



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

Τίτλος Πτυχιακής Εργασίας:

«Ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίου πολιτιστικής
κληρονομιάς»

Παναγιώτης Κωνσταντινίδης

A.M : 201100096

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Μαργαρίτα-Νίκη Ασημακοπούλου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να προσεγγίσει σε προπτυχιακό επίπεδο τη μελέτη ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτηρίου. Το υπό εξέταση κτήριο είναι το Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών, ένα νεοκλασικό διατηρητέο κτήριο στην Πλάκα. Προφανώς, εμφανίζονται πολλές προκλήσεις και περιορισμοί σε αυτό το εγχείρημα αλλά, όπως θα φανεί και από το περιεχόμενο της εργασίας, είναι υλοποιήσιμο. Κύριο μέλημα μας είναι να ταυτοποιήσουμε τα τμήματα της δομής ή της λειτουργίας του μουσείου που είναι ενεργοβόρα και επιτρέπεται να παρέμβουμε. Η μέθοδος που θα μας το επιτρέψει αυτό είναι το εργαλείο προσομοίωσης EnergyPlus. Θα αρχίσουμε με προσομοίωση της αρχικής κατάστασης, και στη συνέχεια θα εξετάσουμε διαφορετικά σενάρια για κάθε παρέμβαση στην ενεργειακή συμπεριφορά του μουσείου. Θα αξιολογήσουμε κάθε παρέμβαση ανάλογα με την ελάττωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που μπορούν να επιφέρουν και τη δυνατότητα εφαρμογής τους, και θα τις συγκρίνουμε μεταξύ τους. Οι βασικές παρεμβάσεις που θα γίνουν στο μουσείο είναι η αναβάθμιση του ηλεκτρικού εξοπλισμού των γραφείων, του φωτισμού, και του συστήματος θέρμανσης ψύξης, είτε αναβαθμίζοντας τις υπάρχουσες κλιματιστικές μονάδες είτε εγκαθιστώντας αντλία θερμότητας. Οι προσομοιώσεις των υποθέσεων μας ήταν ενθαρρυντικές για τα δύο τελευταία σενάρια και έδειξαν μείωση στο ενεργειακή κατανάλωση του κτηρίου, κατά 48,2% και 29% αντίστοιχα. Στο τέλος, θα αναφερθούμε βιβλιογραφικά σε ορισμένες μεθόδους ενεργειακής αναβάθμισης που προτείνουμε να γίνουν μελλοντικά, αν αναθεωρηθεί το νομικό πλαίσιο περιορισμών στα διατηρητέα κτήρια.

ABSTRACT

The purpose of this effort is to tackle the study of energy upgrades to a building at the undergraduate level. The Museum of the University of Athens, a neoclassical listed structure in Plaka, is under dispute. This project obviously has numerous obstacles and restrictions, but as the content of the work shows, it is achievable. Our major goal is to identify if the energy-intensive areas of the museum's construction or operation are permitted to be intervened upon. The EnergyPlus simulation tool will enable us to do this. We will begin by replicating the initial condition before examining several possibilities for each intervention in the museum's energy behavior. We will analyze and compare each action based on the decrease in environmental footprint it can generate. The key interventions in the museum will be the updating of the electrical equipment in the offices, the lighting, and the cooling-heating system, which will be accomplished by either replacing the current air conditioning units or installing a heat pump. The simulations of our assumptions were optimistic for the latter two scenarios, revealing a reduction in the building's energy usage of 48.2 percent and 29 percent, respectively. Finally, we will refer to the literature on certain energy-saving solutions that we want to use in the future if the legislative framework governing limits on listed buildings is revised.

Περιεχόμενα

<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	6
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο</u>	8
<u>«Η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης»</u>	8
<u>«Σε ποιο πλαίσιο επεμβαίνουμε στο κτήριο;»</u>	8
Τι ορίζουμε ως ενεργειακή αναβάθμιση.....	8
Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.).....	9
<u>«Ποιες είναι οι απαιτήσεις ενός μουσειακού κτηρίου;»</u>	10
Κλιματολογία μουσείων.....	10
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο</u>	11
<u>«Ενεργειακή αναβάθμιση σε άλλα μουσεία και κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς»</u>	11
<u>«Ενεργειακή αναβάθμιση στο Μουσείο των Δελφών»</u>	13
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο</u>	14
<u>«Το Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών»</u>	14
Ιστορία του μουσείου.....	14
Άλλες χρήσεις του κτηρίου.....	14
Τι χαρακτηρίζουμε ως διατηρητέο κτήριο.....	15
<u>«Χαρακτηριστικά της προσομοίωσης του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών»</u>	15
Το πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus.....	15
Κτηριακό κέλυφος.....	16
Φωτισμός.....	17
Ενεργειακό σύστημα.....	18
Ηλεκτρικός εξοπλισμός.....	18
<u>«Η προσέγγιση μας για το Μουσείο»</u>	18
Το κτήριο.....	19
Υλικά.....	19
Άλλες παράμετροι.....	20
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο</u>	23
<u>«Η προσομοίωση»</u>	23
Αρχική Κατάσταση (Current State).....	23
<u>«Ενεργειακές αναβαθμίσεις»</u>	24
1 ^ο Σενάριο: Αλλαγή λαμπτήρων σε LED.....	24
2 ^ο Σενάριο: Αναβάθμιση ηλεκτρικού εξοπλισμού και κλιματιστικών.....	26
<u>«Αλλαγή κλιματιστικού συστήματος με αντλία θερμότητας»</u>	31
3 ^ο Σενάριο: Τοποθέτηση αντλίας θερμότητας.....	31
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο</u>	36
<u>«Άλλες πρακτικές ενεργειακής αναβάθμισης»</u>	36
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο</u>	39
<u>«Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων»</u>	39
Αρχική κατάσταση (Current State).....	39
Αλλαγή λαμπτήρων σε LED.....	40
Αναβάθμιση εξοπλισμού γραφείων.....	41
Αναβάθμιση κλιματιστικών.....	42
Τοποθέτηση αντλίας θερμότητας.....	44
Σύγκριση των HVAC συστημάτων.....	46
<u>Συμπεράσματα</u>	49
<u>Βιβλιογραφία</u>	50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα προπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να εξετάσει ένα καίριο ζήτημα που καλείται να λύσει η Πολιτεία με τη βοήθεια της επιστημονικής κοινότητας, την ενεργειακή αναβάθμιση κτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, θα στοχεύσουμε σε μια κατηγορία κτηρίων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, τα κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς. Εναλλακτικά γνωστά ως ιστορικά ή διατηρητέα, ανήκουν σε ξεχωριστό νομικό πλαίσιο και υπάρχουν περιορισμοί στις παρεμβάσεις κι ελαστικότητα στην τήρηση των κανόνων που διέπουν τα άλλα κτήρια. Ειδικότερα, το τμήμα του συγκεκριμένου κτηριακού δυναμικού που θα ασχοληθούμε, είναι τα μουσεία, τα οποία έχουν δικές τους ιδιαιτερότητες.

Η δική μας μελέτη θα επικεντρωθεί στο κτήριο του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών και θα αξιολογήσουμε πιθανά σενάρια για να αναβαθμιστεί ενεργειακά. Θα εξετάσουμε ποιες είναι οι απαιτήσεις ενός κτηρίου που εξυπηρετεί μουσειακές ανάγκες και ποιες είναι επιτρεπτές, εφόσον αυτό χαρακτηρίζεται ως μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς. Θα χρησιμοποιήσουμε όσα περισσότερα στοιχεία και δεδομένα είναι δυνατό για τα χαρακτηριστικά και την τοποθεσία του μουσείου, ώστε να γίνει προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του. Με δεδομένους τους περιορισμούς ενός διατηρητέου κτηρίου θα χωρίσουμε τις επεμβάσεις μας σε επιτρεπόμενες και σε εκείνες που ή δεν επιτρέπονται στο παρόν νομικό πλαίσιο ή δεν έχουμε αρκετά δεδομένα για να γίνει η προσομοίωση. Παρεμβάσεις στο εξωτερικό κέλυφος του κτηρίου ως επί το πλείστον δεν επιτρέπονται και θα αναφερθούμε και παρακάτω τι είναι δυνατό να αναβαθμίσουμε.

Οι προσομοιώσεις μας θα γίνουν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα EnergyPlus (E+) και θα γίνει σύγκριση για κάθε ενδεχόμενη αλλαγή με την παρούσα κατάσταση του κτηρίου (current state). Θα εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε υπόθεσης, με τη βασικότερη να είναι η αλλαγή του συστήματος κλιματισμού και εξαερισμού. Η υπόθεση αυτή θα γίνει σε δύο βήματα: α) την αναβάθμιση του υπάρχοντος κλιματιστικού συστήματος β) την τοποθέτηση αντλίας θερμότητας.

Κάθε προσπάθεια ενεργειακής αναβάθμισης κρύβει προκλήσεις και δυσκολίες, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ένα κτήριο με την ταυτότητα του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών, και σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του οικονομικού προϋπολογισμού, οδηγούμαστε σε αδιέξοδα. Στα επόμενα κεφάλαια θα δούμε ποια είναι αυτά, ποιες περιπτώσεις είναι υλοποιήσιμες στην υπόθεση μας, ποιες έχουν τη μεγαλύτερη ανταπόκριση στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος και ποιες μεθόδους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να ξεπεράσουμε τα εμπόδια που εμφανίζονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

«Η σημασία της ενεργειακής αναβάθμισης»

Ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 36% των εκπομπών CO₂ και το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη¹. Το 35% των κτηρίων είναι πάνω από 50 ετών και μόνο το 0,4-1,2% ανακαινίζεται κάθε χρόνο.²⁷ Η υλικοτεχνική ανάπτυξη και οι ανάγκες που δημιουργούνται από την αλλαγή του τρόπου ζωής, καθιστούν απαραίτητο, να γίνεται αναθεώρηση των κανονισμών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των Τεχνικών Οδηγιών του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε)². Όσο αυστηρότεροι γίνονται αυτοί οι κανονισμοί, οδηγούμαστε πιο κοντά στο στόχο, τα κτήρια μας να έχουν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Τα κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς, τα οποία αποτελούν σημαντικό ποσοστό του κτηριακού δυναμικού της χώρας, κάθε χρόνο αυξάνονται. Οι τεχνικές οδηγίες για αυτά τα κτήρια είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο επιεικείς, ώστε να προστατευτεί η ταυτότητα του κτηρίου και να τονιστεί η σημασία του για την περιοχή που βρίσκεται, και γενικότερα για τη χώρα. Σε συνδυασμό μάλιστα, με το γεγονός ότι οποιαδήποτε διαδικασία αφορά σε αυτήν την κατηγορία κτηρίων, είναι μέρος ευρύτερου πλαισίου αλλαγών (ευρωπαϊκού ή κρατικού μηχανισμού), έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η μέγιστη ενεργειακή αναβάθμιση. Συνήθως, ο χρόνος εκτέλεσης και ο οικονομικός προϋπολογισμός είναι συγκεκριμένοι, και ενίοτε ανεπαρκείς για τις αλλαγές που απαιτούνται, με αποτέλεσμα τα προβλήματα να διαιωνίζονται.

Η περίπτωση που εξετάζουμε έχει ήδη συζητηθεί σε πρώιμο στάδιο από τον Johannes Steinbeisser³ (“Refurbishment and energy efficiency of Cultural Heritage Buildings”, 2019)¹, και από εκεί αντλούμε τα στοιχεία για την προσομοίωση του κτηρίου, εκτός κι αν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορά. Επιπλέον, οι μουσειακές αρχές έχουν προτείνει κάποιες κινήσεις αναβάθμισης (νέο κλιματιστικό σύστημα, τοποθέτηση αντλίας θερμότητας), και σε συνδυασμό με τους νομικούς περιορισμούς των διατηρητέων (για τις παρεμβάσεις στο εξωτερικό τους), θα κινηθούμε σε αυτό το πλαίσιο παρεμβάσεων.

Για την εκτέλεση της μελέτης δεν ήταν δυνατό να έχουμε μετρήσεις, οπότε εργαστήκαμε με εργαλεία προσομοίωσης (EnergyPlus, Sketch Up κ.α.). Για τα στοιχεία του κτηρίου, είτε δομικά είτε ενεργειακά, βασιστήκαμε σε εκείνα του Johannes, και θα αναφερθούμε εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

«Σε ποιο πλαίσιο επεμβαίνουμε στο κτήριο;»

Τι ορίζουμε ως ενεργειακή αναβάθμιση

Η μελέτη ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίου είναι μια συνολική πρόταση επεμβάσεων, η εφαρμογή της οποίας μπορεί να οδηγήσει στο βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα και περιλαμβάνει βελτιώσεις σε κάθε επίπεδο.

Κάθε κτίριο έχει περιθώρια βελτίωσης, είτε βρίσκεται υπό κατασκευή, είτε έχει ολοκληρωθεί. Ειδικά σε κτίρια που έχουν κατασκευαστεί εδώ και δεκαετίες, η ενεργειακή αναβάθμιση, ακόμα και με μικρές επεμβάσεις και βελτιώσεις, είναι απαραίτητη λόγω των τεράστιων απωλειών που σίγουρα θα έχουν.

Οι βασικοί στόχοι της αναβάθμισης είναι:

- η μείωση των ενεργειακών απωλειών,
- η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και
- η παραγωγή ενέργειας.

Επεμβάσεις όπως η αντικατάσταση κουφωμάτων, η εξωτερική θερμομόνωση, ο έλεγχος και η συντήρηση του συστήματος θέρμανσης και ψύξης, η τοποθέτηση ηλιακού θερμοσίφωνα κλπ, καθώς και η τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος ή άλλου συστήματος ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

Οποιοσδήποτε από τις παραπάνω επεμβάσεις, και γενικότερα οι απαιτήσεις για την ενεργειακή απόδοση ενός κτηρίου, υπαγορεύονται από τις Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.) και πιο συγκεκριμένα από τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.).

Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.)

Ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) αποτελεί υποχρέωση της χώρας τόσο προς τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Κοινοτική Οδηγία), αλλά περισσότερο προς τους πολίτες της. Ο κτηριακός πλούτος της χώρας πρέπει, σύμφωνα με τις σύγχρονες απαιτήσεις διαβίωσης, να οδηγηθεί σε ορθότερη ενεργειακή συμπεριφορά μέσω της σωστής διαχείρισης και εξοικονόμησης ενέργειας. Έτσι, για την κατασκευή ενός κτηρίου, εκτός από την ασφάλεια και την αισθητική, συγκαταλέγεται πλέον και η ανάγκη ώστε η κατανάλωση ενέργειας να είναι κατά το δυνατόν χαμηλότερη, με ταυτόχρονη εξασφάλιση άριστων συνθηκών διαβίωσης για τους χρήστες.

Το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, κατάρτισε σε συνεργασία με την Πολιτεία τις απαραίτητες Τεχνικές Οδηγίες, οι οποίες εξειδικεύουν τα πρότυπα των μελετών και των επιθεωρήσεων της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων, στα Ελληνικά κλιματικά και κτηριακά δεδομένα. Παράλληλα το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας ανέπτυξε ειδικό λογισμικό για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης και κατάταξης (βαθμονόμησης) των κτηρίων, τόσο κατά τη διαδικασία ενεργειακών επιθεωρήσεων, όσο και κατά την εκπόνηση μελέτης ενεργειακής απόδοσης.

Για τη δική μας περίπτωση, σύμφωνα με την **παρ.7 του άρθρου 4 του ν. 4122/2013** **εξαιρούνται από την εφαρμογή του Κ.Εν.Α.Κ.** , «κτήρια προστατευόμενα ως μέρος συγκεκριμένου περιβάλλοντος ή λόγω της ιδιαίτερης αρχιτεκτονικής ή ιστορικής τους αξίας, όπως διατηρητέα και εντός παραδοσιακών οικισμών κτίρια, στο βαθμό που η συμμόρφωση προς ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης θα αλλοίωνε κατά τρόπο μη αποδεκτό το χαρακτήρα ή την εμφάνισή τους.»

Αυτό όμως δεν αναιρεί το γεγονός ότι χωρούν βελτιώσεις, ακόμα και υπό τους περιορισμούς που κουβαλά η ταυτότητα του κτηρίου, οι οποίες θα φέρουν εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων, και θα συμβάλλουν στην ορθότερη λειτουργία του Μουσείου του Πανεπιστημίου.

«Ποιες είναι οι απαιτήσεις ενός μουσειακού κτηρίου;»

Κλιματολογία μουσείων

Κλίμα ή μικροκλίμα³⁸ ονομάζεται το σύνολο των περιβαλλοντολογικών παραμέτρων που επικρατούν στο μουσειακό χώρο. Το μικροκλίμα περιλαμβάνει το ακουστικό, το ατμοσφαιρικό, το θερμικό και το οπτικό κλίμα. Σε μια έκθεση, για την προστασία των εκτιθεμένων αντικειμένων, είναι σημαντικό οι περιβαλλοντικοί παράγοντες να ελέγχονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Οι κύριοι παράγοντες που ελέγχουμε είναι

- θερμοκρασία
- σχετική υγρασία
- αιωρούμενα σωματίδια και ρυπογόνοι παράγοντες
- βιολογικοί οργανισμοί
- αντιδράσεις των υλικών
- φως

Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τα μουσειακά αντικείμενα, είναι καταρχήν οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου βρίσκεται ο εκθεσιακός χώρος, εάν το κλίμα είναι ξηρό ή υγρό, κρύο ή θερμό, καθαρό ή μολυσμένο. Η ακριβής γνώση των στοιχείων αυτών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και προϋποθέτει σειρά τακτικών μετρήσεων κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα και σε διάφορες περιόδους του έτους. Με στόχο την, κατά το δυνατόν, σταθερότητα των περιβαλλοντικών συνθηκών πρέπει να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό των συστημάτων διαχείρισης στοιχεία μεταβαλλόμενα, όπως η θερμότητα που εκπέμπεται από τα φωτιστικά σώματα, ή η παρουσία κοινού στους χώρους που επηρεάζει τις συνθήκες του περιβάλλοντος και σε περιόδους μεγάλης προσέλευσης επισκεπτών μπορεί να τις επηρεάσει σημαντικά. Η γνώση των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού του κτιρίου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της παρουσίασης μιας έκθεσης.¹⁹

Ο έλεγχος των τιμών της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας των αιθουσών ενός μουσείου μπορεί να γίνει με μηχανικά συστήματα που λειτουργούν σε μια κεντρική κλιματιστική μονάδα (**HVAC: Heating Ventilation and Air Conditioning**) ή σε αυτοδύναμες τοπικές μονάδες, καθώς επίσης και με επεμβάσεις στο κέλυφος του μουσείου, όπως με υγρομόνωση, θερμομόνωση κ.α. Ο έλεγχος των κλιματολογικών συνθηκών σε ένα μουσείο είναι είτε δύσκολος είτε ιδιαίτερα ακριβός ή ακόμα και τεχνικά αδύνατος. Μια πολύ απλή λύση που αντισταθμίζει τις δύσκολα ελεγχόμενες διακυμάνσεις της υγρασίας και της θερμοκρασίας είναι ο ακριβής έλεγχος και ρύθμιση της υγρασίας του αέρα που περιβάλλει τα εκθέματα- δηλαδή ο μικροκλιματικός έλεγχος σε προθήκες.

Στο οπτικό κλίμα το πρόβλημα στρέφεται στον έλεγχο της ορατής και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Τα εκθέματα υφίστανται σημαντικές φθορές, φωτολυτικές ή φωτοχημικές, που αντιμετωπίζονται με τον έλεγχο της έντασης της ακτινοβολίας και του χρόνου έκθεσης του αντικειμένου σε αυτήν. Στην επιλογή φωτιστικών σωμάτων για τον τεχνητό φωτισμό, η επιλογή τύπου φωτιστικής πηγής, σχετίζεται άμεσα με την εκπομπή ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, οι λάμπες φθορισμού, ενώ εκπέμπουν σχετικά μικρή θερμότητα, παράγουν την υψηλότερη υπεριώδη ακτινοβολία. Το αντίστροφο ισχύει για τις λάμπες πυρακτώσεως. Ειδικά φίλτρα για την υπεριώδη ακτινοβολία, φωτισμός εξ ανακλάσεως, νέα συστήματα φωτισμού όπως οι οπτικές ίνες, leds, με φως χωρίς UV και εκλυόμενη θερμότητα, βοηθούν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

«Ενεργειακή αναβάθμιση σε άλλα μουσεία και κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς»

Μέσω του προγράμματος HAPPEN⁴, καθώς και άλλων μελετών⁵ σε αυτό το αντικείμενο, έχουμε πληθώρα παραδειγμάτων αντίστοιχων περιπτώσεων και είναι εμφανές ότι η αναβάθμιση είναι βιώσιμη και αναγκαία. Να σημειωθεί ότι στις παρακάτω περιπτώσεις έγινε καταγραφή των ενεργειακών απαιτήσεων του εκάστοτε κτηρίου, πραγματοποιήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο μέσω προσομοίωσης για τις προτεινόμενες αλλαγές και τέλος, μετά από αυτές, νέα καταγραφή. Σε όλες τις περιπτώσεις (πέρα από εκείνες από όπου δεν έγιναν οι παρεμβάσεις προφανώς), έχουμε επιβεβαίωση των υπολογισμών του μοντέλου.

Εθνικό Μουσείο ‘Pompeo Aria’, Marzabotto (Ιταλία)

- **Κύριες παρεμβάσεις στο κτήριο: φωτισμός, σκίαση και εξαερισμός**
- **52% ενεργειακή εξοικονόμηση, 37% μείωση CO₂**

• **Μουσείο τέχνης του Kristinehamn (Σουηδία)**

- **Απρίλιος 2003 – Οκτώβριος 2004**
- **Παρεμβάσεις στη δόμηση του κτηρίου, στο φωτισμό και στον εξαερισμό**
- **49% εξοικονόμηση ενέργειας, 28% μείωση CO₂**

Bardini Museum, Florence (Italy)

- **2 περίοδοι ελέγχου (Ετήσια & 2 μήνες χειμώνα/καλοκαίρι)**
- **Παρεμβάσεις κυρίως στη δόμηση του κτηρίου και δευτερευόντως σε άλλους τομείς**
- **48% εξοικονόμηση ενέργειας, 37% μείωση εκπομπών CO₂**

Λαογραφικό Μουσείο, Ljubljana (Σλοβενία)

- **3 περίοδοι ελέγχου (Χειμώνας/Ανοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο/Χειμώνας)**
- **Παρεμβάσεις κυρίως στη δόμηση του κτηρίου (εγκατάσταση μόνωσης, αντικατάσταση υαλοπινάκων κλπ.)**
- **63% εξοικονόμηση ενέργειας, 50% μείωση εκπομπών CO₂**

‘THE PUBLIC’ Arts Centre, West Bromwich (Ηνωμένο Βασίλειο)

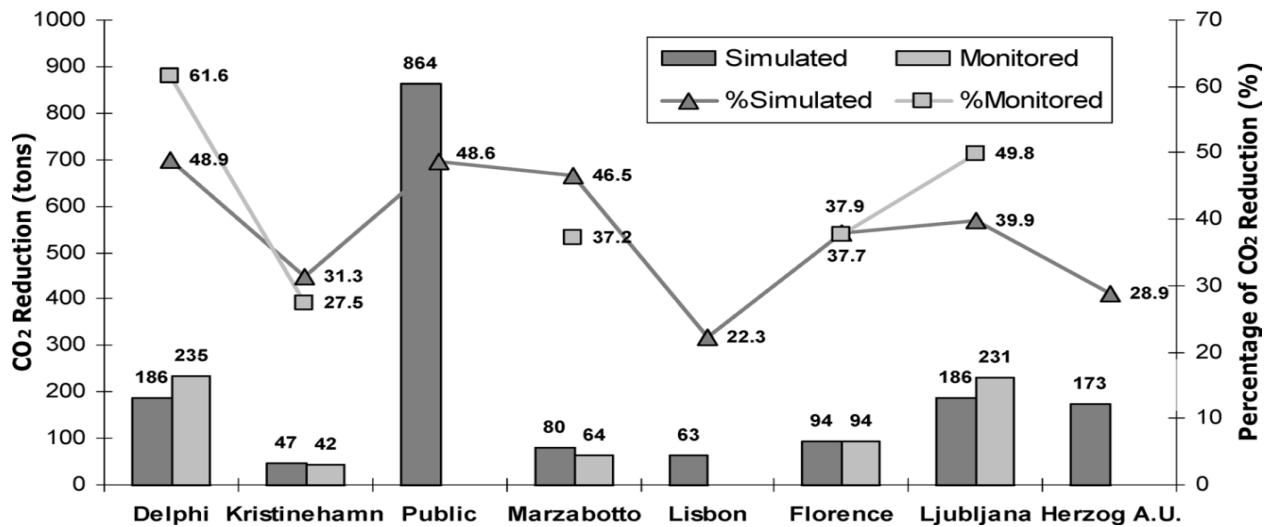
- **Εγκατάσταση μόνωσης και αντικατάσταση υαλοπινάκων**
- **60,7% εξοικονόμηση ενέργειας - 48,6% μείωση εκπομπών CO₂**

Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, Lisbon (Πορτογαλία)

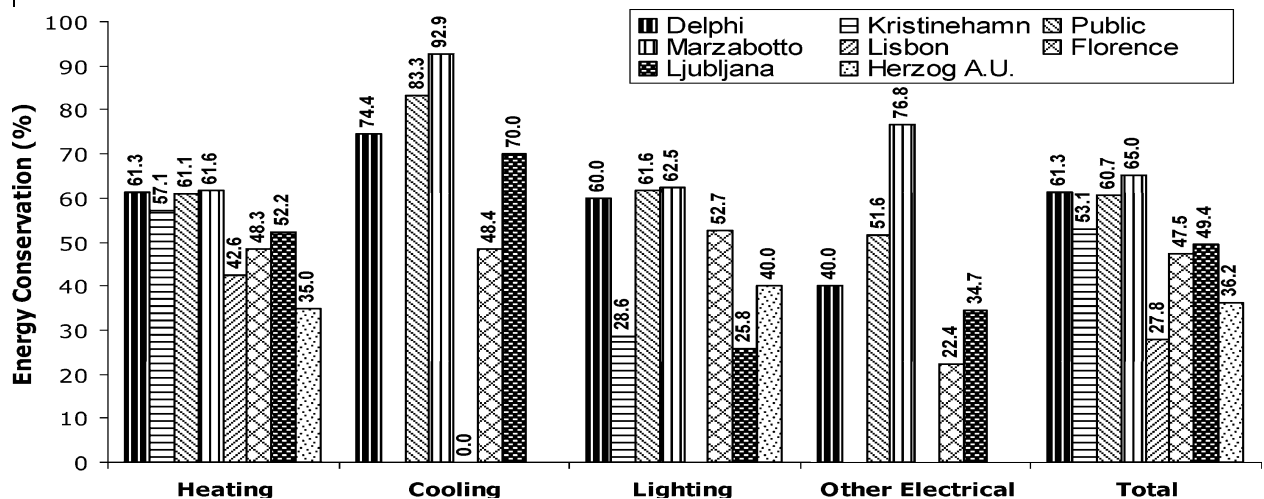
- Παρεμβάσεις κυρίως στο κτήριο
- 27,8% εξοικονόμηση ενέργειας – 22,3% μείωση εκπομπών CO₂

Μουσείο Herzog-Anton-Ulrich, Braunschweig (Γερμανία)

- Αλλαγές στο κτήριο, στο φωτισμό και στον εξαερισμό
- 38,2% εξοικονόμηση ενέργειας – 28,9% μείωση εκπομπών CO₂



Γράφημα 2-1: Με σκούρο χρώμα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με τη μείωση των εκπομπών CO₂ και με ανοιχτό οι καταγεγραμμένες, πραγματικές τιμές.



Γράφημα 2-2: Σε αυτό το γράφημα φαίνεται πως η μεγαλύτερη εξοικονόμηση πραγματοποιείται με την αλλαγή του συστήματος θέρμανσης-ψύξης. Αυτό είναι λογικό καθώς στα παλαιά κτήρια αυτό είναι το μεγαλύτερο μασ εμπόδιο λόγω των παλαιών υλικών και τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί κατά την κατασκευή τους.

«Ενεργειακή αναβάθμιση στο Μουσείο των Δελφών»

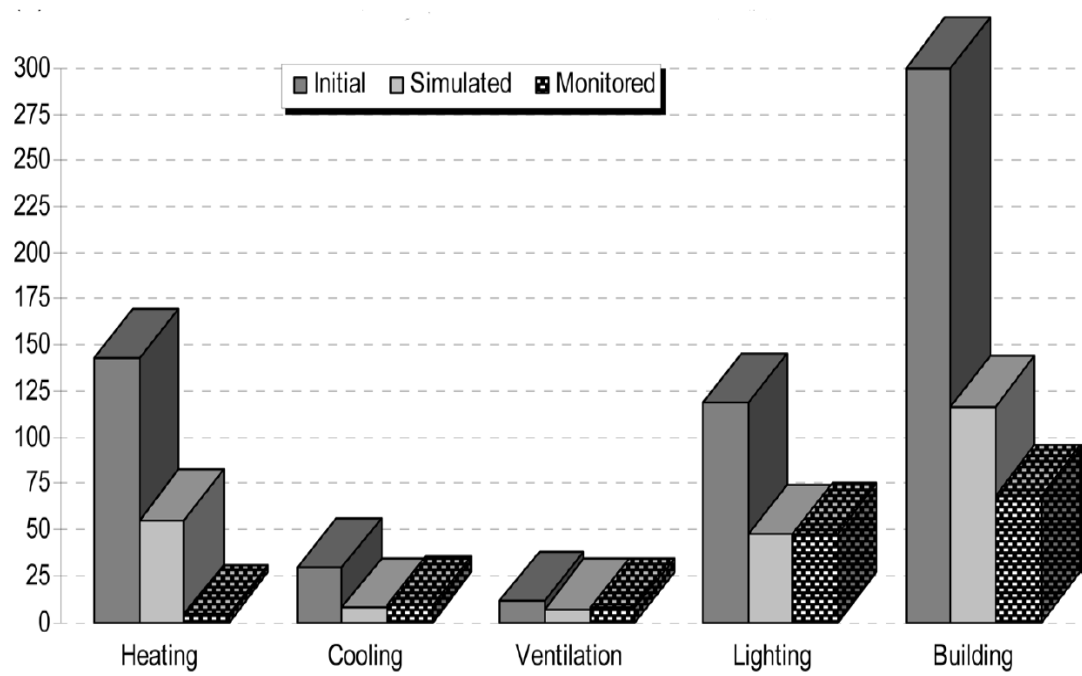
Ειδική αναφορά χρειάζεται το project του Μουσείου των Δελφών⁶, το οποίο επιμελήθηκε η ομάδα Μελέτης Εσωτερικού Περιβάλλοντος του τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ, καθώς κλιματικά είναι πιο κοντά στην περίπτωση του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου ήταν το σύστημα θέρμανσης του καθώς μετρήθηκε πως η κατανάλωση του ήταν 142 kWh/m² μέσα σε ένα έτος, κάτι που αναλογούσε σχεδόν στο μισό ολόκληρης της κατανάλωσης (301 kWh/m²).

Το μοντέλο προσομοίωσης έδειχνε πως θα φτάσει στις 116 kWh/m² και τελικά μετά τις παρεμβάσεις, μετρήθηκε 65 kWh/m². Αυτό οδήγησε σε μείωση των εκπομπών του CO₂ κατά 235 τόνους (61.6% μείωση)

Η αναβάθμιση αυτή επιτεύχθηκε μετά από κάποια σειρά παρεμβάσεων στο ενεργειακό σύστημα αλλά και στο κέλυφος του μουσείου. Πιο συγκεκριμένα: εγκαταστάθηκε νέο σύστημα θέρμανσης-ψύξης, τοποθετήθηκε μόνωση στην οροφή και εξωτερικά των τοίχων, αλλάχθηκαν τα παράθυρα σε διπλής όψεως (σε συνδυασμό με χρήση περσίδων για έλεγχο του φωτός) και τέλος, εφόσον υπήρχε πρόβλημα ηχορύπανσης, τοποθετήθηκε ψευδοροφή.

Παρατηρούμε πως δεν απαιτούνται θεαματικές ή κοστοβόρες αλλαγές για να υπάρξει αποτέλεσμα. Η ενεργειακή αναβάθμιση, εξάλλου, δεν «τελειώνει» μέχρι ένα κτήριο να είναι ενεργειακά αυτόνομο, που ακόμα και τότε απαιτείται συνεχής συντήρηση και ενημέρωση για νέες τεχνολογίες.



Γράφημα 1-3: Με σκούρο γκρι οι αρχικές τιμές ηλεκτρικής κατανάλωσης σε kWh/m² και με ανοιχτό οι τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση. Το τρίτο χρώμα, με το μοτίβο, αντιστοιχεί στις καταγεγραμμένες τιμές, μετά τις παρεμβάσεις. Παρατηρούμε πως και σε αυτή την περίπτωση σε ορισμένες κατηγορίες, όπως η θέρμανση, η μείωση είναι μεγαλύτερη από αυτή που περιμέναμε από την προσομοίωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

«Το Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών»

Ιστορία του μουσείου

Το Μουσείο Ιστορίας του Πανεπιστημίου Αθηνών στεγάζεται στο κτήριο που είναι γνωστό ως «Οικία Κλεάνθους» ή «Παλιό Πανεπιστήμιο».⁷ Η ιστορία του ανέρχεται πολύ πριν από τον 18ο αιώνα και το καθιστά ένα από τα ελάχιστα σωζόμενα κτήρια της προ-οθωνικής περιόδου. Επίσης, έχει το σπάνιο προνόμιο να στεγάζεται στο ίδιο κτήριο, το οποίο στέγασε το πρώτο Πανεπιστήμιο της ανεξάρτητης Ελλάδας (1837-1841) που ήταν και το πρώτο της Βαλκανικής χερσονήσου και της ευρύτερης περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου.

Η σημερινή του λειτουργία, ως Μουσείο, εγκαινιάστηκε το 1987 στο πλαίσιο των εορτασμών για τα 150 χρόνια από την ίδρυση του Ε.Κ.Π.Α. και σε υλοποίηση του οράματος του Καθηγητή Μιγάλη Σταθόπουλου.

Τα εκθέματα και τα κειμήλια έχουν άμεση σχέση με την ιστορία των πρώτων Σχολών του Πανεπιστημίου: Ιατρική, Νομική, Φιλοσοφική, Θεολογική. Παράλληλα, εκτίθενται ιστορικά διοικητικά έγγραφα, όπως είναι το πρώτο μητρώο εγγραφής των φοιτητών, οι πρώτες σφραγίδες των Σχολών, και σπάνια έργα τέχνης όπως το Λάβαρο (1887) του Πανεπιστημίου Αθηνών φιλοτεχνημένο από το Νικόλαο Γύζη (1842-1901) σε συνεργασία με το Γεώργιο Ιακωβίδη (1853-1932) και πολλά άλλα.

Η μόνιμη έκθεση αναπτύσσεται στον πρώτο και το δεύτερο όροφο του κτηρίου, όπου παρουσιάζονται μεταξύ άλλων προσωπογραφίες καθηγητών από αναγνωρισμένους ζωγράφους της εποχής, διδακτικά συγγράμματα, φωτογραφίες από τη ζωή στο Πανεπιστήμιο, σπάνια επιστημονικά όργανα, και άλλα κειμήλια του Πανεπιστημίου Αθηνών. Η οργάνωση και η παρουσίαση των αντικειμένων, είναι βασικά θεματική και ακολουθεί τη διάκριση στις πρώτες Σχολές του Πανεπιστημίου. Τον Ιούνιο 2015, εγκαινιάστηκε ενότητα αφιερωμένη στην Σχολή Θετικών Επιστημών και με επίκεντρο τα σπάνια επιστημονικά όργανα του Μουσείου. Τον Νοέμβριο του 2016, εγκαινιάστηκε η ενότητα για την ιστορία του κτηρίου.

Άλλες χρήσεις του κτηρίου

Μέχρι το 1962 όπου το κτήριο απαλλοτριώθηκε από την Αρχαιολογική Υπηρεσία, άλλαξε ιδιοκτήτες και χρήσεις (στρατώνας, σχολείο, σπίτι, ταβέρνα). Το κτήριο στέγασε πολλές οικογένειες προσφύγων. Το 1946 κηρύχθηκε διατηρητέο μνημείο, ενώ το 1959 ξεκίνησαν οι προσπάθειες της Συγκλήτου του Πανεπιστημίου Αθηνών για την απόκτησή του. Λίγο πριν από την αποκατάσταση της δημοκρατίας, και αφού έφυγαν οι τελευταίοι ένοικοι, ξεκίνησαν οι εργασίες αποκατάστασης του κτηρίου. Το 1985 πραγματοποιήθηκε στο κτήριο η έκθεση με τίτλο «Βυζάντιο και Ευρώπη», στο πλαίσιο των εκδηλώσεων «Αθήνα – Πολιτιστική Πρωτεύουσα της Ευρώπης».⁹

Τι χαρακτηρίζουμε ως διατηρητέο κτήριο

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας^{4,8}, καθιερώνεται ιδιαίτερη κρατική προστασία του πολιτιστικού περιβάλλοντος και των μνημείων της αρχιτεκτονικής μας κληρονομιάς, όπως είναι τα διατηρητέα κτήρια. Το κράτος έχει την υποχρέωση να λαμβάνει ειδικά νομοθετικά μέτρα με τα οποία να εξασφαλίζεται η διαρκής προστασία τους.

Η αποκατάσταση και ανάδειξη των διατηρητέων κτηρίων συμβάλλει στην αναβάθμιση του πολιτιστικού περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής κατοίκων και επισκεπτών.

Τα κριτήρια χαρακτηρισμού είναι:

- Αρχιτεκτονική θεώρηση (αρχιτεκτονική αξία- αξιόλογα μορφολογικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία, θέση- σημείο αναφοράς για την περιοχή)
- Ιστορική θεώρηση (μνήμη, σχέση με ιστορικό πρόσωπο, με αρχιτεκτονική/ τεχνολογική εξέλιξη)
- Χρηστική θεώρηση (χρήσεις που χαρακτηρίζουν συγκεκριμένη ιστορική περίοδο, ως ιστορικό τεκμήριο για χρήσεις που χάνονται κλπ.)
- Περιβαλλοντική και Πολεοδομική θεώρηση (ιστορία πολεοδομικής εξέλιξης, εξέλιξης τυπολογίας κτισμάτων κλπ.)

Για κάθε οικοδομική εργασία στο εξωτερικό και εσωτερικό του διατηρητέου κτηρίου απαιτείται η έγκριση του αρμόδιου Συμβουλίου Αρχιτεκτονικής. Όταν οι εργασίες (επισκευή, εκσυγχρονισμός των εγκαταστάσεων, εσωτερική διαρρύθμιση, καθώς και επεμβάσεις για λόγους στατικούς ή λειτουργικούς του διατηρητέου κτηρίου) συνάδουν με τους όρους της απόφασης χαρακτηρισμού και δεν αλλοιώνουν τον αρχιτεκτονικό χαρακτήρα και τα προστατευόμενα στοιχεία του διατηρητέου, μετά τη θετική γνωμοδότηση του αρμόδιου Συμβουλίου Αρχιτεκτονικής, εκδίδεται η οικοδομική άδεια από την Υπηρεσία Δόμησης.²

«Χαρακτηριστικά της προσομοίωσης του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών»

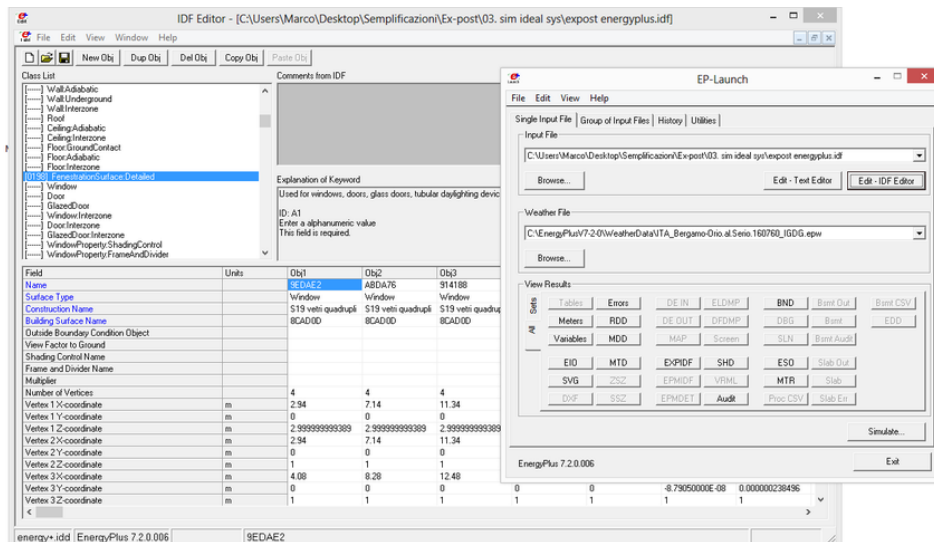
Το πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus

Το EnergyPlus (E+) είναι ένα πρόγραμμα που δημιουργήθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. Σκοπός του είναι να βοηθήσει στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης και των θερμικών φορτίων ενός κτηρίου¹⁸, χρησιμοποιώντας βασικές αρχές και αλγόριθμους. Συνδυάζεται με άλλα προγράμματα, όπως το Sketch Up, όπου σχεδιάζεται το κτήριο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του και τα υλικά του, και εισάγεται στο E+ το οποίο μεταφράζει τα στοιχεία σε κώδικα (idf, input data file).

Αφού έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του κτηρίου, επιλέγουμε τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης μας, όπως όρια για την θερμοκρασία και την υγρασία, τοποθετούμε ηλεκτρικό εξοπλισμό, επιλέγουμε σύστημα θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού (HVAC System) και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτηρίου. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις, για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση, επιλέγουμε κλιματικά δεδομένα. Τα δεδομένα καιρού για το E+, είναι της μορφής epw (energy plus weather file) και μπορούμε να τα βρούμε από διάφορες πηγές στο διαδίκτυο, επιλέγοντας το μετεωρολογικό σταθμό που μας ενδιαφέρει ανά έτος. Είναι πολύ σημαντική η συμβολή τους στην ποιότητα της προσομοίωσης καθώς, αναλόγως της τοποθεσίας του κτηρίου, δεν επηρεάζεται μόνο η θερμοκρασία και η

υγρασία αλλά και η γωνία πρόσπτωσης και η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η βροχόπτωση και η ατμοσφαιρική πίεση.

Η διαδικασία που περιγράψαμε γίνεται πιο εύκολη για τον χρήστη με το βοηθητικό πρόγραμμα του E+, το EP-Launch, όπου μπορούμε να επιλέξουμε τα αρχεία που απαιτούνται για την προσομοίωση και να επέμβουμε αν χρειαστεί (idf editor). Όπως φαίνεται και στο δείγμα της επιφάνειας χρήστη:



Εικόνα 3-1: Στο παράθυρο του IDF Editor προσθέτουμε κάποιο αντικείμενο, αλλάζουμε τις ιδιότητες κάποιο υλικού ή καθορίζουμε τις συνθήκες και τους στόχους της προσομοίωσης. Στο παράθυρο του EP-Launch, επιλέγουμε το αρχείο του κτηρίου (idf) και καιρού (erw), ολοκληρώνουμε την προσομοίωση (simulate), και βλέπουμε ξεχωριστά κάθε είδος αρχείου εξόδου που έχουμε επιλέξει να υπολογιστεί.

Κτηριακό κέλυφος

Λόγω της παλαιάς κατασκευής, όπως είναι λογικό, εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα που διορθώνονται με την υλικοτεχνική αναβάθμιση του μουσείου. Η μόνωση είναι ανεπαρκής και σε πολλές περιπτώσεις ανύπαρκτη, είτε αναφερόμαστε σε θερμομόνωση είτε υγρασιμόνωση είτε ακόμα και ηχομόνωση. Προφανώς αυτό, είτε οφείλεται στο κέλυφος του κτηρίου, είτε στα κουφώματα ή στους εσωτερικούς τοίχους, αντιμετωπίζουμε προκλήσεις όπως θερμικές γέφυρες, συγκεντρώσεις υγρασίας και μεγάλες απώλειες θερμότητας.

Τα παράθυρα και οι πόρτες είναι μέρος της νεοκλασικής του ταυτότητας του κτηρίου και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να αναγνωρίσουμε τα προβλήματα που οφείλονται σε αυτά και αν μπορούσαμε να τα διορθώσουμε. Η παλιά τους τεχνολογία οδηγεί σε μεγάλες απώλειες θερμότητας, ελάχιστη μόνωση ήχου και ανεπαρκή αεροστεγανότητα. Η υλικοτεχνική τους αναβάθμιση θα επιφέρει προφανώς και ενεργειακή εξοικονόμηση. Δυστυχώς, δε θα είναι δυνατή ολοκληρωτικά, ιδιαίτερα άμεσα όπως ενημερωθήκαμε, λόγω περιορισμών στον προϋπολογισμό, της αδυναμίας να ταιριαξουν νέα κουφώματα στις παλιές θέσεις και της αστοχίας του αποτελέσματος ως προς την εμφάνιση, κάτι που είναι απαραίτητο λόγω του χαρακτηρισμού του κτηρίου ως διατηρητέο.

Στο κέλυφος του Μουσείου, η πιο εμφανής αλλαγή είναι η μόνωση που πρέπει να γίνει εξωτερικά (και εσωτερικά) είτε με τοποθέτηση νεότερων τεχνολογιών μόνωσης όπου είναι αυτό δυνατό, είτε με την ανανέωση του βαψίματος. Επίσης ενημερωθήκαμε ότι υπάρχει περιορισμός στον συγκεκριμένο τομέα, όμως έγινε πρόσφατα μια τέτοια ανακαίνιση. Ένα ακόμα κομμάτι που απαιτεί εκσυγχρονισμό αλλά δεν το επιτρέπει ο τύπος του κτηρίου είναι η

σκεπή, η οποία είναι από κεραμίδια και δεν επιτρέπονται αλλαγές, πέρα ίσως από κάποια μόνωση κάτω από αυτά.

Είναι αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατό να αναβαθμίσουμε όλη την κατασκευή, αξίζει όμως να σημειώσουμε, έστω για το μέλλον, ότι οι αλλαγές-επεμβάσεις αυτές θα φέρουν μεγάλη διαφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά του Μουσείου και θα βελτιώσει και την εμπειρία των επισκεπτών και των εργαζομένων.

Φωτισμός

Οι πηγές φωτισμού που χρησιμοποιούνται στα μουσεία είναι: α) ο φυσικός φωτισμός (ήλιος) β) τεχνητός φωτισμός (λαμπτήρες πυρακτώσεως, λαμπτήρες φθορισμού, οπτικές ίνες, LED)³⁸

- Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι οι πιο ταιριαστοί για τις απαιτήσεις μας σε εκπομπές υπεριώδους ακτινοβολίας και στην χρωματική τους απόδοση αλλά είναι οι πιο ενεργοβόροι.

- Οι λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν επίσης υπεριώδη ακτινοβολία, αν και σε πολύ μικρότερο ποσοστό από το φυσικό φως και γι' αυτό χρειάζονται φίλτρα. Γενικά βγάζουν ψυχρό χρώμα και δεν αποδίδουν πάρα πολύ καλά τα χρώματα.

- Οι οπτικές ίνες αποτελούν ένα από τα τεχνολογικά εξελιγμένα συστήματα στο χώρο του φωτισμού. Κατασκευάζονται από εύκαμπτες διαφανείς πλαστικές ή υάλινες ράβδους πολύ μικρής διαμέτρου που εκμεταλλεύονται την αντανάκλαση της δέσμης του φωτός από την φωτεινή πηγή στη μία άκρη τους και μέσω της διάχυσης του σε όλο το σώμα τους, εκπέμπουν το φως από το άλλο άκρο τους. Το εξαιρετικά μικρό τους μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση ρεύματος αλλά και η ικανότητά τους να απομονώνουν το αποτέλεσμα του φωτισμού από την παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος εξαλείφοντας τον κίνδυνο της ηλεκτροπληξίας σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το φως που φτάνει στο άλλο άκρο τους είναι ελεύθερο από θερμότητα, και υπεριώδη ακτινοβολία, τις καθιστούν ως την πλέον κατάλληλη λύση προς αξιοποίηση σε χώρους με ιδιαίτερες απαιτήσεις ασφαλείας ή σε εφαρμογές φωτισμού που χρειάζεται να παραμένουν «έγκλειστες» όπως οι στεγανοί χώροι έκθεσης των μουσειακών προθηκών. Η έλλειψη εξοικείωσης του μουσειακού προσωπικού αποτελεί πιθανό πρόβλημα για την υλοποίηση αυτής της αναβάθμισης.

- Η πιθανότερη, και η πιο εύκολα εφαρμόσιμη επιλογή είναι η τεχνολογία των LED (Light Emitting Diodes: ηλεκτρονικοί δίοδοι εκπομπής φωτός) για τον φωτισμό των προθηκών. Τα LED ως ημιαγωγοί λειτουργούν με ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ρεύματος και εκπέμπουν έντονο φως για τον όγκο τους.

Βασικό πρόβλημα για το Μουσείο, όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι πως είχαμε κατά βάση λάμπες πυρακτώσεως. Όχι σαν ασφαλέστερη επιλογή για τα εκθέματα, καθώς όπως ενημερωθήκαμε από το προσωπικό, εκείνα έχουν ειδικό φωτισμό όπου απαιτείται, αλλά γιατί δεν είχε γίνει η αναβάθμιση σε LED σε μεγάλο αριθμό λαμπτήρων στους κοινόχρηστους χώρους του μουσείου, που όπως είναι κατανοητό, βρίσκονται σχεδόν συνεχώς σε λειτουργία.

Ενεργειακό σύστημα

Μπορεί το σύστημα θέρμανσης και ψύξης να έχει ανανεωθεί ανά τα χρόνια, αλλά οι τεχνολογικές εξελίξεις τα καθιστούν παρωχημένα και η ελλιπής τους συντήρηση, τα κατατάσσει αρκετά κοστοβόρα, ενεργειακά και οικονομικά. Η απόδοση τους με το πέρασμα των ετών μειώνεται και σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή εξαερισμό και το ανύπαρκτο σύστημα ελέγχου, δεν έχουμε ανάκτηση ενέργειας, ούτε ταχεία ανατροφοδότηση για τις συνθήκες που επικρατούν ώστε να τις επαναφέρουμε σε μια κανονικότητα. Αυτό επηρεάζει όπως είναι αναμενόμενο την εμπειρία των επισκεπτών, την καθημερινότητα των εργαζομένων και ενδεχομένως την κατάσταση κάποιων εκθεμάτων.

Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι να βρεθεί ένα ενεργειακό σύστημα, είτε αναβαθμίζοντας το υπάρχον, είτε εγκαθιστώντας ένα νέο, το οποίο θα είναι οικονομικά βιώσιμο και θα μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο περιβάλλον του μουσείου. Το τελευταίο σημαίνει πως, η τοποθέτηση θέλουμε να μη δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργία και στην ακεραιότητα του κτηρίου, και ο εξοπλισμός να μπορεί να «αφομοιωθεί» εμφανισιακά, είτε στο εξωτερικό είτε στο εσωτερικό του Μουσείου. Κύριο μέλημα οποιασδήποτε παρέμβασης είναι να προστατευτούν τα εκθέματα, η ταυτότητα του κτηρίου και η άνεση των επισκεπτών/εργαζομένων.

Ηλεκτρικός εξοπλισμός

Δεν αποτελεί το μεγαλύτερο πρόβλημα στην ενεργειακή συμπεριφορά του μουσείου, αλλά παραμένει σημαντικό κομμάτι. Φυσικά και η παρουσία αυτού του εξοπλισμού είναι απαραίτητη για την ομαλή και ορθή λειτουργία του, οπότε μέλημα μας είναι όπου κριθεί δυνατό να αναβαθμιστεί υλικοτεχνικά το Μουσείο και να τοποθετηθεί ένα ακόμα κομμάτι στο παζλ της ενεργειακής αναβάθμισης, καθώς καμία αλλαγή/παρέμβαση δεν είναι αρκετή από μόνη της, παρά μόνο όταν προστεθεί στο σύνολο.

«Η προσέγγιση μας για το Μουσείο»

Η παρούσα μελέτη γίνεται σε επίπεδο προπτυχιακής εργασίας, οπότε υπάρχουν σημεία στα οποία έχουμε βασιστεί σε μετρήσεις και παραδοχές προηγούμενων ερευνητών και οι υποθέσεις που κάνουμε έχουν ως γνώμονα αυτές.

Σκοπός μας είναι, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα προσομοίωσης EnergyPlus, να μετρήσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου (current state) για ένα έτος, να προτείνουμε κάποιες παρεμβάσεις, να φτιάξουμε ένα νέο μοντέλο και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της βελτιωμένης πρότασης με την αρχική κατάσταση. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα απαιτεί μια γεωμετρία κτηρίου και κάποια καιρικά δεδομένα. Η γεωμετρία του κτηρίου φτιάχτηκε από τον Johannes Steinbeisser χρησιμοποιώντας τα προγράμματα OpenStudio και SketchUp, ο οποίος έφτιαξε το μοντέλο του αξιοποιώντας διάφορα στοιχεία όπως τοποθεσία, υλικά κατασκευής και δομή του κτηρίου. Στη διάθεση του είχε και αρχιτεκτονικά σχέδια τα οποία βοήθησαν στην ορθή μοντελοποίηση.

Το κτήριο

Η είσοδος του μουσείου είναι στον πρώτο όροφο, όπου στεγάζονται το πωλητήριο του, το Χρονολόγιο και οι εκθέσεις της Νομικής, της Ιατρικής καθώς και της Οδοντιατρικής Σχολής. Εξωτερικά, βρίσκονται οι τουαλέτες και μια αποθήκη γενικής χρήσης (όχι εκθεμάτων). Το ισόγειο χρησιμοποιείται κυρίως ως χώρος παρουσιάσεων, ειδικά μετά την ανακαίνιση του, κάτι που τον καθιστά σπάνια χρησιμοποιούμενο χώρο.

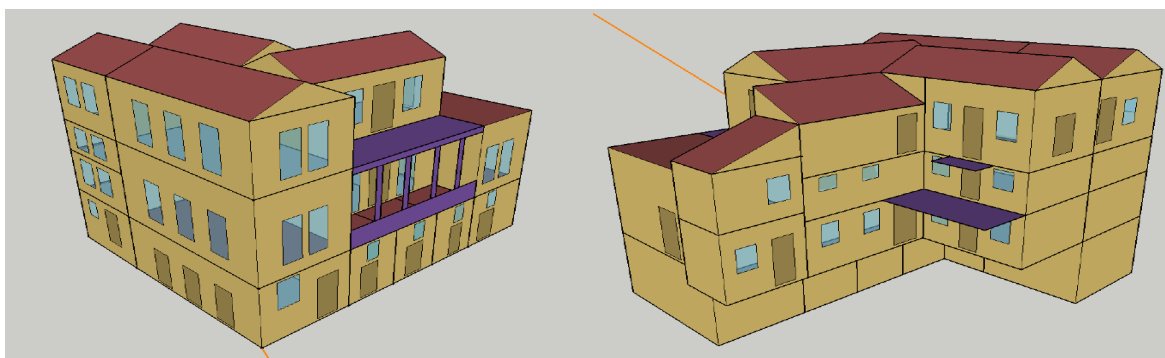
Στο δεύτερο όροφο, βρίσκονται τα γραφεία του προσωπικού και οι εκθέσεις της Φιλοσοφικής, της Θεολογικής Σχολής καθώς και της Σχολής Θετικών Επιστημών.

Στον ημιόροφο, βρίσκεται το γραφείο του διευθυντή του μουσείου και το εργαστήριο συντήρησης των εκθεμάτων, όπου και μερικά αποθηκεύονται.

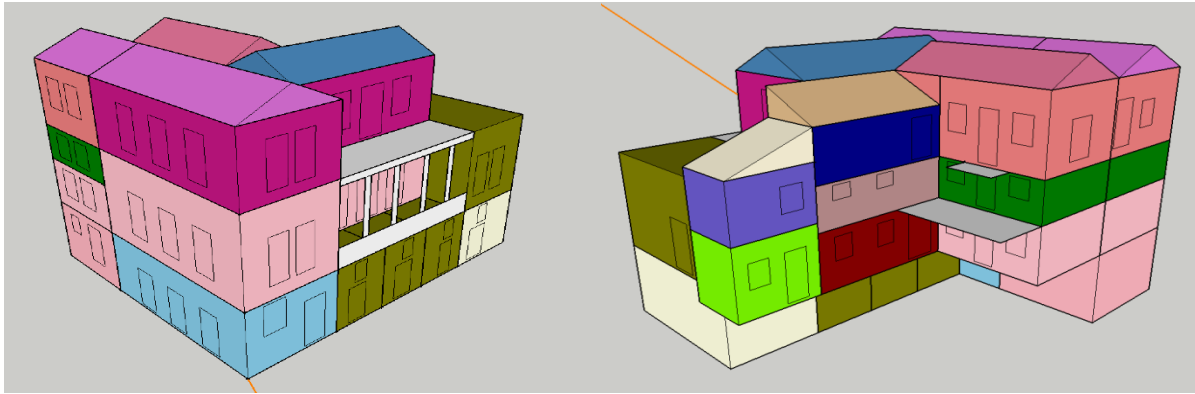
Οι θερμικές ζώνες στην προσομοίωση έχουν χωριστεί ανάλογα με τη θέση και τη χρήση. Για παράδειγμα οι εκθέσεις στο 2^ο όροφο αποτελούν ξεχωριστή θερμική ζώνη από εκείνες του 1^{ου}. Η συνολική επιφάνεια του κτηρίου που έχει χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο μας, είναι 955,86 m².

Υλικά

Για τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής έχουν γίνει υπολογισμοί από όποιες πληροφορίες μπορούσαν να συλλεχθούν. Οι τοίχοι είναι από πέτρα και κονίαμα, εκείνοι που ακουμπούν το έδαφος είναι από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Το πάτωμα του ισογείου είναι από πέτρα και δεν έχει μόνωση. Τα υπόλοιπα εσωτερικά πατώματα και οι οροφές είναι από ξύλο και τα μπαλκόνια είναι από ξύλο ενισχυμένο με σιδερένιες στήλες. Η σκεπή είναι ξύλινη και καλυμμένη με κεραμίδια. Τα παράθυρα είναι διπλά με κενό 7mm και τα κουφώματα τους, όπως και οι πόρτες είναι από ξύλο.



Εικόνα 3-1: Η γεωμετρία του κτηρίου αποτυπωμένη στο EnergyPlus, μέσω του Sketch Up



Εικόνα 3-2: Οι θερμικές ζώνες όπως είναι χωρισμένες στο EnergyPlus.

Άλλες παράμετροι

- Χρήση: υπολογίζουμε ότι κατά τις ώρες λειτουργίας (9:00-16:00) υπάρχουν 13 εργαζόμενοι και 10-20 επισκέπτες (24 άτομα).

Η παρουσία τους υπολογίζεται σε 100 W ανά άτομο. Ο Κ.Εν.Α.Κ ορίζει αυτόν τον αριθμό στα 90 W/άτομο.² Ο δικός μας υπολογισμός προτιμάται γιατί δεν έχουμε συγκεκριμένη εικόνα για το πλήθος, κυρίως των επισκεπτών.

- Εξαερισμός και διείσδυση αέρα: έχουμε λάβει ως σταθερά τις 0,7 αλλαγές αέρα/ώρα, αριθμός που μπορεί να είναι μεγαλύτερος λόγω της μικρής αεροστεγανότητας των παλαιών υλικών που βρίσκονται στο κτήριο. Επίσης δεν υπάρχει μηχανικός εξαερισμός, οπότε προσμετράμε μόνο τον φυσικό εξαερισμό με ροή $10\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ στην είσοδο, στις εκθέσεις και στα γραφεία.²

- Ποιότητα αέρα και υγρασία: αυτά τα δεδομένα δεν έχουν προσομοιωθεί, καθώς απαιτούνται ακριβείς μετρήσεις, και ελέγχονται από το Μουσείο για την προστασία των εκθεμάτων και του κτηρίου. Για την ολοκλήρωση όμως του μοντέλου έχουν ληφθεί ως δεδομένες οι τιμές που απαιτούνται από τον Κ.Εν.Α.Κ. Οι τιμές για την σχετική υγρασία είναι 35%, τον χειμώνα και 50%, το καλοκαίρι.²

Για την εξασφάλιση συνθηκών υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτηρίου και κάθε ανεξάρτητου τμήματος κτηρίου απαιτείται η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση μέρους του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος. Σε μουσειακό χώρο, απαιτούνται $10\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ή αλλιώς $20\text{m}^3/\text{h}/\text{άτομο}$.²

- Φωτισμός: θεωρείται ενεργός κατά τις ώρες λειτουργίας του Μουσείου. Στις προθήκες των εκθεμάτων είναι τοποθετημένες ledοταινίες και δεν έχουν υπολογιστεί αφού δε θα αλλάζουν. Κατά τη δημιουργία του μοντέλου, οι λάμπες ήταν, στην πλειοψηφία τους, πυρακτώσεως. Οπότε κινούμαστε με βάση αυτό το σενάριο.

Σημειώνεται βέβαια ότι στο εργαστήριο συντήρησης έχουμε λάμπες φθορισμού, για την προστασία των υπό συντήρηση ή αποθήκευση εκθεμάτων, όπως ενημερωθήκαμε από τη συντηρήτρια του Μουσείου. Αυτές δε θα αντικατασταθούν.

Πίνακας 3-1: Οι θερμικές ζώνες ανά όροφο και το σύνολο κατανάλωσης του φωτισμού σε kW.

Όροφος	Θερμική Ζώνη	Κατανάλωση (kW)
0	Αίθουσα παρουσιάσεων	1.05
0	Κάμαρες	1.75
1	Είσοδος	0.4
1	Έκθεση	2.95
1	Σκάλες	0.05
1	WC	0.1
1.5	Γραφείο Διευθυντή	0.075
1.5	Εργαστήριο	0.5
2	Έκθεση	2.5
2	Γραφείο	2

- Εξοπλισμός: για την εξυπηρέτηση των αναγκών του προσωπικού υπάρχουν 6 ηλεκτρονικοί υπολογιστές (100 W ο καθένας) με 6 οθόνες (30 W η καθεμία) & 3 εκτυπωτές με σύνολο κατανάλωσης 500 W.

Έχουμε προχωρήσει το μοντέλο με τις παραδοχές ότι δεν έχουν προστεθεί νέοι υπολογιστές και εκτυπωτές. Σημειώνεται πως η κατανάλωση που έχει σημειωθεί από τον Johannes δεν είναι αντιπροσωπευτική όταν οι συσκευές βρίσκονται σε αναμονή.

- Σύστημα θέρμανσης και ψύξης: επίσης λειτουργεί κατά το ωράριο που αναφέραμε. Για την προσομοίωση του μοντέλου έχει χρησιμοποιηθεί ένα ιδεατό σύστημα του προγράμματος EnergyPlus (ideal loads air system). Κατά τη χρήση αυτής της μεθόδου, γίνονται κάποιες παραδοχές για την ροή αέρα κάθε μηχανήματος και τη ροή ανάμεσα στις θερμικές ζώνες, με όριο απόδοσης καθενός ιδανικού συστήματος την ονομαστική ισχύ του κλιματιστικού που είναι σε κάθε θερμική ζώνη.

Βάση του Κ.Εν.Α.Κ. η ελάχιστη θερμοκρασία για ένα μουσειακό χώρο είναι 20° C και η μέγιστη 23°C.² Ο θερμοστάτης τοποθετείται στην είσοδο του Μουσείου, στον πρώτο όροφο.

Πίνακας 3-2: Οι θερμικές ζώνες που έχουν σύστημα θέρμανσης-ψύξης και η κατανάλωση τους σε kW.

Ζώνη	Κατανάλωση (kW)
Γραφείο Διευθυντή	3
Είσοδος	3
Έκθεση 1 ^{ου}	9.5
Έκθεση 2 ^{ου}	10
Γραφεία 2 ^{ου}	6

Παρόμοια με προηγουμένως, εργαζόμαστε με την παραδοχή ότι δεν έχει γίνει κάποια αλλαγή σε αυτό τον εξοπλισμό.

Σημειώνεται πως μετά την πρόσφατη ανακαίνιση του ισόγειου, τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα, τα οποία τίθενται σε λειτουργία σε ελάχιστες περιπτώσεις (εκδηλώσεις, παρουσιάσεις κτλ.). Συνεπώς δε λήφθηκαν υπόψη γιατί δε θα αλλαχθούν (εφόσον είναι καινούρια) και δε χρησιμοποιούνται αρκετά ώστε να θεωρηθούν σημαντικά. (λίγες ώρες/έτος)

- Δεδομένα καιρού: το μοντέλο απαιτεί συγκεκριμένου τύπου αρχεία (erw) τα οποία περιέχουν δεδομένα από μετεωρολογικό σταθμό στην Αθήνα (από τη βάση δεδομένων International Weather for Energy Calculations). Η προσομοίωση χρησιμοποιεί στοιχεία όπως ηλιακή ακτινοβολία (προσανατολισμός και ποσότητα), θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.ά. Σε άλλη περίπτωση, για πιο ακριβείς υπολογισμούς θα χρειαζόμασταν μετρήσεις της θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους στην συγκεκριμένη τοποθεσία. Αυτό δεν ήταν δυνατό, οπότε ο Johannes όρισε μια σταθερή στους 18°C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

«Η προσομοίωση»

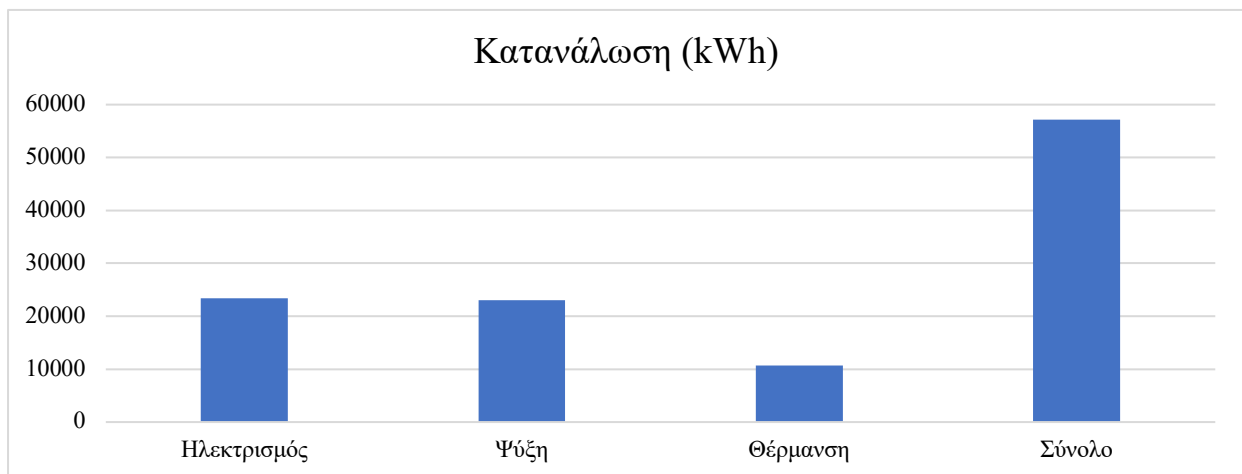
Αρχική Κατάσταση (Current State)

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο κατασκευάστηκε και προσομοιώθηκε σύμφωνα, με την μελέτη του Johannes Steinbeisser, και πάνω σε αυτό έγιναν οι δικές μας προτάσεις για επέμβαση, ώστε να πετύχουμε τη μέγιστη ενεργειακή αναβάθμιση του κτηρίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να βρήκαμε κάποια αστοχία, παράλειψη ή πρόσφατη αλλαγή στα στοιχεία μας. Όπου κρίνεται αναγκαίο, επικαιροποιούμε τα στοιχεία και το σημειώνουμε.

Πίνακας 4-1: Η κατανάλωση χωρισμένη ανά λειτουργία του κτηρίου.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	23397,4094	23025,1842	10686,1966	57108,3792

Όπου «Ηλεκτρισμός» = Φώτα + Εξοπλισμός



Γράφημα 4-1: Όπως και στον πίνακα, χωρίσαμε την κατανάλωση ανά χρήση. Η σχηματική απεικόνιση βοηθάει στην καλύτερη εποπτεία της κατάστασης.

Παρατηρούμε ότι οι ενεργειακές απαιτήσεις των συσκευών και του φωτισμού είναι σχεδόν ίσες με εκείνες της ψύξης, κάτι που δείχνει πως είναι αναγκαία η αναβάθμισή τους. Εφόσον ειδικά δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερα περίπλοκος εξοπλισμός, και μιλάμε για φώτα, υπολογιστές, οθόνες κι εκτυπωτές που συναντάμε συχνά σε οικιακή ή επαγγελματική χρήση (γραφείου).

«Ενεργειακές αναβαθμίσεις»

1^ο Σενάριο: Αλλαγή λαμπτήρων σε LED

Πλεονεκτήματα των LED:

Είναι μια από τις πιο αποδοτικές ενεργειακά και ταχύτατα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες φωτισμού. Οι λαμπτήρες LED χρησιμοποιούν τουλάχιστον 75% λιγότερη ενέργεια και διαρκούν 25 φορές περισσότερο από λαμπτήρες πυρακτώσεως. Για τις Η.Π.Α., η χρήση τους μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση έως και 384 TWh (σε σχέση με τη μη χρήση τους) και με τις παρούσες τιμές, 30 δις \$.¹⁰

Εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα. Σύμφωνα με μελέτες για διαφορετικά είδη κτηρίων, ο φωτισμός αντιστοιχεί σε 30% της ηλεκτρικής κατανάλωσης ετησίως σε κτήρια γραφείων¹², 20-30% σε νοσοκομεία¹³, 28-62% σε σχολεία¹⁴ και σε οικίες 12%.^{15,16} Αυτό δείχνει πόσο σημαντική, για την ενεργειακή απόδοση, ειδικά των δημοσίων κτηρίων, είναι η επιλογή του συστήματος φωτισμού. Η θερμότητα που δημιουργείται από το σύστημα προφανώς επηρεάζει το θερμικό ισοζύγιο, και τις ανάγκες του συστήματος ψύξης και θέρμανσης, άρα και της ενεργειακής απόδοσης.¹⁷

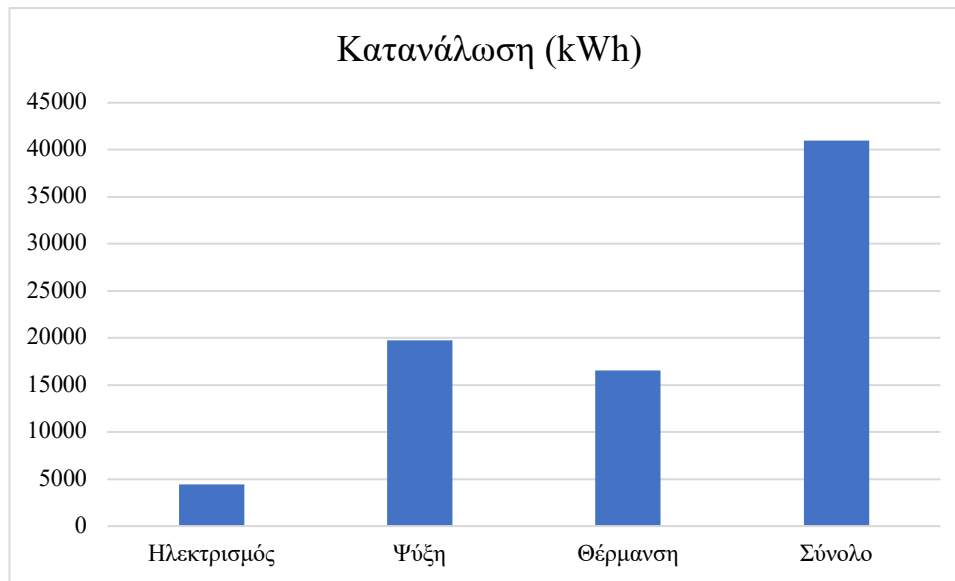
Σε μια άλλη μελέτη¹¹, αποδείχτηκε πως οι θερμικές απώλειες των λαμπτήρων LED είναι **0.08W θερμότητας ανά 1W ηλεκτρικής ενέργειας**, κάτι που τους καθιστά την καλύτερη λύση αν θέλουμε να αποφύγουμε την αύξηση θερμοκρασίας σε έναν χώρο, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Στην προσομοίωση, όπως αναφέραμε και πριν, δεν έχουν συμπεριληφθεί κάποιοι από τους λαμπτήρες γιατί δεν πρόκειται να αλλαχθούν. Μας ενδιαφέρουν εκείνοι που βρίσκονται σε κοινόχρηστους ή εργασιακούς χώρους και δεν επηρεάζουν άμεσα τα εκθέματα.

Έτσι κι αλλιώς, σε αυτό το επίπεδο, στόχος μας είναι να αναδείξουμε την ποσοστιαία ενεργειακή αναβάθμιση, και όχι την ποσοτική.

Πίνακας 4-2: Η αλλαγή στην κατανάλωση ανά χρήση, μετά την πρώτη ενεργειακή αναβάθμιση.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	4436,1466	19764,047	16750,13	40950,03276



Γράφημα 4-2: Σχηματικά η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την αλλαγή των λαμπτήρων.

Η μεγαλύτερη διαφορά (μείωση) παρατηρείται στην κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών, όπου συμπεριλαμβάνονται και τα φώτα, η οποία αγγίζει το 81,04%.

Η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας για ψύξη (14,16%) και η αύξηση για θέρμανση (55%), ίσως να εκπλήσσουν, καθώς δεν φαίνεται να υπάρχει άμεση σύνδεση των συστημάτων αυτών με μια μικρή αλλαγή όπως των λαμπτήρων. Τόνισαμε προηγουμένως τη σημασία που έχει ο τύπος λαμπτήρα και πως επηρεάζει το θερμικό ισοζύγιο με τη θερμότητα που εκπέμπει. Στο EnergyPlus δεν υπάρχει διαχωρισμός για λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού ή LED και απλά ρυθμίζει ο χρήστης κάποιους δείκτες/συντελεστές και την κατανάλωση που έχει ο καθένας. Για παράδειγμα για έναν απλό λαμπτήρα πυράκτωσης έχουμε 100 W, ενώ αν τον αντικαταστήσουμε με έναν αντίστοιχης φωτεινότητας LED, 10 W.

Πίνακας 4-3: Οι θερμικές απώλειες και η αποτελεσματικότητα κάθε τύπου λαμπτήρα.¹¹

Τύπος Λαμπτήρα	Συντελεστής εκπομπής θερμότητας (W/W)	Αποτελεσματικότητα φωτεινότητας (lm/W)
LED	0,08	140
Πυρακτώσεως	0,95	12
Αλογόνου	0,82	16
Φθορισμού	0,31	56

Σύμφωνα με τον πίνακα, το 95% της ισχύος ενός απλού λαμπτήρα εκπέμπεται σαν θερμότητα. Είναι εμφανές ότι η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη κάποια συνεισφορά στη θέρμανση και στην ψύξη (ανάγκη για τη μια το χειμώνα και την άλλη το καλοκαίρι).

Για αυτό το λόγο, μειώνοντας την κατανάλωση του συστήματος φωτισμού βλέπουμε την παραπάνω συμπεριφορά του συστήματος ψύξης-θέρμανσης.

Παρ' όλα αυτά, ο ακριβής συντελεστής εκπομπής θερμότητας δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση, οπότε δεν επηρεαζόμαστε από την αλλαγή. Αξίζει να τονιστεί όμως η σημασία του, για μελλοντικές μελέτες, και στο Μουσείο και αλλού.

Πίνακας 4-4: Η διαφορά στο ενεργειακό αποτύπωμα, μετά την πρώτη προσπάθεια ενεργειακής αναβάθμισης.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
28,29417773238	15980,60445114

Η συνολική κατανάλωση μειώθηκε κατά 28,29% και οι εκπομπές αέριων ρύπων CO₂ κατά 15,9 τόνους !

Για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, την εκπομπή ρύπων διοξειδίου του άνθρακα CO₂, λάβαμε την ενδεικτική τιμή από τον πάροχο της ΔΕΗ, **0,989 kg CO₂/kWh**. Στόχος όλων, χρηστών και παρόχων, είναι η τιμή αυτή να μειώνεται συνεχώς. Ευθύνη του ενός είναι να μειώνονται οι εκπομπές με σωστή συντήρηση και αναβάθμιση του δικτύου, και του άλλου η σωστή χρήση του.

Για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη, χρησιμοποιούμε μόνο τις kWh, οπότε προφανώς η ποσοστιαία μείωση είναι ίδια, όπως και η μείωση του κόστους (€/kWh). Δεν θα συμπεριλαμβάνονται οι ποσοστιαίες μειώσεις σε πίνακες για αυτόν το λόγο.

2^ο Σενάριο: Αναβάθμιση ηλεκτρικού εξοπλισμού και κλιματιστικών

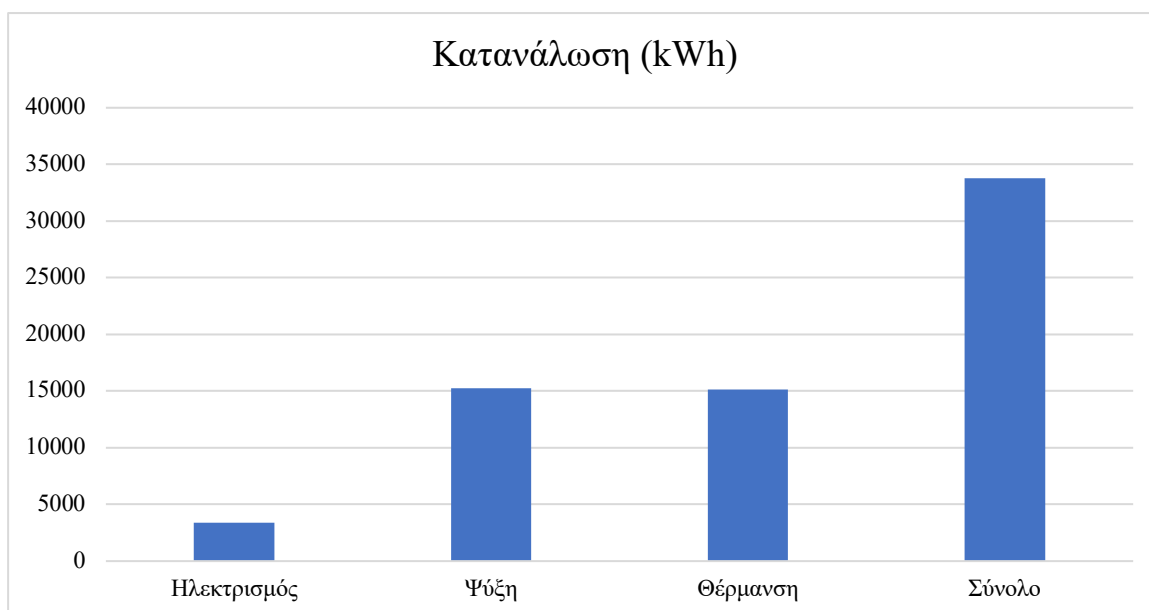
Στο προηγούμενο σενάριο, είδαμε πόσο σημαντική ήταν η συνεισφορά του συστήματος φωτισμού στην συνολική κατανάλωση του ηλεκτρικού εξοπλισμού του κτηρίου. Παρατηρήσαμε πως μειώθηκε 81% και έχουμε περιθώριο βελτίωσης με τις παρακάτω απλές αλλαγές: νέοι εκτυπωτές επαγγελματικής χρήσης και οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών, και τα δύο με ενεργειακή απόδοση τουλάχιστον A+.

Με αντίστοιχη λογική, αντικαθιστούμε τις κλιματιστικές μονάδες με σύγχρονες και πιο οικονομικές.

1. Στις οθόνες, μπορούμε να επιλέξουμε κοινές, καθώς δεν υπάρχουν παραπάνω απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση ~50% στην ισχύ από εκείνη που έχει ληφθεί υπόψη στο μοντέλο προσομοίωσης.
2. Για τους εκτυπωτές όπως αναφέρθηκε, έχει σημειωθεί μια μεγάλη κατανάλωση (500 W) που δε δικαιολογείται για όλη τη διάρκεια του ωραρίου λειτουργίας του Μουσείου, αφού συνήθως βρίσκονται σε αναμονή και μόνο κατά τη χρήση στο μέγιστο φτάνουν την ονομαστική τους ισχύ. Σύμφωνα μάλιστα με τους κατασκευαστές (HP & Epson), ένας μεγάλου τύπου εκτυπωτής με ισχύ 500 W σε χρήση, είναι στα 20 W σε αναμονή και 0,7 W σε λειτουργία “sleep”. Για μικρότερου τύπου έχουμε τις αντίστοιχες τιμές 19 W, 8,3 W και 0,8 W.
3. Το σύνολο των κλιματιστικών στο κτήριο χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη. Υπάρχουν διαφορετικά σε κάθε θερμική ζώνη (κατασκευαστής & ισχύς). Οι αναβαθμισμένες μονάδες είναι ονομαστικής ισχύος, για ψύξη 2700 kW και για θέρμανση 2900 kW.

Πίνακας 4-5: Η κατανάλωση ανά χρήση μετά την αλλαγή του ηλεκτρικού εξοπλισμού και των κλιματιστικών.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	3400,0272	15264,011	15139,01	33802,80482



Γράφημα 4-3: Η σχηματική αναπαράσταση της αλλαγής μετά την προσομοίωση του δεύτερου σεναρίου.

Η κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών μειώθηκε κατά 85,468% από την αρχική κατάσταση. Οι ανάγκες για ψύξη έπεσαν κατά 33,7% και για θέρμανση αυξήθηκαν κατά 41,67%. Οι λόγοι για το δεύτερο είναι εκείνοι που αναλύσαμε και στο προηγούμενο σενάριο, περί σημασίας της θερμικής εκπομπής και δε θα ξανά αναφερθούν. Παρατηρούμε κίολας ότι προηγουμένως, ήταν μεγαλύτερη η ανάγκη για θέρμανση από το σύστημα, κάτι που δείχνει πως η αναβάθμιση που κάναμε είναι επιτυχής.

Το σύστημα, αναφέραμε ότι βασίζεται σε έναν ιδανικό τρόπο ανταλλαγής αέρα μεταξύ θερμικών ζωνών και εξαερισμού, οπότε μπορεί ποσοτικά να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αλλά η προσέγγιση μας για το πόσο σημαντική είναι η κάθε αλλαγή είναι καλή.

Πίνακας 4-6: Ο αντίκτυπος της δεύτερης ενεργειακής αναβάθμισης στο ενεργειακό αποτύπωμα.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
40,8093778880296	23049,2128838

Η εξοικονόμηση ανέρχεται στο **40,8%** στην ηλεκτρική κατανάλωση και στους **23 τόνους CO₂**, και το σενάριο αυτό φαίνεται να δίνει αποτέλεσμα, χωρίς παρεμβάσεις στο κτήριο, αλλά μόνο στον εξοπλισμό του. Ο χαρακτηρισμός του κτηρίου ως διατηρητέο δεν μας άφηνε πολλά περιθώρια στο να επέμβουμε στο κέλυφος του, και προτεραιότητα έχουν ορισμένες επισκευές άμεσης ανάγκης (μούχλα σε κάποια σημεία και επιδιόρθωση κουφωμάτων), που ενημερωθήκαμε πως έχουν δρομολογηθεί άμεσα.

Διαφορετική προσέγγιση, πιθανώς να ήταν οικονομικά ασύμφορη, χρονοβόρα ή να ελλόχευε ο κίνδυνος αλλοίωσης των χαρακτηριστικών του Μουσείου.

Ισόγειο

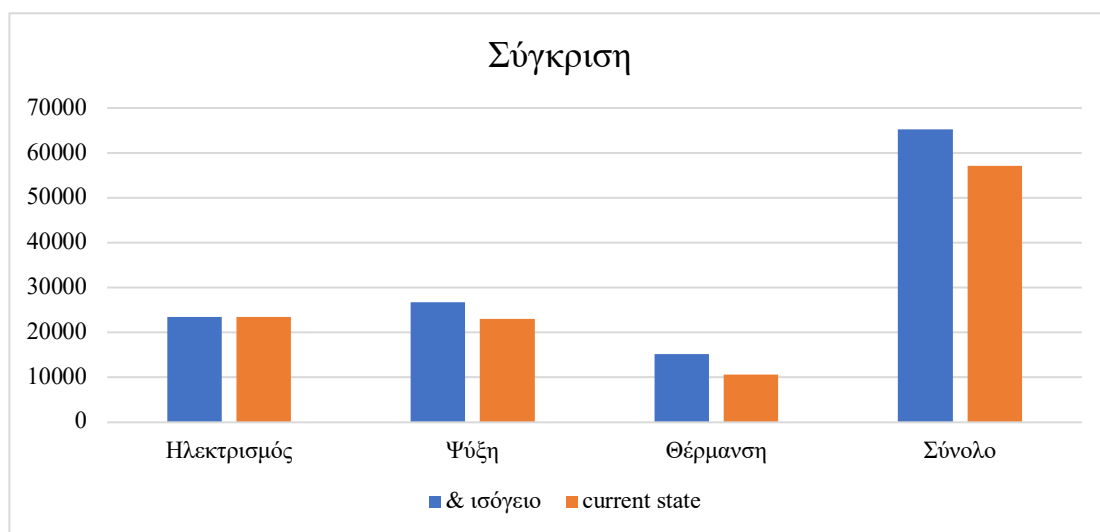
Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε ότι στο ισόγειο δεν υπήρχαν κλιματιστικά σώματα και είχαν τοποθετηθεί πρόσφατα κάποια ηλεκτρικά θερμαντικά. Το ισόγειο συνεπώς δεν ήταν στο μοντέλο προσομοίωσης ως θερμική ζώνη, άρα το πρόγραμμα μας δεν «προσπαθούσε» να το θερμάνει/ψύξει με τον ίδιο τρόπο.

Τα ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα δεν τα συμπεριλάβαμε στην προσομοίωση διότι 1) δε δικαιολογούν την παρουσία τους, λόγω μικρής χρήσης ανά έτος 2) δεν ήταν στην καταμέτρηση που είχε κάνει ο Johannes 3) συνεισφέρουν μόνο στη θέρμανση του ισόγειου κι όχι στην ψύξη.

Για καλύτερη εποπτεία της κατάστασης, εκτελέσαμε δύο σενάρια που συμπεριλαμβάνουν το ισόγειο σαν θερμική ζώνη, σε περίπτωση που αλλάξει χρήση ο χώρος. Στο πρώτο (a), δεν έχουν τοποθετηθεί τα κλιματιστικά που αναφέραμε προηγουμένως ενώ στο δεύτερο έχει αναβαθμιστεί ενεργειακά και το ισόγειο (b).

Πίνακας 4-7: Η κατανάλωση ανά χρήση όταν συμπεριλαμβάνεται το ισόγειο στην αρχική κατάσταση. (Current state with ground floor)

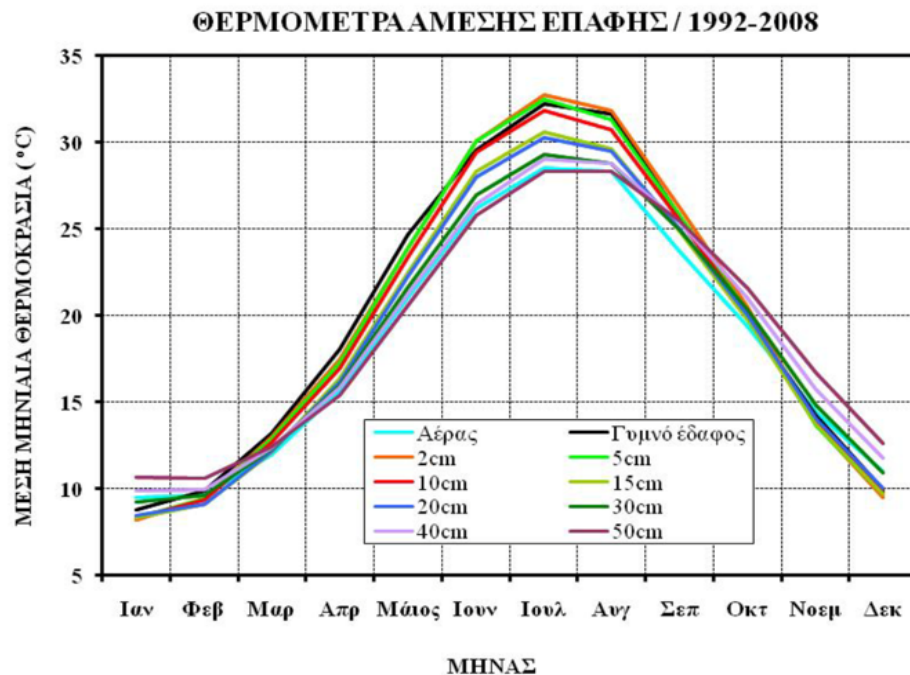
	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	23396,10	26696,62	15168,45	65261,17



Γράφημα 4-4: Η σχηματική απεικόνιση της διαφοράς στην ηλεκτρική κατανάλωση όταν συμπεριλαμβάνεται το ισόγειο.

Στον ηλεκτρισμό βλέπουμε πως η διαφορά είναι αμελητέα (0,1%) αλλά όπως είναι λογικό η κατανάλωση αυξήθηκε στη θέρμανση 41,94% και στην ψύξη 15,95%. Το σύστημα προσπαθεί να εξισορροπήσει τη θερμοκρασία σε έναν καινούριο όροφο ο οποίος έχει «απαιτήσεις» αλλά και συνεισφορές.

Η επαφή με την επιφάνεια του εδάφους και η συνεισφορά της θερμοκρασίας του, η οποία διαφοροποιείται μέσα στο έτος (και τη μέρα), αλλάζουν το θερμικό ισοζύγιο. Είπαμε πως ο Johannes έχει λάβει μια σταθερή θερμοκρασία για όλο το έτος (18° C). Επίσης το έδαφος είναι από πέτρα και η θερμική συμπεριφορά του είναι διαφορετική από το υπόλοιπο κτήριο. Το EnergyPlus περιέχει στην προσομοίωση όλα αυτά τα στοιχεία, αλλά δεν είμαστε βέβαιοι αν αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα.



Γράφημα 4-5: Διάγραμμα της μεταβολής της θερμοκρασίας εδάφους σε διάφορα βάθη την περίοδο 1992-2008 του αυτοματοποιημένου σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Θησείο, μέσα στο έτος.²⁰

Στην προσομοίωση μας έχει επιλεγθεί αλγόριθμος υπολογισμού της θερμοκρασίας του εδάφους ανά βάθος και εποχή. Η σταθερή θερμοκρασία σε ρηχό έδαφος είναι 13° C και σε βαθύ 16° C.

(a)

Πίνακας 4-8: Η κατανάλωση ανά χρήση αφού τοποθετηθούν νέα κλιματιστικά στο κτήριο, εκτός από το ισόγειο.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	3399,76	15263,94	15139,09	33802,79

Πίνακας 4-9: Η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την παραπάνω αλλαγή.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
48,2038247245644	31112,33782

Φαίνεται μεγαλύτερη η διαφορά στην εξοικονόμηση σε σχέση με πριν: υπάρχει μεγάλη αναβάθμιση στον εξοπλισμό του κτηρίου, αλλά δεν έχουν τοποθετηθεί σώματα στο ισόγειο που θα ανέβαζαν την κατανάλωση.

Η σύγκριση που κάνουμε είναι προφανώς με την κατάσταση όπου συμπεριλαμβάνεται η συνεισφορά του ισόγειου (current state with ground floor).

(b)

Πίνακας 4-10: Τοποθετούμε κλιματιστικά και στο ισόγειο, και παρατηρούμε πως επηρεάζονται οι κατηγορίες χρήσης.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	3399,76	16957,06	19482,02	39838,84

Πίνακας 4-11: Η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την ολοκληρωτική αλλαγή του κλιματιστικού συστήματος.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
38,9547567106137	25142,68437

Η ποσοστιαία διαφορά είναι παρόμοια με το σενάριο της αναβάθμισης των κλιματιστικών χωρίς το ισόγειο. Εφόσον τοποθετούνται αυτόνομες κλιματιστικές μονάδες σε κάθε θερμική ζώνη, επιτυγχάνεται ισορροπία στο κτήριο ανά ζώνη και μετά ολικά. Θα συγκρίνουμε κάθε σενάριο παρακάτω.

Συμπέρασμα

Η αναβάθμιση του εξοπλισμού (φώτα, οθόνες, εκτυπωτές, κλιματιστικά) επιφέρει μια εξοικονόμηση **38,9%**, αν συμπεριληφθεί και το ισόγειο στις παρεμβάσεις. Σύμφωνα όμως με την ενημέρωση που έχουμε, στην περίπτωση αναβάθμισης του κλιματιστικού εξοπλισμού, το ισόγειο θα παραμείνει ως έχει. Συνεπώς επιτεύχθηκε αναβάθμιση κατά **48,2%** στην ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση εκπομπών **31,1 τόνων** ρύπων CO₂.

Η απόφαση εξαρτάται από τις μουσειακές αρχές κι ανάγκες, δηλαδή αν σταματήσει ο συγκεκριμένος χώρος να χρησιμοποιείται σπανίως.

«Αλλαγή κλιματιστικού συστήματος με αντλία θερμότητας»

3^ο Σενάριο: Τοποθέτηση αντλίας θερμότητας

Τι είναι αντλία θερμότητας:²¹

Είναι μηχανικές διατάξεις που αντλούν θερμότητα από το περιβάλλον, συνήθως τον ατμοσφαιρικό αέρα και την μεταφέρουν στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Για να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούν ένα μικρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο και αποδίδουν στο πολλαπλάσιο σε θερμική (σε σχέση με αυτό που καταναλώνουν). Πρόκειται για σύστημα υψηλής απόδοσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ψύξη όσο και για θέρμανση κατοικιών αλλά και επαγγελματικών χώρων.

Βάση της ευρωπαϊκής οδηγίας 2009/28/EC/RES Direc., οι αντλίες θερμότητας με υψηλό ονομαστικό βαθμό απόδοσης κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Έχουν πολύ χαμηλότερο «αποτύπωμα» CO₂ σε σχέση με τους υπόλοιπους συμβατικούς τρόπους θέρμανσης/ψύξης.

Βαθμός απόδοσης: Η απόδοση της αντλίας θερμότητας επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος, διότι η ενθαλπία του αέρα είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, επομένως στις χαμηλές θερμοκρασίες του αέρα θα έχουμε μικρά ποσά θερμότητας από τη μία, και από την άλλη, προβλήματα σωστής λειτουργίας του συστήματος κατά το χειμώνα. (*Seasonal Energy Efficiency Ratio, Energy Efficiency Ratio, Coefficient of Performance*)

COP (ειδικός βαθμός απόδοσης αντλίας): βαθμός απόδοσης σε λειτουργία θέρμανσης, είναι ο λόγος της μεταφερόμενης ενέργειας προς το καταναλισκόμενο έργο.

EER (βαθμός ενεργειακής απόδοσης αντλίας): βαθμός απόδοσης σε λειτουργία ψύξης, παρομοίως, ο λόγος της μεταφερόμενης ενέργειας προς το περιβάλλον προς την ενέργεια που κατανάλωσε η αντλία.

SEER (εποχικός βαθμός ενεργειακής απόδοσης): ίδια αρχή με τον EER αλλά στο σύνολο των συνθηκών μιας συγκεκριμένης εποχής

Κατηγορίες αντλιών θερμότητας:

- Αντλίες θερμότητας αέρος - νερού: εκμεταλλεύονται για την άντληση ενέργειας τον αέρα του περιβάλλοντος. Το θερμικό μέσο απόδοσης ενέργειας είναι συνήθως το νερό που μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο θέρμανσης (ενδοδαπέδια, σώματα ακτινοβολίας, fan coils) ή σε κάποιο εναλλάκτη από θερμοδοχείο με ενσωματωμένη αντλία θερμότητας (ζεστού νερού

χρήσης). Ιδανικές για κάθε είδους κατοικία και λειτουργούν τόσο σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες μέχρι -20°C .

- Αντλίες θερμότητας αέρος – αέρος: είναι οι πιο συνηθισμένες στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, έχουν ως πηγή άντλησης ενέργειας αλλά και ως μέσο απόδοσης της ενέργειας, τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση τον εξωτερικό αέρα και στη δεύτερη τον εσωτερικό ή και ένα μέρος εξωτερικού για ταυτόχρονο εξαερισμό του χώρου.
- Αντλίες θερμότητας νερού – νερού (γεωθερμική αντλία): στην κατηγορία αυτή η πηγή άντλησης της ενέργειας προέρχεται από το έδαφος με οριζόντιους ή κάθετους εναλλάκτες οι οποίοι μεταφέρουν τη θερμική ενέργεια του υπεδάφους στην αντλία. Το θερμικό μέσο απόδοσης της ενέργειας είναι και εδώ το νερό.

Πλεονεκτήματα:

- Εξοικονόμηση ενέργειας: πετυχαίνουμε έως και 6 φορές μεγαλύτερες αποδόσεις σε σύγκριση με θέρμανση από μέσα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Συνεπώς έχουμε μικρότερο κόστος 50% - 70% σε σχέση με το πετρέλαιο.
- Ευκολία εγκατάστασης: η εγκατάσταση δεν απαιτεί χώρο για λεβητοστάσιο, καμινάδα όπως συμβαίνει με τους υπάρχοντες τρόπους θέρμανσης. Τοποθετούνται εύκολα σε ελάχιστο χώρο και χρόνο και μπορούν να θερμάνουν ή να δροσίσουν με άνεση ολόκληρο σπίτι. (εκτός από την γεωθερμική αντλία θερμότητας, απαιτείται ειδική μελέτη και επεμβάσεις στον εξωτερικό χώρο για την εφαρμογή της.
- Κόστος συντήρησης: δε χρησιμοποιείται καυστήρας, δεν απαιτείται ετήσια συντήρηση όπως συμβαίνει με τους λέβητες πετρελαίου και αερίου. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με ένα κλιματιστικό, άρα έχει μηδαμινά έξοδα συντήρησης.
- Ευκολία συνδυασμών: οι αντλίες θερμότητας μπορούν να εγκατασταθούν σε νέα ή παλιά κτήρια και να συνδεθούν με υπάρχοντα θερμαντικά σώματα, το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, καθώς και με σώματα fan coils για θέρμανση και ψύξη.

Μειονεκτήματα στην προσομοίωση:

Δεν γνωρίζουμε τι είδους αντλία θα χρησιμοποιηθεί, οπότε στο μοντέλο μας χρησιμοποιήσαμε μια unitary αντλία, δηλαδή μια που δε διαχωρίζει τους τύπους λειτουργίας. Συνεπώς δεν μπορούμε να έχουμε εικόνα των υπέρ και των κατά κάθε τύπου και δεν αντικατοπτρίζονται στην κατανάλωση του ρεύματος. Επιλέξαμε τα χαρακτηριστικά της αντλίας, σύμφωνα με μια ενεργειακής κλάσης A++, ισχύος 22 kW, συντελεστή απόδοσης COP 4,2 και EER 2,76. Τα υπόλοιπα (airflow [ροή αέρα], SEER κτλ.) αφήσαμε το πρόγραμμα να κάνει autosize. Αυτό σημαίνει πως αφήσαμε το πρόγραμμα να «επιλέξει» εκείνο τις τιμές που επιτρέπουν στην αντλία να διατηρεί τις συνθήκες περιβάλλοντος που έχουμε ορίσει.

Αυτό μπορεί να φαίνεται αντιπαραγωγικό αλλά δεδομένων των στοιχείων που έχουμε, είναι μια μέθοδος που μας επιτρέπει να δούμε πως θα πετύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα στο εσωτερικό περιβάλλον του κτηρίου.

A) Χωρίς το ισόγειο

Πίνακας 4-12: Η κατανάλωση όταν τοποθετήσουμε αντλία θερμότητας, χωρίς να συμπεριλάβουμε το ισόγειο.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	44016,59	44016,59

Σε επόμενο κεφάλαιο, όπου απαιτείται, θα χωρίσουμε τον ηλεκτρισμό σε «Θέρμανση» και «Ψύξη»

Πίνακας 4-13: Η διαφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά μετά την τοποθέτηση της αντλίας.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
22,924462652696	12947,77934078

Προφανώς, δεν είναι εξίσου επιτυχής η ενεργειακή αναβάθμιση με το σενάριο του κλιματισμού (όπου δεν είχαμε προσθέσει κλιματιστικά στο ισόγειο) που είχε φτάσει στο 48,2%. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με όσα γνωρίζουμε για τις αντλίες θερμότητας, που τις παρουσιάζουν ως πιο οικονομικά συμφέρουσες και περιβαλλοντικά ασφαλέστερες.

B) Με το ισόγειο

Το σενάριο που μας ενδιαφέρει ρεαλιστικά περιλαμβάνει και το ισόγειο στην αναβάθμιση. Αυτό σημαίνει πως προσθέτουμε μια καινούρια θερμική ζώνη, που όπως σχολιάσαμε θα έχει επιπτώσεις στο θερμικό ισοζύγιο.

Πίνακας 4-14: Η κατανάλωση ενέργειας στο κτήριο αφού τοποθετηθεί αντλία θερμότητας και στο ισόγειο.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	52142	52142

Πίνακας 4-15: Η ενεργειακή αναβάθμιση που επιτυγχάνεται μετά την κάλυψη όλου του κτηρίου από την αντλία θερμότητας.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
8,69641041336634	4911,74885078

Συμπεριλαμβάνοντας το ισόγειο, βλέπουμε πως έχουμε ενεργειακή αναβάθμιση της τάξης του **8,7%** και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του CO₂ κατά **4,9** τόνους.

Σχόλιο

Λόγω της έλλειψης πληροφοριών για το έργο, το μοντέλο της αντλίας και της αντικειμενικής δυσκολίας που παρουσιάζεται για την προσομοίωση της, τα αποτελέσματα έρχονται σε αντιδιαστολή με όσα γνωρίζουμε για τις αντλίες θερμότητας και το πόσο κρίσιμες είναι για οποιαδήποτε ενεργειακή αναβάθμιση. Η κύρια αιτία για αυτό είναι πως τα στοιχεία που δίνουν οι κατασκευαστές (COP, EER κτλ.) δεν είναι κατατοπιστικά. Υπάρχουν μελέτες^{22,23} που το αποκαλύπτουν και συγχρόνως, υπογραμμίζουν πόσο πολύπλοκη καθίσταται η προσομοίωση μιας αντλίας θερμότητας σε προγράμματα όπως το EnergyPlus και το DOE-2, καθώς απαιτούνται πολλές παράμετροι (έως και 35) και η σωστή εφαρμογή πολυωνυμικών καμπυλών 4^{ου} βαθμού, για να είναι ικανοποιητική. Στις ίδιες μελέτες, όπου εξετάζεται και η προσομοίωση των απλών κλιματιστικών, παρουσιάζεται το πρόβλημα των στοιχείων αυτών, που στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι καν διαθέσιμα στον καταναλωτή πριν την αγορά του προϊόντος, κι ακόμα και όταν είναι, υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις αποδόσεις που αναμένονταν και σε εκείνες που μετρήθηκαν. Για να φτάσουν σε αυτό το αποτέλεσμα, έγινε δοκιμή (260 κλιματιστικών, 200 αντλιών) σε διάφορες πόλεις των Η.Π.Α, και συγκρίθηκαν οι μετρήσεις με τις προσομοιώσεις των ίδιων συσκευών. Σαν συμπέρασμα, προτάθηκαν συντελεστές για τις πολυωνυμικές καμπύλες, ανάλογα τον τύπο της συσκευής, οι οποίοι βοηθούν τις προσομοιώσεις να πλησιάσουν την πραγματικότητα.

Διορθωμένη προσομοίωση των αντλιών θερμότητας:

Με βάση τους προτεινόμενους συντελεστές, εκτελέσαμε προσομοιώσεις που φαίνονται πιο ενθαρρυντικές και με βάση τα όσα ξέρουμε για τις αντλίες, πιο κοντά στην πραγματικότητα.

A) Χωρίς το ισόγειο

Πίνακας 4-16: Η κατανάλωση μετά τη διόρθωση των συντελεστών της αντλίας θερμότητας.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	15994,28	15994,28

Πίνακας 4-17: Η διορθωμένη ενεργειακή αναβάθμιση.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
75,491888974715	48724,95421

Διαφορά με την προσομοίωση χωρίς τους συντελεστές: 69,3%

B) Με το ισόγειο

Πίνακας 4-18: Η διορθωμένη κατανάλωση ενέργειας, όταν συμπεριλαμβάνεται και το ισόγειο.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Σύνολο [kWh]
Κατανάλωση	46309,82	46309,82

Πίνακας 4-19: Η διόρθωση στην ενεργειακή αναβάθμιση, όταν συμπεριλαμβάνεται το ισόγειο.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
29,0392433969	18742,88515

Διαφορά με την προσομοίωση χωρίς τους συντελεστές: 11,2%

Συνολικά, παρατηρούμε μια πιο ενθαρρυντική εικόνα για τις προτεινόμενες παρεμβάσεις. Η μεγάλη διαφορά ανά σενάριο κρύβεται στον τρόπο λειτουργίας της αντλίας θερμότητας, στη σημασία που έχει η κυκλοφορία αέρα ανάμεσα στις θερμικές ζώνες, και στη δομή του κτηρίου. Η απομόνωση του ισόγειου από τους άλλους ορόφους, δείχνει πως έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ενεργειακή συμπεριφορά του Μουσείου. Κάτι που φαίνεται λογικό, εφόσον μιλάμε για διαφορετικά δομικά υλικά, διαφορετική ηλιακή έκθεση και έλλειψη άμεσης εναλλαγής αερίων μαζών με τον πρώτο και δεύτερο όροφο.

Το (a) θα το χρησιμοποιήσουμε αργότερα για σύγκριση.

Το (b) είναι ο σκοπός της μελέτης του κτηρίου, καθώς επιθυμούμε να τοποθετηθεί αντλία θερμότητας και στο ισόγειο.

Η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος κατά **29,04%**, και εκπομπής **18,74 τόνων** ρύπων CO₂ είναι πιο κοντά σε αυτό που επιθυμούμε για το Μουσείο και το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις χωρίς τις διορθώσεις.

Σημειώνουμε πως στην προσέγγιση μας, δεν παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα ως πιο έγκυρα, αφού χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία και δεδομένα πέρα των επίσημων οδηγιών του EnergyPlus. Παρ' όλα αυτά φαίνονται να συμβαδίζουν με τη διαίσθηση μας, δηλαδή ότι η τοποθέτηση αντλίας θερμότητας επιφέρει ενεργειακή αναβάθμιση. Η προσπάθεια αυτή μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, αν στο μέλλον έχουμε περισσότερα και αληθή χαρακτηριστικά από τους κατασκευαστές. Αυτό δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας, και θα αρκεστούμε στο γεγονός ότι υπάρχει αναβάθμιση στην ενεργειακή συμπεριφορά του Μουσείου, ακόμα κι αν ποσοτικά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των αντλιών είναι ότι δεν απαιτούν πολλή ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν και δε χάνουν την απόδοσή τους με το πέρασμα του χρόνου, σε σχέση με τις άλλες πηγές θέρμανσης/ψύξης.²³ Όπως έχουν δείξει έρευνες^{24,25,26} σε μουσεία ή/και ιστορικά κτήρια, οι αντλίες θερμότητας είναι αξιόπιστες λύσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση τους. Σε κάποιες από αυτές (κυρίως στην Ιταλία), η αντλία που χρησιμοποιείται είναι νερού-νερού (γεωθερμική), αλλά η αρχή λειτουργίας είναι ίδια με αυτές που κάναμε την προσομοίωση. Παρουσιάζονται²⁴ πως έχουν το δυναμικό να μειώσουν τις απαιτήσεις για ψύξη 30-50%, για θέρμανση 20-40% και σε μια συγκεκριμένη προσομοίωση [Palazzo Gallenga Stuart (Perugia)] εξοικονομήθηκε ενέργεια έως και 60%. Στη δική μας περίπτωση δεν είναι δυνατή η επιλογή της γεωθερμικής αντλίας λόγω της ιδιαιτερότητας της τοποθεσίας του Μουσείου και των εργασιών που θα απαιτούνταν.

Σε διαφορετική υπόθεση²⁵, στο Technical Museum Nikola Tesla (Zagreb), [σημ. έγινε προσομοίωση της χρήσης αντλίας με το TRNSYS], υπήρξε εξοικονόμηση 48%. Σε συνδυασμό με τις αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική του μουσείου (έξτρα 24%) είναι φανερό ότι η ταυτόχρονη εφαρμογή πρακτικών, επιφέρει τη βέλτιστη δυνατή ενεργειακή αναβάθμιση, κάτι που θα σχολιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

«Άλλες πρακτικές ενεργειακής αναβάθμισης»

Όπως σχολιάσαμε προηγουμένως, η πιο αποτελεσματική προσέγγιση στην ενεργειακή αναβάθμιση ενός κτηρίου, παρουσιάζεται όταν συνδυαστούν αρμονικά, τεχνικά (παρεμβάσεις στο κτηριακό κέλυφος, υλικοτεχνική αναβάθμιση κτλ.) και μη τεχνικά μέτρα (αλλαγή στην ενεργειακή πολιτική, ορθή χρήση κτλ.). Έχει εξεταστεί³⁷ σε ποιο ποσοστό μπορεί να βελτιωθεί η ενεργειακή συμπεριφορά ενός ιστορικού κτηρίου χωρίς να αλλοιωθεί έντονα η ταυτότητα του, με ικανοποιητικά αποτελέσματα, η συχνότερη αναβάθμιση είναι στο 20%.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε σε μεθόδους που δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν στο έργο ενεργειακής αναβάθμισης του Μουσείου Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι λόγοι που συντρέχουν για αυτό μπορεί να οφείλονται στο ότι δε δύνανται να εφαρμοστούν προς το παρόν σε διατηρητέα κτήρια πολιτιστικής κληρονομιάς, δεν προβλέπεται να μπορούν να καλυφθούν από τον οικονομικό προϋπολογισμό ή οι μέθοδοι φεύγουν από τη σκοπιά αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Μια μέθοδος που έχει προταθεί²⁶ είναι το να γίνουν πιο ανεκτές οι παράμετροι άνεσης που έχουν οριστεί, όπως η θερμοκρασία να κυμαίνεται μεταξύ 20-23° C. Αυτό το όριο παρουσιάζει προβλήματα για το ενεργειακό σύστημα καθώς εκείνο προσπαθεί να το κρατήσει σταθερό, ανεξάρτητα τις εποχικές ή ημερήσιες διακυμάνσεις. Μια σταθερή θερμοκρασία 22° C, μπορεί να φαίνεται ότι δεν κάνει μεγάλη διαφορά, αλλά σε ετήσιο ορίζοντα, η συνεχής εναλλαγή έχει κόστος, και δεν επηρεάζεται η άνεση προσωπικού και επισκεπτών. Αντίστοιχη αλλαγή, για τις ώρες που δε λειτουργεί το κτήριο, όπου το σύστημα θέρμανσης και ψύξης είναι απενεργοποιημένο, και επέρχονται θερμικές αλλαγές στο εσωτερικό περιβάλλον του κτηρίου, είναι να οριστεί θερμοστάτης. Η πρόταση λέει πως μπορούμε να ορίσουμε θερμοκρασίες κατά τις ώρες (ή μέρες), διαφορετικές ανά μήνα, ώστε όταν ενεργοποιείται το σύστημα να φτάνουμε πιο γρήγορα και πιο οικονομικά στις επιθυμητές συνθήκες. Σημειώνεται πως η μελέτη αυτή έγινε στο Πανεπιστήμιο της Πάντοβα και ενδεικτικά οι προτεινόμενες θερμοκρασίες είναι 22°C (Δεκέμβριο-Φεβρουάριο), 21°C (Νοέμβριο & Μάρτιο), 20°C (Οκτώβριο & Απρίλιο) και 16°C τις Κυριακές (όπου είναι κλειστό). Για τους υπόλοιπους μήνες η θερμική άνεση του κοινού επιτυγχάνεται πιο εύκολα, και δεν ήταν απαραίτητο να αλλαχθεί ο θερμοστάτης.

Αλλαγές όπως οι προηγούμενες μπορούν να επιφέρουν σημαντικές μειώσεις στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός κτηρίου, αλλά είναι ανεπαρκείς αν το κέλυφος του είναι μέρος του προβλήματος. Στην περίπτωση του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών, γνωρίζουμε πως ισχύει αυτό, αλλά οι περιορισμοί ενός διατηρητέου κτηρίου δεν επιτρέπουν πολλές παρεμβάσεις. Επί παραδείγματι, η αεροστεγανότητα, η θερμομόνωση και η υγρασιμότητα έχουμε αναφέρει ήδη πόσο σημαντικές είναι για το μικροκλίμα ενός μουσείου. Η αντικατάσταση κουφωμάτων και η τοποθέτηση παραθύρων διπλής μεμβράνης και χαμηλότερης θερμοπερατότητας (2,1 W/m²K έναντι 3,043 W/m²K) , θα βελτίωνε άμεσα την ανταλλαγή αέρα, θερμότητας και υγρασίας του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ως λιγότερο επεμβατική μέθοδος, προτείνεται η τοποθέτηση περσίδων ή κάποιου άλλου μέσου ελέγχου σκίασης που να επιτρέπεται από τις διατάξεις για τα διατηρητέα. Στις περισσότερες έρευνες σε μουσειακά κτήρια ^{24,25}, η πολιτική αναβάθμισης κουφωμάτων-παραθύρων σε συνδυασμό με την αλλαγή/προσθήκη θερμικής μόνωσης σε τοίχους και οροφή, δείχνει πως οι ενεργειακές απαιτήσεις μειώνονται ως και 60%.¹ Δεν προτείνουμε βέβαια πως

αυτή η ποσοστιαία αλλαγή θα επιτευχθεί και στη δική μας περίπτωση, αλλά πρέπει να υπογραμμιστεί η σημασία των παρεμβάσεων και όταν η εφαρμογή τους συμβαδίζει με την προστασία της ταυτότητας του νεοκλασικού κτηρίου, να μπου σε προτεραιότητα.

Φωτοβολταϊκή ενέργεια

Το ιδανικότερο σενάριο θα ήταν να εφαρμοστούν όλες οι προηγούμενες αλλαγές, και να στραφούμε μερικώς ή ολικώς σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), ώστε το Μουσείο να μειώσει την εξάρτηση του από το ηλεκτρικό δίκτυο. Έχοντας ήδη μιλήσει για το ενδεχόμενο της γεωθερμικής αντλίας, στρεφόμαστε στην αιολική και την ηλιακή ενέργεια. Προφανώς η εκμετάλλευση της πρώτης είναι αδύνατη σε ένα νεοκλασικό κτήριο στο κέντρο της Αθήνας, οπότε θα εξετάσουμε την πιθανότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών κυττάρων (Photovoltaic cells, PV). Σύμφωνα με τις υπάρχουσες διατάξεις για τα διατηρητέα κτήρια απαγορεύονται οι παρεμβάσεις στο εξωτερικό τους που αλλοιώνουν τον χαρακτήρα τους και την αρχιτεκτονική τους.² Τα άλματα όμως σε αυτές τις τεχνολογίες είναι συνεχή και μεγάλα, οι νομοθεσίες αλλάζουν, οπότε αξίζει να εξετάσουμε, έστω βιβλιογραφικά, το ενδεχόμενο, στο εγγύς μέλλον, να εφαρμοστούν PV επιφάνειες, οι οποίες να είναι διάφανες ή να μην προκαλούν υψηλή αισθητική αλλοίωση.

Η τεχνολογία που μας ενδιαφέρει είναι εκείνη των Building-Integrated Photovoltaics (BIPV), δηλαδή των φωτοβολταϊκών που είναι ενσωματωμένα στο κτήριο, σαν δομικά στοιχεία πχ στην οροφή ή στους εξωτερικούς τοίχους. Είναι μια αγορά η οποία έχει έναν σαφή στόχο, να αφομοιωθούν οπτικά και λειτουργικά τα φωτοβολταϊκά κύτταρα σε κτήρια αστικού περιβάλλοντος. Οι χρήστες πρέπει να νιώθουν ότι είναι μια επένδυση η οποία θα έχει ελκυστική οικονομική επιστροφή, ώστε να ισοσταθμίζεται το κόστος. Ενδεικτικά, θα αναζητήσουμε ερευνητικά προγράμματα/έργα που έχουν λάβει τη στήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ώστε να διασφαλίζεται ότι πληρούνται επιστημονικές και δεοντολογικές προϋποθέσεις. Δύο από αυτά τα έργα ανήκουν στο πρόγραμμα HORIZON 2020, όπως και το project HAPPEN, του οποίου είναι μέρος και η έρευνα ενεργειακής αναβάθμισης του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών. Ενώ υπήρχαν πολυάριθμες επιλογές, φτάσαμε σε αυτές γιατί οι σκοποί των ερευνητικών projects συμπίπτουν με τους δικούς μας.

- Το PVSITES²⁸, έχει ως βασικό μέλημα τη χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών (πχ. **copper indium gallium selenide solar cells***), την παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα, την ποικιλία στον σχεδιασμό, την αισθητική αφομοίωση, τη μείωση του κόστους και τη χρήση σε δίκτυο. Χρησιμοποιούνται ήδη πιλοτικά σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, σε κτήρια διαφορετικής χρήσης, νέα ή ανακαινισμένα.
- Το PVadapt²⁷ συνδυάζει την προηγούμενη φιλοσοφία με τεχνολογίες όπως την ενσωματωμένη ανάκτηση θερμότητας με σωλήνες, τα ανακυκλωμένα υλικά και την ικανότητα να λειτουργήσει και να προσαρμοστεί με προβλεπτικό αλγόριθμο, στις ανάγκες του δικτύου και τα φορτία.

* *copper indium gallium selenide solar cell*: λεπτά εύκαμπτα φωτοβολταϊκά φιλμ, ημιαγώγιμο υλικό από χαλκό, ίνδιο, γάλλιο και σελήνιο

Θα εξετάσουμε όμως το πιο ειδικό σενάριο των BIPV, σε κτήρια όπως το Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα ηλιακά PV δεν έχουν πολλά κομμάτια, δεν παράγουν ρύπους ούτε θόρυβο, δεν απαιτούν συχνή και ακριβή συντήρηση, μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές επιφάνειες και το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα που παράγουν μπορεί να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο, όπως του δικτύου, ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες.²⁹

Τα χαρακτηριστικά τους δηλαδή, τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογή σε ιστορικά/πολιτιστικής κληρονομιάς κτήρια. Τα μειονεκτήματά τους είναι η ακριβή εφαρμογή, η μικρή απόδοση ανά τετραγωνικό μέτρο και η οπτική όχληση. Η αντοχή τους είναι μεγάλη (>20 έτη), συνεπώς γίνεται απόσβεση του κόστους τοποθέτησης πολύ νωρίτερα, ανάλογα τον τύπο. Τα τελευταία χρόνια έχουν ανεβεί οι δείκτες απόδοσης και ο στόχος μέχρι το 2030 είναι να φτάσουν κοντά στο 25%, ανεξαρτήτως υλικού κατασκευής.³⁰ Το μεγαλύτερο πρόβλημα για την έντονη εμφάνισή τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τους δείκτες απόδοσης. Το σκούρο υλικό έχει επιλεγεί ώστε να έχουμε όσο λιγότερη δυνατή αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, συνεπώς περισσότερη ηλεκτρική παραγωγή. Και σε αυτό τον τομέα γίνονται πολλές υποσχόμενες προσπάθειες με ειδικά υλικά ή αντανάκλαστικές επιστρώσεις. Ακόμα κι η εφαρμογή τους σε οροφές ή παράθυρα, χωρίς να δημιουργείται οπτική αλλοίωση ενός ιστορικού κτηρίου, έχει φέρει αποτέλεσμα. Λόγω των διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε κάθε εφαρμογή, έχουμε διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης. Ενδεικτικά:³¹

Πίνακας 5-1: Η απόδοση των φωτοβολταϊκών ανά σημείο εφαρμογής και η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο σε ένα έτος.

Σημείο εφαρμογής	Απόδοση	Παραγωγή (kW/m ² /έτος)
Οροφές	22%	317
Ταράτσες	22%	274
Τοίχοι	16-22%	149-204
Επίστρωση παραθύρων	3,4%	3,6 kWh/kWp*day

Wp: Watt-peak, η μέγιστη ισχύς ενός PV

Η φωτοβολταϊκή αποδοτικότητα των οροφών και των προσόψεων κτηρίων στην Ευρώπη έχει υπολογιστεί ότι μπορεί να φτάσει το 1 TWP μέχρι το 2030.³¹ Χώρες όπως η Ιταλία, μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 40% της ετήσιας ηλεκτρικής τους κατανάλωσης, χρησιμοποιώντας BIPV.^{32,33,34} Εκεί έχουμε αρκετά δείγματα εφαρμογών σε διατηρητέα, καθώς και η Ιταλία διαθέτει μεγάλο ιστορικό κτηριακό δυναμικό. Παρομοίως και σε άλλες ευρωπαϊκές περιοχές, αλλά κάθε κράτος έχει την δική του πολιτική προστασίας της πολιτισμικής του κληρονομιάς, οπότε δεν μπορούμε να αντιγράψουμε τις λύσεις παρά να εμπνευστούμε. Όπως το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα 3EnCult²⁴, το οποίο έδειξε πόσο σημαντική είναι η συνεργασία με την τοπική αυτοδιοίκηση, χρησιμοποιώντας γειτονικά κτήρια και εγκαταστάσεις και τοποθετώντας σε αυτά τον απαραίτητο εξοπλισμό. Η εκμετάλλευση επιφανειών που δεν είναι σε οπτική επαφή με το κοινό, (όπισθεν όψη, πλαϊνοί τοίχοι) έδωσαν λύση σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, καθώς και η εφαρμογή τεχνολογιών που αναφέραμε προηγουμένως, όπως «κρυφά» BIPV σε κεραμίδια και γυάλινες επιφάνειες.^{24,36,37} Μπορεί να αναφέραμε ότι τα διάφανα και λεπτά PV έχουν χαμηλό δείκτη απόδοσης, αλλά έχουν αντοχή στον χρόνο και σχεδόν μηδενικό κόστος συντήρησης.³¹ Η τοποθέτησή τους και η εφαρμογή τους, βάζει έναν ακόμη λίθο στο έργο της ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτηρίου.

Στο Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών δεν είναι δυνατόν να εκτελέσουμε κατατοπιστική προσομοίωση με τα λίγα στοιχεία που έχουμε στη διάθεσή μας. Η θέση του κτηρίου είναι η μόνη σταθερά που έχουμε σε αυτό το σενάριο, αλλά δεν γνωρίζουμε ούτε σε ποιο σημείο του θα μπορούσαν να τοποθετηθούν, ούτε τον αριθμό και τον τύπο τους, συνεπώς τον συντελεστή απόδοσής τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

«Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων»

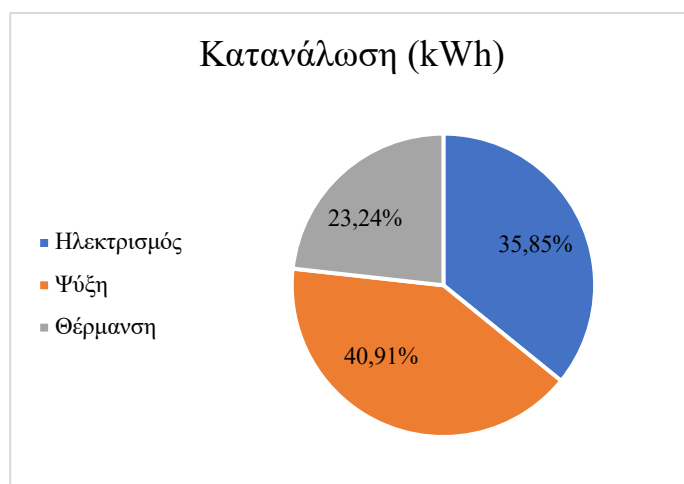
Στο παρόν έργο, τα δύο υποψήφια σενάρια είναι η αναβάθμιση του συστήματος ψύξης/θέρμανσης είτε με νέα κλιματιστικά είτε με τοποθέτηση αντλίας θερμότητας. Προφανώς, η συντήρηση του κτηριακού κελύφους είναι δεδομένη και πραγματοποιείται κατά περιόδους (ανανέωση στρώματος βαφής εσωτερικά κι εξωτερικά του μουσείου, αφαίρεση επιτοίχιας υγρασίας κτλ.). Σε αυτό το πλαίσιο δεν μπορούμε να παρέμβουμε, οι παρεμβάσεις που θα επιλύσουν αυτά τα προβλήματα δεν επιτρέπονται προς το παρόν για την προστασία της πολιτισμικής ταυτότητας του Μουσείου. Η υγρασία στο εσωτερικό κάποιων τοίχων οφείλεται στην ελλιπή μόνωση, κι εμείς στα σενάρια μας εξετάσαμε μόνο την ατμοσφαιρική σχετική υγρασία (RH). Σε κανένα από τα δύο δεν παρουσιάστηκε πρόβλημα με την τιμή της, που να οφείλεται στην ροή αέρα και είναι εντός ορίων άνεσης για κοινό και εκθέματα, (37,9% τον χειμώνα , 45,38% το καλοκαίρι). Η αναβάθμιση του ηλεκτρικού εξοπλισμού και η στροφή σε τεχνολογίες πιο φιλικές προς το περιβάλλον είναι δεδομένες και στις δύο περιπτώσεις, οπότε θα σχολιάσουμε ξεχωριστά. Επιπλέον, σαν αρχική κατάσταση θα χρησιμοποιήσουμε διαφορετική από τον Johannes, θεωρούμε και το ισόγειο ως θερμική ζώνη που συμμετέχει στο σύστημα θέρμανσης-ψύξης (conditioned thermal zone), κι ας μην έχει κλιματιστικά σώματα. Το αναφέρουμε απλά ως τρόπο προσέγγισης και δεν την παρουσιάζουμε ως σωστότερη μέθοδο από του Johannes.

Αρχική κατάσταση (Current State)

Δεν έχουμε αλλάξει τίποτα από τα δεδομένα που λάβαμε για το κτήριο. Στα στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε έχουμε αναφερθεί ήδη στο κεφάλαιο περιγραφής του Μουσείου. Συμπεριλάβαμε το ισόγειο στις θερμικές ζώνες. Για τον υπολογισμό των αέριων ρύπων CO₂, χρησιμοποιήσαμε τον συντελεστή που έχει δώσει στη δημοσιότητα η Δ.Ε.Η, 0,989 kg ρύποι ανά kWh.

Πίνακας 6-1: Τα στοιχεία που προέκυψαν από την προσομοίωση. Η κατανάλωση είναι ανά χρήση και ανά τετραγωνικά επιφάνειας.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Ολική [kWh]	kWh/m ²	CO ₂ (kg)
Κατανάλωση	23396,10	26696,62	15168,45	65261,17	68,2748	64543,29713



Γράφημα 6-1: Ο ποσοστιαίος καταμερισμός κάθε χρήσης επί της συνολικής κατανάλωσης.

Αλλαγή λαμπτήρων σε LED

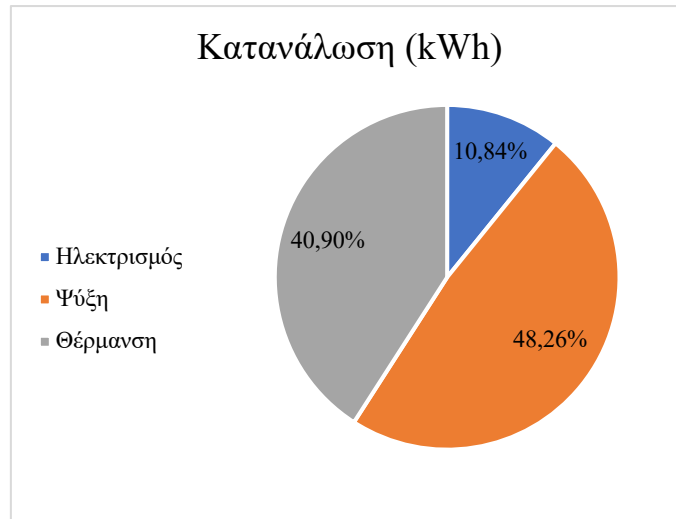
Πίνακας 6-2: Μετά την αλλαγή των λαμπτήρων, ο προηγούμενος πίνακας παίρνει την ακόλουθη μορφή.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Ολική [kWh]	kWh/m ²	CO ₂ (kg)
Κατανάλωση	4437,16	19763,25	16750,94	40951,35	42,842	40500,88515

Πίνακας 6-3: Η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την πρώτη αλλαγή.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
37,25	24042,41198

Παρατηρούμε σημαντική διαφορά με τόσο απλή αλλαγή. Η θερμική συμπεριφορά των λαμπτήρων έχει σχολιαστεί εκτενώς, και είναι εμφανής η προσφορά στο θερμικό ισοζύγιο καθώς επηρεάστηκε η κατανάλωση ρεύματος και για την ψύξη και για τη θέρμανση. Πρόκειται για την πιο «αναίμακτη» επέμβαση και είναι απαραίτητη για κάθε κτήριο, όχι μόνο για το Μουσείο.



Γράφημα 6-2: Σε αυτή τη γραφική απεικόνιση της ποσοστιαίας διαίρεσης των χρήσεων, φαίνεται έντονα η αλλαγή από την αρχική κατάσταση.

Ειδικά στην ψύξη βλέπουμε μείωση 26%, κάτι που μας δείχνει το πρόβλημα που προκαλούσαν οι συμβατικοί λαμπτήρες (επιπλέον αύξηση 10,4% στην θέρμανση). Συνυπολογίζοντας και τη μείωση 81% στην κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών, η συνολική εξοικονόμηση 37,25% στις kWh και 24 τόνων CO₂ είναι παραπάνω από ικανοποιητική.

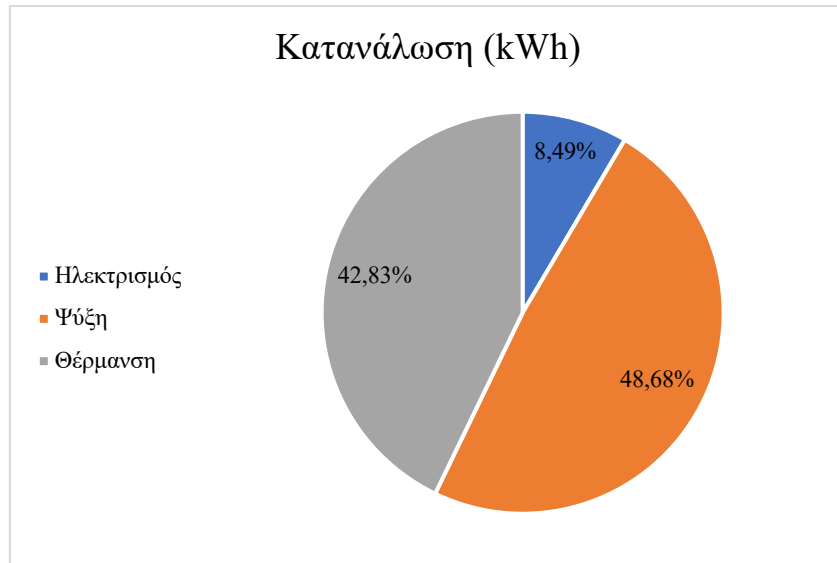
Αναβάθμιση εξοπλισμού γραφείων

Πίνακας 6-4: Η ηλεκτρική κατανάλωση ανά χρήση, κι ανά επιφάνεια.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Ολική [kWh]	kWh/m ²	CO ₂ (kg)
Κατανάλωση	3399,76	19485,82	17145,59	40031,17	41,879	39590,82713

Πίνακας 6-5: Η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και της εκπομπής ρύπων.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
38,66	24952,47



Γράφημα 6-3: Η γραφική απεικόνιση του τρόπου που μοιράζονται οι διαφορετικές χρήσεις κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά και αλλαγή στη συμπεριφορά του συστήματος με την προηγούμενη αλλαγή. Η ενεργειακή αναβάθμιση ήταν περιορισμένη αφού αλλάξαμε μόνο οθόνες υπολογιστών και την κατανάλωση των εκτυπωτών. Η αναβάθμιση τέτοιου τύπου εξοπλισμού συνήθως έρχεται σε δεύτερη μοίρα, και εξαρτάται από τις προθέσεις των αρχών του μουσείου. Προτεραιότητα έχει η αναβάθμιση του συστήματος ψύξης, θέρμανσης και εξαερισμού (HVAC). Αυτό θα το πετύχουμε είτε με εκσυγχρονισμό των κλιματιστικών, με νέα, απόδοσης A+, είτε με τοποθέτηση αντλίας θερμότητας στο κτήριο. Έχουμε ήδη συζητήσει για το κάθε σύστημα, οπότε θα σχολιάσουμε μόνο ότι έχει σχέση με το παρόν έργο.

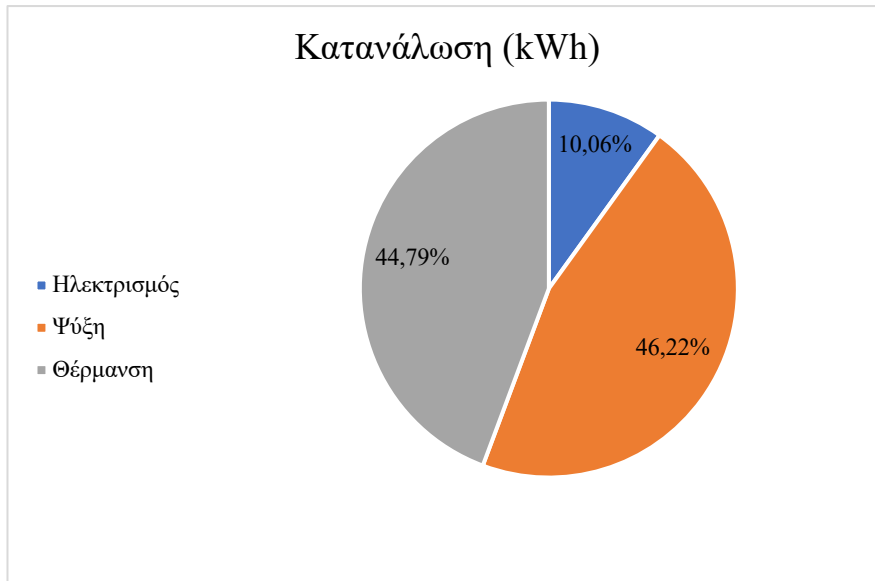
Αναβάθμιση κλιματιστικών

Πίνακας 6-6: Η ηλεκτρική ενέργεια ανά χρήση, μετά την αλλαγή των κλιματιστικών.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Ολική [kWh]	kWh/m ²	CO ₂ (kg)
Κατανάλωση	3399,76	15263,94	15139,09	33802,79	35,3637612411859	33430,95931

Πίνακας 6-7: Η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την αλλαγή του κλιματιστικού συστήματος.

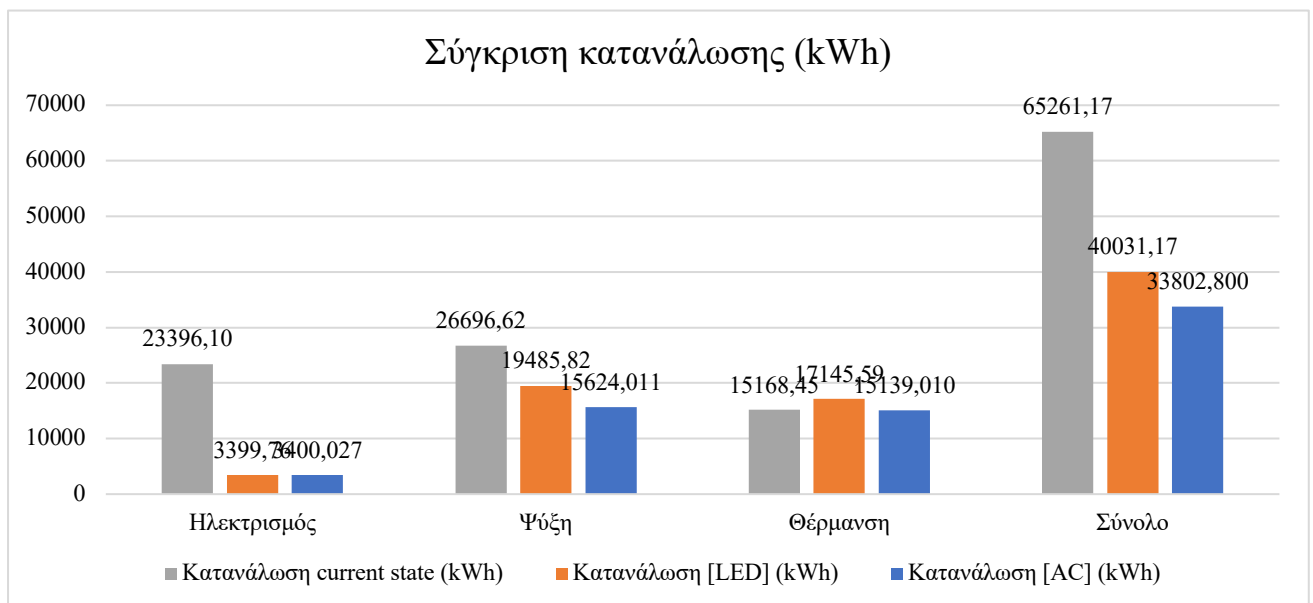
% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
48,2038247245644	31112,33782



Γράφημα 6-4: Η γραφική απεικόνιση του καταμερισμού της ενεργειακής κατανάλωσης κάνει ακόμα πιο εμφανή την αναβάθμιση από την αρχική κατάσταση.

Στις υπάρχουσες θερμικές ζώνες, αλλάξαμε τα στοιχεία χρήσης τους με πιο αποδοτικά, σύμφωνα με κλιματιστικά που βρήκαμε στο εμπόριο, ενεργειακής απόδοσης A+. Υπενθυμίζουμε ότι στην υπόθεση που έχει γίνει από τον Johannes, το σύστημα αυτό είναι ιδανικό, και σύμφωνα με την περιγραφή του EnergyPlus, αναμιγνύει τον αέρα της ζώνης με αυτόν που έχουμε δηλώσει ότι λειτουργεί το μηχάνημα, και αφαιρεί ή προσθέτει υγρασία και θερμότητα με 100% αποδοτικότητα για να φτάσει στις ζητούμενες συνθήκες. Εφόσον συγκρίνουμε με το current state θα κρατήσουμε την ίδια μέθοδο προσέγγισης του συστήματος.

Συγκρίνουμε τις προτεινόμενες παρεμβάσεις.



Γράφημα 6-5: Συγκρίνουμε γραφικά την ενέργεια, ανά χρήση και συνολικά, στα δύο σενάρια αναβάθμισης με την αρχική κατάσταση.

Την αναβάθμιση των λαμπτήρων και του εξοπλισμού γραφείου τα θεωρούμε ένα σενάριο ([LED]), η διαφορά είναι μικρή μεταξύ τους, οπότε τα συγχωνεύσαμε.

Η ενεργειακή αναβάθμιση του μουσείου επιτεύχθηκε με **48,2%** λιγότερη ηλεκτρική κατανάλωση και μείωση των εκπομπών ρύπων CO₂ κατά **31 τόνους**. Οι, βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης, μονάδες κλιματισμού φαίνεται πως έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτηρίου. Δεν είναι μόνο οι συντελεστές απόδοσης τους υπεύθυνοι για αυτό, αλλά και οι αυξημένες ικανότητες ανάμιξης του ατμοσφαιρικού αέρα του κτηρίου. Οι ανεμιστήρες κάθε μονάδας βοηθούν στην σωστή ανάμιξη, και έχουν επιλεχθεί να είναι οι ίδιοι με τους προηγούμενους, λόγω απουσίας στοιχείων. Παρουσιάζεται το ίδιο πρόβλημα με τις αντλίες θερμότητας και τα δεδομένα των κατασκευαστών, δεν ανταποκρίνεται η ονομαστική αξία με την καταγεγραμμένη. Δεν ήταν δυνατή η διόρθωση με συντελεστές σε αυτή την περίπτωση και αρκούμαστε στις τιμές που πήραμε από τον κατασκευαστή ή έχει ορίσει εξ αρχής ο Johannes.

Όσο βελτιώνεται το σύστημα ανάμιξης και κυκλοφορίας του αέρα ανάμεσα στις θερμικές ζώνες, τόσο βελτιώνεται η συμπεριφορά του θερμικού ισοζυγίου, και συνεπώς και του συστήματος HVAC.

Ο καταμερισμός της ενέργειας ανά χρήση φαίνεται σχεδόν σταθερός μετά την πρώτη παρέμβαση. Αλλάζοντας τις ηλεκτρικές συσκευές, «μοιράστηκε» η κατανάλωση τους σε θέρμανση και ψύξη, και επηρεάστηκε το θερμικό ισοζύγιο. Σε ετήσια βάση, οι θερμικές απολαβές τους, όπως και των επισκεπτών και του προσωπικού, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο όσο ασήμαντες και να φαίνονται. Η πρόκληση είναι να παραμένουν σταθερές οι κτηριακές απαιτήσεις σε βάθος χρόνου, ώστε αν παρατηρηθεί διακύμανση να επεμβαίνουμε όπου απαιτείται και να επαναφέρουμε την ενεργειακή «ταυτότητα» του κτηρίου.

Τοποθέτηση αντλίας θερμότητας

Έχουμε προχωρήσει με τη διόρθωση της προσομοίωσης της αντλίας στο EnergyPlus, αλλάζοντας τους συντελεστές στην καμπύλη απόδοσης

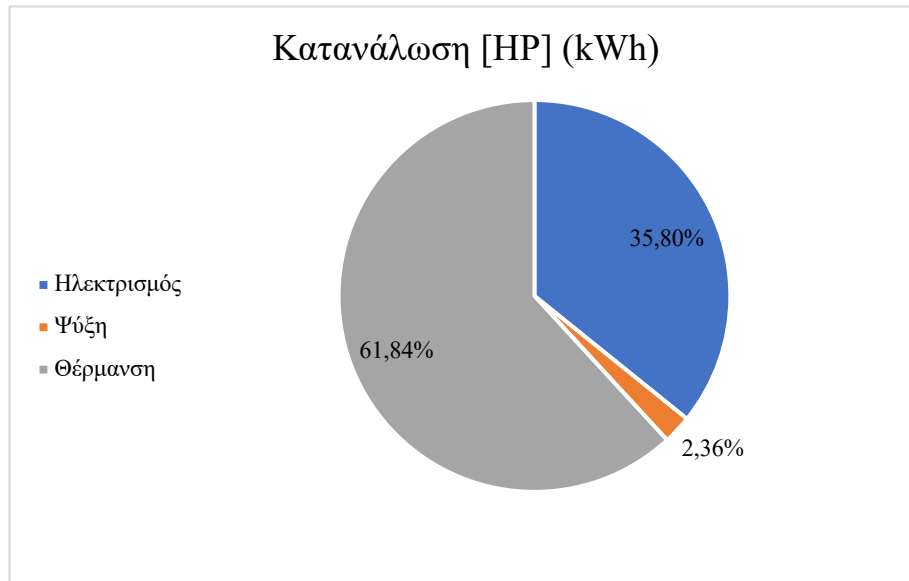
Πίνακας 6-8: Η προσομοίωση με τη "διορθωμένη" αντλία θερμότητας έχει την ακόλουθη ηλεκτρική κατανάλωση.

	Ηλεκτρισμός [kWh]	Ψύξη [kWh]	Θέρμανση [kWh]	Ολική [kWh]	kWh/m ²	CO ₂ (kg)
Κατανάλωση	16577,17	1093,96	28638,69	46309,82	48,4483	45800,41198

Πίνακας 6-9: Η ενεργειακή αναβάθμιση μετά την τοποθέτηση αντλίας θερμότητας.

% μείωση kWh	Μείωση CO ₂ (kg)
29,0392433969541	18742,88515

Διαχωρίσαμε την ψύξη και την θέρμανση, οι οποίες συμπεριλαμβάνοντουσαν στην ηλεκτρική κατανάλωση , λόγω του τρόπου λειτουργίας της αντλίας στο πρόγραμμα



Γράφημα 6-6: Στο διάγραμμα φαίνεται και σχηματικά η σημαντική διαφορά του τρόπου που λειτουργεί το σύστημα μετά την τοποθέτηση αντλίας θερμότητας.

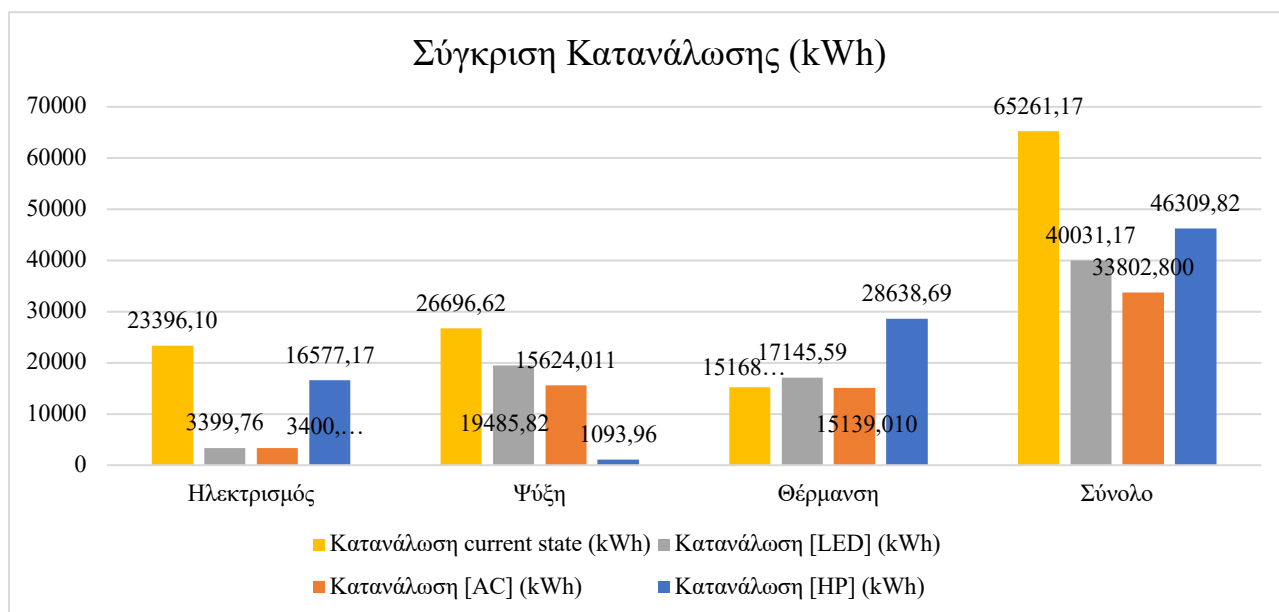
Η παρέμβαση αυτή φέρνει νέες προκλήσεις καθώς εισάγει νέες μεταβλητές και θα δούμε με ποιον τρόπο αλλάζει η θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά του Μουσείου. Για τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντλίας έχουμε τοποθετηθεί ήδη, και θα σχολιάσουμε ποια εμφανίζονται στη δική μας εγκατάσταση και θα τη συγκρίνουμε με την προηγούμενη.

Η σημαντικότερη διαφορά των δύο προσομοιώσεων, πριν καν δούμε τους αριθμούς, είναι ότι στο σενάριο τοποθέτησης της αντλίας συμπεριλαμβάνεται και το ισόγειο. Αυτή η συνολική επιφάνεια 136,27m² και η τοποθέτηση διαφορετικού συστήματος θέρμανσης-ψύξης-εξαερισμού, αλλάζουν κατά κόρον το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Αρχίζουμε με τη γενική εικόνα (σύγκριση με current state) και θα δούμε στη συνέχεια πως συγκρίνεται με το προηγούμενο σενάριο. Παρατηρούμε πως επιτεύχθηκε ενεργειακή εξοικονόμηση με **29% μείωση** της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης και των εκπομπών εναέριων ρύπων CO₂ κατά **18,7 τόνους**, άρα αξίζει να εξεταστεί η περίπτωση της αντλίας. Ο καταμερισμός της ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρήση έχει αλλάξει δραματικά, από μια σχεδόν εξίσου μοιρασμένη κατάσταση πήγαμε σε μία όπου κυριαρχεί η θέρμανση και η κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών και η ψύξη να κατέχει ένα ελάχιστο ποσοστό. Αυτό οφείλεται σε δύο αιτίες, στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος και στον τρόπο που λειτουργεί η προσομοίωση. Στη γενική χρήση ηλεκτρισμού περιέχεται η κατανάλωση που απαιτούν οι ανεμιστήρες και συνολικά το σύστημα εξαερισμού. Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο της αντλίας, έχει γίνει αυτόματος υπολογισμός κάποιων παραμέτρων, κυρίως ροής αέρα (ανά ζώνη ή ανά ανεμιστήρα) ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Γι' αυτό το λόγο σημειώνεται μικρή κατανάλωση για την ψύξη του Μουσείου και τόσο αυξημένη στη θέρμανση, γεγονός που δείχνει πόσο σημαντική είναι η συνεισφορά της ροής και της ανάμιξης του αέρα στο θερμικό ισοζύγιο.

Επιπλέον, όπως προαναφερθήκαμε, όσο καλύτερη γνώση έχουμε για τα χαρακτηριστικά της μηχανής, είτε πρόκειται για αντλία θερμότητας είτε κλιματιστικό, μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη προσομοίωση και συνεπώς να μπορούμε να προβλέψουμε και να σχεδιάσουμε τις αποδοτικότερες παρεμβάσεις σε οποιοδήποτε κτηριακό περιβάλλον.

Σύγκριση των HVAC συστημάτων



Γράφημα 6-7: Γραφική απεικόνιση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε σενάριο. Βοηθάει να τονιστεί η διαφορά μεταξύ των παρεμβάσεων.

Παρατηρούμε και γραφικά τη διαφορά μεταξύ της αρχικής κατάστασης και κάθε πιθανής παρέμβασης, κυρίως στα συστήματα ψύξης-θέρμανσης-εξαερισμού. Η σημασία μιας σωστής προσομοίωσης είναι εμφανής, για να μπορούμε να «προβλέψουμε» τα θερμικά φορτία στο σύστημα, τον τρόπο που θα τα εξισορροπήσουμε και το πόσο αποτελεσματικός είναι. Κάθε κτήριο είναι ένα πολύπλοκο σύστημα με πολλές μεταβλητές, είτε στο κέλυφος του είτε στα περιεχόμενα του, και απαιτείται μελέτη για την επιλογή τους και όπου δεν είναι δυνατή, να γίνονται παραδοχές μέσα στα φυσικά όρια λειτουργίας. Συζητήσαμε ήδη για τις παραδοχές που κάναμε στο κάθε σύστημα και πως θα μπορούσαν να βελτιωθούν οι προσεγγίσεις μας, και κατά συνέπεια οι προσομοιώσεις μας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αποδεχόμαστε την εγκυρότητα των μετρήσεων μας και προχωράμε σε μια άμεση σύγκριση.

Η διαφορά στη συνολική κατανάλωσης ενέργειας είναι προφανής, κι όπως τοποθετηθήκαμε πριν, είναι προϊόν του νέου ορόφου και πιθανώς του τρόπου προσομοίωσης μιας αντλίας θερμότητας κι ενός ιδανικού συστήματος ανταλλαγής αέρα, στο EnergyPlus. Λόγω της προσθήκης της θερμικής ζώνης του ισογείου, θα συγκρίνουμε την ηλεκτρική κατανάλωση κάθε σεναρίου ανά τετραγωνικό μέτρο επιφανείας του Μουσείου, συνολικής (total [955,86m²]) ή θερμαινόμενης/ψυχόμενης από σύστημα (conditioned area).

AC

Πίνακας 6-10: Η ενέργεια που καταναλώνει συνολικά το σύστημα, διαιρεμένη με τη συνολική επιφάνεια και στη συνέχεια με την επιφάνεια όπου καλύπτει το σύστημα των κλιματιστικών.

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m ²]
Total Site Energy	33802,79	35,36	83,48

HP

Πίνακας 6-11: Αφού τοποθετηθεί αντλία θερμότητας, κάνουμε την αναλογία με το πόση ενέργεια καταναλώνεται ανά συνολική ή καλυπτόμενη επιφάνεια.

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m ²]
Total Site Energy	46309,82	48,45	85,57

Είναι εμφανές ότι παρά τη μεγάλη διαφορά (το AC χρησιμοποιεί το 73% της ενέργειας του HP), όταν συγκρίνουμε με την επιφάνεια που καλύπτει το κάθε σύστημα στο εκάστοτε σενάριο η διαφορά είναι πολύ μικρότερη ($\frac{AC}{HP} = 97,5\%$). Άρα η αντλία θερμότητας εκτελεί το έργο της, πολύ πιο αποτελεσματικά ανά επιφάνεια.

Για να πετύχουμε μια πιο ενδεικτική σύγκριση, θα στραφούμε σε δύο σενάρια για να φανεί ακόμα πιο έντονα αυτό το γεγονός: στο πρώτο έχει τοποθετηθεί κλιματιστικό και στο ισόγειο και στο δεύτερο δεν έχει τοποθετηθεί αντλία εκεί.

AC με ισόγειο

Πίνακας 6-12: Η ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας, αλλάζει σημαντικά όταν τοποθετήσουμε κλιματιστικό στο ισόγειο.

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m ²]
Total Site Energy	39838,84	41,68	73,61

HP χωρίς ισόγειο

Πίνακας 6-13: Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, και συνολικά αλλά και ανά επιφάνεια, μειώνεται θεαματικά αν δεν καλυφθεί το ισόγειο από την αντλία θερμότητας.

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m ²]
Total Site Energy	15994,28	16,73	39,50

Η διαφορά ανά τετραγωνικό είναι τεράστια, και φαίνεται πόσο αποδίδει η αντλία θερμότητας σε ένα κτήριο με καλή ροή αέρα. Το ισόγειο είναι μια απομονωμένη θερμική ζώνη, με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, κάτι που προκαλεί ανισορροπίες στο σύστημα (έλλειψη αεροστεγανότητας, θερμικές γέφυρες, ελλειψή ανάμιξη αέρα).

Η ροή αέρα ανάμεσα στις ζώνες του πρώτου και του δευτέρου ορόφου, επιτρέπει να επιτυγχάνονται πιο εύκολα οι συνθήκες που έχουμε ορίσει. Ειδικά σε ένα HVAC σύστημα όπως η αντλία θερμότητας όπου η ροή αέρα είναι κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου λειτουργίας της.

Για να υπογραμμιστεί η σημασία των συντελεστών διόρθωσης στην προσομοίωση της λειτουργίας της αντλίας, είχαμε υπολογίσει τη διαφορά από την προσομοίωση χωρίς αυτούς. Όπως σχολιάσαμε ήδη, ειδικά στο σενάριο χωρίς το ισόγειο, η διαφορά είναι 69,3%, κάτι που δείχνει πόσο σημαντική ήταν η διόρθωση για ένα σύστημα με συνθήκες ανάμιξης αέρα όπως τους δύο ορόφους του Μουσείου. Όταν προστίθεται μια απομονωμένη θερμική ζώνη, το σύστημα καταναλώνει παραπάνω ενέργεια για φέρει τη θερμική ισορροπία που έχουμε επιβάλει. Το γεγονός αυτό, πρέπει να είναι αφορμή για αλλαγές και στο κέλυφος του κτηρίου αν θέλουμε να πετύχουμε πιο σημαντική ενεργειακή αναβάθμιση. Όσο και να ανανεώνουμε υλικοτεχνικά τον εξοπλισμό του, η ενεργειακή του συμπεριφορά και «ταυτότητα» υπαγορεύεται από τα γεωγραφικά και δομικά χαρακτηριστικά του.

Τέλος, συνοψίζουμε τη σύγκριση των περιπτώσεων της ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο

Ανά συνολική επιφάνεια (955,86 m²)

Πίνακας 6-14: Ο λόγος της συνολικής ενέργειας προς τη συνολική επιφάνεια, στην αρχική κατάσταση και σε κάθε περίπτωση ενεργειακής αναβάθμισης.

Σενάριο	Current State	Αναβάθμιση AC	Τοποθέτηση HP
kWh/m ²	68,2748	35,3637	48,4483

Ανά καλυπτόμενη από σύστημα επιφάνεια

Πίνακας 6-15: Υπολογίζουμε το λόγο της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης κάθε HVAC συστήματος με την επιφάνεια που καλύπτεται από αυτό.

Σενάριο	Current State (404,92m ²)	Αναβάθμιση AC (404,92m ²)	Τοποθέτηση HP (541,19m ²)
kWh/m ²	120,59	83,48	85,57

Φαίνεται η αποτελεσματικότητα του κάθε συστήματος ανά επιφάνεια, και ειδικότερα για την αντλία θερμότητας, είναι ξεκάθαρο ότι η διαφορά 2,09 kWh/m² ενώ καλύπτονται 136,27 m² παραπάνω, την καθιστά προτιμητέα επιλογή για να επιφέρει άνεση στο κοινό και στους υπαλλήλους του Μουσείου του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να εξετάσουμε κατά πόσο είναι δυνατή η εφαρμογή τεχνικών, παρεμβάσεων και μεθόδων ενεργειακής αναβάθμισης σε ένα νεοκλασικό κτήριο χαρακτηρισμένο ως κτήριο πολιτιστικής κληρονομιάς. Το Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών, λόγω του χαρακτήρα της χρήσης του, διέπεται κι από επιπλέον κανόνες που καθιστούν ακόμα πιο απαιτητική την περίπτωση της αναβάθμισης του. Αρχίσαμε με συντηρητικές επεμβάσεις, όπως την αλλαγή λαμπτήρων και εξοπλισμού, και καταλήξαμε σε μια επένδυση που θα έχει οικονομική απόσβεση μετά από χρόνια, λόγω του κόστους τοποθέτησης, την αντλία θερμότητας. Συνεπώς, η οικονομική συνιστώσα της ενεργειακής αναβάθμισης εξαρτάται από τον προϋπολογισμό κι από τον χρονικό ορίζοντα των αποτελεσμάτων. Δυστυχώς, όταν το έργο είναι κομμάτι ευρύτερου σχεδίου, όπως στην περίπτωση του Μουσείου (project HAPPEN), πρέπει να συνυπολογιστούν οι κανονισμοί, τα όρια και οι δυνατότητες του, μαζί με τους περιορισμούς λόγω της ταυτότητας του οποιουδήποτε κτηρίου.

Είναι εμφανές πως υπάρχει λύση στο πρόβλημα της ενεργειακής αναβάθμισης κτηρίων πολιτιστικής κληρονομιάς. Με τη βοήθεια προσομοιώσεων, κατασκευάσαμε ένα μοντέλο της παρούσας κατάστασης του μουσείου, και πάνω σε αυτή, δοκιμάζοντας διάφορες παρεμβάσεις, είδαμε τον αντίκτυπο της καθεμίας και τη συμμετοχή της στο σύνολο της ενεργειακής αναβάθμισης. Προφανώς ένα κτήριο με τόσους περιορισμούς δεν θα μπορέσει να γίνει τελείως ενεργειακά αυτόνομο (zero energy building). Παρ' όλα αυτά, χωρίς να επέμβουμε όσο θα έπρεπε στο Μουσείο, πετύχαμε εξοικονόμηση πόρων και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτηρίου. Κινηθήκαμε όπως θα έπρεπε κάθε πολίτης, ανεξαρτήτως επιστημονικού υποβάθρου, με απλές αλλαγές στον εξοπλισμό, και αναβαθμίζοντας το σύστημα θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού οι προτάσεις μας επιφέρουν ενεργειακή μείωση της τάξης του **29%** και ελάττωση των εκπομπών αέριων ρύπων CO₂ κατά **18,7 τόνους**. Είναι βέβαιο πως αν συνδυαστούν με αλλαγές στην ενεργειακή πολιτική εργαζομένων και επισκεπτών θα σημειωθεί ακόμα μεγαλύτερη μείωση.²⁵ Δυστυχώς, με το παρόν νομικό πλαίσιο, δεν μπορούμε να τη θεωρήσουμε δεδομένη, αλλά είναι πιθανό η Πολιτεία, να αναθεωρήσει τους κανόνες που διέπουν τα διατηρητέα κτήρια (και τα μουσεία). Συνεπώς, θα μπορέσουμε να εφαρμόσουμε κι άλλα μέτρα, και να βελτιώσουμε την ενεργειακή συμπεριφορά του Μουσείου χωρίς να αλλοιωθεί η ταυτότητα του ως μνημείο πολιτιστικής κληρονομιάς. Πέρα από τα μέτρα που αφορούν στη συμπεριφορά και την άνεση του ανθρώπινου δυναμικού, εξετάσαμε σε βιβλιογραφικό επίπεδο κάποιες μεθόδους εκμετάλλευσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Δυστυχώς η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια είναι απαγορευτικές λόγω της θέσης του κτηρίου, αλλά η φωτοβολταϊκή όπως είδαμε, έχει υποσχόμενες εφαρμογές και λύσεις (BIPV). Όμως, ακόμα και για την τοποθέτησή τους σε μη ορατά σημεία, έχουμε απαγορευτικά μέτρα που δυσκολεύουν οποιαδήποτε προσπάθεια αναβάθμισης.

Σε καμία περίπτωση δεν υποστηρίζουμε πως αυτά τα μέτρα δεν είναι σημαντικά. Είναι αναγκαία για να διατηρήσουν την ιστορία και τον πολιτισμό μας σαν έθνος. Χρειάζονται όμως τακτικές αναθεωρήσεις που ακολουθούν τις επιστημονικές εξελίξεις, ή πιο γενικά, για το τι ορίζεται ως αλλοίωση του χαρακτήρα ενός διατηρητέου κτηρίου. Στην ίδια λογική, πρέπει να αλλάξει η χρηστικότητα τέτοιων κτηρίων ώστε να αφομοιωθούν και να μην μείνουν ανεκμετάλλευτα και ξεχασμένα στην ιστορία τους. Με τη βοήθεια του προγράμματος HAPPEN, ιστορικά κτήρια από διάφορες χώρες της Μεσογείου έχουν την ευκαιρία να αναβαθμιστούν και να προβληθούν στη συνείδηση του κόσμου. Ελπίζουμε πως η παρούσα εργασία θα βοηθήσει ώστε να επιτευχθεί αυτό και στο Μουσείο του Πανεπιστημίου Αθηνών, και να το φέρει πιο κοντά στην Αθήνα του 21^{ου} αιώνα και τους κατοίκους της.

Βιβλιογραφία

1. Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review, Antonio Martínez-Molina, Isabel Tort-Ausina, Soolyeon Cho, José-Luis Vivancos, 2016
2. Τεχνικές Οδηγίες Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 , Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2017
3. Refurbishment and energy efficiency of Cultural Heritage Buildings, Johannes Steinbeisser, 2019
4. 2019, Ενεργειακή αναβάθμιση Κτηρίων Πολιτιστικής Κληρονομιάς, Horizontal Training Module, Living Lab 1, Παναγιώτης Τασιός
5. Zannis G. et al., *Energy efficiency in retrofitted and new museum buildings in Europe*, 2006
6. Tombazis A. N. et al., *Design and energy performance of the archaeological museum of Delphi*, 2006
7. <http://www.historymuseum.uoa.gr>
8. <https://ypen.gov.gr/chorikos-schediasmos/ktiria/diatiritea/>
9. Εγκυκλοπαίδεια έγχρωμη «ΔΟΜΗ», Όλες οι γνώσεις για όλους, 1975, Εκδόσεις «ΔΟΜΗ» Αθήναι
10. <https://www.energy.gov/energysaver/save-electricity-and-fuel/lighting-choices-save-you-money/led-lighting>
11. 2017, *Dariusz Suszanowicz*, Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems, University of Opole, Faculty of Natural Sciences and Technology, ul. R. Dmowskiego 7-9, 45-365 Opole, Poland
12. R. Zmeureanu, C. Peragine, *Energy Convers. Manage.* 40, 1229-1236 (1999)
13. P. Torcellini, N. Long, S. Pless, R. Judkoff, Technical Report NREL/TP-550-34607, 1-115 (2005)
14. S. Chow, A.R. Ganji, B. 26th World Energy Engineering Congress, (Atlanta Georgia, 2003) DOI:10.1.1.576.5568
15. P. Bertoldi, B. Atanasiu, *Proceedings of EEDAL'06 Conference*, 267-272 (2006)
16. T.Crosbie,S.Guy,*Int.J. Environ. Technol. Manage.* 9, 220-235 (2008)
17. Byung-Lip, P. Ji-Woo, Y. Seunghwan, K. Jonghun, L. Seung-Bok, J. Cheol-Yong, *Energies* 8, 6658-6671 (2015)
18. EnergyPlus Documentation, “Getting Started”
19. English Heritage, Building services Engineering and Safety Team (2008) “Energy conservation in traditional buildings”, p.3, online available
20. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, «Ανάλυση και εκτίμηση θερμοκρασίας εδάφους», Αικατερίνη Κουτελίδα, 2010
21. Διπλωματική εργασία, «Προσομοίωση υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά συστήματα για θέρμανση κτιρίου», Κωνσταντίνος Μόσχος , 2016
22. Improved Modeling of Residential Air Conditioners and Heat Pumps for Energy Calculations , D. Cutler, J. Winkler, N. Kruijs, and C. Christensen (National Renewable Energy Laboratory) & M. Brandemuehl (University of Colorado), 2013
23. Improved Modeling of Residential Air Conditioners and Heat Pumps for Energy Calculations, Dylan S. Cutler, B.A., 2012
24. Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review, Luisa F. Cabeza, Alvaro de Gracia, Anna Laura Pisello, 2018
25. Improving the Energy Efficiency, Limiting Costs and Reducing CO₂ Emissions of a Museum Using Geothermal Energy and Energy Management Policies, Gianluca

- Cadelano , Francesco Cicolin, Giuseppe Emmi, Giulia Mezzasalma, Davide Poletto, Antonio Galgaro and Adriana Bernardi, 2019
26. Retrofit solutions for an historic building integrated with geothermal heat pumps, *Laura Carnieletto, Giuseppe Emmi, Marco Artuzzi, Maria Celeste Piazza, Angelo Zarrella, Michele De Carli*, 2019
 27. PVadapt, Prefabrication, Recyclability and Modularity for cost reductions in Smart BIPV systems, <https://cordis.europa.eu/project/id/818342>, 2018
 28. PVSITES, Building-integrated photovoltaic technologies and systems for large-scale market deployment, <https://cordis.europa.eu/project/id/691768>, 2016
 29. Implementing Solar PV Projects on Historic Buildings and in Historic Districts, A. Kandt, E. Hotchkiss, A. Walker, J. Buddenborg, J. Lindberg, 2011
 30. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in Historical Buildings: Opportunities and Constraints, Flavio Rosa, 2020
 31. Defaix, P.R.; van Sark, W.G.J.H.M.; Worrell, E.; de Visser, E. Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27. *Sol. Energy* 2012, *86*, 2644–2653. Available online: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X12002186> (accessed on 14 May 2018).
 32. El Gammal, A.; Mueller, D.; Buerkstuemmer, H.; Vignal, R.; Macé, P. Technical Evaluation of BIPV Power Generation Potential in EU-28. 2016; pp. 2518–2522. Available online: <http://becquerelinstitute.org/wp-content/uploads/2014/08/6DO-8-final-BIPV-Technical-Potential.pdf> (accessed on 14 May 2018).
 33. Osseweijer, F.J.W.; van den Hurk, L.B.P.; Teunissen, E.J.H.M.; van Sark, W.G.J.H.M. A Review of the Dutch Ecosystem for Building Integrated Photovoltaics. *Energy Procedia* 2017, *111*, 974–981. [CrossRef]
 34. Mancini, F.; Nastasi, B. Solar energy data analytics: PV deployment and land use. *Energies* 2020, *13*, 417. [CrossRef]
 35. Escarre, J.; Li, H.-Y.Y.; Sansonnens, L.; Galliano, F.; Cattaneo, G.; Heinstejn, P.; Nicolay, S.; Bailat, J.; Eberhard, S.; Ballif, C.; et al. When PV modules are becoming real building elements: White solar module, a revolution for BIPV. In Proceedings of the 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, USA, 14–19 June 2015; pp. 1–2. [CrossRef]
 36. Swissinso–Kromatix. Available online: <http://www.swissinso.com/company/technology.html> (accessed on 17 March 2017).
 37. Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review , Sofia Lidelöw, Tomas Örn, Andrea Luciani, Agatino Rizzo, 2018
 38. <http://docplayer.gr/43175136-Perivallontikes-parametroi-5-epanalipsi-1-ti-onomazoyme-klimatologia-moyseion.html>