



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2022-23

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ
ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ –
MASTER OF SCIENCE IN OPERATIONAL
RESEARCH AND DECISION MAKING

(ΠΔ 59 /2021 /ΦΕΚ 145Α'/17.08.2021)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παράγωγής & Διοίκησης



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μοντελοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων
υφιστάμενων κτιριακών υποδομών και
βελτιστοποίηση αποτυπώματος των με τη χρήση
πηγών ενέργειας και υλικών φιλικών μη
ενεργοβόρων προς το περιβάλλον

Υπό:

ΘΩΜΑ ΧΑΣΙΩΤΗ

A.M.:2021018133

Ιανουάριος 2023

*Μοντελοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων υφιστάμενων κτιριακών
υποδομών και βελτιστοποίηση αποτυπώματος των με τη χρήση
πηγών ενέργειας και υλικών φιλικών μη ενεργοβόρων προς το
περιβάλλον*

ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΙΩΤΗΣ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Θωμά Χασιώτη εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ (Επιβλέπων)
Νικόλαος Ιων. Δάρας , Καθηγητής



Καθηγητής ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ
Στέλιος Τσαφάρκης , Αν. Καθηγητής

Καθηγητής ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ
Νικόλαος Καραδήμας , Αν. Καθηγητής



*Μοντελοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων υφιστάμενων κτιριακών
υποδομών και βελτιστοποίηση αποτυπώματος των με τη χρήση
πηγών ενέργειας και υλικών φιλικών μη ενεργοβόρων προς το
περιβάλλον*

ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό

Έτος 2023

Αφιερώσεις

Στη μνήμη του πατέρα μου και στην μητέρα μου που δεν μπορεί πλέον να
με αναγνωρίσει λόγω της ασθένειας της. Στους δύο αυτούς ανθρώπους που πάντα
στήριζαν κάθε προσπάθεια μου για μόρφωση.

Μοντελοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων υφιστάμενων κτιριακών υποδομών και βελτιστοποίηση αποτυπώματος των με τη χρήση πηγών ενέργειας και υλικών φιλικών μη ενεργοβόρων προς το περιβάλλον

ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά όλους τους καθηγητές του ΜΠΣ Ε.Ε.Λ.Α. για τη συνεργασία και ιδιαιτέρως τον κο Καθηγητή Νικόλαο Δάρα για την υποστήριξη και συνδρομή του στην προσπάθεια μου να ολοκληρώσω την υπόψη διατριβή.

*Μοντελοποίηση ενεργειακών απαιτήσεων υφιστάμενων κτιριακών
υποδομών και βελτιστοποίηση αποτυπώματος των με τη χρήση
πηγών ενέργειας και υλικών φιλικών μη ενεργοβόρων προς το
περιβάλλον*

ΘΩΜΑΣ ΧΑΣΙΩΤΗΣ

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.16
§1. Περιγραφή του προβλήματος.....	σελ.16
§2. Σπουδαιότητα του προβλήματος και η αναγκαιότητα της λύσης.....	σελ.17
§3. Περιγραφή μεθοδολογίας – Δομή.....	σελ.19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Διαδικασία λήψης απόφασης.....	σελ.21
§1.1 Γενικά – Βασικές έννοιες.....	σελ.21
§1.2 Ορθολογισμός και λήψη απόφασης	σελ.23
§1.3 Μεθοδολογία λήψης απόφασης.....	σελ.25
§1.4 Δομημένη μοντελοποίηση.....	σελ.27
§1.5 Ταξινόμηση μοντέλων.....	σελ.28
§1.6 Διαδικασίες μοντελοποίησης.....	σελ.29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Γραμμικός προγραμματισμός.....	σελ.31
§2.1 Εισαγωγή.....	σελ.31
§2.2 Γενικά περί Γ.Π.....	σελ.32
§2.3 Χρήση – Χρησιμότητα και απαιτήσεις ΓΠ.....	σελ.35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού.....	σελ.37
§3.1 Γενική μορφή προβλημάτων ΓΠ.....	σελ.37
§3.2 Τυπική Μορφή προβλημάτων ΓΠ.....	σελ.38
§3.3 Προϋποθέσεις εφαρμογής των προβλημάτων ΓΠ.....	σελ.39
§3.4 Χαρακτηριστικά και παραδοχές προβλημάτων ΓΠ.....	σελ.41
§3.5 Μοντελοποίηση Γ.Π.....	σελ.42
§3.6 Γραφική επίλυση προβλημάτων Γ.Π.....	σελ.43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Προβλήματα βελτιστοποίησης.....	σελ.45
§4.1 Εισαγωγή στη βελτιστοποίηση.....	σελ.45
§4.2 Μοντέλο βελτιστοποίησης.....	σελ.46
§4.3 Αλγοριθμικές τεχνικές.....	σελ.47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Κατανάλωση - Εξοικονόμηση ενέργειας των κτιριακών εγκαταστάσεων και Νομοθεσία

§5.1 Ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.....σελ.50	σελ.50
§5.2 Ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και ενεργειακός σχεδιασμός.....σελ.53	σελ.53
§5.3 Γενικά περί Κ.Εν.Α.Κ.....σελ.54	σελ.54
§5.4 Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα.....σελ.55	σελ.55
§5.5 Κτίριο αναφοράς.....σελ.56	σελ.56
§5.5.1 Ελάχιστες απαιτήσεις.....σελ.57	σελ.57
§5.5.2 Συνθήκες λειτουργίας.....σελ.58	σελ.58
§5.5.3 Θερμικές ζώνες κτιρίου.....σελ.59	σελ.59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε υφιστάμενα κτίρια.....σελ.61

§6.1 Ενεργειακή αναβάθμιση κελύφους κτιρίου.....σελ.61	σελ.61
§6.2 Αναβάθμιση Η/Μ εγκαταστάσεων.....σελ.63	σελ.63
§6.3 Λοιπές απαιτητές προδιαγραφές.....σελ.64	σελ.64
§6.4 Συντελεστής θερμοπερατότηταςσελ.66	σελ.66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ενεργειακή μελέτη σε υφιστάμενο κτίριο.....σελ.68

§7.1 Σχέδια και τεχνική περιγραφή.....σελ.68	σελ.68
§7.2 Χρήση κτιρίου και κλιματικές συνθήκες.....σελ.73	σελ.73
§7.3 Γενική διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης.....σελ.74	σελ.74
§7.4 Εξοικονόμηση ενέργειας κουφωμάτων.....σελ.75	σελ.75
§7.5 Υγρομόνωση και θερμομόνωση κελύφους.....σελ.76	σελ.76
§7.6 Ενεργειακή αναβάθμιση εγκαταστάσεων θέρμανσης κτιρίου.....σελ.77	σελ.77
§7.7 Ενεργειακή αναβάθμιση ψύξης και κλιματισμούσελ.78	σελ.78
§7.8 Αντικατάσταση λαμπτήρων φθορισμού με λαμπτήρες LEDσελ.81	σελ.81

§7.9 Ενεργειακή κατάταξη κτιρίου.....σελ.84	
§7.10 Πρόβλημα βελτιστοποίησης.....σελ.87	
Συμπεράσματα.....σελ.91	
Παραρτήματα	
Παράρτημα Ι: Αποτελέσματα κώδικα MATLAB.....σελ.93	
Παράρτημα ΙΙ: Γραφική αποτύπωση αποτελεσμάτων.....σελ.98	
Γενική Βιβλιογραφία.....σελ.101	

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κλιματικές Ζώνες της Ελλάδας.....σελ.56
Εικόνα 2: Ενεργειακά συστήματα.....σελ.64
Εικόνα 3 : Αποτέλεσμα ενεργειακής κατάταξης κτιρίου.....σελ.85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σχέση λήψης απόφασης και της επίλυσής του προβλήματος.....σελ.27
Πίνακας 2: Ταξινόμηση μαθηματικών μοντέλων.....σελ.28
Πίνακας 3: Βασικές κατηγορίες κτιρίων.....σελ.57
Πίνακας 4.: Ωφέλιμη απόδοση κλιματιστικών.....σελ.78
Πίνακας 5.: Εξοικονόμηση ενέργειας βάσει κλάσης κλιματιστικού.....σελ.79
Πίνακας 6.: Στοιχεία λειτουργίας υφιστάμενων συστημάτων ψύξης.....σελ.80
Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων φθορισμού της General Electric.....σελ.81
Πίνακας 8.: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED της Osram.....σελ.82
Πίνακας 9.: Συγκριτικός πίνακας λαμπτήρων.....σελ.83
Πίνακας 10.: Διαφορά ημ. κόστους κατανάλωσης των λαμπτήρων LED.....σελ.83

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.: Αναζήτηση λύσης σε μοντέλα βελτιστοποίησης.....σελ.26
Σχήμα 2.: Ταξινόμηση μοντέλων κατά Davis.....σελ.29
Σχήμα 3.: Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα.....σελ.51
Σχήμα 4.: Εμπομή CO ₂ ανά τομέα στην Ελλάδα.....σελ.52
Σχήμα 5.: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα.....σελ.52
Σχήμα 6.: Έρευνα κατανάλωσης ενέργειας στα νοικοκυριά, 2011 – 2012.....σελ.53
Σχήμα 7.: Γραφική απεικόνιση συντελεστή θερμοπερατότητας.....σελ.65

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι γεγονός ότι η τωρινή ενεργειακή κρίση που υφιστάμεθα και πλήττει την παγκόσμια οικονομία, οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει αυξητική τάση με δυσάρεστες συνέπειες στο περιβάλλον και γενικότερα στον πλανήτη μας. Η ενεργειακή πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η παγκόσμια κοινότητα είναι αφενός η εξοικονόμηση πρωτογενών ενεργειακών πόρων και αφετέρου η προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει γίνει πλέον αντιληπτό, τόσο από τους πολίτες όσο και από τις κυβερνήσεις, ότι η επιδιωκόμενη ανάπτυξη συνδέεται άρρηκτα με τη διαφύλαξη της ισορροπίας του. Δεδομένου ότι ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές πρωτογενούς ενέργειας και ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα, η ανάγκη για ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων εμφανίζεται επιτακτική.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως στόχο να πραγματευτεί την ενεργειακή αναβάθμιση κτιριακών εγκαταστάσεων, οπότε και θα στηριχτεί στην εκπόνηση μελέτης ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενου κτιρίου βάσει του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (Κε.Ν.Α.Κ), με στόχο την ελαχιστοποίηση κατά το δυνατόν της κατανάλωσης ενέργειας μέσω της θερμομονωτικής επάρκειας του κτιρίου - της επιλογής Η/Μ συστημάτων και της χρήσης τεχνολογιών Ανανεώσιμων πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Η όλη έρευνα θα βασιστεί σε πραγματικές μετρήσεις υφιστάμενου κτιρίου του Γενικού Επιτελείου Στρατού, σε περιοχή του Ν. Αττικής, η περιγραφή του οποίου θα γίνει με όλα τα απαραίτητα αρχιτεκτονικά σχέδια, ηλικία, τρόπος κατασκευής του, ενεργειακή ζώνη κ.α. ώστε αρχικά να εκπονηθεί το Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) για τον προσδιορισμό της υφιστάμενης ενεργειακής κλάσης και εν συνεχεία υιοθετώντας μεθόδους του γραμμικού προγραμματισμού μέσω ενός προβλήματος βελτιστοποίησης θα καταλήξουμε στη λύση που θα οδηγήσει στην επιλογή των απαιτητών κατ'ελάχιστο συνδυασμό κοστολογημένων επεμβάσεων που πρέπει να δρομολογηθούν, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ενεργειακή αναβάθμιση του εν λόγω κτιρίου με το μικρότερο δυνατό κόστος (επιθυμητό αποτέλεσμα).

Η βέλτιστη επιλογή θα προκύψει, θέτοντας ένα άνω κατώφλι που θα αφορά στην ελάχιστη επιτρεπτή δαπάνη για τις προτεινόμενες επεμβάσεις, με τη χρήση του λογισμικού πακέτου της Matlab για την αριθμητική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης παρέχοντας ταυτόχρονα και το γραφικό αποτύπωμα αυτής.

«Modeling energy requirements of existing building
infrastructures and optimizing their footprint using
environmentally friendly non-energy-intensive energy sources
and materials»

«Thomas Chasiotis»

ABSTRACT

It is a fact that the current energy crisis that is affecting the world economy is due to energy consumption which shows an increasing trend with unpleasant consequences for the environment and our planet in general. The energy challenge that the global community must face is on the one hand the saving of primary energy resources and on the other hand the protection of the environment, as it has now been realized, both by citizens and by governments, that the intended development is inextricably linked to the preservation of his balance. Given that the building sector is one of the largest consumers of primary energy and is responsible for a significant percentage of CO₂ emissions in the atmosphere, the need for energy upgrading of buildings appears imperative.

The aim of this master's thesis is to deal with the energy upgrading of building facilities, in which case it will basically be based on the preparation of an energy efficiency study of an existing building based on the Regulation on the Energy Performance of Buildings , with the aim of minimizing the possible of energy consumption through the building's thermal insulation adequacy - the choice of E/M systems and the use of Renewable Energy Sources (RES) technologies.

The entire research will be based on actual measurements of an existing building of the General Staff of the Army, in the area of N. Attica, the description of which will be made with all the necessary architectural plans, age, construction method, energy zone, etc. in order to initially prepare the Energy Performance Certificate to determine the existing energy class and then by adopting linear programming methods through an optimization problem we will arrive at the solution that will lead to the selection of the minimum required combination of costed interventions that must be launched, in order to achieve

the greatest possible energy upgrade of the building in question at the lowest possible cost (desired result).

The optimal choice will emerge, setting an upper threshold that will concern the minimum allowable expenditure for the proposed interventions, using the software package of Matlab for the numerical solution of the optimization problem, providing at the same time its graphic imprint.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

§1. Περιγραφή του προβλήματος

Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα αναζητούσε τρόπους και μέσα ώστε να καλύψει την ανάγκη του για προστασία από τις καιρικές συνθήκες. Οι κατασκευές που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για να ικανοποιήσουν στεγαστικές του ανάγκες ήταν απλές. Με τον ερχομό της βιομηχανικής επανάστασης, προέκυψαν νέα δομικά υλικά και τεχνολογίες, και τελικά στον 20ο αιώνα πλέον οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν κάλυπταν μόνο την ανάγκη για στέγαση, αλλά αναβάθμισαν σημαντικά την ποιότητα ζωής του ανθρώπου, με την προσαρμογή στις κατασκευές συστήματα θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, αερισμού κ.τ.λ.

Το 19^ο αιώνα το φαινόμενο της αστικοποίησης είχε ως αποτέλεσμα την εντατικοποίηση της αστικής ανοικοδόμησης και με την ταυτόχρονη υπερπροσφορά ενέργειας, οι κατασκευές μετατράπηκαν σε εξαιρετικά ενεργοβόρες μηχανές¹. Μετέπειτα το 1973 πετρελαϊκή κρίση, η οποία αποτέλεσε την πρώτη ενεργειακή κρίση και σε συνδυασμό με την εμφάνιση περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως αυτό το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αποτέλεσε την αφετηρία του ζητήματος της εξοικονόμησης ενέργειας που όσο προχωράμε στον 21^ο αιώνα γίνεται και πιο έντονο. Άρα λοιπόν τα κτίρια όσον αφορά τη λειτουργία τους, θα πρέπει να τα θεωρούμε ζώντες οργανισμούς και αποτελούν τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας, γεγονός που προκαλεί την σύγχρονη επιστήμη στην ανεύρεση μεθόδων εξοικονόμησης της. Στο πλαίσιο αυτό, εντάσσεται η ενεργειακή αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων επιβαρύνοντας σημαντικά τους κρατικούς προϋπολογισμούς αλλά και τους ιδιώτες.

Για την ΕΕ, ο κτιριακός τομέας (νοικοκυριά, επιχειρήσεις, βιομηχανίες) αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας, σε ποσοστό που φτάνει το 40% της συνολικής ενέργειας, με το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της ενέργειας καταναλώνεται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης/ψύξης στις κτιριακές εγκαταστάσεις. Σε αντιστοιχία στην Ελλάδα, λόγω των προβλημάτων που εντοπίζονται επί των πλείστων στην μειωμένη επάρκεια της θερμομόνωσης των κτιρίων, το ποσοστό ανέρχεται στο 30% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας καθόσον κτίρια που κατασκευάστηκαν πριν από το 1980 απαιτούν βελτιώσεις σε θέματα θερμοικής άνεσης και ποιότητας αέρα. Από αυτή την ενέργεια χρησιμοποιείται το 70% για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και το 18% για οικιακές συσκευές, φωτισμό και

¹Zhang, Z.& Wu, X & Yang, X. & Zhu, Y. Bepas, “A life cycle building environmental performance assessment model. Building and Environment”, ISSN 0360-1323,2006, pp 670-673.

κλιματισμό τους θερινούς μήνες². Επιπλέον στις κτιριακές εγκαταστάσεις οφείλεται το 45% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα στη χώρα μας και λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά μικρό πληθυσμό της σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, ο οικιακός τομέας της Ελλάδας είναι από τους πιο ενεργοβόρους στην Ευρώπη. Στα παραπάνω αρνητικά ποσοστά συμβάλλουν τα δημόσια κτίρια της χώρας και πολύ περισσότερο κτιριακές εγκαταστάσεις του ΥΠΕΘΑ, οι οποίες αριθμούν σε πενταψήφιο αριθμό και χαρακτηριστικό τους είναι η παλαιότητα κατασκευής τους.

§2. Σπουδαιότητα του προβλήματος και η αναγκαιότητα της λύσης

Με δεδομένο ότι η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει αυξητική τάση με τις όποιες δυσάρεστες συνέπειες στο περιβάλλον σε παγκόσμιο επίπεδο η επιστημονική κοινότητα συλλογικά επιλαμβάνεται με σειρά μέτρων για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, έχοντας ως πρωτεύοντα σκοπό τη μείωση των ρύπων και παράλληλα την εξοικονόμηση των πρωτογενών ενεργειακών πόρων.

Η τωρινή ενεργειακή κρίση με τις αυξανόμενες πιέσεις των περιορισμών πόρων και η ανάγκη για προστασία του περιβάλλοντος έχουν καταστήσει ζωτικής σημασίας την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης βιώσιμης ανάπτυξης, έχοντας ως πυλώνα την ενεργειακή αυτονομία των υφιστάμενων κτιριακών εγκαταστάσεων.

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη εργαλείων αξιολόγησης βιώσιμων κτιρίων. Ωστόσο, πολλά εργαλεία αξιολόγησης αντιμετωπίζουν προβλήματα με μεθόδους αξιολόγησης, τα οποία υπονομεύουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και την εφαρμογή τους. Εάν τα προβλήματα αυτά επιμείνουν, ο ρόλος των εργαλείων αξιολόγησης των βιώσιμων κτιρίων ως βοηθημάτων λήψης αποφάσεων κατά το στάδιο του σχεδιασμού θα είναι πολύ περιορισμένος³.

Ο τρόπος κατασκευής των νέων κτιρίων παίζει ιδιάζων ρόλο στην εφαρμογή της ενεργειακής απόδοσης και γενικότερα, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, ο σχεδιασμός είναι μια βασική φάση για αποτελεσματική βελτίωση σε ολόκληρο

² Πηγή ΕΛΣΤΑΤ

³ Richardson, G.R.A. & Lynes, J.K. «Institutional motivations and barriers to the construction of green buildings on campus». *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2007, pp. 345-351

τον τομέα των κατασκευών . Οι πρώιμες φάσεις σχεδιασμού κτιρίων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της απόδοσης του κύκλου ζωής ενός κτιρίου όσον αφορά τους πόρους και την κατανάλωση ενέργειας και την ανάπτυξη του κόστους κύκλου ζωής (LCC), αντίστοιχος είναι ο ρόλος της ενεργειακής αναβάθμισης των υφιστάμενων κτιρίων. Σε αυτό το στάδιο, το δυναμικό βελτιστοποίησης παραμένει ιδιαίτερα υψηλό με το ανάλογο κόστος, το οποίο ο εκάστοτε επενδυτής προσδοκά να είναι το ελάχιστο και να προβεί στην απόσβεση του το συντομότερο δυνατό. Απαιτούνται λοιπόν βελτιωμένα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων προκειμένου να μοντελοποιηθεί σαφώς η σχέση μεταξύ των σχεδίων δράσης του αποφασίζοντα (ιδιώτης, επιχείρηση, εταιρία, κρατική οντότητα) επιτυγχάνοντας τη μεγιστοποίηση των δεικτών ενεργειακής αναβάθμισης των υφιστάμενων με το ελάχιστο κόστος.

Έπειτα από την χρησιμοποίηση της υπάρχουσας ελληνικής και ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας στην παρούσα διπλωματική εργασία και με δεδομένο ότι το πλείστον των δημόσιων κτιρίων και πολύ περισσότερο τα κτίρια διοικητικής μέριμνας του ΥΠΕΘΑ προέκυψε το συμπέρασμα ότι μοντελοποίηση των υφιστάμενων κτιριακών υποδομών και η ενεργειακή αναβάθμιση σύμφωνα με το πρότυπο κτίριο αναφοράς όπως ορίζεται από τον Κ.Εν.Α.Κ είναι κάτι παραπάνω από απαραίτητο, θα λέγαμε απαιτητό, σήμερα που βιώνουμε τη μεγαλύτερη ενεργειακή κρίση παγκοσμίως.

Μέσω της παρούσης εισαγωγής και κατ'επέκταση της εργασίας εν συνόλω επιχειρείται να δοθεί η σμίλευση των εργαλείων και των δυνατοτήτων που δίδονται μέσω της επιχειρησιακής έρευνας με τις αποφάσεις που καλείται να πάρει ένας ενεργειακός επιθεωρητής προκειμένου μέσω των εναλλακτικών επιλογών να προβεί σε εκείνες τις βέλτιστες ενέργειες για την ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων ικανοποιώντας ταυτόχρονα τον οποιονδήποτε επενδυτή την ταχύτερη απόσβεση του ποσού που θα καταβάλει.

Κύριοι θεματικοί πυλώνες υποστήριξης της παρούσης εργασίας είναι:

- Ο τρόπος λήψης των αποφάσεων του οιοδήποτε επενδυτή ή κυρίου του έργου
- Οι δυνατότητες χρήσης και επεξεργασίας των προβλημάτων βελτιστοποίησης του Γραμμικού προγραμματισμού.
- Περιθώρια ενεργειακής αναβάθμισης υφιστάμενων κτιρίων
- Ελαχιστοποίηση του κόστους των επεμβάσεων και σενάρια απόσβεσης τους
- Χρήση του κώδικα του λογισμικού της MATLAB
- Εξαγωγή συμπερασμάτων και προοπτικές επέκτασης της έρευνας.

§3. Περιγραφή μεθοδολογίας- Δομή

Στη παρούσα διατριβή αναπτύσσεται ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων σε εργασίες υφιστάμενης κατασκευής του Γενικού Επιτελείου Στρατού. Η κύρια ιδέα είναι να δημιουργηθεί και να δοκιμαστεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο λήψης αποφάσεων συνδυάζοντας τις απαιτητές εργασίες ενεργειακής αναβάθμισης στο μέγιστο δυνατό όριο της κλίμακας σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. με το επιθυμητό κόστος που ο ιδιοκτήτης (ΥΠΕΘΑ) έχει ως ανώτατο όριο να δαπανήσει.

Οι ακόλουθες εργασίες πρέπει να εκτελεστούν για την επίτευξη των στόχων της παρούσης διατριβής:

- Ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας που έχει διεξαχθεί στον ερευνητικό τομέα, όπου και θα παρουσιαστούν τα ευρήματα της βιβλιογραφικής έρευνας.
- Επεξήγηση του προτεινόμενου μοντέλου λήψης αποφάσεων (που θα επιλεγεί καταλλήλως από την βιβλιογραφία), το οποίο περιλαμβάνει επιμέρους παρεμβάσεις στις υφιστάμενες κατασκευές.
- Παρουσίαση και επεξήγηση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στις περιπτώσιολογικές μελέτες.
- Δόμηση προβλήματος μεγιστοποίησης με την κύρια συνάρτηση και τους περιορισμούς που την πλασιώνουν.
- Παρουσίαση του μοντέλου συνοδευόμενο με ρεαλιστικό σενάριο. Πραγματοποίηση υπολογισμών και συζήτηση αποτελεσμάτων.
- Παρουσίαση τελικών συμπερασμάτων σχετικά με την πραγματοποιηθείσα έρευνα και παρουσίαση γενικών συστάσεων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας αναφέρονται συνοπτικά οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων, ο τρόπος δόμησης αυτών στις περιπτώσεις εκείνες όπου απαιτείται η επεξεργασία πολλών και σύνθετων πληροφοριών και διαδικασίες μοντελοποίησης.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται μια ομαλή είσοδο στο γραμμικό μια ευρέως γνωστή μέθοδο της επιχειρησιακής έρευνας, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, έτσι ώστε να υποβοηθηθεί το έργο των αποφασίζόντων στη λήψη αποφάσεων

Στο 3ο κεφάλαιο θα γίνει μια ανάλυση των προβλημάτων του Γ.Π. στον τρόπο δόμησης, τις προϋποθέσεις εφαρμογής τους και τον τρόπο μοντελοποίησης τους και στο 4ο

κεφάλαιο θα αναφερθούμε αλγοριθμικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, καθώς και μέθοδοι γραφικής επίλυσης.

Τα κεφάλαια που ακολουθούν (5ο, 6ο και 7ο) αποτελούν εκείνο το μέρος της εργασίας που περιλαμβάνει τη μελέτη ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίου πολλαπλών χρήσεων σε Στρώο, διατυπώνοντας ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης και μέσω της χρήσης του λογισμικού της Matlab, θα προκύψουν σενάρια που θα αφορούν πραγματικές και εφαρμόσιμες λύσεις μέσα από τις οποίες θα υφίσταται εναρμονισμός με τις σύγχρονες απαιτήσεις του Κ.Εν.Α.Κ. Τέλος υιοθετώντας μεθόδους του γραμμικού προγραμματισμού μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης θα καταλήξουμε στη λύση (επιθυμητό αποτέλεσμα) που θα οδηγήσει στην επιλογή των απαιτητών και ελάχιστο εργασιών που πρέπει να δρομολογηθούν, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίου με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αποτελέσματα με τη χρήση της Matlab καθώς και αποτύπωμα σε γράφημα της βέλτιστης επιλογής παρουσιάζονται αναλυτικά στα Παραρτήματα Ι και ΙΙ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διαδικασία λήψης απόφασης

§1.1 Γενικά - Βασικές έννοιες

Στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων γίνεται μια εκτεταμένη ανάλυση τρόπων για την βελτιστοποίηση των συνθηκών λήψης ή τη λήψη μιας απόφασης που πρόκειται να λάβει μια επιχείρηση ή ένας οργανισμός ή ένα άτομο έχοντας παραπάνω από μια δυνατές εναλλακτικές επιλογές. Συνήθως στις επιχειρήσεις/εταιρίες/οργανισμούς το άτομο που είναι υπεύθυνο για μια επιλογή είναι ο διευθυντής ή ο ιδιοκτήτης, ή μια ομάδα που καλείται να ακολουθήσει διαδικασίες ώστε να καταλήξει στην βέλτιστη. Είναι προφανές ότι κάθε επιλογή επηρεάζει την το μέλλον της επιχείρησης ή της κρατικής οντότητας γεγονός που απαιτεί συνυπολογισμό πιθανών εξελίξεων στην επιλογή της απόφασης. Τα μελλοντικά σενάρια απαιτείται να μην οδηγούν σε βέβαια αποτελέσματα ώστε να υπάρχει ανάγκη λήψης απόφασης.

Όλοι είμαστε εξοικειωμένοι με την έννοια της απόφασης και η αναζήτηση της είναι η πιο σωστή επιλογή δίδοντας απάντηση στο ερώτημα «to be or not to be». Ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουμε την απόφαση ποικίλει εξαρτώμενος τόσο από τη φύση, όσο και από την πολυπλοκότητα του προβλήματος που έχουμε να επιλύσουμε. Πριν προχωρήσουμε στη μελέτη των προβλημάτων απόφασης θα πρέπει να γνωρίζουμε επιγραμματικά μερικές βασικές έννοιες:

Η λήψη αποφάσεων είναι το αποτέλεσμα εκείνων των διαδικασιών που έχουν στόχο την ανάλυση των επιπτώσεων όλων των εναλλακτικών αποφάσεων⁴, οδηγώντας μας σε μια προσπάθεια σύγκρισης όλων των εμπλεκόμενων ώστε να βρεθεί μία κοινή αποδεκτή λύση.

Απόφαση θεωρούνται όλες εκείνες οι ενέργειες ενός ή περισσότερων ανθρώπων με στόχο την επιλογή ενός κοινού τρόπου δράσης που προκύπτει μέσα από πλήθος εναλλακτικών επιλογών. Οι ενέργειες μπορεί να περιλαμβάνουν σιέψεις, αξιολογήσεις, κρίσεις κ.α.

Η Ανάλυση Αποφάσεων είναι η ορθολογική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων η οποία μέσω μοντέλων (models) αναπαριστά εναλλακτικά σχέδια δράσης σχετικά με το πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε στοχεύοντας πάντα στην επιλογή της βέλτιστης απόφασης.

⁴ Ν. Ματσασίνης, «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2010 σελ. 77 - 78.

Εναλλακτικές επιλογές είναι οι τρόποι εναλλακτικοί που δύναται να επιλέξει κάποιος ο οποίος καλείται να πάρει την ορθή απόφαση επίλυσης του προβλήματος, η λύση του οποίου θα δοθεί μέσω ενός από τους παραπάνω τρόπους.

Κριτήρια είναι τα χαρακτηριστικά κάθε εναλλακτικής επιλογής.

Στόχος είναι η απάντηση στο ερώτημα τι θέλουμε να πετύχουμε με σαφή διαχωρισμό των επιλογών δράσης.

Η Ποιότητα Απόφασης αφορά στην εκτίμηση αν μία απόφαση είναι καλή ή κακή.

Η Αξία αφορά στο πόσο επιθυμητό είναι το αποτέλεσμα που επιζητούμε εκφραζόμενη σε ποσοτικά ή ποιοτικά συναρτήσεως του οφέλους.

Η Αποδοχή που συχνά έρχεται σε σύγκριση με κάποιο από τα ποιοτικά κριτήρια συνδεδεμένη με την εφαρμογή της απόφασης από εκείνους που τους αφορά ή τους επηρεάζει νοητικά ή και συναισθηματικά.

Η Θεωρία Λήψης Αποφάσεων είναι ο κλάδος που ασχολείται με τη λήψη σημαντικών αποφάσεων σε σημαντικά προβλήματα, μέσω επεξεργασίας των δεδομένων ή προβλέψεων, για την βέλτιστη δυνατή επιλογή σε συνθήκες που ενέχουν αβεβαιότητα. Ασχολείται με την εφαρμογή αλγορίθμων και μεθόδων για τη λήψη σημαντικών αποφάσεων για τις οποίες δεν είναι προφανές τι ενέργεια πρέπει να γίνει, δεδομένου ότι οι αποφάσεις πρέπει να ληφθούν κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας. Η συγκεκριμένη διαδικασία εξαιρετικά πολύπλοκη καθόσον εμπεριέχει πολλές εναλλακτικές λύσεις.

Μέσω της χρήσης αλγορίθμων προσπαθούμε να συνθέσουμε ένα κώδικα υποστήριξης συγκεκριμένης διαδικασίας δημιουργώντας ένα μηχανισμό πρόβλεψης και επιλογής των πιθανών αποτελεσμάτων. Η διαδικασία θα πρέπει να δρομολογεί την αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων μη κάνοντας διάκριση σε βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα αποτελέσματα. Συναφώς πρέπει να επισημανθεί ότι η λήψη μιας απόφασης οδηγεί στην αποσταθεροποίηση ενός συστήματος και με την αποκατάσταση μιας ισορροπίας την σταθεροποίηση ενός άλλου. Ιδιαίτερο και σημαίνουν ρόλο κατέχει η λήψη της ορθής απόφασης σε μια επιχείρηση ή ένα κρατικό οργανισμό αφού αποτελεί πυλώνα επιτυχίας για την περαιτέρω πορεία της/του, χωρίς φυσικά να λησμονάτε η πιθανότητα της τυχαίας επίδρασης, αλλά και σωστός ο χρόνος λήψης της απόφασης.⁵

⁵ Παναγιώτου Ν. «Εισαγωγή στην Ανάλυση Αποφάσεων», ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας 2011, σελ 12-15.

§1.2 Ορθολογισμός και Λήψης απόφασης

Η ορθολογιστική λήψη μιας απόφασης μέσω μιας γνωσιακής διαδικασίας αναλύει συστηματικά το πρόβλημα, βασιζόμενη στις διαθέσιμες πληροφορίες – γνώσεις και ακολουθώντας επιλέγεται η δράση μέσα από σαφείς και ξεκάθαρους κανόνες. Στις εταιρίες/κρατικές οντότητες ο κύριος υπεύθυνος είναι ο διευθύνων σύμβουλος/επικεφαλής ο οποίος θα κληθεί να πάρει μια απόφαση για την μετουσίωση μιας συγκεκριμένης επιχειρηματική ιδέας σε πράξη. Η λήψη μιας απόφασης είναι η κυριότερη εργασία που πρέπει να κάνει ένας μάνατζερ μιας επιχείρησης. Η εξέλιξη κάθε εταιρίας και των εργαζόμενων εξαρτάται από μια σειρά αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν από τους υπεύθυνους. Ομοίως ενεργεί και ο ιδιοκτήτης μιας μικρής επιχείρησης με ελάχιστους εργαζομένους ή ακόμη και εάν αυτός είναι ο μοναδικός εργαζόμενος.

Για να μπορέσουμε όμως να εξεταστούν όλα τα δεδομένα με τρόπο ορθολογικό, και μαθηματικοποιημένο θα πρέπει να μπορούν όλοι οι παράγοντες να υπεισέλθουν στη συνάρτηση. Αυτό όμως είναι αδύνατον για αρκετούς λόγους:

- Για να βρούμε την βέλτιστη δυνατή απόφαση θα πρέπει να υπολογίσουμε με βάση μελλοντικές προβλέψεις, που ως γνωστόν είναι εντελώς αβέβαιες
- Είναι αδύνατον να υπολογιστούν όλες οι εναλλακτικές λύσεις ενός ζητήματος
- Είναι αδύνατον να αναλυθεί κάθε εναλλακτική και να ποσοτικοποιηθεί ώστε να υπολογιστεί στον αλγόριθμο
- Τέλος, η πληροφόρηση και τα δεδομένα που λαμβάνονται είναι πάντα ελλιπή και συνεπώς υπάρχουν παράγοντες που δεν μπορούν να υπολογιστούν.

Προϋποθέσεις απαιτητές για μια ορθολογική λήψη απόφασης είναι οι γνωστές επιλογές στον αποφασίζοντα και η καθαρότητα του προβλήματος, καθαρές και σταθερές προτιμήσεις, καθορισμός κριτηρίων και απόδοση βαρών σε αυτά, προσδιορισμός εναλλακτικών επιλογών και τέλος η μεγιστοποίηση του προβλήματος⁶.

Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις αποφάσεις σε δύο είδη : τις προκαθορισμένες αποφάσεις οι οποίες τις περισσότερες φορές λαμβάνονται αυτόματα και καθορίζονται από την πολιτική μιας επιχείρησης, και τις μη προκαθορισμένες αποφάσεις που πρέπει να

⁶ Ν. Ματσατσίνης «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2010 σελ. 81 - 82.

ληφθούν σε ιδιαίτερες συνθήκες όπως ένα απρόβλεπτο ή πιθανό γεγονός. Ένα μέρος των μη προκαθορισμένων αποφάσεων είναι οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε στρατηγικό επίπεδο⁷.

Οι τρεις μεταβλητές με τις οποίες πρέπει να υπολογιστεί αν αξίζει να ληφθεί μια απόφαση είναι το ρίσκο, η βεβαιότητα και η αβεβαιότητα.

Αναλυτικότερα:

Η περίπτωση της βεβαιότητας είναι αυτή που υπάρχει επαρκής πληροφόρηση, ανάλυση των δεδομένων και έχει βγει συμπέρασμα κατά το οποίο φαίνεται να μην υπάρχει κάποιος κίνδυνος. Συνεπώς είναι μονόδρομος η λήψη της απόφασης. Κατά αυτή την περίπτωση έχουμε εξακριβώσει τις σχέσεις αιτίας και αιτιατού.

Η δεύτερη περίπτωση είναι η περίπτωση ύπαρξης κάποιου κινδύνου, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει βεβαιότητα για την έκβαση της λήψης της απόφασης. Ο αποφασίζων σε αυτή την περίπτωση καλείται να λειτουργήσει με βάση την αντίληψή του. Θεωρούμε ότι υπάρχει πληροφόρηση αλλά όχι πλήρης.

Η τρίτη και τελευταία περίπτωση είναι η περίπτωση της αβεβαιότητας όπου υπάρχει ή πολύ μικρή πληροφόρηση, έως έλλειψη πληροφόρησης, ή πάρα πολλές εναλλακτικές λύσεις, που δεν επιτρέπουν τη λήψη απόφασης με τη χρήση εμπειρίας. Σε αυτή την περίπτωση ο υπεύθυνος θα πρέπει να λάβει την απόφαση με βάση το ένστικτό του ή χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο που σχετίζεται με τη θεωρία παιγνίων.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν οι υπεύθυνοι να αποφασίσουν με ορθολογικότητα και η απόφαση εναπόκειται περισσότερο στα προσωπικά τους κριτήρια.⁸

Τέλος υπεύθυνος/οι για τη λήψη μιας καλής απόφασης είναι ο αποφασίζων ή η ομάδα των αποφασιζόντων όπου για να ληφθεί μια καλή απόφαση θα πρέπει να υπάρχει το χαρακτηριστικό της διορατικότητας ώστε να βλέπει τις μελλοντικές επιπτώσεις των ληφθέντων αποφάσεων. Επιπροσθέτως μία καλή απόφαση δεν αποτελεί ένα τυχαίο γεγονός, αλλά για να θεωρηθεί καλή πρέπει με την εφαρμογή της να οδηγηθούμε στη βέλτιστη λύση και την επίτευξη του στόχου. Βέβαια η λήψη μιας καλής απόφασης δεν έχει πάντοτε καλά αποτελέσματα, όμως ακολουθώντας την ορθή χρήση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων αυξάνονται τα ποσοστά επιτυχίας λήψης καλών αποφάσεων και κατ'επέκταση καλών αποτελεσμάτων.

⁷ Καρλαύτης Μ. , Λαγαρός Ν. «Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς» ,Εκ. Συμμετρία, 2010, σελ. 12-16

⁸ Μποναζούνας Μ., «Βελτιστοποίηση Συστημάτων» ,ΕΜΠ, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα ,2000, σελ. 11-14

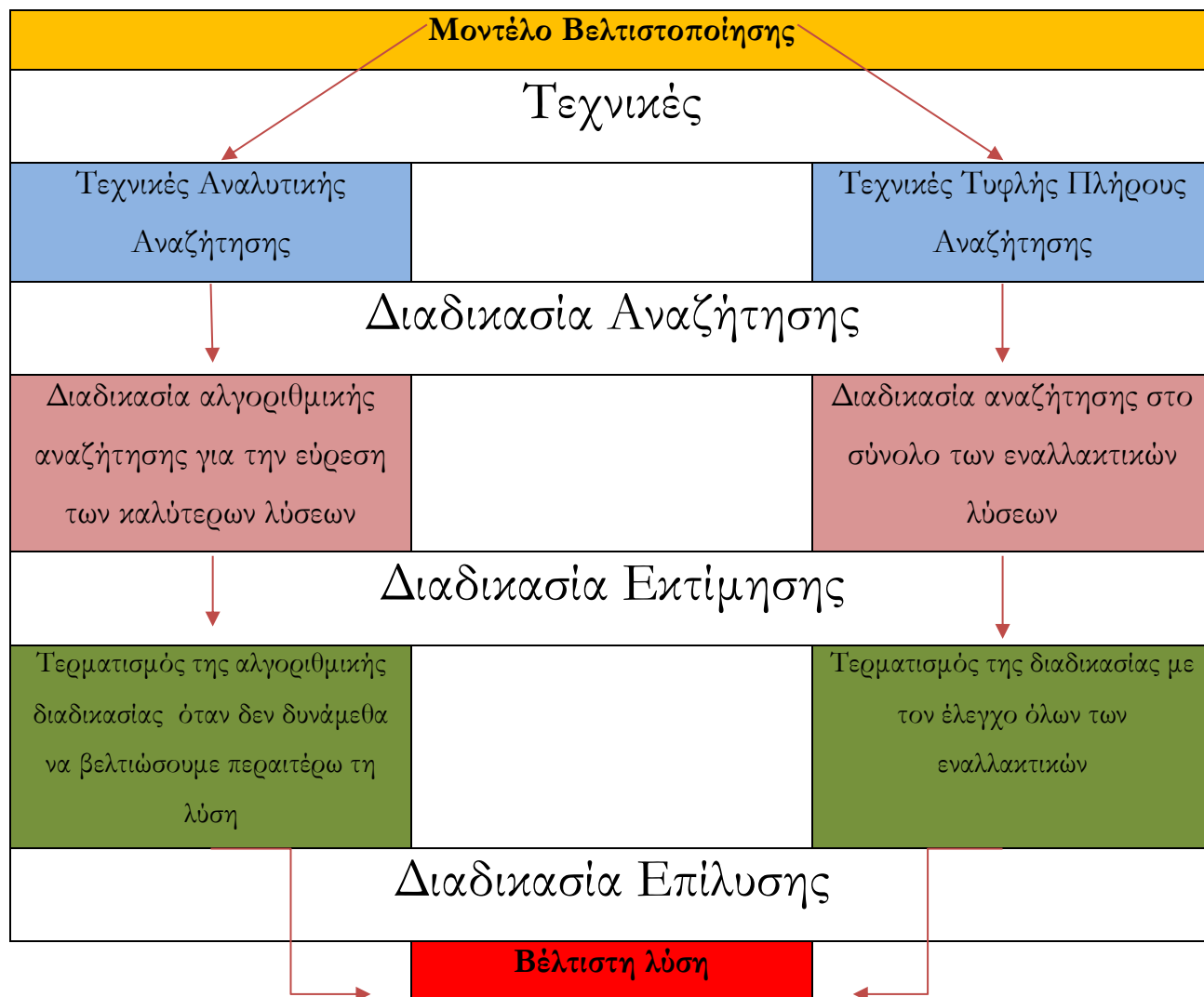
§1.3 Μεθοδολογία λήψης απόφασης

Το κλασικό μοντέλο του Simon (1960) το οποίο αναφέρεται στην διαδικασία λήψης αποφάσεων από έναν αποφασίζοντα, χωρίζει την διαδικασία λήψης μιας απόφασης σε τέσσερις φάσεις:

- **Η νοητική φάση (Intelligent Phase).** Η φάση της διερεύνησης που αρχικά αναζητούνται οι καταστάσεις για τις οποίες μπορούν να ληφθούν αποφάσεις. Γίνεται διερεύνηση αν το πρόβλημα είναι μεν πραγματικό και δεν αποτελεί μέρος ενός άλλου ευρύτερου προβλήματος. Στην συνέχεια καθορίζεται ο βαθμός σημαντικότητας του προβλήματος, έτσι ώστε να είναι γνωστή η προτεραιότητα που θέτει ο αποφασίζων για την επίλυση του. Το πρόβλημα ταξινομείται σε μια από τις τρεις κατηγορίες προβλημάτων (δομημένο, αδόμητο, ημιδομημένο) και στην συνέχεια διασπάται σε επιμέρους προβλήματα. Τέλος γίνεται η καταγραφή του. Συνοπτικά γίνεται ο εντοπισμός των στόχων και η καταγραφή σημείων των αποφάσεων, η ταξινόμηση τους και η συλλογή δεδομένων.

- **Σχεδιασμός (Design).** Κατά την φάση αυτή γίνεται έρευνα, ανάλυση και ανάπτυξη όλων των δυνατών εναλλακτικών τρόπων δράσης. Η φάση αυτή ξεκινά με την μελέτη του προβλήματος έτσι ώστε να γίνει κατανοητό από όλους τους εμπλεκόμενους στην διαδικασία λήψης της απόφασης. Στην συνέχεια διερευνώνται όλοι οι πιθανοί τρόποι δράσεις, (εναλλακτικές επιλογές) οι οποίοι εφόσον αναπτυχθούν θα εφαρμοστούν για να βρεθούν οι λύσεις και το κατά πόσο είναι υλοποιήσιμες, ανάλογα με τα σενάρια που θα προκριθούν. Σημαντικό κομμάτι αυτή της φάσης είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος (εικονικά, αναλογικά, μαθηματικά).

- **Επιλογή (Choice).** Είναι η φάση της διαδικασίας όπου γίνεται η επιλογή της καταλληλότερης απόφασης μέσα από το σύνολο των εναλλακτικών τρόπων δράσης (τεχνικές επίλυσης). Στη συγκεκριμένη φάση εκτελούνται όλες εκείνες οι ενέργειες για την αναζήτηση, εκτίμηση και εύρεση της κατάλληλης λύσης του μοντέλου. Για την υλοποίηση των ανωτέρω και ειδικότερα για τις ενέργειες της αναζήτησης εφαρμόζονται τεχνικές εξαρτώμενες από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, που διακρίνονται στα μοντέλα βελτιστοποίησης και τα περιγραφικά μοντέλα. Η λειτουργία ενός μοντέλου βελτιστοποίησης φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Σχήμα 1: Αναζήτηση λύσης σε μοντέλα βελτιστοποίησης

• **Φάση ολοκλήρωσης.** Στην τελική αυτή την φάση εφαρμόζουμε την προτεινόμενη λύση. Έλεγχος των αποτελεσμάτων και εξέταση των αιτιών απόκλισης από τις προβλέψεις. Αν τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης είναι ικανοποιητικά τότε συμπεραίνεται ότι οι εργασίες των προηγούμενων φάσεων έγιναν σωστά. Αν τα αποτελέσματα από την άλλη μεριά δεν είναι ικανοποιητικά τότε έχουμε την δυνατότητα επιστροφής στην αρχική φάση έως ότου καταλήξουμε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Εν κατακλείδι στη φάση αυτή αξιολογείται η απόφαση και η διαδικασία λήψης απόφασης, η αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα αυτής.

Για την ορθή κατανόηση της σχέσης μεταξύ της λήψης απόφασης και της επίλυσης του προβλήματος δύναται να βοηθήσει ο παρακάτω πίνακας:

Επίλυση Προβλήματος	Λήψη Απόφασης
Αναγνώριση και κατανόηση	Αναγνώριση των στόχων της απόφασης
Συγκέντρωση πληροφοριών	Συλλογή πληροφοριών
Δημιουργία ιδεών	Ανεύρεση τρόπου επίτευξης στόχου
Ανάπτυξη λύσεων	Καθορισμός κριτηρίων
Επιλογή της βέλτιστης λύσης	Επιλογή της καλύτερης σειράς ενεργειών
Εφαρμογή	Εφαρμογή

Πίνακας 1.: Σχέση μεταξύ της λήψης απόφασης και της επίλυσης του προβλήματος

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η επίλυση ενός προβλήματος είναι μια ενέργεια η οποία αφορά είτε στην ικανοποίηση κάποιας ανάγκης, είτε δίνει έμφαση στη διαδικασία σκέψης η οποία προηγείται της τελικής επιλογής.⁹ Εν τέλει η διαδικασία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μια απόφαση, μπορεί και όχι.

§1.4 Δομημένη μοντελοποίηση

Η αφηρημένη έκφραση της πραγματικότητας ή μια απλοποιημένη αναπαράσταση αναπαράσταση είναι ένα μοντέλο. Η χρήση των μοντέλων αποτελεί εξαιρετικό εργαλείο ώστε να πειραματιζόμαστε σε εργαστηριακό επίπεδο προσομοιώνοντας την πραγματικότητα σχετικά εύκολα και με χαμηλό κόστος. Τα μοντέλα είναι για τον αποφασίζοντα εργαλεία που μετατρέπουν τα δεδομένα σε μια χρήσιμη πληροφορία. Το επιθυμητό είναι για ένα μοντέλο να έχει τη δυνατότητα να αναπαριστά το σύνολο των δυνατών όψεων ενός γεγονότος και το εφικτό να αναπαριστά μόνο μερικές όψεις. Για την καλύτερη κατανόηση της χρήσης των μοντέλων και πως μπορούμε να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες της μοντελοποίησης απαιτείται να γνωρίζουμε¹⁰:

- Μοντέλο: Είναι μια αναπαράσταση κάποιων όψεων της πραγματικότητας.
- Επιλυτής: Είναι ο διαχειριστής ενός μοντέλου μέσω μιας διαδικασίας όπου θα προβεί στη επίλυση του προβλήματος.

⁹ Bulgurcu B, Cavusoglu H and Benbasat I “Information Security Policy Compliance: An Empirical Study of Rationality-Based Beliefs and Information Security Awareness”, MIS Quarterly, 2010, pp 523-548.

¹⁰ Ν. Μαντατσίνης «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2010 σελ 385 - 394.

- Βάση μοντέλων: Είναι αποθήκη συλλογής μοντέλων διαθέσιμη στους χρήστες.
- Προσέγγιση μοντελοποίησης: Αφορά ένα πλαίσιο σωρευμένων εννοιών απαραίτητων για τη σχεδίαση ενός συστήματος διαχείρισης μοντέλων.
- Γλώσσα μοντελοποίησης: Είναι μια οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού για την έκφραση αφηρημένων εννοιών.

Σύμφωνα με τον Bell et al. (1985) τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των προβλημάτων μιας απόφασης διακρίνονται σε **περιγραφικά**, ο ορισμός τους γίνεται με μαθηματικές σχέσεις, σε **κανονιστικά**, όπου η λήψη απόφασης γίνεται από έναν υπεράνθρωπο που ακολουθεί ένα λογικό σύνολο ορισμάτων και τα **ρυθμιστικά** όπου η ανάλυση των προβλημάτων προκύπτει με την κρίση νοημόνων ατόμων.

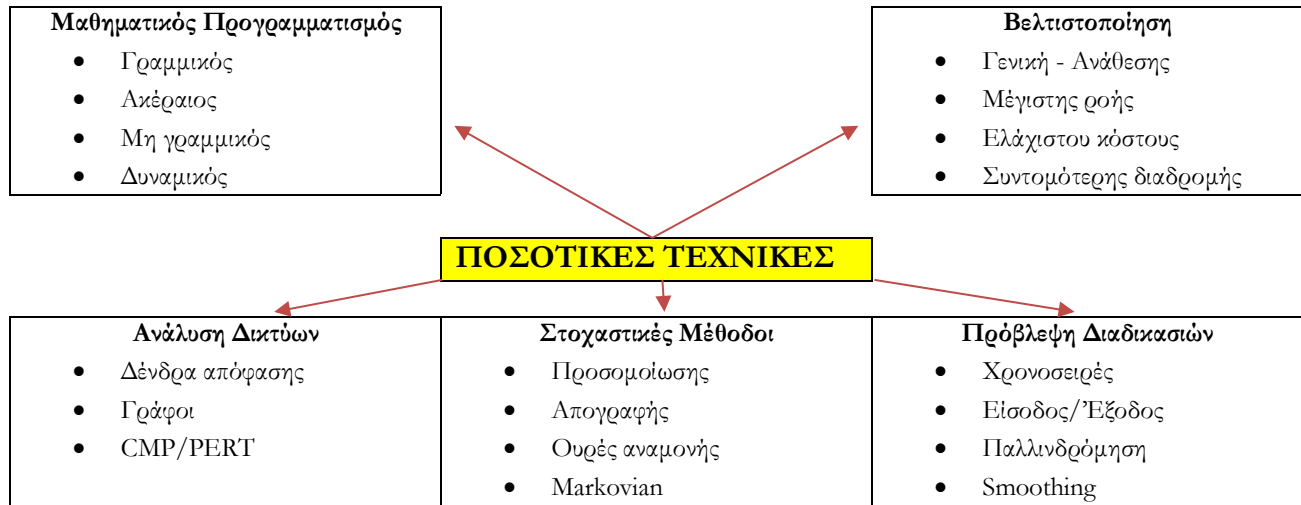
§1.5 Ταξινόμηση μοντέλων

Πολλές φορές ο αποφασίζων καλείται να αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα και να καταλήξει σε μία λύση που δεν είναι προφανής ή δεν δύναται να επιλέξει μεταξύ κάποιων εναλλακτικών και θα απαιτηθεί να ορισθεί μια συνάρτηση f μεταξύ ανεξάρτητων μεταβλητών x_1, x_2, \dots, x_n και μιας ανεξάρτητης μεταβλητής y με σκοπό να βρεθούν εκείνες οι τιμές των μεταβλητών οι οποίες θα δώσουν την καλύτερη τιμή εξαρτημένης μεταβλητής y . Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο οδηγεί στον αποφασίζοντα στην καλύτερη λύση. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας σύμφωνα με τον Ragsdale (2001) των μαθηματικών μοντέλων:

Κατηγορίες	Χαρακτηριστικά		
	Συνάρτηση	Αν. Μεταβλητές	Τεχνικές Επιχ. Έρευνας
Ρυθμιστικά μοντέλα	Γνωστή Καλώς ορισμένη	Γνωστή / υπό έλεγχο αποφασίζοντα	Γραμμικός, μη γραμμικός, ακέραιος προγραμματισμός, δίκτυα
Πρόβλεψης	Άγνωστη Κακώς ορισμένη	Γνωστή / υπό έλεγχο αποφασίζοντα	Ταξινομική ανάλυση, Ανάλυση παλινδρόμησης
Περιγραφικά	Γνωστή Καλώς ορισμένη	Άγνωστη / Αβέβαιη	Προσομοίωση, ουρές, μοντέλα απογραφής

Πίνακας 2.: Ταξινόμηση μαθηματικών μοντέλων

Σύμφωνα με τον Davis (1988) τα μοντέλα της επιχειρησιακής έρευνας ταξινομούνται όπως στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.: Ταξινόμηση μοντέλων κατά Davis

Τα μοντέλα τα οποία διαθέτει ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων εξαρτώνται κατά κύριο λόγο τις απαιτήσεις των χρηστών που τις υποστηρίζουν και δευτερευόντως από τις εφαρμογές τους και το είδος των αποφάσεων.

§1.6 Διαδικασίες μοντελοποίησης

Κατά τη φάση σχεδίασης της διαδικασίας λήψης απόφασης ακολουθούνται τα ακόλουθα διαδοχικά βήματα για την μοντελοποίηση ενός προβλήματος:

- **Συστατικά μοντέλου:** Περιλαμβάνουν μεταβλητές απόφασης, αστάθμητες μεταβλητές και τη μαθηματική έκφραση του μοντέλου που συνδέει τις μεταβλητές απόφασης και τις αστάθμητες μεταβλητές.
- **Δομή μοντέλου:** Είναι η μαθηματική έκφραση των συστατικών (ισότητα - ανισότητα).
- **Αρχές επιλογής :** Αφορά τη βέλτιστη λύση, ή την ικανοποιητική λύση και την ακολουθούμενη διαδικασία επίτευξης της.
- **Εναλλακτικές επιλογές :** Η ύπαρξη των εναλλακτικών είναι απαραίτητη διότι η επίλυση του μοντέλου δεν είναι η λύση του προβλήματος, αλλά μία δυνατή λύση.
- **Πρόβλεψη αποτελεσμάτων :** Απαιτείται η πρόβλεψη όλων των εναλλακτικών λύσεων καθόσον υφίσταται σύγκριση και εκτίμηση των κριτηρίων που έχουν προκριθεί.
- **Μέτρηση αποτελεσμάτων :** Σε μονάδες που έχουν προκαθοριστεί.

- Σενάρια : Η περιγραφή μιας διαδικασίας για την εξέταση της δυνατής λύσης (το βέλτιστο , το αδύναμο-χείριστο , ενδιάμεσο/ μέση κατάσταση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γραμμικός προγραμματισμός

§2.1 Εισαγωγή

Παρότι είναι σχετικά νέα επιστήμη, ο Γραμμικός Προγραμματισμός, γνώρισε άνθιση και πρόοδο σε κλάδους της πληροφορικής και όχι μόνο. Εξάλλου, ο ίδιος ο Γ.Π αποτελεί τμήμα της Πληροφορικής η γέννηση του οποίου προέκυψε στη διάρκεια του Β' παγκόσμιου πολέμου ως ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για να μειώσει το κόστος τους και παράλληλα να αυξήσει τις απώλειες του εχθρού στη διεξαγωγή των μαχών. Μεταπολεμικά, πολλές βιομηχανίες προτίμησαν τη χρήση του στον καθημερινό τους σχεδιασμό. Οι ιδρυτές του θέματος είναι ο Leonid Kantorovich, Ρώσος μαθηματικός το 1939 που ανέπτυξε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, ο George B. Dantzig το 1947, ο οποίος δημοσίευσε τη μέθοδο Simplex, και John Von Neumann, ο οποίος ανέπτυξε τη θεωρία της δυαδικότητας κατά την ίδια χρονική περίοδο¹¹.

Το γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού παρουσιάστηκε αρχικά να λυθεί από τον Leonid Khachiyan το 1979, αλλά μια μεγαλύτερη θεωρητική και πρακτική λύση επιλέχθηκε το 1984, όταν η Narendra Karmarkar εισήγαγε μια νέα μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming) αποτελεί χωρίς αμφιβολία στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας το δημοφιλέστερο μοντέλο καθώς και της διοικητικής επιστήμης. Η μεγάλη επιτυχία που είχαν οι εφαρμογές του, σε προβλήματα λήψεως αποφάσεων σε δημόσιες, ιδιωτικές επιχειρήσεις, οργανισμούς και κρατικές οντότητες, οφείλεται από τη μία πλευρά στα επιτεύγματα της έρευνας οικονομολόγων και μαθηματικών σε θεωρητικό επίπεδο και από την άλλη πλευρά, στη ταχύτατη ανάπτυξη της πληροφορικής επιστήμης και τεχνολογίας¹².

Ο Γ.Π είναι μία μαθηματική τεχνική¹³ που βοηθά στο σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις απαραίτητες εξισορροπήσεις για την κατανομή των πόρων.

¹¹ Οικονόμου Σ., και Γεωργίου Κ. «Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων», Εκδόσεις Ευγ. Μπένου, Αθήνα 1999, σελ 12-15.

¹² Barlow, F.G. , «Excel Models for Business and Operations Management», John Wiley & Sons, Chichester, Sussex 1999, pp 33-35

¹³ Υψηλάντης Π., «Επιχειρησιακή Έρευνα», Εκδόσεις Προπομπός, 4η Έκδοση, 2012, σελ. 42

Υπολογίζει τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη τιμή του αντικειμενικού στόχου και παράλληλα εγγυάται την άριστη λύση του διατυπωμένου μοντέλου. Εν τέλει θα λέγαμε ότι είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική μαθηματικής μοντελοποίησης για τον καθορισμό της βέλτιστης κατανομής των πόρων ανάμεσα σε ανταγωνιστικές απαιτήσεις. Οι πόροι μπορεί να περιλαμβάνουν πρώτες ύλες, χρόνο, χρήματα, ανθρώπινο δυναμικό, μηχανήματα, χώρο κ.λπ. Είναι το μοντέλο εκείνο που αφορά, κάτω από κάποιους γραμμικούς περιορισμούς, στη μεγιστοποιεί ή στην ελαχιστοποιεί μία γραμμική συνάρτηση. Από οικονομικής πλευράς, ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια τεχνική που ασχολείται με το πρόβλημα της κατανομής των περιορισμένων πόρων ενός συστήματος στον ανταγωνιστικό χώρο της αγοράς κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Με το Γραμμικό Προγραμματισμό, ως επέκταση της γραμμικής άλγεβρας, βρίσκονται βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα τα οποία μπορούν να εκφραστούν με τη χρήση γραμμικών εξισώσεων και ανισοτήτων, δηλαδή αυτό που επιζητάμε, το αντικείμενο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Βέβαια, μέσω του Γραμμικού Προγραμματισμού μπορεί να παρέχονται λογικές και ρεαλιστικές αναπαραστάσεις πολλών προβλημάτων του πραγματικού κόσμου με κριτήριο μια σειρά υποθέσεων που υιοθετούνται κατά την διαδικασία εξειδίκευσης του μαθηματικού υποδείγματος του προβλήματος.

Τέλος, θεωρείται μία από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις του 20ου αιώνα και στις μέρες μας, αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων εμπορικών – βιομηχανικών εταιρειών¹⁴. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια επικρατεί η αντίληψη ότι, μία στις δύο εφαρμογές μοντέλων επιχειρησιακής έρευνας, σε πραγματικά προβλήματα διοίκησης, παραπέμπουν στον γραμμικό προγραμματισμό. Αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση διαφόρων περίπλοκων προβλημάτων αποφάσεων. Η ποιότητα των αποφάσεων αυτών, όμως εξαρτάται από την ακρίβεια της περιγραφής της κατάστασης που μελετάται, καθώς και από την καταλληλότητα των προϋποθέσεων ή των επιβαλλόμενων απλουστεύσεων. Άρα σημαντικό ρόλο στο Γ.Π έχει η ακρίβεια της διατύπωσης του προβλήματος.

§2.2 Γενικά περί Γ.Π.

Με τον όρο «Προγραμματισμός» σε μια εταιρία, ένα φορέα ή μία κρατική οντότητα εννοούμε, τη διαδικασία λήψης και υλοποίησης αποφάσεων που θα οδηγήσουν στην επίτευξη

¹⁴ Κόγκας Δ., «Στρατηγικό Επιχειρησιακό Περιβάλλον-Στρατηγική Διοίκηση», έκδοση Γ. Μπένου, Αθήνα 2007, σελ. 24-

ατομικών, ομαδικών και οργανωτικών στόχων. Οι λειτουργίες του προγραμματισμού στις εταιρίες είναι πολυδιάστατες και έχουν δυναμικό χαρακτήρα. Η πρώτη λειτουργία αφορά, τα επιχειρησιακά προβλήματα και οι αντίστοιχες λύσεις τους που δύναται κανείς να τις εξετάσει και να αναλύσει από διάφορες πλευρές (οικονομική, περιβαλλοντική, πολιτική, τεχνική κλπ) και η δεύτερη εστιάζει στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον μέσα στο οποίο λαμβάνονται οι αποφάσεις αλλά και στις μεταβαλλόμενες παραδοχές οι οποίες διέπουν τη λήψη οποιασδήποτε απόφασης..

Η ραγδαία ανάπτυξη των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών κατέστησε δυνατή τη χρήση περιγραφικών μαθηματικών προτύπων στοχεύοντας στη μελέτη σύνθετων προβλημάτων και ιδιαίτερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης (optimization models), δηλαδή πρότυπα κατά τα οποία η στρατηγική ή ο σχεδιασμός που προτείνουν επιτυγχάνει τη βέλτιστη τιμή ενός αντικειμένου. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εξεύρεση ενός σχεδιασμού ανεξάρτητων μεταβλητών που λαμβάνουν ακέραιες ή πραγματικές μεταβλητές και οι οποίες ονομάζονται παράμετροι ή μεταβλητές σχεδιασμού (design variables), έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) του προβλήματος.

Οι τεχνικές της βελτιστοποίησης βασίζονται στις αρχές του του Μαθηματικού Προγραμματισμού (Mathematical Programming – Μ.Π) χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η καλύτερη ή η άριστη λύση σε ένα πρόβλημα που απαιτεί μία απόφαση ή ένα σύνολο αποφάσεων σχετικά με τη χρησιμοποίηση των υπαρχόντων περιορισμένων πόρων για την επίτευξη ενός αντικειμενικού στόχου, αποτελεί στην ουσία το πεδίο των μαθηματικών που πραγματεύεται τη μοντελοποίηση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η μοντελοποίηση στοχεύει στην όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική απεικόνιση του πραγματικού προβλήματος, με μαθηματικές σχέσεις κατάλληλης μορφής, έτσι ώστε κάνοντας χρήση διαφόρων τεχνικών επίλυσης του μαθηματικού προγραμματισμού να βρεθεί η ζητούμενη λύση. Οι αρχές του Μ.Π μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες:

- Ο Γραμμικός προγραμματισμός (Linear Programming – L.P), ο οποίος αποτελεί μια ευρέως γνωστή μέθοδο της επιχειρησιακής έρευνας, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, έτσι ώστε να υποβοηθηθεί το έργο των αποφασίζόντων στη λήψη αποφάσεων¹⁵. Ο γραμμικός

¹⁵ Glassey R and Gupta V. «An LP analysis of paper recycling», In *studis in LP*, ed, H Salkin and J. Saha, N. York, N. Holland, 1975, pp 43-45

προγραμματισμός εντάσσεται στα μοντέλα επιχειρησιακής έρευνας τα οποία περιέχουν επιπλέον μοντέλα :

- Αποφάσεων (Συστηματοποιούν τις μεθόδους σύγκρισης εναλλακτικών αποφάσεων και ακολουθώντας την επιλογή της βέλτιστης λύσης σε συνθήκες αβεβαιότητας και ρίσκου).
- Προβλημάτων μεταφοράς (Επιτρέπουν τη βέλτιστη επιλογή των διαδρομών για τη μεταφορά των αγαθών από τα σημεία παραγωγής ή αποθήκευσης στα σημεία κατανάλωσης με τον πιο οικονομικό τρόπο).
- Δικτυωτής ανάλυσης (Χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση μιας πραγματικής κατάστασης σε μορφή δικτύου. Με αυτά είναι δυνατός ο προσδιορισμός των χρονικών ορίων μέσα στα οποία θα πρέπει να αρχίσει και να περατωθεί η κάθε εργασία ώστε να συμπληρωθεί η εκτέλεση του έργου σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα).
- Ουρές αναμονής (Σε αυτή την περίπτωση μας ενδιαφέρει η το δυνατόν καλύτερη λειτουργία των μονάδων «εξυπηρέτησης» , οπότε επιτρέπουν την ανάλυση παρόμοιων καταστάσεων έτσι ώστε λαμβάνοντας υπόψη το κόστος εξυπηρέτησης και το κόστος αναμονής, που εξαρτάται από το χρόνο, να προσδιοριστεί το βέλτιστο επίπεδο εξυπηρέτησης).
- Προγραμματισμού και ελέγχου αποθεμάτων (Είναι ένας από τους σημαντικότερους τομείς της διοίκησης παραγωγής και δίνουν απαντήσεις σε ερωτήματα που θέτει η επιχείρηση ώστε να ελαχιστοποιεί το κόστος της, διότι τα αποθέματα αποτελούν σημαντικό κόστος για αυτή, λόγω του ότι αντιπροσωπεύουν κεφάλαια που είναι δεσμευμένα/παγωμένα και τα οποία η επιχείρηση δεν μπορεί να τα αξιοποιήσει σε άλλες δραστηριότητες).
- Προσομοίωσης (Είναι ένας τρόπος προσέγγισης στην ανάλυση σύνθετων προβλημάτων των οποίων η απεικόνιση σε ένα αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο δεν είναι δυνατή, είτε λόγω της πολυπλοκότητας τους ή διότι οι τιμές των παραμέτρων τους παρουσιάζουν τυχαίες διακυμάνσεις).
- Ο Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming – N.L.P) όπου σε όλες τις περιπτώσεις η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις περιορισμού είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού. Επισημαίνεται ότι σε αυτή την περίπτωση η εύρεση ενός τοπικού ελάχιστου δεν πιστοποιεί την εύρεση ενός καθολικού ελάχιστου.

- Ο Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming - IP) , όπου οι μεταβλητές σχεδιασμού δεν είναι συνεχείς, αλλά παίρνουν διακριτές τιμές (συνήθως είναι ακέραιες) από κάποιο συγκεκριμένο σύνολο τιμών.
- Ο Γεωμετρικός Προγραμματισμός (Geometric Programming - GP), που αφορά σε μία ειδική κατηγορία προβλημάτων, όπου η αντικειμενική συνάρτηση αλλά και οι συναρτήσεις περιορισμού είναι πολυωνυμικής μορφής με την υποσημείωση ότι οι μεταβλητές σχεδιασμού λαμβάνουν πάντα θετικές τιμές.
- Ο δυναμικός προγραμματισμός, σύμφωνα με τον οποίο υφίστανται μαθηματικά μοντέλα που χρησιμεύουν στον καθορισμό της στρατηγικής των διαδοχικών/αλληλένδετων αποφάσεων όπου το αποτέλεσμα της κάθε μιας επηρεάζει τις επιλογές που θα προκριθούν στις επόμενες φάσεις.

Τέλος στον Μαθηματικό Προγραμματισμό συμπεριλαμβάνεται η Πολυκριτήρια Ανάλυση (Multicriteria Analysis – Π.Α) η οποία αποτελεί έναν εξελιγμένο κλάδο της επιχειρησιακής έρευνας για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Η λήψη αποφάσεων αποτελεί έναν τομέα της επιχειρησιακής έρευνας με δυναμική ανάπτυξη, τόσο σε πρακτικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο. Τα προβλήματά της δεν επιλύονται μονοδιάστατα¹⁶. Πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα εκείνα τα κριτήρια που επηρεάζουν ποικιλοτρόπως τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων και να συνδυαστούν κατάλληλα μεταξύ των για την ορθολογική λύση των εκάστοτε προβλημάτων.

§2.3 Χρήση – Χρησιμότητα και απαιτήσεις Γ.Π.

Ο Γ.Π είναι μια τεχνική που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) μιας ή περισσότερων γραμμικών συναρτήσεων (κριτήρια βελτιστοποίησης) και αγνώστων πραγματικών μεταβλητών, των οποίων το πεδίο τιμών οριοθετείται από γραμμικούς περιορισμούς (ανισοεξισώσεις). Οι άγνωστες μεταβλητές μοντελοποιούν το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και γι αυτό ονομάζονται μεταβλητές απόφασης¹⁷.

Ο Γ.Π αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο βελτιστοποίησης για ποικίλους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ότι πολλά πρακτικά προβλήματα της επιχειρησιακής έρευνας μπορούν να εκφραστούν με συγκεκριμένο τρόπο ως προβλήματα αυτής της κατηγορίας.

¹⁶ Σίσιος Γ. «Γραμμικός Προγραμματισμός», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 1998, σελ. 13-15.

¹⁷ Senior B. & Fleming J., «Organizational Change», Prentice Hall, 3rd edition, London, 2007, pp76-79.

Η επίλυση προβλημάτων μέσω της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού, χρησιμοποιείται ευρέως στη μικροοικονομία καθώς και στη διαχείριση μίας οποιασδήποτε εταιρείας (όπως στον σχεδιασμό, στην παραγωγή, στην μεταφορά και σε άλλα θέματα). Αν και τα σύγχρονα θέματα διαχείρισης είναι συνεχώς μεταβαλλόμενα, οι περισσότερες εταιρείες, οι επιχειρησιακοί ερευνητές αλλά και η πλειοψηφία των αναλυτών προβλημάτων απόφασης, χρησιμοποιούν τον γραμμικό προγραμματισμό προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη ή να ελαχιστοποιήσουν το κόστος τους.

Προβλήματα απόφασης αυτής της μορφής είναι, για παράδειγμα, η κατανομή του εργατικού δυναμικού, η κατανομή κεφαλαίου σε διάφορα επενδυτικά προγράμματα, η σωστή διαχείριση τεχνολογικού εξοπλισμού και πρώτων υλών σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, κτλ.

Η δόμηση ενός προβλήματος Γ.Π απαιτεί τα παρακάτω:

- Παρουσία περιορισμών για τη ελαχιστοποίηση σε βαθμό στον οποίο μπορεί να επιδιωχθεί ο αντικειμενικός στόχος.
- Πρέπει να υπάρχουν εναλλακτικοί τρόποι δράσης για να επιλεγθεί τελικά ένας από αυτούς.
- Τα προβλήματα Γ.Π. επιδιώκουν να μεγιστοποιήσουν ή να ελαχιστοποιήσουν κάποια ποσότητα (συνήθως κέρδους ή κόστους) εκφρασμένη ως αντικειμενική συνάρτηση.
- Ο αντικειμενικός στόχος και οι περιορισμοί των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού πρέπει να εκφράζονται με γραμμικές εξισώσεις ή ανισότητες.

Όπως αναφέρθηκε ένα μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού επιδιώκει να μεγιστοποιήσει ή να ελαχιστοποιήσει μία γραμμική συνάρτηση που υπόκειται σε ορισμένους γραμμικούς περιορισμούς. Το γραμμικό μοντέλο αποτελείται από ένα σύνολο από μεταβλητές απόφασης, μία αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο από περιορισμούς και αντίστοιχα είναι απαιτητές οι κάτωθι παραδοχές:

- Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί παρουσιάζουν σταθερότητα στις αποδόσεις κλίμακας.
- Οι τιμές των παραμέτρων είναι γνωστές με βεβαιότητα.
- Η παραδοχή της προσθετικότητας: Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης.
- Η παραδοχή της συνέχειας: Οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή μέσα σε ένα δεδομένο εφικτό εύρος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προβλήματα Γ.Π.

§3.1 Γενική μορφή προβλημάτων Γ.Π.

Σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού δεδομένων n μεταβλητών και m γραμμικών εξισώσεων ή ανισοτήτων, ζητούνται οι μη αρνητικές τιμές αυτών των μεταβλητών οι οποίες ικανοποιούν αυτές τις εξισώσεις/ανισώσεις και βελτιστοποιούν (μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν) συγκεκριμένη γραμμική συνάρτηση αυτών των μεταβλητών. Μπορούμε να διαμορφώσουμε το μαθηματικό μοντέλο ενός γενικού¹⁸ προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού επιλέγοντας τις τιμές των X_1, X_2, \dots, X_n , έτσι ώστε:

$$\text{Maximize/Minimize } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \text{ (Αντικειμενική Συνάρτηση)}$$

Με τους περιορισμούς,

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n \leq, =, \geq B_1$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n \leq, =, \geq B_2$$

.....

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n \leq, =, \geq B_m$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0 \text{ (Μη αρνητικότητα)}$$

Αυτή είναι μία γενική μορφή ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού. Κάθε πρόβλημα του οποίου το μαθηματικό μοντέλο ακολουθεί την παραπάνω φόρμα είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

- Η συνάρτηση (Z) που επιζητούμε να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function).
- Κάθε περιορισμός είναι μια γραμμική συνάρτηση ως προς τις μεταβλητές X_i .
- Οι συντελεστές C_j αναφέρονται και ως συντελεστές κόστους και αντιπροσωπεύουν το μοναδιαίο κόστος.

¹⁸ Βασιλείου Π., Τσάντας Ν., «Εισαγωγή στην Επιχ. Έρευνα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα, 2000, σελ. 54-55

- Οι πρώτοι m περιορισμοί ονομάζονται λειτουργικοί περιορισμοί (functional constraints).
- Ο τελευταίος περιορισμός αναφέρετε ως συνθήκη της μη αρνητικότητας.

§3.2 Τυπική μορφή προβλημάτων Γ.Π.

Στην τυπική μορφή όλοι οι περιορισμοί του γραμμικού προβλήματος είναι διατυπωμένοι με εξισώσεις. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιλύεται το γραμμικό πρόβλημα δια της αλγεβρικής μεθόδου Simplex¹⁹. Όπως αναφέραμε, προϋπόθεση για την μετατροπή ενός γ.π. στην τυπική μορφή είναι απαραίτητο να μετατραπούν οι ανισωτικές σχέσεις σε μορφή εξισώσεων.

Maximize/Minimize $Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$ (Αντικειμενική Συνάρτηση)

Με τους περιορισμούς,

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n = B_1$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n = B_2$$

.....

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \dots + A_{mn}X_n = B_m$$

$$\text{Και } X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0 \text{ (Μη αρνητικότητα)}$$

Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή νέων μεταβλητών οι οποίες ονομάζονται χαλαρές μεταβλητές (slack variables). Σε κάθε περιορισμό της μορφής (\leq), (μεγιστοποίηση προβλημάτων), προστίθεται μια χαλαρή μεταβλητή, η οποία υπόκειται στον περιορισμό της μη αρνητικότητας. Σε κάθε περιορισμό της μορφής (\geq), (ελαχιστοποίηση προβλημάτων), αφαιρείται μία διαφορετική χαλαρή μεταβλητή, η οποία υπόκειται στον περιορισμό της μη αρνητικότητας.

Παράδειγμα:

$$a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pn}X_n \leq b_p \rightarrow a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pn}X_n + X_{n+p} = b_p$$

¹⁹ Η μέθοδος Simplex είναι μια καθορισμένη σειρά επαναλαμβανόμενων υπολογισμών μέσω των οποίων ξεκινώντας από ένα αρχικό σημείο της περιοχής των εφικτών λύσεων οδηγούμαστε σε κάθε επανάληψη από ένα ακραίο σημείο (κορυφή) της περιοχής των εφικτών λύσεων σε ένα άλλο, γειτονικό με το προηγούμενο, το οποίο αντιστοιχεί σε καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εντοπισθεί η βέλτιστη λύση.

$$a_{q1}x_1 + a_{q2}x_2 + \dots + a_{qn}x_n \geq b_q \rightarrow a_{q1}x_1 + a_{q2}x_2 + \dots + a_{qn}x_n - x_{n+q} = b_q$$

Με τον όρο λύση εννοούμε τη τελική απάντηση την οποία και επιζητούμε σε ένα πρόβλημα. Στον γραμμικό προγραμματισμό, καθώς και στις επεκτάσεις του, ο κανόνας είναι τελείως διαφορετικός επειδή εδώ ως λύση θα θεωρούμε κάθε προσδιορισμό τιμών για τις μεταβλητές απόφασης (x_1, x_2, \dots, x_n) άσχετα με το αν είναι μια επιθυμητή ή ακόμα και επιτρεπτή επιλογή.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν τα παρακάτω είδη λύσεων.

- Εφικτή λύση (feasible solution) είναι η λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς σε ένα πρόβλημα. Ένα πρόβλημα όμως είναι δυνατό να μην έχει εφικτές λύσεις. Στη γραφική αναπαράσταση ενός προβλήματος Γ.Π. , η περιοχή των εφικτών λύσεων ονομάζεται εφικτή περιοχή στην οποία ερευνάται η ύπαρξη εφικτών λύσεων με την εύρεση της βέλτιστης.
- Βέλτιστη λύση (optimal solution) είναι η κάθε εφικτή λύση, η οποία βελτιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Συνήθως ένα πρόβλημα έχει μια βέλτιστη λύση όμως είναι δυνατό να έχουμε και πολλαπλές βέλτιστες λύσεις οπότε σ' αυτή την περίπτωση το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού θα έχει άπειρες βέλτιστες λύσεις.
- Καμία βέλτιστη λύση αυτό συμβαίνει μόνο όταν δεν έχει καμία εφικτή λύση ή όταν οι περιορισμοί δεν εμποδίζουν την αύξηση ή μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης προς την επιθυμητή κατεύθυνση²⁰.

§3.3 Προϋποθέσεις εφαρμογής του Γ.Π.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού θα πρέπει αρχικά να πραγματοποιηθεί έλεγχος εάν μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή γραμμικών σχέσεων (συναρτήσεων), που σημαίνει ότι ικανοποιούνται οι παρακάτω θεμελιώδεις παραδοχές – αρχές²¹. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι: Αρχή της Αναλογικότητας - Αρχή της Αθροιστικότητας - Αρχή της Διαιρετότητας - Αρχή της Βεβαιότητας.

Αρχή της Αναλογικότητας Η υπόθεση της αναλογικότητας συνδέεται τόσο με την αντικειμενική συνάρτηση όσο και με τους περιορισμούς. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η

²⁰ Δαρζέντας Ι., Τσαγγάρης Χ., «Σημειώσεις στο Μάθημα Επιχειρησιακή Έρευνα Ι», Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστημίου Αιγαίου, Σάμος, 1999, σελ. 16-19

²¹ Βασιλείου Π., Τσάντας Ν., «Εισαγωγή στην Ε.Ε.», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2000, σελ. 56-57

συνεισφορά κάθε δραστηριότητας j στην διαμόρφωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης f είναι ανάλογη της στάθμης της δραστηριότητας x_j και εκφράζεται από τον όρο $c_j x_j$ ($j=1, \dots, n$). Αντίστοιχα, η συνεισφορά κάθε δραστηριότητας j στην διαμόρφωση της τιμής του αριστερού μέλους ενός περιορισμού i ($i=1, \dots, m$) είναι ανάλογη της στάθμης της δραστηριότητας x_j και εκφράζεται από τον όρο $a_{ij} x_j$ ($j=1, \dots, n$) του περιορισμού αυτού. Με βάση την υπόθεση αυτή σε κανένα όρο, τόσο στην αντικειμενική συνάρτηση όσο και στις συναρτήσεις των περιορισμών, δεν εμφανίζεται μεταβλητή με εκθέτη διαφορετικό της μονάδας.

Αρχή της Αθροιστικότητας

Όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση αυτό σημαίνει ότι η συνεισφορά κάθε μεταβλητής απόφασης στην τιμή του z είναι ανεξάρτητη από τις τιμές που παίρνουν οι άλλες μεταβλητές απόφασης.

Όσον αφορά τους περιορισμούς, η αθροιστικότητα σημαίνει ότι η κατανάλωση από μία μεταβλητή απόφασης ενός πόρου στο αριστερό μέλος ενός περιορισμού, είναι ανεξάρτητη από τις τιμές που παίρνουν οι άλλες μεταβλητές.

Όπως είναι φανερό, οι υποθέσεις της Αναλογικότητας και της Αθροιστικότητας ορίζουν ότι όλες οι εμπλεκόμενες στο μοντέλο συναρτήσεις είναι γραμμικές.

Αρχή της Διαιρετότητας. Για το μοντέλο του γραμμικού προγραμματισμού υποτίθεται ότι κάθε δραστηριότητα (δηλ μεταβλητή) πρέπει να είναι συνεχής και επομένως άπειρα διαιρετή. Αυτό συνεπάγεται ότι όλα τα επίπεδα δραστηριοτήτων και όλες οι χρήσεις πόρων μπορούν να πάρουν κλασματικές τιμές ή ακέραιες τιμές²². Όταν η υπόθεση της διαιρετότητας δεν ισχύει όταν υπάρχουν δύο ενδεχόμενα:

- Αγνόηση της υπόθεσης αυτής, λύση του προβλήματος με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού, και στρογγυλοποίηση των τιμών των μεταβλητών στην κοντινότερη ακέραια μονάδα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως όταν οι τιμές των μεταβλητών είναι μεγάλες.
- Χρήση τεχνικών του ακέραιου προγραμματισμού όταν οι τιμές των μεταβλητών είναι μικρές (π.χ. 0 ή 1), όπως σε πολλά προβλήματα επενδύσεων.

Αρχή της βεβαιότητας. Η υπόθεση της βεβαιότητας αφορά στις παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή τους συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης, τους περιορισμούς και

²² Κολέτσος, Ι. «Γραμμικός Προγραμματισμός. Ανάκτηση από Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Μαθηματικών», (2017). <http://www.math.ntua.gr/~coletsos/Documents/paradeigmata.pdf>

τους σταθερούς όρους. Σύμφωνα με την υπόθεση, κάθε παράμετρος του μοντέλου είναι γνωστή με βεβαιότητα με αποτέλεσμα το μοντέλο να είναι προσδιοριστικό.

§3.4 Χαρακτηριστικά και παραδοχές προβλημάτων του Γ.Π.

Αν και οι εφαρμογές του Γ.Π. ποικίλουν, εν τούτοις όλα τα προβλήματα του έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως:

- Κάθε πρόβλημα Γ.Π, περιλαμβάνει μια σειρά από μεταβλητές που συνήθως αντιπροσωπεύουν τις ποσότητες που πρέπει να προσδιοριστούν μέσω της επίλυσής του (προβλήματα μεγιστοποίησης / ελαχιστοποίησης).
- Σε όλα τα προβλήματα του Γ.Π, αποβλέπουμε στην καλύτερη δυνατή αύξηση του κέρδους ή στην αντίστοιχη μείωση του κόστους δηλαδή στη βέλτιστη λύση.
- Το κέρδος ή το κόστος δίνεται από μια γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών που προαναφέραμε την οποία αποκαλούμε αντικειμενική συνάρτηση.
- Σε όλα τα προβλήματα του Γ.Π, είναι απαραίτητο να υπάρχουν οι περιορισμοί, οι οποίοι θα οριοθετούν τη δυνατότητα της απεριόριστης αύξησης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης όταν επιζητούμε το κέρδος και την απεριόριστη ελάττωσή της όταν επιζητούμε το κόστος (αύξηση κέρδους/μείωση κόστους).
- Κάθε πρόβλημα Γ.Π, περιέχει τις εναλλακτικές λύσεις εκ των οποίων θα επιλεγεί η βέλτιστη. Η διαδικασία επιλογής γίνεται μέσω διαφορετικών αναλογιών με σκοπό να αναδειχτεί η βέλτιστη λύση. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας του Γ.Π, απαιτούνται ορισμένες παραδοχές σύμφωνα με τις οποίες υποθέτουμε ότι:
 - Οι συντελεστές των προσδιορισμών καθώς και οι συντελεστές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σταθεροί και δεν υπόκεινται σε τυχαίες διακυμάνσεις.
 - Οι παραπάνω συντελεστές, έχουν αναλογική καθώς και αθροιστική ισχύ (δηλαδή οι περιορισμοί του προβλήματος είναι γραμμικοί).
 - Η παραγωγή είναι συνεχής (δηλαδή η παραγωγή οποιασδήποτε ποσότητας είναι ακέραια ή κλασματική).

§3.5 Μοντελοποίηση Γ.Π.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Γ.Π. απαιτείται αρχικά η δημιουργία μίας μαθηματικής διατύπωσης του συγκεκριμένου επιχειρησιακού προβλήματος. Η διατύπωση αυτή μπορεί να είναι αρκετά εύκολη ή πολύπλοκη ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, όπου η μοντελοποίηση αυτού γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω στάδια:²³

- Βήμα 1^ο: Αντικείμενο απόφασης: Στο πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης έγκειται ο καθορισμός των μεταβλητών απόφασης. Οι μεταβλητές αυτές οφείλουν να αντανακλούν απόλυτα το ζητούμενο της απόφασης, μέσα από τις ανάγκες του περιβάλλοντος στο οποίο θα παρθεί η απόφαση και σύμφωνα με τις αξίες της κοινωνίας (αναβάθμιση των συνθηκών εργασίας, καθαρό φυσικό περιβάλλον κτλ). Το αντικείμενο της απόφασης ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό του συνόλου των λύσεων ($A = \{ x \in R' / Ax \leq b, x \geq 0 \}$) μετά από τη διαμόρφωση περιορισμών που είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Η τεχνολογία, το περιβάλλον, οι πόροι αλλά και οι προτιμήσεις είναι η κατ' εξοχήν πηγή των έμμεσων επιτρεπτών ορίων μέσα στα οποία υπάρχουν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης.

- Βήμα 2^ο: Ο αναλυτής του προβλήματος, οφείλει να διαμορφώσει γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις (των μεταβλητών απόφασης x) σύμφωνα με τους στόχους και τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα (μεγιστοποίηση παραγωγικότητας, ελαχιστοποίηση ρύπανσης του περιβάλλοντος κτλ). Τα κριτήρια αυτά έχουν την εξής μορφή:

$$\text{➤ } [\max] f_1(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$\text{➤ } [\min] g_1(x) = d_1x_1 + d_2x_2 + \dots + d_nx_n$$

Όπου ο αριθμός n των κριτηρίων και (c_i, d_i) με $i = 1, 2, 3, \dots, n$, είναι η μήτρα των συντελεστών των αντικειμενικών συναρτήσεων.

- Βήμα 3^ο Μοντέλα απόφασης: Ο αναλυτής χρησιμοποιεί μια σειρά από αλγορίθμους και συναφείς τεχνικές για την επίτευξη βέλτιστων λύσεων και τη τεκμηρίωση αυτών. Σε προβλήματα καθαρής βελτιστοποίησης, όταν το κριτήριο είναι ένα και μοναδικό, χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο επίτευξης βέλτιστης λύσης, ο γνωστός αλγόριθμος Simplex. Οι τεχνικές αυτές που συμβάλλουν αποτελεσματικά στην ανάλυση είναι οι εξής²⁴:

²³ Οικονόμου Σ., και Γεωργίου Κ. «Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων», Εκδόσεις Μπένου, Αθήνα, 1999, σελ 34-36.

²⁴ Clarke T. & Clegg S., «Changing Paradigms: The Transformation of Management Knowledge for the 21st Century», Profile Books Ltd., London, 2008, pp 37-38.

- Ανάπτυξη λύσης
- Ανάλυση ευαισθησίας
- Παραμετρική ανάλυση
- Ανάλυση ευστάθειας

• Βήμα 4^ο Υποστήριξη απόφασης: Ο αναλυτής έχει ως στόχο να πείσει τον αποφασίζοντα για την αξία μιας λύσης. Σε περίπτωση που η λύση και οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον που θα παρθεί η απόφαση δεν ικανοποιούν τον αποφασίζοντα, θα πρέπει ο αναλυτής να μπει στη διαδικασία να επιλέξει προς αναθεώρηση ένα ή περισσότερους από τους παράγοντες:

- Τεχνολογία (ανακαινιση τεχνολογικού εξοπλισμού κ.α.)
- Περιβάλλον (βελτίωση συνθηκών εργασίας, κ.α.)
- Πόροι (αύξηση προϋπολογισμού, νέες προμήθειες πρώτων υλών, κ.α.)
- Προτιμήσεις (αλλαγή πολιτικής: προσθήκη νέων αντικειμενικών συναρτήσεων, κ.α.)

§3.6 Γραφική επίλυση προβλημάτων Γ.Π.

Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται ο τρόπος επίλυσης των προβλημάτων του Γ.Π με τη γραφική μέθοδο, ένας εναλλακτικός τρόπος που βοηθά στην κατανόηση της φύσης των προβλημάτων και της μεθοδολογίας επίλυσης τους. Τα προβλήματα Γ.Π. που περιέχουν 2 ή 3 μεταβλητές απόφασης, μπορούν να λυθούν με τη γραφική μέθοδο και συγκεκριμένα προβλήματα δύο μεταβλητών υλοποιούνται στο επίπεδο (δύο διαστάσεις), ενώ προβλήματα τριών μεταβλητών υλοποιούνται στον χώρο (τρεις διαστάσεις). Προκειμένου να λυθεί ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με τη γραφική μέθοδο, ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:

- Εύρεση των σημείων υπό των ορισθέντων περιορισμών
- Γραφικός σχεδιασμός των περιορισμών
- Σκίαση της περιοχής των εφικτών λύσεων
- Εντοπισμός της βέλτιστης/καλύτερης λύσης

➤ Με την προσέγγιση της απαρίθμησης και ελέγχου όλων των ακραίων σημείων (κορυφών) της εφικτής περιοχής, τον εντοπισμό όλων των συντεταγμένων όλων των κορυφών της εφικτής περιοχής και τέλος την επιλογή εκείνης που μεγιστοποιεί/ ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

➤ Με την προσέγγιση της χάραξης των καμπυλών ίσου κέρδους/ κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης προσδιορίζοντας το σημείο όπου η καμπύλη εφάπτεται της εφικτής περιοχής πριν την εγκαταλείψει.

Για την καλύτερη κατανόηση και χρήση της υπόψη μεθόδου επίλυσης των προβλημάτων του Γ.Π θα ήταν απαιτητό να αποσαφηνίσουμε έννοιες που ειπώθηκαν και συγκεκριμένα²⁵:

- Περιοριστική ευθεία: Είναι η ευθεία που αντιστοιχεί σε κάθε περιορισμό του προβλήματος που έχει τεθεί.
- Κορυφή ή ακραίο σημείο: Είναι το σημείο τομής των περιοριστικών ευθειών. (κοινό σημείο περιορισμών).
- Εφικτή περιοχή: Είναι η περιοχή των εφικτών λύσεων που περικλείεται από τις περιοριστικές ευθείες.
- Εφικτή λύση: Είναι το ακραίο σημείο, η κορυφή της εφικτής περιοχής.
- Γειτονικές εφικτές λύσεις: Είναι αυτές που συνδέονται με μια ακμή (σύνορο) της εφικτής περιοχής.
- Βέλτιστη λύση: Είναι η κορυφή της εφικτής περιοχής που δίνει στην αντικειμενική συνάρτηση τη βέλτιστη τιμή. Η οποία είναι μοναδική, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις με άπειρες άριστες λύσεις, ή καμία άριστη λύση, όπου στις περιπτώσεις αυτές αντικειμενική συνάρτηση να τείνει στο άπειρο.

²⁵ Κολέτσος, Ι. «Γραμμικός Προγραμματισμός. Ανάκτηση από Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Μαθηματικών», 2017, <http://www.math.ntua.gr/~coletsos/Documents/paradeigmata.pdf>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προβλήματα βελτιστοποίησης

§4.1 Εισαγωγή στη βελτιστοποίηση

Στον επιχειρηματικό χώρο όλες σχεδόν οι αποφάσεις που πρέπει να παρθούν από τις οικονομικές μονάδες, είτε είναι άτομα είτε επιχειρήσεις είτε δημόσιοι οργανισμοί, μπορούν να θεωρηθούν ως προβλήματα βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση μπορεί να αναφέρεται όχι μόνο στη μεγιστοποίηση του κέρδους αλλά και στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, στη χρησιμοποίηση του άριστου μεγέθους διαφήμισης, στην απασχόληση της άριστης ποσότητας από έναν παραγωγικό συντελεστή.

Αν και Θα έπρεπε να αποφεύγεται η ερμηνεία μέσω ορισμού μπορούμε να πούμε σύντομα και πολύ εισαγωγικά ότι, Βελτιστοποίηση είναι η επιλογή και η εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων για την επίλυση επιχειρησιακών προβλημάτων με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο και τον βέλτιστο τρόπο λειτουργίας οργανωμένων συστημάτων ή οργανωτικών/διεκπεραιωτικών διαδικασιών, δομημένη σε στάδια όπως παρακάτω:

- Αναγνώριση του προβλήματος και περιγραφή του: Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την παρατήρηση των συμπτωμάτων και την εντοπισμό των αιτιών του προβλήματος, καθώς και περιπτώσεις ομοιοτήτων με άλλα προβλήματα για να καθοριστούν οι αντικειμενικοί σκοποί/στόχοι.
- Καθορισμός των παραμέτρων του προβλήματος: Αφορά την ανίχνευση των παραγόντων που είναι ικανοί να επηρεάσουν τη λύση, ώστε να διερευνηθούν εναλλακτικές λύσεις.
- Εντοπισμός των περιορισμών του προβλήματος: Στο στάδιο αυτό προσδιορίζονται τα όρια εντός των οποίων δυνάμεθα να κινηθούμε.
- Αναζήτηση λύσεων και επιλογή της βέλτιστης: Με την εύρεση όλων των εφικτών λύσεων επιλέγεται η βέλτιστη βασιζόμενη στον αντικειμενικό στόχο που τέθηκε στο πρώτο στάδιο.
- Δοκιμή και εφαρμογή της βέλτιστης λύσης: Στο τελευταίο στάδιο η προτεινόμενη ως βέλτιστη λύση ελέγχεται για το επιθυμητό αποτέλεσμα και εφαρμόζεται στο ρεαλιστικό πρόβλημα. Πιθανόν το πιο δύσκολο τμήμα της διαδικασίας καθόσον ενέχει

κίνδυνος να μην προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα ακόμη και αν εφαρμοστεί η βέλτιστη λύση στην περίπτωση της μη ορθής εφαρμογής της.

Τέλος θα ήταν σκόπιμη η αναφορά του διαχωρισμού της βελτιστοποίησης ως διαδικασίας σε δύο κατηγορίες²⁶, τη βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς και τη βελτιστοποίηση με περιορισμούς.

Η βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς σημαίνει ότι για μια δραστηριότητα επιδιώκεται να μεγιστοποιηθεί το όφελος ή να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της χωρίς να τεθούν περιορισμοί για τους πόρους που θα χρησιμοποιηθούν.

Στη βελτιστοποίηση με περιορισμούς στο πρόβλημα επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της ωφέλειας ή η ελαχιστοποίηση του κόστους μιας δραστηριότητας με τον περιορισμό ότι υπάρχει ορισμένο μέγεθος πόρων που μπορούν να διατεθούν.

§4.2 Λειτουργία μοντέλου βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση ως διαδικασία βασίζεται κατά κύριο λόγο στη μοντελοποίηση του υπό εξέταση προβλήματος, κυρίως στα τρία πρώτα στάδια καθώς μέσω αυτών προκύπτει η επιστημονική διατύπωση του προβλήματος. Το μοντέλο είναι μια εξιδανικευμένη αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, όπως έχει ειπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όσο πιο πιστά αναπαριστάνει τη πραγματικότητα, τόσο πιο ρεαλιστική θα είναι και η λύση που θα προκύψει.

Το μοντέλο του προβλήματος συνήθως αποτελείται από ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν την κατάσταση και περιλαμβάνει μεταβλητές υπό τον έλεγχο μας (μία ή και περισσότερες), παραμέτρους ή αλλιώς δεδομένα που επηρεάζουν τη λύση του προβλήματος. Συνήθως είναι σταθερές (ντετερμινιστικά μοντέλα) αλλά μπορεί να υπόκεινται και σε τυχαίες διακυμάνσεις (στοχαστικά μοντέλα). Επίσης περιλαμβάνονται οι περιορισμοί μέσω εξισώσεων και ανισώσεων δομημένες από τον αναλυτή ώστε να υπακούουν οι μεταβλητές που έχουν ορισθεί. Τέλος περιλαμβάνεται ο αντικειμενικός στόχος που έχει τεθεί και ο οποίος δεν είναι πάντα μοναδικός αλλά μπορεί να αποτελείται από επί μέρους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν μέχρι την επίτευξη του επιλέγοντας τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της συνάρτησης.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, τα μοντέλα που θα προκύπτουν από τη μοντελοποίηση δεν είναι πάντοτε μαθηματικά μοντέλα, αλλά μπορεί να είναι εικονικά, όπως μία μακέτα, άλλα αναλογικά όπως οι στατιστικές καμπύλες ή και ψηφιακά μοντέλα

²⁶ Αλεξανδρίδης Αν. «Εφαρμοσμένη Βελτιστοποίηση», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2018, σελ. 44 - 47

προσομοίωσης, που απαιτούν Η/Υ για την επίλυσή τους μια και δεν είναι δυνατό να περιγραφούν με μαθηματικές σχέσεις.

Για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος και αφού επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο και κατασκευαστεί σε μαθηματική (ή άλλη) μορφή, εφαρμόζονται οι κατάλληλες τεχνικές για να βρεθούν οι δυνατές ή εφικτές λύσεις του. Από τις λύσεις αυτές θα προκύψει η βέλτιστη λύση η οποία θα ικανοποιεί εφ' ενός τους τιθέμενους περιορισμούς και θα πλησιάζει αφ' ετέρου περισσότερο από όλες τις άλλες δυνατές λύσεις στον επιθυμητό σκοπό.

Κατά τη δόμηση του μοντέλου πρέπει να προβλεφθεί και η ανάλυση ευαισθησίας, διότι με αυτήν μελετάται η επίδραση των σημαντικότερων παραμέτρων στη βέλτιστη λύση. Οι παράμετροι που θεωρήθηκαν αρχικά σταθερές δύνανται να μεταβληθούν ελαφρώς από εξωγενείς παράγοντες. Αν η βέλτιστη λύση επηρεάζεται σημαντικά από αυτές τις μικρές μεταβολές των παραμέτρων τότε δεν θα είναι η επιθυμητή.

Σε απλά προβλήματα με την επίλυση απλών μαθηματικών εξισώσεων η λύση αποτυπώνεται σχετικά εύκολα. Σε πολύπλοκες όμως περιπτώσεις, η λύση συχνά βρίσκεται μετά από επαναλαμβανόμενη διαδικασία «δοκιμή και λάθος», με τη χρήση επαναληπτικών τεχνικών και αλγορίθμων που υλοποιούνται μόνο μέσω Η/Υ (π.χ.: LINDO, QSB+, EXCEL κλπ.).

Με την ολοκλήρωση της δόμησης του μοντέλου και καταλήγοντας στο τελευταίο στάδιο ελέγχεται σαν πρώτο βήμα η αξιοπιστία του, αλλά και η αξιοπιστία της βέλτιστης λύσης που μας δίνει. Ο έλεγχος γίνεται μέσω σύγκρισης παλαιών δεδομένων με γνωστά αποτελέσματα. Αν το μοντέλο μας δώσει τα ίδια αποτελέσματα τότε μπορούμε να προχωρήσουμε στην εφαρμογή του.

Η εφαρμογή της λύσης σε real time στο πραγματικό πρόβλημα είναι το τελευταίο και πιο δύσκολο βήμα, γιατί δεν αρκεί μόνο μια καλή ερευνητική ομάδα, αλλά απαιτείται η συνεργασία και η συγκατάθεση όλων των ενδιαφερομένων ομάδων/αποφασιζόντων (κράτος, ιδιοκτήτες, επενδυτές, κλπ.). Ακόμη και η πιο τέλεια λύση αν εφαρμοστεί λάθος θα αποτύχει.

§4.3 Αλγοριθμικές τεχνικές

Όταν δίδεται ένα πρόβλημα, και πριν ασχοληθούμε με την κωδικοποίηση και τον προγραμματισμό, πρέπει προκαταρκτικά να κάνουμε μία θεωρητική μελέτη επί του

προβλήματος²⁷. Πιο συγκεκριμένα, μία καλή ιδέα είναι να προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε, αν το δεδομένο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με βάση κάποιες γενικές μεθοδολογίες ανάπτυξης αλγορίθμων.

Για την αλγοριθμική επίλυση ενός προβλήματος υπάρχουν κάποιες βασικές και θεμελιώδεις τεχνικές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Τέτοιες τεχνικές αποτελούν μία σειρά πολύτιμων εργαλείων για την αλγοριθμική επίλυση προβλημάτων και είναι άμεσα εφαρμόσιμες σε περίπτωση που αντιμετωπίζουμε κάποιο πρόβλημα, πριν χρησιμοποιήσουμε πιο προχωρημένες τεχνικές. Κάποιες τεχνικές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αναλύονται παρακάτω:

- Εξάντληση

Συνήθως είναι η τεχνική που επιλέγεται καθώς αποτελεί την πρώτη σκέψη για την επίλυση ενός προβλήματος. Ως κύρια ιδέα υλοποίησής της είναι η παραγωγή με έναν συγκεκριμένο τρόπο όλων των λύσεων σε ένα πρόβλημα και ταυτόχρονα να υλοποιείται ο έλεγχος της επιθυμητή ιδιότητα του αναλυτή (π.χ. κόστος μικρότερο από ένα προκαθορισμένο άνω όριο, κατώφλι). Βεβαίως υπάρχουν προβλήματα στα οποία αυτή είναι εκ φύσεως η μόνη λύση. Για παράδειγμα, αν θέλαμε όλες τις πιθανές λύσεις σε ένα τυχερό παιχνίδι πχ το ΛΟΤΤΟ θα έπρεπε προφανώς να παράγουμε όλους του πιθανούς συνδιασμούς.

- Άπληστη Μέθοδος

Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ότι λειτουργούν σε βήματα και σε κάθε βήμα γίνεται μια αμετάκλητη επιλογή για κάθε λύση. Η άπληστη επιλογή μπορεί να φανεί με βάση την τρέχουσα κατάσταση και κάποιο απλό κριτήριο. Είναι μία τεχνική εξαιρετικά ισχυρή που οδηγεί σε γρήγορους, απλούς και αποδοτικούς αλγορίθμους για αρκετά προβλήματα αλλά προφανώς όχι για όλα και η βέλτιστη λύση μπορεί να έλθει υπό προϋποθέσεις.

- Διαίρει και Βασίλευε

Η βασική ιδέα αυτής της εξαιρετικά ισχυρής τεχνικής είναι η διαίρεση του προβλήματος σε υποπροβλήματα που έχουν την ίδια τυποποίηση με το αρχικό πρόβλημα αλλά είναι μικρότερα σε μέγεθος. Καταλήγοντας στη λύση του κάθε υποπροβλήματος μεμονωμένα και οδηγούμαστε στη σύνθεση λύσης του αρχικού προβλήματος από τις λύσεις των υποπροβλημάτων ώστε να καταλήξουμε στην καλύτερη. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται από επάνω προς τα κάτω (top-down). Η τεχνική αυτή διακρίνεται για την ευκολία ανάλυσης

²⁷ D. Z. Du, P. M. Pardalos, W. Wu, «Μαθηματική Θεωρία Βελτιστοποίησης», Εκδ. Νέων Τεχνολογιών, 2005, pp 28-36

με αναδρομικές σχέσεις με πολλές σημαντικές εφαρμογές όπως προβλημάτων ταξινόμησης ενός πίνακα στοιχείων χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο της γρήγορης ταξινόμησης (quicksort) ή τον αλγόριθμο της συγχώνευσης (mergesort), πολλαπλασιασμός πινάκων, αριθμών, FFT, δυαδική αναζήτηση, ύψωση σε δύναμη.

- Δυναμικός Προγραμματισμός

Αυτή η εξαιρετικά χρήσιμη τεχνική στην ουσία είναι η τεχνική διαίρει και βασίλευε συνδυασμένη με την απομνημόνευση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων. Με την υπόψη τεχνική εξετάζονται προβλήματα με την αντίστροφη φιλοσοφία δηλαδή με προσέγγιση από κάτω προς τα επάνω (bottom - up). Πιο συγκεκριμένα, η φιλοσοφία των προβλημάτων αυτών είναι από την αρχή να επιλύονται τα μικρότερα προβλήματα και σταδιακά να επιλύονται τα μεγαλύτερα ως σύνθεση των απλούστερων. Η επίλυση των υποπροβλημάτων δεν γίνεται ανεξάρτητα αλλά υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση.

- Διακλάδωση και Περιορισμός

Αποτελεί μία γενική αλγοριθμική προσέγγιση για επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο υπόψη αλγόριθμος εκτελεί μία συστηματική απαρίθμηση όλων των υποψήφιων λύσεων εκτελώντας μία αναζήτηση στον χώρο των λύσεων. Θεωρούμε ότι οι υποψήφιες λύσεις αναπαρίστανται με ένα δένδρο, όπου η ρίζα του αντιστοιχεί σε όλες τις δυνατές λύσεις. Ο αλγόριθμος εξερευνά το δένδρο με τέτοιο τρόπο, ώστε για κάθε διακλάδωση (branch) να γίνεται ένας έλεγχος σε σχέση με ένα κάτω ή/και άνω φράγμα που αφορά στη βέλτιστη λύση (bound). Αν βρεθεί ότι στην υπόψη διακλάδωση δεν υπάρχει λύση που να μπορεί να οδηγήσει στη βέλτιστη, τότε δε συνεχίζεται η διερεύνηση αλλά προχωράμε σε άλλο κλάδο²⁸. Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου είναι του περιοδεύοντος πωλητή.

- Οπισθοδρόμηση

Η οπισθοδρόμηση είναι μία γενική τεχνική (επαναληπτικός λογάριθμος) κυρίως σε προβλήματα ικανοποίησης περιορισμών. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των προβλημάτων είναι η δυνατότητα αυξητικής κατασκευής των υποψήφιων λύσεων με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελέγχεται μία μερική λύση (το τμήμα της λύσης που έχει κατασκευαστεί), η οποία δεν μπορεί να οδηγήσει σε μία συνολική λύση και, επομένως μπορούμε να εγκαταλείψουμε την κατασκευή της (αναίρεση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων).

²⁸ Laguna, M., Kelly, J.P., Gonzalez-Velarde, J.L. and Glover, F. «Tabu search for the multilevel generalized assignment problem, Eur J Oper Res.1975, pp176-189.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Κατανάλωση Ενέργειας Κτιριακών Εγκαταστάσεων και Νομοθεσία

§5.1 Ενεργειακή κατάσταση σε Ελλάδα

Ένας σπάνιος συνδυασμός γεγονότων δημιούργησε την «τέλεια καταιγίδα» για την παγκόσμια αγορά ενέργειας. Πρώτον η κατάρρευση της ζήτησης ενέργειας -που προκλήθηκε από την πανδημία- οδήγησε πολλές εταιρείες ενέργειας να μειώσουν την παραγωγή τους κατά τη διάρκεια του 2020. Η μείωση της παραγωγής προκάλεσε προβλήματα αποθήκευσης, συντήρησης και εφοδιαστικές ελλείψεις. Δεύτερον, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως η αιολική και η υδροηλεκτρική, υπολειπόμενες. Τρίτον ο συνεχιζόμενος πόλεμος Ρωσίας – Ουκρανίας. Το ερώτημα που πλανάται είναι το εάν ΕΕ και Ελλάδα ήταν επαρκώς προετοιμασμένες για αυτήν την ενεργειακή κρίση η οποία υφίσταται. Και οι δύο εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ρωσικό φυσικό αέριο. Αυτή η εξάρτηση οδήγησε αρκούντως αναλυτές να ισχυριστούν ότι η ΕΕ είναι εκτεθειμένη στρατηγικά. Η Ελλάδα, ως κράτος-μέλος με σχετικά χαμηλό μερίδιο εγχώριων ΑΠΕ (18% το 2019), είναι επίσης έντονα ευάλωτη σε αυτή την ενεργειακή κρίση²⁹.

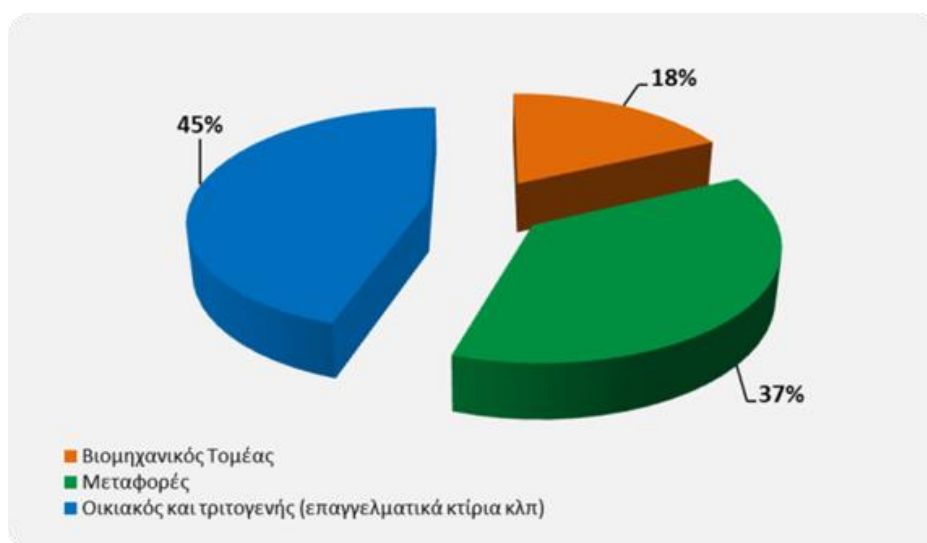
Η ρύπανση του περιβάλλοντος αποτελεί επίσης ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η κοινωνία και η οικονομία τα τελευταία χρόνια. Είναι ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός δολοφόνος με περίπου 8 εκατομμύρια θανάτους ετησίως να αποδίδονται σε αυτή. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Από αυτούς τους θανάτους τα 4,2 εκατομμύρια είναι αποτέλεσμα έκθεσης σε υπαίθρια ατμοσφαιρική ρύπανση του περιβάλλοντος και 3,8 εκατομμύρια αποδίδονται στο αποτέλεσμα της έκθεσης των νοικοκυριών στον καπνό από βρώμικες εστίες μαγειρέματος και καύσιμα³⁰.

Η εξοικονόμηση ενέργειας κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την προστασία του περιβάλλοντος και τον περιορισμό εκπομπών ρύπων. Έναν από τους πιο σημαντικούς ρόλους στην εκπομπή ρύπων και την κατανάλωση ενέργειας αναμφίβολα κατέχει ο κτιριακός τομέας, καθώς τα κτίρια έχουν άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις μέσα από τη χρήση πρωτογενών υλικών, την κατανάλωση φυσικών πόρων, την παραγωγή ρύπων και οικιακών αποβλήτων. Στην

²⁹ <https://www.enainstitute.org/publication>

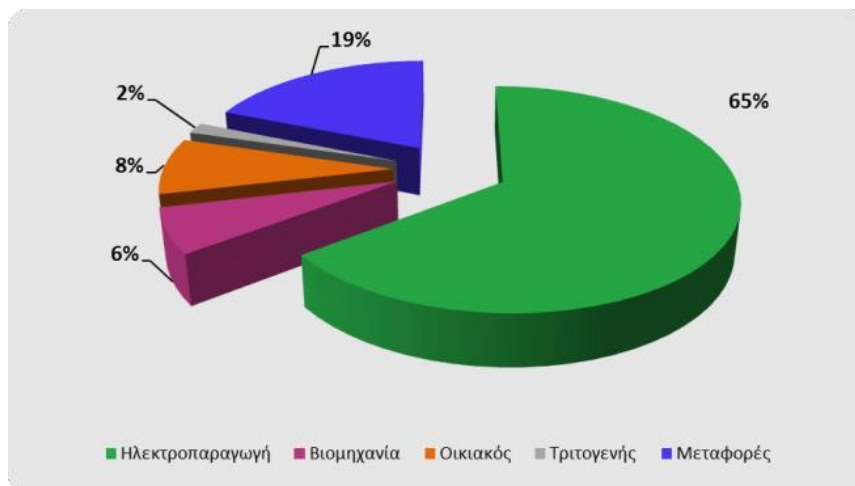
³⁰ <https://worldgbc.org/>

Ελλάδα μάλιστα, σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία, υπάρχουν περίπου 5 εκατομμύρια κτίρια με συνολική επιφάνεια πάνω από 553 εκατομμύρια m^2 , τα οποία ευθύνονται για το 45 % της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, από την κατανομή των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ανά τομέα στην Ελλάδα, δείχνει ότι ο κτιριακός τομέας (οικιακός και τριτογενής) καλύπτει ένα 10%.³¹ Επιπρόσθετα, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας αντιστοιχεί στον κτιριακό τομέα. Αυτό το ποσοστό αγγίζει το 65%. Με βάση τα νούμερα αυτά και με τελικό στόχο τη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από τον κτιριακό τομέα, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθοδολογιών που θα οδηγήσουν στην ενεργειακή αναβάθμιση των υπαρχόντων κτιρίων και τον ορθό ενεργειακό σχεδιασμό των νέων και υφιστάμενων κατασκευών. Στον κτιριακό τομέα (οικιακό και τριτογενή) το 70 % της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στη θέρμανση και το δροσισμό. Μάλιστα η απώλεια θερμότητας το χειμώνα και η υπερθέρμανση το καλοκαίρι είναι αποτέλεσμα κατά ένα 50 % των τοίχων, των οροφών και των πατωμάτων και κατά ένα 25 % των κουφωμάτων.

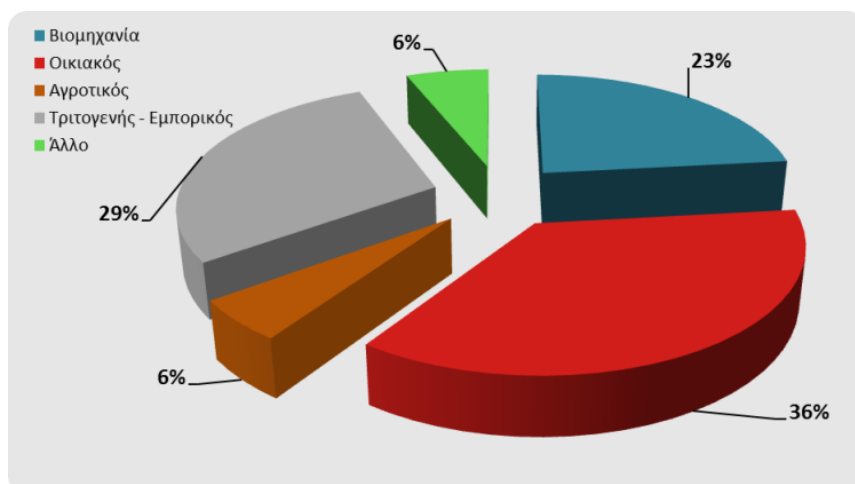


Σχήμα 3.: Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα (πηγή: ΕΛ. ΣΤΑΤ.)

³¹ <http://www.cres.gr/cres/index.html>



Σχήμα 4: Εκπομπή CO₂ ανά τομέα στην Ελλάδα(πηγή: ΕΛ. ΣΤΑΤ.)

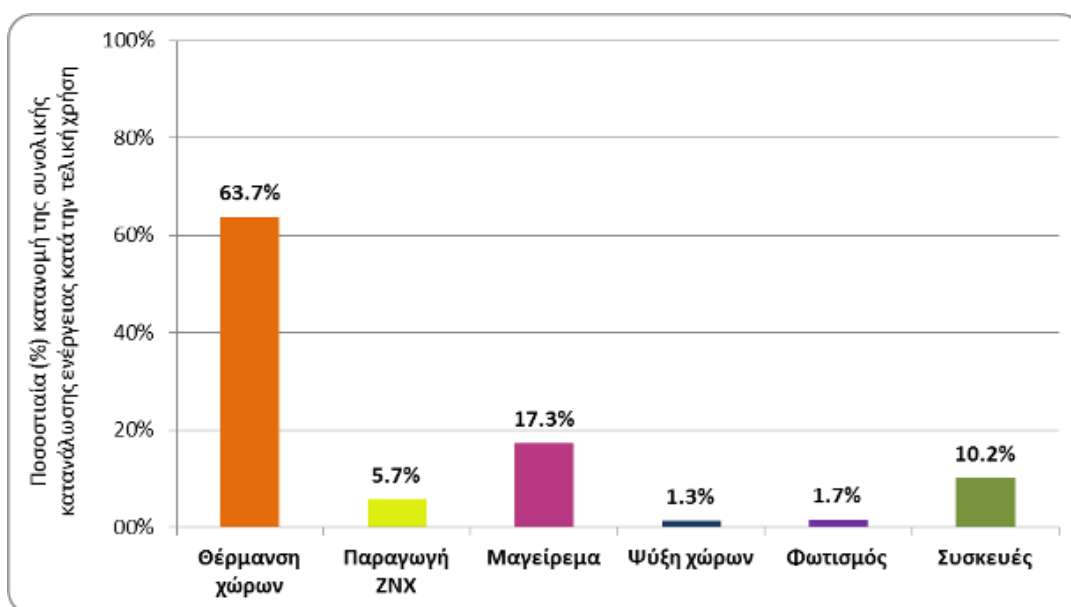


Σχήμα5: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα στην Ελλάδα(πηγή:ΕΛ. ΣΤΑΤ.)

Σύμφωνα με έρευνα που διενήργησε η ΕΛΣΤΑΤ (Οκτωβρίου 2011 – Σεπτεμβρίου 2012) με τη συνεργασία του ΚΑΠΕ ως τεχνικού εμπειρογνώμονα, για την ενεργειακή κατανάλωση των ελληνικών νοικοκυριών, προέκυψαν τα εξής χρήσιμα συμπεράσματα:

- Κάθε ελληνικό νοικοκυριό καταναλώνει **13.994 kWh ετησίως**, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του.
- Η μέση ετήσια **κατανάλωση θερμικής ενέργειας** (για θέρμανση χώρου, ζεστό νερό, μαγείρεμα κ.ά.) ανά νοικοκυριό είναι **10.244 kWh**, απ' όπου το **85.9%** της συνολικής ετήσιας θερμικής ενέργειας που καταναλώνεται, είναι για την **θέρμανση χώρου**.

- Η μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά νοικοκυριό **3.750 kWh**, απ' όπου το **38.4%** της συνολικής ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται, είναι για το **μαγείρεμα**.



Σχήμα 6: Έρευνα κατανάλωσης ενέργειας στα νοικοκυριά, 2011 – 2012 (Πηγή ΕΛΣΤΑΤ)

§5.2 Ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και ενεργειακός σχεδιασμός

Με τον όρο εξοικονόμηση ενέργειας εννοούμε της μείωση της καταναλισκόμενης ποσότητας ενέργειας. Όσο λιγότερη ενέργεια χρησιμοποιούμε τόσο θα αυξάνονται τα οφέλη τόσο στο οικονομικό κεφάλαιο, αλλά το σημαντικότερο στο περιβαλλοντικό τομέα. Η ενεργειακή απόδοση αυτή τη στιγμή βρίσκεται στο επίκεντρο της ενεργειακής πολιτικής της ευρωπαϊκής ένωσης και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την επίτευξη του στόχου με πολύ χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως το 2050. Με τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης κτιρίων έχει μπει στο στόχαστρο η ενσωμάτωση ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού όσον αφορά το κτιριακό τομέα με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης τους την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος. Συμπερασματικά η εξοικονόμηση ενέργειας με την ενεργειακή απόδοση κτιρίων είναι δύο αλληλένδετοι τομείς.

Λαμβάνοντας υπ όψη τις εξωτερικές κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες , τις κλιματικές απαιτήσεις των εσωτερικών χώρων και τη σχέση κόστους /οφέλους , οι στόχοι του ενεργειακού σχεδιασμού³² είναι :

Χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο , τα οποία δεν απαιτούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή τους.

Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων , δηλαδή μείωση της ποσότητας ενέργειας που καταναλώνεται για θέρμανση , ψύξη , εξαερισμό , φωτισμό , και παροχή ζεστού νερού χρήσης ενός κτιρίου .

Αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και κυρίως της ηλιακής ενέργειας.

Περιορισμό των εκπομπών αέριων ρύπων (π.χ. CO₂) που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, προκειμένου να εξασφαλισθεί η προστασία του περιβάλλοντος.

Σύγκλιση των κτιριακών προτύπων προς αυτά των κρατών – μελών , που έχουν ήδη υψηλά επίπεδα απαιτήσεων.

Τα οφέλη του ενεργειακού σχεδιασμού είναι πολλαπλά και μπορούμε να τα συνοψίσουμε σε :

Ενεργειακά : εξοικονόμηση ενέργειας και παράλληλα εξασφάλιση θερμικής και οπτικής άνεσης

Οικονομικά : μείωση στην κατανάλωση καυσίμων και του κόστους που προέρχονται από αυτά, εξοικονόμηση χρημάτων όσον αφορά την εγκατάσταση των ηλεκτρομηχανολογικών λειτουργιών θέρμανσης, ψύξης, αερισμού φωτισμού.

Περιβαλλοντικά: μείωση των ρύπων που προκαλούνται από την καύση συμβατικών καυσίμων και κατά συνέπεια περιορισμός φαινομένου του θερμοκηπίου και αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Κοινωνικά : βελτίωση της ποιότητας ζωής, συμβολή στην επιτυχή ανάπτυξη των πόλεων.

§5.3 Γενικά περί Κ.Εν.Α.Κ.

Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 91/2002/ΕΚ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων η χώρα μας είχε την υποχρέωση να εφαρμόσει έως το 2006 τη σχετική έκδοση των

³² Πέριος Δ.Π., «Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια- αθλητικά κέντρα βιομηχανικές μεταφορές, τόμος Α», Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ, Αθήνα 2007,σελ. 8-11

νομοθετικών διαταγμάτων. Ως εκ τούτου προέβηκε στην έκδοση το νόμου ν.3661/2008 (ΦΕΚ Α' 89) για τον καθορισμό μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στου οποίου συμπεριλαμβάνεται ο Κ.Εν.Α.Κ. (κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων), ο οποίος περιλαμβάνει με τη σειρά του τεχνικές οδηγίες γύρω από τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα κτίρια. Παρά ταύτα, οι παραπάνω κανονισμοί τροποποιήθηκαν και ισχύουν σήμερα οι νόμοι 4122/2013 (ΦΕΚ Α' 42) «Ενεργειακή απόδοση κτιρίων», η οποία ακολουθεί την ευρωπαϊκή οδηγία 2010/31/ΕΕ και τις λοιπές διατάξεις. Ως εκ τούτου ο Κ.Εν.Α.Κ. ισχύει σήμερα μέχρι νεότερης έκδοσης για αναθεώρηση του κανονισμού και προβλέπει τις κάτωθι βασικότερες οδηγίες για τη ενεργειακή μελέτη του κτιρίου³³:

Ορίζεται η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακή κατάταξης των κτιρίων (άρθρα 4 και 5).

Καθορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις (Kwh/m^2) για την ενεργειακή απόδοση και ενεργειακή κατάταξη των νέων και ριζικώς ανακαινιζόμενων κτιρίων μέσω της μεθοδολογίας του κτιρίου αναφοράς (άρθρα 7 και 13). Με την ίδια μεθοδολογία αξιολογούνται και κατατάσσονται ενεργειακά και τα υφιστάμενα προς πιστοποίηση κτίρια.

Καθορίζονται οι ελάχιστες προδιαγραφές για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους και οι τεχνικές προδιαγραφές των Η/Μ εγκαταστάσεων των υπό μελέτη νέων κτιρίων, καθώς και των ριζικώς ανακαινισμένων (άρθρο 8).

Ορίζεται το περιεχόμενο της μελέτης ενεργειακής απόδοσης (Μ.Ε.Α) των κτιρίων (άρθρο 11).

Καθορίζεται η μορφή του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης (Π.Ε.Α) κτιρίου, καθώς και τα στοιχεία που αυτό θα περιλαμβάνει (άρθρο 14).

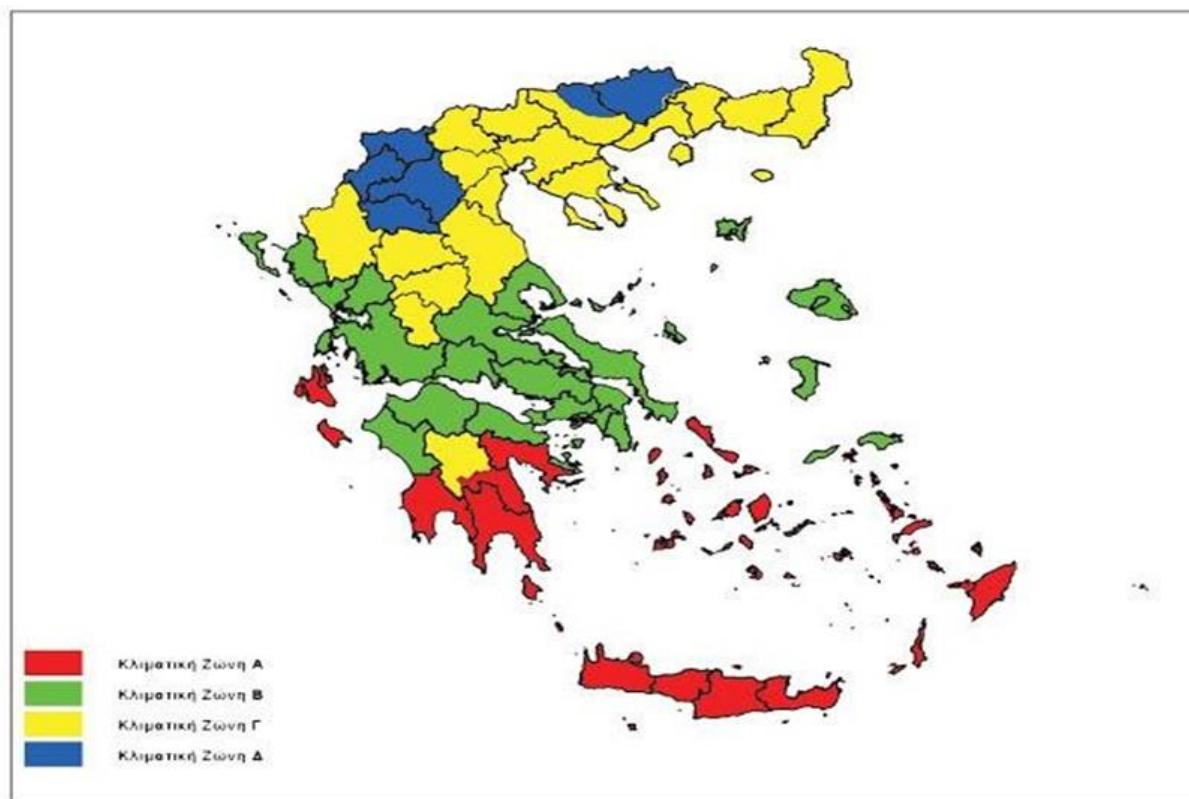
Καθορίζεται η διαδικασία των ενεργειακών επιθεωρήσεων των κτιρίων, καθώς και η διαδικασία των επιθεωρήσεων λεβήτων και εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού (άρθρο 15, 16 και 17).

§5.4 Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα

Απαραίτητο στοιχείο για την μελέτη ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι η διαίρεση των κλιματικών ζωνών στην ελληνική επικράτεια. Με βάση αυτό, έχουμε την

³³ Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας - ΤΕΕ: www.tee.gr

διαίρεση της Ελλάδος σε τέσσερις κλιματικές ζώνες (από τη θερμότερη στη ψυχρότερη) και αποδίδεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1: Κλιματικές Ζώνες της Ελλάδας

Σε κάθε νομό, οι περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων, εντάσσονται στην επόμενη ψυχρότερη ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με τα παραπάνω. Για την Δ ζώνη όλες οι περιοχές ανεξαρτήτως υψομέτρου περιλαμβάνονται στην ζώνη Δ. Στο τμήμα του νομού Αρκαδίας που εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ και στο τμήμα στου νομού Σερρών (ΒΑ τμήμα) που εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Δ, περιλαμβάνονται όλες οι περιοχές που έχουν υψόμετρο άνω των 500 μέτρων.

§5.5 Κτίριο αναφοράς

Στον παρακάτω πίνακα καθορίζονται οι βασικές κατηγορίες και χρήσεις κτιρίων στον οποίο εντάσσεται το υπό μελέτη ή επιθεώρηση κτίρια, για να πιστοποιηθεί η ενεργειακή του

απόδοση. Αυτά τα κτίρια τα οποία καθορίζονται από τον κτιριοδομικό κανονισμό διαχωρίζονται σε βασικές κατηγορίες και επιμέρους κατηγορίες (χρήσεις)³⁴.

Ωστόσο καθορίζονται συνθήκες λειτουργίας ανάλογα με τη χρήση για τις ανάγκες του Κ.Εν.Α.Κ.

Βασικές κατηγορίες κτηρίων	Χρήσεις κτηρίων που περιλαμβάνονται στις κατηγορίες
Κατοικίας	Μονοκατοικία, πολυκατοικία (κτήριο με περισσότερα του ενός ανεξάρτητα διαμερίσματα).
Προσωρινής διαμονής	Ξενοδοχείο, ξενώνας, οικοτροφείο και κοιτώνας.
Συνάθροισης κοινού	Χώρος συνεδρίων, χώρος εκθέσεων, μουσείο, χώρος συναυλιών, θέατρο, κινηματογράφος, αίθουσα δικαστηρίων, κλειστό γυμναστήριο, κλειστό κολυμβητήριο, εστιατόριο, ζαχαροπλαστείο, καφενείο, τράπεζα, αίθουσα πολλαπλών χρήσεων.
Εκπαίδευσης	Νηπιαγωγείο, πρωτοβάθμια εκπαίδευση, δευτεροβάθμια εκπαίδευση, τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας, φροντιστήριο.
Υγείας και κοινωνικής πρόνοιας	Νοσοκομείο, κλινική, αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο, ψυχιατρείο, ίδρυμα απόρων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομείο, βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός.
Σωφρονισμού	Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή.
Εμπορίου	Κατάστημα, εμπορικό κέντρο, αγοράς και υπεραγοράς, φαρμακείο, κουρείο και κομμωτήριο, ινστιτούτο γυμναστικής.
Γραφείων	Γραφείο, βιβλιοθήκη.

Πίνακας 3: Βασικές κατηγορίες κτιρίων

§5.5.1 Ελάχιστες απαιτήσεις

Βάσει του άρθρου 7 του Κ.Εν.Α.Κ. για κάθε νέο και ριζικά ανακαινισμένο κτίριο πρέπει να πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης κατά τα οριζόμενα άρθρα 4 και 5 του νόμου 3661/2008. Ωστόσο οι ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης εξασφαλίζεται όταν το κτίριο εναρμονίζεται με όλες τις ελάχιστες προδιαγραφές που περιγράφονται στο άρθρο 8 του Κ.Εν.Α.Κ. και:

³⁴ ΥΠΕΚΑ: www.ypeka.gr

Είτε η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του εξεταζόμενου κτιρίου είναι μικρότερη από τη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου αναφοράς, όπως αυτό περιγράφεται στο άρθρο 9 του Κ.Εν.Α.Κ. (τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου αναφοράς) ή ίση με αυτό.

Είτε το εξεταζόμενο κτίριο να έχει τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με το κτίριο αναφοράς τόσο ως προς το κτιριακό κέλυφος όσο και ως προς τις ηλεκτρομηχανολογικές του εγκαταστάσεις στο σύνολο τους.

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ο υπολογισμός της πρωτογενούς ενέργειας με την εκπόνηση ενεργειακής μελέτης, προκειμένου να προσδιοριστεί η ενεργειακή απόδοση και η κατάταξη του κτιρίου. Σύμφωνα με το άρθρο 8 του Κ.Εν.Α.Κ., οι ελάχιστες απαιτήσεις για τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα κτίρια, αναφέρονται στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του κτιρίου στη θερμομόνωση του κελύφους και στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Για αυτές τις ελάχιστες απαιτήσεις το κτίριο αναφοράς πρέπει:

- να είναι το ίδιο με το εξεταζόμενο (υπό μελέτη κτίριο)
- να έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το εξεταζόμενο κτίριο
- να πληροί τις ελάχιστες προδιαγραφές
- να έχει καθορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά (τεχνικά χαρακτηριστικά στα εξωτερικά δομικά στοιχεία του και στις Η/Μ εγκαταστάσεις των εσωτερικών χώρων).

§5.5.2 Συνθήκες λειτουργίας

Το κτίριο αναφοράς ως εξ ορισμού είναι ένα κτίριο το οποίο έχει ίδιο προφίλ, δηλαδή όμοιες συνθήκες λειτουργίας με το εξεταζόμενο κτίριο. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες λειτουργίας θα ισχύουν τόσο για το υπό μελέτη κτίριο όσο και για το κτίριο αναφοράς. Βέβαια δεν θα ισχύουν τα παραπάνω εάν το υπό μελέτη κτίριο έχει διαφορετικές τιμές για κάποιες από τις παραμέτρους του όπως αυτές που θα αναλυθούν στις ενότητες των συνθηκών λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι εάν η στάθμη φωτισμού η οποία καθορίζεται από πίνακες ανά κατηγορία σε συγκεκριμένη χρήση κτιρίου ξεπερνά τα προβλεπόμενα όρια (τα οποία καθορίζονται στο κτίριο αναφοράς) τότε το εξεταζόμενο κτίριο θα διαμορφωθεί ανάλογα με τα συστήματα που διαθέτει, ενώ για το κτίριο αναφοράς θα λαμβάνονται υπόψη τιμές όπως αυτές ορίζονται στις εθνικές προδιαγραφές.

Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα που απαιτούνται για τους υπολογισμούς της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, καθορίζονται και οι παράμετροι των συνθηκών λειτουργίας του κτιρίου. Ο Μηχανικός μελέτης καθορίζει τον αριθμό των ανεξάρτητων

θερμικών ζωνών του κτιρίου ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κτιρίου. Οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας από χρήστη σε χρήστη μπορεί να διαφέρουν κατά περίπτωση. Άρα απαραίτητη προϋπόθεση είναι να καθοριστούν σε εθνικό επίπεδο οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να προσδιορίζεται εκτενέστερα με υπολογισμό η καταναλισκόμενη ενέργεια και η ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Σημειώνεται πως οι παράμετροι συνθηκών λειτουργίας ενός κτιρίου καθορίστηκαν βάσει Ευρωπαϊκών προτύπων (EN 150 13790:2008 και EN 15251:2007) και άλλων διεθνών προδιαγραφών. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις κτιρίων ή και ειδικών χώρων κτιρίων (π.χ. χειρουργείο) που δεν αναφέρονται στην παρούσα, καθώς και σε περιπτώσεις οι οποίες χρήζουν περισσότερη λεπτομερή εξέταση, οι συνθήκες λειτουργίας καθορίζονται κατά περίπτωση από τις συνθήκες σχεδιασμού.

Οι ειδικές συνθήκες λειτουργίας των επί μέρους χώρων ενός κτιρίου (wc, διαδρόμων, αποθηκών κ.τ.λ.) λαμβάνονται υπόψη μόνο κατά το σχεδιασμό του κτιρίου ή κατά το σχεδιασμό της θερμικής ζώνης, ενώ κατά την μελέτη ενεργειακής απόδοσης λαμβάνεται υπόψη μια ενιαία τιμή για κάθε παράμετρο (π.χ. θερμοκρασία, σχετική υγρασία κ.ά) όπως αναφέρεται στη γενική χρήση κτιρίου και σε αντίστοιχους πίνακες. Επιπρόσθετα και σε όσες υποκατηγορίες κτιρίων στα οποία δεν υπάρχει καθορισμένη τιμή παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας κ.ά) τότε λαμβάνεται η γενική τιμή της κατηγορίας αυτής.

§5.5.3 Θερμικές ζώνες κτιρίου

Για να μπορέσουμε να κατατάξουμε το κτίριο ενεργειακά πρέπει να το χωρίσουμε πρώτα σε θερμικές ζώνες, δηλαδή σε χώρους με παρόμοια χρήση, ίδιο προφίλ λειτουργίας ή και ίδια ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Για αυτόν τον χωρισμό θερμικών ζωνών πρέπει να τηρούμε τους παρακάτω κανόνες:

- Δυνατόν μικρότερος αριθμός θερμικών ζωνών για να επιτύχουμε οικονομία στους υπολογισμούς και στο χρόνο.
- Ο προσδιορισμός θερμικών ζωνών να γίνεται με την καταγραφή της πραγματικής λειτουργίας του κτιρίου.
- Για τμήματα του κτιρίου με όγκο μικρότερο του 10% του συνολικού όγκου, πρέπει να εξετάζονται ενταγμένες σε άλλες θερμικές ζώνες με παρόμοιες χρήσεις.

Για να υπολογιστούν τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης, το κτίριο πρέπει να μελετηθεί σαν μια ενιαία θερμική ζώνη ή κατά περίπτωση να διαχωρίζεται σε περισσότερες

ζώνες. Ωστόσο, είναι φρόνιμο να μην γίνεται σύζευξη ζωνών αλλά μεμονωμένων ζωνών, για να επιτευχθεί ακρίβεια υπολογιστική³⁵. Για τον καθορισμό ανεξάρτητων θερμικών ζωνών σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. (ΦΕΚ 407/9.4.2010) και πρότυπο ΕΛΟΤ EN 150 13790:2009 επιβάλλεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η επιθυμητή θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων διαφέρει πάνω από 4K (4oC) σε σχέση με τα άλλα τμήματα του κτιρίου για τη χειμερινή ή και καλοκαιρινή περίοδο.
- Σε χώρους με διαφορετικές θερμοκρασίες π.χ. νοσοκομεία όπου έχουμε διαφορετικές συνθήκες στους χώρους (θερμοκρασία, σχετική υγρασία).
- Σε χώρους με μεγάλες εναλλαγές ενέργειας (π.χ. μεγάλα ανοίγματα με ανταλλαγή θερμικού κέρδους κ.τ.λ.)
- Σε χώρους στους οποίους υπάρχει μηχανικός εξαερισμός και καλύπτει λιγότερο από το 80% της επιφάνειας της κάτοψης του κτιρίου.

Σε χώρους όπου υπάρχουν διαφορετικά συστήματα θέρμανσης ή ψύξης.

Κατά συνέπεια, καταλαβαίνουμε πως είναι πολύ σημαντικός ο καθορισμός θερμικών ζωνών σε ένα κτίριο για να υπολογιστεί με ακρίβεια ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας U.

³⁵ ΕΛΟΤ: www.elot.gr

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε υφιστάμενα κτίρια

§6.1 Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίου

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται με:

- τον κατάλληλο σχεδιασμό του
- τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων
- μέσω της υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών

συστημάτων

- την άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν.

- την ενεργειακή διαχείριση του κτιρίου, μία συστηματική, οργανωμένη και συνεχής δραστηριότητα που αποτελείται από ένα προγραμματισμένο σύνολο διοικητικών, τεχνικών και οικονομικών δράσεων³⁶.

Οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κτίριο μπορεί να αφορούν:

- Το κτιριακό κέλυφος (π.χ. μόνωση, κατάλληλα συστήματα ανοιγμάτων όπως θύρες υαλοπίνακες κλπ)

- Τον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου (π.χ. χρήση βλάστησης)
- Τις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, ζεστού νερού και τις ηλεκτρικές συσκευές

- Την ορθολογική χρήση του κτιρίου και την αξιοποίηση των δομικών του στοιχείων (π.χ. ενεργειακή διαχείριση, φυσικός αερισμός).

Το κέλυφος ενός κτιρίου αποτελεί το φυσικό σύνολο μεταξύ του εσωτερικού χώρου όπου οι άνθρωποι περνούν τον περισσότερο χρόνο της ζωής τους από το εξωτερικό περιβάλλον. Για να συμβεί αυτό, το κτιριακό κέλυφος πρέπει να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν μικρότερη μετάδοση θερμότητας από τον εξωτερικό στον εσωτερικό χώρο και το αντίστροφο .

³⁶ <http://www.cres.gr>

Η μετάδοση θερμότητας γίνεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας, δηλαδή έχουμε πάντοτε μεταφορά θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο περιβάλλον. Αυτή η μετάδοση θερμότητας παρατηρείται και στα κτίρια, με αποτέλεσμα τις κρύες ημέρες να έχουμε ροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον και τις θερμές ημέρες από το περιβάλλον προς τον εσωτερικό χώρο. Εδώ εισάγεται ο ορισμός της θερμομόνωσης ενός δομικού στοιχείου που είναι το σύνολο των μεθόδων και των υλικών, που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η επιτυχής θερμομόνωση εξασφαλίζει τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας U του δομικού στοιχείου δηλαδή περιορίζει τη ροή θερμότητας διαμέσου του στοιχείου. Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης θερμοδιαφυγής R_0 . Όταν, λοιπόν θερμομονώσουμε το κέλυφος ενός κτιρίου χρησιμοποιώντας τα υλικά αυτά, αυξάνουμε την αντίσταση θερμοδιαφυγής της οικοδομής. Δηλαδή στην αντίσταση θερμοδιαφυγής της κατασκευής προσθέτουμε την αντίσταση θερμοδιαφυγής των μονωτικών υλικών. Θεωρητικά μπορούμε να μηδενίσουμε τη ροή θερμότητας αυξάνοντας το πάχος του θερμομονωτικού υλικού. Αυτό όμως συνοδεύεται με αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων άρα περιορισμό ωφέλιμου χώρου και αύξηση της ποσότητας του θερμομονωτικού υλικού άρα αύξηση κόστους υλικού. Σε κεντρικές κτιριακές εγκαταστάσεις το συνολικό πάχος των τοιχωμάτων έχει τεράστια οικονομική σημασία, γιατί το κόστος του διατιθεμένου ωφέλιμου εμβαδού είναι πολύ υψηλό. Στις περιπτώσεις αυτές δικαιολογείται η χρήση ισχυρών μονωτικών υλικών μεγάλου κόστους γιατί προέχει η εξοικονόμηση ενέργειας³⁷.

Η αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας του κτιριακού κελύφους περιλαμβάνει παρεμβάσεις στους εξωτερικούς τοίχους, στο δώμα, στο δάπεδο εφ' όσον συνορεύει με μη θερμαινόμενους χώρους (υπόγειο) ή με τον εξωτερικό αέρα, σε εσωτερικούς τοίχους που συνορεύουν με μη θερμαινόμενους χώρους (αποθήκες).

Ο βαθμός της παρέμβασης εξαρτάται από το αν το κτίριο κατασκευάζεται ή ανακαινίζεται. Όπως είναι προφανές, στις ανακαινίσεις είναι αρκετά δύσκολο να γίνουν σημαντικές βελτιώσεις στη θερμομόνωση του κελύφους³⁸.

Η σωστή θερμομόνωση ενός κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη μεγαλύτερη θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου
- Την αύξηση του κατασκευαστικού κόστους κατά 4% περίπου.

³⁷ <https://www.followgreen.gr>

³⁸ <https://www.followgreen.gr>

- Τη μείωση των αρχικών δαπανών για την εγκατάσταση του συστήματος θέρμανσης ,επειδή περιορίζει τις προβλεπόμενες απώλειες θερμότητας .
- Τη μείωση των λειτουργικών εξόδων του κτιρίου ,επειδή περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.
- Τη διατήρηση των θερμικών ηλιακών κερδών επί μεγάλο χρονικό διάστημα στο εσωτερικό του κτιρίου.

§6.2 Αναβάθμιση των Η/Μ εγκαταστάσεων

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας σε ένα κτίριο , καταναλώνεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του για θέρμανση και ψύξη. Η αναβάθμιση των θερμικών συστημάτων είτε είναι κεντρικά είτε είναι αυτόνομα θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές ενεργειακές παρεμβάσεις σε ένα κτίριο.

Τα παλαιότερα συστήματα θέρμανσης /ψύξης καταναλώνουν πολύ ενέργεια και για αυτό πρέπει να αντικατασταθούν με συστήματα νέας γενιάς με πιστοποιημένες ιδιότητες ώστε να μη καταναλώνουν άσκοπα ενέργεια. Τα συμβατικά θερμικά συστήματα αποτελούνται από : τον λέβητα – καυστήρα (πετρελαίου ή φυσικού αερίου) , τις σωληνώσεις τον κυκλοφορητή και τα θερμαντικά σώματα.

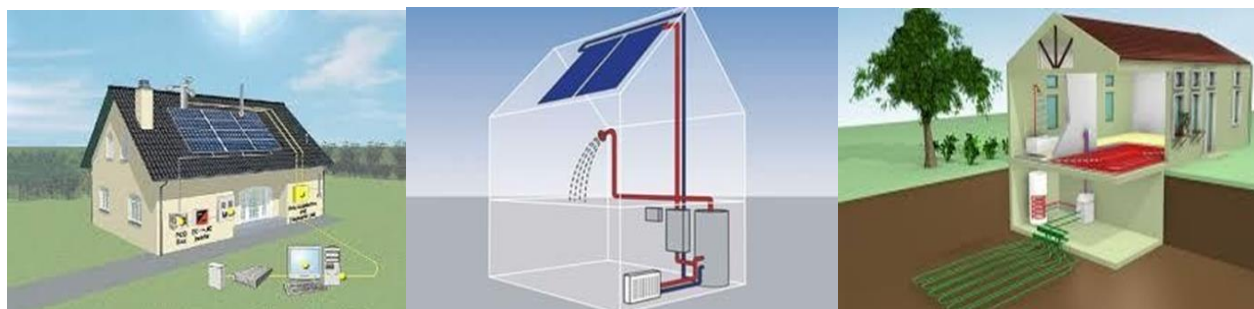
Η εγκατάσταση μιας αντλίας θερμότητας ή λέβητα φυσικού αερίου μπορεί να προσφέρει αρκετά μεγάλη εξοικονόμηση και απόδοση.

Τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων μπορούν να καλύψουν από 10% - 100% τις ανάγκες ενός κτιρίου σε θέρμανση και σε ζεστό νερό χρήσης.

Η ενεργειακή αναβάθμιση των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων περιλαμβάνει αλλαγές:

- Στις εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης – κλιματισμού
- Στην επιλογή συστήματος φωτισμού με όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας
- Αυτοματισμοί για τον έλεγχο των Η/Μ εγκαταστάσεων
- Στις ηλεκτρικές συσκευές οικιακής χρήσης του κτιρίου
- Χρήση και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας³⁹.

³⁹ www.cres.gr



Φωτοβολταϊκό σύστημα

Θερμικά ηλιακά συστήματα
Εικόνα 2: Ενεργειακά συστήματα

Γεωθερμική αντλία

§6.3 Λοιπές απαιτητές προδιαγραφές

Ουσιαστικός παράγοντας σχεδιασμού αποτελεί η υγραμόνωση σε συνδυασμό με τη θερμομόνωση καθώς η υγρασία αποτελεί μία σημαντική απειλή για το κέλυφος του κτιρίου και την υγεία των ενοίκων⁴⁰. Ο πάγος και το χαλάζι μπορούν να προκαλέσουν μηχανική διάβρωση. Η βροχή που οδηγείται στο εσωτερικό των τοίχων από τον άνεμο μπορεί να δημιουργήσει λεκέδες και αποσύνθεση. Η εσωτερική συμπύκνωση των υδρατμών προκαλεί μείωση της αντοχής και καταστροφή της θερμομόνωσης. Για αυτό η σωστή υγραμόνωση απαιτεί καλό σχεδιασμό, κατάλληλη επιλογή υλικών και ιδιαίτερα επιμελημένη εργασία στη φάση της κατασκευής.

Τα κουφώματα στο κάθε κτίριο υπάρχουν για να επιτρέπουν την είσοδο φωτός και αέρα σε κλειστούς χώρους. Ενώ η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος είναι πολλές φορές το ζητούμενο, τα κουφώματα μπορούν να είναι η κύρια αιτία θερμικών απωλειών αν δεν κατασκευαστούν με τα κατάλληλα υλικά και δεν μονωθούν όπως πρέπει. Μπορεί το κέλυφος ενός κτιρίου να είναι κατάλληλα μονωμένο και να υπάρχει απώλεια θερμότητας από τα πλαίσια και τα τζάμια των κουφωμάτων. Επομένως έχει μεγάλη σημασία να βελτιώνεται η αεροστεγανότητα των παραθύρων και να μειώνεται η απώλεια θερμότητας από τα πλαίσια και τα τζάμια των κουφωμάτων χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το κτίριο πρέπει να γίνει αεροστεγές, καθώς αν δεν έχει επαρκή εξαερισμό θα αντιμετωπίσει προβλήματα υγρασίας. Τα πιο κοινά κουφώματα κατασκευάζονται από αλουμίνιο, ξύλο ή PVC. Τα κουφώματα αλουμινίου λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους αλλά και της συμπεριφοράς τους στις κλιματολογικές συνθήκες αποτελούν ιδανική λύση⁴¹.

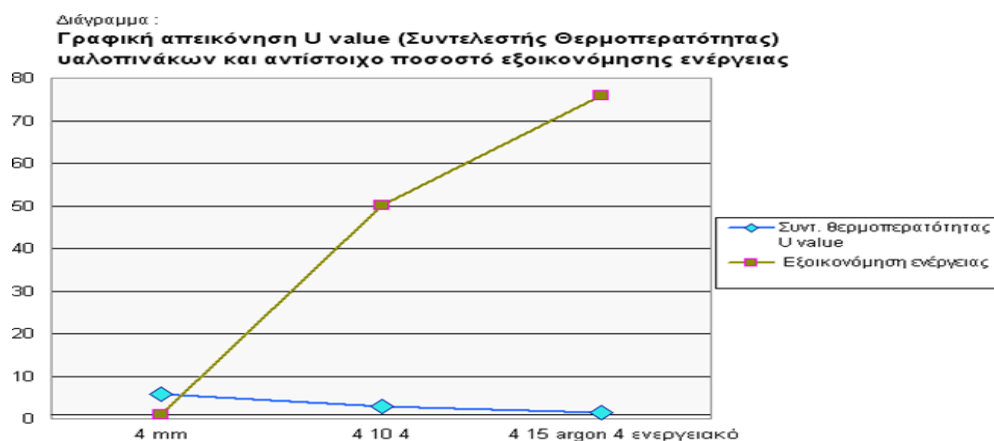
⁴⁰ Wangel, J. & Wallhagen, M. & Malmqvist, T. & Finnveden, G. «Certification systems for sustainable neighbourhoods: What do they really certify», Environmental Impact Assessment Review, 2016, 205-213

⁴¹ <https://www.ecologic-al.gr>

Πλεονεκτήματα Επιλογής Κουφωμάτων Αλουμινίου

- Έχουν καλές θερμομονωτικές ιδιότητες .
- Προσφέρουν οικονομία στην κατανάλωση καυσίμων ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.
- Βελτιώνουν την ακουστική άνεση του χώρου.
- Αυξάνουν το επίπεδο ασφάλειας του κτιρίου .
- Μηδενικό κόστος συντήρησης
- Προσφέρουν φυσικό φωτισμό

Σύμφωνα με το πρόγραμμα μέτρησης εξοικονόμησης ενέργειας για τους υαλοπίνακες που εκπονήθηκε από ειδικούς του Πανεπιστημίου Lund σε συνεργασία με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τα ενεργειακά διπλά τζάμια μειώνουν την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έως και 7.400 κιλοβατώρες για τη θέρμανση και ψύξη κατοικιών⁴². Συγκεκριμένα, οι θερμικές απώλειες σε σχέση με τα απλά τζάμια μειώνονται κατά 27% έως και 46%. Αυτό μεταφράζεται σε όφελος της τάξης των 750,00 € κατ' έτος και προκύπτει μόνο από τη χρήση υαλοπινάκων νέας τεχνολογίας, λόγω των αυξημένων θερμομονωτικών χαρακτηριστικών⁴³.



Σχήμα7.: Γραφική απεικόνιση συντελεστή θερμοπερατότητας

⁴² Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας – ΚΑΠΕ: www.cres.gr

⁴³ <https://fenestral.gr> , <https://www.praktikal.gr/>

Με τον όρο ενεργειακοί υαλοπίνακες η αλλιώς ενεργειακά τζάμια εννοούμε υαλοπίνακες διπλούς η τριπλούς στους οποίους έχει γίνει ειδική επεξεργασία και έχει εφαρμοστεί ένα ειδικό φιλμ το οποίο συνήθως είναι στρώμα από αδιαφανή οξείδια του αργύρου για να αυξάνεται η θερμομόνωση τους και να επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας. Οι τύποι των ενεργειακών τζαμιών ποικίλουν όμως οι δυο βασικές κατηγορίες είναι τα τζάμια 2 και 4 εποχών. Η βασικότερη διαφορά των ενεργειακών υαλοπινάκων 2 εποχών από αυτούς των 4 εποχών είναι η συμπεριφορά τους καλοκαιρινούς θερμούς μήνες. Οι υαλοπίνακες 4 εποχών διαθέτουν ειδικά φιλμ τα οποία επιτρέπουν στο ηλιακό φως να περάσει μέσα στο σπίτι μας, αλλά εμποδίζουν τη θερμότητα του ηλίου με συνέπεια την εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της μη χρήσης κλιματιστικών.

Συντελεστές θερμομόνωσης κάθε τζαμιού :

- Μονό τζάμι: συντελεστής θερμομόνωσης $5,7 \text{ w/m}^2\text{K}$
- Διπλό απλό τζάμι: συντελεστής θερμομόνωσης $3 \text{ w/m}^2\text{K}$
- Διπλό Ενεργειακό τζάμι: συντελεστής θερμομόνωσης $1 \text{ w/m}^2\text{K}$
- Τριπλό Ενεργειακό τζάμι: συντελεστής θερμομόνωσης $0,6 \text{ w/m}^2\text{K}$

§6.4 Συντελεστής θερμοπερατότητας

Κάθε νέο ή ριζικά ανακαινιζόμενο κτίριο πρέπει να πληρεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις ώστε ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων, τα οποία έχουν καθοριστεί για κάθε κλιματική ζώνη. Κατά συνέπεια για να ικανοποιεί ένα δομικό στοιχείο τις απαιτήσεις της θερμομονωτικής επάρκειας θα πρέπει να ισχύει $U_{\text{εξεταζ.}} \leq U_{\text{max}} \text{ (W/m}^2\text{Ko)}$ για κάθε σύνολο των επιμέρους δομικών στοιχείων. Για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας όλου του κτιρίου ο μελετητής οφείλει να τον υπολογίσει από την παρακάτω σχέση:

$$U_m = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot U_j \cdot b + \sum_{i=1}^v L_i \cdot \Psi_i \cdot b}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad [\text{W/(m}^2\text{K)}]$$

όπου	U_m [W/(m ² ·K)]	ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κελύφους όλου του κτηρίου,
	n [–]	το πλήθος των επί μέρους δομικών στοιχείων στο κέλυφος του κτηρίου,
	v [–]	το πλήθος των θερμογεφυρών που αναπτύσσονται στα εξωτερικά ή εσωτερικά όρια κάθε επιφάνειας A_j του κελύφους,
	A_j [m ²]	το εμβαδό επιφάνειας που καταλαμβάνει το κάθε δομικό στοιχείο στη συνολική επιφάνεια του κελύφους του κτηρίου,
	U_m [W/(m ² ·K)]	ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κάθε δομικού στοιχείου j του κελύφους του κτηρίου,
	L_i [m]	το συνολικό μήκος του κάθε τύπου θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτηρίου,

Ψ_j [W/(m²·K)] ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του κάθε τύπου
θερμογέφυρας που αναπτύσσεται στο περίβλημα του κτηρίου,
 b [-] μειωτικός συντελεστής (όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα για κάθε
τύπο δομικού στοιχείου).

Το ευρισκόμενο πηλίκο U_m συγκρίνεται με αυτό που ορίζεται ως μέγιστο επιτρεπόμενο $U_{m,max}$
από το λόγο A/V του πίνακα 7 για κάθε κλιματική ζώνη.

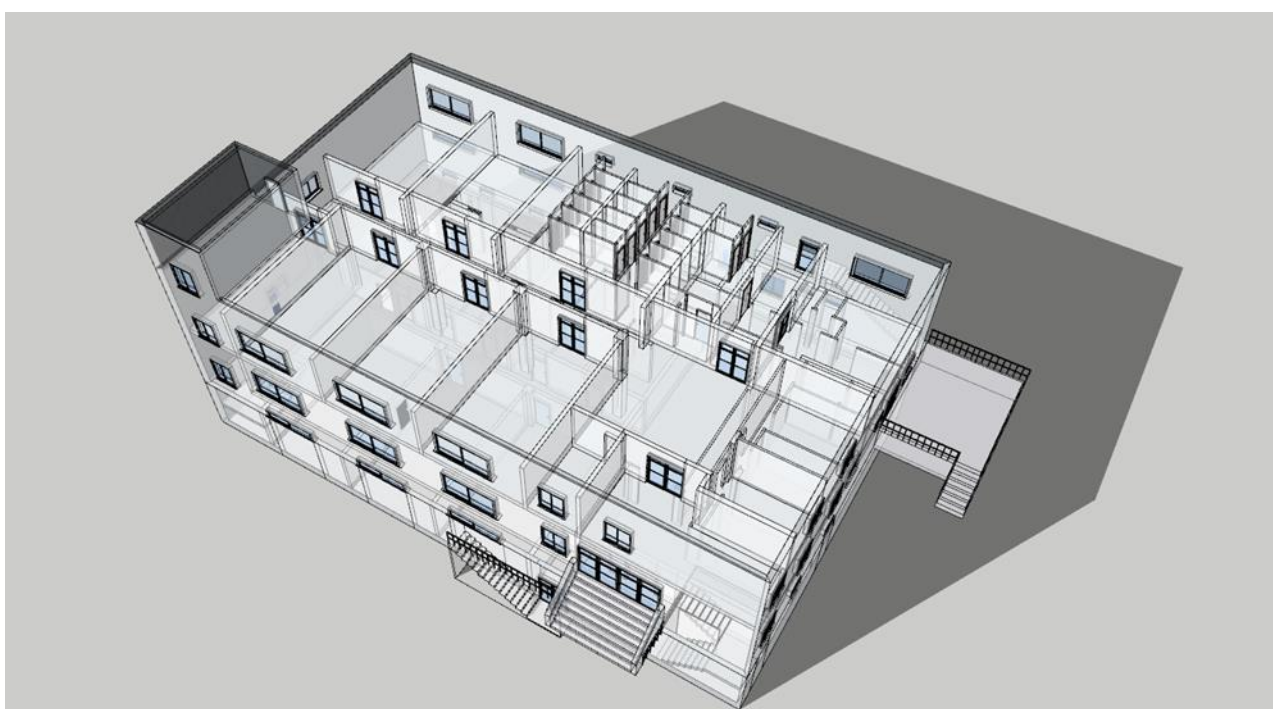
Πρέπει πάντα να ισχύει:

$$U_m \leq U_{m,max}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ενεργειακή μελέτη σε υφιστάμενο κτίριο πολλαπλών χρήσεων

§7.1 Σχέδια και τεχνική περιγραφή



Τρισδιάστοτο προφίλ διώροφου κτιρίου στο οποίο στρατωνίζονται έως 80 άνδρες και περιλαμβάνονται τα γραφεία διοίκησης καθώς και χώροι υγιεινής και ψυχαγωγίας – εστιατορίου. Το υπόψη κτίριο βρίσκεται σε Στρώο στις παρυφές του Υμηττού στο Ν. Αττικής, κατασκευασμένο τη δεκαετία του 90 από σύγχρονα δομικά της εποχής και η χρήση του, όπου ισχύει ο κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων (ΚΘΚ) και για λόγους ασφαλείας δεν εμπεριέχονται φωτογραφίες, όπως προβλέπονται από τις διαδικασίες εκπόνησης του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Αναβάθμισης. Ο τύπος του κτιρίου χαρακτηρίζεται ως παλιός γιατί οι άδειες του είναι πριν την εφαρμογή του κανονισμού ενεργειακής απόδοσης κτιρίων το 2010 και δεν έχει υποστεί καμία ανακαίνιση. Το ιδιοκτησιακό καθεστώς του κτιρίου αφορά

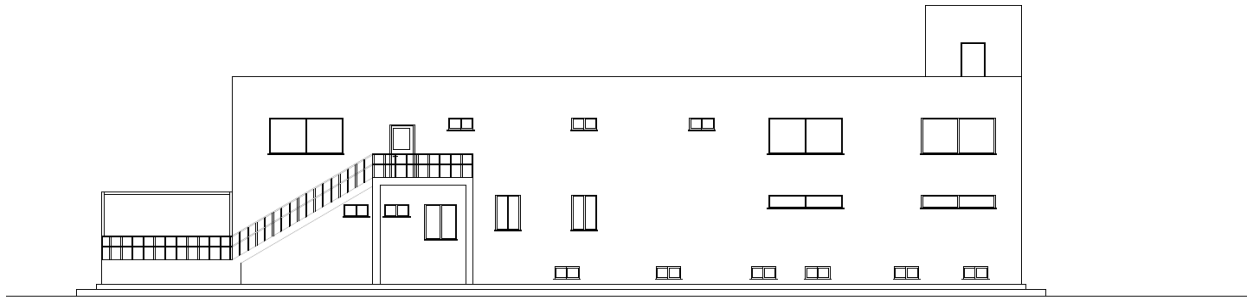
δημόσιο κτίριο. Η χρήση του είναι 24ωρη από το μέγιστο αριθμό προσωπικού που μπορεί να φιλοξενήσει.



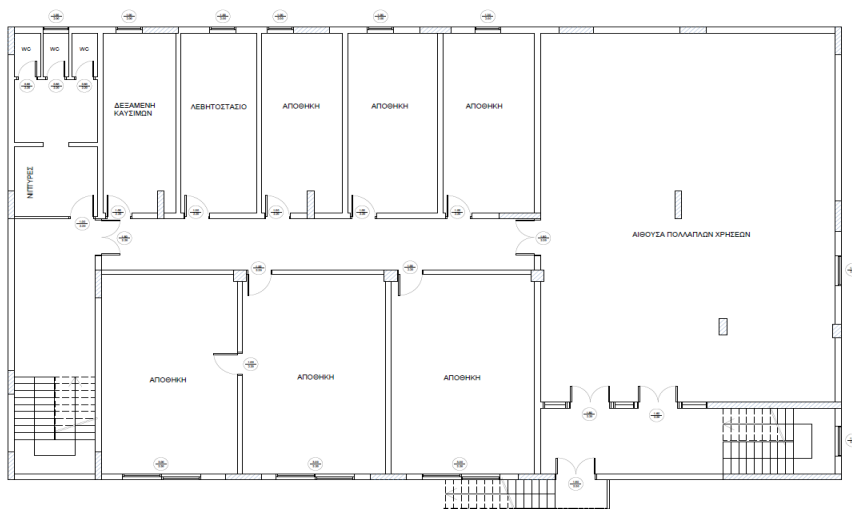
Πρόσοψη



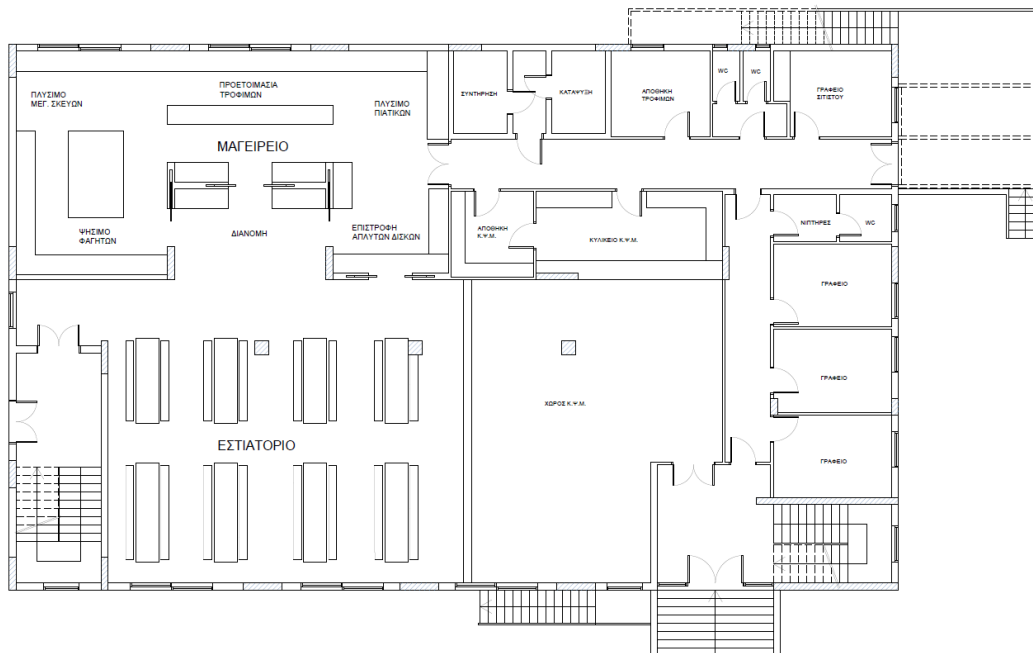
Πρόσοψη και πλάγια όψη



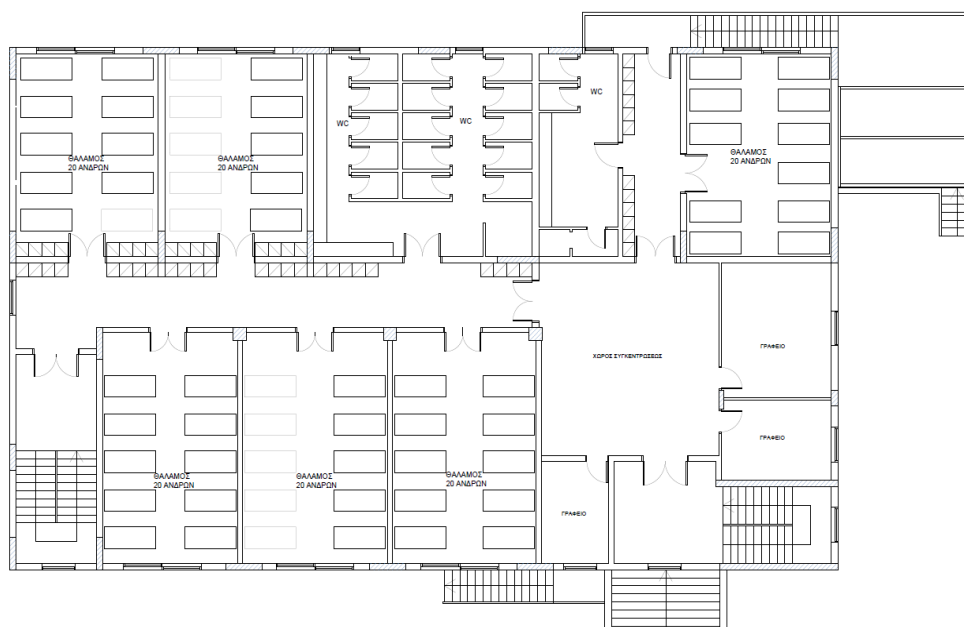
ΟΠΙΣΘΙΑ ΟΨΗ



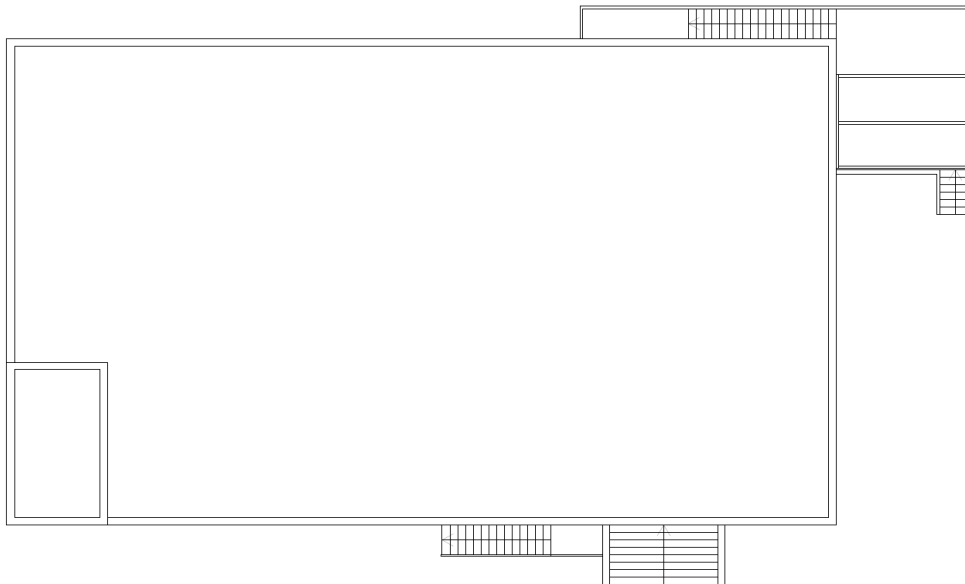
ΚΑΤΟΨΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ



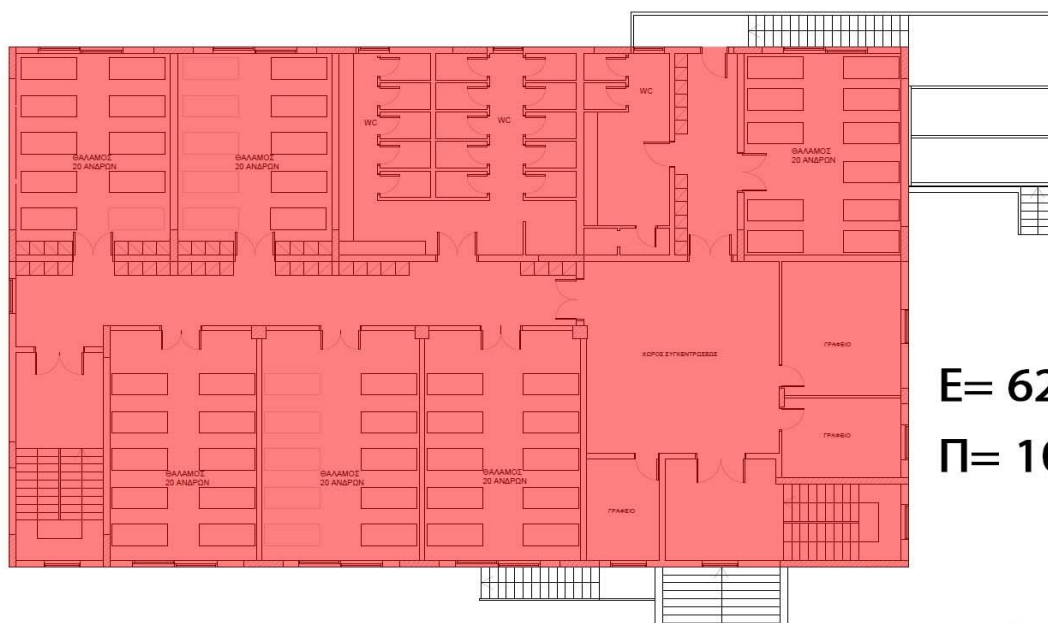
ΚΑΤΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ



ΚΑΤΟΨΗ ΟΡΟΦΟΥ



ΚΑΤΟΨΗ ΔΩΜΑΤΟΣ



$E = 624 \text{ m}^2$

$\Pi = 103 \text{ m}$

ΚΑΤΟΨΗ ΟΡΟΦΟΥ

§7.2 Χρήση κτιρίου – Κλιματικές συνθήκες

Στον πίνακα του προηγούμενου κεφαλαίου της §5.5 έγινε ξεχωριστή μνεία για τα κτίρια αναφοράς, σύμφωνα με τον οποίο βάσει των χαρακτηριστικών του υπό εξέταση κτιρίου μας δίδεται η δυνατότητα να το κατατάξουμε σύμφωνα με τη χρήση του σε συγκεκριμένη κατηγορία. Επειδή δεν υφίσταται ακριβή κατηγορία για το υπόψη κτίριο το κατατάσσουμε στην πλησιέστερη και αυτή είναι η **βασική κατηγορία των κτιρίων προσωρινής διαμονής**.

Η ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου αναδεικνύεται κάτι παραπάνω από επιτακτική τον αιώνα που διανύουμε λόγω των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Ακραία καιρικά φαινόμενα όπως οι ακραίοι καύσωνες, οι τυφώνες και οι ισχυρές καταιγίδες βάζουν σε κίνδυνο το δικαίωμα εκατομμυρίων ανθρώπων σε τροφή νερό υγεία ακόμα και στην ίδια την ζωή.

Οι αυξημένες ανάγκες διαβίωσης (θέρμανση, κλιματισμός παραγωγή ζεστού νερού, φωτισμός, καθημερινές ανάγκες) έχουν καταστήσει τα σύγχρονα κτίρια αρκετά ενεργοβόρα και επιβαρυντικά για το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό με τη σημαντική αύξηση του κόστους ενέργειας των τελευταίων ετών κάνει υποχρεωτική την ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και δραστική μείωση του λειτουργικού κόστους σε όλους τους τομείς. Κατ' επέκταση η κτιριακή αναβάθμιση κρίνεται αρκετά σημαντική αν όχι απαραίτητη.

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής εντείνονται χρόνο με το χρόνο με αποτέλεσμα να μας τονίζουν καθημερινώς πόσο αναγκαία είναι η επιβολή μέτρων για την μείωση εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, ώστε να μπορέσουμε ενδεχομένως να περιορίσουμε την υπερθέρμανση του πλανήτη⁴⁴.

Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι μπορούμε να ανατρέψουμε την πορεία των γεγονότων αν καταφέρουμε άμεσα να μειώσουμε την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, το οποίο μπορεί να γίνει με την προώθηση της καινοτομίας στις πράσινες τεχνολογίες και την χρησιμοποίηση πράσινης ενέργειας στην κατασκευή και στη συντήρηση των κτιρίων.

Απαραίτητο στοιχείο για την μελέτη ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι η διαίρεση των κλιματικών ζωνών στην ελληνική επικράτεια. Με βάσει αυτό, έχουμε την διαίρεση της Ελλάδος σε τέσσερις κλιματικές ζώνες (από τη θερμότερη στη ψυχρότερη) και αποδίδεται σχηματικά στο σχήμα της §5.4.

⁴⁴ Nelms, C. & Russell, A.D & Lence, B.J. «Assessing the performance of sustainable technologies: a framework and its application Building research and information.» Building Research & Information, 2007 pp. 237-251.

Το συγκεκριμένο κτίριο που μελετάμε βρίσκεται στον Νομό Αττικής δηλαδή **Ζώνη Β** όπου το κλίμα είναι εύκρατο και χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, ενώ είναι γενικά ήπιο στο μεγαλύτερο μέρος του έτους.

§7.3 Γενική διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης

Η διαδικασία ενεργειακής επιθεώρησης⁴⁵ ενός κτιρίου περιλαμβάνει τέσσερα βήματα:

- Βήμα 1^ο: Συλλογή πρωτογενών ενεργειακών στοιχείων.
- Βήμα 2^ο: Ανάλυση πρωτογενών ενεργειακών στοιχείων
- Βήμα 3^ο: Επιτόπια συνοπτική ενεργειακή επιθεώρηση.
- Βήμα 4^ο: Επιτόπια εκτενής ενεργειακή επιθεώρηση

Ενεργειακές μετρήσεις ονομάζονται οι διαδικασίες εκείνες, που επιτρέπουν τον προσδιορισμό των παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με τη χρήση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια και τις βιομηχανίες. Ο ενεργειακός επιθεωρητής αναλαμβάνει αυτές τις μετρήσεις και αποτελούν βασικό πυλώνα μιας ενεργειακής επιθεώρησης καθώς χωρίς αυτές δε θα υπάρχει εντοπισμός και ποσοτικοποίηση των πιθανών ανωμαλιών στη λειτουργία κάθε εγκατάστασης, ο προσδιορισμός της ενεργειακής απόδοσης, και το σημαντικότερο ιεράρχηση των προτεινόμενων επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια μιας ενεργειακής μέτρησης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η μέθοδος μέτρησης, τα μετρητικά όργανα, η διάρκεια της μέτρησης και ο χρόνος της. Χωρίς αυτές τις γνώσεις είναι πολύ πιθανό κάποιος να πέσει στη παγίδα των άσκοπων μετρήσεων που δίνουν μη αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Οι μετρήσεις με τα φορητά όργανα κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης, δεν δίνουν πλήρη εικόνα για τη μηνιαία ή την ετήσια κατανάλωση ενέργειας δεδομένου ότι δεν μετράτε ευθέως ο χρόνος. Μας επιτρέπουν παρόλο αυτά να υπολογίσουμε τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης των εγκαταστάσεων και την ακρίβεια των εγκατεστημένων οργάνων μέτρησης.

Οι μετρήσεις που συνήθως απαιτούνται περιλαμβάνουν:

- Τις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου
- Τις θερμικές συνθήκες στο εσωτερικό του κτιρίου
- Την ηλεκτρική ενέργεια
- Τη διαχείριση του αέρα
- Το σύστημα σωληνώσεων

⁴⁵ Πέριος Σ. «Ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων και βιομηχανιών», Εκδ. Δημούδη , Αθήνα 2006, σελ.22-25

- Τις συνθήκες στο λεβητοστάσιο
- Την κατάσταση της εγκατάστασης κλιματισμού Και περιλαμβάνουν τα παρακάτω μεγέθη :

- Παροχές υγρών η αέριων καυσίμων
- Ηλεκτρικές μετρήσεις (τάση, ένταση, ισχύς, συντελεστής ισχύος)
- Θερμοκρασίες ρευστών (αέρα, νερού) και στερεών επιφανειών
- Πιέσεις ρευστών σε σωλήνες, καμίνους ή δοχεία
- Εκπομπές καυσαερίων (CO_2 , CO , O_2 , καπνός)
- Σχετική υγρασία
- Εντάσεις φωτισμού

Οι επεμβάσεις που θα απαιτηθούν προκειμένου να αναβαθμιστεί η ενεργειακή κλάση του κτιρίου σε σχέση πάντα με τους περιορισμούς που θα τεθούν (κόστος, χρόνος, κ.α.) αναλύονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους επεξηγώντας την απαίτηση του εγχειρήματος, με απώτερο στόχο τη δόμηση του προβλήματος βελτιστοποίησης , την εξαγωγή αποτελέσματος και τη λήψη απόφασης.

§7.4 Εξοικονόμηση ενέργειας με αλλαγή κουφωμάτων

Αντικατάσταση παλαιών κουφωμάτων με σημαντικές απώλειες καθόσον δεν εμποδίζουν τη θέρμανση ή την ψύξη από το εσωτερικό ενός κτιρίου στο εξωτερικό περιβάλλον με νέου τύπου προσέχοντας το «θερμοδιακοπόμενο προφίλ» και τα οποία κρατούν την εξωτερική θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του τζαμιού και την εσωτερική θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου. Έτσι, η ζέστη ή η ψύξη εγκλωβίζονται στο εσωτερικό διατηρώντας την επιθυμητή θερμοκρασία και επιτυγχάνοντας παράλληλα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το ρόλο της θερμοδιακοπής παίζει το πολυαμίδιο, το οποίο είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό, σχετικά υψηλού κόστους, ενισχυμένο με ίνες υάλου σε ποσοστό περίπου 25%. Με αυτό το τρόπο ενισχύονται οι μηχανικές ιδιότητες του πολυαμιδίου το οποίο έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Η αύξηση του πλάτους προφίλ και πολυαμιδίου, μειώνει σημαντικά τη διερχόμενη θερμότητα από τη μάζα του υλικού. Οι συντελεστές θερμοπερατότητας κυμαίνονται περίπου από 1,8 έως 3,0 $\text{W/m}^2\text{K}$, το οποίο ενισχύεται περαιτέρω με την προσθήκη αφρώδους θερμομονωτικού υλικού στο χώρο μεταξύ των πολυαμιδίων και επιτυγχάνονται ακόμα χαμηλότεροι συντελεστές από 1-1,8 $\text{W/m}^2\text{K}$. Επίσης,

η χρήση υαλοπινάκων μεγαλύτερου πάχους, (διπλοί ή τριπλοί) συμβάλλει θετικά στην θερμομόνωση όπως και στην ηχομόνωση του χώρου.

§7.5 Υγρομόνωση - Θερμομόνωση κελύφους

Το νερό που μπορεί να υπάρχει στα δομικά στοιχεία και με τις τρεις φάσεις του διεισδύει στη μάζα τους χωρίς τις περισσότερες φορές να γίνεται άμεσα αντιληπτό και προκαλεί βλάβες οι οποίες φθάνουν μέχρι την πλήρη καταστροφή των υλικών. Ο πάγος και το χαλάζι μπορούν να προκαλέσουν μηχανική διάβρωση. Η βροχή που οδηγείται στο εσωτερικό των τοίχων από τον άνεμο μπορεί να δημιουργήσει λειέδες και αποσύνθεση. Η εσωτερική συμπύκνωση των υδρατμών προκαλεί μείωση της αντοχής και καταστροφή της θερμομόνωσης. Τέλος η επιφανειακή συμπύκνωση των υδρατμών καταστρέφει το χρώμα των τοίχων. Παλαιότερα, λύση στο πρόβλημα έδινε η αύξηση του πάχους των τοίχων. Σήμερα όμως η βελτίωση της ποιότητας των υλικών και η επιμελημένη κατασκευή επιτρέπουν τη χρήση λεπτότερων τοίχων⁴⁶. Οι βλάβες που προκαλούνται από την υγρασία είναι σοβαρές και αρκετές φορές μη αναστρέψιμες. Για αυτό η σωστή υγρομόνωση απαιτεί καλό σχεδιασμό, κατάλληλη επιλογή υλικών και ιδιαίτερα επιμελημένη εργασία στη φάση της κατασκευής.

Η μετάδοση θερμότητας γίνεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας, δηλαδή έχουμε πάντοτε ροή θερμότητας από το θερμότερο στο ψυχρότερο περιβάλλον. Αυτή η μετάδοση θερμότητας παρατηρείται και στα κτίρια, με αποτέλεσμα τις κρύες ημέρες να έχουμε ροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον και τις θερμές ημέρες από το περιβάλλον προς τον εσωτερικό χώρο. Θερμομόνωση ενός δομικού στοιχείου ονομάζεται το σύνολο των μεθόδων και των υλικών, που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η επιτυχής θερμομόνωση εξασφαλίζει τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας U του δομικού στοιχείου δηλαδή περιορίζει τη ροή θερμότητας διαμέσου του στοιχείου. Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης θερμοδιαφυγής R_0 αλλά μεγαλύτερες τιμές έχουν τα θερμομονωτικά υλικά. Θεωρητικά μπορούμε να μηδενίσουμε τη ροή θερμότητας αυξάνοντας το πάχος του θερμομονωτικού υλικού. Αυτό όμως σημαίνει αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων (κόστος χώρου) και αύξηση της ποσότητας του θερμομονωτικού υλικού (κόστος υλικού). Σε κεντρικές κτιριακές εγκαταστάσεις το συνολικό πάχος των τοιχωμάτων έχει τεράστια οικονομική σημασία, γιατί

⁴⁶ [https:// www.cres.gr](https://www.cres.gr)

το κόστος του διατιθέμενου ωφέλιμου εμβαδού είναι πολύ υψηλό. Στις περιπτώσεις αυτές δικαιολογείται η χρήση ισχυρών μονωτικών υλικών μεγάλου κόστους γιατί προέχει η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η αύξηση της θερμομονωτικής ικανότητας του κτιριακού κελύφους περιλαμβάνει παρεμβάσεις σε εξωτερικούς τοίχους, στο δώμα, στο δάπεδο εφόσον συνορεύει με μη θερμαινόμενους χώρους (υπόγειο) ή με τον εξωτερικό αέρα σε εσωτερικούς τοίχους που συνορεύουν με μη θερμαινόμενους χώρους (αποθήκες)

Ο βαθμός της παρέμβασης εξαρτάται από το αν το κτίριο κατασκευάζεται ή ανακαινίζεται. Όπως είναι προφανές, στις ανακαινίσεις είναι αρκετά δύσκολο να γίνουν σημαντικές βελτιώσεις στη θερμομόνωση του κελύφους.

Η σωστή θερμομόνωση ενός κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα⁴⁷:

- Τη μεγαλύτερη θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου
- Την αύξηση του κατασκευαστικού κόστους κατά 4% περίπου.
- Τη μείωση των αρχικών δαπανών για την εγκατάσταση του συστήματος θέρμανσης, επειδή περιορίζει τις προβλεπόμενες απώλειες θερμότητας.
- Τη μείωση των λειτουργικών εξόδων του κτιρίου, επειδή περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.
- Τη διατήρηση των θερμικών ηλιακών κερδών επί μεγάλο χρονικό διάστημα στο εσωτερικό του κτιρίου

§7.6 Ενεργειακή αναβάθμιση εγκαταστάσεων θέρμανσης κτιρίου

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας σε ένα κτίριο, καταναλώνεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του για θέρμανση ή ψύξη. Η αναβάθμιση των θερμικών συστημάτων είτε είναι κεντρικά είτε είναι αυτόνομα θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές ενέργειες παρέμβασης σε ένα κτίριο.

Τα παλαιότερα συστήματα καταναλώνουν πολύ ενέργεια και για αυτό πρέπει να αντικατασταθούν με συστήματα νέας γενιάς με πιστοποιημένες ιδιότητες ώστε να μη καταναλώνουν άσκοπα ενέργεια. Τα συμβατικά θερμικά συστήματα αποτελούνται από: τον

⁴⁷ <https://www.followgreen.gr>

λέβητα – καυστήρα (πετρελαίου ή φυσικού αερίου) , τις σωληνώσεις τον κυκλοφορητή και τα θερμαντικά σώματα. Η εγκατάσταση μιας αντλίας θερμότητας ή λέβητα φυσικού αερίου μπορεί να προσφέρει αρκετά μεγάλη εξοικονόμηση και απόδοση. Τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων μπορούν να καλύψουν από 10% - 100% τις ανάγκες ενός κτιρίου σε θέρμανση και σε ζεστό νερό χρήσης.

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας σε ένα κτίριο , καταναλώνεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του για θέρμανση η ψύξη. Η αναβάθμιση των θερμικών συστημάτων είτε είναι κεντρικά είτε είναι αυτόνομα θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές ενέργειες παρέμβασης σε ένα κτίριο.

§7.7 Ενεργειακή αναβάθμιση συστήματος ψύξης-κλιματισμού

Τα συστήματα ψύξης – κλιματισμού όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελούν έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν όμως κάποιες ενέργειες που μπορούν να αποτρέψουν τη σπατάλη ενέργειας και κατά συνέπεια χρημάτων από τα κλιματιστικά χωρίς ωστόσο να χαθεί η θερμική άνεση.

- Ρύθμιση στη σωστή θερμοκρασία: η ιδανική θερμοκρασία ενός χώρου κυμαίνεται από 20-27 βαθμούς κελσίου χωρίς η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος να είναι πάνω από 10 βαθμούς. Ρυθμίζοντας τον θερμοστάτη σε ακραίες θερμοκρασίες σπαταλάμε ηλεκτρική άσκοπη ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε ένας βαθμός χαμηλότερη θερμοκρασία στο κλιματιστικό αυξάνει κατά 10% την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

- Σωστή διάσταση του κλιματιστικού: το μέγεθος του κλιματιστικού είναι κυρίως ανάλογο των τετραγωνικών μέτρων του δωματίου αλλά εξαρτάται και από το προσανατολισμό και τη μόνωση του κτιρίου. Ένα κλιματιστικό που είναι μεγαλύτερο από ότι χρειάζεται μπορεί να καταναλώσει έως και 50% περισσότερη ενέργεια.

Εμβαδό δωματίου (m ²)	Προτεινόμενα BTU
9-13	7.000
13-18	9.000
18-25	12.000
25-30	14.000
30-35	16.000
35-40	18.000
40-45	20.000
45-65	22.000
55-65	24.000

Πίνακας 4.: Ωφέλιμη απόδοση κλιματιστικών

• Επιλογή κλιματιστικού υψηλής ενεργειακής κλάσης: όσο μεγαλύτερη η ενεργειακή κλάση τόσο λιγότερη η ενεργειακή κατανάλωση. Παραδείγματος χάρη εάν αντικαταστήσουμε ένα κλιματιστικό ενεργειακής κλάσης C με ένα κλιματιστικό ενεργειακής κλάσης A+ εξοικονομούμε ενέργεια περίπου 34% ενώ αν το αντικαταστήσουμε με ένα καινούργιας τεχνολογίας ενεργειακής κλάσης A+++ η εξοικονόμηση ενέργειας φτάνει έως 95%. Παρακάτω πίνακας με εξοικονόμηση ενέργειας ανάλογα την ενεργειακή κλάση του κλιματιστικού.

ΤΑΞΗ	D	C	B	A	A+	A++	A+++
D							
C	13%						
B	26%	11%					
A	39%	23%	10%				
A+	52%	34%	21%	9%			
A++	90%	68%	51%	36%	25%		
A+++	121%	95%	75%	59%	45%	16%	

Πίνακας 5.: Εξοικονόμηση ενέργειας βάσει κλάσης κλιματιστικού

• Κλιματιστικό με τεχνολογία inverter : τα κλιματιστικά με τεχνολογία inverter λειτουργούν με μεταβλητό ρυθμό ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου ενώ τα συμβατικά με σταθερές στροφές. Αυτό τα κάνει να έχουν αυξημένη κατανάλωση ενέργειας λόγω της επαναλαμβανόμενης ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της συσκευής. Από την άλλη μεριά τα inverter δουλεύουν συνέχεια σε χαμηλές στροφές μειώνοντας τη κατανάλωση ενέργειας. Άλλο προσόν τους είναι ότι είναι αθόρυβα. Το κόστος τους είναι περίπου 30% ακριβότερα από τα συμβατικά, αλλά γρήγορα θα αποσβεστεί ιδιαίτερα εάν λειτουργεί πολλές ώρες τη μέρα.

Στην υπό μελέτη εγκατάσταση βρίσκονται σε λειτουργία 14 κλιματιστικά παλαιού τύπου η κατανάλωση βάσει λειτουργίας τους φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Χώρος	Ισχύς	Ώρες χρήσης	Κατανάλωση (ημερήσια)	Κατανάλωση (ετήσια)
Γραφείο διοικητή	1,3 kW	8 h	10,4 kWh	3,796 MWh
2 ^ο – 3 ^ο γραφείο	1,3 kW	8 h	10,4 kWh	3,796 MWh
1 ^ο γραφείο	1,3 kW	8 h	10,4 kWh	3,796 MWh
Ειδικό τμήμα	1,3 kW	8 h	10,4 kWh	3,796 MWh
Μισθοτροφοδοσία	1,1 kW	8 h	8,8 kWh	3,212 MWh
Θάλαμοι οπλιτών	3,4 kW	16 h	272 kWh	99,28 MWh
ΑΥΔΜ	1,1 kW	12 h	13,2 kWh	4,818 MWh
ΚΨΜ	1,3 kW	12 h	15,6 kWh	5,694 MWh
Διαχείριση ΚΨΜ	1,1 kW	8 h	8,8 kWh	3,212 MWh

Πίνακας 6.: Στοιχεία λειτουργίας υφιστάμενων συστημάτων ψήξης

Με βάση τις τιμές του παραπάνω πίνακα, η ηλεκτρική κατανάλωση των κλιματιστικών σε καθημερινή βάση φτάνει τις 360 kWh. Έτσι, με τη δεδομένη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στα 0,117 €/kWh, το ημερήσιο κόστος κατανάλωσης αγγίζει τα **42,12 €/ημέρα**. Άρα, το ετήσιο κόστος φτάνει τις **15.373,80 €**.

Για την αντικατάσταση των κλιματιστικών, θα επιλεγούν κλιματιστικά inverter των 9.000 btu, καθώς οι χώροι που απαιτείται κλιματισμός ανήκουν στο εύρος των 13-18 m². Η ετήσια κατανάλωση των εν λόγω κλιματιστικών είναι 917 kWh για θέρμανση και 148 kWh για ψύξη, άρα συνολική κατανάλωση 1,065 MWh/έτος. Έτσι, ενώ τα 14 κλιματιστικά παλαιού τύπου καταναλώνουν συνολικά 131,4 MWh/έτος με κόστος 15.373,80 €, τα κλιματιστικά νέου τύπου έχουν κατανάλωση $14 \cdot 1,065 \text{ MWh/έτος} = 14,91 \text{ MWh/έτος}$ και κόστος **1.744,47 €** (ή **4,78 €/ημέρα**).

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης εξαρτάται από το κόστος των κλιματιστικών, το οποίο εκτιμάται σε 580 €/κλιματιστικό, καθώς και την αμοιβή του προσωπικού που θα αναλάβει την εγκατάσταση, που εκτιμάται στα 180 €. Έτσι, το τελικό κόστος εκτιμάται στις 8.300€. Τελικά, απόσβεση αναμένεται να επιτευχθεί σε $\frac{8.300 \text{ €}}{(42,12-4,78)\text{€/ημέρα}} = 222 \text{ ημέρες}$, δηλαδή το εκτιμώμενο χρονικό διάστημα απόσβεσης είναι 7-8 μήνες.

§7.8 Αντικατάσταση λαμπτήρων φθορισμού με λαμπτήρες LED

Στο κτίριο υπάρχουν τοποθετημένοι 200 λαμπτήρες φθορισμού. Στην μελέτη που ακολουθεί θα αποδειχθεί ότι η αντικατάστασή τους με λαμπτήρες τεχνολογίας LED, θα είναι οικονομικά συμφέρουσα και θα υπάρξει απόσβεση σε μικρό χρονικό διάστημα. Για τη μελέτη θεωρείται δεδομένη η τιμή του ρεύματος στα 0,117€/kWh.

Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται στην υπό μελέτη εγκατάσταση, είναι της General Electric, και στον παρακάτω πίνακα, ακολουθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Κατανάλωση	36W
Ροή φωτεινής πηγής	3350 Lumen
Ενεργειακή απόδοση φωτεινής πηγής	93,06 Lumen/W
Πλήθος	200
Μήκος	1,20m
Τύπου	T8
Διάρκεια ζωής	15.000h
Κόστος (λαμπτήρα)	1,57€

Πίνακας 7: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων φθορισμού της General Electric

- Στην εγκατάσταση που εξετάζουμε, το κόστος των λαμπτήρων ανέρχεται στα $1,57€ \times 200 = \mathbf{314,00€}$.
- Επιπλέον, η συνολική κατανάλωση ισχύος των λαμπτήρων ανέρχεται στα $36W \times 200 = \mathbf{7,2 kW}$
- Η συνολική ενέργεια που θα καταναλώσουν στις 15.000h που θα λειτουργήσουν μέχρι την αντικατάστασή τους είναι $7,2kW \times 15.000h = \mathbf{108 MWh}$.
- Τελικά το κόστος ανά kWh, λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στα 0,117€/kWh, ανέρχεται στα $0,117 \text{ €/kWh} \times 108.000 \text{ kWh} = \mathbf{12.636,00€}$.

Συνυπολογίζοντας και το αρχικό κόστος των λαμπτήρων, καταλήγουμε σε μία τελική τιμή **12.940,00€**.

Για τη συγκεκριμένη μελέτη, επιλέγονται οι λαμπτήρες LED, της εταιρίας Diolamp. Επειδή οι λαμπτήρες LED έχουν μεγαλύτερη απόδοση φωτεινής πηγής (σχεδόν 50% περισσότερο), για κάθε 2 λαμπτήρες φθορισμού, θα αντικαταστήσουμε με έναν λαμπτήρα

LED, οπότε θα χρησιμοποιηθούν 100 τέτοιοι λαμπτήρες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κατανάλωση	14W
Φωτεινή ροή	1550 Lumen
Απόδοση φωτεινής πηγής	110,7 Lumen/W
Πλήθος	100
Μήκος	1,20m
Τύπου	T8
Διάρκεια ζωής	30.000h
Κόστος (λαμπτήρα)	2,90€

Πίνακας 8.: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED της Osram

- Στην εγκατάσταση που εξετάζουμε, το κόστος των λαμπτήρων ανέρχεται στα $2,90\text{€} \times 100 = \mathbf{290,00\text{€}}$.
- Επιπλέον, η συνολική κατανάλωση ισχύος των λαμπτήρων ανέρχεται στα $14\text{W} \times 100 = \mathbf{1,4\text{ kW}}$
- Η συνολική ενέργεια που θα καταναλώσουν κατά τις 30.000h που θα λειτουργήσουν μέχρι την αντικατάστασή τους ανέρχεται στις $1,4\text{kW} \times 30.000\text{h} = \mathbf{42\text{ MWh}}$.
- Τελικά το κόστος ανά kWh, λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στα 0,117€/kWh, ανέρχεται στα $0,117\text{ €/kWh} \times 42.000\text{ kWh} = \mathbf{4.914,00\text{€}}$.

Συνυπολογίζοντας και το αρχικό κόστος των λαμπτήρων, καταλήγουμε σε μία τελική τιμή **5.204,00€**.

Αν και από τα παραπάνω, φαίνεται ότι οι λαμπτήρες LED, έχουν το μισό κόστος σε σύγκριση με τους λαμπτήρες φθορισμού, υπάρχει μια παράμετρος που θα γύρει ακόμα περισσότερο τη σύγκριση υπέρ των λαμπτήρων LED και αυτό αφορά τη διάρκεια ζωής. Οι λαμπτήρες LED, που έχουν επιλεγεί, έχουν **διπλάσια** διάρκεια ζωής. Οι λαμπτήρες φθορισμού, θα πρέπει να αλλαχθούν μία επιπλέον φορά, πριν αλλαχθούν οι αντίστοιχοι λαμπτήρες LED. Έτσι, το νέο κόστος υπολογίζεται ως εξής:

- Συνολικά χρειάζονται 400 λαμπτήρες φθορισμού (και όχι 200), άρα το κόστος των λαμπτήρων είναι **628,00€**.
- Η κατανάλωση ισχύος είναι $200 \times 36\text{W} = \mathbf{7,2\text{ kW}}$.
- Η συνολική κατανάλωση ενέργειας, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους, θα είναι $30.000\text{h} \times 7,2\text{ kW} = \mathbf{216\text{ GWh}}$.

• Τελικά το κόστος ανά kWh, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος στα 0,117€/kWh, ανέρχεται στα 0,117 €/kWh X 432 GWh = **25.272,00€**.

Λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος των λαμπτήρων, καταλήγουμε σε ένα κόστος που ανέρχεται στις **25.900,00€**.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα στοιχεία σύγκρισης των δύο τεχνολογιών.

Λαμπτήρας	Φθορισμού (200)	Φθορισμού (400)	LED (100)
Κόστος εγκατάστασης	494€	808€	470€
Κόστος κατανάλωσης	12.636€	25.900€	4.914€
Διάρκεια ζωής	15.000h	30.000h	30.000h
Συνολικό κόστος	12.940€	26.708€	5.204€

Πίνακας 9.: Συγκριτικός πίνακας λαμπτήρων

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης, θεωρείται δεδομένο ότι οι λαμπτήρες φθορισμού που βρίσκονται ήδη στην εγκατάσταση του κτιρίου, έχουν ακόμα 15.000h διάρκεια ζωής. Επίσης, για να καθοριστεί ο ακριβής χρόνος απόσβεσης, θα πρέπει να οριστούν οι ώρες λειτουργίας των λαμπτήρων ημερησίως. Ωστόσο, οι ώρες λειτουργίας διαφέρουν, ανάλογα με το είδος του χώρου που βρίσκονται οι λαμπτήρες (π.χ. σε ένα γραφείο ο χρόνος λειτουργίας ημερησίως είναι περίπου 8 ώρες, στην κουζίνα 12 ώρες, στους διαδρόμους 24 ώρες και στις αποθήκες 1 ώρα). Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τις ώρες λειτουργίας των λαμπτήρων ανά χώρο, καθώς και το πλήθος τους.

Χώρος	Πλήθος λαμπτήρων φθορισμού	Πλήθος λαμπτήρων LED	Ώρες λειτουργίας	Κατανάλωση λαμπτήρων φθορισμού	Κατανάλωση λαμπτήρων LED	Διαφορά κόστους
Εστιατόριο	18	9	4 h	2,592 kWh	0,504 kWh	0,244 €
Κ.Ψ.Μ.	19	10	8 h	5,472 kWh	1,120 kWh	0,509 €
Κουζίνα	16	8	12 h	6,912 kWh	1,344 kWh	0,651 €
Θάλαμοι	30	15	6 h	6,480 kWh	1,260 kWh	0,611 €
Γραφεία	21	10	8 h	6,048 kWh	1,120 kWh	0,577 €
Υπόγειο	41	20	1 h	1,476 kWh	0,280 kWh	0,140 €
Τουαλέτες	20	10	24 h	17,28 kWh	3,360 kWh	1,629 €
Διάδρομοι	35	17	24 h	30,24 kWh	5,712 kWh	2,870 €

Πίνακας 10.: Η διαφορά ημερήσιου κόστους κατανάλωσης ορίζεται ως το γινόμενο του κόστους ανά kWh με τη διαφορά της κατανάλωσης των λαμπτήρων φθορισμού με την κατανάλωση των λαμπτήρων LED

Έτσι, η συνολική διαφορά ημερήσιου κόστους κατανάλωσης ανέρχεται στα 0,244 € + 0,509€ + 0,651€ + 0,611€ + 0,577€ + 0,140€ + 1,629€ + 2,87€ = **7,231 €/ημέρα**. Άρα, για ένα κόστος εγκατάστασης που ανέρχεται στα 290 € συν την αμοιβή του ηλεκτρολόγου εγκατάστασης που εκτιμάται στα 180€, η απόσβεση θα έχει επιτευχθεί σε 470 € / 7,231 €/ημέρα = **65 ημέρες**. Άρα, η κάλυψη αυτού του ποσού θα έχει επιτευχθεί σε 65 ημέρες, δηλαδή σε σχεδόν από **2 μήνες**.

§7.9 Ενεργειακή κατάταξη κτιρίου

Η ενεργειακή κλάση είναι μια βαθμολογία που δίνεται σε ένα ακίνητο ανάλογα με την εκτιμώμενη ετήσια κατανάλωση ενέργειας που πραγματοποιεί. Η κατανάλωση ενέργειας του υπό επιθεώρηση ακινήτου, συγκρίνεται με ένα κτίριο αναφοράς και ταξινομείται σε μια προκαθορισμένη κλίμακα από το **A** έως το **H**.

Ο ενεργειακός επιθεωρητής που αναλαμβάνει την ενεργειακή πιστοποίηση του κτιρίου, δηλαδή την κατάταξή του σε ενεργειακή βαθμίδα πρέπει να βασιστεί σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά όπως η ηλικία του ακινήτου, τα υλικά κατασκευής, το σύστημα θέρμανσης-ψύξης και ο τρόπος παροχής ζεστού νερού.

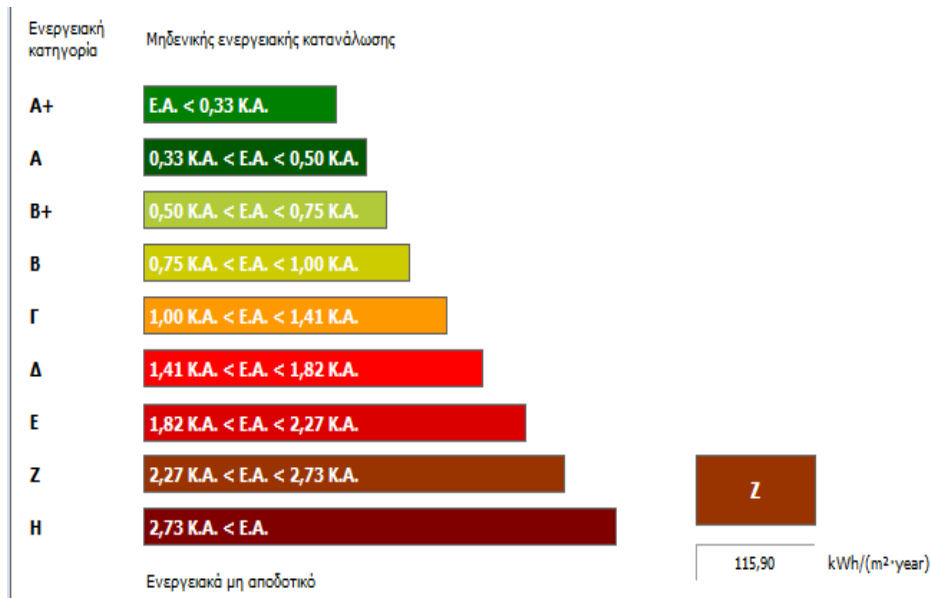
Η ενεργειακή κατανάλωση μετράτε με τη χρήση kWh δηλαδή με τη χρήση ενέργειας που θα χρησιμοποιούσες εάν κρατούσες σε λειτουργία μια συσκευή 1,000 watt για μια ώρα. Δηλαδή διαφορετικές συσκευές χρησιμοποιούν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας, για παράδειγμα μια λάμπα πυρακτώσεως συγκριτικά με μια λάμπα Led.

Η τοποθέτηση του συγκεκριμένου κτιρίου στην κατηγορία E ουσιαστικά δείχνει την συμπεριφορά του ακινήτου και κατ' επέκταση το λειτουργικό κόστος αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό. Δηλαδή αντιστοιχεί σε 182% - 227% της κατανάλωσης του ακινήτου αναφοράς.

Οι 9 κατηγορίες ενεργειακής κατάταξης είναι οι **(A+, A, B+, B, Γ, Δ, E, Z, H)** καθορίζονται από ένα εύρος τιμών βάσει της υπολογιζόμενης συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου σε σύγκριση με το κτίριο αναφοράς. Ως κτίριο αναφοράς χρησιμοποιείται το υπό θεώρηση κτίριο, αλλά με συγκεκριμένες προδιαγραφές και ιδεατά τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως σύστημα θέρμανσης ψύξης, συστήματα σκίασης, αερισμός, συστήματα φωτισμού, αυτοματισμοί⁴⁸.

⁴⁸ Πέριος Δ.Π., «Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια- αθλητικά κέντραβιομηχανικές μεταφορές, τόμος Α», Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ, Αθήνα 2007, σελ. 33-36

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ενεργειακή κατηγορία του κτιρίου που μελετάμε. Θα μπορούσε να καταταχθεί σε μια από τις 9 κλάσεις A+ έως H στην οποία ανήκουν τα μη αποδοτικά κτίρια.



Εικόνα 3 : Αποτέλεσμα ενεργειακής κατάταξης κτιρίου

Αποτύπωμα

Το υπάρχον κτίριο κατατάσσεται στην **Z** κλάση και χαρακτηρίζεται ενεργειακά ως μη αποδοτικό με συνολική ενεργειακή κατανάλωση 115,90 kWh/(m²·year). Επίσης στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τις καταναλώσεις ενέργειας για κάθε χρήση του υπάρχοντος κτιρίου συγκριτικά με τις καταναλώσεις του κτιρίου αναφοράς.

Όπως διαπιστώσαμε προηγουμένως σύμφωνα με την ενεργειακή μελέτη που ειπονήσαμε, η ενεργειακή κλάση του υφιστάμενου κτιρίου είναι **Z** κατηγορίας με ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας 115,9 kWh/(m²·year). Αυτή η κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με του κτιρίου αναφοράς που είναι 49,6 kWh/(m²·year) είναι πολύ υψηλή.

Θερμομόνωση κελύφους

Το κέλυφος του δεν είναι επαρκώς θερμομονωμένο με συνέπεια να μην υπάρχει ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση. Οι εγκαταστάσεις σχετικά με τη ψύξη, τη θέρμανση και το φωτισμό δεν έχουν αντικατασταθεί από κατασκευής του με αποτέλεσμα το υφιστάμενο κτίριο να μην έχει εκσυγχρονιστεί.

Από τη θερμομόνωση κτιριακού κελύφους παρατηρούμε πώς έχουμε σημαντική μείωση στη κατανάλωση ενέργειας στη ψύξη όπου από 3,70 kwh/(m².year) μειώνεται σε 2,1 kwh/(m².year). Ακόμη πιο μεγάλη πτώση κατανάλωσης ενέργειας παρατηρούμε στη θέρμανση, από 43,7 kwh/(m².year) μειώνεται σε 13.1 kwh/(m².year). Το σενάριο της θερμομόνωσης αναβαθμίζει το υφιστάμενο κτίριο δυο κατηγορίες, από Ζ σε Δ με συνολική ενεργειακή κατανάλωση 83.70 kwh/(m².year). Οι καταναλώσεις ζεστού νερού χρήσης και φωτισμού παραμένουν σταθερές.

Αντικατάσταση λέβητα πετρελαίου με λέβητα φυσικού αερίου

Για τη θέρμανση του κτιρίου χρησιμοποιείται ένας λέβητας πετρελαίου που είναι εγκατεστημένος στο υπόγειο, στο χώρο του λεβητοστασίου. Το σύστημα θέρμανσης χρησιμοποιείται έξι μήνες το χρόνο για την κάλυψη των θερμικών φορτίων και περίπου για 8 ώρες ημερησίως. Είναι εγκατεστημένο από το 1990 όταν και κατασκευάστηκε το κτίριο. Βαθμός απόδοσης παραγωγής υπολογίζεται 0.89. Λαμβάνεται συντελεστής θερμικών απωλειών διανομής από πίνακες=0,95. Λαμβάνεται ποσοστό λειτουργίας βοηθητικών συστημάτων από 4,15 W/m²=80%.

Η αντικατάσταση λέβητα πετρελαίου με λέβητα φυσικού αερίου παρατηρούμε τη κατακόρυφη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, από 43,70kwh/(m².year) σε 10,90 kwh/(m².year). Το κτίριο αναβαθμίζεται ενεργειακά και κατατάσσεται στην ενεργειακή κλάση Δ με πρωτογενής ενέργεια ανά τελική χρήση 83,00 kwh/(m².year). Οι καταναλώσεις για ψύξη, ζεστό νερό χρήσης και φωτισμό παραμένουν σταθερές.

Το πρώτο σενάριο που αντιστοιχεί στη θερμομόνωση του κτιριακού κελύφους με υψηλών προδιαγραφών θερμομονωτικά υλικά της Hyperdesmo-LV στεγανωτικό – Μονωτικό ταρτσών το οποίο είναι χαμηλού ιξώδους χυτή ελαστική μεμβράνη πολυουρεθανικής βάσεως ενός συστατικού. Το συγκεκριμένο υλικό πολυμερίζεται με την υγρασία της επιφάνειας και σχηματίζει μονολιθική στεγανωτική μεμβράνη. Επίσης είναι υλικό μικρομοριακής δομής με χαμηλό ιξώδες που επιτρέπει την χρήση του από μηχανές ψεκασμού. Με αυτό το υλικό το οποίο έχει κόστος αγοράς της 25 Kg συσκευασίας στα 125 ευρώ και κόστος τοποθέτησης 30,00 ευρώ ανά τετραγωνικό αναβαθμίζει το κτίριο στην κατηγορία Δ και μειώνει το λειτουργικό κόστος του κτιρίου κατά 4.244,00€/έτος εάν επιθυμούμε απόσβεση σε βάθος πενταετίας. Διότι θα χρειαστούμε τουλάχιστον είκοσι συσκευασίες των 25 Kg και συνολικό κόστος εγκαταστάτης του στην ταράτσα 18.720,00 λόγω των 624 m² και κόστος υλικών 2.500,00 ευρώ. Επιπλέον το κόστος αντικατάστασης των κουφωμάτων για το σύνολο των 82 m² για θερμοδιακοπτόμενα κουφώματα αλουμινίου με διπλά ενεργειακά τζάμια ανά τετραγωνικό είναι περίπου 350,00 ευρώ δηλαδή 28.700,00 ευρώ.

Αυτό κρίνει τη συγκεκριμένη αναβάθμιση ως τη πιο μη συμφέρουσα καθώς οι άλλες δύο επεμβάσεις, αλλαγή λέβητα πετρελαίου με φυσικού αερίου και αναβάθμιση φωτισμού χώρου αναβαθμίζουν το κτίριο στην κατάταξη Γ εξίσου, αλλά δεν αποφέρουν τα ίδια οικονομικά οφέλη. Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή καταλληλότερου σεναρίου παίζει και ο χρόνος απόσβεσης για κάθε σενάριο. Στη περίπτωση μας είναι πολύ κοντά και για τα τρία σενάρια με ένα εύρος τιμών (5 έτη-6,5έτη). Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή του 1^{ου} σεναρίου είναι να διατεθεί ένα υψηλό οικονομικό κεφάλαιο της τάξεως των 75.000,00€ μαζί με ενδεχόμενα απρόβλεπτα κόστη. Στα άλλα σενάρια αναβάθμισης το κόστος κεφαλαίου που απαιτείται είναι αισθητά πιο χαμηλό με την αλλαγή λέβητα σε φυσικό αέριο στα 13.000,00€ και την αναβάθμιση φωτισμού στα μόλις 450,00 ευρώ.

Σε μια ιδανική λύση αλλά λιγότερο εφικτή λόγω κόστους αναβάθμισης θα γινόταν ο συνδυασμός των τριών σεναρίων αναβαθμίζοντας το κτίριο στην ενεργειακή κατηγορία Α και με τη προσθήκη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ίσως φτάναμε και τις ιδανικές ενεργειακές καταναλώσεις ενός κτιρίου κάνοντας το κατηγορίας σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης.

§7.10 Πρόβλημα βελτιστοποίησης

Οι επεμβάσεις που περιεγράφηκαν προηγουμένως στα δομικά υλικά και τον Η/Μ εξοπλισμό, μπορούν να γίνουν με διάφορους συνδυασμούς μεταξύ των, ώστε να επιτύχουμε την ενεργειακή αναβάθμιση, στις διάφορες βαθμίδες, από τη Ζ, που αφορά στην τωρινή ενεργειακή κλάση του υπό μελέτη κτιρίου έως και την Α⁺ τη μέγιστη ενεργειακή αναβάθμιση. Υπάρχουν 32 πιθανά σενάρια, ανεξαρτήτου κόστους και ελάχιστης ενεργειακής βαθμίδας. Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόβλημα το οποίο θα δομηθεί με τη θεωρία που αναπτύχθηκε στο 3^ο κεφάλαιο και με την μαθηματική επίλυση του προβλήματος θα αναζητήσουμε τη βέλτιστη λύση η οποία θα είναι συνυφασμένη με το ελάχιστο κόστος, ένας περιορισμός που θα πρέπει να «υπακούει» η συνάρτηση και σύναμμα με τη δυνατόν καλύτερη ενεργειακή του αναβάθμιση.

Για τον τρόπο δόμησης του υπόψη προβλήματος βελτιστοποίησης κρίνεται απαραίτητο να δοθούν επιπλέον εξηγήσεις – επισημάνσεις ώστε να αποδειχθεί ότι για τη λήψη της τελικής απόφασης του ιδιοκτήτη/κυρίου της εξαταζόμενης κτιριακής εγκατάστασης ακολουθήθηκαν διαδικασίες των τεσσάρων πρώτων κεφαλαίων της παρούσης και συγκεκριμένα:

Η γενική μορφή της συνάρτησης που καλούμαστε να μεγιστοποιήσουμε σε πρόβλημα του ΓΠ έχει τη μορφή:

$$F=a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_nx_n$$

Με a_1, \dots, a_n τα βάρη και $x_1 \dots x_n$ οι μεταβλητές

Στο εν λόγω πρόβλημα η συνάρτηση που επιζητούμε να βελτιστοποιήσουμε είναι :

$$N=w_1c_1+w_2c_2+\dots+w_5c_5$$

Όπου $F=N$ η ενεργειακή αναβάθμιση και w_1, w_2, \dots, w_5 τα βάρη των εργασιών 1 έως 5 και c_1, \dots, c_5 τα κόστη που αποτελούν τις μεταβλητές μας

Οι περιορισμοί σε ένα πρόβλημα του ΓΠ έχουν την μορφή ανισώσεων

$$b_1x_1+\dots+b_nx_n \leq B$$

Στο εν λόγω πρόβλημα $B \leq 30.000 \text{ €}$ δηλαδή $c_1+c_2+c_3+c_4+c_5 \leq 30.000 \text{ €}$ και τα c_1, \dots, c_5 οι μεταβλητές που παίρνουν είτε προκαθορισμένη τιμή, εάν επιλεγούν οι εργασίες που αντιπροσωπεύουν, ή 0 εάν η εργασία επιλεγεί να μην γίνει.

Άρα αρχίζοντας την επίλυση του προβλήματος η συνάρτηση που πρέπει να βρεθεί το μέγιστό της είναι:

$$N = \sum_{n=0}^4 W_n \cdot C_n.$$

όπου: w_n το διάνυσμα βάρους που αντιστοιχεί στην επέμβαση n

C_n το κόστος που αντιστοιχεί στην επέμβαση n

Επέμβαση	Κόστος	Ενεργειακή αναβάθμιση
Κουφώματα	$C_1 = 21.220 \text{ €}$	1,5 κλάση
Λέβητας φυσικού αερίου	$C_2 = 13.000 \text{ €}$	1,5 κλάση
Κέλυφος	$C_3 = 28.700 \text{ €}$	1,5 κλάση
Λαμπτήρες LED	$C_4 = 450 \text{ €}$	1 κλάση
Κλιματιστικά inverter	$C_5 = 8.500 \text{ €}$	1 κλάση

Αρχικά ορίζεται μία κλίμακα ενεργειακών βαθμίδων, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Ενεργειακή κλάση	Κλίμακα
A ⁺	N = 8
A	N = 7
B ⁺	N = 6
B	N = 5
Γ	N = 4
Δ	N = 3
E	N = 2
Z	N = 1
H	N = 0

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του διανύσματος των βαρών w_n .

$$\text{Ορίζεται: } w_n = \frac{N}{Cn}$$

όπου: N η ενεργειακή αναβάθμιση που αντιστοιχεί σε κάθε βαθμίδα

$\sum_{n=0}^4 Cn$ το συνολικό κόστος και των πέντε επεμβάσεων

Άρα το διάνυσμα βαρών είναι: $w_n = [0,00007 \ 0,00012 \ 0,00005 \ 0,00223 \ 0,00012]$

Αντίστοιχα, το διάνυσμα κόστους: $C_n = [21.220 \ 13.000 \ 28.700 \ 450 \ 8.500]$

Έτσι, η συνάρτηση που πρέπει να γίνει μέγιστη είναι η:

$$N = \sum_{n=0}^4 Wn \cdot Cn$$

Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι η άνοδος κατά 0,5 βαθμούς της κλίμακας που χρησιμοποιείται, σημαίνει άνοδος ενεργειακής κλάσης κατά 1 σκαλοπάτι.

Από τις πέντε επεμβάσεις που έχουν αναλυθεί νωρίτερα, προκύπτουν $2^5 = 32$ πιθανοί

συνδυασμοί επεμβάσεων, ο καθένας εκ των οποίων θα αναβαθμίσει το κτίριο με ένα συγκεκριμένο κόστος. Με διαφορετικά κόστη, μπορεί να επιτευχθεί αναβάθμιση ίδιας βαθμίδας. Ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται πέντε πιθανά σενάρια, όπου έχει καθοριστεί συγκεκριμένο όριο κόστους και θα αποτελέσει βασικό εργαλείο στον αποφασίζοντα για την επιλογή της τελικής του απόφασης και πιθανών εναλλακτικών.

Κόστος επεμβάσεων	Σενάριο 1° (κανένα όριο κόστους)	Σενάριο 2° (όριο κόστους 65.000€)	Σενάριο 3° (όριο κόστους 50.000€)	Σενάριο 4° (όριο κόστους 35.000€)	Σενάριο 5° (όριο κόστους 25.000€)
Μόνωση δώματος	21.220 €	21.220 €	21.220 €	-	-
Αντικατάσταση λέβητα	13.000 €	13.000 €	13.000 €	13.000 €	13.000 €
Αντικατάσταση κουφωμάτων	28.700 €	28.700 €	-	-	-
Αντικατάσταση λαμπτήρων	450 €	450 €	450 €	450 €	450 €
Αντικατάσταση κλιματιστικών	8.500 €	-	8.500 €	8.500 €	8.500 €
Συνολικό κόστος	71.870 €	63.370 €	43.170 €	21.950 €	21.950 €
Ενεργειακή κλάση	A ⁺	A	B ⁺	B	B

Κατά αντιστοιχία, στον επόμενο πίνακα ακολουθεί ο βέλτιστος και ο χειρίστος οικονομικά τρόπος αναβάθμισης στις ενεργειακές κλάσεις B και Γ.

Ενεργειακή κλάση	Κλάση B (max κόστος)	Κλάση B (min κόστος)	Κλάση Γ (max κόστος)	Κλάση Γ (min κόστος)
Μόνωση δώματος	21.220 €	-	21.220 €	-
Αντικατάσταση λέβητα	-	13.000 €	-	13.000 €
Αντικατάσταση κουφωμάτων	28.700 €	-	28.700 €	-
Αντικατάσταση λαμπτήρων	-	450 €	-	450 €
Αντικατάσταση κλιματιστικών	8.500 €	8.500 €	-	-
Κόστος επεμβάσεων	58.420 €	21.950 €	49.920 €	13.450 €

Φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, γραμμοσκιασμένη, η βέλτιστη λύση αφού ικανοποιεί τη συνάρτηση και τον περιορισμό που τέθηκε: Κόστος κάτω των 30.000,00 € μέγιστη κλίμακα αναβάθμισης σύμφωνα με βάση τον Κ.Εν.Α.Κ. η κλάση B.

Συμπεράσματα

Επαληθεύεται ότι με τον Γ.Π. μπορούμε να λύσουμε προβλήματα οποιασδήποτε διάστασης X , Y (X μεταβλητές, Y περιορισμούς) και με τη χρήση H/Y , επιτυγχάνεται η επιθυμητή ταχύτητα επίλυσης των.

Ο γραμμικός προγραμματισμός ισχύει μόνο για τα προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές, δηλαδή, όπου μπορούν να εκφραστούν οι εξισώσεις με ευθείες γραμμές. Σε πραγματικές συνθήκες ζωής, όταν οι περιορισμοί ή αντικειμενικές συναρτήσεις δεν είναι γραμμικές, η τεχνική αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι δε συντελεστές αβεβαιότητας, όπως οι καιρικές συνθήκες, δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και η υιοθέτηση των αποτελεσμάτων του αποσκοπεί στην εύρεση της μέγιστης ενεργειακής αναβάθμισης ενός κτιρίου με συγκεκριμένο κόστος. Ωστόσο είναι εφικτή η τροποποίηση του αλγορίθμου, ώστε να βρεθεί το ελάχιστο κόστος για το οποίο μπορεί να επιτευχθεί ενεργειακή αναβάθμιση συγκεκριμένου πλήθους ενεργειακών κλάσεων, ανάλογα με την αναβάθμιση που επιδιώκει ο χρήστης.

Για να επιτευχθεί ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου αναφοράς, η βασική προϋπόθεση είναι να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση όμως ταυτόχρονα να καλυφθεί και το σύνολο των ημερήσιων αναγκών σε ενέργεια. Για να επιτευχθεί η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου αναφοράς, υπάρχουν δύο ειδών επεμβάσεις: Πρώτον επεμβάσεις στα δομικά υλικά, ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή θερμομόνωση του κτιρίου και δεύτερον επεμβάσεις στον H/M εξοπλισμό (π.χ. λαμπτήρες, κλιματιστικά, λέβητες κλπ.). Η κάθε εργασία έχει διαφορετικό αντίκτυπο στο ενεργειακό αποτύπωμα του κτιρίου, διαφορετικό χρόνο περάτωσης και διαφορετικό κόστος. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η εύρεση της βέλτιστης λύσης για την επίτευξη της ενεργειακής αναβάθμισης οποιασδήποτε υφιστάμενης εγκατάστασης, στην επιθυμητή ενεργειακή κλάση, με το ελάχιστο δυνατό κόστος κατά κύριο λόγο, και κατά δεύτερο λόγο με την μικρότερη δυνατή χρονική διάρκεια περάτωσης των εργασιών.

Ένα άλλο συμπέρασμα από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ότι επιλέγουμε τις ελάχιστες απαιτητές εργασίες που θα μας οδηγήσουν στην μέγιστη ενεργειακή αναβάθμιση. Αυτό μας οδηγεί εμμέσως σε κέρδος χρόνου στις επεμβάσεις άρα σε κέρδος χρόνου στην παράδοση του κτιρίου για χρήση και την ταχύτερη απόσβεση της επένδυσης.

Επιπλέον ένα από τα βασικότερα συμπεράσματα της εργασίας είναι ότι για να καταταγεί το συγκεκριμένο κτίριο σε ενεργειακή κατηγορία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες παρεμβάσεις οι οποίες μεταξύ τους θα έχουν το ίδιο αποτέλεσμα αλλά οικονομικά μεταξύ τους υπάρχει μεγάλη απόκλιση. Παραδείγματος χάρη για να καταταγεί το κτίριο στην κατηγορία Γ θα πρέπει να αντικατασταθεί ο λέβητας πετρελαίου όπως και οι λάμπες LED με οικονομικό αποτύπωμα της τάξης των 13.450,00 €, ενώ θα μπορούσε να καταταγεί πάλι στην ίδια κατηγορία με αντικατάσταση κουφωμάτων – μόνωση δώματος με συνολικό κόστος 49.920,00 €. Συνεπώς, το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο δηλαδή το κτίριο θα καταταγεί στην κατηγορία Γ, αλλά με διαφορετικό οικονομικό αποτύπωμα. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η υιοθέτηση του γραμμικού προγραμματισμού ως μέθοδος βελτιστοποίησης προκειμένου να γίνει επιλογή των απαραίτητων εργασιών που πρέπει να γίνουν ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ενεργειακή αναβάθμιση με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Επειδή όλες οι ενέργειες πραγματοποιήθηκαν σε υπαρκτό κτίριο και οι μετρήσεις, ανάγκες, χρήση του κτιρίου είναι ρεαλιστικές και όχι θεωρητικές, το εξαγόμενο αποτέλεσμα δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα πανομοιότυπα κτίρια που υφίστανται σε Στρώδα στον ελληνικό χώρο με μοναδική αλλαγή την κλιματική ζώνη.

Τέλος το υπόψη πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να επεκταθεί με την εισαγωγή περισσότερων μεταβλητών όπως της μεταβλητής του χρόνου των εργασιών ενεργειακής αναβάθμισης του κτιρίου ή ακόμη και της μεταβλητής της κλιματικής ζώνης του ελληνικού χώρου, δηλαδή της υφιστάμενης θέσης του κτιρίου, ακόμη και των διαφορετικών δομικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν καταλήγοντας σε βέλτιστες λύσεις με αποκλίσεις σημαντικές, σε σχέση με το σύνολο των χρημάτων που καλείται ο επενδυτής να δαπανήσει.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Τρόπος εισαγωγής δεδομένων σε κώδικας της MATLAB που εντοπίζει το βέλτιστο σενάριο. Σαν είσοδο δέχεται το διάνυσμα κόστους, το διάνυσμα βάρους και το μέγιστο κόστος που διατίθεται προς δαπάνη, ορίστηκε αυθαίρετα και είναι προς επιλογή του χρήστη η τιμή που ανατίθεται. Στην έξοδο του προγράμματος εμφανίζεται η βέλτιστη λύση για να επιτευχθεί η μέγιστη ενεργειακή αναβάθμιση, με ανώτατο όριο κόστους το μέγιστο κόστος που ανατέθηκε στην είσοδο. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης βελτιστοποίησης της MATLAB. Συγκεκριμένα, έχοντας θέσει σαν περιορισμό το αρχικό κόστος 30.000,00€, ο αλγόριθμος λύνει το πρόβλημα που έχει οριστεί στην § 7.10.

Παρακάτω ακολουθεί ο κώδικας MATLAB με τη χρήση του οποίου λύθηκε το προαναφερθέν πρόβλημα βελτιστοποίησης ενώ δίπλα δίδονται τα σχόλια με πράσινο χρώμα.

```
maximum_cost_by_user=30000;  
cost_per_scenario=[21200 13000 28700 450 8500];  
weight_per_scenario=[0.00007 0.00012 0.00005 0.00223 0.00012];  
number_of_scenarios=length(cost_per_scenario);  
  
%% Optimization Problem  
cost_of_system=optimvar('cost_of_system',1,1,'LowerBound',0,'UpperBound',maximum_cost_by_user);  
total_energy_improvement=optimvar('total_energy_improvement',1,1,'LowerBound',0,'UpperBound',sum(cost_per_scenario.*weight_per_scenario));  
binary_per_scenario=optimvar('binary_per_scenario',1,number_of_scenarios,'LowerBound',0,'UpperBound',1,'Type','integer');  
prob=optimproblem;  
prob.Objective= -total_energy_improvement;  
prob.Constraints.cons1 = total_energy_improvement == sum(cost_per_scenario.*weight_per_scenario.*binary_per_scenario);  
prob.Constraints.cons2 = cost_of_system == sum(cost_per_scenario.*binary_per_scenario);  
  
options = optimoptions('intlinprog','Display','off');  
sol = solve(prob,'solver','intlinprog','Options',options);  
scenarios_used=sol.binary_per_scenario;  
total_improvement=sol.total_energy_improvement;  
total_cost=sol.cost_of_system;  
  
fprintf("Η ενεργειακή αναβάθμιση που επιτυγχάνεται είναι: %d κλάρεις\r\n",round(total_improvement))  
fprintf("Το συνολικό κόστος είναι: %d€\r\n",total_cost)  
for i=1:number_of_scenarios  
    if scenarios_used(i)>0  
        fprintf("Εφαρμόστηκε το σενάριο %d\r\n",i)  
    end  
end
```

Αποτέλεσμα

```
>> Optimization  
Η ενεργειακή αναβάθμιση που επιτυγχάνεται είναι: 4 κλάσεις  
  
Το συνολικό κόστος είναι: 2.195000e+04€  
  
Εφαρμόστηκε το σενάριο 2  
  
Εφαρμόστηκε το σενάριο 4  
  
Εφαρμόστηκε το σενάριο 5
```

```
%Αρχικοποίηση προβλήματος  
cost_per_scenario=[21200 13000 28700 450 8500];  
weight_per_scenario=[0.00007 0.00012 0.00005 0.00223 0.00012];  
improvement=cost_per_scenario.*weight_per_scenario;  
  
% Εύρεση όλων των πιθανών σεναρίων  
possible_1=nchoosek(1:5,1);  
possible_2=nchoosek(1:5,2);  
possible_3=nchoosek(1:5,3);  
possible_4=nchoosek(1:5,4);  
possible_5=nchoosek(1:5,5);  
  
% Εύρεση κόστους και αναβάθμισης όλων των πιθανών σεναρίων  
k=1;  
for i=1:size(possible_1,1)  
    cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_1(i,1));  
    improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_1(i,1));  
    k=k+1;  
end  
for i=1:size(possible_2,1)  
  
cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_2(i,1))+cost_per_  
scenario(possible_2(i,2));  
  
improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_2(i,1))+improvement_  
ent(possible_2(i,2));  
    k=k+1;  
end  
for i=1:size(possible_3,1)  
  
cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_3(i,1))+cost_per_  
scenario(possible_3(i,2))+cost_per_scenario(possible_3(i,3));
```

```

improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_3(i,1))+improvement(possible_3(i,2))+improvement(possible_3(i,3));
    k=k+1;
end
for i=1:size(possible_4,1)

cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_4(i,1))+cost_per_scenario(possible_4(i,2))+cost_per_scenario(possible_4(i,3))+cost_per_scenario(possible_4(i,4));

improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_4(i,1))+improvement(possible_4(i,2))+improvement(possible_4(i,3))+improvement(possible_4(i,4));
    k=k+1;
end
for i=1:size(possible_5,1)

cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_5(i,1))+cost_per_scenario(possible_5(i,2))+cost_per_scenario(possible_5(i,3))+cost_per_scenario(possible_5(i,4))+cost_per_scenario(possible_5(i,5));

improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_5(i,1))+improvement(possible_5(i,2))+improvement(possible_5(i,3))+improvement(possible_5(i,4))+improvement(possible_5(i,5));
    k=k+1;
end
cost_improvement_combinations=[cost_of_possible_combination;improvement_of_possible_combination];
clear i k

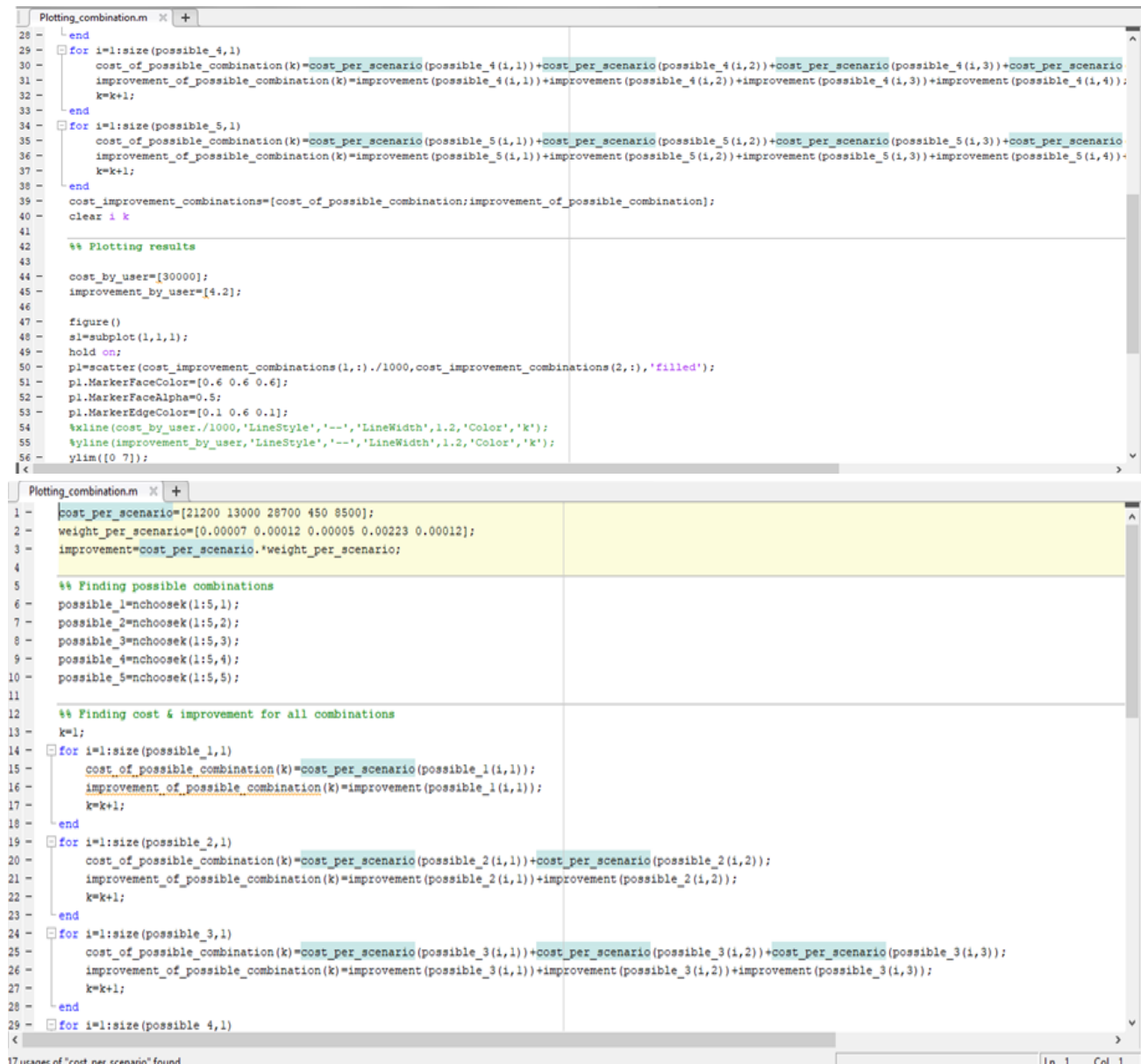
%% Διάγραμμα με τα αποτελέσματα

cost_by_user=[30000];
improvement_by_user=[4.2];

figure()
s1=subplot(1,1,1);
hold on;
p1=scatter(cost_improvement_combinations(1,:)/1000,cost_improvement_combinations(2,:), 'filled');
p1.MarkerFaceColor=[0.6 0.6 0.6];
p1.MarkerFaceAlpha=0.5;
p1.MarkerEdgeColor=[0.1 0.6 0.1];
% xline(cost_by_user./1000,'LineStyle','--','LineWidth',1.2,'Color','k');
% yline(improvement_by_user,'LineStyle','--','LineWidth',1.2,'Color','k');
ylim([0 7]);
set(gca, 'YTick', [0:1:10000]);
set(gca, 'YTickLabel', {'Z'; 'E'; 'Δ'; 'Γ'; 'B'; 'B+'; 'A'; 'A+'});
ylabel({'Ενεργειακή αναβάθμιση'; '[κλάση]'});
xlim([0 80]);
set(gca, 'XTick', [0:5:500]);

```

```
xlabel('Κόστος σεναρίων [κ€]');  
xtickangle(0);  
grid on;  
box off;  
x0=3; y0=3;  
width=13;  
height=8;  
set(gcf, 'units', 'centimeters', 'position', [x0,y0,width,height]);  
set(gca, 'FontName', 'Palatino Linotype', 'FontSize', 9);  
a=get(s1, 'Position');  
set(s1, 'Position', [a(1)+0.07 a(2)+0.1 a(3)-0.05 a(4)-0.1]);
```



The image shows two screenshots of MATLAB code. The top screenshot shows a plot titled 'Plotting_combination.m' with a scatter plot of cost vs. improvement. The bottom screenshot shows the code for finding possible combinations and calculating cost and improvement for all combinations.

```
28 - end  
29 - for i=1:size(possible_4,1)  
30 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_4(i,1))+cost_per_scenario(possible_4(i,2))+cost_per_scenario(possible_4(i,3))+cost_per_scenario  
31 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_4(i,1))+improvement(possible_4(i,2))+improvement(possible_4(i,3))+improvement(possible_4(i,4));  
32 - k=k+1;  
33 - end  
34 - for i=1:size(possible_5,1)  
35 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_5(i,1))+cost_per_scenario(possible_5(i,2))+cost_per_scenario(possible_5(i,3))+cost_per_scenario  
36 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_5(i,1))+improvement(possible_5(i,2))+improvement(possible_5(i,3))+improvement(possible_5(i,4));  
37 - k=k+1;  
38 - end  
39 - cost_improvement_combinations=[cost_of_possible_combination;improvement_of_possible_combination];  
40 - clear i k  
41 -  
42 - %% Plotting results  
43 -  
44 - cost_by_user=[30000];  
45 - improvement_by_user=[4.2];  
46 -  
47 - figure()  
48 - s1=subplot(1,1,1);  
49 - hold on;  
50 - p1=scatter(cost_improvement_combinations(1,:)/1000,cost_improvement_combinations(2,:), 'filled');  
51 - p1.MarkerFaceColor=[0.6 0.6 0.6];  
52 - p1.MarkerFaceAlpha=0.5;  
53 - p1.MarkerEdgeColor=[0.1 0.6 0.1];  
54 - xkline(cost_by_user./1000, 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 1.2, 'Color', 'k');  
55 - yline(improvement_by_user, 'LineStyle', '--', 'LineWidth', 1.2, 'Color', 'k');  
56 - ylim([0 7]);  
57 -
```

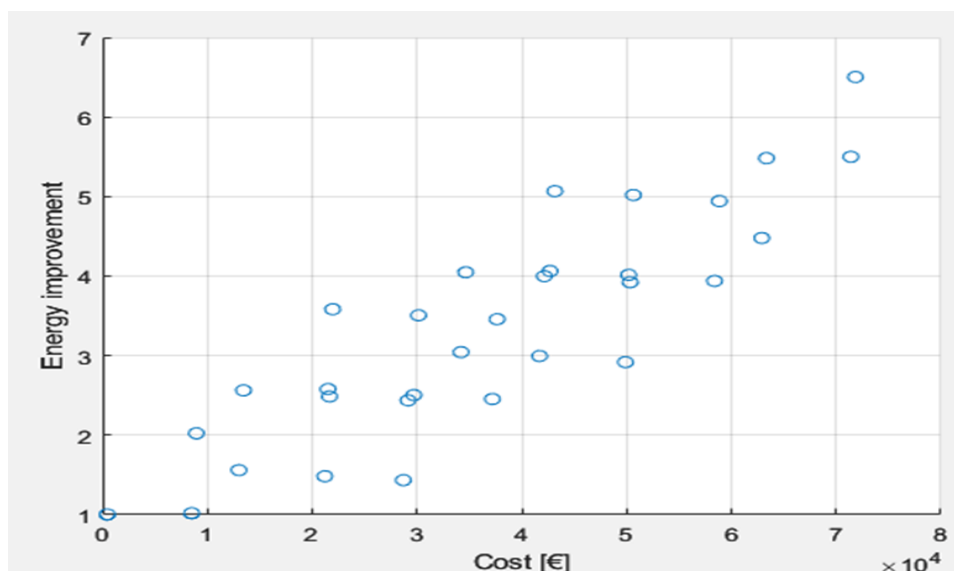
```
1 - cost_per_scenario=[21200 13000 28700 450 8500];  
2 - weight_per_scenario=[0.00007 0.00012 0.00005 0.00223 0.00012];  
3 - improvement=cost_per_scenario.*weight_per_scenario;  
4 -  
5 - %% Finding possible combinations  
6 - possible_1=nchoosek(1:5,1);  
7 - possible_2=nchoosek(1:5,2);  
8 - possible_3=nchoosek(1:5,3);  
9 - possible_4=nchoosek(1:5,4);  
10 - possible_5=nchoosek(1:5,5);  
11 -  
12 - %% Finding cost & improvement for all combinations  
13 - k=1;  
14 - for i=1:size(possible_1,1)  
15 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_1(i,1));  
16 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_1(i,1));  
17 - k=k+1;  
18 - end  
19 - for i=1:size(possible_2,1)  
20 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_2(i,1))+cost_per_scenario(possible_2(i,2));  
21 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_2(i,1))+improvement(possible_2(i,2));  
22 - k=k+1;  
23 - end  
24 - for i=1:size(possible_3,1)  
25 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_3(i,1))+cost_per_scenario(possible_3(i,2))+cost_per_scenario(possible_3(i,3));  
26 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_3(i,1))+improvement(possible_3(i,2))+improvement(possible_3(i,3));  
27 - k=k+1;  
28 - end  
29 - for i=1:size(possible_4,1)  
30 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_4(i,1))+cost_per_scenario(possible_4(i,2))+cost_per_scenario(possible_4(i,3))+cost_per_scenario(possible_4(i,4));  
31 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_4(i,1))+improvement(possible_4(i,2))+improvement(possible_4(i,3))+improvement(possible_4(i,4));  
32 - k=k+1;  
33 - end  
34 - for i=1:size(possible_5,1)  
35 - cost_of_possible_combination(k)=cost_per_scenario(possible_5(i,1))+cost_per_scenario(possible_5(i,2))+cost_per_scenario(possible_5(i,3))+cost_per_scenario(possible_5(i,4));  
36 - improvement_of_possible_combination(k)=improvement(possible_5(i,1))+improvement(possible_5(i,2))+improvement(possible_5(i,3))+improvement(possible_5(i,4));  
37 - k=k+1;  
38 - end  
39 - cost_improvement_combinations=[cost_of_possible_combination;improvement_of_possible_combination];  
40 - clear i k  
41 -
```

```
Plotting_combination.m
45 improvement_by_user=[4.2];
46
47 figure()
48 si=subplot(1,1,1);
49 hold on;
50 pl=scatter(cost_improvement_combinations(1,:)/1000,cost_improvement_combinations(2,:), 'filled');
51 pl.MarkerFaceColor=[0.6 0.6 0.6];
52 pl.MarkerFaceAlpha=0.5;
53 pl.MarkerEdgeColor=[0.1 0.6 0.1];
54 %xline(cost_by_user./1000,'LineStyle','--','LineWidth',1.2,'Color','k');
55 %yline(improvement_by_user,'LineStyle','--','LineWidth',1.2,'Color','k');
56 ylim([0 7]);
57 set(gca,'YTick',[0:1:10000]);
58 set(gca,'YTickLabel',{'Z ':'E ':'Δ ':'Γ ':'B ':'B+':'A ':'A+'});
59 ylabel({'Ενεργειακή αναβάθμιση':'[κλάση]'});
60 xlim([0 80]);
61 set(gca,'XTick',[0:5:500]);
62 xlabel({'Κόστος σεναρίων [κ€]'});
63 xtickangle(0);
64 grid on;
65 box off;
66 x0=3; y0=3;
67 width=13;
68 height=8;
69 set(gcf,'units','centimeters','position',[x0,y0,width,height]);
70 set(gca,'FontName','Palatino Linotype','FontSize',9);
71 a=get(si,'Position');
72 set(si,'Position',[a(1)+0.07 a(2)+0.1 a(3)-0.05 a(4)-0.1]);
73
```

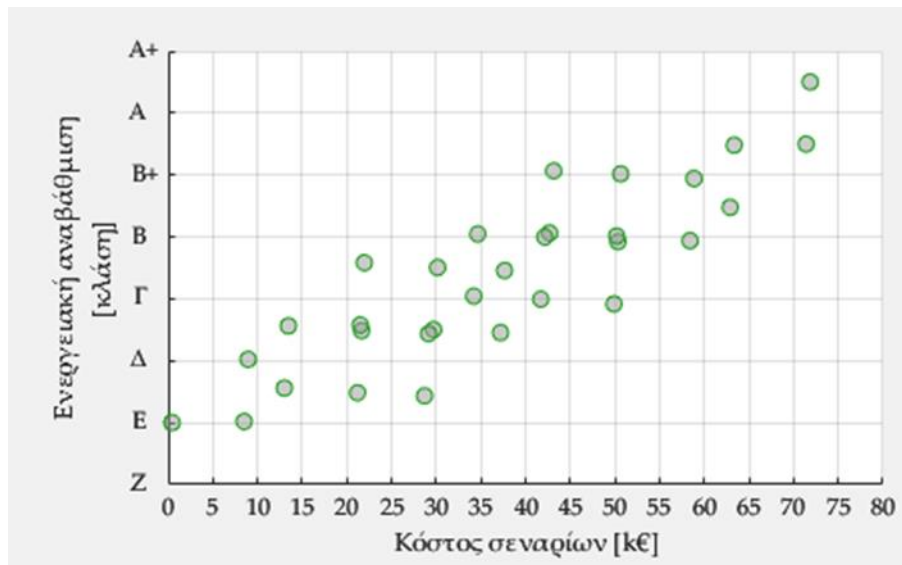
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

Αποτύπωμα αποτελέσματος σε γράφημα

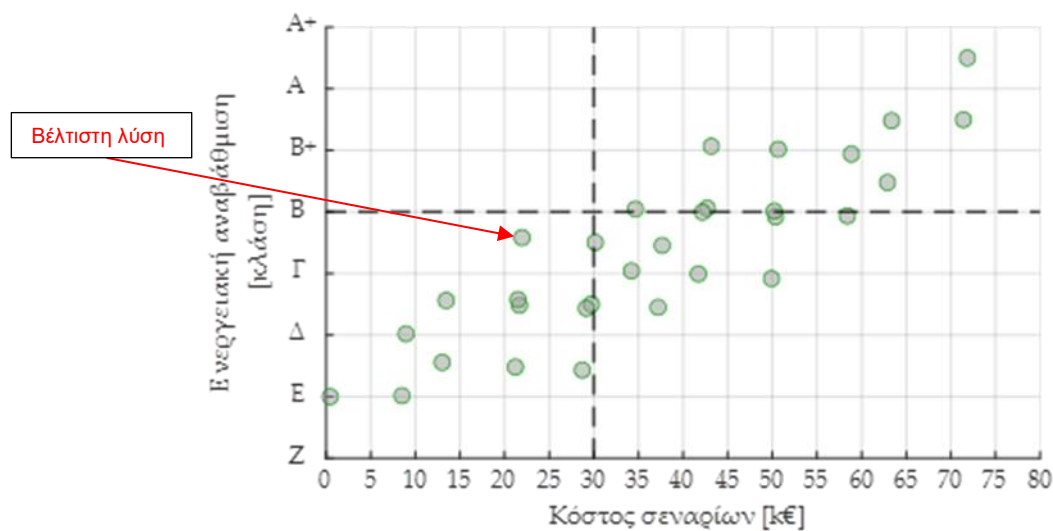
Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται ως κουκίδες όλα τα πιθανά σενάρια. Η εφαρμογή ενός σεναρίου έχει κάποιο συγκεκριμένο κόστος, το οποίο απεικονίζεται στον άξονα των x , ενώ η ενεργειακή αναβάθμιση που επιτυγχάνεται, απεικονίζεται στον άξονα των y . Σκοπός των συγκεκριμένων διαγραμμάτων είναι η ανάδειξη του γεγονότος, ότι με διαφορετικό κόστος, είναι δυνατό να επιτευχθεί η ίδια ενεργειακή αναβάθμιση, ανάλογα με τις εργασίες που επιλέγονται. Αντίστοιχα, με το ίδιο ή με μικρή απόκλιση κόστους, κάποια σενάρια μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετική ενεργειακή αναβάθμιση.



Εικόνα 1: Αποτελέσματα πρώτης εκδοχής του κώδικα



Εικόνα 2: Αποτελέσματα δεύτερης εκδοχής του κώδικα. Αναπαράσταση όλων των πιθανών σεναρίων ως προς την ενεργειακή αναβάθμιση που επιτυγχάνεται και το κόστος.



Εικόνα 3: Αποτελέσματα τρίτης εκδοχής του κώδικα. Η οριζόντια γραμμή αναπαριστά την επιθυμητή ενεργειακή κλάση και η κατακόρυφη το μέγιστο κόστος

Στην τελική εκδοχή του κώδικα προστίθεται το γραφικό των διακεκομμένων γραμμών, με την χρήση των οποίων, μπορεί να εμφανιστεί το πεδίο των επιθυμητών λύσεων. Συγκεκριμένα, επιθυμητές λύσεις ορίζονται οι λύσεις που ανήκουν στο εμβαδό που σχηματίζεται από τις ευθείες $x = 0$, $y = 0$ και τις διακεκομμένες, τις οποίες ο χρήστης τοποθετεί κατά το δοκούν, προκείμενου να ορίσει ο ίδιος τι επιθυμεί.

Γενική Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

- Αλεξανδρίδης Αν. «Εφαρμοσμένη Βελτιστοποίηση», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2018.
- Βασιλείου Π., Τσάντας Ν., «Εισαγωγή στην Ε.Ε.», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2000.
- Δαρζέντας Ι., Τσαγγάρης Χ., «Σημειώσεις στο Μάθημα Επιχειρησιακή Έρευνα Ι», Τμήμα Μαθηματικών Πανεπιστημίου Αιγαίου, Σάμος, 1999.
- Καρλαύτης Μ. , Λαγαρός Ν. «Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς», Εκ. Συμμετρία, 2010.
- Κόγκας Δ., «Στρατηγικό Επιχειρησιακό Περιβάλλον-Στρατηγική Διοίκηση», έκδοση Γ. Μπένου, Αθήνα 2007.
- Ματσατσίνης Ν., «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2010.
- Μποναζούντας Μ., «Βελτιστοποίηση Συστημάτων», ΕΜΠ, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα ,2000, σελ. 11-14
- Οικονόμου Σ., και Γεωργίου Κ. «Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων», Εκδόσεις Ευγ. Μπένου, Αθήνα 1999.
- Παναγιώτου Ν. ,«Εισαγωγή στην Ανάλυση Αποφάσεων», ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας 2011.
- Πέρδιος Δ.Π. «Ενεργειακή επιθεώρηση κτιρίων και βιομηχανιών», Εκδ. Δημούδη, Αθήνα 2006.
- Πέρδιος Δ.Π., «Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια- αθλητικά κέντρα βιομηχανικές μεταφορές, τόμος Α», Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ, Αθήνα 2007.
- Σίσκος, Γ. «Γραμμικός Προγραμματισμός», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 1998.

Ξενόγλωσση

- Barlow, F.G. , «Excel Models for Business and Operations Management», John Wiley & Sons, Chichester, Sussex 1999.

- Bulgurcu B, Cavusoglu H and Benbasat I “Information Security Policy Compliance: An Empirical Study of Rationality-Based Beliefs and Information Security Awareness”, MIS Quarterly, 2010.
- Clarke T. & Clegg S., «Changing Paradigms: The Transformation of Management Knowledge for the 21st Century», Profile Books Ltd., London, 2008.
- D. Z. Du, P. M. Pardalos, W. Wu, «Μαθηματική Θεωρία Βελτιστοποίησης», Εκδ. Νέων Τεχνολογιών, 2005.
- Glassey R and Gupta V. «An LP analysis of paper recycling» , In studiensin LP , ed , H Salkin and J. Saha, N. York, N. Holland, 1975.
- Laguna, M., Kelly, J.P., Gonzalez-Velarde, J.L. and Glover, F. «Tabu search for the multilevel generalized assignment problem, Eur J Oper Res. 1975.
- Nelms, C. & Russell, A.D & Lence, B.J. «Assessing the performance of sustainable technologies: a framework and its application Building research and information.» Building Research & Information, 2007.
- Richardson, G.R.A. & Lynes, J.K. «Institutional motivations and barriers to the construction of green buildings on campus». International Journal of Sustainability in Higher Education. , 2007.
- Senior B. & Fleming J., «Organizational Change», Prentice Hall, 3rd edition, London, 2007.
- Wangel, J. & Wallhagen, M. & Malmqvist, T. & Finnveden, G. «Certification systems for sustainable neighbourhoods: What do they really certify», Environmental Impact Assessment Review, 2016, pp 205-213
- Zhang, Z. & Wu, X & Yang, X. & Zhu, Y. Bepas , “A life cycle building environmental performance assessment model. Building and Environment”, ISSN 0360-1323, 2006.

Διαδίκτυο

<https://support.microsoft.com/el-gr/office/>

<https://www.enainstitute.org/publication>

<https://worldgbc.org/>

<http://www.cres.gr/cres/index.html>

<http://www.cres.gr>

<https://www.ecologic-al.gr>

<https://fenestral.gr>

<https://www.praktikal.gr/>

<https://www.followgreen.gr>

<http://ebooks.edu.gr/>

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας - ΤΕΕ: <https://www.tee.gr>

Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής : <https://www.ypoka.gr>

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης : <https://www.elot.gr>

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας: [https:// www.cres.gr](https://www.cres.gr)