of the 13th Domestic Use of Energy Conference. pp. 139–144.
14. Lutz, James D., Klein, Gary, Springer, David, Howard, Bion D., 2002. Residential hot water distribution systems: Roundtable session. Lawrence Berkeley National Laboratory.
15. Roux, Le, Gabriel, Willem, 2016. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data. Renew. Energy 96, 603–612.

16. Joubert, E.C., Hess, S., Van Niekerk, J.L., 2016. Large-scale solar water heating in South Africa: Status, barriers and recommendations. Renew. Energy 97, 809– 822.
17. Jamar, A.M.Z.A.A., Majid, W.H., Azmi, M., Norhafana, Z.A.A., Razak, A.A., 2016. A review of water heating system for solar energy applications. Int. Commun. Heat Mass Transfer 76, 178–187.
18. Liu, Zhijian, Wang, Yifei, Xie, Zhiping, Yu, Hancheng, Ma, Wensheng, 2017b. The related problems and development situation of air source heat pump in the cold and serve cold climate areas. Procedia Eng. 205, 368–372.
19. Hepbasli, Arif, Kalinci, Yildiz, 2009. A review of heat pump water heating systems. Renewable and Sustainable Energy Rev. s13 (6), 1211–1229.
20. ASHRAE, ASHARE Handbook: HVAC Systems and Equipment.: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2008, vol. SI Edition.
21. Hans-Martin Henning, Solar-assisted Air-conditioning in Buildins: A Handbook for Planners.: Springer, 2003, vol. 1.
22. https://renewablelab.files.wordpress.com/2013/04/cf86cebfcf81cf84ceb9ceb1.pdf
23. https://www.cedengineering.com/userfiles/HVAC%20Design%20for%20Cleanroom %20Facilities.pdf
24. https://www.cedengineering.com/userfiles/HVAC%20Design%20for%20Cleanroom %20Facilities.pdf
25. P.A. Hohne , K. Kusakana , B.P. Numbi 2018, A review of water heating technologies: An application to the South African context., Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Central University of Technology, Free State Bloemfontein, South Africa
26. Muzaffar Ali 2013, Optimization of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning (HVAC) System Configurations Department of Mechanical Engineering Faculty of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Engineering & Technology Taxila, Pakistan 2013https://www.cedengineering.com/userfiles/HVAC%20Design%20for%20Cleanroom%20Facilities.pdf
27. https://www.google.com/search?rlz=1C1AVFC_enGR761GR761&biw=1536&bih=674&tbm=isch&sxsrf=ACYBGNTh2auzRcaEuOAchXSFRzpJkPab1g%3A1568032515930&sa=1&ei=A0d2XdK2OMT4kwXmwpmYCA&q=bag+filters&oq=bag+filters&gs_l=img.3..0i19l10.15339.17838..17954...0.0..1.589.2529.0j3j6j5-1....2..0....1..gws-

wiz-
img.....35i39j0j0i67j0i30.Nl9atAXeb6Y&ved=0ahUKEwiSxO6o4MPkAhVE_KQKHWZhBoMQ4dUDCAY&uact=5#imgrc=qz8z6VarlSRaWM:

28. https://www.google.com/search?q=hepa+filter&rlz=1C1AVFC_enGR761GR761&sxsrf=ACYBGNSlWypNLA8RM87QfPrG3BTG1ga6WA:1568032679175&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjWl9r24MPkAhWeRxUIHZdNDDwQ_AUIEigB&biw=1536&bih=674#imgrc=kHDtGEgNpjaSUM:
29. https://www.google.com/search?q=ulpa+filter&rlz=1C1AVFC_enGR761GR761&sxsrf=ACYBGNRS9ZPwc-5YlKmuza3Pz2UAUvYg6w:1568032995644&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjT9s2N4sPkAhWLzaQKHQHVAlsQ_AUIEigB&biw=1536&bih=674#imgrc=QgL82h_Cp6AHuM:
30. https://www.cedengineering.com/userfiles/HVAC%20Design%20for%20Cleanroom%20Facilities.pdf
31. https://www.google.com/search?q=clean+room+work+benches&rlz=1C1AVFC_enGR761GR761&sxsrf=ACYBGNTNp_w9EP5Fqs-Smf8j82jaYc-yZQ:1568033752178&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj4ha325MPkAhVDKVAKHZQwBmAQ_AUIEigB&biw=1536&bih=674&dpr=1.25
32. https://www.google.com/search?rlz=1C1AVFC_enGR761GR761&biw=1536&bih=674&tbm=isch&sxsrf=ACYBGNREKeDTWLqQ5O7GCQKKYT9EmQe83Q%3A1568034527529&sa=1&ei=3052Xe7vH4qq1fAP5aSz6AQ&q=heat+gain+cooling+load+diagram&oq=heat+gain+cooling+load+diagram&gs_l=img.3...49376.54231..54455...0.0..0.183.3368.0j25.....0....1..gws-wiz-img.....35i39j0i19j0i30j0i5i30j0i8i30j0i24.s4QvFLe0BIk&ved=0ahUKEwiu24jo58PkAhUKVRUIHWXSDE0Q4dUDCAY&uact=5#imgrc=anDKUl35xW05tM:
33. https://renewablelab.files.wordpress.com/2013/04/cf86cebfcf81cf84ceb9ceb1.pdf
34. Energy Plus [Online]: https://energyplus.net/
35. Energy Plus [Online]: https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf
36. https://ipsdb.com/files/docs/13SO-Capparella.pdf?fbclid=IwAR00GfNh1gQTn_t6MRyHEccCmrXz2NQtkbAsmQyPzBktlJ12uPU0caB9sAQ