



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

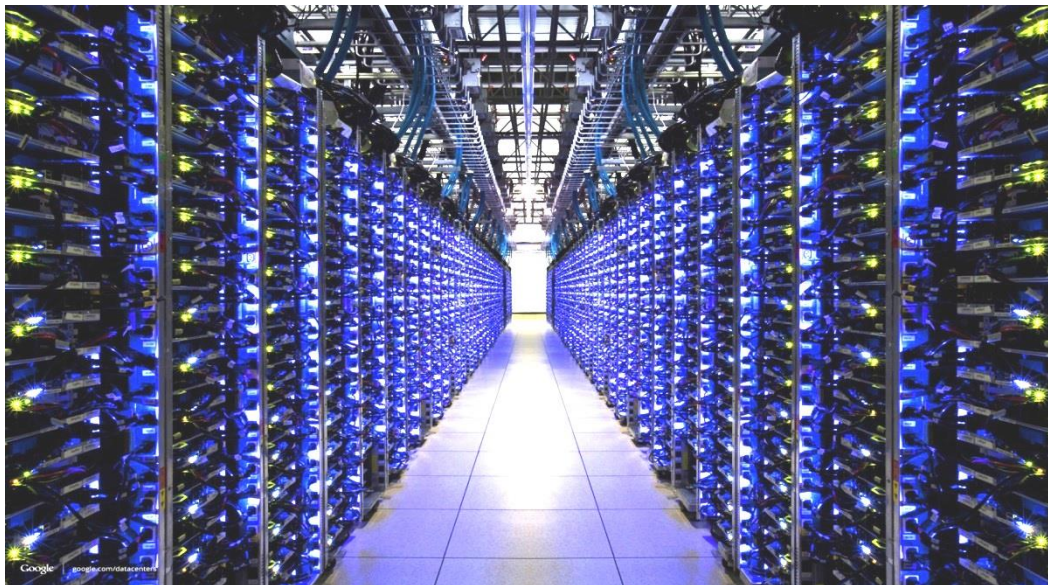
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### **Διπλωματική εργασία**

«Ενεργειακά αποδοτικές λύσεις για ψύξη σε υπολογιστικά κέντρα»  
(data centers)



**Ευγενία Διονυσοπούλου**

**Τριμελής επιτροπή:**

Δ. Κολοκοτσά (επιβλέπουσα)

Θ. Τσούτσος

Μ. Λαζαρίδης

Χανιά, Μάρτιος 2015

## Ευχαριστίες

*Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το κύκνειο άσμα των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και ταυτόχρονα τη δίοδο προς την περαιτέρω εξέλιξη και υλοποίηση των επαγγελματικών μου στόχων.*

*Με το πέρας της φοίτησής μου θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερως την Επίκουρη Καθηγήτρια κυρία Διονυσία Κολοκοτσά για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Σωτήρη Παπαντωνίου. Η καθοδήγηση και οι χρήσιμες συμβουλές τους αποδείχθηκαν καταλυτικές τόσο για την ανάπτυξη, όσο και για την ολοκλήρωση της εργασίας.*

*Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Μιχαήλ Λαζαρίδη και τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο, τόσο για την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή, όσο και για το χρόνο που διέθεσαν κατά τη μελέτη και παρουσίαση της εργασίας μου.*

*Επιπροσθέτως, θα ήθελα να αναφέρω πως οι φιλίες των παιδικών μου χρόνων, αλλά και όσες ανέπτυξα στη φοιτητική μου πορεία συνετέλεσαν όλα αυτά τα χρόνια στη συλλογή μοναδικών εμπειριών και όμορφων αναμνήσεων, για τις οποίες τους ευχαριστώ.*

*Ωστόσο, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, η στάση των οποίων είναι ιδιαίτερα σημαντική για μένα, καθώς με στηρίζουν με αγάπη και υπομονή σε όλα τα βήματα της ζωής μου και χωρίς την υποστήριξή τους θα ήταν αδύνατη η περάτωση των σπουδών μου.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στον κατακλυσμό του σύγχρονου κόσμου από πληροφορίες και ηλεκτρονικά δεδομένα, τα οποία χρήζουν αποτελεσματικής διαχείρισης και αποθήκευσης. Στρατηγικές διαχείρισης των δεδομένων αναπτύσσονται στα υπολογιστικά κέντρα, τα οποία είναι ευρέως γνωστά κυρίως με τον αγγλικό όρο data centers. Η ύπαρξη των κέντρων αυτών είναι καταλυτική για τους περισσότερους κλάδους επαγγελμάτων, όπως είναι η πληροφορική, η βιομηχανία, η ιατρική, η κινητή τηλεφωνία.

Ωστόσο, η αδιάλειπτη λειτουργία των υπολογιστικών κέντρων συνδέεται άρρηκτα με την υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η οποία σύμφωνα με στατιστικές έρευνες αντιστοιχεί στο 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Ταυτόχρονα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή της απαραίτητης ενέργειας, ζημιώνουν ανεπανόρθωτα το περιβάλλον. Επομένως, οι μελετητές των υπολογιστικών κέντρων στρέφουν το ενδιαφέρον τους στην εύρεση καινοτόμων και ενεργειακά αποδοτικών λύσεων, που αφορούν κυρίως στην αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την εύρεση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων για την ψύξη ενός ήδη υπάρχοντος υπολογιστικού κέντρου στην Ανκόνα της Ιταλίας. Με τη βοήθεια του λογισμικού TRNSYS εξετάστηκαν κάποια σενάρια αλλαγών στο σύστημα ψύξης, τόσο μεμονωμένα όσο και συνδυαστικά. Συγκεκριμένα, με σκοπό την αποφυγή, όσο ήταν εφικτό, της λειτουργίας των παραδοσιακών μηχανημάτων ψύξης αναπτύχθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια εφαρμογής φυσικής ψύξης : έμμεση φυσική ψύξη με νερό, φυσικός αερισμός και άμεση φυσική ψύξη με νερό ποταμού, ενώ εξετάστηκε και ένα σενάριο βελτίωσης της αποδοτικότητας των υπολογιστών. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των παραπάνω σεναρίων συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους, όσο και με το αρχικό σύστημα ψύξης του υπολογιστικού κέντρου και οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός συνδυαστικού σεναρίου, το οποίο αποδείχθηκε ως εξαιρετικά αποδοτικό.

Στα πλαίσια του συνδυαστικού σεναρίου, επιτεύχθηκε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 25.1% επί της συνολικής αρχικής ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και ειδικότερα 41,7% επί της ενέργειας που καταναλώνεται ετησίως για ψύξη. Τέλος, είναι αξιοσημείωτη η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 25.1%.

## **ABSTRACT**

The rapid advancement of technology has led to the flood of the modern world with information and electronic data, which require efficient management and storage. Data management strategies are developed in data centers. The existence of these centers is crucial for most professional fields, such as computer science, industry, medicine and mobile technology.

However, the uninterrupted operation of data centers is closely associated with high energy consumption, which according to surveys, accounts for 2% of global energy consumption. Simultaneously, the combustion of fossil fuels, with the purpose of meeting the energy needs in data centers, causes remarkable carbon emissions, which irreparably damage the environment. Therefore, scholars of data centers focus on finding innovative and energy-efficient solutions, relating mainly to the replacement of conventional energy sources with renewable sources.

This thesis refers to finding energy efficient cooling solutions for an existing data center in Ancona, Italy. With the help of TRNSYS software, five change scenarios were tested in the primary cooling system, both separately and in combination. Specifically, in order to avoid, as was possible, the operation of traditional cooling units, three different free cooling scenarios were applied: indirect waterside freecooling, direct airside free cooling and direct waterside free cooling by using river water. Moreover, one more scenario was tested concerning an upgrade of the servers. The results of modeling were compared with each other and with the data's center primary cooling system and led to the development of a combinatorial scenario, which was proved to be very efficient.

In the context of combinatorial scenario achieved energy savings -25.1% of the total annual initial energy consumption and particularly -41.7% of the energy consumed annually for cooling. Finally, it is worth noting the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by 25.1%.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	viii
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ .....	1
1.2 ΔΟΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ.....	2
1.3 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	3
1.4 ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ .	4
1.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΗΣ ASHRAE .....	5
<b>2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ .....</b>	<b>8</b>
2.1 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΜΕΣΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ .....	8
2.2 ΑΠΟΔΟΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ .....	9
2.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	10
2.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO <sub>2</sub> ).....	13
2.5 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ (GREEN DATA CENTERS) .....	15
2.5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ .....	18
2.6 ΦΥΣΙΚΗ ΨΥΞΗ.....	23
2.6.1 Φυσική ψύξη με αέρα.....	26
2.6.1.1 Άμεσος φυσικός αερισμός (Direct Airside Free Cooling) .....	26
2.6.1.2 Έμμεση φυσική ψύξη με αέρα (Indirect Airside Free Cooling).....	28
2.6.2 Φυσική ψύξη με νερό .....	29
2.6.2.1 Άμεση φυσική ψύξη με νερό (Direct Waterside Free Cooling) .....	29
2.6.2.2 Έμμεση Φυσική Ψύξη με νερό (Indirect Waterside Free Cooling).....	30

<b>3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ .....</b>	<b>34</b>
3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	34
3.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ.....	35
3.2 ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ .....	36
<b>4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>42</b>
<b>5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΟΡ ...</b>	<b>50</b>
5.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ .....	51
5.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ .....	54
5.2.1 Σενάριο έμμεσης φυσικής ψύξης με νερό .....	55
5.2.2 Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με αέρα.....	59
5.2.3 Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με νερό .....	65
5.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ .....	69
5.4 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΛΛΑΓΩΝ .....	71
5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ .....	74
<b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ</b>	
<b>ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....</b>	<b>79</b>
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	79
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	80
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>83</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: 2011 ASHRAE - Ορισμός κατηγοριών .....	6
Πίνακας 2. Θερμικές κατευθυντήριες γραμμές ASHRAE 2011 .....	6
Πίνακας 3: ASHRAE 2011- Ψύξη με υγρό.....	7
Πίνακας 4: Εκπομπές CO <sub>2</sub> SMART 2020).....	14
Πίνακας 5: Κατηγορίες φυσικής ψύξης.....	25
Πίνακας 6: Αρχικές είσοδοι στο TRNSYS .....	45
Πίνακας 7: Τιμές συντελεστών μετατροπής για την Ιταλία .....	53
Πίνακας 8: Αρχική ετήσια κατανάλωση ενέργειας .....	53
Πίνακας 9: Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 1 .....	56
Πίνακας 10: Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 1 .....	57
Πίνακας 11: Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 2 .....	62
Πίνακας 12: Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 2 .....	63
Πίνακας 13: Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 3 .....	66
Πίνακας 14: Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 3 .....	67
Πίνακας 15: Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 4 .....	69
Πίνακας 16: Είσοδοι συνδυαστικού σεναρίου στο TRNSYS .....	71
Πίνακας 17: Κατανάλωση ενέργειας - Συνδυαστικό σενάριο.....	72
Πίνακας 18: Ετήσιες εκπομπές CO <sub>2</sub> για όλα τα σενάρια.....	76

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Συστήματα που στεγάζονται στα υπολογιστικά κέντρα .....	2
Εικόνα 2: Παράδειγμα εσωτερικής διάταξης των υπολογιστικών .....	3
Εικόνα 3: Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε ένα μέσο υπολογιστικό .....	8
Εικόνα 4: Ενεργειακή κατάταξη εταιρειών .....	16
Εικόνα 5: Παγκόσμιες προβλεπόμενες επενδύσεις στα Green Data Centers: 2009-2015 ..	17
Εικόνα 6: Το Lulea Green Data Center.....	19
Εικόνα 7: Υδροηλεκτρικός σταθμός Akkats.....	19
Εικόνα 8. Μέσα στο green arctic data center της Facebook .....	20
Εικόνα 9: Green Data Center της Apple.....	21
Εικόνα 10: Φωτοβολταϊκά συστήματα της Apple.....	21
Εικόνα 11:Το data center στην Hamina Φινλανδίας.....	22
Εικόνα 12: Αιολικό πάρκο στη Σουηδία .....	22

Εικόνα 13: Εξοικονομητής αέρα .....	24
Εικόνα 14: Σχηματικό διάγραμμα άμεσου φυσικού αερισμού .....	26
Εικόνα 15: Σύστημα Kyoto .....	28
Εικόνα 16: Το πλωτό data center Maine barge της Google .....	29
Εικόνα 17: Σύστημα ψύξης με δύο πηνία .....	30
Εικόνα 18: Σύστημα παράκαμψης του ψύκτη μέσω εναλλάκτη .....	31
Εικόνα 19: Σύστημα ψύξης που συνδυάζει φυσική ψύξη και ηλιακή ενέργεια.....	32
Εικόνα 20: Νοσοκομείο Riuniti.....	34
Εικόνα 21: AOR Data Center .....	34
Εικόνα 22: Διάταξη θερμών/ψυχρών διαδρόμων.....	35
Εικόνα 23: Τα κύρια μέρη ενός ψύκτη.....	37
Εικόνα 24: Πύργοι Ψύξης.....	38
Εικόνα 25: Dry Coolers .....	38
Εικόνα 26: Διάγραμμα συστήματος ψύξης (κύριο και εφεδρικό).....	41
Εικόνα 27: Περιβάλλον προσομοίωσης του υπό μελέτη συστήματος στο TRNSYS .....	43
Εικόνα 28: Προσομοίωση αρχικού συστήματος ψύξης στο TRNSYS .....	44
Εικόνα 29: Βήματα που ακολουθήθηκαν .....	50
Εικόνα 30: Φυσικός αερισμός σε υπολογιστικό κέντρο.....	59
Εικόνα 31: Απαιτούμενες αλλαγές αέρα σε υπολογιστικά κέντρα .....	60
Εικόνα 32: Τμήμα ποταμού Esino.....	65
Εικόνα 33: Προσομοίωση του σεναρίου 3 στο TRNSYS .....	66
Εικόνα 34: Ψύξη του Douglas County Data Center με νερό επαναχρησιμοποίησης.....	81
Εικόνα 35: Ανανεώσιμες πηγές στα υπολογιστικά κέντρα .....	82

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Εκπομπές CO <sub>2</sub> από data centers 2002-2020 .....	15
Διάγραμμα 2: Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας, Ρύθμιση θερμοκρασίας αίθουσας υπολογιστών .....	51
Διάγραμμα 3: Ετήσια διακύμανση δείκτη PUE, Ρύθμιση σχετικής υγρασίας.....	52
Διάγραμμα 4: Μηνιαία κατανομή της συνολικής ενέργειας στην αρχική κατάσταση .....	54
Διάγραμμα 5: Σενάριο Έμμεσης ψύξης με νερό .....	58
Διάγραμμα 6: Ετήσια διακύμανση σχετικής υγρασίας .....	61
Διάγραμμα 7: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη - Σενάριο φυσικού αερισμού .....	64



Διάγραμμα 8: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη -Σενάριο άμεσης ψύξης με νερό ποταμού /Περίοδος μοντελοποίησης: Αύγουστος-Σεπτέμβριος .....	68
Διάγραμμα 9: Ετήσια κατανάλωση συνολικής ενέργειας - Σενάριο βελτίωσης H/Y .....	70
Διάγραμμα 10: Ετήσια κατανάλωση συνολικής ενέργειας - Συνδυαστικό σενάριο .....	72
Διάγραμμα 11: Μηνιαία κατανομή της συνολικής ενέργειας στο συνδυαστικό σενάριο...	73
Διάγραμμα 12: Σύγκριση σεναρίων ως προς τη μείωση ετήσιων εκπομπών CO <sub>2</sub> .....	77
Διάγραμμα 13: Σύγκριση σεναρίων ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη.....	74
Διάγραμμα 14: Σύγκριση σεναρίων ως προς την ετήσια κατανάλωση ενέργειας από τον ψύκτη.....	75
Διάγραμμα 15: Σύγκριση ετήσιας διακύμανσης του δείκτη PUE.....	78

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ

Τα υπολογιστικά κέντρα ή αλλιώς data centers είναι εγκαταστάσεις που στεγάζουν συστήματα υπολογιστών, με σκοπό τη διαχείριση, την αποθήκευση και την επεξεργασία ψηφιακών δεδομένων.

Η λειτουργία τους εξαπλώθηκε ουσιαστικά από τη στιγμή που το διαδίκτυο εισέβαλε καθοριστικά στην ανθρώπινη καθημερινότητα. Τα δεδομένα που στεγάζονται στα υπολογιστικά κέντρα προέρχονται από διάφορους κλάδους επαγγελματιών. Καθημερινά και σε παγκόσμιο επίπεδο διακινούνται σε αυτά εκατομμύρια εκπαιδευτικά, κρατικά, ιατρικά, νομικά, τραπεζικά δεδομένα, πληροφορίες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και προσωπικά δεδομένα χρηστών κοινωνικών δικτύων (**Cho et.al., 2012**). Επομένως κρίνεται αναγκαία η λειτουργία τους 24 ώρες την ημέρα, με σκοπό την εξυπηρέτηση χιλιάδων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε υπολογιστές (servers), οι οποίοι είναι στοιβαγμένοι σε ράφια (racks) μέσα στο υπολογιστικό κέντρο.

Ένα υπολογιστικό κέντρο μπορεί να εγκατασταθεί είτε μέσα σε ένα ήδη υπάρχον κτίριο, διαμορφώνοντας κατάλληλες συνθήκες στέγασης για τους υπολογιστές, είτε σε ένα κτίριο που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για αυτόν το σκοπό. Ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετούν, το μέγεθός τους κυμαίνεται από ένα μικρό δωμάτιο με υπολογιστές μέχρι τεράστιους πολυχώρους εξοπλισμένους με υπολογιστές και άλλες μονάδες υποστήριξης.

## 1.2 ΔΟΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ

Αξίζει αρχικά να αναφερθεί, ότι τα υπολογιστικά κέντρα δε σχεδιάζονται για ανθρώπους, αλλά για υπολογιστές, με αποτέλεσμα να διαθέτουν συνήθως ελάχιστη είσοδο εξωτερικού αέρα και καθόλου παράθυρα. Σε ένα υπολογιστικό κέντρο στεγάζονται:

**1) συστήματα πληροφορικής, 2) μονάδες υποστήριξης των συστημάτων πληροφορικής και 3) συστήματα ψύξης,** τα οποία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω, ενώ κάποια από αυτά τα συστήματα απεικονίζονται στην εικόνα 1. (Mackay n.d.)

<u>IT εξοπλισμός :</u>	<u>Μονάδες υποστήριξης:</u>	<u>Σύστημα ψύξης:</u>
❖ υπολογιστές (servers)	❖ διακόπτες	❖ ψύκτες (chillers)
❖ ράφια (racks)	❖ γεννήτριες	❖ πύργοι ψύξης (cooling towers)
❖ Συσκευές αποθήκευσης	❖ μονάδα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)	❖ κλιματιστικές μονάδες υπολογιστών (CRACs)
❖ Ρυθμιστές τάσης	❖ μπαταρίες	❖ βαλβίδες
	❖ μονάδα διανομής ισχύος (PDU)	❖ αντλίες



Εικόνα 1: Συστήματα που στεγάζονται στα υπολογιστικά κέντρα (Fiberlink, 2014)



Εικόνα 2: Παράδειγμα εσωτερικής διάταξης των υπολογιστικών κέντρων (Fiberlink, 2014)

### 1.3 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Οι διαχειριστές των υπολογιστικών κέντρων ενδέχεται, είτε να διαχειρίζονται τα δεδομένα της δικής τους επιχείρησης, είτε να συνεργάζονται με διάφορες άλλες επιχειρήσεις, οι οποίες τους εμπιστεύονται τα δεδομένα τους. Σε κάθε περίπτωση ένα υπολογιστικό κέντρο πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Αξιοπιστία:** Κατά τη λειτουργία του κέντρου είναι σημαντικό να μην παρουσιάζονται συχνά βλάβες των συστημάτων. Για παράδειγμα, ενδέχεται δύο κέντρα να έχουν την ίδια διαθεσιμότητα, αλλά εκείνο που παρουσιάζει σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα λιγότερες πιθανές βλάβες σε σύγκριση με το άλλο, θεωρείται περισσότερο αξιόπιστο.
- **Διαθεσιμότητα:** Ο όρος αυτός εκφράζει το μέσο χρόνο ανά καθορισμένη χρονική περίοδο (συνήθως ανά έτος) στον οποίο η λειτουργία του υπολογιστικού κέντρου δεν διακόπτεται από κάποια βλάβη.
- **Πλεονασμός:** Ο όρος αυτός περιλαμβάνει την ύπαρξη εναλλακτικών λύσεων και υποδομών στην περίπτωση που διακοπεί απότομα η λειτουργία κάποιων συστημάτων του υπολογιστικού κέντρου. Προτείνεται, δηλαδή, σε περίπτωση βλάβης να ενεργοποιείται εφεδρικός εξοπλισμός, ώστε να μη χάνονται σημαντικά δεδομένα. (Whitehead et.al., 2014)

## 1.4 ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στα συστήματα πληροφορικής ακολουθεί την παρακάτω διαδρομή:

**1.**

Ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται σε μία μονάδα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)

- Το UPS λειτουργεί ως εφεδρική μπαταρία, ώστε να μην υπάρχει κανένα ενδεχόμενο απώλειας σημαντικών δεδομένων σε μία πιθανή διακοπή ρεύματος.
- Η τάση μετατρέπεται στο UPS από εναλλασσόμενη σε συνεχή για να φορτιστούν οι μπαταρίες.
- Στη συνέχεια η τάση μετατρέπεται ξανά από συνεχή σε εναλλασσόμενη στην έξοδο του UPS.

**2.**

Η ισχύς εισέρχεται στη μονάδα διανομής ρεύματος (PDU)

- Το ρεύμα διανέμεται μέσω του PDU στα ράφια (racks) και κατά συνέπεια στους υπολογιστές
- Στο τροφοδοτικό (PSU) των υπολογιστών το ρεύμα μετατρέπεται από εναλλασσόμενο σε ρεύμα χαμηλής συνεχούς τάσης

**3.**

Ρεύμα χαμηλής συνεχούς τάσης τροφοδοτεί τα εσωτερικά στοιχεία των υπολογιστών

- Τα εσωτερικά στοιχεία των υπολογιστών περιλαμβάνουν την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), τους σκληρούς δίσκους, τη μνήμη και τους ανεμιστήρες
- Ρεύμα λαμβάνουν επίσης και οι συσκευές αποθήκευσης καθώς και ο εξοπλισμός δικτύου, ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση και η αποθήκευση των δεδομένων

(Mackay , n.d.)

## 1.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΗΣ ASHRAE

### 1.5.1 ASHRAE

Η **ASHRAE** (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), που ιδρύθηκε το 1894, είναι μία οργάνωση τεχνολογίας κτιρίων με περισσότερα από 54000 μέλη παγκοσμίως. Η οργάνωση και τα μέλη της εστιάζουν στα κτιριακά συστήματα, την ενεργειακή απόδοση, την ποιότητα του εσωτερικού αέρα, καθώς και στην ψύξη και την αειφορία στη βιομηχανία.

Όσον αφορά στον τομέα των υπολογιστικών κέντρων, η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας τους, η δημιουργία όλο και περισσότερων εφαρμογών πληροφορικής και η έλλειψη μιας κατευθυντήριας γραμμής για τη διαχείριση των συστημάτων ψύξης τους, δημιούργησαν την ανάγκη ύπαρξης ενός κοινού πλαισίου επικοινωνίας για όλους τους διαχειριστές των υπολογιστικών κέντρων παγκοσμίως. **(Steinbrecher et al., 2011)**

Η ASHRAE TC 9.9 εξέδωσε τις πρώτες Θερμικές Κατευθυντήριες γραμμές για υπολογιστικά κέντρα το 2004. Η δεύτερη έκδοση, που πραγματοποιήθηκε το 2008, ήταν ουσιαστικά μία επέκταση της προηγούμενης με σκοπό να δώσει τη δυνατότητα στα υπολογιστικά κέντρα να εφαρμόσουν πιο εύκολα μεθόδους φυσικής ψύξης. Τέλος, το 2011 κυκλοφόρησε η τρίτη έκδοση Θερμικών κατευθυντήριων γραμμών από την ASHRAE, όπου περιλαμβάνεται αύξηση των επιτρεπτών ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας στο εσωτερικό των υπολογιστικών κέντρων. Κατά αυτόν τον τρόπο, ευνοείται πλέον σε μεγάλο βαθμό η φυσική ψύξη και επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της λειτουργίας των παραδοσιακών κλιματιστικών μονάδων, γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας και βέλτιστη ενεργειακή απόδοση των συστημάτων. Στον πίνακα1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες, στις οποίες διαχωρίζονται οι διάφοροι χώροι ηλεκτρονικού εξοπλισμού σύμφωνα με την τρίτη έκδοση της ASHRAE το 2011, καθώς και ο περιβαλλοντικός έλεγχος που δέχονται. **(Facilities, Spaces and Equipment 2011)**

Πίνακας 1: 2011 ASHRAE - Ορισμός κατηγοριών

Κατηγορίες 2011	Εφαρμογές	Εξοπλισμός Τεχνολογίας Πληροφοριών	Περιβαλλοντικός Έλεγχος
A <sub>1</sub>	Υπολογιστικό Κέντρο (Data Center)	Υπολογιστές Επιχείρησης, Προϊόντα αποθήκευσης	Αυστηρός Έλεγχος
A <sub>2</sub>		Υπολογιστές, Προϊόντα αποθήκευσης, Ατομικοί υπολογιστές, Σταθμοί εργασίας	Μερικός Έλεγχος
A <sub>3</sub>			Μερικός Έλεγχος, Χρήση τεχνικών φυσικής ψύξης όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν
A <sub>4</sub>			Μερικός Έλεγχος, Χρήση τεχνικών φυσικής ψύξης σχεδόν όλο το χρόνο
B	Γραφείο, Σπίτι	Ατομικοί υπολογιστές, Laptops, Εκτυπωτές	Ελάχιστος έλεγχος
C	Εμπορικό κέντρο, Βιομηχανία, Εργοστάσιο	Εξοπλισμός εμπορικών κέντρων, Ενισχυμένοι ελεγκτές, Υπολογιστές	Κανένας έλεγχος

Ο πίνακας 2 περιλαμβάνει το εύρος επιτρεπτών ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας για κάθε κατηγορία υπολογιστικού κέντρου. Παρουσιάζονται, επίσης, οι τιμές που προτείνει η ASHRAE για τις παραπάνω παραμέτρους.

Πίνακας 2. Θερμικές κατευθυντήριες γραμμές ASHRAE 2011

Εύρος τιμών	Κατηγορία	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία RH (%)
Προτεινόμενες	A	18-27	60%
Επιτρεπτές	A <sub>1</sub>	15-32	20%-80%
	A <sub>2</sub>	10-35	20%-80%
	A <sub>3</sub>	5-40	8%-80%
	A <sub>4</sub>	5-45	8%-90%
	B	5-35	8%-80%
	C	5-40	8%-80%

Πολλά υπολογιστικά κέντρα μπορούν πλέον να ενταχθούν στις δύο νέες κατηγορίες A<sub>3</sub> και A<sub>4</sub>, που προστέθηκαν στην τρίτη έκδοση της ASHRAE το 2011. Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα σε ένα υπολογιστικό κέντρο μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει πλέον τους 30°C, κάτι που στο παρελθόν δεν ήταν επιτρεπτό.

Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι ο διαχειριστής είναι αυτός που κρίνει σε ποια κατηγορία θα εντάξει το υπολογιστικό κέντρο του, εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας (Lee and Chen 2013).

Ωστόσο, εκτός από τον αέρα, η χρήση νερού για την ψύξη των πληροφοριακών συστημάτων (IT εξοπλισμός) είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται πολύ τα τελευταία χρόνια και κινεί το ενδιαφέρον όλο και περισσότερων διαχειριστών. Η ικανότητα του νερού να μεταφέρει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα όγκου (ή μάζας) προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου. Στην τρίτη έκδοση της ASHRAE το 2011 περιέχονται πέντε κατηγορίες υπολογιστικών κέντρων που χρησιμοποιούν υγρό για την ψύξη του εξοπλισμού τους. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι κατηγορίες αυτές, ο κύριος και ο συμπληρωματικός εξοπλισμός ψύξης για κάθε κατηγορία, καθώς και το εύρος των επιτρεπτών ορίων θερμοκρασίας του νερού που τροφοδοτεί την εγκατάσταση. (Facilities, Spaces and Equipment 2011)

Πίνακας 3: ASHRAE 2011- Ψύξη με υγρό (Kaiser et al. n.d.)

Κατηγορίες ψύξης με υγρό	Τυπικός σχεδιασμός υποδομής		Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας στην εγκατάσταση
	Κύριος εξοπλισμός απόρριψης θερμότητας	Συμπληρωματικός εξοπλισμός ψύξης	
W <sub>1</sub>	Ψύκτης / Πύργος Ψύξης	Εξοικονομητής νερού (Με Dry cooler ή Πύργο ψύξης)	2°C έως 17°C
W <sub>2</sub>			2°C έως 27°C
W <sub>3</sub>	Πύργος Ψύξης	Ψύκτης	2°C έως 32°C
W <sub>4</sub>	Εξοικονομητής νερού (Με Dry cooler ή Πύργο ψύξης)	Δεν υπάρχει	2°C έως 45°C
W <sub>5</sub>	Κεντρικό σύστημα θέρμανσης (Building Heating System)	Πύργος Ψύξης	>45°C

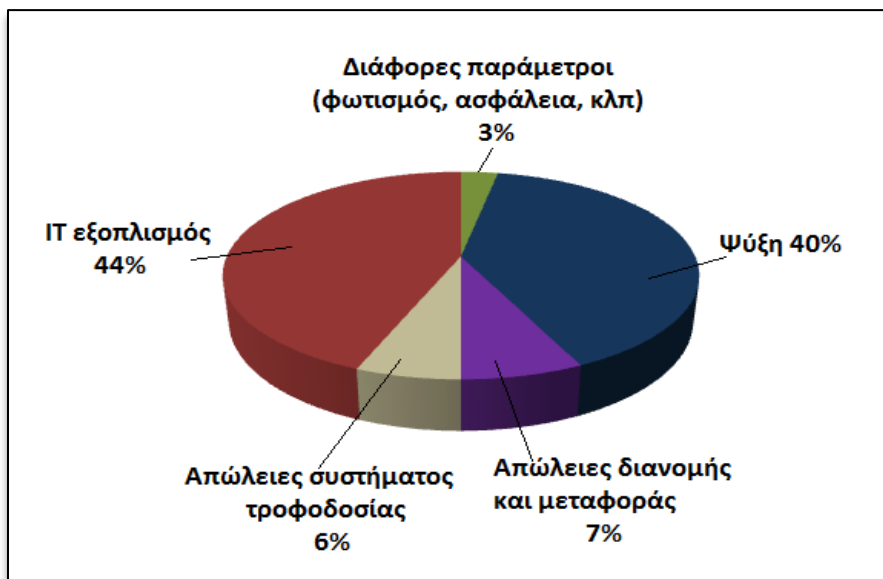


## 2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ

### 2.1 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΜΕΣΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ

Η συνεχής λειτουργία τόσο των πληροφοριακών συστημάτων, όσο και των μηχανημάτων ψύξης, έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας. Υπολογίζεται μάλιστα ότι τα υπολογιστικά κέντρα καταναλώνουν 40 φορές περισσότερη ενέργεια από ένα κτίριο με γραφεία (Choo, et.al., 2014).

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας, όπως συνήθως απαντάται σε ένα μέσο υπολογιστικό κέντρο. Είναι αξιοπρόσεκτο, πως για την ψύξη των υπολογιστών απαιτείται περίπου η ίδια ενέργεια με αυτήν που απαιτείται για τη λειτουργία τους (Zhang, et.al. 2014).



Εικόνα 3: Ποσοστιαία κατανομή ενέργειας σε ένα μέσο υπολογιστικό κέντρο, (Zhang et al. 2014)

## 2.2 ΑΠΟΔΟΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Τα υπολογιστικά κέντρα διαχειρίζονται αδιαλείπτως πληροφορίες και δεδομένα, με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων θερμικών φορτίων, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται με στόχο την ορθή λειτουργία του εξοπλισμού. Κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό επομένως, κατά την κατασκευή ενός υπολογιστικού κέντρου να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο ροής του αέρα. Στα περισσότερα κέντρα, κλιματιστικές μονάδες αναλαμβάνουν την ψύξη των μηχανημάτων και του χώρου και τοποθετούνται συνήθως στο δάπεδο του κέντρου. Τα κλιματιστικά περιλαμβάνουν ανεμιστήρες, φίλτρα και πηνία ψύξης. Σκοπός ενός συστήματος διαχείρισης αέρα είναι η αποφυγή της ανάμειξης του ψυχρού αέρα που παρέχεται στον IT εξοπλισμό και του θερμού αέρα που προέρχεται από αυτόν (Ebrahimi, et.al.,2014)

### Αποτελεσματικές μέθοδοι διαχείρισης αέρα

- Έλεγχος της ροής του αέρα στην αίθουσα υπολογιστών
- Πλάνο βέλτιστης τοποθέτησης των ραφιών (racks) στο χώρο
- Δημιουργία ψυχρών και θερμών διαδρόμων (cold / hot aisles)
- Αεριζόμενα ράφια (racks)
- Τοποθέτηση ευέλικτων εμποδίων ανάμειξης του αέρα
- Εγκατάσταση εσχάρων (grills) βελτιστοποιημένης παροχής και επιστροφής αέρα
- Τοποθέτηση διάτρητων πλακιδίων δαπέδου
- Φυσικός αερισμός χώρου
- Χρήση ανεμιστήρων μετατροπής συχνότητας (Zhang et al., 2014)
- Τοποθέτηση ψυκτών οροφής (Spanaki et al., 2014)

Επιπλέον, ως αποτέλεσμα της ταχείας ανάπτυξης των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων, εισήχθηκαν πρόσφατα στην αγορά **νέα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων** (WSNs: Wireless Sensor Networks), με σκοπό την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συνθηκών στα υπολογιστικά κέντρα.

Οι νέοι αυτοί αισθητήρες είναι μικρότεροι, περισσότερο αξιόπιστοι, πιο οικονομικοί και ελέγχουν τη θερμοκρασία, την υγρασία, τη χρήση ενέργειας και άλλες παραμέτρους, τόσο στο εσωτερικό του υπολογιστικού κέντρου, όσο και στο εξωτερικό περιβάλλον (Lajevardi, et.al, 2014). Αξίζει να τονιστεί ακόμα, πως ένα συχνό φαινόμενο στα υπολογιστικά κέντρα αποτελεί ο εντοπισμός **θερμών σημείων (hot spots)** σε κάποιους υπολογιστές (servers), γεγονός που δυσχεραίνει την ψύξη του χώρου (Fakhim et al. 2011). Αυτό το αυτοματοποιημένο σύστημα αισθητήρων παρακολουθήσεως συμβάλλει στη σωστή διαχείριση των θερμικών φορτίων και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα υπολογιστικά κέντρα (Lajevardi, et.al, 2014).

### 2.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Με στόχο την κατανόηση και τη σύγκριση της ενεργειακής κατανομής και απόδοσης ενός υπολογιστικού κέντρου έχουν προταθεί από την επιστημονική κοινότητα πολλοί χρήσιμοι δείκτες και συντελεστές.



Ο **IT-PEW** (IT productivity Per Embedded Watt = Παραγωγικότητα/watt) είναι ένας δείκτης που παρουσιάζει την απόδοση των υπολογιστών. Η μεγιστοποίηση του δείκτη αυτού αποτελεί πρόκληση για τους διαχειριστές των υπολογιστικών κέντρων.



Ο **PUE** θεωρείται ίσως ο πιο σημαντικός δείκτης, ο οποίος σχετίζεται με την απόδοση των υποδομών ενός υπολογιστικού κέντρου. Σε αυτήν την περίπτωση και σε αντίθεση με το δείκτη IT-PEW, οι διαχειριστές των κέντρων στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του PUE, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

(Yuventi and Mehdizadeh, 2013)



Ο **GEC** (Green energy coefficient) είναι από περιβαλλοντική σκοπιά ένας ιδιαίτερα σημαντικός συντελεστής, καθώς αναφέρεται στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσα στο κέντρο, υπολογίζοντας το λόγο :

$$GEC = \frac{\text{Ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές}}{\text{Συνολική ενέργεια}}$$

(Whitehead et al., 2014)



Ο **ERE** (Energy Reuse Effectiveness) είναι ένας δείκτης που αφορά στην ενεργειακή απόδοση ενός υπολογιστικού κέντρου, εξετάζοντας την ενέργεια που μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Ο ERE υπολογίζεται ως εξής:

$$ERE = \frac{P_{\text{DATACENTER}} + P_{\Psi\Upsilon\Xi\text{H}\Sigma} + P_{\text{ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ}}}{P_{\text{IT}}}$$

Όπου  $P_{\text{ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ}}$  = η ενέργεια που επαναχρησιμοποιείται σε μια δευτερεύουσα εφαρμογή, η οποία συνήθως είναι η θέρμανση ενός χώρου

### 2.3.1 ΔΕΙΚΤΗΣ PUE

Ο δείκτης **PUE** (Power Usage Effectiveness) προτάθηκε για πρώτη φορά το 2006 και καθιερώθηκε τυπικά το 2007 από την Green Grid, μία μη κερδοσκοπική οργάνωση επαγγελματιών πληροφορικής. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης σε ένα υπολογιστικό κέντρο (**Beitelmal and Fabris, 2014**). Συγκεκριμένα, παρουσιάζει το ποσοστό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του εξοπλισμού IT σε σχέση με τη συνολική ισχύ μιας εγκατάστασης και εκτιμάται με βάση την παρακάτω εξίσωση (**Brady et al., 2013**).

$$PUE = \frac{\text{Συνολική ενέργεια εγκατάστασης}}{\text{Ενέργεια ηλεκτρονικού εξοπλισμού}}$$

Ο PUE χρησιμοποιείται τόσο στο στάδιο του σχεδιασμού ενός υπολογιστικού κέντρου με στόχο την εκτίμηση της δυνητικής ενεργειακής του απόδοσης, όσο και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του, συμβάλλοντας στην αποτίμηση και την παρακολούθηση των ενεργειακών του απαιτήσεων. Ωστόσο, κατά το στάδιο του σχεδιασμού, όπως είναι λογικό, η τιμή του PUE είναι ενδεικτική και όχι απόλυτα ακριβής. Ο PUE θεωρείται ο πιο διαδεδομένος δείκτης απόδοσης και συγκεκριμένα υπολογίζεται ότι μέχρι το τέλος του 2015 θα χρησιμοποιείται από το 80% των μεγάλων υπολογιστικών κέντρων (**Whitehead et al., 2014**).

Η **βέλτιστη τιμή** που μπορεί να λάβει ο δείκτης PUE είναι η μονάδα, δηλαδή  $PUE=1$ . Αξίζει να σημειωθεί όμως, πως αυτό θα συνέβαινε μόνο υπό ιδανικές συνθήκες, καθώς στην πραγματικότητα πάντα παρατηρείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για την υποστήριξη του IT εξοπλισμού (**Brady et al., 2013**). Τιμή  $PUE=2$  σημαίνει πως από τη συνολική ισχύ που παρέχεται στο data center, το 50% χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του IT εξοπλισμού και το υπόλοιπο 50% για την ψύξη των servers και τη λειτουργία άλλων μονάδων υποστήριξης (**Beitelmal and Fabris 2014**). Σύμφωνα με έρευνες του Uptime Institute, η τιμή του PUE στα περισσότερα data centers κυμαίνεται κατά μέσο όρο από 1.8 έως 1.89 (**Yuventi and Mehdizadeh 2013**).

Παρά τη διαδεδομένη εφαρμογή του δείκτη PUE, εντοπίζονται κάποια προβλήματα ως προς τον καθορισμό του. Ένα από τα αυτά αφορά στην επιλογή των υποδομών του υπολογιστικού κέντρου που πρέπει να συμπεριληφθούν στον όρο της συνολικής ενέργειας ( $P_t$ ) της εξίσωσης. Κάποιοι θεωρούν πως ο όρος αυτός αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτείται αποκλειστικά και μόνο για την αδιάλειπτη λειτουργία των υπολογιστών. Με βάση την παράνω λογική, τα συστήματα φωτισμού, ασφάλειας, ακόμα και κάποια μηχανήματα ψύξης, τα οποία δε λειτουργούν συνεχώς, δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του  $P_t$ , καθώς οδηγούν σε εσφαλμένη τιμή του PUE και εμποδίζουν την ελαχιστοποίησή του. Επίσης, σύγχυση κατά τον υπολογισμό του  $P_t$  μπορεί να προκληθεί στην περίπτωση κτιρίων πολλαπλών ζωνών, όπου η ενέργεια μοιράζεται εκτός από τους υπολογιστές και σε άλλα συστήματα.

Στην περίπτωση αυτή προτείνεται ο υπολογισμός του **Partial PUE** (pPUE), ενός δείκτη παραπλήσιου με τον PUE. Ο pPUE υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε ζώνη του κέντρου (π.χ ζώνη ορόφου με τους υπολογιστές). Ωστόσο, το άθροισμα των pPUE κάθε ζώνης ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύει το συνολικό PUE όλης της εγκατάστασης (**Yuventi and Mehdizadeh 2013**).

## 2.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO<sub>2</sub>)

Η έντονη επισήμανση από τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης για την κλιματική αλλαγή και την επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη έχει ευαισθητοποιήσει την κοινή γνώμη παγκοσμίως. Λόγω του περιβαλλοντικού κινδύνου, οι επιχειρήσεις που δεν ακολουθούν στρατηγικές διαχείρισης φιλικές τους το περιβάλλον, δέχονται πλέον ποινικές κυρώσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το 2009 ο τομέας της πληροφορικής ευθυνόταν για το 3% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> στον πλανήτη. Οπότε η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι ένα οξύ πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου να διευκολυνθούν περαιτέρω εξελίξεις στα συστήματα πληροφορικής.

**Ειδικότερα στα υπολογιστικά κέντρα**, ένα πρόβλημα που εντοπίζεται συχνά είναι το γεγονός ότι περίπου το 90% των υπολογιστών παραμένουν αδρανείς για μεγάλο χρονικό διάστημα της ημέρας, ενώ δυστυχώς ταυτόχρονα καταναλώνουν υπέρογκα ποσά ενέργειας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τεράστιων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> (**Uddin and Rahman 2012**). Συγκεκριμένα, έρευνες δείχνουν, ότι ο μέσος όρος παραγωγής πραγματικού έργου από τους υπολογιστές αντιστοιχεί σε ποσοστό λιγότερο από 3% της συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας (**Beitelmal and Fabris 2014**).

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος έχουν δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια πολλοί κρατικοί και ιδιωτικοί περιβαλλοντικοί οργανισμοί. Για παράδειγμα, το **Climate Group** είναι μία μη κερδοσκοπική οργάνωση, η οποία συνεργάζεται παγκοσμίως με επιχειρήσεις και κυβερνήσεις, προωθώντας οικολογικές αρχές και τεχνολογίες με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το 2008 το Climate Group εξέδωσε μία αναφορά με το όνομα «**Smart 2020: Επιτρέποντας την οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην πληροφορική**». Η εν λόγω αναφορά παρουσιάζει μία έρευνα που αποδεικνύει πως η εφαρμογή εξυπνότερων τεχνολογιών πληροφορικής θα μπορούσε να επιφέρει 15% μείωση στις παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> μέχρι το 2020.

Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή δεν αλλάξει τίποτα στον τρόπο διαχείρισης της τεχνολογίας, είναι σχεδόν αναμενόμενη η αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο προσεχές μέλλον.

Επισημαίνεται σύμφωνα με την έρευνα SMART 2020, ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που προέρχονται από τις εφαρμογές της πληροφορικής αυξάνονται περίπου κατά 6% ετησίως, δηλαδή με τόσο γρήγορο ρυθμό, ώστε το 2020 είναι πιθανόν να ευθύνονται για το 12% των εκπομπών CO<sub>2</sub> παγκοσμίως (**Farnworth and Castilla-rubio n.d.**).

Ο πίνακας 4 που ακολουθεί περιλαμβάνει τα κυριότερα συστήματα πληροφορικής και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που αναλογούσαν στο κάθε σύστημα το 2007 και αυτές που αναμένεται να προκύψουν αντίστοιχα το 2020.

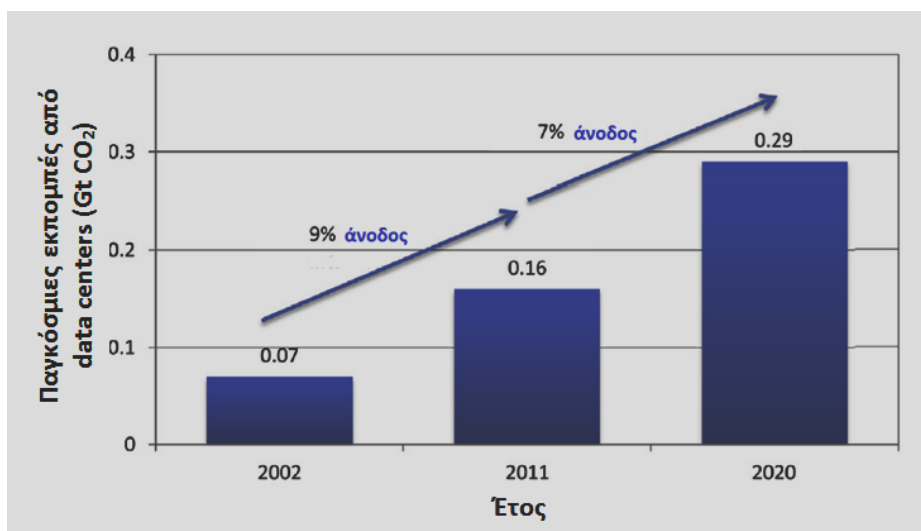
**Πίνακας 4:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> SMART 2020 (Uddin and Rahman 2012)

Παγκόσμια κατανομή Εκπομπών CO <sub>2</sub> από συστήματα πληροφορικής	Εκπομπές 2007 MtCO <sub>2</sub> e	Ποσοστό 2007	Εκπομπές 2020 MtCO <sub>2</sub> e	Ποσοστό 2020
Παγκοσμίως	830	100%	1430	100%
<b>Υπολογιστικά κέντρα</b>	116	14%	257	18%
Υποδομές/συσκευές τηλεπικοινωνίας	307	37%	358	25%
Προσωπικοί Υπολογιστές	407	49%	815	57%

#### **Υπολογισμός οικολογικού αποτυπώματος των υπολογιστικών κέντρων το 2020:**

Από τους τρεις κυριότερους τομείς της πληροφορικής που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4, τα υπολογιστικά κέντρα παρουσιάζουν αξιοπρόσεκτη αύξηση στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Αν υποθεθεί ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας συνεχιστεί σε αντιστοιχία με τη ζήτηση, το 2020 αναμένεται να χρησιμοποιούνται παγκοσμίως 122 εκατομμύρια υπολογιστές, σε σύγκριση με τα 18 εκατομμύρια που χρησιμοποιούνταν το 2008 (**Farnworth and Castilla-rubio n.d.**).

Στο διάγραμμα 1 παρουσιάζονται οι παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> από υπολογιστικά κέντρα σύμφωνα με μετρήσεις του 2002 και οι πιθανές εκπομπές έως το 2020. Παρατηρείται μία αύξηση 9% ανά έτος από το 2002 έως το 2011, ενώ αναμένεται περαιτέρω άνοδος 7% ανά έτος από το 2011 έως το 2020 (**Whitehead et al., 2014**).



**Διάγραμμα 1:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> από data centers 2002-2020  
(Whitehead et al. 2014)

## 2.5 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ (GREEN DATA CENTERS)

Η έννοια του οικολογικού ή αλλιώς πράσινου υπολογιστικού κέντρου (Green data center) έχει πλέον μεταβεί από θεωρητικό σε πρακτικό επίπεδο και οι ηγέτες της πληροφορικής καλούνται να αντεπεξέλθουν επάξια στη δημιουργία νέων οικολογικών υπολογιστικών κέντρων ή στην οικολογική αναδιαμόρφωση των ήδη υπαρχόντων, ώστε να διαθέτουν χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας, υλικά αειφορίας και περιβαλλοντικές προϋποθέσεις. Το «**πράσινο**» υπολογιστικό κέντρο είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό οικοσύστημα πληροφορικής, στο οποίο :

- Τεχνολογίες λογισμικού ελέγχουν τα δεδομένα και τις ανάγκες χωρητικότητας
- Οι εργοδότες πράττουν ανάλογα με επικυρωμένα έγγραφα για την κατάλληλη διαχείριση των συστημάτων και την αξιοποίηση ενέργειας
- Κατασκευάζονται υποδομές για την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

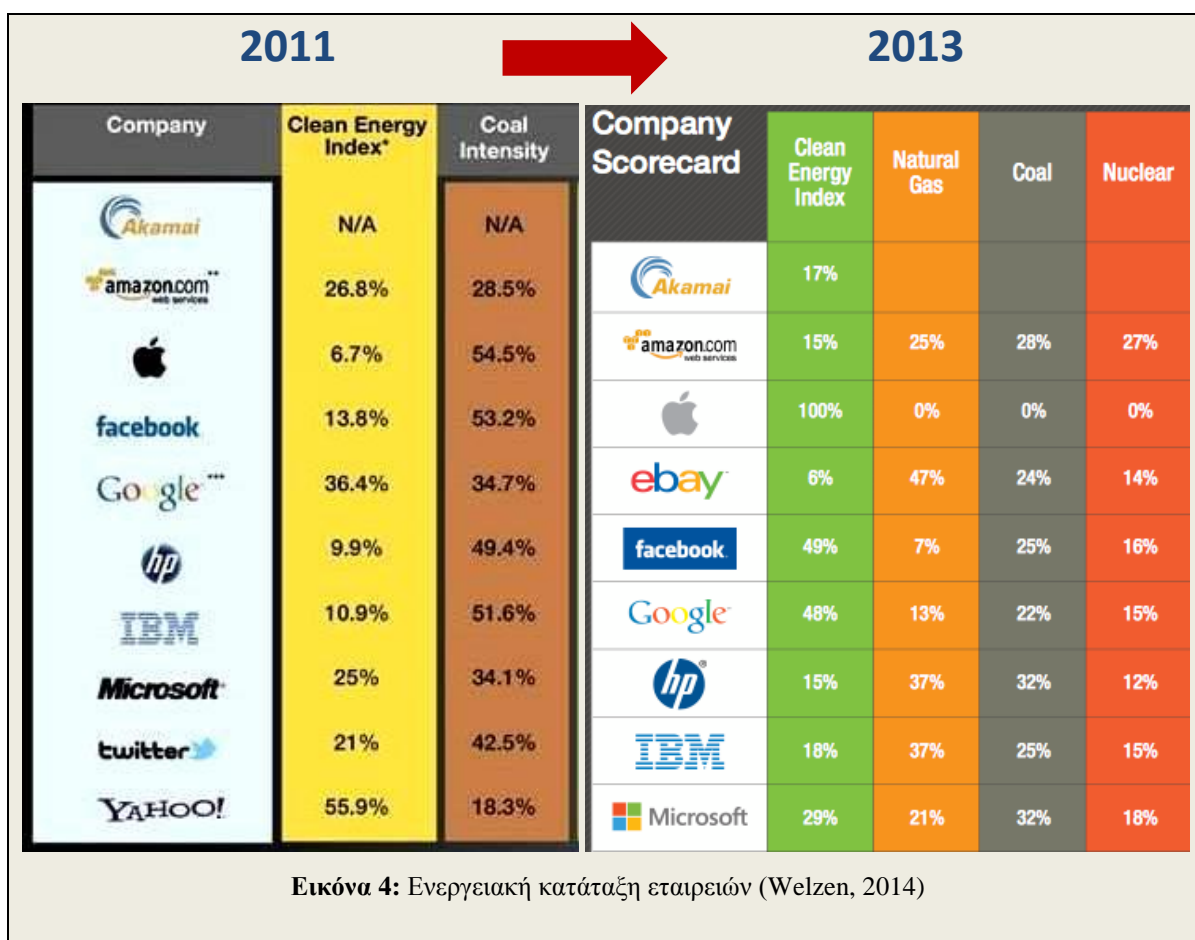
Ανάμεσα στα **χαρακτηριστικά** του οικολογικού υπολογιστικού κέντρου περιλαμβάνονται τα εξής :

- Αποτελεσματικότεροι υπολογιστές, οι οποίοι αναπτύσσουν χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία συστημάτων αποθήκευσης



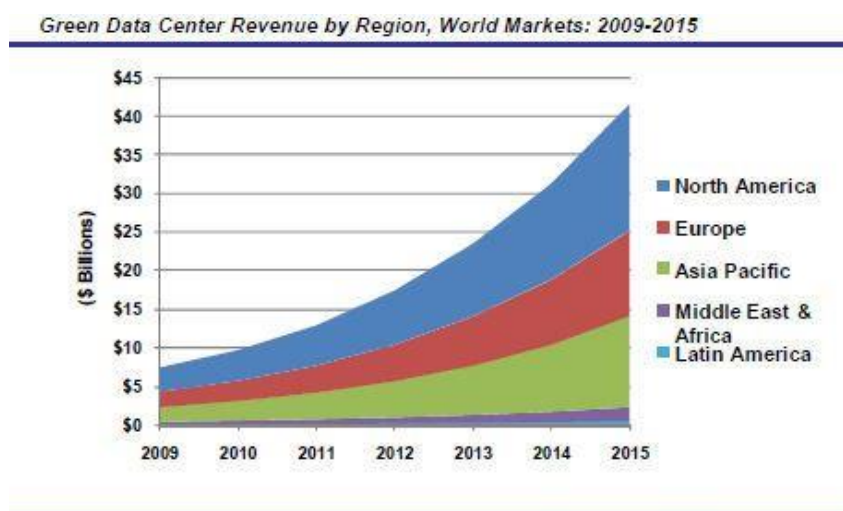
- Αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και κατ'επέκταση περιορισμός των επιπτώσεων υπερθέρμανσης του πλανήτη  
(Chou and Chou 2012)
- Δυνατότητα μακροβιότερης λειτουργίας του υπολογιστικού κέντρου  
(Uddin and Rahman, 2012)

Το 2011 η **Greenpeace** δημοσίευσε μία αναφορά με τίτλο «Πόσο βρώμικο είναι το Data Center σου;» (How dirty is your data center?), σύμφωνα με την οποία θα βαθμολογούνταν οι κυριότερες διαδικτυακές επιχειρήσεις ως προς το μέγεθος της ζημίας προς το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα της αναφοράς ήταν απογοητευτικά, καθώς οι περισσότερες εταιρείες χρησιμοποιούσαν καύση άνθρακα για την λειτουργία των υπολογιστικών τους κέντρων, ενώ τα ποσοστά χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ήταν ως επί το πλείστον πολύ μικρά (T. Power and Computing n.d.).



Η έκδοση της συγκεκριμένης αναφοράς το 2011 προκάλεσε την κινητοποίηση των εταιρειών προς την υιοθέτηση διαφορετικών στρατηγικών, φιλικών προς το περιβάλλον. Στο πλάνο των αλλαγών συμπεριλαμβάνονταν κυρίως η μείωση της καύσης άνθρακα και η ένταξη καθαρής ενέργειας στα υπολογιστικά κέντρα. Το **2013** η Greenpeace πραγματοποίησε μία **δεύτερη έρευνα**, σύμφωνα με την οποία παρατηρείται εμφανής και αξιόλογη βελτίωση στις πολιτικές διαχείρισης των περισσότερων εταιρειών. Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο αναφορών της Greenpeace. Στα αριστερά παρατίθεται η αναφορά του 2011 και στα δεξιά αυτή του 2013. Στις έρευνες συμμετείχαν εταιρείες όπως: Google, Facebook, Microsoft, Apple, Twitter, Amazon, IBM, κ.ά., ενώ για κάθε εταιρεία παρατίθενται τα ποσοστά χρήσης καθαρής ενέργειας, άνθρακα, φυσικού αερίου και πυρηνικών.

Αξίζει να αναφερθεί, πως οι επενδύσεις της βιομηχανίας στα green data centers αναμένεται να αυξηθούν ραγδαία έως το τέλος του 2015. Στην εικόνα 5 απεικονίζεται η προβλεπόμενη εξέλιξη αυτών των επενδύσεων από το 2009 έως το 2015 παγκοσμίως, σύμφωνα με την αναφορά Pike Research. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το παγκόσμιο κεφάλαιο για την εφαρμογή οικολογικών τεχνολογιών στα υπολογιστικά κέντρα θα ανέρχεται στα \$40 δισεκατομμύρια δολάρια το 2015, ενώ το 2009 ήταν μόλις \$7,5 δισεκατομμύρια. Επιπλέον, είναι εμφανές πως ηγέτης στις «πράσινες» επενδύσεις είναι η Βόρεια Αμερική, ενώ ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά η Ευρώπη, η Ασία, η Μέση Ανατολή, η Αφρική και τέλος η λατινική Αμερική. **(Environmental Leader, 2010)**



**Εικόνα 5:** Παγκόσμιες προβλεπόμενες επενδύσεις στα Green Data Centers: 2009-2015  
(Environmental Leader, 2010)

Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται, ότι στόχος ενός σύγχρονου οικολογικού υπολογιστικού κέντρου αποτελεί τόσο η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όσο και η εφαρμογή φυσικών μεθόδων ψύξης, αφού ο συνδυασμός των παραπάνω επιφέρει μεγάλα ποσά εξοικονόμησης ενέργειας.

Πρακτικά, από όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι οι περισσότερο διαδεδομένες. Παρά το παγκοσμίως αποδεκτό γεγονός ότι η **αιολική ενέργεια** είναι μία σημαντική ανανεώσιμη πηγή, παρουσιάζει ένα μειονέκτημα ως προς την προβλεψιμότητα. Συγκεκριμένα, η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι δυνατόν να προβλεφθεί ώρες ή μέρες πριν, αλλά δεν υπάρχει ένα ακριβές και σταθερό μοντέλο πρόβλεψης για μεγαλύτερη χρονική περίοδο (**Malkamäki and Ovaska, 2012**) . Αντιθέτως, η διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περισσότερο προβλέψιμη τόσο σε ημερήσια όσο και σε ετήσια βάση (**Τσούτσος , 2008**). Επιπροσθέτως, η **ηλιακή ενέργεια** σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αποτελεί μία καλή ενεργειακή πηγή για συστήματα όπως τα υπολογιστικά κέντρα, στα οποία η ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος (**Malkamäki and Ovaska 2012**).

### 2.5.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ

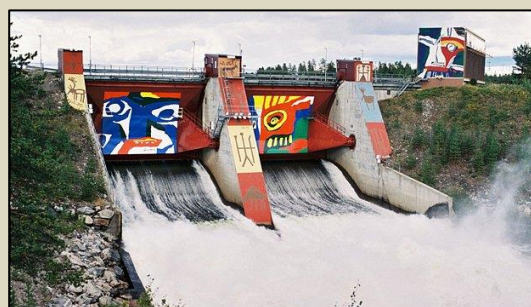
Οι πρώτες εγκαταστάσεις των υπολογιστικών κέντρων βρίσκονται σε περιοχές όπου η περισσότερη ισχύς παράγεται από σταθμούς καύσης άνθρακα. Ωστόσο, η καύση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το κυριότερο αέριο που συνδέεται με την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον, αποτελεί πρόβλημα για τους διαχειριστές των υπολογιστικών κέντρων το γεγονός ότι επενδύουν τεράστια ποσά χρημάτων στην κατανάλωση ρεύματος. Η Greenpeace υποστηρίζει ότι η Apple, η Facebook και η Google βρίσκονται ανάμεσα στις ηγετικές εταιρείες, που έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο στην αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε κάποια αξιόλογα οικολογικά υπολογιστικά κέντρα που χρηματοδοτούνται από αυτές τις τρεις εταιρείες.



✓ **Οικολογικό υπολογιστικό κέντρο της Facebook στη Σουηδία**



**Εικόνα 6:** Το Lulea Green Data Center στη Σουηδία (Gregory, 2013)



**Εικόνα 7:** Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Παροχής ενέργειας Akkats (Gregory, 2013)

Το Facebook εγκαινίασε πρόσφατα ένα νέο οικολογικό υπολογιστικό κέντρο στην περιοχή Lulea της Σουηδίας. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις που το στεγάζουν παρουσιάζονται στην εικόνα και καταλαμβάνουν έκταση 30.000 τετραγωνικών μέτρων.

Το συγκεκριμένο κέντρο λειτουργεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που προέρχεται από μεγάλα κοντινά υδροηλεκτρικά έργα, όπως είναι εμφανές στην εικόνα 7. Το πλεονέκτημα της βόρειας τοποθεσίας των εγκαταστάσεων έγκειται στο ότι δεν αναπτύσσονται σχεδόν ποτέ υψηλές θερμοκρασίες. Η πρόβλεψη των ζεστών ημερών δίνει το περιθώριο εξοικονόμησης 70% ενέργειας σε σχέση με ένα μέσο υπολογιστικό κέντρο που χρησιμοποιεί ακριβά μηχανικά μέσα ψύξης. Το ψυχρό κλίμα της Σουηδίας παρέχει φυσική ψύξη στους δεκάδες χιλιάδες υπολογιστές (servers), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε μεγάλους διαδρόμους μέσα στο κέντρο, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8.

Η δημοσίευση μιας φωτογραφίας, η ενημέρωση μιας κατάστασης ή οποιοδήποτε άλλο είδος δραστηριότητας στο Facebook στην Ευρώπη, θα πραγματοποιηθεί κατά πάσα πιθανότητα μέσω των υπολογιστών αυτών. Σύμφωνα με στατιστικά δεδομένα, 350 εκατομμύρια φωτογραφίες αποστέλλονται στο Facebook ημερησίως (Gregory, 2013).



Εικόνα 8. Μέσα στο green arctic data center της Facebook (Gregory, 2013)

Η πολιτική που ακολουθεί το Facebook είναι η μεταλαμπάδευση της γνώσης που έχει αποκτηθεί σχετικά με την ενεργειακή απόδοση των υπολογιστικών κέντρων, μέσω ενός προγράμματος που ονομάζεται Open Compute.

### ✓ Οικολογικό υπολογιστικό κέντρο της Apple στη Νεβάδα

Η Apple το 2011 κατέλαβε μία θέση ανάμεσα στους μεγαλύτερους ρυπαντές, με τη μεγαλύτερη εξάρτηση των υπολογιστικών κέντρων της σε άνθρακα και το χαμηλότερο ποσοστό χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το γεγονός αυτό προβλημάτισε ιδιαίτερα τα στελέχη της Apple, τα οποία αποφάσισαν να αλλάξουν ριζικά την κατάσταση ακολουθώντας μία <<πράσινη>> πολιτική.

Πλέον τα κέντρα της Apple τροφοδοτούνται ενεργειακά με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά 94%, πλησιάζοντας όλο και περισσότερο στην επίτευξη του στόχου της εταιρείας για 100% χρήση ανανεώσιμων πηγών .

Αξιοσημείωτη είναι η ιδιαίτερα μεγάλη άνοδος του ποσοστού τα τελευταία τέσσερα χρόνια, καθώς το 2010 η ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές κάλυπτε μόνο το 35% των συνολικών ενεργειακών αναγκών. (Zibreg, 2014)





**Εικόνα 9:** Green Data Center της Apple στη Νεβάδα (Levy, 2014)



**Εικόνα 10:** Φωτοβολταϊκά συστήματα της Apple στο Yerington, ΗΠΑ (Levy, 2014)

Το **νέο οικολογικό κέντρο της Apple** βρίσκεται στην περιοχή Reno, στη Νεβάδα των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση όταν ολοκληρωθεί πλήρως θα περιλαμβάνει 16 ανεξάρτητα κτίρια όπου θα στεγάζονται χιλιάδες υπολογιστές (εικόνα 9), με στόχο την υποστήριξη διαφόρων υπηρεσιών iCloud, όπως το Siri, το FaceTime και την αποστολή e-mail. Ενώ τα περισσότερα υπολογιστικά κέντρα χρησιμοποιούν νερό για την ψύξη των υπολογιστών, το κέντρο στο Reno χρησιμοποιεί αέρα. Συγκεκριμένα, η εγκατάσταση απορροφά μέσω φίλτρων ζεστό αέρα από την έρημο της Νεβάδας, ο οποίος διοχετεύεται στη συνέχεια στους διαδρόμους του κέντρου για να κρατήσει τους υπολογιστές στη βέλτιστη θερμοκρασία δωματίου. Τις ημέρες που η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα υψηλή ο εξωτερικός αέρας ψύχεται με εξάτμιση (evaporative cooling), μία τεχνική η οποία εκθέτει τον αέρα σε υγρασία.

Ταυτόχρονα, η Apple αγοράζει για τη λειτουργία του Reno data center ισόποση ενέργεια με αυτήν που παράγεται στο τεράστιο φωτοβολταϊκό πάρκο στο Yerington, το οποίο απέχει 130km από το Reno. Πρόκειται για μια εγκατάσταση, η οποία παρέχει 18-20 MW ισχύος και περιλαμβάνει τόσο ηλιακούς συλλέκτες, όσο και καθρέφτες, οι οποίοι εφταπλασιάζουν τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στους συλλέκτες (Levy, 2014).

✓ **Οικολογικό υπολογιστικό κέντρο της Google στη Φινλανδία**

Η Google εγκαινίασε το 2011 στη Hamina της Φινλανδίας ένα πρωτοποριακό υπολογιστικό κέντρο. Περίπου 50 κατασκευαστικές εταιρείες και πάνω από 2000 εργάτες συνεργάστηκαν για την μετατροπή μιας πρώην χαρτοβιομηχανίας σε ένα από τα ενεργειακά πιο αποδοτικά υπολογιστικά κέντρα στον κόσμο. Το συγκεκριμένο κέντρο διαθέτει ένα υψηλής τεχνολογίας σύστημα ψύξης, κατά το οποίο αντλείται θαλασσινό νερό από τον κόλπο της Βαλτικής. Το νερό, αφού χρησιμοποιηθεί για την ψύξη των υπολογιστών, επαναχρησιμοποιείται για τη θέρμανση οικιών και γραφείων (Zimmer, 2013). Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει τεράστια ποσά εξοικονόμησης ενέργειας και εφαρμόστηκε στη Hamina για πρώτη φορά παγκοσμίως.



**Εικόνα 11:** Το data center στην Hamina Φινλανδίας



**Εικόνα 12:** Αιολικό πάρκο στη Σουηδία

(Zimmer, 2013)

Ταυτόχρονα, εκτός από τη χρήση του θαλασσινού νερού για την ψύξη των εγκαταστάσεων, η Google έχει επενδύσει πολύ στην αιολική ενέργεια. Συγκεκριμένα, Μάιο του 2013 έκλεισε δεκαετή συμφωνία με μία σουηδική εταιρεία για την κατασκευή αιολικού πάρκου στην περιοχή Maenaara της Βόρειας Σουηδίας (εικόνα 12), με αποτέλεσμα το υπολογιστικό κέντρο στη Φινλανδία να καλύπτει τις ενεργειακές του απαιτήσεις, αγοράζοντας την ενέργεια που θα παράγεται στο αιολικό πάρκο στη Σουηδία. Το αιολικό πάρκο θα αποτελείται από 24 ανεμογεννήτριες, από τις οποίες θα παράγεται ισχύς 72MW για τη λειτουργία του κέντρου. Η ολοκλήρωση της κατασκευής του πάρκου αναμένεται μέσα στο 2015.

✓ **Οικολογικό υπολογιστικό κέντρο της Lamda Hellix στην Ελλάδα**



Η Lamda Hellix ανέλαβε τη δημιουργία του πρώτου οικολογικού υπολογιστικού κέντρου στην Ελλάδα, βασισμένου αποκλειστικά σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για λογαριασμό του Εθνικού Δικτύου Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ). Το έργο περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη διαχείριση ενός πρωτοποριακού υπολογιστικού κέντρου, το οποίο θα επιτυγχάνει μοναδική, για τα ελληνικά δεδομένα, εξοικονόμηση ενέργειας πάνω από 70%.

Για την υλοποίηση του έργου έχει επιλεγεί τοποθεσία παρακείμενη στον ποταμό Λούρο και σε κοντινή απόσταση από το τεχνητό φράγμα του υδροηλεκτρικού σταθμού 10.5 MW της ΔΕΗ στην περιοχή της Φιλιππιάδας. Στόχος του έργου είναι να αξιοποιηθούν στο μέγιστο οι υδάτινοι πόροι της περιοχής για την πλήρη κάλυψη των συνολικών ενεργειακών αναγκών του υπολογιστικού κέντρου, αλλά ταυτόχρονα να προκύψουν περαιτέρω επενδύσεις και αναβάθμιση της περιοχής (**Energy in , 2014**).

## 2.6 ΦΥΣΙΚΗ ΨΥΞΗ

Με τον όρο **φυσική ψύξη** ή αλλιώς **free cooling** εννοείται η χρήση του φυσικού κλίματος για την ψύξη των υπολογιστικών κέντρων, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές ψύξης, οι οποίες υποστηρίζουν τη χρήση κλιματιστικών μονάδων. Η φυσική ψύξη μπορεί να εφαρμοστεί όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα (ή νερού) είναι αρκετά χαμηλή, ώστε ο αέρας αυτός (ή το νερό) να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως βοηθητικό ψυκτικό μέσο, είτε ως κύρια πηγή ψύξης σε ένα υπολογιστικό κέντρο (**Dai et al., 2013**).

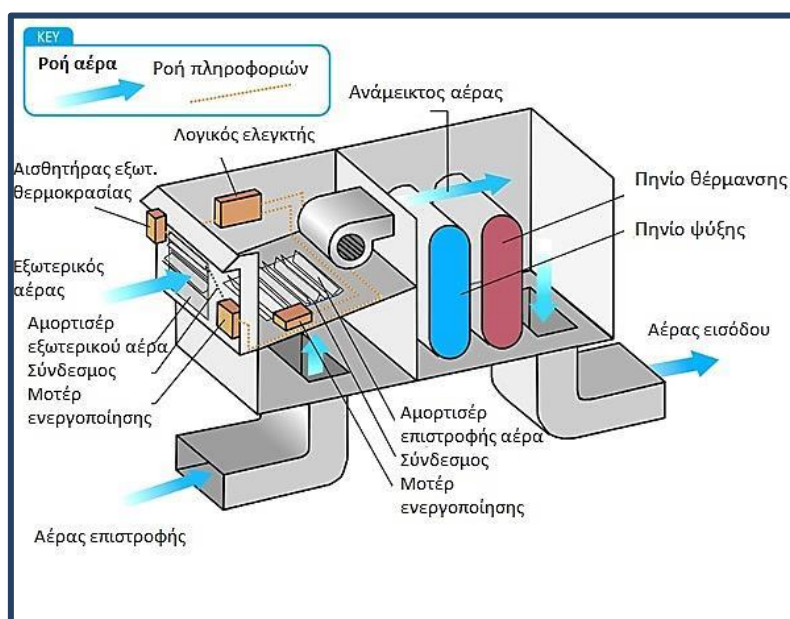


Σε ένα μεγάλο πλήθος περιοχών, η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του αέρα μέσα σε ένα υπολογιστικό κέντρο για μεγάλη χρονική περίοδο του έτους (**Zhang et.al., 2014**). Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι ικανοποιητικά πιο χαμηλή σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του κέντρου, η θερμότητα μεταφέρεται φυσικά προς το εξωτερικό περιβάλλον χωρίς να είναι απαραίτητη η μηχανική υποστήριξη από τον συμπιεστή (compressor) του κλιματιστικού, με αποτέλεσμα να μπορεί να παραλειφθεί η λειτουργία του συστήματος ψύξης – συμπίεσης ατμών των κλιματιστικών. Στην παραπάνω περίπτωση, παρατηρείται εξοικονόμηση ενέργειας, αφού αντί των κλιματιστικών γίνεται χρήση εξοικονομητών.

Οι **εξοικονομητές (economizers)** αποτελούν μία τεχνολογία ψύξης, η οποία εκμεταλλεύεται τις εξωτερικές συνθήκες για την παροχή μερικής ή ολοκληρωτικής ψύξης, χωρίς τη χρήση ενέργειας παραγόμενης από κλιματιστικά. Δύο κατηγορίες εξοικονομητών κυκλοφορούν στην αγορά:

- 1.) οι εξοικονομητές παροχής αέρα (airside economizers)
- 2.) οι εξοικονομητές παροχής νερού (waterside economizers) (**Kaiser et al. n.d.**).

Στην εικόνα 13 παρατίθεται ένα παράδειγμα εξοικονομητή αέρα, όπου είναι εμφανής η λειτουργία του.



Εικόνα 13: Εξοικονομητής αέρα

Έως και την προηγούμενη πενταετία, η φυσική ψύξη δεν μπορούσε να εφαρμοστεί στα υπολογιστικά κέντρα επειδή οι προδιαγραφές των εσωτερικών συνθηκών τους (όρια θερμοκρασίας- υγρασίας) ήταν υπερβολικά αυστηρές και δεν πληρούνταν σχεδόν ποτέ από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Ωστόσο το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε όταν η ASHRAE, αρχικά το 2008 και στη συνέχεια το 2011, άλλαξε ουσιαστικά τα κριτήρια της σωστής λειτουργίας ενός υπολογιστικού κέντρου, δημιουργώντας δύο νέες κατηγορίες υπολογιστικών κέντρων ( $A_3, A_4$ ) και επεκτείνοντας το εύρος των επιτρεπόμενων ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι διαχειριστές των κέντρων έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν τις πιο ενεργειακά αποδοτικές συνθήκες λειτουργίας της επιχείρησής τους εντάσσοντάς την σε μία από τις υπάρχουσες κατηγορίες που προτάσσει η ASHRAE. Οι παραπάνω καινοτομίες της ASHRAE έδωσαν, δηλαδή, το έναυσμα της χρήσης φυσικής ψύξης στα υπολογιστικά κέντρα, που θεωρείται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας.

Στον πίνακα 5 καταγράφονται οι δύο κυριότερες κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζεται η φυσική ψύξη, καθώς και τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας.

**Πίνακας 5:** Κατηγορίες φυσικής ψύξης (Zhang et al. 2014)

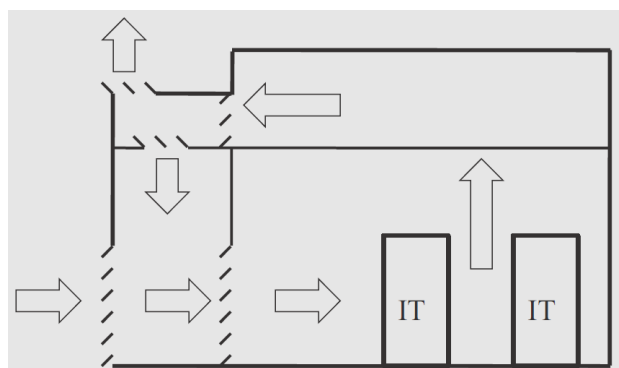
Κατηγορία	Τύπος	Χαρακτηριστικά
Φυσική Ψύξη με αέρα (Airside free cooling)	Άμεσο	Απευθείας εισαγωγή του κρύου αέρα μέσα στο data center
	Έμμεσο	Έμμεση αξιοποίηση του εξωτερικού αέρα μέσω εναλλακτών θερμότητας
Φυσική ψύξη με νερό (Waterside free cooling)	Άμεση ψύξη με νερό	Απευθείας χρήση φυσικού κρύου νερού
	Αερόψυκτο	Χρήση ψύκτη αέρα για την ψύξη του νερού κυκλοφορίας
	Πύργος ψύξης	Χρήση πύργου ψύξης για την ψύξη του νερού κυκλοφορίας

### 2.6.1 Φυσική ψύξη με αέρα

Το σύστημα φυσικής ψύξης με αέρα διαχειρίζεται, όπως προαναφέρθηκε τον εξωτερικό αέρα για την ψύξη του υπολογιστικού κέντρου. Συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό περιλαμβάνει αισθητήρες (sensors), οι οποίοι παρακολουθούν συνεχώς τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας τόσο στο εξωτερικό περιβάλλον, όσο και μέσα στο κέντρο. Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι κατάλληλη, ένας εξοικονομητής αέρα διοχετεύει τον εξωτερικό αέρα απευθείας μέσα στο κέντρο ή έμμεσα με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας. Η φυσική ψύξη με αέρα είναι μία μέθοδος που εξαπλώνεται ραγδαία σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με μία πρόσφατη έρευνα, το 99% των υπολογιστικών κέντρων στην Ευρώπη μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία A<sub>2</sub> της ASHRAE και να εκμεταλλευτούν το φυσικό αερισμό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αντίστοιχα το 75% των υπολογιστικών κέντρων της Νότιας Αμερικής χρησιμοποιούν εξοικονομητές αέρα περισσότερο από 8500 ώρες/ έτος (Zhang et al. 2014). Τέλος, το 2013 οι Siriwardana et al., διεξήγαγαν μία έρευνα για την εφαρμογή του φυσικού αερισμού στα υπολογιστικά κέντρα στην Αυστραλία και έκριναν ότι ο φυσικός αερισμός μπορεί να εφαρμοστεί επικερδώς για περισσότερες από 1550 ώρες το χρόνο στις νότιες πόλεις της Αυστραλίας, όπου το κλίμα δεν είναι πολύ υγρό και ζεστό.

#### 2.6.1.1 Άμεσος φυσικός αερισμός (Direct Airside Free Cooling)

Αποτελεί την πιο απλή μέθοδο φυσικής ψύξης με αέρα, εφόσον επιτρέπει την άμεση διοχέτευση του κρύου εξωτερικού αέρα προς το εσωτερικό του υπολογιστικού κέντρου μέσω ανεμιστήρων, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 14 (Endo et al., 2014).



**Εικόνα 14:** Σχηματικό διάγραμμα άμεσου φυσικού αερισμού (Zhang et al. 2014)

Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ότι δεν απαιτεί τη χρήση αντλιών, πύργων ψύξης και εναλλακτών θερμότητας, έχει προκαλέσει ταυτόχρονα κάποιους προβληματισμούς που αφορούν στα επίπεδα υγρασίας και την είσοδο ανεπιθύμητων σωματιδίων και ρυπαντικών φορτίων μέσω του αέρα. Ήταν λοιπόν, φυσικό επακόλουθο να τεθεί υπό αμφισβήτηση η αξιοπιστία της μεθόδου, εφόσον στους διαχειριστές των υπολογιστικών κέντρων πλανόταν ο φόβος βλάβης του IT εξοπλισμού.

Τα τελευταία χρόνια ο έλεγχος και η αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων έχει ελκύσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε οχτώ υπολογιστικά κέντρα στην Καλιφόρνια Αμερικής έδειξαν ότι η αύξηση της συγκέντρωσης του ρυπαντικού φορτίου, που εισήχθηκε μέσω του φυσικού αερισμού, δεν ξεπέρασε τα αποδεκτά όρια που έχει θέσει η ASHRAE και μάλιστα θα μπορούσε να αποφευχθεί εντελώς με τη χρήση φίλτρων. Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, τα υπολογιστικά κέντρα, που διαθέτουν εξοικονομητές, μπορούν να ελέγξουν επαρκώς τα επίπεδα υγρασίας (**Shehabi et al., 2008**).

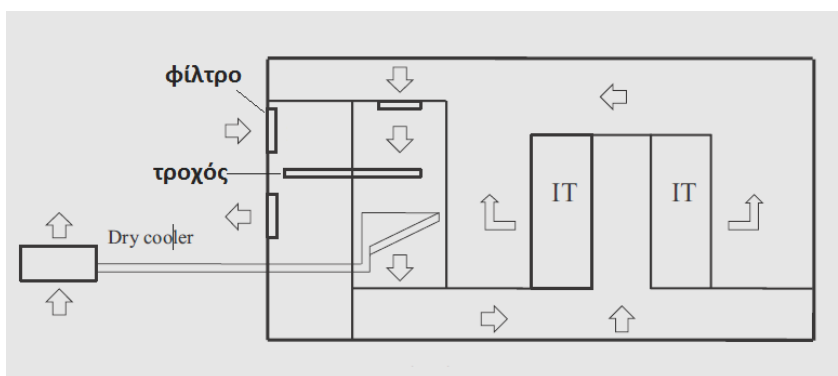
Αντίστοιχες έρευνες που διεξήχθησαν σε ευρωπαϊκές χώρες και στην Ινδία, έδειξαν ότι δεν υπάρχει λόγος αμφισβήτησης της μεθόδου του άμεσου φυσικού αερισμού. Ωστόσο, φυσικός αερισμός σε υπολογιστικά κέντρα σε περιοχές της Κίνας δεν ενδείκνυται, εφόσον τα επίπεδα σκόνης και άλλων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερα υψηλά.

Αποδεικνύεται, επομένως, πως η εφαρμογή του φυσικού αερισμού συνδέεται άμεσα με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Αξίζει άρα να αναφερθεί, ότι στα υπολογιστικά κέντρα που ψύχονται άμεσα με εξωτερικό αέρα είναι επιτακτική η ύπαρξη στρατηγικών ελέγχου και αισθητήρων παρακολούθησης των εξωτερικών συνθηκών.

### 2.6.1.2 Έμμεση φυσική ψύξη με αέρα (Indirect Airside Free Cooling)

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα του άμεσου φυσικού αερισμού ενδέχεται να προκαλέσει βλάβη των μηχανημάτων. Αντιθέτως, οι εξοικονομητές με έμμεση χρήση αέρα περιλαμβάνουν εναλλάκτες, οι οποίοι επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας, χωρίς να είναι αναγκαία η είσοδος του εξωτερικού αέρα μέσα στο υπολογιστικό κέντρο.

Το σύστημα τροχών του Kyoto παρουσιάζεται στην εικόνα 15 και είναι ένα γνωστό παράδειγμα εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος. Περιλαμβάνει έναν τροχό περιστροφής αέρα, έναν εναλλάκτη θερμότητας με άμεση εκτόνωση αέρα και μονάδες ελέγχου για τη διαχείριση του συστήματος. Η παραπάνω διάταξη επιτρέπει την παροχή αέρα στο υπολογιστικό κέντρο χωρίς τη διατάραξη των συνθηκών στο εσωτερικό του κέντρου, παρέχοντας τη δυνατότητα ενεργοποίησης του φυσικού αερισμού όταν είναι εφικτό και επιτρέποντας σε αντίθετη περίπτωση τη λειτουργία των παραδοσιακών συστημάτων ψύξης. Ο ετήσιος συντελεστής απόδοσης (COP) αυτών των συστημάτων κυμαίνεται συνήθως από 8 έως 10, σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από την απόδοση των παραδοσιακών συστημάτων, η οποία είναι περίπου 3-4 (Zhang, et. al., 2014).



Εικόνα 15: Σύστημα Kyoto (Zhang, et. al., 2014)

Έχει παρατηρηθεί ότι με το πέρασμα του χρόνου συγκεντρώνεται υψηλή ποσότητα ρυπαντών του αέρα στον εναλλάκτη θερμότητας, γεγονός που δυσχεραίνει τη λειτουργία του και μειώνει την απόδοσή του. Επιβάλλεται οπότε η συχνή συντήρηση των συστημάτων.

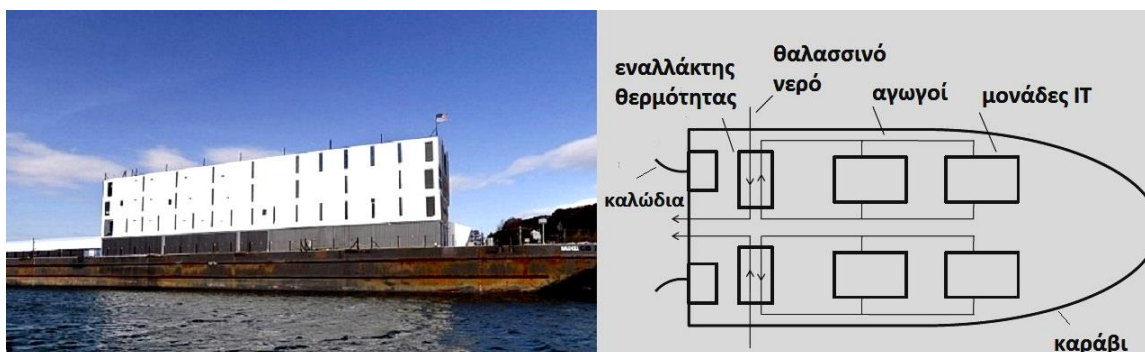
## 2.6.2 Φυσική ψύξη με νερό

Η φυσική ψύξη με νερό είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιεί φυσικές πηγές κρύου νερού για την ψύξη των υπολογιστικών κέντρων χωρίς την παρεμβολή μέσων μεταφοράς θερμότητας (Zhang et al. 2014).

### 2.6.2.1 Άμεση φυσική ψύξη με νερό (Direct Waterside Free Cooling)

Η μονάδα κλιματισμού CRAC (Computer room air conditioning unit) ευθύνεται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο υπολογιστικό κέντρο, ώστε ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός να λειτουργεί με ασφάλεια και ενεργειακή αποδοτικότητα. Ο σχεδιασμός της μονάδας ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις κατασκευής και διαχείρισης των κέντρων αυτών. Η σύγκριση του υψηλού επιπέδου ροής της θερμότητας (περίπου  $100\text{W}/\text{cm}^2$ ) σε ένα σύγχρονο υπολογιστικό κέντρο υψηλής πυκνότητας ισχύος, με την πολύ κατώτερη δυνατότητα του αέρα για απομάκρυνση θερμότητας (περίπου  $37\text{W}/\text{cm}^2$ ) υποδεικνύει την δυσχέρεια διαχείρισης των θερμικών φορτίων από τα συστήματα ψύξης παλιάς τεχνολογίας. Αυτός είναι ο κύριος λόγος αντικατάστασης των παλαιότερων συστημάτων ψύξης, που χρησιμοποιούν αέρα, με νέα συστήματα ψύξης, τα οποία χρησιμοποιούν νερό (Ebrahimi, et.al., 2014).

Η χρήση συστημάτων ψύξης με νερό μπορεί να επιφέρει ουσιαστικά κέρδη από την εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, η ψύξη των υπολογιστών με νερό, σε συνδυασμό με μεθόδους φυσικού αερισμού μπορούν να μειώσουν ή ακόμα και να εξαλείψουν τη χρήση των κλιματιστικών.

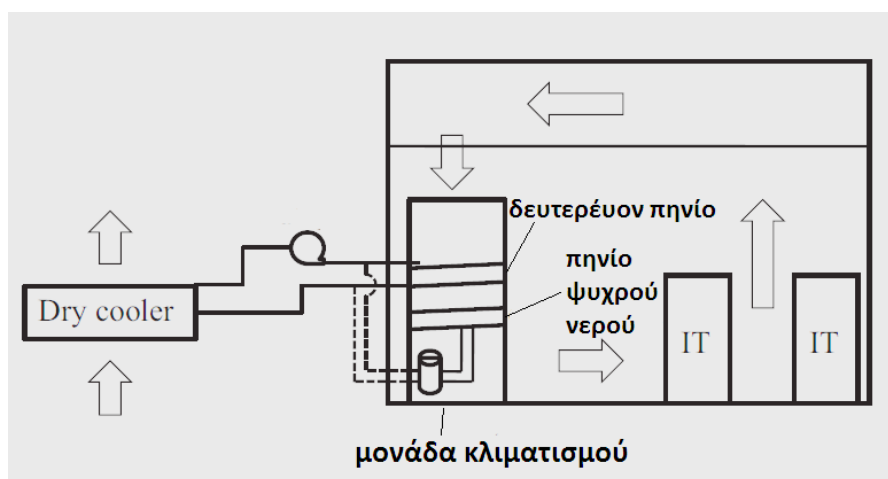


Εικόνα 16: Το πλωτό data center Maine barge της Google (Mail Online, 2013)

Το **2009** προτάθηκε από τους **Clidas, et.al.** η δημιουργία ενός υπολογιστικού κέντρου στον ωκεανό ή σε τοποθεσία κοντά στον ωκεανό, εξοπλισμένο με ένα κλειστό σύστημα ψύξης, το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 16. Το ψυκτικό υγρό ρέει και μεταφέρει θερμότητα στο νερό της θάλασσας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Η ενέργεια που παράγεται από τη φυσική κίνηση του θαλασσινού νερού συσσωρεύεται στο σύστημα και μετατρέπεται σε ενέργεια τροφοδοσίας των αντλιών ψύξης του υπολογιστικού κέντρου. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου είναι περιορισμένη, λόγω της εξάρτησής της από φυσικές πηγές κρούς νερού, οπότε σε αυτήν την περίπτωση η εγκατάσταση των υπολογιστικών κέντρων πάνω ή κοντά στον ωκεανό αποτελεί ιδανική λύση. Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κύματα του ωκεανού, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβη στο σύστημα.

#### 2.6.2.2 Έμμεση Φυσική Ψύξη με νερό (Indirect Waterside Free Cooling)

Σε ένα τέτοιου είδους σύστημα χρησιμοποιείται ένας ψύκτης αέρα για την ψύξη του νερού που επανακυκλοφορεί στις μονάδες κλιματισμού, όταν η εξωτερική θερμοκρασία αέρα είναι αρκετά χαμηλή. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 17.



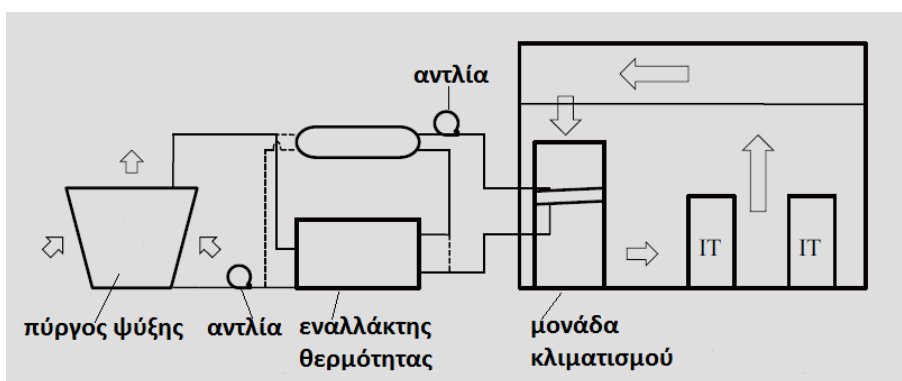
Εικόνα 17: Σύστημα ψύξης με δύο πηνία (Zhang, et.al., 2014)

Στο ανεξάρτητο δευτερεύον πηνίο ρέει το ψυκτικό υγρό κατά τη λειτουργία των εξοικονομητών. Όταν οι εξωτερικές συνθήκες του αέρα βρίσκονται μέσα στα προκαθορισμένα όρια, το νερό επιστρέφει από τους dry coolers και ρέει στο πηνίο ψυχρού νερού, μειώνοντας ή μηδενίζοντας την ανάγκη μηχανικού κλιματισμού.

Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι, όταν οι συνθήκες δεν επιτρέπουν το φυσικό αερισμό, το υπολογιστικό κέντρο να μην ψύχεται με τον παραδοσιακό μηχανικό εξοπλισμό, αλλά με λιγότερη απόδοση από την κανονική, εξαιτίας της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας που προκαλεί το επιπρόσθετο πηνίο.

### Σύστημα χρήσης πύργου ψύξης (Cooling tower system)

Στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται ένας πύργος ψύξης για την ψύξη του νερού ανακυκλοφορίας στις μονάδες κλιματισμού και στους εναλλάκτες θερμότητας. Δύο δεξαμενές νερού είναι αναγκαίες, μία εξωτερική δεξαμενή ψύξης νερού (cooling water loop) και μία εσωτερική δεξαμενή ψύξης νερού (chilled water loop). Τα παραδοσιακά κλιματιστικά μπορούν να μετατραπούν στο παραπάνω είδος συστήματος, αν παρακάμψουν τον ψύκτη μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού χρησιμοποιείται για την έμμεση ψύξη του νερού που ψύχει το υπολογιστικό κέντρο. Όταν οι εξωτερικές συνθήκες είναι κατάλληλες, αντλίες μεταφέρουν το νερό του δευτερεύοντος κυκλώματος (cooling water) σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, ώστε να ψυχθεί στη συνέχεια το νερό που χρησιμοποιείται για την ψύξη της αίθουσας των υπολογιστών (chilled water), παρακάμπτοντας τον ψύκτη. Το παραπάνω είδος συστήματος είναι ευρέως διαδεδομένο σε υπολογιστικά κέντρα μεγάλου μεγέθους, με αξιοσημείωτη επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας (**Zhang et al., 2014**).

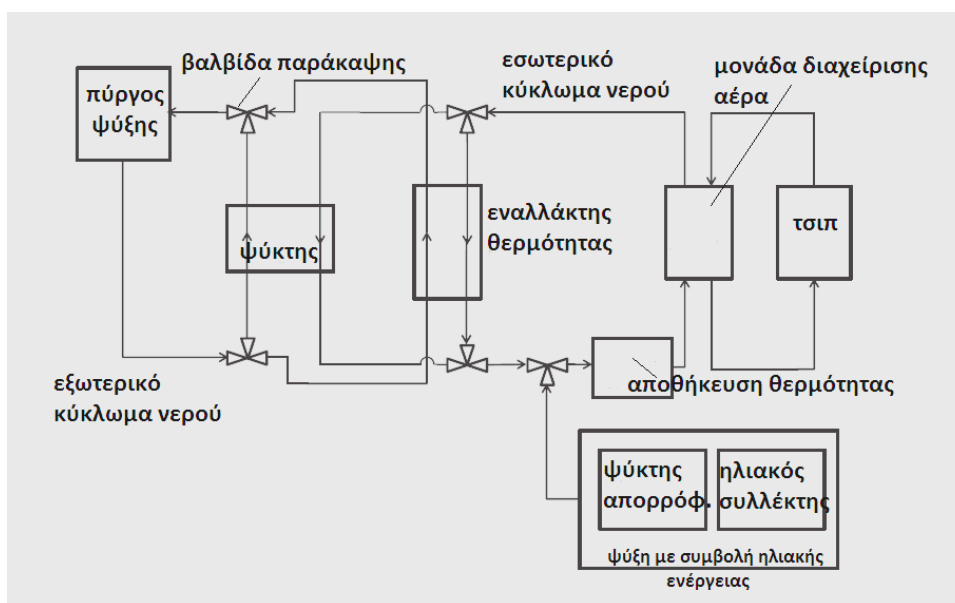


**Εικόνα 18:** Σύστημα παράκαμψης του ψύκτη μέσω εναλλάκτη θερμότητας (Zhang, et.al., 2014)



### Σύστημα συνδυασμού πύργου ψύξης – ηλιακού συστήματος

Το σύστημα χρήσης του πύργου ψύξης μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με τη μέθοδο ψύξης με απορρόφηση, αξιοποιώντας ουσιαστικά την ηλιακή ενέργεια και την απορριπτόμενη θερμότητα από τα υπολογιστικά κέντρα. Συγκεκριμένα, οι ψύκτες απορρόφησης μπορούν να λειτουργήσουν με μεγάλη αποδοτικότητα, αν εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, οπότε η ψύξη με ηλιακή απορρόφηση έχει προταθεί και εφαρμοστεί σε πολλά υπολογιστικά κέντρα που εφαρμόζουν μεθόδους φυσικής ψύξης. Οι **Hamann et al. το 2011** πρότειναν ένα αντίστοιχο σύστημα ψύξης, που συνδυάζει φυσική ψύξη και εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 19.



**Εικόνα 19:** Σύστημα ψύξης που συνδυάζει φυσική ψύξη και ηλιακή ενέργεια (Zhang, et.al.,2014)

Όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή ενεργοποιείται η φυσική ψύξη και παρακάμπτεται ο ψύκτης. Επιπροσθέτως, στους ηλιακούς συλλέκτες παράγεται θερμότητα, η οποία θέτει σε λειτουργία τον ψύκτη απορρόφησης, από όπου παρέχεται το νερό ψύξης. Όταν δεν είναι εφικτή η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή κατά τη διάρκεια της νύχτας, εφαρμόζεται φυσική ψύξη. Τα τελευταία χρόνια, οι εταιρείες που διαχειρίζονται υπολογιστικά κέντρα

επενδύουν όλο και περισσότερο στην εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου, ελαχιστοποιώντας το κόστος επένδυσης για ψύξη.

Τα τρία είδη συστήματος που περιγράφηκαν παραπάνω είναι τρεις τρόποι επίτευξης της φυσικής ψύξης με νερό, χωρίς να υπάρχουν αυστηροί κανόνες για την εφαρμογή του καθενός. Το ένα σύστημα μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ένα άλλο αν υπάρξουν κάποιες αλλαγές. Για παράδειγμα, το σύστημα με τον πύργο ψύξης μπορεί να μετατραπεί σε σύστημα άμεσης ψύξης, απλά με την αντικατάσταση του πύργου ψύξης με μία φυσική πηγή νερού.

Τέλος, οι **Lee and Chen (2013)** διεξήγαγαν μία έρευνα, η οποία αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας στα υπολογιστικά κέντρα που εφαρμόζουν μεθόδους φυσικής ψύξης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε 17 διαφορετικές κλιματικές ζώνες και τα αποτελέσματα έδειξαν πως για κάθε μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του υπολογιστικού κέντρου κατά  $2^{\circ}$ , η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω φυσικού αερισμού αυξάνεται 2,8-8,5%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κλιματικής ζώνης.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν, επιπλέον, ότι τα κέντρα που βρίσκονται σε ψυχρές κλιματικές ζώνες, παρουσίασαν τα μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, εφαρμόζοντας τη μέθοδο του φυσικού αερισμού. Αντιθέτως σε περιοχές με υπερβολικά ξηρό ή υπερβολικά υγρό κλίμα, ο φυσικός αερισμός στα υπολογιστικά επιφέρει μικρότερα ποσοστά εξοικονόμησης, εφόσον απαιτείται η λειτουργία πρόσθετων συστημάτων ύγρανσης ή αφύγρανσης του αέρα αντίστοιχα.

Οι συγγραφείς επισημαίνουν ακόμα ότι η απευθείας είσοδος του εξωτερικού αέρα δεν ενδείκνυται για όλες τις κλιματικές ζώνες, σε αντίθεση με τη φυσική ψύξη με νερό, η οποία φαίνεται να είναι μία περισσότερο αποτελεσματική μέθοδος τόσο σε ξηρά όσο και υγρά κλίματα.

Τέλος, μία έρευνα της Green Grid το 2011 απέδειξε πως οι εξοικονομητές που χρησιμοποιούν νερό είναι περισσότερο διαδεδομένοι στα υπολογιστικά κέντρα από αυτούς που χρησιμοποιούν αέρα (**Kaiser et al. n.d**).

### 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ

#### 3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το **υπολογιστικό κέντρο AOR**, το οποίο βρίσκεται στην πόλη Ανκόνα της Ιταλίας και εντάσσεται στο νοσοκομείο Riuniti. Στο συγκεκριμένο κέντρο αποθηκεύονται:

- ✓ διοικητικές πληροφορίες του νοσοκομείου
- ✓ ιατρικά αρχεία ασθενών
- ✓ αρχεία εικόνων
- ✓ το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο των εργαζομένων
- ✓ οποιοδήποτε αρχείο σχετίζεται με την ομαλή λειτουργία του νοσοκομείου

Το νοσοκομείο Riuniti συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα Green @ Hospital, που στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα νοσοκομεία, μέσω της εφαρμογής καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον ιδεών (**Βάγιας, 2014**). Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος, είναι ιδιαίτερα σημαντική η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του υπολογιστικού κέντρου AOR.



**Εικόνα 20:** Νοσοκομείο Riuniti  
(Green @ Hospital, n.d)



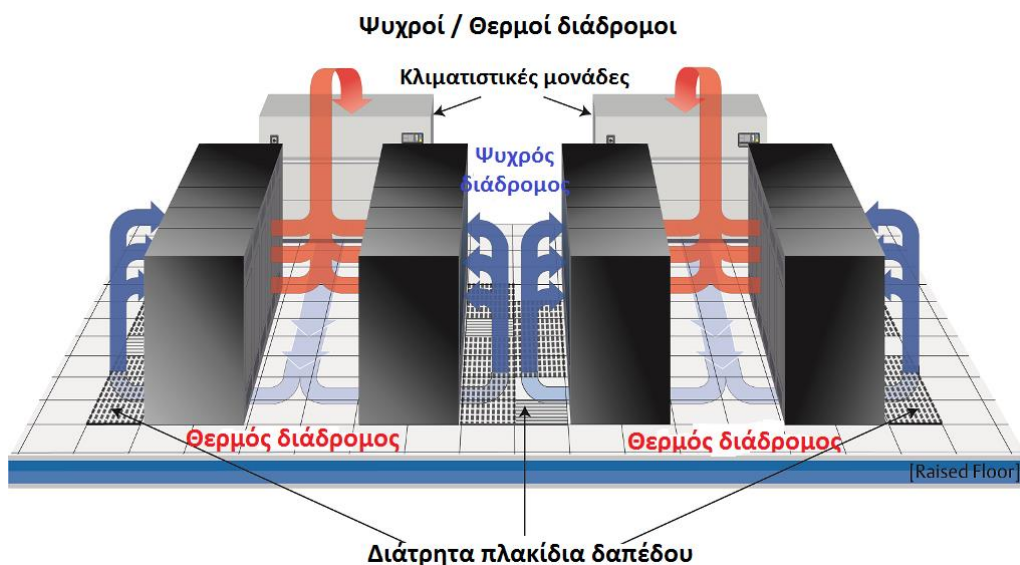
**Εικόνα 21:** AOR Data Center

### 3.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Το υπολογιστικό κέντρο AOR καταλαμβάνει **έκταση  $23\text{m}^2$**  και είναι ενσωματωμένο μέσα σε ένα χώρο που χρησιμοποιείται από τους εργαζομένους του νοσοκομείου. Περιλαμβάνει **10 ράφια** (racks) με υπολογιστές (servers), όπου συλλέγονται και αποθηκεύονται τα ηλεκτρονικά δεδομένα.

Οι υπολογιστές έχουν τοποθετηθεί καταλλήλως, ώστε να δημιουργούνται ψυχροί και θερμοί διάδρομοι κατά τη λειτουργία του υπολογιστικού κέντρου. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική διαχείρισης αέρα σε παγκόσμιο επίπεδο, εφόσον εξυπηρετεί κατά το βέλτιστο την ψύξη των υπολογιστών (**Todorovic and Kim 2014**).

Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται η διάταξη ψυχρών / θερμών διαδρόμων, όπου τα μπλε βέλη αντιπροσωπεύουν τη ροή του ψυχρού αέρα και τα κόκκινα τη ροή του θερμού αέρα. Όπως είναι διακριτό, ο εξοπλισμός πληροφορικής (IT) είναι τοποθετημένος σε σειρές από ράφια, οι οποίες διαχωρίζονται από θερμούς και ψυχρούς διαδρόμους.



Εικόνα 22: Διάταξη θερμών/ψυχρών διαδρόμων

Ο ψυχρός διάδρομος δημιουργείται στην πλευρά παροχής αέρα στους υπολογιστές, ενώ αντίστοιχα ο θερμός διάδρομος δημιουργείται στην πλευρά απόρριψης του αέρα από τους υπολογιστές.

Ψυχρός αέρας διοχετεύεται μέσω των διάτρητων πλακιδίων δαπέδου στον ψυχρό διάδρομο. Στο εσωτερικό των υπολογιστών, ο αέρας θερμαίνεται και απορρίπτεται στο θερμό διάδρομο. Στη συνέχεια, ο αέρας από το θερμό διάδρομο ανυψώνεται και απομακρύνεται προς τις κλιματιστικές μονάδες, όπου ψύχεται ξανά περνώντας από πηνία, τα οποία περιέχουν κρύο νερό που έχει αντληθεί από τον ψύκτη (chiller), ο οποίος είναι τοποθετημένος έξω από το δωμάτιο των υπολογιστών. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται εσωτερική επανακυκλοφορία του αέρα, επιτρέποντας μόνο ένα μικρό ποσοστό εισόδου του εξωτερικού αέρα, ώστε να διατηρείται ο χώρος σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης. Όταν το σύστημα διαχείρισης αέρα σχεδιάζεται άρτια, δίνεται η δυνατότητα μείωσης του αρχικού κεφαλαίου επένδυσης και συντήρησης και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα βλάβης του συστήματος λόγω υπερθέρμανσης.

## 3.2 ΑΡΧΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ

### 3.2.1 Ψύκτες- Πύργοι ψύξης- Dry Coolers

Οι ψύκτες είναι μηχανήματα, τα οποία απομακρύνουν θερμότητα από ένα υγρό, μέσω ενός κύκλου ψύξης με **συμπίεση ατμών** ή με **απορρόφηση**. Το υγρό αυτό είναι συνήθως νερό, αλλά ενδέχεται επίσης να περιέχει μικρή ποσότητα (περίπου 20%) γλυκόλης και αντιδιαβρωτικών ουσιών.

**Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένας ψύκτης είναι τα εξής:**

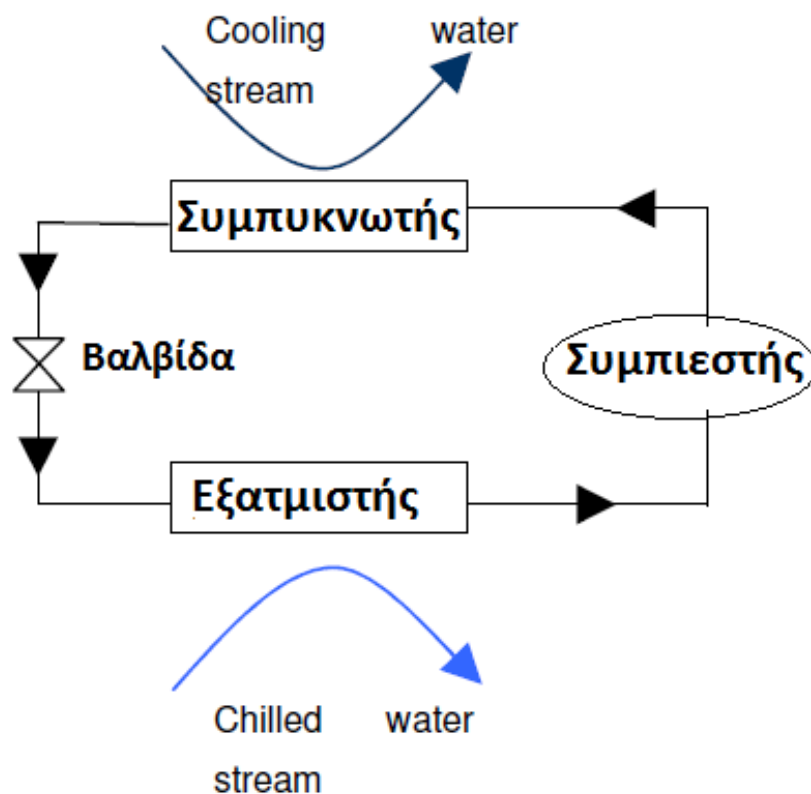
- Συμπιεστής (compressor)
- Εξατμιστής (evaporator)
- Συμπυκνωτής (condenser)

**(Κολοκοτσά, 2014)**

Ο βασικός κύκλος ψύξης είναι ο ίδιος και για τα δύο είδη ψυκτών. Συγκεκριμένα και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ένα υγρό ψυκτικό μέσο, το οποίο υφίσταται αλλαγή φάσης και μετατρέπεται σε αέριο μέσω ενός **εξατμιστή (evaporator)**, ο οποίος απορροφά θερμότητα από το υγρό, με αποτέλεσμα αυτό να ψύχεται.

Στη συνέχεια, το ψυκτικό αέριο συμπιέζεται σε υψηλότερη πίεση μέσω ενός **συμπιεστή (compressor)**, έπειτα μετατρέπεται πάλι σε υγρό απορρίπτοντας θερμότητα μέσω ενός **συμπυκνωτή (condenser)** και τέλος μεταβαίνει ξανά στον εξατμιστή ως ένα μίγμα υγρού και ατμού και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Στην εικόνα 23 παρουσιάζονται τα κύρια μέρη ενός ψύκτη και ο κύκλος των διεργασιών που περιγράφηκαν παραπάνω.



Εικόνα 23: Τα κύρια μέρη ενός ψύκτη (Mackay, n.d.)

### Πύργοι ψύξης και Dry Coolers

Οι πύργοι ψύξης είναι συστήματα που χρησιμοποιούν οικονομικές και αποδοτικές μεθόδους για την ψύξη του νερού. Σε έναν πύργο ψύξης, το νερό ρέει μέσα σε μια δεξαμενή μεγάλης επιφάνειας, στην οποία παρέχεται αέρας αντίθετης κατεύθυνσης από τη ροή του νερού. Μέσω αυτής της επαφής μεταξύ αέρα και νερού, μικρή ποσότητα του νερού εξατμίζεται, ψύχοντας κατά αυτόν τον τρόπο το νερό που απομένει για την ανακυκλοφορία. Το ψυχθέν υγρό μπορεί να ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη από αυτή του αέρα.



Εικόνα 24: Πύργοι Ψύξης



Εικόνα 25: Dry Coolers

(VIFlow, n.d.)

Σε έναν **πύργο ψύξης** το νερό βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον αέρα και η ψύξη του οφείλεται στη διαδικασία της εξάτμισης. Το κατώτερο όριο ψύξης εδώ είναι η θερμοκρασία υγρού βολβού (*wet-bulb temperature*), που σημαίνει ότι το νερό που ψύχεται μπορεί να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν του αέρα. Αντίθετα, σε έναν **dry cooler**, παρεμβάλλεται σωλήνας πτερυγωτών τοιχωμάτων μεταξύ του νερού και του αέρα και η ψύξη του νερού επιτυγχάνεται μέσω της μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τον αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμοκρασία του αέρα είναι το κατώτερο όριο ψύξης.

**Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης καταναλώνουν πολλή ενέργεια αναφέρονται παρακάτω:**

- 1) Υψηλή κατανάλωση ενέργειας των μηχανημάτων ψύξης. Τα παραδοσιακά συστήματα συμπίεσης ατμών πρέπει να είναι σε διαρκή λειτουργία όλο το χρόνο, ακόμα και το χειμώνα όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα χαμηλή.
- 2) Υψηλή ενεργειακή κατανάλωση στο σύστημα των αντλιών. Πολλή ενέργεια χρειάζονται οι αντλίες (pumps) και οι ανεμιστήρες (fans) για τη μεταφορά του κρύου νερού ή του κρύου αέρα. Ταυτόχρονα, οι απώλειες ενέργειας κατά τη μεταφορά είναι σημαντικές στην περίπτωση που τα μηχανήματα απέχουν πολύ το ένα από το άλλο.
- 3) Ανάμειξη των κρύων και των ζεστών ρευμάτων αέρα. Η είσοδος του ζεστού αέρα στους κρύους διαδρόμους (cold aisles) αποτελεί ένα σύνηθες πρόβλημα στα υπολογιστικά κέντρα, εξαιτίας της έλλειψης κατάλληλων συστημάτων ελέγχου ροής του αέρα.

**Το σύστημα ψύξης του υπολογιστικού κέντρου AOR περιλαμβάνει :**

- Δύο ψύκτες (chiller)
- Τέσσερις dry coolers, δύο για κάθε ψύκτη
- Έναν εναλλάκτη θερμότητας
- Μία δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης νερού
- Πέντε αντλίες
- Έξι βαλβίδες

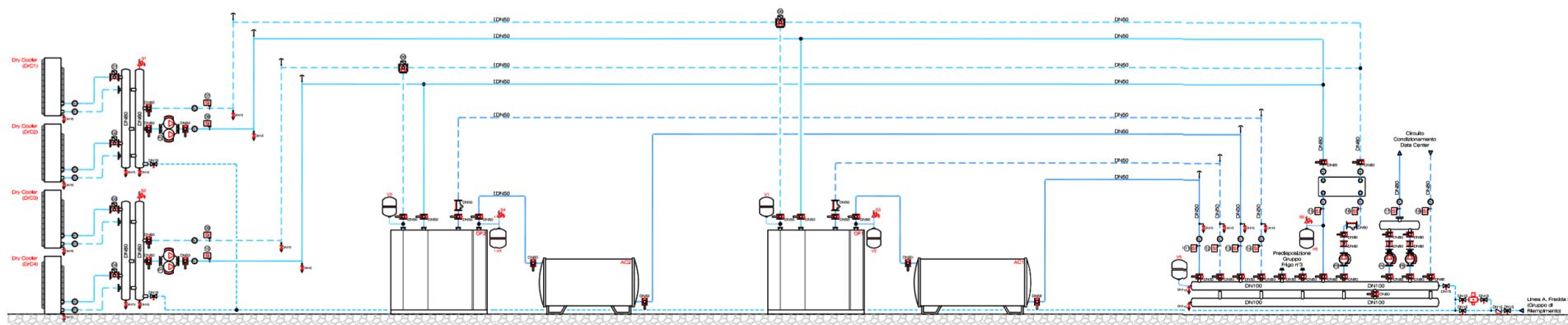


Στο υπολογιστικό κέντρο AOR έχουν εγκατασταθεί **δύο πανομοιότυπα συστήματα ψύξης, ένα κύριο και ένα εφεδρικό**, τα οποία παρουσιάζονται διαγραμματικά στην εικόνα 26. Το κάθε ένα αποτελείται από έναν ψύκτη και δύο dry coolers. Τα δύο συστήματα είναι εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους και δεν λειτουργούν ταυτόχρονα. Ωστόσο, η ανάγκη ύπαρξης δύο ταυτόσημων συστημάτων προκύπτει λόγω της πιθανότητας παρουσίας βλαβών. Σε μία τέτοια έκτακτη περίπτωση βλάβης του ενός συστήματος ψύξης, τίθεται σε λειτουργία το δεύτερο εφεδρικό σύστημα, ώστε να μη χαθούν σημαντικά δεδομένα (**Whitehead et al., 2014**)

Οι συμπυκνωτές στους ψύκτες είναι υδρόψυκτοι, ενώ η παραγόμενη θερμότητα συμπύκνωσης απομακρύνεται από τους dry coolers και απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, οι dry coolers μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο ως μονάδες συμπύκνωσης, αλλά και ως βασικές μονάδες κατά την εφαρμογή φυσικής ψύξης (free cooling), όπως θα εξεταστεί παρακάτω.

Κατά τη λειτουργία του **ενός** συστήματος, μία αντλία συμβάλλει στην ανακυκλοφορία του νερού από τους dry coolers στον εναλλάκτη θερμότητας. Ταυτόχρονα, μία δεύτερη αντλία έχει τοποθετηθεί στο σύστημα για τον έλεγχο της ροής του νερού από τον εναλλάκτη θερμότητας προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Τέλος, μία τρίτη αντλία εγγυάται τη συνεχή ροή του νερού από τον ψύκτη στη δεξαμενή αποθήκευσης και από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς τις κλιματιστικές μονάδες της αίθουσας υπολογιστών. Όσον αφορά στις βαλβίδες, το σύστημα περιλαμβάνει δύο βαλβίδες τριπλού ελέγχου για την ενεργοποίηση της φυσικής ψύξης και δύο βαλβίδες διπλού ελέγχου για τη λειτουργία των dry coolers.

Για την ενεργοποίηση της φυσικής ψύξης χρησιμοποιείται μία βαλβίδα παράκαμψης, η οποία εμποδίζει τη λειτουργία του ψύκτη, ώστε το νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης να ψύχεται απευθείας μέσω των dry coolers. Αυτή η παράκαμψη του ψύκτη είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού δεν απαιτείται επιπλέον ενέργεια για τη λειτουργία του συμπιεστή του, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας.



Εικόνα 26: Διάγραμμα συστήματος ψύξης (κύριο και εφεδρικό)

## 4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

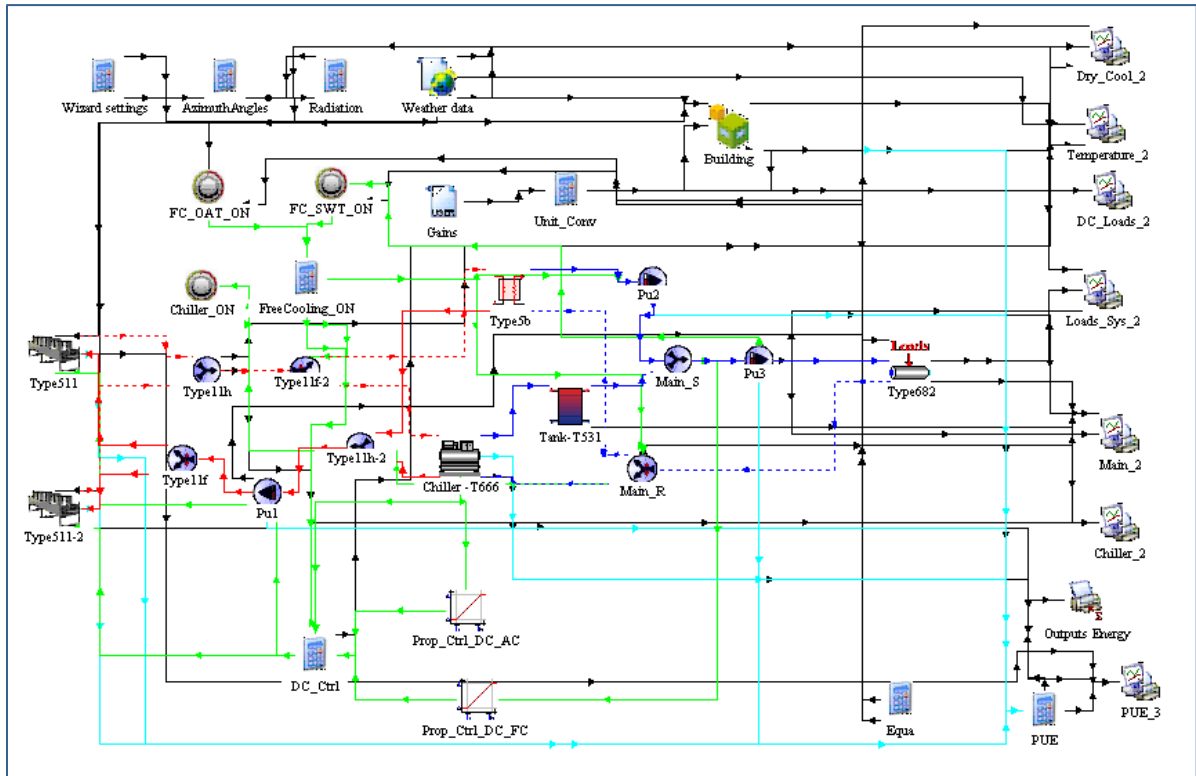
### 4.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ TRNSYS

Το TRNSYS είναι ένα ευέλικτο πρόγραμμα προσομοίωσης συστημάτων, αλλά κυρίως κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων των κτιρίων πολλαπλών ζωνών. Χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς και τους ερευνητές σε όλον τον κόσμο για την εφαρμογή καινοτόμων ιδεών στον τομέα της ενέργειας, από το σχεδιασμό απλών συστημάτων ζεστού νερού έως το σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός κτιρίου και του εξοπλισμού του.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα μελέτης στρατηγικών ελέγχου, συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή, φωτοβολταϊκή, συστήματα υδρογόνου) και της συμπεριφοράς των ανθρώπων που κινούνται μέσα στο κτίριο. Ένα πρόγραμμα στο TRNSYS υλοποιείται γραφικά συνδέοντας στοιχεία στο στούντιο προσομοίωσης (Simulation Studio). Τα στοιχεία στο TRNSYS αναφέρονται συνήθως ως τύποι (types).

Η βιβλιοθήκη του TRNSYS περιέχει πολλούς τύπους, όπως θερμικά και ηλεκτρικά ενεργειακά συστήματα, καθώς και ρουτίνες για την επεξεργασία μετεωρολογικών δεδομένων ή άλλες εξαρτώμενες από την χρονική στιγμή μεταβλητές (Πυλούδη, 2013). Σε κάθε τύπο αντιστοιχεί ένα αρχείο με εισόδους, εξόδους, παραμέτρους και άλλες ρυθμιστικές λειτουργίες.

**Στη συγκεκριμένη εργασία, η μοντελοποίηση στο TRNSYS περιλαμβάνει την ανάπτυξη μόνο του κυρίου συστήματος ψύξης και όχι του εφεδρικού.** Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται ολοκληρωμένο το περιβάλλον προσομοίωσης (Simulation Studio) του υπολογιστικού κέντρου AOR.



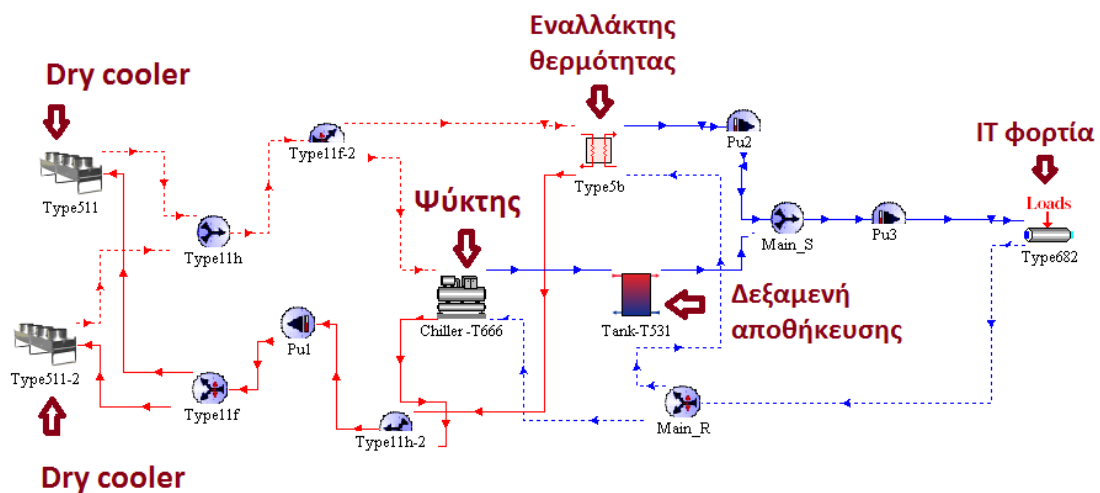
Εικόνα 27: Περιβάλλον προσομοίωσης του υπό μελέτη συστήματος στο TRNSYS

Το μοντέλο δέχεται ως κύριες εισόδους :

- Αρχείο καιρού του έτους 2011 για την πόλη της Ανκόνα, το οποίο παρέχεται από τη μετεωρολογική βάση δεδομένων Meteonorm.
- Αρχείο με τα θερμικά φορτία (IT loads) των υπολογιστών. Το αρχείο αυτό ουσιαστικά περιέχει τις πραγματικές τιμές της ενέργειας, η οποία καταναλώνεται από τους υπολογιστές ανά ώρα στο υπολογιστικό κέντρο AOR για ένα έτος.
- Δεδομένα που αφορούν στη λειτουργία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ψύκτη.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης στο TRNSYS αποθηκεύονται σε αρχεία excel, μέσω ενός εργαλείου της βιβλιοθήκης του λογισμικού (online plotter). Οι έξοδοι του μοντέλου, στις οποίες δόθηκε έμφαση στη συγκεκριμένη εργασία, είναι οι εξής:

- Η θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία στην αίθουσα των υπολογιστών
- Η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο κέντρο
- Η ενέργεια που καταναλώνεται από τους υπολογιστές
- Η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη των μηχανημάτων και του χώρου
- Η ενέργεια που καταναλώνεται από τον ψύκτη
- Οι απώλειες ενέργειας κατά τη διανομή
- Ο δείκτης PUE



Εικόνα 28: Προσομοίωση αρχικού συστήματος ψύξης στο TRNSYS

Στην εικόνα 28 είναι εμφανή τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα ψύξης, καθώς και η ροή του νερού.

Το σύστημα περιλαμβάνει **δύο κυκλώματα ψύξης**, όπως προαναφέρθηκε, τα οποία διαχωρίζονται εμφανώς στην εικόνα, το ένα με κόκκινο και το δεύτερο με μπλε χρώμα.

- Τα **μπλε βέλη** αναπαριστούν τη ροή του νερού, το οποίο ξεκινάει από τον ψύκτη, στη συνέχεια καταλήγει στις κλιματιστικές μονάδες, οι οποίες ψύχουν τους υπολογιστές, απομακρύνοντας τα θερμικά φορτία από αυτούς και τέλος επιστρέφει στον ψύκτη ώστε να ψυχθεί ξανά. Το νερό αυτό αναφέρεται ως **Chilled Water**.

- **Τα κόκκινα βέλη** αναπαριστούν τη ροή του νερού, το οποίο ξεκινάει από τους dry coolers, όπου έχει ψυχθεί και καταλήγει στον ψύκτη, όπου συντελεί στην ψύξη του Chilled Water απομακρύνοντας ουσιαστικά τη θερμότητα από αυτό. Το νερό αυτού του κυκλώματος αναφέρεται ως **Cooling Water**.

Στη συνέχεια, στον πίνακα 6, καταγράφονται και περιγράφονται εν συντομία οι βασικότερες παράμετροι που δέχθηκε το TRNSYS ως εισόδους κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης στην αρχική κατάσταση.

**Πίνακας 6:** Αρχικές είσοδοι στο TRNSYS

Σημαντικές Αρχικές Είσοδοι		
Περιγραφή	Συμβολισμός στο TRNSYS	Αρχική Τιμή
Αρχείο καιρού ενός έτους στην Ανκόνα	Weather Data	-
Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος	OAT_TMY2	-
Σχετική Υγρασία	RELHUM_DATA_CENTER	-
Αρχείο ενός έτους Θερμικών φορτίων υπολογιστών	Elect_IT	-
Όγκος δεξαμενής αποθήκευσης	Tank_Vol	0.3m <sup>3</sup>
Ισχύς Ψύκτη	Chiller_Capacity	72.6 kW
Θερμοκρασία νερού παροχής από τον ψύκτη	CHw_T_SP=14°C	14°C
Ισχύς Dry Cooler	DC_Elect_Pow	1.9kW
Ονομαστική ταχύτητα ροής νερού στον ψύκτη	CHw_M_Rated	12500 kg/h
Θερμοκρασία αέρα στην αίθουσα υπολογιστών	Room_Temp_SP	24°C
Θερμοκρασία ρύθμισης παροχής νερού, κάτω από την οποία ενεργοποιείται η φυσική ψύξη	FC_SWT_SP	16°C
Θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, κάτω από την οποία ενεργοποιείται το σύστημα φυσικής ψύξης	FC_OAT_SP	-10°C

Παρατήρηση: Η παράμετρος FC\_OAT\_SP στην αρχική κατάσταση λαμβάνει την τιμή -10° C, γεγονός που σημαίνει ότι η φυσική ψύξη δεν ενεργοποιείται ποτέ σε όλη τη διάρκεια του έτους, αφού η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι πάντα μεγαλύτερη από τους -10° C.

Ακολουθώντας, παρουσιάζεται συνοπτικά η μαθητική περιγραφή των κυριότερων τύπων (Types) που χρησιμοποιήθηκαν στο TRNSYS για τις ανάγκες της μοντελοποίησης.



### Θερμικά Φορτία Υπολογιστών

**Type 682:** Ο χρήστης εισάγει το ρυθμό ροής, την ειδική θερμότητα και τη θερμοκρασία του υγρού σε ένα σημείο αναφοράς. Στη συνέχεια, το μοντέλο υπολογίζει μέσω της εξίσωσης που ακολουθεί, τη θερμοκρασία του υγρού ύστερα από την πρόσθεση ή την αφαίρεση φορτίων στην έξοδο από το σημείο αναφοράς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα θερμικά φορτία από τους υπολογιστές προστίθενται στο υγρό, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του υγρού στο σημείο εξόδου να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εισόδου.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{\dot{Q}}{mCp}$$

Όπου:  $T_{out}$  = Θερμοκρασία του υγρού μετά την πρόσθεση των φορτίων ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{in}$  = Θερμοκρασία του υγρού πριν την πρόσθεση των φορτίων ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Cp$  = Ειδική θερμοχωρητικότητα του υγρού ( $\text{KJ/kg.K}$ )

$\dot{Q}$  = Μεταφορά θερμότητας στο υγρό ( $\text{KJ/hr}$ )



### Εναλλάκτης Θερμότητας

**Type 5b:** Μέσα στον εναλλάκτη διακρίνονται δύο πλευρές μία θερμή (source side) και μία ψυχρή (load side), στις οποίες ρέουν δύο διαφορετικά κυκλώματα υγρών. Ο χρήστης εισάγει έναν συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και τις θερμοκρασίες εισόδου των υγρών. Στη συνέχεια το μοντέλο προσδιορίζει την πλευρά με την ελάχιστη παραγωγική ικανότητα και υπολογίζει την απόδοση του εναλλάκτη σύμφωνα με την εξίσωση που ακολουθεί :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\frac{UA}{C_{\min}} * \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right)}{1 - \left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) * \exp\left(-\frac{UA}{C_{\min}} * \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right)}$$

Όπου:  $\varepsilon$  = απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας

$C_{\max}$  = μέγιστη παραγωγική ικανότητα

$C_{\min}$  = ελάχιστη παραγωγική ικανότητα

$UA$  = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας



### Δεξαμενή Αποθήκευσης

**Type 531:** Πρόκειται για μία δεξαμενή επίπεδου πυθμένα τοποθετημένη σε κάθετη διάταξη, όπου ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας πασουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dT_{Tank}}{dt} = \frac{Q_{in,Tank} - Q_{out,Tank}}{C_{Tank}}$$

Όπου:  $T_{Tank}$  = Θερμοκρασία υγρού στο εσωτερικό της δεξαμενής

$T_{in,Tank}$  = Θερμοκρασία του υγρού που εισέρχεται στη δεξαμενή

$T_{out,Tank}$  = Θερμοκρασία του υγρού που εξέρχεται από τη δεξαμενή

$C_{Tank}$  = Χωρητικότητα δεξαμενής





### Ψύκτης

**Type 666:** Πρόκειται για έναν ψύκτη συμπίεσης ατμών. Ο χρήστης παρέχει στο λογισμικό δεδομένα καταλόγου, τα οποία εισάγονται ως εξωτερικά αρχεία κειμένου και το μοντέλο προσδιορίζει την απόδοση του ψύκτη με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$COP_{nom} = COP_{rated} * COP_{ratio}$$

$$Capacity = Capacity_{rated} * Capacity_{ratio}$$

$$\dot{Q}_{load} = m_{chw} * C_{p_{chw}} * (T_{chw,in} - T_{chw,set})$$

$$PLR = \frac{\dot{Q}_{load}}{Capacity}$$

Όπου:

$COP_{nom}$  = Ονομαστικός συντελεστής απόδοσης του ψύκτη στις τρέχουσες συνθήκες

$COP_{rated}$  = Εκτιμώμενος συντελεστής απόδοσης του ψύκτη

$COP_{ratio}$  = Λόγος του ονομαστικού συντελεστή απόδοσης του ψύκτη προς τον εκτιμώμενο συντελεστή απόδοσης

$Capacity$  = Χωρητικότητα ψύκτη (kJ/hr)

$PLR$  = Part Load Ratio

$m_{chw}$  = ροή μάζας του chilled water (kg/hr)

$C_{p_{chw}}$  = Ειδική θερμοχωρητικότητα του chilled water (kJ/kg.K)

$T_{chw,in}$  = Θερμοκρασία εισόδου του chilled water στον ψύκτη

$T_{chw,set}$  = Επιθυμητή θερμοκρασία του chilled water που εξέρχεται από τον ψύκτη

$\dot{Q}_{load}$  = Θερμικά φορτία στον ψύκτη (kJ/hr)



### Dry Cooler

**Type 511:** Πρόκειται για μια συσκευή, η οποία χρησιμοποιείται για την ψύξη ενός υγρού ρεύματος, με εμφύσηση αέρα κατά μήκος πηνίων, όπου περιέχεται το υγρό. Ο χρήστης εισάγει σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες καταγράφονται σε τεχνικούς καταλόγους και ενημερωτικά φυλλάδια της κατασκευαστικής εταιρείας και στη συνέχεια το μοντέλο υπολογίζει την απόδοση του dry cooler για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών.

Η θερμοκρασία του υγρού εξόδου ( $T_{fluid,out}$ ) υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$h_{sat}(T_{fluid,out}) = h_{air}(T_{air,in}) + \frac{\dot{m}_{fluid} * Cp_{fluid} * (T_{fluid,in} - T_{fluid,out})}{\dot{m}_{air} * (1 - \exp[-\lambda_{design} * (\gamma_{air})^{-0.4}] )}$$

Όπου:

$$\lambda_{design} = \ln \left[ \frac{h_{sat}(T_{fluid,out,design}) - h_{air}(T_{air,in,design})}{h_{sat}(T_{fluid,out,design}) - h_{air}(T_{air,out,design})} \right]$$

$$\gamma_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{design}}$$

$\gamma_{air}$  = λόγος της ροής του αέρα προς τη ροή σχεδιασμού

$\dot{m}_{fluid}$  = ροή μάζας υγρού (kg/hr),  $\dot{m}_{air}$  = ροή μάζας αέρα (kg/hr)

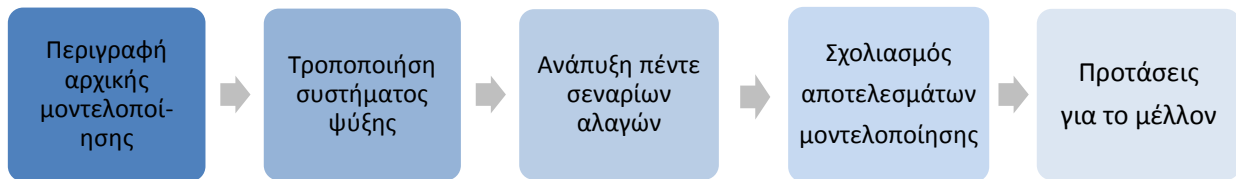
$T_{fluid, in}$  = θερμοκρασία υγρού που εισέρχεται στον dry cooler (°C)

$T_{fluid, out}$  = θερμοκρασία υγρού που εξέρχεται από τον dry cooler (°C)

$Cp$  = ειδική θερμοχωρητικότητα υγρού (kJ/kgK)

$h_{sat}$  = μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στον αέρα και στο υγρό στη θερμοκρασία κορεσμού (kJ/hr.m<sup>2</sup>.K).

## 5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΟΡ



**Εικόνα 29:** Βήματα που ακολουθήθηκαν

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται όλη η διαδικασία της ενεργειακής ανάλυσης του υπολογιστικού κέντρου υπό μελέτη. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν παρουσιάζονται στην εικόνα 29.

Αρχικά, λοιπόν, παρουσιάζεται διαγραμματικά η αρχική κατάσταση μοντελοποίησης και μελετώνται παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο δείκτης PUE και η ενεργειακή κατανάλωση του υπολογιστικού κέντρου. Στη συνέχεια, τροποποιώντας το αρχικό μοντέλο, αναπτύσσονται τα εξής πέντε σενάρια αλλαγών:

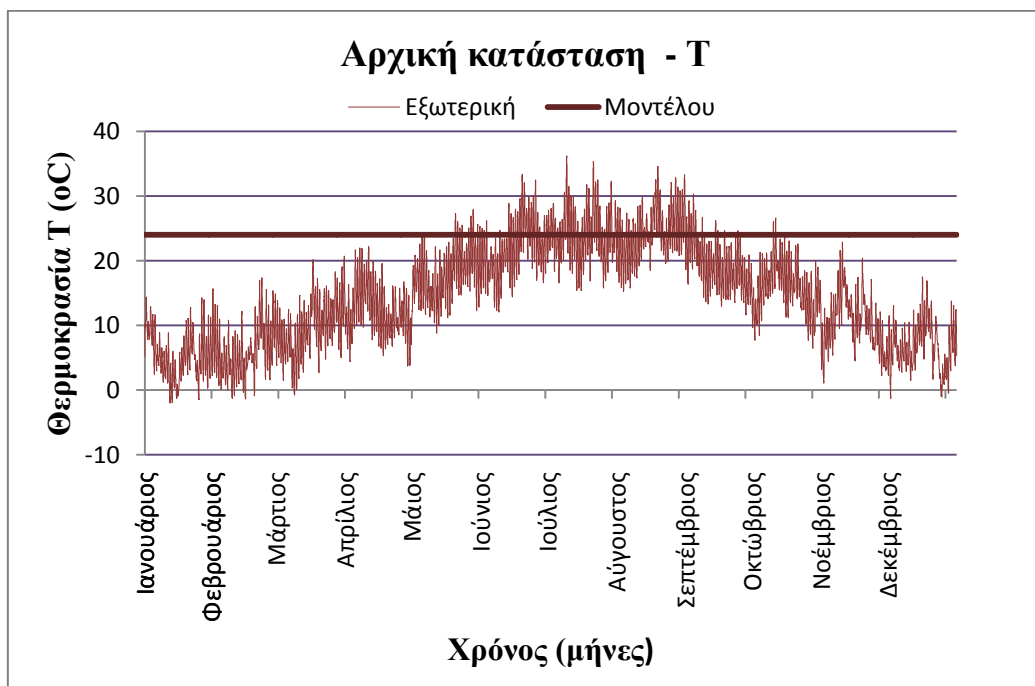
- 1) Σενάριο έμμεσης φυσικής ψύξης με νερό
- 2) Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με αέρα
- 3) Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με νερό ποταμού
- 4) Σενάριο βελτίωσης των υπολογιστών
- 5) Συνδυαστικό σενάριο

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των παραπάνω σεναρίων παρουσιάζονται διαγραμματικά και σχολιάζονται ως προς τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με την αρχική κατάσταση, ενώ τέλος προτείνονται κάποιες περαιτέρω ιδέες προς υλοποίηση για μελλοντικούς ερευνητές του θέματος.

## 5.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

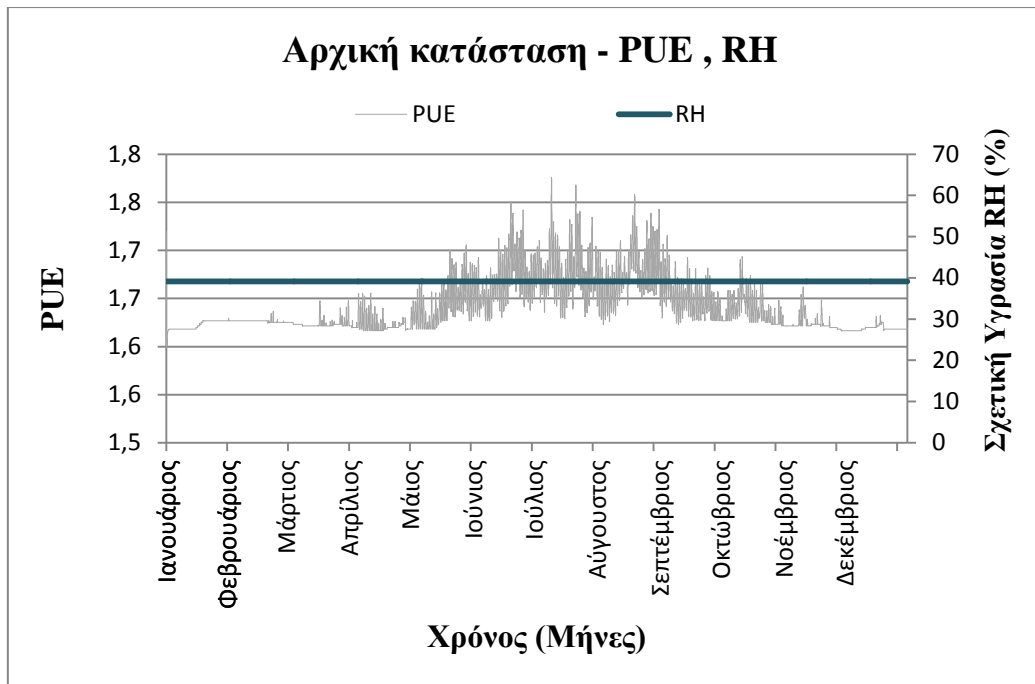
Στο διάγραμμα 2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός έτους, σύμφωνα με τα μετεωρολογικά στοιχεία της Ανκόνα για το 2011, καθώς και η αρχική ρύθμιση της θερμοκρασίας του αέρα στην αίθουσα των υπολογιστών στους 24°C.

Η μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι 36.2°C και εντοπίζεται τον Ιούλιο, ενώ η ελάχιστη είναι -2°C και εντοπίζεται τον Ιανουάριο.



**Διάγραμμα 2:** Ετήσια διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας, Ρύθμιση θερμοκρασίας αίθουσας υπολογιστών

Το διάγραμμα 3 απεικονίζει, αντίστοιχα, την αρχική ρύθμιση της σχετικής υγρασίας RH στο 39%, καθώς και την ετήσια διακύμανση της τιμής του δείκτη PUE. Η μέγιστη τιμή **PUE= 1.78** εντοπίζεται τον Ιούλιο όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα υψηλή και οι απαιτήσεις ενέργειας για ψύξη αυξάνονται. Αντιθέτως, η ελάχιστη τιμή **PUE=1.60** παρατηρείται τον Ιανουάριο, όπου η εξωτερική θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα χαμηλή.



**Διάγραμμα 3:** Ετήσια διακύμανση δείκτη PUE, Ρύθμιση σχετικής υγρασίας

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο υπολογιστικό κέντρο υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\text{Συνολική ενέργεια} = \text{Άθροισμα} \left( \begin{array}{c} \text{IT Φορτία} \\ \text{Ψύκτης} \\ \text{DryCoolers} \\ \text{Αντλίες} \\ \text{Μονάδες υποστήριξης} \end{array} \right) * \text{Συντελεστής Διόρθωσης}$$

- Ο **συντελεστής διόρθωσης**  $\text{Adj\_Factor}=1.242169$  υπολογίστηκε με βάση τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας στο υπολογιστικό κέντρο και της ενέργειας από την προσομοίωση του μοντέλου στο TRNSYS, ενώ ταυτόχρονα περιλαμβάνει και τις απώλειες κατά τη διανομή ενέργειας στο σύστημα.

- Η **πρωτογενής** ενέργεια που καταναλώθηκε και οι εκπεμπόμενοι ρύποι CO<sub>2</sub> υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις:
  - MWh πρωτογενούς ενέργειας = PEI \* MWh διανομής
  - T CO<sub>2</sub> = CO<sub>2equiv</sub> \* MWh διανομής
- Ο συντελεστής μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας(PEI) και τα CO<sub>2equiv</sub> διαφέρουν ανά χώρα. Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές για την Ιταλία.

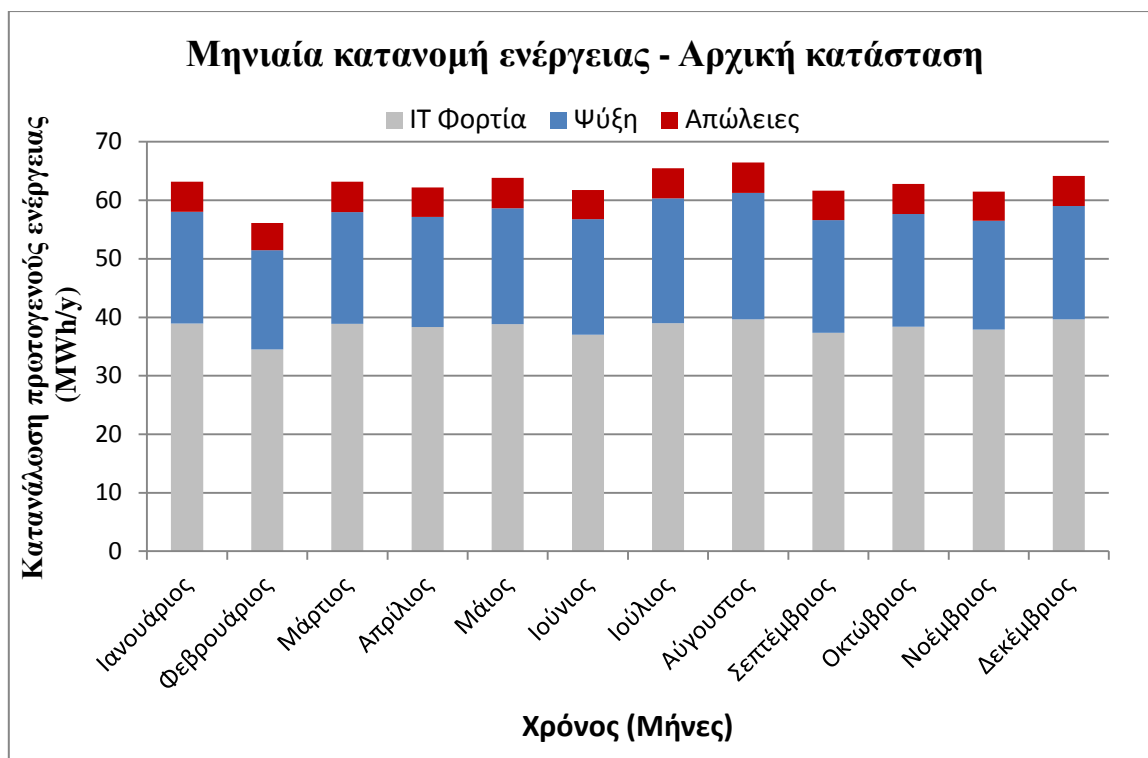
**Πίνακας 7:** Τιμές συντελεστών μετατροπής για την Ιταλία

Ιταλία		
Ενεργειακή Πηγή	PEI	CO <sub>2</sub> equiv
Ηλεκτρισμός	2.17	531

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, παρουσιάζεται στον πίνακα 8 η αρχική ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο υπολογιστικό κέντρο AOR, καθώς και η μετατροπή της σε πρωτογενή ενέργεια.

**Πίνακας 8:** Αρχική ετήσια κατανάλωση ενέργειας

	Συνολική	ITΦορτία	Ψύξη	Απώλειες
Αρχική κατανάλωση ενέργειας (MWh/γ)	346.7	211.3	107.4	28.0
Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh/γ)	752.3	458.4	233.1	60.8



**Διάγραμμα 4:** Μηνιαία κατανομή της συνολικής ενέργειας στην αρχική κατάσταση

Στο διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η διακύμανση της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για κάθε μήνα του έτους. Είναι εμφανές, ότι ο μήνας με τη μέγιστη συνολική κατανάλωση είναι ο Αύγουστος, όπου καταναλώνονται 66.5 MWh, ενώ το Φεβρουάριο καταναλώνεται η ελάχιστη ενέργεια συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες, που ισοδυναμεί με 56.1 MWh.

## 5.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Η εφαρμογή φυσικής ψύξης στα υπολογιστικά κέντρα έχει αποδειχθεί ως η περισσότερο κερδοφόρος μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε αυτόν τον τομέα. Στην παρούσα εργασία υλοποιούνται μέσω του TRNSYS τα ακόλουθα τρία διαφορετικά σενάρια εφαρμογής φυσικής ψύξης:



### 5.2.1 Σενάριο έμμεσης φυσικής ψύξης με νερό

Στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνεται φυσική ψύξη στο υπολογιστικό κέντρο, χωρίς να είναι αναγκαία η εγκατάσταση κάποιου συμπληρωματικού συστήματος. Το ήδη υπάρχον σύστημα τροποποιείται κατάλληλα, ώστε να αποφευχθεί η μηχανική ψύξη και να ενισχυθεί η φυσική ψύξη, όταν οι εξωτερικές συνθήκες το επιτρέπουν. Συγκεκριμένα, μία **βαλβίδα παράκαμψης** αποκόπτει τη λειτουργία του ψύκτη εξαναγκάζοντας τη ροή του cooling water να ακολουθήσει μία εναλλακτική διαδρομή και όχι αυτήν που περιλαμβάνει τον ψύκτη. Αντίστοιχα το chilled water, που καταλήγει στην αίθουσα των υπολογιστών, δεν ψύχεται στον ψύκτη, όπως συμβαίνει στη μηχανική ψύξη, αλλά μέσω του εναλλάκτη με τη μεταφορά θερμότητας από το cooling water.

Κατά τη μοντελοποίηση του σεναρίου αυτού στόχος ήταν η επίτευξη του υψηλότερου δυνατού **ποσοστού εξοικονόμησης ενέργειας**. Η διαδικασία που προηγείται της μοντελοποίησης, περιλαμβάνει την εξέταση και τροποποίηση κάποιων παραμέτρων του αρχικού συστήματος.



Συγκεκριμένα, τροποποιήθηκαν οι εξής παράμετροι:

- ❖ η θερμοκρασία ρύθμισης παροχής νερού από τον ψύκτη **CHw\_T\_SP**
- ❖ η θερμοκρασία στην αίθουσα υπολογιστών **DC\_ROOM\_TSP**
- ❖ η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, κάτω από την οποία ενεργοποιείται το σύστημα φυσικής ψύξης **FC\_OAT\_ON**
- ❖ η θερμοκρασία ρύθμισης παροχής νερού, κάτω από την οποία ενεργοποιείται η φυσική ψύξη **FC\_SWT\_ON**

Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται πιθανοί συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων. Οι συνδυασμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση την ακόλουθη λογική: αύξηση της θερμοκρασίας του νερού που παρέχεται από τον ψύκτη μικρότερη των 4°C, δεν επιφέρει αλλαγές στη θερμοκρασία της αίθουσας υπολογιστών. Αντιθέτως, κάθε αύξηση της θερμοκρασίας παροχής νερού από τον ψύκτη κατά 4°C συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας της αίθουσας των υπολογιστών κατά 2°C.

Επιπλέον, για την ενεργοποίηση της φυσικής ψύξης είναι απαραίτητο να τηρείται η συνθήκη **FC\_SWT\_ON > CHw\_T\_SP**, δηλαδή η θερμοκρασία παροχής νερού κατά την φυσική ψύξη πρέπει να ρυθμίζεται, ώστε να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία παροχής νερού από τον ψύκτη.

**Πίνακας 9:** Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 1

Σενάριο	CHw_T_SP (°C)	DC_ROOM_TSP (°C)	FC_OAT_ON (°C)	FC_SWT_ON (°C)
1-1	14	24	15	15
1-2	16	24	17	17
1-3	18	26	19	19
1-4	20	26	21	21
1-5	22	28	23	23
1-6	24	28	25	25

Στον πίνακα 9 είναι εμφανές, ότι σε κάποια σενάρια έχουν αυξηθεί αρκετά οι τιμές των παραμέτρων, συγκρίνοντάς τες με την αρχική κατάσταση. Αξίζει να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι η **δυνατότητα αύξησης των τιμών της θερμοκρασίας είναι επιτρεπτή**, αφού οι νέες κατηγορίες υπολογιστικών κέντρων που προτάθηκαν τα τελευταία χρόνια από την ASHRAE επιτρέπουν πλέον την αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο του αέρα μέσα στην αίθουσα υπολογιστών, όσο και του νερού κυκλοφορίας στις κλιματιστικές μονάδες, γεγονός που δεν επιτρεπόταν στο παρελθόν (Steinbrecher et al., 2011).

Ο πίνακας 10 που ακολουθεί, περιέχει τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση των σεναρίων του πίνακα 9. Στις στήλες του πίνακα αυτού καταγράφονται για κάθε ένα σενάριο: η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στο υπολογιστικό κέντρο, η πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται για ψύξη και τα αντίστοιχα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

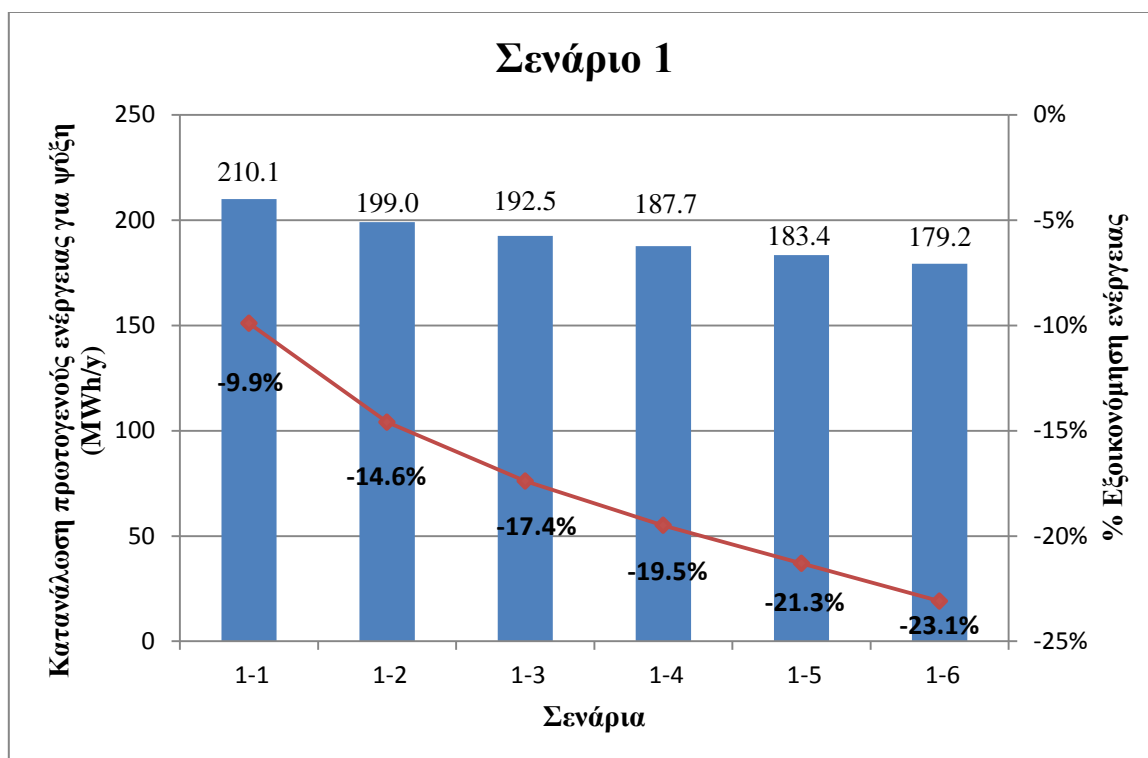
Το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\text{Αρχική Ενέργεια} - \text{Τελική Ενέργεια}}{\text{Αρχική Ενέργεια}} * 100\%$$

**Πίνακας 10:** Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 1

Σενάρια	Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh/y)	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη (MWh/y)	Ποσοστό εξοικονόμησης συνολικής ενέργειας %	Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για ψύξη %
Αρχικό	752.3	233.1	-	-
1-1	729.3	210.1	-3.1%	-9.9%
1-2	718.2	199.0	-4.5%	-14.6%
1-3	711.8	192.5	-5.4%	-17.4%
1-4	707.1	187.7	-6.0%	-19.5%
1-5	702.7	183.4	-6.6%	-21.3%
1-6	698.4	179.2	-7.2%	-23.1%

Στο διάγραμμα 5 αναπαριστάται γραφικά η σύγκριση των σεναρίων που περιγράφηκαν στους παραπάνω πίνακες. Παρατηρείται και εδώ ότι το βέλτιστο σενάριο είναι το 1-6.



Διάγραμμα 5: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη – Σενάριο Έμμεσης ψύξης με νερό

**Βέλτιστο σενάριο έμμεσης φυσικής  
ψύξης με νερό**



**Σενάριο 1-6**

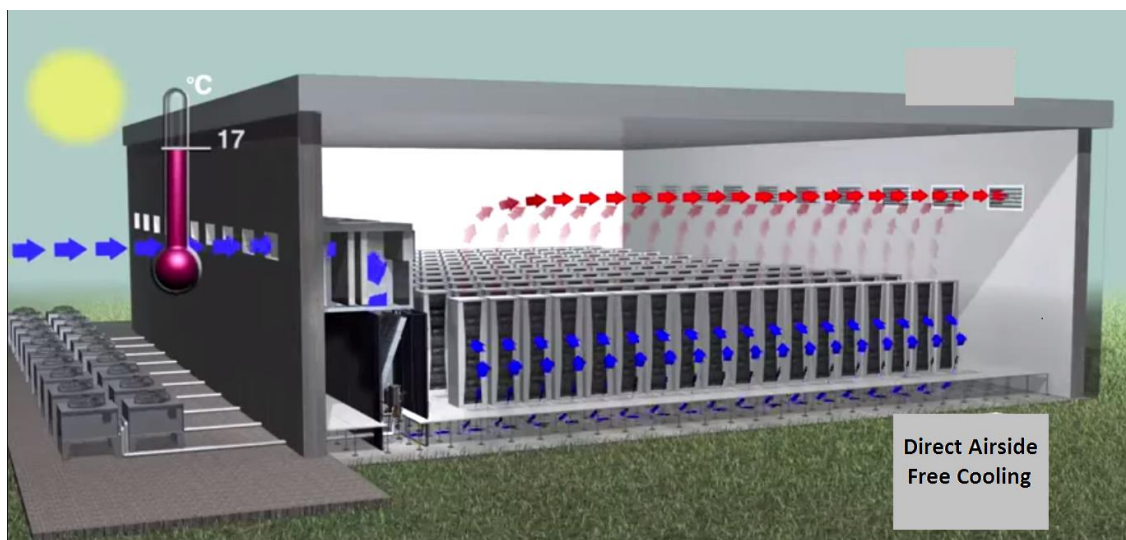
Το σενάριο που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας είναι το σενάριο 1-6. Στο σενάριο αυτό, η θερμοκρασία του νερού παροχής από τον ψύκτη έχει ρυθμιστεί στους 24°C, η θερμοκρασία στην αίθουσα των υπολογιστών ρυθμίστηκε στους 28°C, ενώ στους 25°C ρυθμίστηκαν η θερμοκρασία εξωτερικού αέρα και η θερμοκρασία παροχής νερού κατά τη φυσική ψύξη. Ήταν αναμενόμενο να είναι αυτό το βέλτιστο σενάριο, αφού οι τιμές ρύθμισης των θερμοκρασιών ήταν υψηλότερες από τις αντίστοιχες των υπόλοιπων σεναρίων. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας παρατηρείται, αφού περιορίζεται η απαίτηση της λειτουργίας του ψύκτη.

### 5.2.2 Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με αέρα

Η ανάπτυξη του σεναρίου αυτού περιλαμβάνει την τοποθέτηση ανοιγμάτων και **ειδικών φίλτρων** κατά μήκος ενός από τους τοίχους στο δωμάτιο των υπολογιστών. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο εξωτερικός αέρας που εισέρχεται, φιλτράρεται με σκοπό την απομάκρυνση ρυπαντικών φορτίων, τα οποία θα ήταν υπεύθυνα για πιθανή βλάβη στους υπολογιστές.

Κατά τον ελεύθερο φυσικό αερισμό, ο αέρας κινείται από το εσωτερικό ενός κτιρίου προς το περιβάλλον και αντίστροφα. Η κίνηση αυτή του αέρα οφείλεται στη διαφορά πίεσης, που παρατηρείται μεταξύ των σημείων του χώρου, η οποία προκαλείται είτε λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, είτε λόγω των ρευμάτων του αέρα στο χώρο (**Λαζαρίδης Μ., 2008**). Οπότε, ο εισερχόμενος αέρας ψύχει τους υπολογιστές, διατηρώντας παράλληλα το δωμάτιο σε κατάλληλη θερμοκρασία και στη συνέχεια το ζεστό ρεύμα αέρα απομακρύνεται από την απέναντι πλευρά του δωματίου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 30.

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς όχι μόνο περιορίζει τη χρήση των κλιματιστικών μονάδων, αλλά ταυτόχρονα πλεονεκτεί έναντι άλλων, λόγω του ελάχιστου κόστους εφαρμογής.

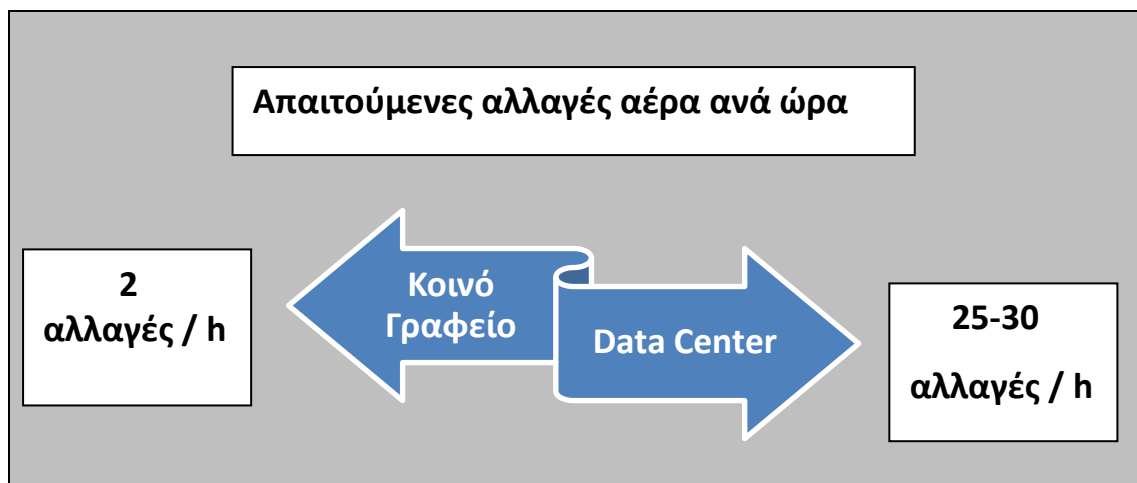


Εικόνα 30: Φυσικός αερισμός σε υπολογιστικό κέντρο

Ωστόσο, ο υπολογισμός της απαιτούμενης ροής του αέρα σε ένα υπολογιστικό κέντρο είναι μία ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, εξαρτώμενη από ποικίλους παράγοντες προς εξέταση.

Η πρόβλεψη των παραγόμενων θερμικών φορτίων από τους υπολογιστές, η σωστή ανταπόκριση του συστήματος ψύξης, η πιθανότητα εντοπισμού «θερμών σημείων» (hot spots) σε ορισμένους υπολογιστές και η αποφυγή ανάμειξης των ψυχρών και θερμών ρευμάτων αέρα είναι οι σημαντικότεροι από τους παράγοντες που διαφοροποιούν τα υπολογιστικά κέντρα από τα κοινά κτίρια.

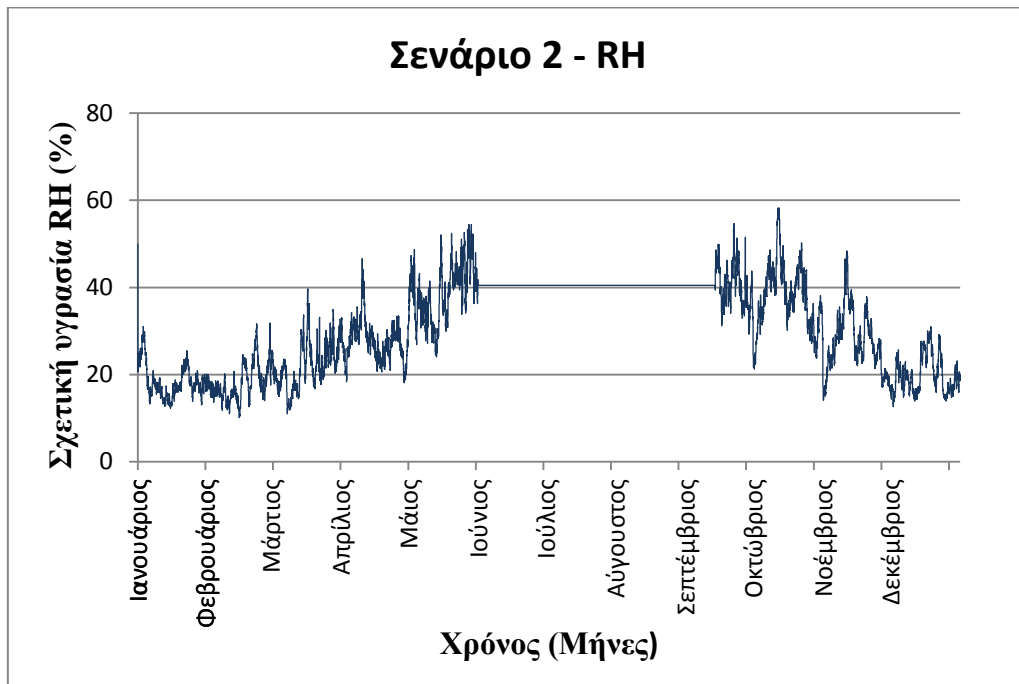
Αν η παροχή του αέρα είναι ανεπαρκής, τότε ο ψυχρός αέρας θα θερμανθεί ταχέως με αποτέλεσμα να μην προλάβουν να ψυχθούν όλες οι θερμές περιοχές. Για αυτόν το λόγο, σε ένα υπολογιστικό κέντρο απαιτούνται περίπου 25-30 αλλαγές αέρα ανά ώρα, ενώ για τον εξαερισμό ενός κοινού γραφείου απαιτούνται μόλις 2 αλλαγές ανά ώρα.



**Εικόνα 31:** Απαιτούμενες αλλαγές αέρα σε υπολογιστικά κέντρα

Ο άμεσος φυσικός αερισμός εφαρμόστηκε στο AOR data center με τη χρήση του TRNSYS για τη χρονική περίοδο ενός έτους, **εκτός από τους καλοκαιρινούς μήνες**. Παρατηρήθηκε ότι τα επίπεδα σχετικής υγρασίας του εξωτερικού αέρα που σημειώνονται από τον Ιούνιο έως τα μέσα Σεπτεμβρίου είναι ανώτερα ( $R_h > 80\%$ ) από τα επιτρεπτά όρια που θέτει η ASHRAE για τα υπολογιστικά κέντρα ( **$8\% < R_h < 80\%$** ). Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατό να συμπεριληφθούν στη μοντελοποίηση αυτού του σεναρίου οι συγκεκριμένοι μήνες.

Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η διακύμανση της Σχετικής Υγρασίας (RH) κατά τη διάρκεια του έτους. Όπως είναι εμφανές, ο φυσικός αερισμός διακόπτεται από τις αρχές Ιουνίου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου για τους λόγους που προαναφέρθηκαν και η υγρασία αυτήν την περίοδο ρυθμίζεται στο 36%. Παράλληλα παρατηρείται σταδιακή μείωση των επιπέδων της υγρασίας από το φθινόπωρο έως το χειμώνα και σταδιακή αύξηση από την άνοιξη έως το καλοκαίρι.



Διάγραμμα 6: Ετήσια διακύμανση σχετικής υγρασίας

Αρχικά, τροποποιήθηκε καταλλήλως η δομή του αρχικού μοντέλου στο TRNSYS, ώστε να εισάγεται εξωτερικός αέρας μέσα στο υπολογιστικό κέντρο, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι παράμετροι που διαδραματίζουν ρόλο σε αυτό το σενάριο αφορούν στις αλλαγές αέρα ανά ώρα (ACR), τη θερμοκρασία του αέρα στην αίθουσα των υπολογιστών και τη θερμοκρασία του νερού παροχής από τον ψύκτη. Κατά την ανάπτυξη των σεναρίων, η παράμετρος που αναφέρεται στις αλλαγές του αέρα ανά ώρα δέχθηκε τις τιμές 25 και 30 changes/hr. Αντίστοιχα, οι τιμές της θερμοκρασίας του νερού που παρέχεται από τον ψύκτη κυμάνθηκαν από 14°C-24°C, ενώ η θερμοκρασία του αέρα στην αίθουσα των υπολογιστών κυμάνθηκε από 24°C-28°C, σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια της ASHRAE. Παράλληλα, εξετάστηκε τόσο η ταυτόχρονη λειτουργία του φυσικού αερισμού και του ψύκτη, όσο και η απομονωμένη λειτουργία τους.

▪ **Ταυτόχρονη λειτουργία ψύκτη και φυσικού αερισμού- Μερική φυσική ψύξη:**

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μερική και όχι ολική φυσική ψύξη, καθώς δεν παρακάμπτεται η λειτουργία του ψύκτη. Η αίθουσα των υπολογιστών δέχεται εξωτερικό αέρα ο οποίος συμβάλλει στην ψύξη του χώρου σε συνδυασμό με τον ψύκτη. Η εφαρμογή του συστήματος αυτού επιφέρει εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση, αφού ο ψύκτης λειτουργεί σε χαμηλότερη ισχύ, με αποτέλεσμα την κατανάλωση λιγότερης ενέργειας.

▪ **Απομονωμένη λειτουργία ψύκτη και φυσικού αερισμού- Ολική φυσική ψύξη:**

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκε η εφαρμογή ολικού φυσικού αερισμού κατά τη διάρκεια ενός έτους, εκτός από την καλοκαιρινή περίοδο, κατά την οποία τίθεται σε λειτουργία ο ψύκτης. Η εξοικονόμηση ενέργειας που παρατηρείται έγκειται στο γεγονός ότι ο ψύκτης και οι κλιματιστικές μονάδες δεν καταναλώνουν ενέργεια, αφού παρακάμπτεται η λειτουργία τους.

**Στον πίνακα 11** παρατίθενται τα υποσενάρια που αναπτύχθηκαν για το σενάριο 2, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου δυνατού συνδυασμού παραμέτρων. Όπως φαίνεται στον πίνακα, αναπτύχθηκαν 4 σενάρια ταυτόχρονης λειτουργίας του ψύκτη και του φυσικού αερισμού και 3 σενάρια απομονωμένης λειτουργίας του φυσικού αερισμού.

**Πίνακας 11:** Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 2

Σενάριο	Αλλαγές αέρα ανά ώρα ACR (1/hr)	Θερμοκρασία αίθουσας υπολογιστών (°C)	Θερμοκρασία του νερού παροχής από τον ψύκτη (°C)	Λειτουργία ψύκτη και αερισμού
2-1	25	24	14	Ταυτόχρονη
2-2	30	26	18	Ταυτόχρονη
2-3	30	28	22	Ταυτόχρονη
2-4	30	28	26	Ταυτόχρονη
2-5	30	26	18	Απομονωμένη
2-6	30	26	20	Απομονωμένη
2-7	30	28	24	Απομονωμένη

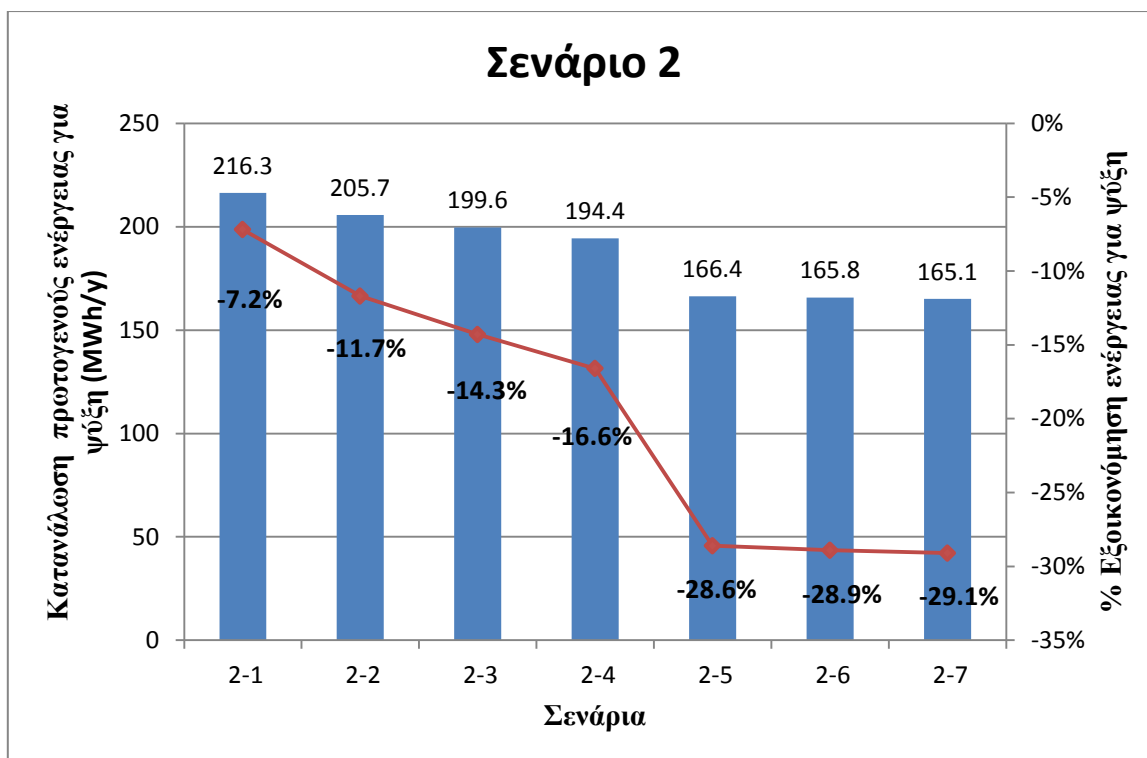
Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των σεναρίων του πίνακα 11 περιέχονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 12. Για κάθε σενάριο καταγράφεται η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του υπολογιστικού κέντρου, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη και τα αντίστοιχα ποσοστά εξοικονόμησης που προκύπτουν σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο.

**Πίνακας 12:** Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 2

Σενάρια	Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh)	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη (MWh)	Ποσοστό εξοικονόμησης συνολικής ενέργειας %	Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για ψύξη %
Αρχικό	752.3	233.1	-	-
2-1	735.7	216.3	-2.2%	-7.2%
2-2	725.0	205.7	-3.6%	-11.7%
2-3	718.9	199.6	-4.5%	-14.3%
2-4	713.7	194.4	-5.1%	-16.6%
2-5	685.7	166.4	-8.9%	-28.6%
2-6	685.1	165.8	-8.9%	-28.9%
2-7	684.5	165.1	-9.0%	-29.1%

Η γραφική απεικόνιση των τιμών του πίνακα 12 παρουσιάζεται στο διάγραμμα 7. Από την παρατήρηση του διαγράμματος συμπεραίνεται πως τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας είναι υψηλότερα στην περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας του ψύκτη και του φυσικού αερισμού, δηλαδή στα σενάρια 2-5, 2-6 και 2-7.





**Διάγραμμα 7:** Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη - Σενάριο φυσικού αερισμού

**Βέλτιστο σενάριο άμεσης ψύξης με αέρα ➡ Σενάριο 2-7**

Ο βέλτιστος συνδυασμός τιμών των παραμέτρων του πίνακα 10 αντιστοιχεί στο σενάριο 2-7, όπου σε ετήσια βάση καταναλώνονται συνολικά 315.4 MWh/y και ειδικότερα 76.1 MWh/y για την ψύξη του υπολογιστικού κέντρου. Τα παραπάνω ποσά ενέργειας αντιστοιχούν σε -9.0% ποσοστό εξοικονόμησης επί της συνολικής ενέργειας και σε -29.1% ποσοστό εξοικονόμησης για ψύξη.

### 5.2.3 Σενάριο άμεσης φυσικής ψύξης με νερό

Όπως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εφαρμογή φυσικών μεθόδων ψύξης στα υπολογιστικά κέντρα έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και μάλιστα αποφεύγοντας την πρόκληση περιβαλλοντικών ζημιών (**Guizzi and Manno 2011**). Μία ιδιαίτερα καινοτόμο ιδέα αποτελεί η χρήση θαλασσινού ή άλλων φυσικών πηγών νερού για την ψύξη του χώρου των υπολογιστών.

Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης του συστήματος ψύξης μέσω της άντλησης νερού από τον ποταμό **Esino**, τμήμα του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 32.

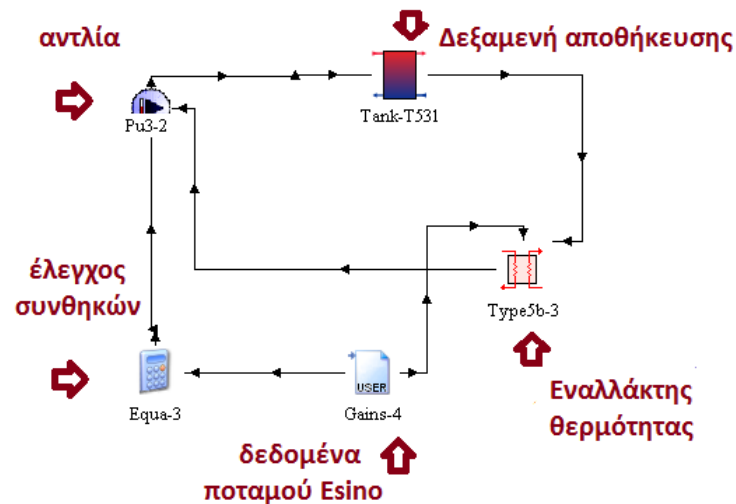


Εικόνα 32: Τμήμα ποταμού Esino

Ο ποταμός αυτός διασχίζει την πόλη της Ανκόνα, έχει μήκος 85km και εκβάλλει στην Αδριατική θάλασσα. Ωστόσο, μετρήσεις της θερμοκρασίας των υδάτων του ποταμού διατίθενται μόνο για τους μήνες **Αύγουστο και Σεπτέμβριο**, οπότε έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης μόνο για τη συγκεκριμένη περίοδο.

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου σεναρίου προϋποθέτει την τοποθέτηση ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας και μίας αντλίας νερού, σύμφωνα με τη διάταξη της εικόνας 33.

Κατά τη μοντελοποίηση του σεναρίου, ελέγχεται η θερμοκρασία των υδάτων του ποταμού σε σύγκριση με τη θερμοκρασία νερού παροχής από τον ψύκτη. Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μικρότερη από τη δεύτερη, το υπολογιστικό κέντρο ψύχεται φυσικά μέσω του ποταμού. Στην αντίθετη περίπτωση, ενεργοποιείται η μηχανική ψύξη, τίθεται δηλαδή σε λειτουργία ο ψύκτης.



Εικόνα 33: Προσομοίωση του σεναρίου 3 στο TRNSYS

Ο πίνακας 13 περιέχει δύο διαφορετικά σενάρια άμεσης ψύξης του υπολογιστικού κέντρου με νερό, ρυθμίζοντας κατάλληλα τη θερμοκρασία του αέρα στην αίθουσα των υπολογιστών και τη θερμοκρασία του νερού που παρέχεται από τον ψύκτη, σε συνδυασμό με την παροχή νερού από τον ποταμό Esino.

Πίνακας 13: Είσοδοι μοντελοποίησης για το σενάριο 3

Σενάρια	DC_ROOM_TSP (°C)	CHw_T_SP (°C)	Μέση θερμοκρασία υδάτων Esino (°C)	Παροχή νερού από Esino (kg/hr)
Αρχικό	24	14	-	-
3-1	26	20	17.5	4000
3-2	28	24	17.5	4000

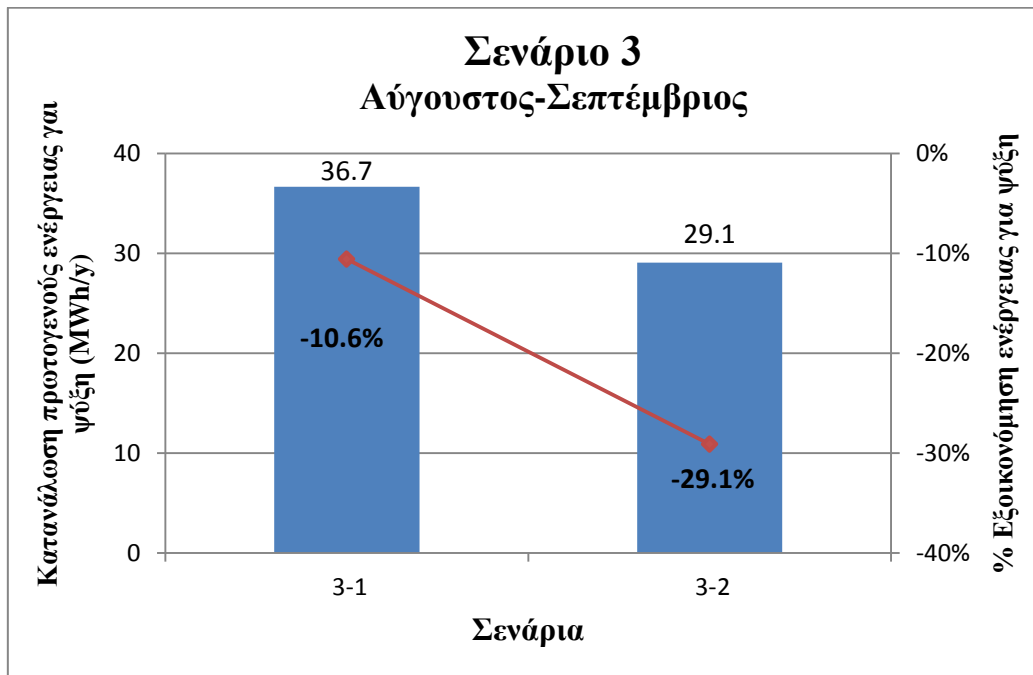
Τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση των σεναρίων του πίνακα 13 καταγράφονται στον πίνακα 14, όπου παρουσιάζεται η συνολική πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας για τους δύο μήνες, η πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται για ψύξη και τα αντίστοιχα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας.

**Αξίζει να σημειωθεί** πως τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας θα ήταν σαφώς υψηλότερα αν η μοντελοποίηση της άμεσης άντλησης νερού από τον Esino γινόταν καθόλη τη διάρκεια του έτους και όχι μόνο για δύο μήνες.

**Πίνακας 14:** Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 3

Σενάρια	Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh)	Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη (MWh)	Ποσοστό εξοικονόμησης συνολικής ενέργειας (%)	Ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για ψύξη (%)
Αρχικό	128.1	41.0	-	-
3-1	123.7	36.7	-3.4%	-10.6%
3-2	116.1	29.1	-9.4%	-29.1%

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται γραφικά τα δύο σενάρια που περιγράφηκαν παραπάνω για τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο.



**Διάγραμμα 8:** Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη -Σενάριο άμεσης ψύξης με νερό ποταμού

Περίοδος μοντελοποίησης: Αύγουστος-Σεπτέμβριος

**Βέλτιστο σενάριο άμεσης ψύξης με  
νερό ποταμού**



**Σενάριο 3-2**

Το σενάριο 3-2 είναι περισσότερο αποδοτικό, καθώς τους δύο συγκεκριμένους μήνες καταναλώνονται **29.1 MWh** για την ψύξη του υπολογιστικού κέντρου, ενώ αρχικά καταναλώνονταν 41MWh. Συνεπώς, είναι αξιοσημείωτη η εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό -29.1%.

### 5.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Η επίτευξη της ενεργειακής απόδοσης στα υπολογιστικά κέντρα δεν είναι συνιστώσα αποκλειστικά και μόνο της ανάπτυξης ενός καλά δομημένου συστήματος ψύξης, αλλά και της εφαρμογής ενός ανεπτυγμένου λογισμικού υπολογιστών. Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει σχεδιασμό πολυπύρηνων μικροεπεξεργαστών, τεχνικές αποτελεσματικής συσκευασίας, καθώς και τοποθέτηση νέων υποσυστημάτων μνήμης και δίσκου, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (**Uddin and Rahman 2012**).

Στο σενάριο που αναπτύσσεται παρακάτω, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του υπολογιστικού κέντρου AOR, τοποθετώντας στους υπολογιστές μία «πράσινη» μνήμη (green memory). Επιλέχθηκε η «πράσινη» μνήμη που προτείνει η εταιρεία Samsung (**Samsung's 5<sup>th</sup> Generation Green Memory**), η οποία δίνει τη δυνατότητα στους πυρήνες των υπολογιστών να διαχειρίζονται μεγάλο πλήθος δεδομένων, απαιτώντας ταυτόχρονα λιγότερο χώρο αποθήκευσης και καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια.

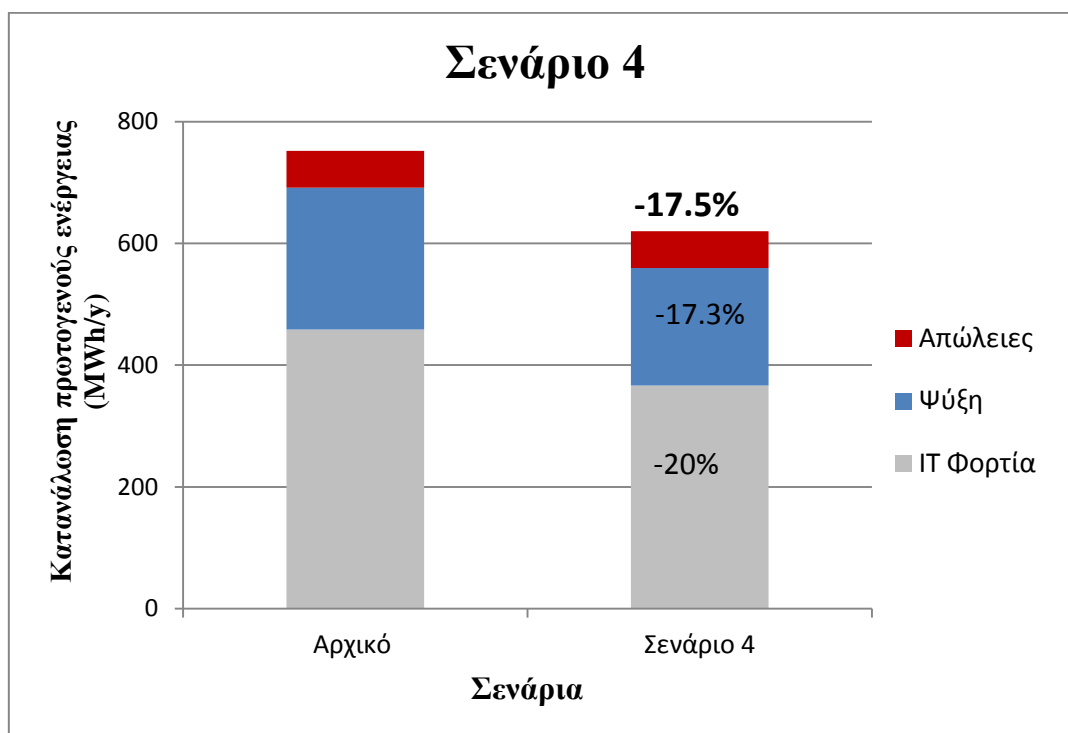
Αυτή η λύση συνδυάζει βέλτιστη παροχή ισχύος, αποτελεσματική διακίνηση δεδομένων με μείωση του κόστους διαχείρισης και συνεπώς μείωση των θερμικών φορτίων που παράγονται (**Samsung Electronics, 2013**).

**Πίνακας 15:** Κατανάλωση ενέργειας για το σενάριο 4

	Συνολική	ITΦορτία	Ψύξη	Απώλειες
Κατανάλωση ενέργειας (MWh/γ)	285.8	169	88.8	28
Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh/γ)	620.2	366.7	192.7	60.8
%Εξοικονόμηση ενέργειας	-17.5%	-20%	-17.4%	0%

Στον πίνακα 15 καταγράφονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του σεναρίου 4 και συγκεκριμένα παρουσιάζεται η κατανομή ενέργειας κατά τη λειτουργία των υπολογιστών και του συστήματος ψύξης. Η βελτίωση των υπολογιστών, μέσω της τοποθέτησης της πράσινης μνήμης αποδεικνύεται επικερδής, τόσο εξαιτίας της μείωσης των φορτίων IT, όσο και της μείωσης της ενέργειας που απαιτείται για την ψύξη των υπολογιστών.

Το διάγραμμα 9 αποτελεί τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του σεναρίου 4, τα οποία συγκρίνονται με το αρχικό σενάριο. Η μείωση της ενέργειας που καταναλώνουν οι υπολογιστές κατά **20%** και η μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για ψύξη κατά **17.3%** συνθέτουν μία διακριτή μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά **17.5%**.



**Διάγραμμα 9:** Ετήσια κατανάλωση συνολικής ενέργειας - Σενάριο βελτίωσης H/Y

## 5.4 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΛΛΑΓΩΝ

Ύστερα από την ανάπτυξη των τεσσάρων σεναρίων, που παρουσιάστηκαν το καθένα ξεχωριστά στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε προσπάθεια συνδυασμού αυτών, με σκοπό την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας.

Το υπολογιστικό κέντρο σε αυτήν την περίπτωση ψύχεται άμεσα με φυσικό αερισμό (direct airside free cooling) από τον Ιανουάριο έως τον Ιούνιο και από τον Οκτώβριο έως το Δεκέμβριο. Τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο ενεργοποιείται η φυσική ψύξη με νερό από τον ποταμό Esino και την υπόλοιπη περίοδο, δηλαδή από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο, ενεργοποιείται το σύστημα της έμμεσης φυσικής ψύξης με νερό (indirect waterside free cooling), όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα βρίσκεται στα επιτρεπτά επίπεδα. Όταν όμως η εξωτερική θερμοκρασία υπερβαίνει τα όρια ενεργοποίησης της φυσικής ψύξης, τίθεται σε λειτουργία ο ψύκτης. Ταυτόχρονα, η τοποθέτηση της «πράσινης» μνήμης στους υπολογιστές, που περιγράφηκε στο σενάριο 4, αποδεικνύεται επικερδής για το σύστημα, καθώς μειώνει τις απαιτήσεις ενέργειας για τη λειτουργία των υπολογιστών.

**Πίνακας 16:** Είσοδοι συνδυαστικού σεναρίου στο TRNSYS

Είσοδοι Συνδυαστικού Σεναρίου	
DC_ROOM_TSP	28°C
CHw_T_SP	24 °C
FC_OAT_ON	25 °C
FC_SWT_ON	25 °C
Tav Esino	17.5 °C
ACR	30/hr

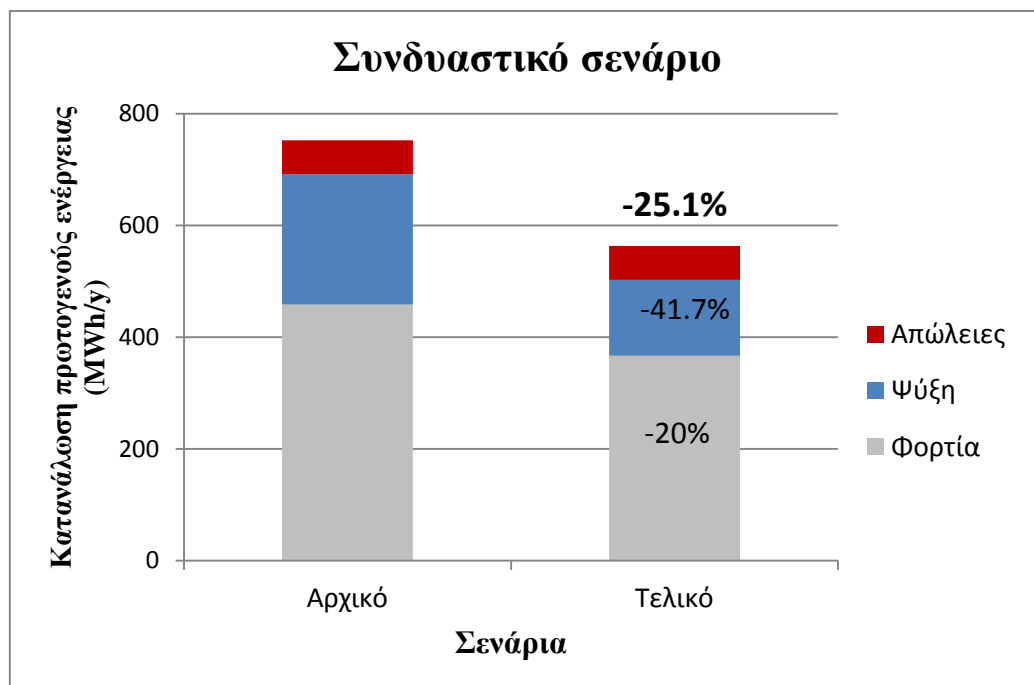
Οι βασικές είσοδοι στο TRNSYS για το σενάριο αυτό καταγράφονται στον πίνακα 16, ενώ τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης παρουσιάζονται στον πίνακα 17. Η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ισοδυναμεί με 563.3 MWh, από τις οποίες 366.7 MWh καταναλώνονται κατά τη λειτουργία των υπολογιστών, 135.8 MWh απαιτούνται για την ψύξη του υπολογιστικού κέντρου και 60.8 MWh αντιστοιχούν στις απώλειες κατά τη διανομή της ενέργειας.



Πίνακας 17: Κατανάλωση ενέργειας - Συνδυαστικό σενάριο

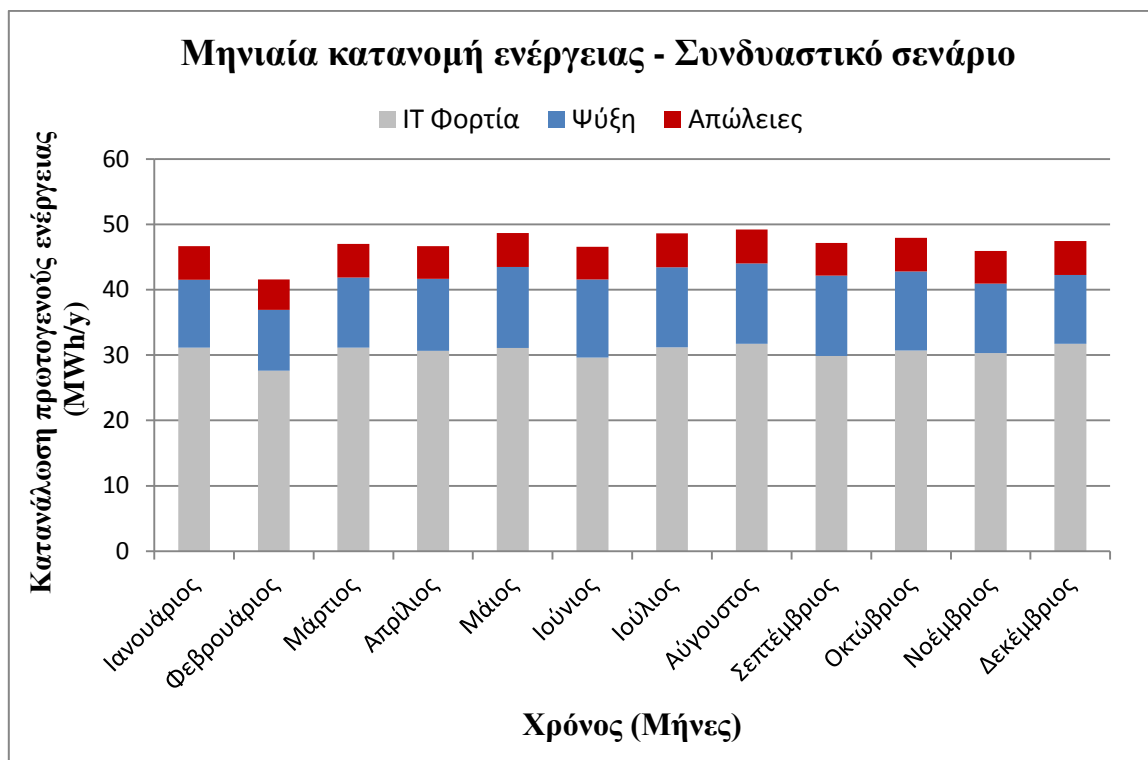
	Συνολική	ITΦορτία	Ψύξη	Απώλειες
Κατανάλωση ενέργειας (MWh/y)	259.6	169	62.6	28
Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (MWh/y)	563.3	366.7	135.8	60.8
%Εξοικονόμηση ενέργειας	-25.1%	-20%	-41.7%	0%

Στο διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η σύγκριση της αρχικής κατανάλωσης ενέργειας με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του συνδυαστικού σεναρίου. Οι αλλαγές που εφαρμόστηκαν επιφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας κατά **25.1% επί της αρχικής συνολικής ενέργειας**. Τα επιμέρους ποσοστά εξοικονόμησης είναι εξίσου υψηλά, καθώς στον τομέα της ψύξης καταναλώνεται πλέον **41.7%** λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την αρχική, ενώ όσον αφορά στη λειτουργία των υπολογιστών, παρατηρείται μείωση κατά **20%** στις απαιτήσεις ενέργειας.



Διάγραμμα 10: Ετήσια κατανάλωση συνολικής ενέργειας - Συνδυαστικό σενάριο

Στο διάγραμμα 11, που ακολουθεί, συνοψίζονται γραφικά τα όσα προαναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για κάθε μήνα του έτους.

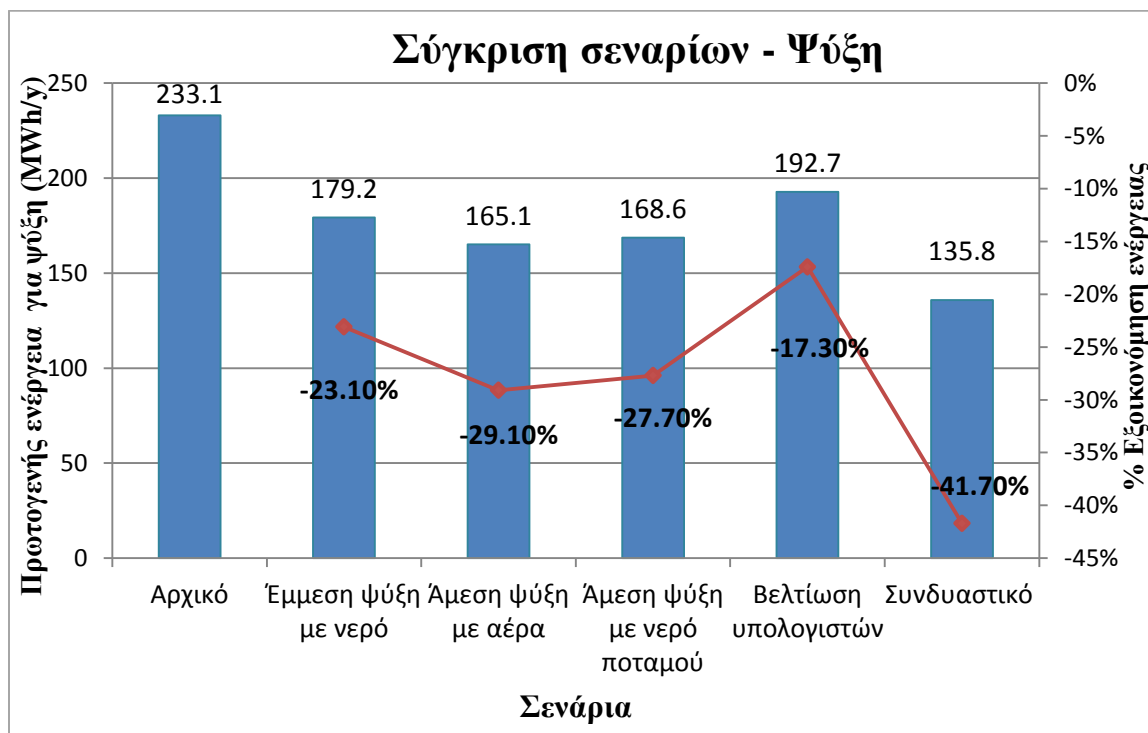


**Διάγραμμα 11: Μηνιαία κατανομή της συνολικής ενέργειας στο συνδυαστικό σενάριο**

Είναι εμφανές πως ο Αύγουστος είναι ο μήνας που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ενέργεια, σε αντίθεση με το Φεβρουάριο, όπου παρατηρείται το ελάχιστο ποσό κατανάλωσης ενέργειας, συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες.

Ειδικότερα η κατανάλωση ενέργειας για ψύξη είναι συνιστώσα των IT φορτίων, αλλά και της δυνατότητας ενεργοποίησης της φυσικής ψύξης. Παρατηρείται, λοιπόν, πως το Φεβρουάριο σημειώνεται η μικρότερη διακίνηση ηλεκτρονικών δεδομένων, με συνέπεια να μειώνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία των υπολογιστών, γεγονός που τελικά οδηγεί σε λιγότερη κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη του υπολογιστικού κέντρου.

## 5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ



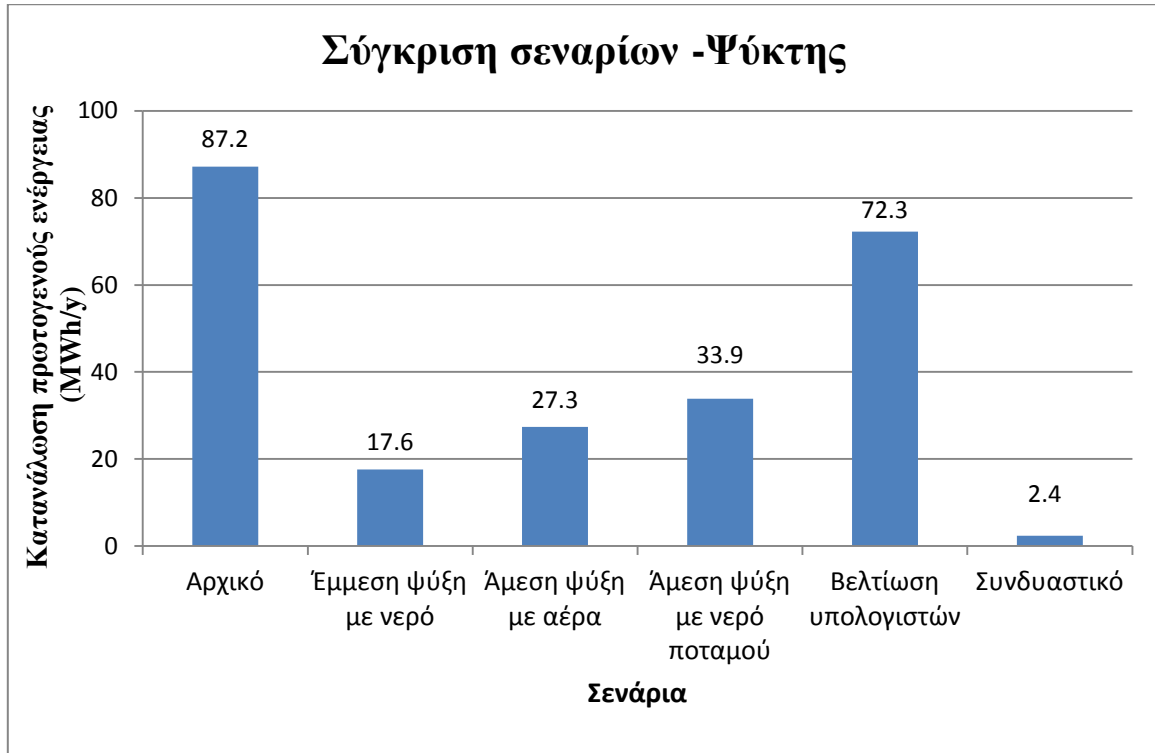
**Διάγραμμα 12:** Σύγκριση σεναρίων ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη

Στο διάγραμμα 12 συγκρίνονται γραφικά όλα τα σενάρια αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν, ως προς την ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη. Συγκεκριμένα, οι στήλες με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη μετρούμενη σε MWh/y για κάθε σενάριο ξεχωριστά, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με την αρχική κατανάλωση ενέργειας. Συμπεραίνεται ότι:

- Το σενάριο που αποδεικνύεται ως το πιο αποδοτικό για την ψύξη του κέντρου είναι το συνδυαστικό σενάριο, το οποίο αντιστοιχεί σε κατανάλωση ενέργειας 135MWh/y και σε ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας για ψύξη -41.7%.
- Ωστόσο, στην πράξη, ίσως να μην είναι απόλυτα εφικτός ο συνδυασμός όλων των παραπάνω σεναρίων από οικονομικής απόψεως. Οπότε, αν εξεταστούν μεμονωμένα και όχι συνδυαστικά τα σενάρια που αναπτύχθηκαν, συμπεραίνεται ότι η άμεση φυσική ψύξη με αέρα είναι ιδιαίτερα επικερδής μέθοδος, καθώς αντιστοιχεί σε ποσοστό εξοικονόμησης -29.1%.

- Επιπλέον, η έμμεση φυσική ψύξη με νερό παρουσιάζει λίγο μικρότερο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας (-23.1%) σε σύγκριση με τον φυσικό αερισμό, ενώ το σενάριο βελτίωσης των υπολογιστών παρουσιάζει εξοικονόμηση ενέργειας -17.3%.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 13 η ενέργεια που καταναλώνεται αποκλειστικά από τον ψύκτη του υπολογιστικού κέντρου για κάθε ένα σενάριο.



**Διάγραμμα 13:** Σύγκριση σεναρίων ως προς την ετήσια κατανάλωση ενέργειας από τον ψύκτη

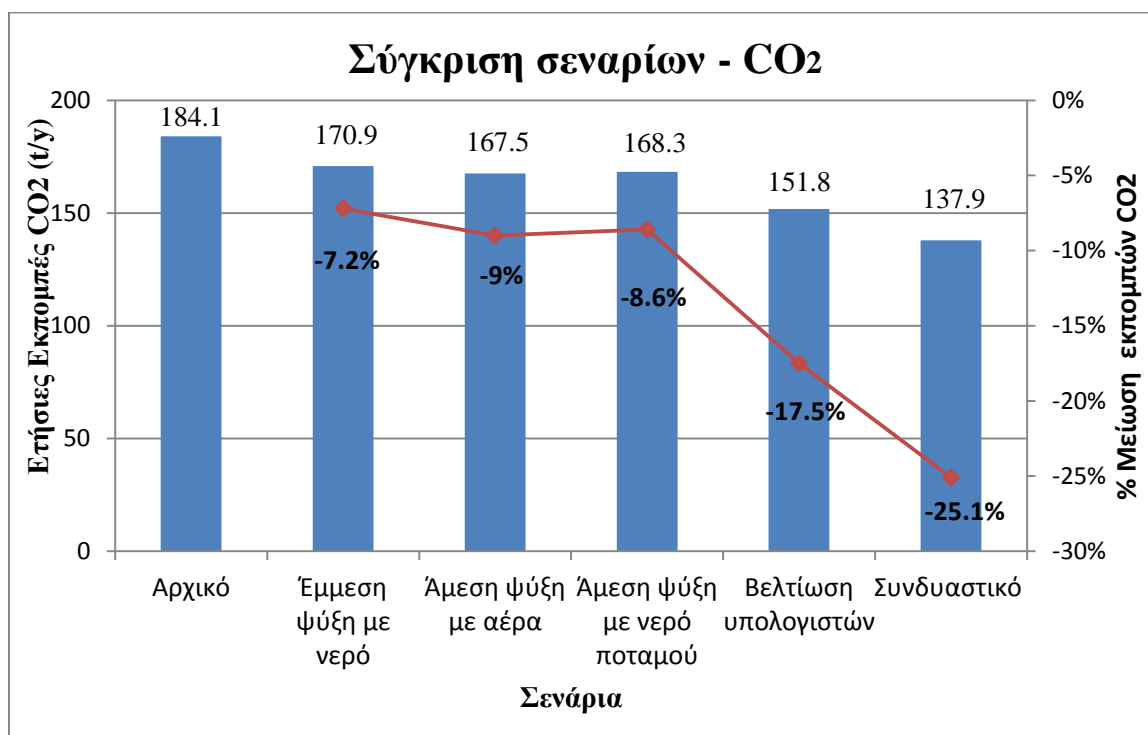
- Όπως είναι εμφανές στο διάγραμμα 13, αρχικά καταναλώνονταν από τον ψύκτη 87.2 MWh πρωτογενούς ενέργειας ετησίως.
- Η ενέργεια που καταναλώνεται από τον ψύκτη κατά την εφαρμογή της έμμεσης φυσικής ψύξης με νερό είναι σαφώς λιγότερη σε σύγκριση με την αρχική. Συγκεκριμένα, καταναλώνονται 17.6 MWh ετησίως από τον ψύκτη, ενώ το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για ψύξη σε αυτό το σενάριο καταναλώνεται από τους ανεμιστήρες των dry coolers.

- Υπενθυμίζεται ότι κατά την εφαρμογή του σεναρίου της άμεσης ψύξης με αέρα, η λειτουργία του ψύκτη εντοπίζεται μόνο κατά τη χρονική περίοδο από τις αρχές Ιουνίου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου, ενώ τους υπόλοιπους μήνες ενεργοποιείται ο φυσικός αερισμός. Ο ψύκτης, σε αυτήν την περίπτωση καταναλώνει 27.3 MWh ετησίως.
- Στο σενάριο της άμεσης ψύξης με νερό ποταμού, ο ψύκτης καταναλώνει 33.9 MWh ετησίως, αφού η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου σεναρίου πραγματοποιήθηκε μόνο για δύο μήνες (Αύγουστο – Σεπτέμβριο).
- Η βελτίωση των υπολογιστών μειώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις της ψύξης του υπολογιστικού κέντρου και συνεπώς μειώνεται και η λειτουργία του ψύκτη, ο οποίος καταναλώνει 72.3 MWh/γ.
- Κατά την εφαρμογή του συνδυαστικού σεναρίου αλλαγών, ο ψύκτης καταναλώνει ετησίως 2.4 MWh, που σημαίνει ότι η λειτουργία του έχει περιοριστεί σημαντικά σε σχέση με το αρχικό μοντέλο ψύξης, καθώς ενεργοποιείται μόνο όταν οι εξωτερικές συνθήκες δεν επιτρέπουν την εφαρμογή φυσικής ψύξης.

Πίνακας 18: Ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> για όλα τα σενάρια

Σενάρια	Εκπομπές CO <sub>2</sub> (t/y)	% Ετήσια Μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub>
Αρχικό	184.1	-
Έμμεση ψύξη με νερό	170.9	-7.2%
Άμεση ψύξη με αέρα	167.5	-9%
Άμεση ψύξη με νερό ποταμού	168.3	-8.6%
Βελτίωση υπολογιστών	151.8	-17.5%
Συνδυαστικό	137.9	-25.1%

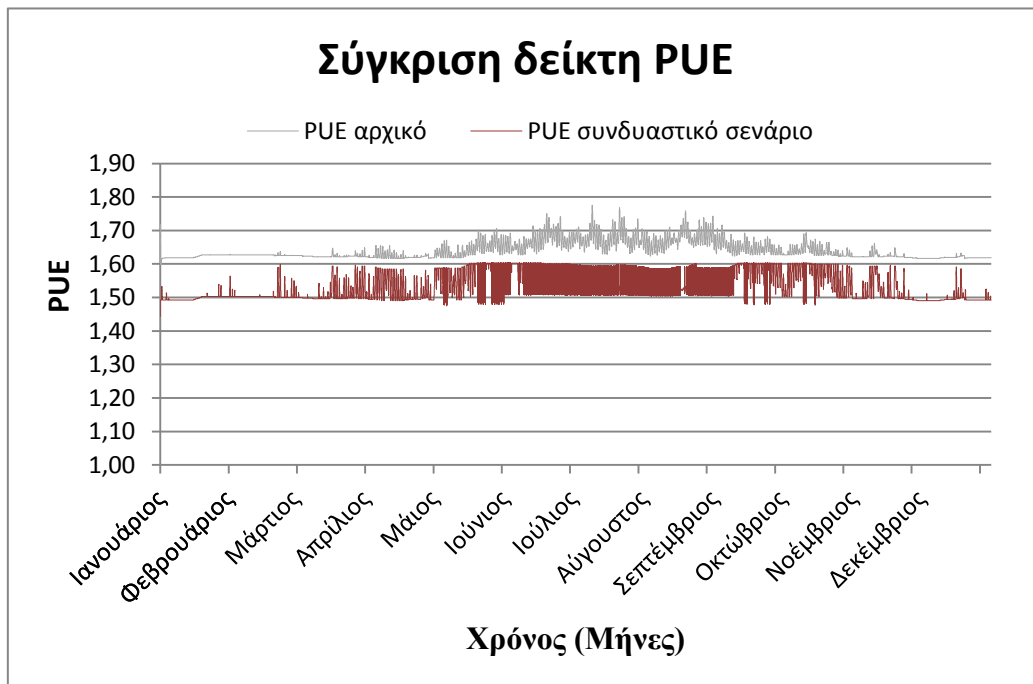
Ύστερα από τη μοντελοποίηση όλων των σεναρίων, καταγράφονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 18 οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οι οποίες υπολογίστηκαν σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στη σελίδα 49 και παρουσιάζονται γραφικά στο διάγραμμα 14.



**Διάγραμμα 14:** Σύγκριση σεναρίων ως προς τη μείωση ετήσιων συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub>

- Το υψηλότερο ποσοστό μείωσης των εκπομπών (-25.1%) παρατηρείται κατά την εφαρμογή του συνδυαστικού σεναρίου, όπου εκπέμπονται συνολικά 137.9 t CO<sub>2</sub>/ y, ενώ οι αρχικές εκπομπές ισοδυναμούσαν με 184.1 t/y.
- Έπειτα, το σενάριο της βελτίωσης των υπολογιστών αντιστοιχεί στο δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης (-17.5%) των ρύπων του CO<sub>2</sub>. Ο υπολογισμός των ετήσιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έγινε με βάση τη **συνολική** ετήσια κατανάλωση ενέργειας και όχι με βάση την ενέργεια που καταναλώνεται αποκλειστικά για ψύξη.

Επομένως, είναι λογικό το σενάριο αυτό να παρουσιάζει μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> σε σχέση με τα σενάρια φυσικής ψύξης, αφού παρουσιάζει εξοικονόμηση ενέργειας τόσο στον τομέα των φορτίων IT, όσο και στον τομέα της ψύξης, ενώ στα σενάρια φυσικής ψύξης δεν παρατηρείται εξοικονόμηση στον τομέα των φορτίων IT.



**Διάγραμμα 15:** Σύγκριση ετήσιας διακύμανσης του δείκτη PUE στο Αρχικό και στο Συνδυαστικό Σενάριο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η εξέταση του δείκτη PUE αποτελεί μία σαφή εικόνα για την ενεργειακή απόδοση των υπολογιστικών κέντρων (**Yuventi and Mehdizadeh 2013**). Στο διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση του δείκτη PUE στην αρχική κατάσταση, αλλά και κατά την εφαρμογή του συνδυαστικού σεναρίου αλλαγών, ώστε να είναι συγκρίσιμες οι δύο περιπτώσεις. Παρατηρείται πως στην αρχική κατάσταση η μέση τιμή του δείκτη PUE είναι 1.64, ενώ στο συνδυαστικό σενάριο η μέση τιμή του δείκτη είναι 1.54, γεγονός που σημαίνει ότι οι αλλαγές στο σύστημα ψύξης ήταν ενεργειακά αποδοτικές.

Επιπροσθέτως, είναι εμφανές ότι τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει μία αυξομείωση στην τιμή του PUE, που οφείλεται πιθανότατα στην ενεργοποίηση του ψύκτη και των dry coolers, όταν οι εξωτερικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη φυσική ψύξη.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εξέταση και ανάπτυξη της παρούσας εργασίας διεξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία επικεντρώνονται στην βελτίωση του συστήματος ψύξης του υπολογιστικού κέντρου υπό μελέτη, αλλά και σφαιρικότερα στην καλλιέργεια οικολογικής συνείδησης κατά τη λειτουργία των υπολογιστικών κέντρων, με στόχο τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας, όσο και την συνειδητή μείωση των περιβαλλοντικών ζημιών. Τα συμπεράσματα αυτά συνοψίζονται παρακάτω:

- ❖ Η αύξηση των επιτρεπτών ορίων της θερμοκρασίας του αέρα αλλά και του νερού παροχής στα υπολογιστικά κέντρα και ειδικότερα στο υπολογιστικό κέντρο AOR, έδωσε τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στον τομέα της ψύξης.
- ❖ Τα πέντε σενάρια που αναπτύχθηκαν αποδεικνύονται όλα επικερδή ως προς την ενέργεια που εξοικονομείται για την ψύξη της αίθουσας των υπολογιστών, με ποσοστά εξοικονόμησης πάνω από 20% επί της αρχικής κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη.
- ❖ Το σενάριο που παρουσιάζει τη **μεγαλύτερη εξοικονόμηση** ενέργειας για ψύξη είναι το συνδυαστικό σενάριο, η εφαρμογή του οποίου αποφέρει 41.7% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη.
- ❖ Συγκρίνοντας μεμονωμένα και όχι συνδυαστικά τις μεθόδους φυσικής ψύξης, ο φυσικός αερισμός αποδεικνύεται ως η ενεργειακά αποδοτικότερη μέθοδος, με ποσοστό εξοικονόμησης 29.1%.
- ❖ Η ψύξη του υπολογιστικού κέντρου μέσω άντλησης υδάτων από τον ποταμό Esino συμπεραίνεται ότι είναι μία **εν δυνάμει** εξαιρετικά αποδοτική λύση, αφού σε χρονικό διάστημα μόλις δύο μηνών εφαρμογής η αρχική κατανάλωση συνολικής ενέργειας μειώνεται κατά 8.6%.

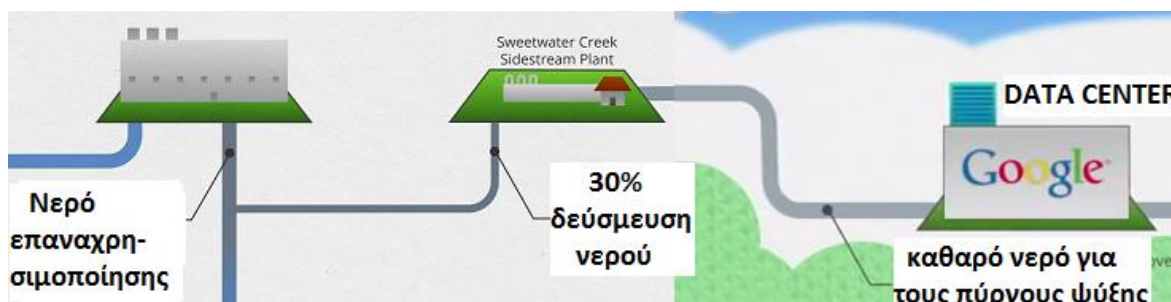


## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν τέθηκε το ζήτημα της ανάλυσης του κόστους των μεθόδων που εξετάστηκαν. Προτείνεται, επομένως, η ανάπτυξη μιας οικονομικής μελέτης, με σκοπό τη διατύπωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας περί της πλέον συμφέρουσας αλλαγής στο σύστημα ψύξης.
- Οι αλλαγές που εφαρμόστηκαν στο σύστημα μηχανικής ψύξης περιλαμβάνουν παρεμβάσεις που αφορούν μόνο στη λειτουργία του ψύκτη. Περαιτέρω έρευνα βελτιστοποίησης της απόδοσης των αντλιών και των ανεμιστήρων στους dry coolers θα οδηγούσε σε μεγαλύτερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας.
- Επιπλέον, προτείνεται διεξαγωγή μετρήσεων της θερμοκρασίας και της παροχής των υδάτων του ποταμού Esino, ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση του σεναρίου άμεσης ψύξης με νερό ποταμού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και όχι μόνο για δύο μήνες.
- Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε ο δείκτης PUE. Ωστόσο, θα ήταν ενδιαφέρουσα η εξέταση και άλλων δεικτών ενεργειακής απόδοσης όπως ο GEC (Green energy coefficient) και ο ERE (Energy Reuse Effectiveness).
- Είναι ευρέως γνωστό, ότι τα καιρικά φαινόμενα δεν είναι σταθερά, αλλά μεταβλητά. Οπότε, τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν σε αυτή τη μελέτη με βάση το αρχείο καιρού για το έτος 2011 δεν μπορούν να γενικευτούν απόλυτα σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών επεξεργασίας μετεωρολογικών δεδομένων θα μπορούσε να επιτυγχάνεται σχετική πρόβλεψη των συνθηκών του εξωτερικού περιβάλλοντος, ώστε να επιλέγεται η ενεργοποίηση του κατάλληλου συστήματος ψύξης αντίστοιχα.

- Μία ιδιαίτερα καινοτόμο ιδέα για την ψύξη των υπολογιστικών κέντρων αποτελεί η χρήση νερού επαναχρησιμοποίησης (reuse water). Η φυσική ψύξη των υπολογιστικών κέντρων με νερό δε συνάδει απαραίτητα με τη χρήση πόσιμου νερού. Γι αυτό το λόγο, η χρήση νερού επαναχρησιμοποίησης αποτελεί μία βιώσιμη λύση, καθώς όχι μόνο δεν επιβαρύνει το φυσικό περιβάλλον, αλλά ταυτόχρονα εξυψώνει την αξία της ανακύκλωσης.

Κάθε αναπτυγμένη πόλη διαθέτει εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων. Το νερό που προκύπτει καταλήγει συνήθως, είτε σε υδάτινους αποδέκτες, είτε προς άρδευση. Προτείνεται, λοιπόν, συνεργασία του υπολογιστικού κέντρου AOR με κέντρο βιολογικών καθαρισμών και επεξεργασίας λυμάτων με σκοπό την άντληση του νερού προς επαναχρησιμοποίηση για την ψύξη της αίθουσας των υπολογιστών, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 33.



Εικόνα 34: Ψύξη του Douglas County Data Center με νερό επαναχρησιμοποίησης

- Προτείνεται ακόμα διαφορετική διαχείριση της θερμότητας που απορρίπτεται από το υπολογιστικό κέντρο προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, μέσω του σχεδιασμού κατάλληλων διατάξεων θα μπορούσε να γίνει εφικτή η χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας για τη θέρμανση κάποιων εγκαταστάσεων του νοσοκομείου, είτε γραφείων, είτε δωματίων ασθενών.

- Τέλος, προτείνεται η εξέταση της διαθεσιμότητας και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην περιοχή (π.χ ηλιακή, αιολική). Για παράδειγμα, η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της τοποθέτησης φωτοβολταϊκών συστημάτων ή υλικών αλλαγής φάσης στην τοιχοποιία της αίθουσας των υπολογιστών θα μπορούσε να επιφέρει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, αφού στόχος ενός οικολογικού υπολογιστικού κέντρου είναι ο συνδυασμός εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με την εφαρμογή φυσικών μεθόδων ψύξης.



**Εικόνα 35:** Ανανεώσιμες πηγές στα υπολογιστικά κέντρα

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη Βιβλιογραφία

- Beitelmal A.H., Fabris D., 2014. "Servers and Data Centers Energy Performance Metrics." *Energy & Buildings* 80: 562–69.
- Brady G., Kapur N., Summers J.L., Thompson H.M., 2013. "A Case Study and Critical Assessment in Calculating Power Usage Effectiveness for a Data Centre." *Energy Conversion and Management* 76: 155–61.
- Cho J., Lim T., Kim B.S., 2012. "Viability of Datacenter Cooling Systems for Energy Efficiency in Temperate or Subtropical Regions: Case Study." *Energy and Buildings* 55: 189–97.
- Choo K., Galante R.M., Ohadi M.M., 2014. "Energy Consumption Analysis of a Medium-Size Primary Data Center in an Academic Campus." *Energy and Buildings* 76: 414–21.
- Chou D.C., Chou A.Y., 2012. "Awareness of Green IT and Its Value Model." *Computer Standards & Interfaces* 34(5): 447–51.
- Clidas J., Stiver DW, Hamburg W., 2009, "Water-based data center." Patent US7525207B2.
- Dai J., Das D., Ohadi M., Pecht M., 2013. "Reliability Risk Mitigation of Free Air Cooling through Prognostics and Health Management." *Applied Energy* 111: 104–12.
- Ebrahimi K., Jones G.F., Fleischer A.S., 2014. "A Review of Data Center Cooling Technology, Operating Conditions and the Corresponding Low-Grade Waste Heat Recovery Opportunities." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 622–38.
- Endo H., Kodama H., Fukuda H., Sugimodo T., Horie T., Kondo M., 2014. "Effect of Climatic Conditions on Energy Consumption in Direct Fresh-Air Container Data Centers." *Sustainable Computing: Informatics and Systems*.
- Facilities, Mission Critical, Technology Spaces, and Electronic Equipment. 2011. "2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center." 1–45.

- Fakhim B., Behnia M., Armfield S.W., Srinarayana N., 2011. "Cooling Solutions in an Operational Data Centre: A Case Study." *Applied Thermal Engineering* 31(14-15): 2279–91.
- Farnworth E., Castilla-rubio J.C., "SMART 2020 : Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age".
- Guizzi L., Manno M., 2011. "Fuel cell-based cogeneration system covering data centers' energy needs". *Energy* 41(56-64).
- Hammann H.F., Iyengar M.K., Kessel T.G., 2011, "Cooling infrastructure leveraging a combination of free and solar cooling". Patent US8020390B2.
- Kaiser J., "SURVEY RESULTS : DATA CENTER ECONOMIZER USE".
- Lajevardi B., Haapala K.R., Junker J.F., 2014. "Real-Time Monitoring and Evaluation of Energy Efficiency and Thermal Management of Data Centers." *Journal of Manufacturing Systems*.
- Lee K.P., Chen H.L., 2013. "Analysis of Energy Saving Potential of Air-Side Free Cooling for Data Centers in Worldwide Climate Zones." *Energy and Buildings* 64: 103–12.
- Mackay, K., "Energy Efficient Cooling Solutions for Data Centres." 1–128.
- Malkamäki T., Ovaska S.J., 2012. "Solar Energy and Free Cooling Potential in European Data Centers." *Procedia Computer Science* 10: 1004–9.
- Power Emerson Network, "Energy Efficient Cooling Solutions for Data Centers." Power, That, and Cloud Computing. "How Dirty Is Your Data ?" Practice, Best. "Google ' S Green Data Centers : Network POP Case Study".
- Shehabi A., Horvath A., Tschudi W., Gadgil A.G., Nazaroff W.W., 2008. "Particle Concentrations in Data Centers." *Atmospheric Environment* 42 (24): 5978–90.
- Siriwardana J., Jayasekara S., Halgamuge S.K., 2013. "Potential of Air-Side Economizers for Data Center Cooling: A Case Study for Key Australian Cities." *Applied Energy* 104: 207–19.
- Spanaki A., Kolokotsa D., Tsoutsos T., Zacharopoulos I., 2014. "Assessing the Passive Cooling Effect of the Ventilated Pond Protected with a Reflecting Layer." *Applied Energy* 123: 273–80.

- Steinbrecher R., Schmidt R., 2011. 2011. “Data Center Environments ASHRAE'S Evolving Thermal Guidelines.” *Mission Critical Facilities and Electronic Equipment*.
- Todorovic M.S., Kim J.T., 2014. “Data Centre's Energy Efficiency Optimization and Greening—Case Study Methodology and R&D Needs.” *Energy and Buildings*.
- Uddin M., Rahman A.A., 2012. “Energy Efficiency and Low Carbon Enabler Green IT Framework for Data Centers Considering Green Metrics.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6): 4078–94.
- Whitehead B., Andrews D., Shah A., Maidment G., 2014. “Assessing the Environmental Impact of Data Centres Part 1: Background, Energy Use and Metrics.” *Building and Environment* 82: 151–59.
- Yuventi J., Mehdizadeh R., 2013. “A Critical Analysis of Power Usage Effectiveness and Its Use in Communicating Data Center Energy Consumption.” *Energy and Buildings* 64: 90–94.
- Zhang H., Shao S., Xu H., Zou H., Tian C., 2014. “Free Cooling of Data Centers: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35: 171–82.
- Zimmermann S., Meijer I., Tiwari M.K., Paredes S., Michel B., Poulikakos D., 2012. “Aquasar : A Hot Water Cooled Data Center with Direct Energy Reuse.” *Energy* 43(1): 237–45.

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βάγιας Β. (2014), “Δυναμική εξοικονόμηση ενέργειας και βελτίωση θερμικής άνεσης στο νοσοκομείο Χανίων”
- Κολοκοτσά Δ. (2014), “Ενεργειακή αξιολόγηση συστημάτων ψύξης”, Διαλέξεις μαθήματος Ενεργειακής Αξιολόγησης Κτιρίων, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης
- Λαζαρίδης Μ. (2008), “Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους”, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλας
- Πυλούδη Ε. (2013), “Μετατροπή του κτιρίου μηχανικών περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης σε κτίριο μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης”
- Τσούτσος Θ. (2008), “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Περιβάλλον”, Σημειώσεις μαθήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης

## Διαδίκτυο

- Energy in (2014), Το πρώτο οικολογικό Data Center στην Ελλάδα, (<http://energyin.gr/2014/10/08/to-%CF%80%CF%81%CF%8E%CF%84%CE%BF-%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CF%8C-data-center-%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1/>, τελευταία πρόσβαση στις 20/1/2015)
- Environmental Leader, (2010), Green Data Centers to Capture 28% Market Share by 2015, (<http://www.environmentalleader.com/2010/08/05/green-data-centers-to-capture-28-market-share-by-2015/#ixzz3UC2TIErs>, τελευταία πρόσβαση στις 10/3/2015)
- Fiberlink, (2014), Data Center Rack, ([http://fiberoptiksolution.com/?attachment\\_id=39](http://fiberoptiksolution.com/?attachment_id=39), τελευταία πρόσβαση στις 12/12/2014)
- Green @ Hospital n.d , Ospedali Riuniti di Ancona, (<http://www.greenhospital-project.eu/the-partners/ospedali-riuniti-ancona/>, τελευταία πρόσβαση στις 19/1/2015)
- Gregory, M. (2013), Inside Facebook's green and clean arctic data centre, (<http://www.bbc.com/news/business-22879160>, τελευταία πρόσβαση στις 21/12/2014)
- Levy, S. (2014), Apple aims to shrink it's carbon footprint with new data centers, (<http://www.wired.com/2014/04/green-apple>, τελευταία πρόσβαση στις 10/3/2015)
- Mail Online, (2013),Is Google building a navy? Internet giant launches second 'floating data center', (<http://www.dailymail.co.uk/news/article-2479299/Second-floating-Google-data-center-spotted-Maine.html#ixzz3UGyPQE7h>, τελευταία πρόσβαση στις 28/9/2014)
- Samsung Electronics, (2013), Samsung's 5th Generation Green Memory Solution- The optimal next-generation memory solution for the data center, ([http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/file/media/5th\\_Generation\\_Green\\_Memory\\_Solution.pdf](http://www.samsung.com/global/business/semiconductor/file/media/5th_Generation_Green_Memory_Solution.pdf), τελευταία πρόσβαση στις 11/3/2015)

- Wenzel, E. (2014), Apple, Facebook, Google score in Greenpeace data center ratings, (<http://www.greenbiz.com/blog/2014/04/02/google-apple-facebook-good-greenpeace-energy-ratings>, τελευταία πρόσβαση στις 9/3/2015)
- Zibreg, C. (2014), Apple gives the press a rare peek into upcoming Nevada server/solar farm, (<http://www.idownloadblog.com/2014/04/21/apple-tour-green-data-centers/>, τελευταία πρόσβαση στις 11/3/2015)
- Zimmer, L. 2013, Stockholm Data Center Saves \$1 Million a Year by Using Baltic Seawater for Cooling, (<http://inhabitat.com/baltic-seawater-used-to-cool-stockholm-data-centers-and-to-heat-nearby-homes-offices/>, τελευταία πρόσβαση στις 7/1/2015)