



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



Πανεπιστήμιο Δυτική Αττικής
Σχολή Μηχανικών – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Αρχιτεκτονική και Δομοστατική
Αποκατάσταση
Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων (Α.ΔΟ.ΑΠ.)

Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση Εναλλακτικών Ενίσχυσης Κτιρίου

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Κατσιάδα Αλεξάνδρα

ΑΜ:2167

Επιβλέποντες Καθηγητές

Ισαάκ Βρυζίδης

Κωνσταντίνος Ρεπαπής

Αθήνα 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΚΑΘΗΓΗΤΗ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
------------------------	----------

ΒΡΥΖΙΔΗΣ ΙΣΑΑΚ
(Επιβλέπων)

ΡΕΠΑΠΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
(Επιβλέπων)

ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
(Εξεταστής)

Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Αλεξάνδρα Κατσιάδα του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 2167 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών “Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων” του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: “Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου”.

Η Δηλούσα



Κατσιάδα Αλεξάνδρα

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, με τίτλο «Αρχιτεκτονική και Δομοστατική Αποκατάσταση Ιστορικών Κτιρίων και Συνόλων».

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στους καθηγητές μου και επιβλέποντες κ. Ισαάκ Βρυζίδη και κ. Κωνσταντίνο Ρεπαπή για την συνεχή επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας μου, τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσαν, για την άψογη συνεργασία, αλλά και για τις γνώσεις που εισέπραξα, καθ' όλη τη διάρκεια της διδασκαλίας του, στο πλαίσιο των μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω της εταιρία Seismosoft που μου παραχώρησαν την άδεια χρήσης του λογισμικού Seismobuild 2023 για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς και τον αδελφό μου για όλη την υποστήριξη που μου δείχνουν σε κάθε νέο βήμα.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της πολυπλοκότητας στη λήψη αποφάσεων για τον ανασχεδιασμό των κτιρίων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, κάποιες από τις οποίες βασίζονται στην πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε την εφαρμογή πλήθους μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης στον ανασχεδιασμό κτιρίων. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το ζήτημα αξιολόγησης της ενίσχυσης και αποκατάστασης ενός κτιρίου τριών επιπέδων στην περιοχή της Αττικής, μέσω της χρήσης του στατικού προγράμματος Seisbuild. Πιο συγκεκριμένα θα προταθούν τρεις διαφορετικές εναλλακτικές ενίσχυσης όπως η περίπτωση χρήση μανδύων, FRPs και ο συνδυασμός μανδύων με τοιχώματα. Όπου μετά μέσω της πολυκριτήριας ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου TOPSIS αλλά και της εκτίμησης των βαρών με την μέθοδο WAP, των έξι κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση, θα αποφανθεί πια εναλλακτική ενίσχυσης είναι η καλύτερη επιλογή για το κτίριο. Τα κριτήρια είναι η τέμνουσα βάσης, ο χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης κτιρίου, το κόστος κατασκευής, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα, οι τεχνολογικές απαιτήσεις-βαθμός αναγκαιότητας εξειδίκευσης προσωπικού και τέλος ο βαθμός αρχιτεκτονικής επιρροής. Η συγκεκριμένη διπλωματική επιβεβαίωσε την χρησιμότητα της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων στην βελτίωση της διαδικασίας επιλογής και στην αξιολόγηση των εναλλακτικών ενίσχυσης και αποκατάστασης κτιρίων.

Abstract

In recent years due to the complexity in decision making for building redesign, various methods have been developed, some which are based on multi criteria decision analysis. The literature review highlights the application of several multi-criteria analysis methods in the design of buildings, in case they need to improve their seismic resilience. Various alternatives for building retrofitting exist, and each outweighs a set of parameters compared to the others. This study aims to evaluate alternatives in seismic retrofitting existing three-story building in Attica, using the program Seismobuild for seismic assessment and strengthening. More specifically, it will be proposed to use jacket on the existing columns and beams, FRPs just like the previous alternative, as well as the combination of using jackets and adding walls to provide increased support. The proposed methodology is based on the TOPSIS method, while the criteria weights are estimated with the WAP method. The criteria are the base shear, the building restoration and reinforcement time, the construction cost, the carbon footprint, the technological requirements-degree of necessity of personnel specialization and finally the degree of architectural influence. This dissertation confirmed the usefulness of multi-criteria decision analysis in improving the selection process and in the evaluation of the seismic retrofitting alternatives in existing buildings.

Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή.....	9
2.	Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων	11
2.1.	Εισαγωγή στην Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων.....	11
2.2.	Αντικειμενικότητα της MCDA.....	11
2.3.	Σύντομη Ιστορική Αναδρομή	12
2.4.	Στάδια της Πολυκριτήριας Υποστήριξης Αποφάσεων.....	12
2.5.	Ανάλυση των κυριότερων όρων της.....	14
2.6.	Μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	15
2.7.	Γενικευμένο πλαίσιο για την επιλογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης	16
3.	Μέθοδοι της Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων.....	19
3.1.	Η μέθοδος AHP (Analytic Hierarchic Process).....	19
3.1.1.	Στάδια ανάλυσης της μεθόδου AHP.....	20
3.1.2.	Εφαρμογή της AHP	21
3.2.	Η μέθοδος Promithee.....	21
3.2.1.	Οι μέθοδοι Promithee I και II.....	22
3.2.2.	Η εφαρμογή της Promethee στην διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής.	24
3.3.	Οι μέθοδοι Electre	24
3.3.1.	Εφαρμογή των μεθόδων Electre	28
3.4.	Η μέθοδος Topsis.....	29
3.4.1.	Η εφαρμογή της Topsis	30
3.5.	Η μέθοδος Copras.....	30
3.6.	Η μέθοδος MAUT (Multi-Attribute Utility Theory).....	31
4.	Ενίσχυση Κατασκευών	32
4.1.	Ενίσχυση με τη χρήση FRP	32
4.1.1.	Ενίσχυση υποστυλωμάτων με ινοπλιμένα πολυμερή FRPs.....	34
4.1.2.	Ενίσχυση δοκού με ινοπλιμένα πολυμερή FRPs.....	34
4.2.	Ενίσχυσης με τη χρήση Μανδύων.....	35
4.2.1.	Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες.....	37
4.2.2.	Ενίσχυση δοκών με μανδύες.....	38
4.3.	Ενίσχυση με τη χρήση Τοιχωμάτων.	39
5.	Εφαρμογές στα κτίρια	43
5.1.	Μελέτη ανακαίνισης κτιρίου.....	43

5.2.	Πολυκριτηριακή ανάλυση για την επιλογή υλικού προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	46
5.3.	Αξιολόγηση της βιωσιμότητας των εναλλακτικών διαρθρωτικών λύσεων ενός κτιρίου.....	47
6.	Μελέτη Περίπτωσης.....	50
6.1.	Γενικά Στοιχεία	50
6.2.	Ενίσχυση κτιρίου με το πρόγραμμα SeismoBuild	51
6.2.1.	1ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση FRP	51
6.2.1.	2ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση Μανδύων	53
6.2.2.	3ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση Μανδύων και Τοιχωμάτων.	54
6.3.	Καθορισμός κριτηρίων για την αξιολόγηση των κατασκευών.....	56
6.3.1.	Στατικά Κριτήρια με τη μέθοδο Pushover.....	56
6.3.2.	Χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης κτιρίου	58
6.3.3.	Κόστος κατασκευής.....	63
6.3.4.	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα	66
6.3.5.	Τεχνολογικές απαιτήσεις - Βαθμός αναγκαιότητας εξειδικευμένου προσωπικού	68
6.3.6.	Βαθμός Αρχιτεκτονικής επιρροής	69
7.	Πολύ-κριτήρια Αξιολόγηση των Εναλλακτικών.....	70
7.1.	Μοντέλο Ολικής Προτίμησης	70
7.1.1.	Η μέθοδος προτεραιότητας WAP.....	70
7.1.2.	Μέθοδος TOPSIS.....	73
7.1.3.	Αξιολόγηση των Εναλλακτικών	76
8.	Συμπεράσματα	82
9.	Βιβλιογραφία.....	84
	Παράρτημα Α.....	88

1. Εισαγωγή

Το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού εστιάζει κατά βάση στη λειτουργικότητα, την αντοχή και την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Για να επιτευχθούν αυτά τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται να έχει μία κατασκευή, πρέπει να ληφθούν υπόψη πρωτίτερα κάποιες παράμετροι που θα δώσουν την ευχέρεια μέσω της ιεράρχησης τους βάση σημαντικότητας και άλλων κριτηρίων, να διεκπεραιωθεί μία κατασκευή όσο το δυνατόν πιο αποδοτική και συμφέρουσα γίνεται. Στον Ελλαδικό χώρο εμφανίζεται μεγάλη σεισμικότητα, με αποτέλεσμα σε πλειάδα κατασκευών να πρέπει να γίνει επέμβαση έτσι ώστε να αποφευχθεί κατάρρευση και όλα τα επακόλουθα. Εν προκειμένω λόγω του αντικείμενου της αρχιτεκτονικής και δομοστατικής αποκατάστασης ιστορικών κτιρίων και συνόλων, επιλέχθηκε για την μελέτη περίπτωσης ένα κτίριο τριών επιπέδων από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο έχει άμεση ανάγκη να ενισχυθεί, καθώς τα αποτελέσματα της αποτίμησης δεν είναι ικανοποιητικά. Για να επιτευχθεί αυτό και για να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα στην ενίσχυση της κατασκευής μας θα γίνει χρήση του λογισμικού Seisbuild και της μεθόδου λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, έτσι ώστε να επιλεγεί η καλύτερη εναλλακτική ενίσχυσης του κτιρίου.

Στη μελέτη ανασχεδιασμού του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν, η οποία θα γίνει με τρεις διαφορετικές προτάσεις ενίσχυσης, οι βασικές αρχές του Ευρωκώδικα 8 με στόχο τη Στάθμη επιτελεστικότητας (B1) «Σημαντικές Βλάβες» (SD) για σεισμό με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια. Έτσι ώστε να υπάρχουν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με την απόκριση του κτιρίου σε σεισμό επιλέγουμε την μέθοδο της ανελαστικής ανάλυσης (Pushover) για κάθε έναν από τους τρόπους ενίσχυσης όπου θα προταθούν.

Εν συνεχεία για την επιλογή του τρόπου ενίσχυσης για το εν λόγω κτίριο χρησιμοποιήθηκαν οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής ανάλυσης. Οι οποίες είναι εργαλεία ιδιαίτερης σημασίας στο αντικείμενο του μηχανικού και όχι μόνο, κατά την εξέταση πτυχών ενίσχυσης, βιωσιμότητας, ενεργειακής απόδοσης, στον σχεδιασμό των κατασκευών κλπ. Αυτό συμβαίνει καθώς χρησιμεύουν για την αξιολόγηση κατά την λήψη αποφάσεων ανάμεσα σε διαφορετικές εναλλακτικές λύσεων συμπεριλαμβανομένων ως παράμετρο τις διαφορετικές διαστάσεις του προβλήματος, όπως οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές όταν αντιμετωπίζουν προβλήματα.

Πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στην πολυκριτήρια λήψη αποφάσεων, όπως μια ιστορική αναδρομή, στα στάδια και στις μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται κάποιες ενδεικτικές μέθοδοι της λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, όπως η AHP, η Topsis, η Electre και άλλες πολλές, όπου

μετέπειτα στην μελέτη περίπτωσης θα επιλεγθεί μία απ όλες αυτές που αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή μεθόδων ενίσχυσης όπως των FRPs, μανδυών και τοιχωμάτων, αναφορά στις ιδιαιτερότητες κάθε μεθόδου αλλά και στον τρόπο τοποθέτησης τους.

Στη συνέχεια στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τρία διαφορετικά παραδείγματα εφαρμογής της πολυκριτήριας ανάλυσης, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα φάσματα των προβλημάτων όπως στο κομμάτι της βιωσιμότητας, του περιβάλλοντος, την επιλογή υλικών ή τρόπου ενίσχυσης και σε άλλα πολλά. Το έκτο κεφάλαιο αφορά αποκλειστικά και μόνο στη μελέτη περίπτωσης και πιο συγκεκριμένα μια γενική περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου, παραδοχές για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους στο στατικό λογισμικό Seisbuild, επιπλέον αναφέρονται οι τρεις εναλλακτικές ενισχύσεις του κτιρίου (χρήση μανδυών, FRPs και μανδύες με τοιχώματα) και τέλος καθορίζονται τα έξι κριτήρια για την αξιολόγηση των εναλλακτικών.

Επιπρόσθετα στο έβδομο κεφάλαιο, περιγράφεται η μεθοδολογία της πολυκριτήριας αξιολόγησης των εναλλακτικών. Πιο συγκεκριμένα αξιολογήθηκαν και την κατατάχθηκαν οι εναλλακτικές με τη χρήση των μεθόδων WAP και της TOPSIS, όπου η μέθοδος WAP χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σχετικής σπουδαιότητας των κριτηρίων (βαρύτητες) και η μέθοδος TOPSIS για την τελική κατάταξη των κριτηρίων που καθορίστηκαν.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις και τις εφαρμογές των μεθόδων.

2. Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων

2.1. Εισαγωγή στην Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων

Σε αυτή την ενότητα αναφέρεται το τι είναι επί της ουσίας η Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων (MCDM) μέσω της ιστορικής αναδρομής και της περιγραφής της, αλλά επιπλέον θα την συγκρίνουμε με την Πολυκριτήρια Υποστήριξη Αποφάσεων (MDMA).

Η Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων (Multicriteria Decision Making) MCDM είναι ένας όρος που επί της ουσίας χρησιμοποιείται για να περιγράψει με τρεις λέξεις την φιλοσοφία του κλάδου. Δηλαδή πως υπάρχουν πολλές μέθοδοι που έχει στα χέρια του ο αποφασίζοντας για να τις χρησιμοποιήσει για να καταλήξει σε μία απόφαση και την καλύτερη δυνατή επίλυση μέσα από ένα σύνολο αποφάσεων, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Μέσω της χρήσης της πολυκριτήριας μπορεί ένα πρόβλημα να σπάσει σε μικρότερα και μέσω των υπολογιστικών διαδικασιών που χρειάζεται να γίνουν αλλά και την ικανότητα που αποφασίζοντας να φέρεις εις πέρας πιο εύκολα την επίλυση του σύνθετου αρχικού προβλήματος. (Chen. et al., 2008).

Αντί για την MCDM που προαναφέρθηκε μπορεί να αναφερθεί και ως MCDA (Multicriteria Decision Analysis), Πολυκριτήρια Υποστήριξη Αποφάσεων. Η κύρια διαφορά τους είναι πως ο αποφασίζοντας πρέπει να καταλήξει σε μια απόφαση, καθώς οι μέθοδοι δεν μπορούν να την πάρουν. Έχει ως στόχο την επιλογή, την ταξινόμηση και την ομαδοποίηση των εναλλακτικών μέσα από ένα μικρό σύνολο κριτηρίων όπου ο αποφασίζων θα μπορεί να αισθάνεται βέβαιος για τη τελική του επιλογή. (Roy, 1996)

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η MCDM διαιρείται σε δύο κατηγορίες (Triantaphyllou, 2000):

- MADM (Multi Attribute Decision Making): Ασχολείται με προβλήματα διακριτών χώρων και ταυτίζεται με την MCDM
- MODM (Multi Objective Decision Making): Ασχολείται με προβλήματα σε συνεχή χώρο αποφάσεων

2.2. Αντικειμενικότητα της MCDA

Κατά βάση από πολλούς θεωρείται αντικειμενική, ενώ εξ αρχής είναι γνωστό πως το αποτέλεσμα της απόφασης βγαίνει σύμφωνα με την κρίση του αποφασίζοντας ο οποίος απλά προσπαθεί να υποστηρίξει το σκεπτικό του, εξηγώντας το πώς κατέληξε στο να παρθεί η εκάστοτε απόφαση. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, θεωρείτε πως η MCDA βασίζεται στην αντικειμενικότητα, ωστόσο πρέπει να υπάρχει προσοχή σε κάποιους περιορισμούς που επηρεάζουν την ύπαρξή της.

Οι πιο βασικοί περιορισμοί είναι οι εξής (Greco. et al., 2016):

- Τα όρια μεταξύ τους είναι στην ασαφή
- Πλειάδα δεδομένων που χρησιμοποιούνται είναι ασαφή ή ελλιπής
- Το μαθηματικό μοντέλο δεν καθορίζει το αν η απόφαση είναι ορθή ή όχι.
- Ο αποφασίζοντας όσο σίγουρος και να είναι για την απόφαση του, θα αναθεωρήσει κάποια στιγμή γι αυτές.

2.3. Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε επιγραμματικά καθαρά στην ιστορική αναδρομή της πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων (Δούμπος & Ζοπουνίδης, 2004).

- 1886: Ο Pareto μέσω της εργασίας του ήταν η πρώτη επίσημη προσέγγιση στο ζήτημα των πολλαπλών κριτηρίων και θεμελίωσε τις αρχές της πολυκριτήριας ανάλυσης και την έννοια της αποτελεσματικότητας
- 1944: Οι Von Neumann και Morgenstern εισάγουν την θεωρία της χρησιμότητας
- 1951: Ο Koopmans εισήγαγε την έννοια του αποτελεσματικού συνόλου
- 1961: Οι Charnes και Cooper ένωσαν τον γραμμικό προβληματισμό με την πολυκριτήρια ανάλυση
- 1965: Ο Fishburn έφερε εις πέρας την επέκταση της θεωρίας χρησιμότητας σε προβλήματα λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια
- 1968: ο Roy διατύπωσε την θεωρία για τις σχέσεις υπεροχής
- Τις επόμενες δεκαετίες αναπτύσσεται η εφαρμογή της και επεκτείνεται η χρήση της

2.4. Στάδια της Πολυκριτήριας Υποστήριξης Αποφάσεων

Ο Roy το 1985 ανέπτυξε μια γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης για τα προβλήματα της Πολυκριτήριας Λήψης Αποφάσεων η οποία περιλαμβάνει τέσσερα στάδια.

1. Αντικείμενο της απόφασης

Περιλαμβάνεται η επεξεργασία του συνόλου αποφάσεων και ο ορισμός του συνόλου A των εναλλακτικών. Το σύνολο A δεν είναι μοναδικό αλλά ούτε μπορεί να ληφθεί εύκολα, όπως επίσης δεν εξαρτάται μόνο από το πρόβλημα απόφασης, τον αποφασίζοντα αλλά και από τις προβληματικές που θα παρατεθούν.

Ο Roy διαχωρίζει τέσσερις προβληματικές στην πολυκριτήρια κατάταξη. Όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονομερώς ή ακόμα και μαζί σε κάθε ένα βήμα της πολυκριτήριας ανάλυσης.

Οι προβληματικές είναι οι εξής:

- Επιλογή μιας δράσης από το σύνολο εναλλακτικών Α.
- Ομαδοποίηση των δράσεων σε καθορισμένες κατηγορίες και ταξινόμηση των κατηγοριών αυτών.
- Κατάταξη των δράσεων από την καλύτερη προς τη χειρότερη.
- Περιγράφονται οι δράσεις και οι συνέπειες τους. Περιορίζεται στα στάδια 1 και 2.

2. Οικογένεια κριτηρίων

Εντοπίζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ανάλυσης των εναλλακτικών δραστηριοτήτων, όπου κάθε παράγοντας βοηθά σημαντικά στη λήψη απόφασης και θεωρείται ως κριτήριο. Οπότε οι εναλλακτικές δημιουργούν ένα σύνολο επιπτώσεων και έχουν τα εξής χαρακτηριστικά (Σίσκος, 2008):

- Είναι σημαντικά καθορισμένη σχετικά με το περιεχόμενό της
- Επιτρέπει την λεπτομερή απόδοση ενός συγκεκριμένου αποτελέσματος

Ο κάθε αναλυτής έχει χρέος να ξεκαθαρίσει τις επιπτώσεις των διαφόρων εναλλακτικών και έπειτα να συνεχίσει δημιουργία μιας συνεπούς οικογένειας κριτηρίων (Consistent Family of Criteria), έτσι ώστε να ληφθεί κάποια απόφαση.

Για να γίνει χρήση των κριτηρίων ως μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων, πρέπει να πληρούν τρεις προϋποθέσεις:

- Μονοτονία: Οι προτιμήσεις που ικανοποιούνται για την υποομάδα κριτηρίων πρέπει να είναι συνεπείς με τις προτιμήσεις, με βάση τις δεδομένες εναλλακτικές
- Επάρκεια: Το πρόβλημα απόφασης εξετάζεται στην γενικευμένη μορφή του, έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτή η διαφορά των κριτηρίων που έχουν μεταξύ τους
- Μη πλεονασμός: Τα κριτήρια πρέπει να ικανοποιούν τις δυο παραπάνω προϋποθέσεις και να μην ξεφεύγουν από το πλαίσιο που έχει οριστεί από το πρόβλημα

3. Μοντελοποίηση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα

Δημιουργείται και χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ολικής προτίμησης (Global Evaluation Model), έτσι ώστε μέσω της εναλλακτικής που θα έχει επιλεγεί για το πρόβλημα, να έχει πετύχει ο στόχος που είχε τεθεί εξ αρχής.

Το μοντέλο ολικής προτίμησης χρησιμοποιείται για:

- Να προσδιοριστεί η αξιολόγηση κάθε μίας εναλλακτικής
- Συγκρίνονται ανά δυάδα οι εναλλακτικές
- Διερευνάται το σύνολο των εναλλακτικών δράσεων όταν αυτό είναι συνεχές.

Σχετικά με τον πως αναπτύσσεται το μοντέλο ολικής προτίμησης ορίζονται δύο προσεγγίσεις:

- Μέσω της συνεννόηση του αναλυτή με τον αποφασίζοντα
- Αναλύοντας τις αποφάσεις που λαμβάνει ο αποφασίζοντας

4. Υποστήριξη της απόφασης

Ο αποφασίζοντας στο τελευταίο βήμα κατανοεί το τι έχει πραγματοποιηθεί στα προηγούμενα βήματα, απαντά σε ερωτήματα και καταλήγει στο αποτέλεσμα βασιζόμενος στο τι έχει προηγηθεί (Δούμπος, 2000 & Ishizaka and Nemeny, 2013 & Roy, 1985).

Η κατάταξη των μεθόδων σύνθεσης των κριτηρίων είναι (Belton & Stewart, 2002):

- Μοντέλα μέτρησης της αξίας: Δημιουργούνται τιμές με σκοπό να αποσαφηνίσουν τον βαθμό προτίμησης μιας απόφασης έναντι μιας άλλης
- Μοντέλα στόχων ή αναφοράς: Καθορίζονται τα επιθυμητά επίπεδα που μπορεί να επιτευχθεί το κάθε κριτήριο
- Μοντέλα υπεροχής: Συγκρίνονται οι εναλλακτικές ανά δυάδα σύμφωνα με το κάθε κριτήριο έτσι ώστε να καθοριστεί ο βαθμός προτίμησης του κάθε κριτηρίου συγκριτικά με το άλλο

2.5. Ανάλυση των κυριότερων όρων της

Εναλλακτική: Η εναλλακτική είναι μια ενέργεια ή απόφαση που ανήκει στο σύνολο των εναλλακτικών, όπου μετά την αξιολόγηση τους βοηθούν στο να παρθεί η σωστή επιλογή του αποφασίζοντα. Το σύνολο των εναλλακτικών θεωρείται σταθερό, ομοιογενές και αμετάβλητο στον χρόνο κάτι που βοηθά τον αποφασίζοντα. (Roy, 1985).

Κριτήρια: Το κριτήριο μέσω της κρίσης του αποφασίζοντα βοηθούν στο να συγκριθούν μεταξύ τους οι εναλλακτικές (Roy, 1985, Δούμπος & Ζοπουνίδης, 2004)

Αποφασίζων: Ο αποφασίζοντας «decision maker (DM)» διαλέγει την πιο συμφέρουσα λύση μέσα από ένα πλήθος επιλογών. Μπορεί να είναι ένα άτομο ή ακόμα μία ομάδα, όταν ο αποφασίζοντας πρέπει να αποφασίσει μόνος του είναι ακατόρθωτο να έχει διαλέξει μόνο ένα κριτήριο με το που δει

το πρόβλημα. Ενώ αν υπάρχει μία ομάδα από αποφασίζοντες ακόμα και τότε δεν είναι εύκολο να επιλεγεί ένα κριτήριο απ όλους τους DMs, αυτό γίνεται καθώς ο κάθε ένας τους έχει τη δική του αντίληψη και το δικό του σκεπτικό για το κάθε κριτήριο. (Δούμπος & Ζοπουνίδης, 2004)

2.6. Μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης

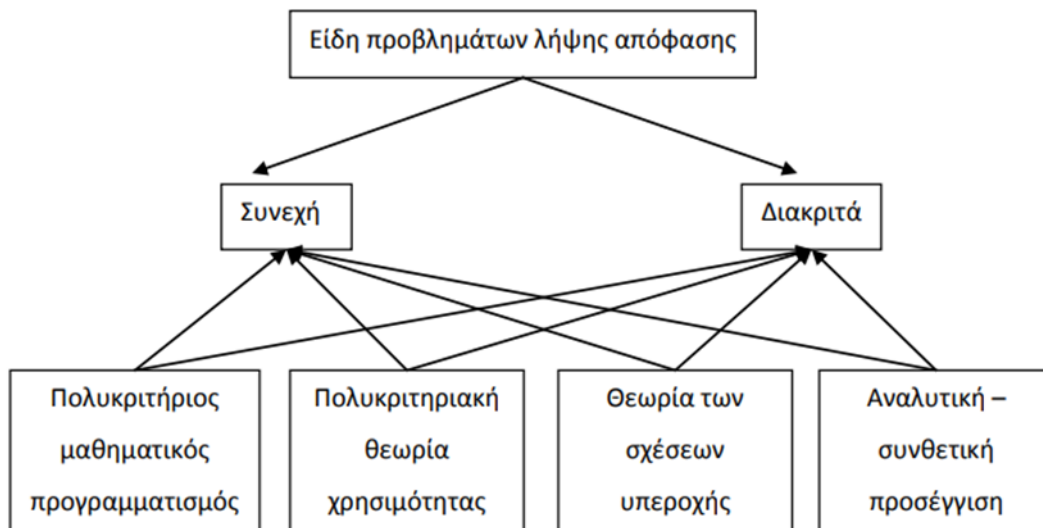
Οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις φτιάχτηκαν για την υποστήριξη της εφαρμογής επί του πρακτέου της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Μπορεί να κατηγοριοποιηθούν με βάση την μορφή που θα έχει το μοντέλο της ολικής προτίμησης και για αυτό προτείνεται ομαδοποίηση των πολυκριτηριακών προσεγγίσεων σε τέσσερις κατηγορίες (Pardalos, 1995).

- Πολυκριτηριακός μαθηματικός προγραμματισμός (Multi-Objective Mathematical Programming): Έχει ως στόχο την δημιουργία ενός συστήματος αξιών το οποίο ταξινομεί τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων βασιζόμενο στα κριτήρια. Εν προκειμένω ταξινομούνται σύμφωνα με το στάδιο επίλυσης όπου εκεί εκφράζει ο αποφασίζοντας τις προτιμήσεις του.

Σύμφωνα με την προηγούμενη περιγραφή διακρίνονται τρεις κατηγορίες πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης:

1. A Priori Methods
2. Interactive Methods
3. A Posteriori or Generation Methods

- Πολυκριτηριακή θεωρία χρησιμότητας (Multi-Attribute Utility Theory): Έχει ως στόχο να λύσει προβλήματα όπου υπάρχουν διακριτές εναλλακτικές επιλογές και οι στόχοι πάνω από ένας. Η AHP και η ANP είναι χαρακτηριστικές μέθοδοι της.
- Θεωρία των σχέσεων υπεροχής (Outranking Relations Theory): Έχει ως στόχο να λύνει προβλήματα μη επιλογών πραγματοποιώντας διμερές συγκρίσεις. Οι AHP, ELECTRE, PROMETHE κλπ είναι χαρακτηριστικές μέθοδοι της.
- Αναλυτική-συνθετική προσέγγιση (Preference Disaggregation Approach): Έχει ως στόχο να αναλύσει το σκεπτικό του αποφασίζοντα.

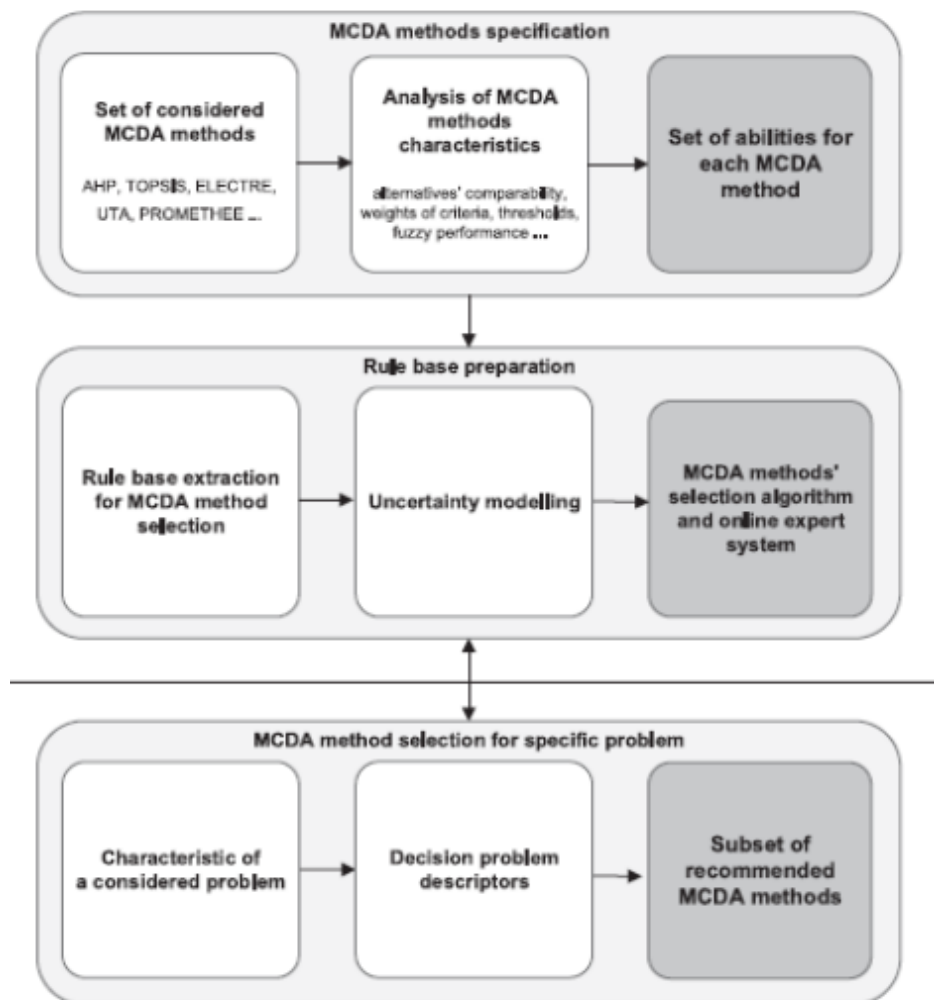


Σχήμα 2.1: Η συμβολή των θεωρητικών ρευμάτων της πολυκριτήριας ανάλυσης στην επίλυση συνεχών και διακριτών προβλημάτων λήψης απόφασης. (Pardalos. et al., 1995)

Από το παραπάνω σχήμα είναι αντιληπτό πως οι τέσσερις προσεγγίσεις ανταποκρίνονται σε συνεχή και διακριτά προβλήματα και στη επίλυση τους (Δούμπος, 2000).

2.7. Γενικευμένο πλαίσιο για την επιλογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης

Σε έρευνα του 2018 από τον Watrobski προσπαθήθηκε να δημιουργηθεί για την επιλογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης μία κατευθυντήρια γραμμή, έτσι ώστε να υπάρχει μεγάλη βεβαιότητα για την αντικειμενικότητα της απόφασης. Το σκεπτικό της κατευθυντήριας γραμμής βασίστηκε στην ανάλυση των 56 μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης που την χαρακτηρίζουν και στα στάδια που υπάρχουν για την λήψη της απόφασης. Το σκεπτικό γύρω από την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

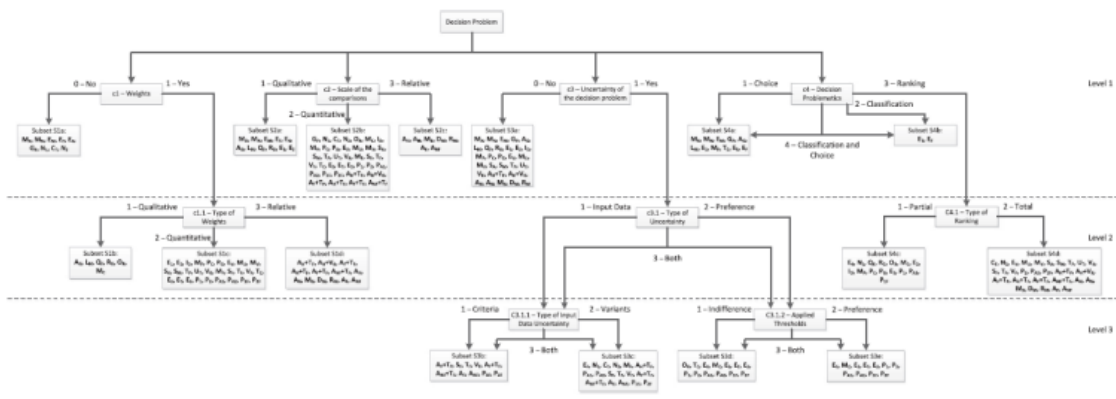


Σχήμα 1.2: Διαδικασία έρευνας. (Watrobski,2018)

Από το παραπάνω σχήμα, διακρίνονται δυο στάδια του προτεινόμενου πλαισίου:

1. Γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών, ανάλυση των κανόνων μεθοδολογίας τους και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την ικανότητα τους οι μέθοδοι
2. Εφαρμόζεται η διαδικασία για τη επιλογή της εύρεσης μεθόδου έτσι ώστε να βρεθεί τρόπος επίλυσης του προβλήματος

Τα κύρια βήματα για να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος είναι το να οριστούν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη τα βάρη των κριτηρίων, με τι κριτήριο θα συγκριθεί η απόδοση των εναλλακτικών, αν χαρακτηρίζεται το πρόβλημα από αβεβαιότητα και τέλος ποια είναι η προβληματική της απόφασης. Τέλος αναλύονται οι μέθοδοι σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους και τις ικανότητες, όπως επίσης περιγράφονται τα προβλήματα που χρήζουν επίλυση. Με αυτόν τον τρόπο για να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος της πολυκριτήριας ανάλυσης δημιουργείται ένα δέντρο απόφασης το οποίο παραθέτει όλα αυτά που προαναφέρθηκαν και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2: Το δέντρο απόφασης για την επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου MCDA με βάση τις προτεινόμενες περιγραφές. (Watrobski, 2018)

Το δέντρο απόφασης αποσκοπεί στο να συνδέσει το πρόβλημα που ο αποφασίζοντας ανατίθεται να λύσει, σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα που προσφέρουν τα δεδομένα που εισάγονται στην ανάλυση.

3. Μέθοδοι της Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων

Η παρούσα εργασία όπως έχει ήδη αναφερθεί, πραγματοποιεί μια ανασκόπηση τελευταίας τεχνολογίας των κύριων μεθοδολογιών λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, οι οποίες βοηθούν στην εύρεση λύσης για τα προβλήματα αξιολόγησης και επιλογής των μοντέλων που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Όπου θα γίνει αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται συχνότερα και μνημονεύονται στη διεθνή αρθρογραφία, όπως η διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας (AHP), η πραγματικότητα έκφρασης της εξάλειψης και επιλογής (Electre), η τεχνική για τη σειρά προτίμησης κατά ομοιότητα με την ιδανική λύση (Topsis) η σύνθετη αναλογική αξιολόγηση (Copras) και η θεωρία χρησιμότητας πολλαπλών χαρακτηριστικών (MAUT). Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων πλέον συγκαταλέγουν τις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές όταν αντιμετωπίζουν προβλήματα γι' αυτό και οι επιλεγμένες μέθοδοι από ομάδες MCDM/MCDA (πολλαπλών κριτηρίων λήψης αποφάσεων/ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων) μπορούν να χρησιμεύσουν ως σημαντικά υποστηρικτικά εργαλεία. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τον πολεοδομικό σχεδιασμό, καθώς και στην κατασκευή. Το ενδιαφέρον για αυτό το θέμα αυξάνεται συστηματικά, κάτι που μπορεί να επιβεβαιωθεί από την ήδη προδοθείσα γενική επισκόπηση, καθώς και από την εργασία που επικεντρώνεται αποκλειστικά στις προκλήσεις λήψης αποφάσεων στον τομέα της ενίσχυσης κατασκευών.

3.1. Η μέθοδος AHP (Analytic Hierarchic Process)

Η μέθοδος αναλυτικής ιεράρχησης AHP (Analytic Hierarchic Process - AHP), ήρθε εις πέρας την δεκαετία του '80 για να βοηθήσει σε δύσκολα προβλήματα να βρεθεί λύση μετά από ενδελεχή και χρόνια έρευνα του Saaty και είναι ικανή να ταξινομεί τις εναλλακτικές εφόσον έχουν οριστεί με ακρίβεια οι προτιμήσεις. Με αυτό τον τρόπο ο αποφασίζοντας μέσα από ερωτήματα που του τίθενται, χρειάζεται να απαντήσει πόσο υπερτερεί ένα κριτήριο από ένα άλλο, έτσι ώστε να βοηθηθεί να αποφασίσει. Η εν λόγω σύγκριση μπορεί να βασιστεί σε μία ποιοτική κλίμακα, δηλαδή οι απαντήσεις που μπορούν να δοθούν είναι:

- Ίση
- Οριακά ισχυρή
- Πολλή ισχυρή
- Υπερβολικά ισχυρή

Ενώ οι τιμές που μπορούν να δοθούν είναι από το 1 το οποίο αντιστοιχεί στο «ίσης σημασίας» μέχρι και το 9 το οποίο αντιστοιχεί στο «πολύ περισσότερο σημαντικό», ωστόσο υπάρχουν και συμπληρωματικές τιμές από το 1/1 μέχρι το 1/9. (Saaty, 1980)

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις δυνατές επιλογές που υπάρχουν για την βαθμολόγηση:

Πίνακας 3.1: Επιλογές βαθμολόγησης όπως δίνονται στους λήπτες απόφασης.

Συγκριτική σημασία προτιμήσεων		
1	Ίσης σημασίας	Τα κριτήρια επιδρούν εξίσου σημαντικά στο πρόβλημα
3	Ελάχιστα πιο σημαντική	Η εμπειρία και η κρίση ευνοούν ελαφρά τη σημασία του ενός κριτηρίου έναντι του άλλου
5	Αρκετά πιο σημαντική	Η εμπειρία και η κρίση ευνοούν αρκετά τη σημασία του ενός κριτηρίου έναντι του άλλου
7	Πολύ πιο σημαντική	Υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ότι το ένα κριτήριο υπερέχει του άλλου
9	Εξαιρετικά πιο σημαντική	Υπάρχουν πολύ ισχυρές ενδείξεις ότι το ένα κριτήριο υπερέχει του άλλου
2-4-6-8		Ενδιάμεσες τιμές

Πέρα από τα προτερήματα της, τα οποία ενδεικτικά είναι η απλότητα της στη χρήση και πως ορίζονται οι σχέσεις κριτηρίων και εναλλακτικών, έχει και μειονεκτήματα όπως και κάθε άλλη μέθοδος. Ένα από τα πιο σημαντικά της μειονεκτήματα είναι πως υστερεί στο μαθηματικό κομμάτι έναντι άλλων μεθόδων, πιο συγκεκριμένα όταν συμπληρώνεται ακόμα μια επιλογή, τότε η κατάταξη των δύο άλλων επιλογών που είχε ήδη γίνει πιθανότατα να αναστραφεί. Το φαινόμενο αυτό θεωρείται ως ασυνεπές συγκριτικά πάντα με το σκεπτικό αξιολόγησης των εναλλακτικών. (Saaty, 2003)

3.1.1. Στάδια ανάλυσης της μεθόδου AHP

Η μέθοδος AHP, σύμφωνα με τον Saaty (1980), είναι βασισμένη σε τέσσερα στάδια:

1. Ο λήπτης αποφάσεων έχει την ευχέρεια να συγκρίνει ανά ζεύγη a_{ij} δύο εναλλακτικών i και j σχετικά με ένα κριτήριο/ υπό-κριτήριο στη βάση μίας αντίστροφης κλίμακας $a_{ij}=1/ a_{ji}$.
2. Ο λήπτης αποφάσεων δεν κρίνει καθολικά μία εναλλακτική ως απόλυτα καλύτερη από μία άλλη για ένα συγκεκριμένο κριτήριο, για παράδειγμα, $a_{ij} \neq \infty$.
3. Το πρόβλημα απόφασης μπορεί να διαμορφωθεί σε μία ιεραρχία.
4. Όλα τα κριτήρια/ υπό-κριτήρια, τα οποία έχουν κάποια επιρροή στο εν λόγω πρόβλημα, αποτελούν μία ιεραρχία.

Ο Σπανός (2004) παραθέτει τρία βασικά χαρακτηριστικά της AHP:

- Η αναλυτικότητα της, μπορεί να μετατρέψει το σκεπτικό του λήπτη αποφάσεων σε αριθμούς.
- Ιεραρχεί το πρόβλημα, το οποίο βοηθά στην εξάλειψη της πολυπλοκότητας.
- Υπάρχει διαδικασία για τη λήψη αποφάσεων, οι πληροφορίες που δίνει ο λήπτης αποφάσεων ποσοτικοποιούνται ως βάρη.

3.1.2. Εφαρμογή της AHP

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται για να επιλεγούν και να αξιολογηθούν τα έργα.

- Δίνει χρήσιμες βοήθειες στον ερευνητή για να κάνει την πιο σωστή επιλογή
- Βοηθά στην αξιολόγηση των υπεροχών των εναλλακτικών
- Οργανώνει τις διαδικασίες και καθορίζει τους συντελεστές σημαντικότητας.

Θετικά στοιχεία της μεθόδου:

- Αποδίδει καλύτερα από άλλες αντίστοιχες μεθόδους
- Μπορεί ο ερευνητής να προσδιορίζει και να επιλύει με ευκολία προβλήματα
- Κάνει έλεγχο συνέχειας στα κριτήρια που έχουν τεθεί, μέσω της σύγκρισης, κάτι σπάνιο καθώς σε άλλες μεθόδους δεν συμβαίνει
- Συνδυάζεται με άλλες μεθόδους και εφαρμόζεται σε πλειάδα προβλημάτων

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Δεν είναι μαθηματικά ορθή (Banae Costa. et.al., 2001)
- Είναι αντίστροφη της κατάταξης, καθώς βασίζεται στην εφαρμογή της μαθηματικής μεταβλητότητα (Triantaphyllou, 2000)
- Είναι χρονοβόρα
- Θέλει αρκετή προσοχή κατά τη διάρκεια, καθώς αν γίνει λάθος, μετά λειτουργεί αλυσιδωτά και ακολουθεί μια σειρά λαθών

3.2. Η μέθοδος Promithee

Οι πέντε μέθοδοι Promithee έχουν κοινή βάση, αλλά κάθε μια από τις πέντε έχει αναπτυχθεί για να λύνει μια περιορισμένη γκάμα προβλημάτων, έγιναν γνωστές από τους Brans & Vincke (1984), ανήκουν στο σύμπλεγμα των μεθόδων σχέσεων υπεροχής και στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα

αναλυθούν εκτενώς οι Promithee I και II, όπου η πρώτη παρέχει μερική κατάταξη των εναλλακτικών και η δεύτερη πλήρη κατάταξη. Έχουν ως χαρακτηριστικό ό,τι κατατάσσονται τα προγράμματα μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγος της απόδοσης των εναλλακτικών, προς τα ήδη καθορισμένα στοιχεία ανάλυσης.

3.2.1. Οι μέθοδοι Promithee I και II

Promithee I:

Η μέθοδος Promithee I για να γίνει η εφαρμογή της προβαίνει σε μια σειρά από βήματα.

1. Συγκρίνεται μόνο ένα κριτήριο σε σχέση με τα διαφορετικά σενάρια, κάνοντας χρήση ενός από τα σχήματα που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.2: Έξι τύποι γενικευμένων σεναρίων. (Brans & Vincke, 1984)

<p>Usual - criterion</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{If } d_{ij}^k \leq 0 \text{ (Indifference)} \\ 1 & \text{If } d_{ij}^k > 0 \text{ (Strict preference)} \end{cases}$	
<p>Quasi - criterion</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{If } d_{ij}^k \leq q_k \text{ (Indifference)} \\ 1 & \text{If } d_{ij}^k > q_k \text{ (Strict preference)} \end{cases}$	
<p>Criterion with linear preference</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{d_{ij}^k}{p_k} & \text{If } d_{ij}^k \leq p_k \text{ (Weak preference)} \\ 1 & \text{If } d_{ij}^k > p_k \text{ (Strict preference)} \end{cases}$	
<p>Level - criterion</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{If } d_{ij}^k \leq q_k \text{ (Indifference)} \\ \frac{1}{2} & \text{If } q_k < d_{ij}^k \leq p_k \text{ (Weak preference)} \\ 1 & \text{If } d_{ij}^k > p_k \text{ (Strict preference)} \end{cases}$	
<p>Criterion with linear preference and indifference area</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{If } d_{ij}^k \leq q_k \text{ (Indifference)} \\ \frac{d_{ij}^k - q_k}{p_k - q_k} & \text{If } q_k < d_{ij}^k \leq p_k \text{ (Weak preference)} \\ 1 & \text{If } d_{ij}^k > p_k \text{ (Strict preference)} \end{cases}$	
<p>Gaussian criterion</p> $P_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{If } d_{ij}^k \leq 0 \\ 1 - \exp\left\{-\frac{(d_{ij}^k)^2}{2\sigma_k^2}\right\} & \text{If } d_{ij}^k > 0 \end{cases}$	

- Στο πρώτο κριτήριο δεν περιλαμβάνονται όρια,
- Στο δεύτερο κριτήριο περιλαμβάνεται μόνο το όριο αδιαφορίας q_j .

- Στο τρίτο κριτήριο το οποίο περιλαμβάνει το όριο προτίμησης P_j .
- Στο τέταρτο κριτήριο περιλαμβάνει το όριο αδιαφορίας q_j όπως και όριο προτίμησης P_j .
- Στα δυο τελευταία κριτήρια περιλαμβάνονται από τις γραμμές προτίμησης με διάστημα αδιαφορίας και το γκαουσιανό κριτήριο.

2. Ομαδοποιούνται οι επιλογές στα ζεύγη a και b , υπολογίζουμε τον δείκτη προτίμησης $P_j(a,b)$ σταθμίζοντας το κάθε κριτήριο ανάλογα με τον συντελεστή βαρύτητας που έχει τεθεί.

$$P(a,b) = (a,b)$$

Οι τιμές του δείκτη $P(a,b)$ κυμαίνονται μεταξύ του $(0,1)$

3. Ορίζονται η θετική, η ουδέτερη και η αρνητική ροή, σύμφωνα με τους συνολικούς δείκτες.

Θετική ροή:
$$\varphi^+(a) = \frac{\sum_{j=1} P(a, j)}{n-1}$$

Αρνητική ροή:
$$\varphi^-(a) = \frac{\sum_{j=1} P(a, j)}{n-1}$$

Υπολογίζονται για κάθε λύση a δυο μέτρα αξιολόγησης που δείχνουν κατά πόσο η λύση αυτή υπερέρχει έναντι των άλλων επιλογών ή το αντίθετο.

4. Γίνεται πλήρης ή μερική κατάταξη των εναλλακτικών σύμφωνα με την ισχυρή προτίμηση.

Promithee II:

Με την εφαρμογή της μεθόδου Promithee κατατάσσονται οι επιλογές σύμφωνα με ο μέτρο υπεροχής κάθε επιλογής. Το μέτρο αυτό υπολογίζεται, αφαιρώντας την αρνητική ροή από την θετική.

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \text{ (Καθαρή Ροή)}$$

Όταν η θετική ροή είναι μεγαλύτερη της αρνητικής ροής, τότε υπάρχει καθαρή υπεροχή και αναγνωρίζει μόνο καταστάσεις προτίμησης.

$$aP_{II}b \text{ αν } \varphi(a) > \varphi(b) \text{ (Προτίμηση)}$$

Σε περίπτωση που οι δυο ροές είναι ίσες, τότε υπάρχει κατάσταση αδιαφορίας.

$$aI_{II}b \text{ αν } \varphi(a) = \varphi(b) \text{ (Αδιαφορία)}$$

3.2.2. Η εφαρμογή της Promethee στην διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής.

Η Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations (Promethee) είναι μια τεχνική MCDM με υψηλότερη κατάταξη, η οποία βασίζεται στη σύγκριση κατά ζεύγη εναλλακτικών λύσεων, στην ιεράρχησή της, ώστε να προσδιοριστούν οι κυρίαρχες σε σχέση με επιλεγμένα κριτήρια απόφασης και εξετάζει τα ποιοτικά και τα ποσοτικά κριτήρια. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος, οι συναρτήσεις προτίμησης εκχωρούνται σε κάθε κριτήριο, όπως ορίζεται από την ομάδα λήψης αποφάσεων. Εξετάζονται συνήθως έξι έως οκτώ τύποι συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίοι μπορεί να είναι σταθεροί, γραμμικοί, κλιμακωτοί, Gaussian ή λογιστικοί, ανάλογα με τη φύση και τη διαθεσιμότητα δεδομένων σχετικά με το υπό αξιολόγηση κριτήριο. Η μέθοδος Promethee δεν συσχετίζει μια συγκεκριμένη χρησιμότητα σε κάθε κριτήριο, όπως συνήθως για τις προσθετικές τεχνικές, αλλά λειτουργεί αξιολογώντας την απόκλιση μεταξύ δύο εναλλακτικών λύσεων σε αυτό το κριτήριο.

Εκτός από τα θετικά που αναφέρθηκαν, η εφαρμογή των μεθόδων έχει και αρνητικά.

- Λόγω των συντελεστών βαρύτητας, των ορίων προτίμησης P_j και αδιαφορίας q_j , έχουν ευαισθησία
- Δεν εξηγείται μέσω ορισμού
- Είναι αλληλένδετα το γνωστικό επίπεδο του αποφασίζοντα με την αποτελεσματικότητα
- Στην εξέταση ενός συνόλου πιθανών αποφάσεων, το ποια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί αποφασίζεται από τον αναλυτή
- Για την κάθε μία απόφαση, η ανάλυση θα πρέπει να γίνεται από την αρχή.

3.3. Οι μέθοδοι Electre

Μία βασική μέθοδος στο χώρο των σχέσεων υπεροχής είναι η Electre (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité – Elimination and Choice Expressing Reality), την οποία ανέπτυξε ο Bernard Roy (1968, 1978, 1991, 1996) για να καλύψει τα κενά των υπόλοιπων μεθόδων λήψης αποφάσεων. Η Electre έχει τέσσερις διαφορετικές εκδοχές οι οποίες έχουν δημιουργηθεί με κοινή βάση, αλλά διαφέρουν μεταξύ τους σχετικά με το τι στοιχεία εκχωρούνται αλλά και τα αποτελέσματά τους. Ο Roy αναφέρει πως εφόσον υπάρχουν περισσότερα κριτήρια για την x_i από την x_j , και δεν έχει ισχυρή αντίθεση για την x_i , τότε η εναλλακτική x_i ξεπερνά την x_j . Ενώ για να υφίσταται ο ισχυρισμός $x_i S x_j$ ή όχι, εξετάζεται κάθε ένα ζεύγος x_i και x_j , εφόσον $x_i S x_j$ σημαίνει πως « x_i είναι τουλάχιστον εξίσου καλό με το x_j » η «το x_i δεν είναι χειρότερο από το x_j ».

Τα τέσσερα ενδεχόμενα είναι τα εξής:

- $x_i \succ x_j$ και όχι $(x_j \succ x_i)$
- όχι $(x_i \succ x_j)$ και $x_j \succ x_i$
- $x_i \succ x_j$ και $x_j \succ x_i$ (αδιαφορία)
- όχι $x_i \succ x_j$ και όχι $x_j \succ x_i$. (ασυμβατότητα)

Ωστε να γίνει έλεγχος της σχέσης υπεροχής δημιουργείται ένας πίνακας ασυμφωνίας, με σκοπό να βρεθούν οι διαφορές και οι ομοιότητες των εναλλακτικών που συνδυάζονται, όπου εφόσον υπερέχει ισχυρά στα κριτήρια η μία έναντι κάποιας άλλης τότε αποκλείεται. Δηλαδή ο πίνακας ασυμφωνίας έρχεται σε κόντρα με τον πίνακα ασυμφωνίας (Hwang. et al., 1993). Έτσι δημιουργείται η έννοια του κατωφλιού, δηλαδή η αξία που δικαιολογεί την υπεροχή μιας εναλλακτικής συγκριτικά με κάποια άλλη, όπου μέσω αυτών διαμορφώνεται η σχέση υπεροχής S . (Roy, 1978)

Για να δημιουργηθούν οι πίνακες που αναφέρθηκαν ανωτέρω, χρησιμοποιούνται τα ανώτατα και τα κατώτερα όρια των εναλλακτικών, τα οποία τα επιλέγει ο λήπτης αποφάσεων.

- Υπερέχει αν έχει τιμές άνω του ανώτατου ορίου
- Αποκλείεται αν έχει τιμές κάτω του κατώτερου ορίου
- Όταν τα όρια είναι μεταβλητά ενώ οι συναρτήσεις αξίας των κριτηρίων σταθερές

Electre I:

Έχει σχεδιαστεί για προβλήματα επιλογής. Το οποίο σημαίνει πως από ένα σύνολο πιθανών λύσεων A , προτιμάται το υποσύνολο A_1 , το οποίο για κάθε μία εν δυνάμει λύση a_2 (με $a_2 \hat{=} A - A_1$), να υφίσταται έστω μία λύση $a_1 \hat{=} A_1$ η οποία θα υπερτερεί της λύσης a_2 .

Για το κριτήριο g_i υπάρχει ένα βάρος w_i :

$$c(a,b) = \frac{1}{P} \sum_{j: g_j(a) \geq g_j(b)} p_j \text{ με } P = \sum_{j=1}^n p_j$$

Δείκτης ασυμφωνίας:

$$d(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_j(a) \geq g_j(b) \\ \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)] & \end{cases}$$

$$\text{με } \delta = \max_{c,d,j} [g_j(c) - g_j(d)]$$

ή αλλιώς υπάρχει ένα σύνολο ασυμφωνίας D_j για κάθε κριτήριο g_j , με $D_j = \{(x_j, y_j), \dots\}$.

Όπου μετέπειτα ορίζεται το κατώφλι συμφωνίας c και το κατώφλι ασυμφωνίας d ως εξής:

$$S(a, b) \text{ iff } \begin{cases} c(a, b) \geq c \\ d(a, b) \leq d \end{cases} \quad \text{ή} \quad S(a, b) \text{ iff } \begin{cases} c(a, b) \geq c \\ (g_j(a), g_j(b)) \notin D_j, \forall j \end{cases}$$

Electre II και III:

Σχεδιάστηκε για προβλήματα κατάταξης και χρειάζεται να καθοριστούν δύο σχέσεις υπεροχής, αντί για μία. Αντίθετα η Electre III (Roy, 1978), έχει δημιουργηθεί για προβλήματα υπεροχής και κάνει χρήση τριών διαφορετικών κατωφλιών. Αποσκοπώντας στο να αφομοιωθούν οι αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των αξιολογήσεων.

Η Electre III μέσω της διαδικασίας εξάγει τη σχέση ανάμεσα στις εναλλακτικές λύσεις (Hashemi. et al., 2016). Η μέθοδος αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία αναφέρονται ευθύς αμέσως:

- Ο αποφασίζοντας έχει άμεση συμμετοχή στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.
- Καθορίζονται τα όρια προτίμησης αι αδιαφορίας
- Ο αποφασίζοντας μπορεί να προβεί σε ανάλυση των ποιοτικών και ποσοτικών κριτηρίων

Η εφαρμογή της μεθόδου Electre III αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου g_j για την εκάστοτε εναλλακτική.

Το οποίο αποτυπώνεται στην εξής σχέση:

$$g(a) = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_m(a))$$

Όπου:

$A=(a,b,c,\dots,n)$: ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων

$g_j=(g_1,g_2,\dots,g_m)$: ένα σύνολο κριτηρίων

Κατά την ανάλυση της μεθόδου φάνηκαν τα εξής:

- Καθορισμός ορίων
- Καθορισμός δεικτών συμμετρίας και ασυμμετρίας
- Αποσαφηνίζεται ο βαθμός αξιοπιστίας
- Οι εναλλακτικές κατατάσσονται ανάλογα

Οι συντελεστές $q(g)$ και $p(g)$ σηματοδοτούν τα όρια αδιαφορίας και προτίμησης αντίστοιχα.

Εάν $g(a) \geq g(b)$, τότε,

$$g(a) > g(b) + p(g(b)) \Rightarrow aPb$$

$$g(b) + q(g(b) < g(a) < g(b) + p(g(b)) \Rightarrow aQb$$

$$g(b) < g(a) < g(b) + q(g(b)) \Rightarrow alb$$

όπου:

- P: ισχυρή προτίμηση
- Q: ανίσχυρη προτίμηση
- $g(a)$: η τιμή του κριτηρίου της εναλλακτικής a

Ακολουθούν τα τέσσερα βήματα της μεθόδου παρατίθενται επιγραμματικά:

1. Ο δείκτης συμφωνίας $C(a,b)$ υπολογίζεται για κάθε ζεύγος εναλλακτικών λύσεων ξεχωριστά ως εξής:

$$S(a,b) \begin{cases} c(a,b) \text{ if } d_i(a,b) \leq c(a,b) \\ c(a,b) \prod_{i \in J(a,b)} \frac{1-d_j(a,b)}{1-c(a,b)} \end{cases}$$

Όπου $C_i(a,b)$ ο βαθμός κατάταξης της εναλλακτικής a και της εναλλακτικής b με βάση το κριτήριο i .

$$C_i(a,b) \begin{cases} 0 \text{ if } g_i(b) - g_i(a) > p_i(g_i(a)) \\ 1 \text{ if } g_i(b) - g_i(a) > p_i(g_i(a)) \\ \frac{p_i + g_i(a) - g_i(b)}{p_i - q_i} \end{cases}$$

Έτσι, $0 \leq c_i(a,b) \leq 1$

2. Ο δείκτης ασυμφωνίας $d(a,b)$ για κάθε κριτήριο ξεχωριστά ορίζεται ως εξής:

$$d_i(a,b) \begin{cases} 0 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) > p_i(g_i(a)) \\ 1 & \text{if } g_i(b) - g_i(a) > v_i(g_i(a)) \\ \frac{g_i(b) + g_i(a) - p_i}{v_i - p_i} & \end{cases}$$

Έτσι, $0 \leq d_i(a,b) \leq 1$.

3. Ο βαθμός κατάταξης ορίζεται από το $S(a,b)$

$$S(a,b) \begin{cases} c(a,b) & \text{if } d_i(a,b) \leq c(a,b) \\ c(a,b) \prod_{i \in J(a,b)} \frac{1 - d_j(a,b)}{1 - c(a,b)} & \end{cases}$$

Όπου $J(a,b)$ το σύνολο κριτηρίων, για $d_j(a,b) > c(a,b)$.

4. Κατατάσσονται οι εναλλακτικές μέσω δύο διαδικασιών ενδιάμεσης κατάταξης, την φθίνουσα και την αύξουσα.

Επιπλέον υπάρχει μία επέκταση η οποία προσθέτει την έννοια των τριών βαθμών αξιοπιστίας:

- Αξιοπιστία συμφωνίας
- Αξιοπιστία ασυμφωνίας
- Καθαρή αξιοπιστία.

Ο βαθμός αξιοπιστίας συμφωνίας ορίζεται ως εξής:

$$\varphi^+(x_i) = \sum_{x_j \in X} S(x_i, x_j)$$

Ενώ ο βαθμός αξιοπιστίας ασυμφωνίας ορίζεται ως εξής:

$$\varphi^-(x_i) = \sum_{x_j \in X} S(x_i, x_j)$$

Τέλος, ο βαθμός καθαρής αξιοπιστίας ορίζεται ως εξής:

$$\varphi(x_i) = \varphi^+(x_i) - \varphi^-(x_i)$$

3.3.1. Εφαρμογή των μεθόδων Electre

Είναι από τις δημοφιλέστερες μεθόδους που δίνονται στους λήπτες αποφάσεων, έτσι ώστε να την χρησιμοποιήσουν για να αξιολογήσουν και να καταλήξουν στην καταλληλότερη επιλογή.

Τα πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής:

- Περιορίζονται η υποκειμενικότητα και η γενικολογία, μέσω της χρήσης των ορίων προτίμησης
- Είναι εφικτό να συγκριθούν εντελώς διαφορετικά κριτήρια με άλλες μονάδες μέτρησης κλπ, χωρίς να προαπαιτείτε κάποια τροποποίηση
- Αποτίμηση των προτιμήσεων με βεβαιότητα
- Συγκρίνονται ανά δυάδα, κάτι το οποίο επισπεύδει την διαδικασία

Εκτός από πλεονεκτήματα έχει και μειονεκτήματα:

- Δεν προσμετράτε η αθροιστική επίδοση των εναλλακτικών (Zorounidis. et al., 2010)
- Επηρεάζεται το αποτέλεσμα από τους συντελεστές βαρύτητας και των ορίων αδιαφορίας q_i και p_i (Figueira. et al., 2002)
- Υπάρχουν αλλαγές στην κατάταξη των εναλλακτικών, λόγω αλλαγής των εναλλακτικών με υποδεέστερες (Wang. et al., 2006)

3.4. Η μέθοδος Topsis

Η Topsis (Technique For Order of Preference by similarity to ideal preference by similarity to ideal solution) είναι απλοϊκή, εύκολη στη χρήση και μπορεί να γίνει αντιληπτή στον χρήστη και χαρακτηρίζεται ως μία παραλλαγή της Electre η οποία εδραιώθηκε από τους Hwang και Yoon (1981). Βασίζεται στη θεωρία της χρησιμότητας καθώς συγκρίνονται οι εναλλακτικές με βάσει τις βαρύτητες και το πόσο αποδοτικές ήταν, βρίσκει μία λύση από το πόσο μακριά ή κοντά σε απόσταση είναι από την βέλτιστη. Τέλος σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους έχει το δυνατόν τις πιο λίγες αναστροφές στην κατάταξη τους.(Cheng. et al., 2008; Zanakis. et al., 1998)

Τα πλεονεκτήματα της είναι τα εξής (Kim. et al.,1997; Shih. et al., 2007):

- Έχει μαθηματική λογική, το οποίο αντιστοιχεί σε ανθρώπινο σκεπτικό
- Χρησιμοποιεί τιμές που κλιμακώνονται
- Έχει απλοϊκή διαδικασία υπολογισμού
- Στις εναλλακτικές τα μέτρα απόδοσης εκδηλώνονται ως πολυεδρικό, το λιγότερο δύο διαστάσεων.

3.4.1. Η εφαρμογή της Topsis

Σύμφωνα με τον Yoon (1987) υπολογίζεται η ιδανική λύση, η οποία ορίζεται από το πώς θα βαθμολογηθεί το κριτήριο και με το αν χρήζει να μεγιστοποιηθεί ή όχι. (Triantaphyllou et al., 1996). Η ιδανική λύση συμβολίζεται με $(A)^+$. Ύστερα υπολογίζεται η χειρότερη λύση, ακριβώς με το ίδιο σκεπτικό που υπολογίζεται και η βέλτιστη λύση και συμβολίζεται με $(A)^-$. Στη συνέχεια για όλες τις επιλογές ξεχωριστά μετράται η διαφορά της βέλτιστης τιμής με τον βαθμό ιεράρχησης του κριτηρίου και αυτή η τιμή υψώνεται στο τετράγωνο, αθροίζονται οι δύο τιμές και το αποτέλεσμα τους εξάγεται στο τετράγωνο. Έτσι υπολογίζεται η λύση $(R)^+$ για τις εναλλακτικές ως εξής:

$$R^+ = \sqrt{\left((A)^+ - (C1)\right)^2 + \left((A)^+ - (C2)\right)^2 + \left((A)^+ - (C3)\right)^2}$$

Ακριβώς η ίδια διαδικασία γίνεται και για τις χειρότερες τιμές με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως και για τις καλύτερες. Σε αυτό το σημείο διαμορφώνεται ένας πίνακας όπου στις γραμμές αποτυπώνονται οι τιμές $(R)^+$ και $(R)^-$, ενώ στις στήλες οι εναλλακτικές. Τέλος υπολογίζεται ο δείκτης εγγύτητας για τις εναλλακτικές ως εξής:

$$C.I = \frac{(R)^-}{\left((R)^+ + (R)^-\right)}$$

3.5. Η μέθοδος Copras

Η Copras (Complex Proportional Assessment) εμφανίστηκε το 1996 για να χρησιμοποιηθεί σαν μέσσω ώστε να επιλεγθεί η βέλτιστη εναλλακτική μέσα από μία πληθώρα λύσεων και η επιλογή αυτή να είναι αξιόπιστη ευρέως. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα να εκχωρηθούν ορισμένα επίπεδα αβεβαιότητας στις τιμές των κριτηρίων, ανάλογες πάντα με το αν θεωρείται ωφέλιμο ή μη για τον στόχο. Μετέπειτα η προτεραιότητα των εναλλακτικών προσδιορίζεται αξιολογώντας τη σχετική σημασία της (ή την ισοδύναμη ποσοτική χρησιμότητα) ως συνάρτηση των ωφέλιμων και μη ιδιοτήτων που αξιολογήθηκαν σε προηγούμενο βήμα.

Η μέθοδος Copras εισήχθη από τους Zavadskas. et al.,(2016). Η αξιοπιστία και η ακρίβεια της μεθόδου Copras αναγνωρίζεται από αρκετούς μελετητές και στις μέρες μας χρησιμοποιείται για την επίλυση διαφορετικά προβλήματα μηχανικής και διαχείρισης πολλαπλών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, η ακρίβεια του, τα μέτρα απόδοσης στη μέθοδο προϋποθέτουν την άμεση και αναλογική εξάρτηση του.

3.6. Η μέθοδος MAUT (Multi-Attribute Utility Theory)

Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τους Churchman. et al., (1957), ενώ συνεχίστηκε από τον Fishburn (1968, 1970, 1978) και τον Sintonen (1981) και βασίζεται στη θεωρία της χρησιμότητας με τις πολλές παραπάνω δυνατότητες. Όπως έχει προστεθεί ένας κανόνας ο οποίος εμπεριέχει συνολικά τα μέτρα απόδοσης, τα μέτρα απόδοσης των εναλλακτικών αντιτίθενται στον χαρακτηριστικών και εξασφαλίζει βαρύτητες για το κάθε ένα χαρακτηριστικό ξεχωριστά (Σπανός, 2004). Έχει ως βασικό της πλεονέκτημα την υποστήριξη των αποφασιζόντων ώστε να καταφέρουν να αντιληφθούν σε δεύτερο επίπεδο ποια απόφαση θα είναι η καλύτερη επιλογή για το πρόβλημα (De Montis. et al., 2005).

Η σχέση εύρεσης της χρησιμότητας των εναλλακτικών είναι η εξής:

$$U(x) = \sum_{i=1} w_i v_i(x)$$

Όπου:

w_i : η βαρύτητα σημαντικότητας του κριτηρίου i

v_i : η επίδοση – τιμή της εναλλακτικής x ως προς το κριτήριο i .

Υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία για να βρεθούν και να αξιολογηθούν τα κριτήρια από τον λήπτη αποφάσεων, δηλαδή αρχικά θα δοθούν με ακρίβεια οι επιλογές και τα κριτήρια που τα έκαναν να επιλεγούν. Μετά αξιολογούνται οι επιλογές ως προς τα κριτήρια μονομερώς, σύμφωνα με την αναγκαιότητα τους ορίζονται τα βάρη των κριτηρίων και ύστερα κανονικοποιούνται έτσι ώστε στο σύνολο να έχουν τιμή ίση με το ένα. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται το βάρος των κριτηρίων με το άθροισμα των γινομένων των επιλογών και αυτό το αποτέλεσμα είναι τα μέτρο αξίας των διαθέσιμων επιλογών. Τέλος σε αυτό το σημείο κατατάσσονται οι εναλλακτικές κατά φθίνουσα σειρά βασιζόμενοι στην τιμή της αξίας των εναλλακτικών και σαν τελευταίο βήμα γίνεται ανάλυση ευαισθησίας. (Wallnau,1998)

4. Ενίσχυση Κατασκευών

Η ενίσχυση των κατασκευών είναι μία διαδικασία διερεύνησης και μελέτης της υπάρχουσας κατάστασης της κατασκευής καθώς και αποτίμησης της. Ο εκάστοτε μηχανικός χρειάζεται να κρίνει την κατάσταση της υφιστάμενης κατάστασης και να προτείνει μια επέμβαση η οποία θα επιφέρει τα απαιτούμενα αποτελέσματα, σκεπτόμενος πάντα πολλούς παράγοντες. Δηλαδή θα πρέπει να βρει την πιο συμφέρουσα οικονομικά, χρονικά αλλά και αποδοτικά πρόταση, όπως επίσης και την πιο ασφαλή. Επί της ουσίας, η ενίσχυση μιας κατασκευής επιλέγεται στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα των δομικών στοιχείων, κατά επέκταση της κατασκευής, σε σχέση με αυτή του αρχικού σχεδιασμού. Η μεθοδολογία και οι τρόποι επέμβασης και ενίσχυσης ενός κτίσματος έχουν εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια, καθώς έχουν ανακαλυφθεί πολλές νέες τεχνικές. Το οποίο δεν σημαίνει πως οι προϋπάρχουσες μέθοδοι ενίσχυσης αναιρούνται λόγω τις εμφάνισης των νέων, αλλά εξαιτίας της διαχρονικότητας τους θεωρούνται απολύτως αξιόπιστες και αποδοτικές. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως το δομικό στοιχείο που πλήττεται περισσότερο, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, είναι τα υποστυλώματα, λόγω του μεγέθους των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων καθώς και της μεγάλης απαίτησης τους σε πλαστιμότητα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τρεις συγκεκριμένες μέθοδοι ενίσχυσης οι οποίες μετέπειτα θα εφαρμοστούν και στο κτίριο της μελέτης περίπτωσης έτσι ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη επιλογή από τις εναλλακτικές αυτές.

4.1. Ενίσχυση με τη χρήση FRP

Τα ίνα-ενισχυμένα πολυμερή απαρτίζονται από την πλαστική πολυμερή ρητίνη και την ενίσχυση της, όπου μετά την σύνθεση τους δημιουργείται το FRP και αποδίδει καλύτερα το υλικό συνάμα και οι ιδιότητες του ενισχύονται αρκετά. (Σπυράκος, 2004). Οι πολυμερείς ρητίνες έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Είναι κολλώδεις και εύχρηστες
- Έχουν αδύναμη σκληρότητα
- Μειώνεται η τριβή μετά την τοποθέτηση του
- Δεν διαβρώνονται οι επιφάνειες
- Χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος των ινών

Βασικά Είδη ΙΟΠ (FRPs):

- Ίνες Υάλου (GFRP): Χρησιμοποιούνται για ενίσχυση και επισκευή κατασκευών από το 1939 και πιο πολύ ο ύαλος-E και ύαλος-S
- Ίνες Άνθρακα (CFRP): Είναι το είδος FRPs που επιλέγεται συχνότερα και έχει εφευρεθεί από το 1950.
- Ίνες Αραμιδίου (AFRP): Δεν γίνεται χρήση τόσο συχνά σε σχέση με τα άλλα είδη και εμφανίστηκε το 1970

Άλλα Είδη ΙΟΠ (FRPs):

- Ίνες Γραφίτη
- Ίνες Βορίου
- Ίνες από Καρβίδιο του Πυριτίου

Προτερήματα της χρήσης FRPs ως μέσω ενίσχυσης:

- Μεγάλη εφελκυστική αντοχή
- Το μέτρο ελαστικότητας E_f , είναι μεταξύ από 30 και 300 Gpa
- Έχουν μικρό βάρος, κυμαίνεται περίπου $\frac{1}{4}$ αυτού του χάλυβα
- Έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάρκεια
- Στην τοποθέτηση είναι εύκολη και εύχρηστη
- Θέλει ελάχιστον χρόνο για να εφαρμοστεί σε σχέση με όλες τις αντίστοιχες εφαρμογές ενίσχυσης
- Δεν επηρεάζεται η γεωμετρία και η δυσκαμψία
- Έχουν υψηλή χημική αντίσταση σε όξινο περιβάλλον αλλά και αντοχή σε κόπωση, ερπυσμό και χαλάρωση
- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον

Γι όλους αυτούς τους λόγους η χρήση FRPs για την ενίσχυση κατασκευών θεωρείται από τις πιο ανταγωνιστικές και έχει πάρει τρομερή άνοδο στο πόσο χρησιμοποιείται στο εξωτερικό αλλά τώρα τελευταία αναπτύσσεται ραγδαία και στον Ελλαδικό χώρο.

Πέρα από τα προτερήματα θα γίνει αναφορά και των μειονεκτημάτων:

- Έχει υψηλό κόστος υλικών
- Πρέπει να προστατεύεται από βανδαλισμούς, πυρκαγιά και υπεριώδη ακτινοβολία
- Είναι ευπαθή σε αλκαλικό περιβάλλον

- Χρήζει ανάγκη από εξειδικευμένο προσωπικό για την εφαρμογή καθώς είναι από τις νεοεμφανισθείσες στον χώρο
- Υπάρχει έλλειψη κανονισμών σχεδιασμού

4.1.1. Ενίσχυση υποστρωμάτων με ινοπλιμένα πολυμερή FRPs

Ευθύς αμέσως θα γίνει αναφορά στους γενικούς κανόνες που αφορούν την εφαρμογή των ινοπλιμένων πολυμερών και ειδικότερα στα υποστρώματα. (Σπυράκος, 2004)

1. Αρχικά πρέπει να γίνει απομάκρυνση των χαλαρών τμημάτων, να γίνει γέμισμα των ρωγμών, δηλαδή επί της ουσίας να δημιουργηθεί μια κατάλληλη βάση έτσι ώστε να μπορέσουν να επικολληθούν σωστά και με επιτυχία τα υλικά.
2. Για να παραλάβει σωστά τις δυνάμεις που ασκούνται κατά την διεύθυνση των ινών, η ενίσχυση θα πρέπει να δρα σαν εφελκόμενος οπλισμός. Αν γίνεται χρήση εύκαμπτων υφασμάτων οι υπολογισμοί βασίζονται στην ονομαστική διατομή των υφασμάτων.
3. Στην οριακή κατάσταση φέρουσας ικανότητας, δεν υπάρχει διαρροή του οπλισμού ενίσχυσης σύνθετων υλικών, καθώς έχουν μικρότερες τιμές οι εφελκυστικές δυνάμεις από την μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση θραύσης. Αυτό συμβαίνει εφόσον έχει επιτευχθεί καλή αγκύρωση των οπλισμών.
4. Ο βαθμός ενίσχυσης ισούται με τον λόγο της ροπής της αντοχής αφού έχει γίνει η ενίσχυση προς την ροπή προ αυτής και πρέπει να είναι πιο συνετός με σκοπό αν και εφόσον αστοχήσουν οι οπλισμοί να αναλάβει τα μόνιμα φορτία το μέλος.

4.1.2. Ενίσχυση δοκού με ινοπλιμένα πολυμερή FRPs

Μεγάλο ρόλο για την επιλογή του τρόπου εφαρμογής των FRPs παίζει το για ποιόν λόγο γίνεται η ενίσχυση. Δηλαδή αν η κατασκευή χρήζει ενίσχυση σε κάμψη τότε τα υφάσματα θα τοποθετηθούν στην εφελκούμενη πλευρά της δοκού παράλληλα στον άξονα του μέλους. Ενώ αν πρέπει να ενισχυθεί για να αυξηθεί η διατμητική αντοχή, τότε τοποθετούνται κάθετα στον άξονα, αυτό σημαίνει πως θα είναι ανοιχτού τύπου, μορφής U, καθώς είναι αρκετά δύσκολο να γίνει επέμβαση στην άνω πλάκα για να ενισχυθεί πλήρως το μέλος. Επιπρόσθετα μπορεί να τοποθετηθούν τα υφάσματα με λωρίδες ανά διαστήματα, εάν και εφόσον αυτό απαιτείται από την εκτενή μελέτη που έχει γίνει για την κατασκευή. Και οι δύο τρόποι εφαρμογής παρατίθενται εικόνες 4.1 & 4.2, αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά και το πώς εφαρμόζονται τα ινοπλισμένα πολυμερή αναφέρονται με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 4.1.1, όπου αναφέρεται και η εφαρμογή τους στα υποστυλώματα.



Σχήμα 4.1: Ενίσχυση δοκού με υφασμάτινα ΙΟΠ παράλληλα στον άξονα του μέλους με σκοπό την αύξηση καμπτικής ροπής. (<https://em4c.gr/portfolio/dimos-iliou/>)



Σχήμα 4.2: Ενίσχυση δοκού με υφάσματα ΙΟΠ κάθετα στον άξονα του μέλους με σκοπό την αύξηση της διατμητικής αντοχής του. (<https://monosimacon.blogspot.com>)

4.2. Ενίσχυσης με τη χρήση Μανδυών

Οι μανδύες είναι βοηθητικό μέσο για την ενίσχυση υποστυλωμάτων αλλά και των δοκών, καθώς βοηθούν στο να βελτιωθεί η αντοχή, η δυσκαμψία και η πλαστιμότητα των μελών. Ένα σημαντικό

κομμάτι και κομβικό είναι η ενίσχυση στο κομμάτι ένωσης των δοκών και των υποστυλωμάτων καθώς σαν σημείο έχει ανάγκη από πλαστιμότητα και παραμορφωσιμότητα. (Δρίτσος, 2005)

Όπως κάθε μέθοδος ενίσχυσης και η χρήση μανδύων έχει τα προτερήματά της:

- Αυξάνεται περιμετρικά η διατομή του στοιχείου που ενισχύεται
- Αυξάνεται ο βαθμός πυροπροστασίας
- Μειώνεται η λυγηρότητα
- Αυξάνεται η δυσκαμψία της διατομής

Είδη μανδύων:

Σύμφωνα με το υλικό της σκυροδέτησης και τις παραμέτρους της εκάστοτε κατασκευής, επιλέγεται και το κατάλληλο είδος μανδύα, τους οποίους θα εξηγήσουμε περιληπτικά έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές οι διαφορές μεταξύ τους (Σπυράκος, 2004):

- Μανδύες από έγχυτο σκυρόδεμα: Εφαρμόζεται όταν είναι αναγκαίο ο μανδύας να ξεπερνά το πάχος των 8cm, συγκεκριμένα για μία σειρά οπλισμού έχουμε 8 έως 12cm ενώ για δύο σειρές οπλισμού έχουμε πάχος 12cm και βεβαίως κρίνεται απαραίτητο α χρησιμοποιηθεί και ξυλότυπος.
- Μανδύες από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα: Χρησιμοποιείται όταν απαιτούνται μανδύες πάχους 5cm έως 10cm, χωρίς την αναγκαιότητα ξυλότυπου, εφαρμόζεται σε επιφάνειες με κλίση και όπου δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση. Έχει ως πλεονέκτημα τον ελάχιστο χρόνο σχετικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις και πως προσφύεται πολύ εύκολα, ωστόσο χρήζει ανάγκη από εξειδικευμένο προσωπικό καθώς η εκτόξευση του σκυροδέματος είναι μείζον ζήτημα και φέρει πολλές παραμέτρους για να γίνει σωστά και με επιτυχία.
- Μανδύες από σκυροτσιμεντόπηγμα: Χρησιμοποιείται όταν ο οπλισμός είναι αρκετά πυκνός καθώς τα αδρανή και η τσιμεντοκονία εισέρχονται σε δόσεις. Έχει μεγάλη αντοχή, ενώνεται και επιτυχία με το σκυρόδεμα που υπάρχει ήδη στην κατασκευή αλλά έχει μεγάλο κόστος και χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό για την εγκατάστασή της.
- Μανδύες από ειδικά σκυροδέματα ή τσιμεντοκονιάματα: Είναι κοστοβόρα επιλογή για αυτό και δεν επιλέγεται συχνά, αλλά κατά βάση χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται μανδύας με μικρό πάχος.

Ανάλογα με την έκταση της βλάβης και τους πιθανούς αρχιτεκτονικούς περιορισμούς, οι μανδύες διακρίνονται σε:

- ολικούς μανδύες,

- τοπικούς μανδύες,
- ολόπλευρους ή κλειστούς μανδύες,
- ανοικτούς μανδύες (τρίπλευρους ή δίπλευρους).

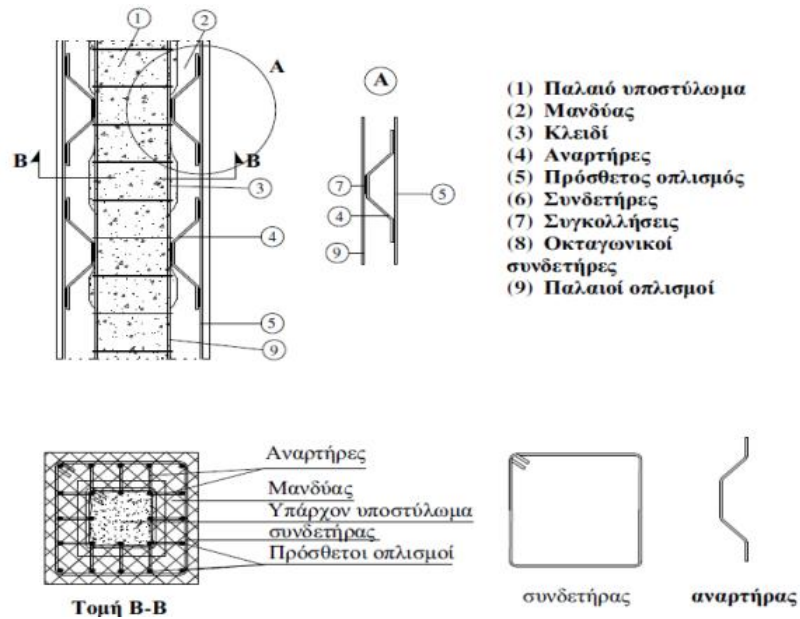
4.2.1. Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες

Όπως αναφέρθηκε ήδη οι μανδύες χρησιμοποιούνται ώστε να ενισχυθούν υποστυλώματα, δοκοί και οι κόμβοι τους, επιλέγοντας πάντα το κατάλληλο είδος σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Ένα από τα σημαντικά θετικά της χρήσης τους για τα υποστυλώματα είναι πως δεν επιφέρει επεμβάσεις στην αρχιτεκτονική του υποστυλώματος αλλά και βοηθά στο να αυξηθεί η πυροπροστασία. Επιπλέον υπάρχει η επιλογή ολικού ή τοπικού μανδύα ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής, αλλά και πρέπει να επεκτείνονται και στους επόμενους ορόφους, όπως επίσης και στα πέδιλα αν η ενίσχυση γίνεται στο όροφο του ισογείου.

Κάτι που πρέπει να αναφερθεί είναι πως ο μανδύας παραλαμβάνει νέα φορτία και όχι τα υφιστάμενα. Για να θεωρηθεί η ενισχυόμενη διατομή σαν ένα στοιχείο πρέπει πρώτα να γίνει αποφόρτιση του υπάρχοντος μέλους και στη συνέχεια να ενισχυθεί. Έτσι το μέλος που έχει δεχθεί την ενίσχυση μπορεί να δεχθεί όλα τα φορτία που δέχεται. (Δρίτσος, 2005)

Διαδικασία εφαρμογής:

Αρχικά γίνεται αποφόρτιση των πλακών και των δοκών και αρχίζουν να υποστυλώνονται, απομακρύνεται το αποδιοργανωμένο σκυρόδεμα και ξεκινάνε οι τεχνικές εργασίες για να επισκευαστούν τυχόν βλάβες στα υποστυλώματα. Σε αυτό το σημείο ξεκινούν να φαίνονται οι θέσεις του νέου οπλισμού, έτσι διανοίγονται και γίνονται οπές στις θέσεις αγκύρωσης των νέων ράβδων και στις θέσεις των βλήτρων που έχουν υπολογιστεί. Μετά μέσω της χρήσης του κατάλληλου εξοπλισμού από ειδικά εξειδικευμένο προσωπικό εκτραχύνονται οι επιφάνειες σε βάθος 6mm, για να απομακρυνθεί η εξωτερική στρώση του τσιμεντοπολτού, έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα αδρανή και να είναι εφικτό το να καθαριστούν οι εν λόγω επιφάνειες μέσω αέρα και αναρρόφησης όπου κρίνεται απαραίτητο. Εν συνεχεία αγκυρώνονται με κόλλα (χημική πάκτωση) στα άκρα διαμήκεις ράβδοι οπλισμού και τα βλήτρα όπου κρίνεται απαραίτητο. Γίνεται τοποθέτηση και ηλεκτροσυγκόλληση των χαλίδινων παρεμβλημάτων σύνδεσης των παλαιών με τους νέους οπλισμούς, τοποθετούνται νέοι συνδετήρες και γίνεται ο τελικός καθαρισμός με τον τρόπο που αναφέρθηκε και προηγουμένως. Τέλος διαβρέχεται η επιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος, του ξυλότυπου και των αδρανών τουλάχιστον 6 ώρες πριν την σκυροδέτηση του νέου σκυροδέματος και σκυροδετείται ο μανδύας, σύμφωνα με τα μέτρα συντήρησης του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος. (ΟΑΣΠ, 2001)



Σχήμα 4.3: Ενίσχυση υποστυλώματος με κλειστού τύπου μανδύα ΟΣ.(ΟΑΣΠ, 2001)

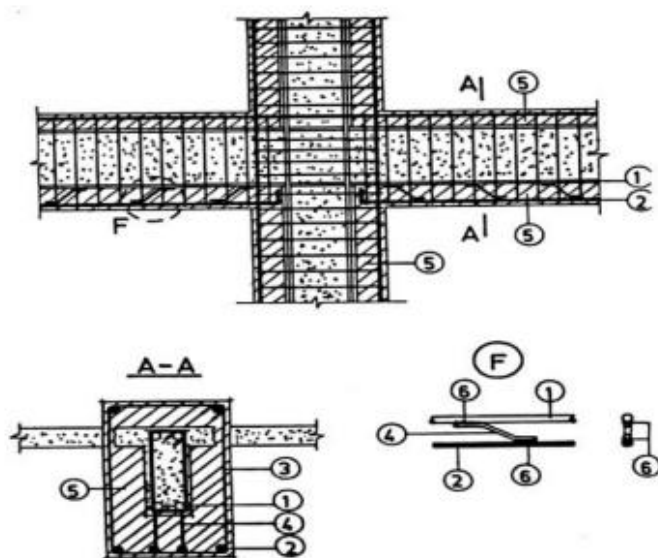


Σχήμα 4.4: Ενίσχυση υποστυλώματος με μανδύες ΟΣ.(<http://episkeves2.civil.upatras.gr/>)

4.2.2. Ενίσχυση δοκών με μανδύες

Μία δοκός ενισχύεται για κάμψη μέσω της προσθήκης νέου οπλισμού στα πέλαμα της, τα οποία θα καλυφθούν από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 7-10 cm σε όλο το πλάτος της δοκού έτσι ώστε να σχηματιστεί ένας μονόπλευρος μανδύας Ο/Σ. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να αποφορτιστεί η δοκός που ενισχύεται. Οι έλεγχοι της δοκού βασίζονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. τα μεγέθη έντασης διαιρούνται με έναν συντελεστή 0.85 ή οι αντοχές πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή 0.85.

Τέλος για την συγκεκριμένη περίπτωση χρειάζεται να γίνει έλεγχος της διεπιφάνειας σε ικανότητα μεταβίβασης των φορτίων από τον αρχικό φορέα στο ενισχυμένο μέλος, η οποία εξαρτάται από το εμβαδόν και από τους μηχανισμούς του βλήτρου και τριβής, όπου μέσω αυτών της μεταβιβάζονται οι δυνάμεις.



1. παλιός οπλισμός, 2. πρόσθετος οπλισμός, 3. πρόσθετοι συνδετήρες, 4. ράβδοι συνδέσεως, 5. μανδύας σκυροδέματος, 6. συγκόλληση.

Σχήμα 4.5: Ενίσχυση δοκού με κλειστού τύπου μανδύα ΟΣ. (Δρίτσος, 2005)

4.3. Ενίσχυση με τη χρήση Τοιχωμάτων.

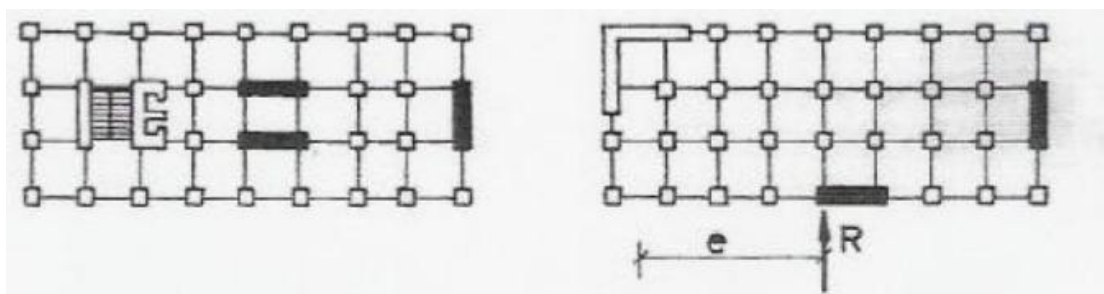
Από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων είναι η προσθήκη νέων τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός επιλεγμένων πλαισίων. (Δρίτσος, 2005)

Η μέθοδος αυτή αλλάζει ριζικά τη συμπεριφορά του φορέα μετά την ενίσχυση του ως εξής:

- Αυξάνεται η αντοχή και η δυσκαμψία του
- Μειώνεται η ιδιοπερίοδος της κατασκευής
- Αλλάζει ο τρόπος μεταφοράς του φορτίου εντός της κατασκευής
- Μειώνονται οι βλάβες σε δευτερεύοντα στοιχεία
- Βελτιώνεται η κατανομή των δυσκαμψιών τόσο καθ' ύψος όσο και σε κάτοψη

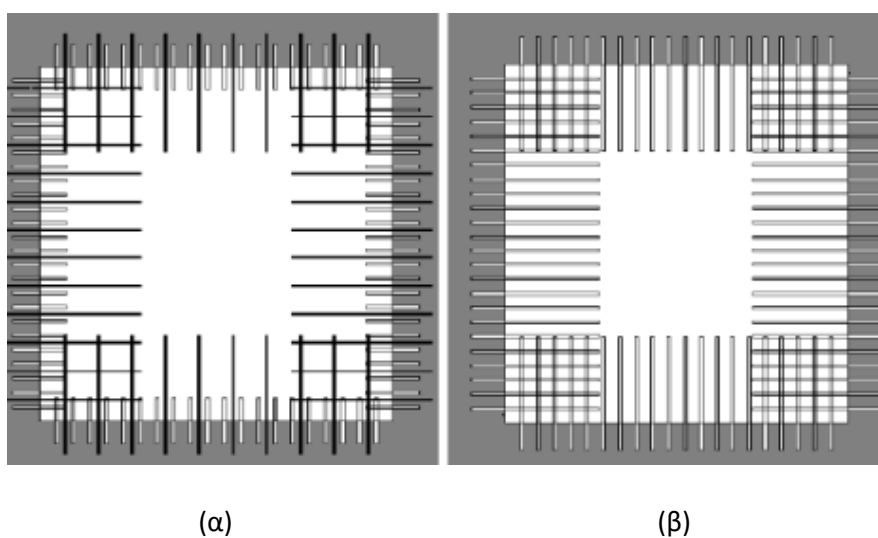
Η σωστή διάταξη των προστιθέμενων τοιχωμάτων στην ασύμμετρη κάτοψη μιας υφιστάμενης κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί ως σωτήρια λέμβος καθώς μειώνει την απόσταση του κέντρου

στροφής από το κέντρο μάζας της κατασκευής, έχοντας ως σκοπό την μείωση των εντάσεων που δημιουργούσε πριν η ευστρεψία κτιρίου (σχήμα 4.6). (Λίτσος, 2012)



Σχήμα 4.6: Προσθήκη τοιχίων για βελτίωση της κανονικότητας σε κάτοψη. (Λίτσος, 2012)

Συνήθως κατασκευάζονται εκείνη τη στιγμή από έγχυτο, εκτοξευόμενο ή αυτοσυμπκνούμενο σκυρόδεμα. Η μεταφορά του φορτίου από το συνδεδεμένο πλαίσιο στο εν λόγω τοίχωμα επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διατεταγμένων βλήτρων, όπου αγκυρώνονται και οι οπλισμοί εντός του πλαισίου αλλά και οι ράβδοι να ματίζουν ή να συνδέονται ως αγκύρια στα βλήτρα. (Στρεπελιάς, 2012)



(α)

(β)

Σχήμα 4.7: (α) άμεση σύνδεση ράβδων κορμού με περιβάλλον πλαίσιο με μάτιση με ράβδους πακτωμένες στο περιβάλλον πλαίσιο (β) έμμεση σύνδεση ράβδων κορμού με περιβάλλον πλαίσιο με χρήση των βλήτρων ως αγκύρια (Στρεπελιάς, 2012)

Ένα ακόμα μείζον ζήτημα είναι η αντιμετώπιση της συστολής ξήρανσης του νέου σκυροδέματος στην ένωση του νέου με το παλιό στοιχείο, το οποίο παρατηρείται κατά μήκος της ένωσης του τοιχώματος στο ψηλότερο κομμάτι με την δοκό στο κάτω άκρο της.

Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με τους εξής τρόπους:

- Χρήση σκυροδέματος ειδικής σύνθεσης
- Χρήση ειδικών πρόσμικτων που περιορίζουν την συστολή ξήρανσης

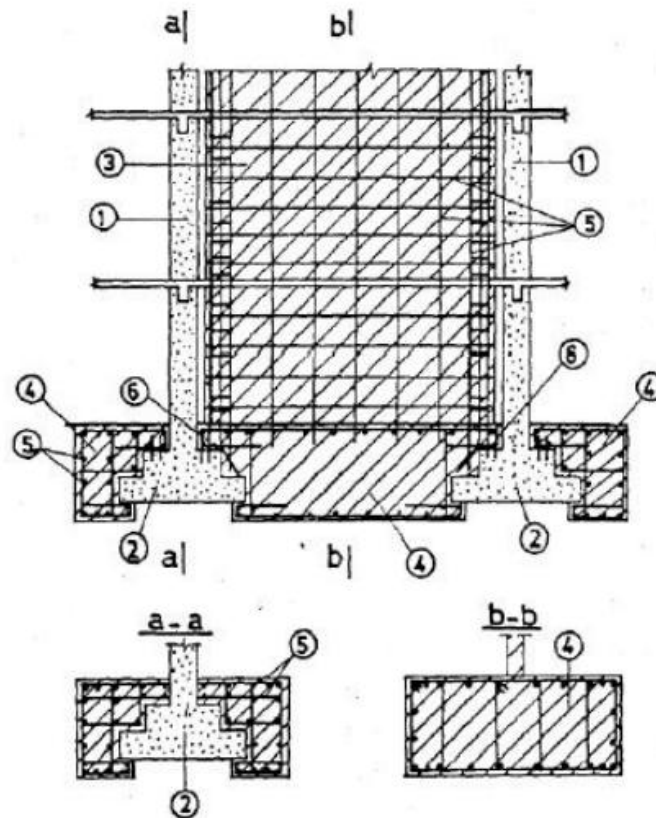
- Σκυροδέτηση του τοιχώματος μέχρι ύψος 20cm περίπου χαμηλότερα από το κάτω άκρο της δοκού, όπου μετά από ένα χ διάστημα (το οποίο αποσαφηνίζεται από τον ειδικό) συμπληρώνεται και το υπόλοιπο μέρος με εποξειδικό ή πολυεστερικό κονίαμα.
- Σκυροδέτηση του τοιχώματος στα 5-7 mm χαμηλότερα από το κάτω άκρο της δοκού και συμπλήρωση αυτού με ρητινοειδή κόλλα με ρητινενέσεις

Πέρα από το είδος των τοιχωμάτων που αναφέρθηκαν ήδη, υπάρχουν και τα προκατασκευασμένα, τα οποία είναι είτε συμπαγή από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε τύπου "σάντουιτς" με εξωτερικούς φλοιούς από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ενισχυμένα μεταλλικά φύλλα, και εσωτερικό γέμισμα από κάποιο υλικό με μονωτικές ιδιότητες. Η χρήση αυτών είναι από τις πιο οικονομικές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, όμως υστερεί σε δυσκαμψία και αντοχή. Στις κατασκευές που χρήζουν να έχουν μια πιο πλάστιμη συμπεριφορά, η σύνδεση τους γίνεται στις δοκούς, ενώ μεταξύ υποστύλωματος και τοιχώματος αφήνεται ένα ανεπαίσθητο κενό. Στη περίπτωση που συνδέονται άμεσα το τοίχωμα με το υποστύλωμα, τότε αυτό αποτελεί το άκρο του τοιχώματος και υπάρχει αυξημένη ένταση. Γι αυτό το γειτονικό υποστύλωμα ενισχύεται με μανδύα, έτσι ώστε να ενσωματωθεί ορθά στο άκρο του τοιχώματος (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Προσθήκη τοιχώματος και ενίσχυση υποστύλωματος (Δρίτσος, 2005)

Η σύνδεση των εμφανιζόμενων τοιχωμάτων με την υπάρχουσα θεμελίωση του κτιρίου είναι ένα ζήτημα το οποίο πρέπει να μελετηθεί ενδελεχώς. Αυτό συμβαίνει καθώς τα νέα τοιχώματα που σχεδιάζονται για να ενισχύσουν το κτίριο μεταφέρουν μεγάλες δυνάμεις και ροπές, ενώ οι αξονικές είναι μικρές, στην θεμελίωση ακόμα και αν αυτή πρόκειται να ενισχυθεί. Η εν λόγω ενίσχυση ανεβάζει αρκετά το κόστος επέμβασης του κτιρίου αν και κρίνεται απαραίτητη για τον λόγο που εξηγήθηκε προωτέρα. (Δρίτσος, 2005)



1. Υφιστάμενα υποστυλώματα, 2. Υφιστάμενα θεμέλια, 3. Νέο τοίχωμα, 4. Νέο οπλισμένο σκυρόδεμα, 5. Πρόσθετοι οπλισμοί, 6. Πρόσθετα στοιχεία για την αγκύρωση των νέων οπλισμών.

Σχήμα 5.13: Θεμελίωση νέου τοιχώματος εντός υφισταμένου πλαισίου. (Δρίτσος, 2005)

5. Εφαρμογές στα κτίρια

Στόχος του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει μέσω της βιβλιογραφίας το πώς εφαρμόζονται στην πράξη κάποιες από τις μεθόδους της πολυκριτήριας που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, θα δούμε ορισμένους ερευνητές πάνω σε ποιες κατηγορίες ασχολήθηκαν, ποιες μεθόδους χρησιμοποίησαν καθώς και τις εναλλακτικές λύσεις που έδωσαν.

5.1. Μελέτη ανακαίνισης κτιρίου

Οι Silva and Almeida (2013) είχαν ως στόχο της μελέτης τους την επιλογή των υλικών και των κατασκευαστικών λύσεων για την ανακαίνιση των τοίχων της πρόσοψης ενός κτιρίου, με βάση τα κριτήρια που είναι υποχρεωτικά. Εν προκειμένω είναι απαραίτητο να επιλεγούν τις κατάλληλες κατασκευαστικές λύσεις λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις τους στην ενεργειακή απόδοση, την θερμομόνωση και την ακουστική μόνωση, την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους και περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κτιρίου. Η ενσωματωμένη ενέργεια, η επιφανειακή μάζα και το πάχος των κατασκευαστικών λύσεων λήφθηκαν επίσης υπόψη καθώς αποτελούν μέλημα του σχεδιαστή, επηρεάζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τη θερμική αδράνεια και την ωφέλιμη επιφάνεια του κτιρίου.

Σε αυτή την εργασία εφαρμόζεται μια μέθοδος ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων MCDA ELECTRE III για την εξισορρόπηση όλων αυτών πτυχών σε ένα έργο ανακαίνισης, προκειμένου να βοηθηθεί η ομάδα σχεδιασμού στην επιλογή του κατασκευαστικές λύσεις.

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, η μέθοδος ELECTRE III εφαρμόστηκε στην αξιολόγηση πολλών εναλλακτικών λύσεων για τους τοίχους της πρόσοψης με βάση πέντε κριτήρια:

1. θερμομόνωση
2. ακουστική μόνωση
3. ενσωματωμένη ενέργεια
4. επιφανειακή μάζα
5. επιφανειακό πάχος

Ο Πίνακας 5.1 παραθέτει τα κύρια χαρακτηριστικά του κελύφους του κτιρίου.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά του κτιρίου.

Building element	Construction solution	U-value [W/m ² °C]
Structure	Concrete pillars and beams	-
Floors	Concrete	-

Roof	Pitched roof	2.35
Ceiling	Beam and pot slab	3.08
Facade walls	Single pane hollow concrete block	1.90
Roller shutter boxes	Concrete	2.85
Windows (window to wall ratio of 20%)	Single clear glass and aluminum frame	5.14
Partition walls	Hollow brick	-

Τα βήματα της διαδικασίας της ανακαίνισης που έγιναν είναι τα εξής:

- αντικατάσταση των υαρχόντων κουφωμάτων και ρολά από παράθυρα με διπλό τζάμι με σκελετό αλουμινίου με θερμοδιακοπή και μονωμένα ρολά
- Τοποθέτηση 20εκ ορυκτοβάμβακας στην οροφή για τη βελτίωση της θερμικής του απόδοσης
- Χρήση σύνθετων συστημάτων εξωτερικής θερμομόνωσης, ETICS, αεριζόμενος τοίχος, μόνωση και γυψοσανίδες ή κούφια τούβλα λαμβάνοντας υπόψη τρία μονωτικά υλικά (EPS, XPS και MW)

Οι εναλλακτικές για τον τοίχο πρόσοψης είναι οι εξής:

1. O: Κοίλος τσιμεντόλιθος (20 cm)
2. R1: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm) και σύστημα ETICS με 6 cm EPS
3. R2: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm) και σύστημα ETICS με 8 cm EPS
4. R3: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm) και αεριζόμενος τοίχος με πέτρα (1 cm) και 6 cm XPS
5. R4: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm) και αεριζόμενος τοίχος με πέτρα (1 cm) και 8 cm XPS
6. R5: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm), MW (6 cm) και γυψοσανίδα (1,3 cm)
7. R6: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm), MW (8 cm) και γυψοσανίδα (1,3 cm)
8. R7: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm), MW (6 cm) και κοίλο τούβλο (11 cm)
9. R8: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm), MW (8 cm) και κοίλο τούβλο (11 cm)
10. R9: Κοίλος τοίχος από τσιμεντόλιθο (20 cm), διάκενο αέρα (2 cm), MW (6 cm) και κοίλο τούβλο (11 cm)

Ο Πίνακας 5.2 παραθέτει τα αποτελέσματα της πρόβλεψης της συμπεριφοράς των τοίχων της πρόσοψης σύμφωνα με τα πέντε κριτήρια που επιλέχθηκαν για να ξεπεράσουν τις εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.

Πίνακας 5.2: Κριτήρια για τις διαφορετικές σχεδιαστικές εναλλακτικές που μελετήθηκαν για την πρόσοψη.

Options	U-Value [W/(m ² °C)]	D _{2m,Nt,w} [dB]	EE [Mj/m ²]	Msi [kg/m ²]	Thickness [cm]
O	2.64	30	0	150	24.0
R1	0.81	33	190	150	32.0
R2	0.74	33	231	150	34.0
R3	0.84	35	1715	150	37.0
R4	0.77	36	1770	150	39.0
R5	0.98	35	195	15	32.3
R6	0.90	36	237	15	34.3
R7	0.77	37	232	140	43.0
R8	0.70	38	275	140	45.0
R9	0.75	39	276	140	45.0

Ο πίνακας βαθμών αξιοπιστίας και τα αποτελέσματα της υψηλότερης κατάταξης με τη μέθοδο ELECTRE III παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 3.3: Πίνακας βαθμών αξιοπιστίας για τις εναλλακτικές λύσεις που επιλέχθηκαν για τους τοίχους της πρόσοψης

Options	O	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	Non-A	Dom m (A)	Racking Options
O	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	O	0.23	R7
R1	0.77	-	1.00	1.00	0.92	1.00	0.92	0.83	0.74	0.75	R1	0.88	R8
R2	0.74	1.00	-	1.00	0.92	1.00	0.92	0.83	0.75	0.75	R2	0.82	R9
R3	0.00	0.00	0.00	-	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	R3	0.00	R1
R4	0.00	0.00	0.00	0.98	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	R4	0.01	R2
R5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	1.00	0.00	0.00	0.00	R5	0.00	O
R6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	-	0.00	0.00	0.00	R6	0.05	R6
R7	0.70	0.93	0.95	0.97	0.99	0.94	0.95	-	1.00	1.00	R7	1.00	R4
R8	0.70	0.86	0.93	0.96	0.97	0.87	0.94	1.00	-	1.00	R8	1.00	R5,R3
R9	0.70	0.86	0.93	0.96	0.97	0.87	0.94	0.99	1.00	-	R9	1.00	

Κατά τη διάρκεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, ήταν δυνατό να επαληθευτεί ότι η κατασκευή ενός δεύτερου κοίλου υαλοπίνακα (με μόνωση), με χαμηλότερη τιμή U και ενσωματωμένη ενέργεια και η υψηλότερη ακουστική μόνωση και η επιφανειακή μάζα κατατάχθηκαν ως οι καλύτερες επιλογές αποκατάστασης.

5.2. Πολυκριτηριακή ανάλυση για την επιλογή υλικού προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η εργασία των Čuláková. et al., (2013), εστιάζει στην αξιολόγηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιριακών κατασκευών. Η επιλογή υλικού αντιπροσωπεύει την συστηματική και ολιστική προσέγγιση λήψης αποφάσεων και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση και τη βιωσιμότητα του κτιρίου κατά τη διάρκεια της συνολικής ζωής.

Η περιβαλλοντική ανάλυση αυτής της μελέτης περίπτωσης βασίζεται στην Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA). Το LCA είναι πολύ γνωστό εργαλείο για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ευρεία έκταση σε όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Περιλαμβάνει την αξιολόγηση συγκεκριμένων στοιχείων του προϊόντος σύστημα για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων. Ωστόσο, έχει ορισμένους περιορισμούς στον πρακτικό σχεδιασμό κτιρίων λόγω εξαιρετικά απαιτητικών δεδομένων και εντατικής εργασίας. Τα αποτελέσματα των λύσεων υλικών υπολογίζονται με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης απόφασης (MCDA) προκειμένου να αποκτηθεί σαφής εικόνα της επιλογής υλικού. Το MCDA βοηθά στη γεφύρωση πολλών πτυχών της ανάλυσης ταυτόχρονα και προσφέρει τη δυνατότητα στάθμισης των κριτηρίων ως προς το επίπεδο σημαντικότητας του στη συγκεκριμένη ιδέα σχεδιασμού του κτιρίου.

Η περιγραφή των συνθέσεων υλικών για εναλλακτικές δομές του κελύφους κτιρίου είναι η εξής:

- Για το δάπεδο: Συμβατικό δάπεδο 1F, εναλλακτικό δάπεδο 2F, εναλλακτικό δάπεδο 3F, εναλλακτικό δάπεδο 4F.
- Για τον τοίχο: Συμβατικό εξωτερικό τοίχωμα 1W, εναλλακτικός εξωτερικός τοίχος 2W, εναλλακτικός εξωτερικός τοίχος 3W, εναλλακτικός εξωτερικός τοίχος 4W.
- Για την οροφή: Συμβατική οροφή 1R, εναλλακτική οροφή 2R, εναλλακτική οροφή 3R, εναλλακτική οροφή 4R.

Όλα τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας MDCA προκειμένου να ληφθεί ακριβής εικόνα του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία κάθε κριτηρίου. Η διαδικασία στάθμισης βασίζεται στον Saaty η μέθοδος και τα προκύπτοντα βάρη είναι: 21.9 % για την ενσωματωμένη ενέργεια καθώς και για το ενσωματωμένο ισοδύναμο CO₂, 12.0 % για ενσωματωμένο SO₂eq, 5.9 % για το βάρος της επιφάνειας, 30.9 % θερμική αποθήκευση, 3.7 % μετάδοση θερμότητας και επιφάνεια θερμοκρασία

Τα αποτελέσματα υπολογίζονται με μαθηματικές μεθόδους WSA, IPA, TOPSIS και CDA. Η καλύτερη προκύπτουσα τιμή της μεθόδου Weighted Sum Approach (WSA) και μέσω της χρήσης της

μεθόδου TOPSIS για την επιλογή της ιδανικής λύσης η οποία επισημαίνεται με τον πλησιέστερο αριθμό έως 1 και για την Ανάλυση Ιδανικών Σημείων (IPA) η βέλτιστη λύση είναι ο πλησιέστερος αριθμός στο 0. Για Συμφωνία Η ανάλυση ασυμφωνίας (CDA) η καλύτερη εναλλακτική είναι αυτή με τον χαμηλότερο αριθμό.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-7 για όλες τις δομές εναλλακτικές λύσεις κελύφους κτιρίου.

Ο Πίνακας 5.4 επισημαίνει ότι η εναλλακτική 4F είναι η καλύτερη λύση

Πίνακας 5.4: Συνολικά αποτελέσματα μεθόδων MDCA για εναλλακτικές λύσεις δαπέδου

Alternative	WSA	TOPSIS	IPA	CDA
1F	0.3090	0.4602	0.6910	3.7983
2F	0.4652	0.4089	0.5348	3.3541
3F	0.4484	0.3945	0.5516	3.0356
4F	0.7862	0.7056	0.2138	1.1848

Ο Πίνακας 5.5 δείχνει ότι η εναλλακτική λύση 4W είναι η καταλληλότερη

Πίνακας 5.5: Συνολικά αποτελέσματα μεθόδων MDCA για εναλλακτικές λύσεις εξωτερικού τοίχου

Alternative	WSA	TOPSIS	IPA	CDA
1W	0.3663	0.3489	0.6337	3.4449
2W	0.3585	0.3978	0.6415	4.2400
3W	0.3809	0.3381	0.6191	3.1455
4W	0.9368	0.9354	0.0632	0.5201

Ο Πίνακας 5.6 δείχνει ότι η λύση 4R είναι η καταλληλότερη.

Πίνακας 5.6: Συνολικά αποτελέσματα μεθόδων MDCA για εναλλακτικές λύσεις για στέγες

Alternative	WSA	TOPSIS	IPA	CDA
1R	0.3090	0.7059	0.6910	3.7983
2R	0.4650	0.4087	0.5350	3.3541
3R	0.4495	0.3946	0.5505	3.0356
4R	0.7874	0.7059	0.2126	1.1848

5.3. Αξιολόγηση της βιωσιμότητας των εναλλακτικών διαρθρωτικών λύσεων ενός κτιρίου.

Αντικείμενο της μελέτης των Vilutiene. et al., (2020) είναι ένα εμπορικό κτίριο. Οι αποστάσεις μεταξύ των αξόνων του νέου κτιρίου είναι 16.28 m. Το ύψος του υφιστάμενου κτιρίου είναι 9.5 m

και το ύψος του νέου κτιρίου είναι 15.5 m. Η διάταξη των φέρων κατασκευών του νέου κτιρίου περιορίζεται από τη διάταξη των φέρουσων κατασκευές του υφιστάμενου κτιρίου. Νέες φέρουσες κατασκευές επιτρέπεται να εγκατασταθούν μόνο σε διασταύρωση των υφιστάμενων αξόνων κτιρίου στάθμευσης αυτοκινήτων.

Εναλλακτικές δομικές λύσεις:

- Εναλλακτική A1. Σκελετός οικοδομής από οπλισμένο σκυρόδεμα, προκατασκευασμένα μεταλλικά στοιχεία.
- Εναλλακτική A2. Προκατασκευασμένα φέροντα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Εναλλακτικό A3. Σκελετός κτιρίου από μονολιθικό οπλισμένο σκυρόδεμα.

Σε αυτή τη μελέτη γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Το συνολικό βάρος του υπό κατασκευή κτιρίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το υπολογιζόμενο επιτρεπόμενο βάρος, καθώς αυτό θα κατασκευαστεί σε υφιστάμενο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων.
- Το κτίριο πρέπει να πληροί τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις που τίθενται για τα πολιτιστικά κτίρια.
- Η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιείται μόνο για το στάδιο της παραγωγής.

Τα κριτήρια βιωσιμότητας που χρησιμοποιούνται σε αυτή την έρευνα περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

- Περιβαλλοντικά
- Οικονομικά
- Τεχνολογικά
- Φυσικά κριτήρια

Στον πίνακα 5.7 παρατίθενται το σύνολο των κριτηρίων αξιολόγησης της βιωσιμότητας των εναλλακτικών δομικών λύσεων της μελέτης που ασχολούνται οι Vilutiene. et al., (2020).

Πίνακας 5.7: Σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης βιωσιμότητας εναλλακτικών δομικών λύσεων της μελέτης περίπτωσης.

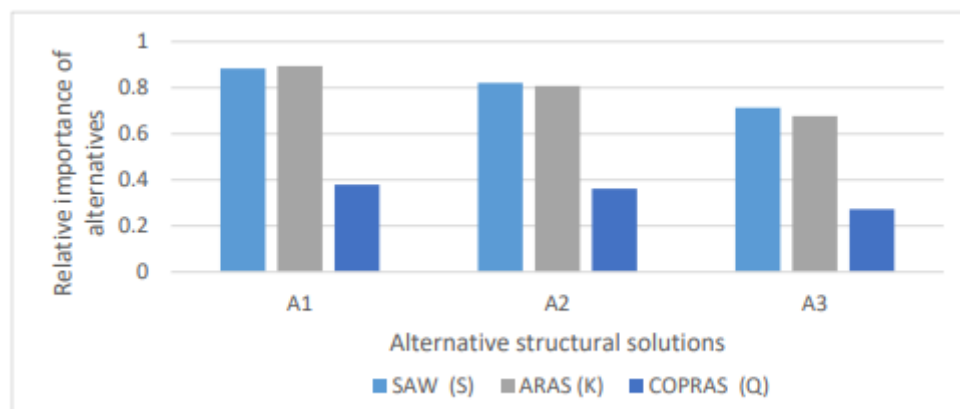
Criteria		Measuring Units
Physical criteria		
R1	Total area of indoor spaces	m ²
R2	Weight of structures	T
R3	Maximum load on columns in the peak load area	kN

Economic criteria		
R4	Costs of works	Euro
R5	Costs of materials	Euro
Technological criteria		
R6	The amount of work performed by the average worker in one hour	Person-hours
R7	The amount of work performed by the machines and equipment	Machine-hours
Environmental criteria		
R8	Energy consumption for production of materials	MJ
R9	Global warming potential (GPW)	Kg CO ₂ eq/unit
R10	Greenhouse gas emissions (CFC-11)	Kg CFC-11eq

Στη μελέτη περίπτωσης εφαρμόζονται οι μέθοδοι SAW, ARAS και COPRAS της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μέθοδοι SAW και ARAS δίνουν παρόμοιες τιμές για τους βαθμούς χρησιμότητας του συναρτήσεως βελτιστοποίησης για τις εναλλακτικές A1 και A2 (Πίνακας 9). Στην πρώτη περίπτωση, η απόσταση του Το A2 από το A1 είναι περίπου 7%. Στην περίπτωση της μεθόδου ARAS, τα αποτελέσματα για τα A3 και A1 είναι περίπου 16%. Σύμφωνα με τη μέθοδο COPRAS, τα αποτελέσματα για τα A3 και A1 διαφέρουν κατά ένα τέταρτο και αυτή η διαφορά μπορεί να θεωρηθεί ως σημαντική.

Στον σχήμα 5.1 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων πολυκριτηριακής ανάλυσης.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων πολυκριτηριακής ανάλυσης (Vilutiene et al. (2020))

Η τρίτη εναλλακτική είναι η βέλτιστη επιλογή σχετικά με το κριτήριο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά η δυσμενέστερη σχετικά με το κόστος και τον χρόνο της κατασκευής συγκριτικά με τις άλλες δύο επιλογές. Γι' αυτό τον λόγο απαιτείται επιπρόσθετος έλεγχος με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη λύση και για τα τρία κριτήρια μαζί.

6. Μελέτη Περίπτωσης

6.1. Γενικά Στοιχεία

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός τριών εναλλακτικών για το κτίριο, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο ενίσχυσης τους. Μέσω της πολυκριτήριας ανάλυσης και των κριτηρίων που θα παρατεθούν σε επόμενες υποενότητες του συγκεκριμένου κεφαλαίου, θα παρθεί η απόφαση για το πια εναλλακτική ενίσχυσης είναι η καλύτερη επιλογή. Το εν λόγω κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Αττικής, στο οποίο κατασκευάστηκε το ισόγειο το 1968 ενώ ο Α΄ όροφος και ο Β΄ όροφος το 1973. Ο πρώτος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου έχει γίνει με τη χρήση FRP, ο δεύτερος τρόπος είναι η χρήση μανδύων και τέλος ο τρίτος τρόπος ενίσχυσης είναι με μανδύες και τοιχώματα. Η διάσταση του κτιρίου είναι 14 m x 8.65 m. Το κτίριο αναπτύσσεται σε τρία επίπεδα, το ισόγειο και δύο ορόφους με συνολικό ύψος κτιρίου 11.2 m (το ισόγειο έχει ύψος 4.8 m ενώ ο κάθε όροφος έχει μικτό ύψος 3.2 m). Τέλος η θεμελίωση του κτιρίου είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Παραδοχές Προσομοίωσης – Υλικά

Για την ενίσχυση του κτιρίου στον φέροντα οργανισμό χρησιμοποιήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβας οπλισμού B500C .

Φορτία

Και οι τρεις εναλλακτικές ενίσχυσης του διατηρητέου κτιρίου έχουν κοινά φορτία τα οποία παρατίθενται ευθύς αμέσως:

- Φορτία επικάλυψης = 1.5 kN/m^2
- Κινητά φορτία = 2.0 kN/m^2
- Εξωστών = 5.0 kN/m^2
- Φορτίο εξωτερικής τοιχοποιίας = 3.6 kN/m^2
- Φορτίο εσωτερικής τοιχοποιίας έχει ομοιόμορφη κατανομή στις πλάκες

Φάσμα σχεδιασμού

Για της εναλλακτικές ενίσχυσης επιλέχθηκε στο στατικό πρόγραμμα Seisbuild να διερευνηθούν με βάση τον EC8 – Αντισεισμικός Κανονισμός Σεισμική Δράση και τις παρακάτω διατάξεις σχεδιασμού:

- Σεισμική ζώνη: I

- Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση: 0.24g
- Σπουδαιότητας κτιρίου: II

Παράμετροι Φάσματος

- Φάσμα: Φάσμα σχεδιασμού
- Τύπος εδάφους: II
- Συντελεστής απόσβεσης: 5%

6.2. Ενίσχυση κτιρίου με το πρόγραμμα SeismoBuild

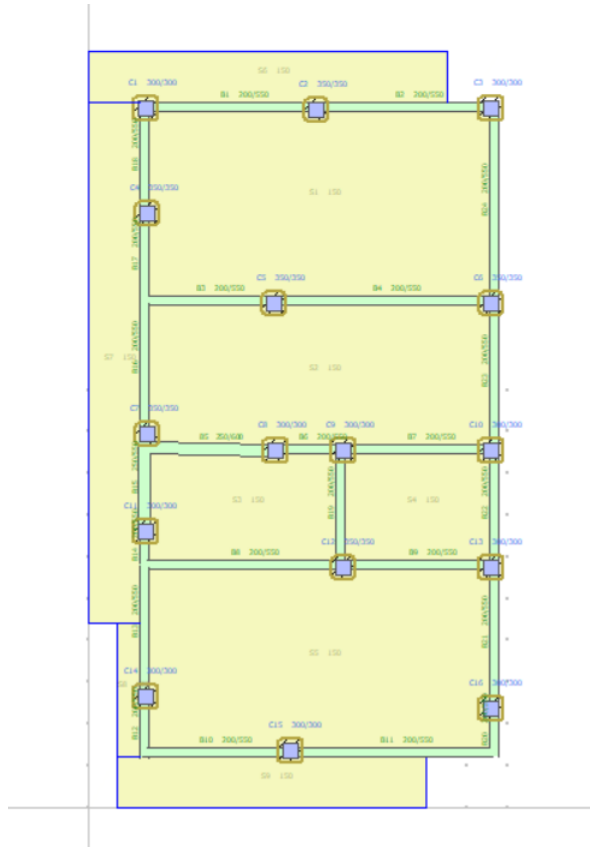
Η επίλυση και των τριών εναλλακτικών ενίσχυσης του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SeismoBuild. Το λογισμικό SeismoBuild είναι καινοτόμο καθώς παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση για σεισμική ανάλυση και σχεδιασμό οπλισμένου σκυροδέματος. Εφαρμόζει πλήρως τις μεθόδους σεισμικού σχεδιασμού που καθορίζονται από τους κανονισμούς όπως του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του Ευρωκώδικα. Το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν τόσο γραμμική όσο και μη γραμμική ανάλυση αλλά επίσης γραμμική ελαστική και ανελαστική στατική μέθοδο ανάλυσης. Η λελογισμένη και φιλική προς τον χρήστη διεπαφή του λογισμικού καθώς και η απλότητά του, είναι αποτέλεσμα του ότι είναι ένα λογισμικό σχεδιασμένο ειδικά για σεισμική αποτίμηση και σχεδιασμό ενίσχυσης κτιρίων, το οποίο παρέχει μια ολοκληρωμένη μαθησιακή εμπειρία σε μηχανικούς που δεν είναι εξοικειωμένοι με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το απλοϊκό γραφικό περιβάλλον βοηθά στο να παραχθούν ευκολότερα και γρηγορότερα μοντέλα αποτίμησης πολυώροφων κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος μέσα σε λίγα λεπτά συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας της τεχνικής έκθεσης και των σχεδίων CAD.

6.2.1. 1ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση FRP

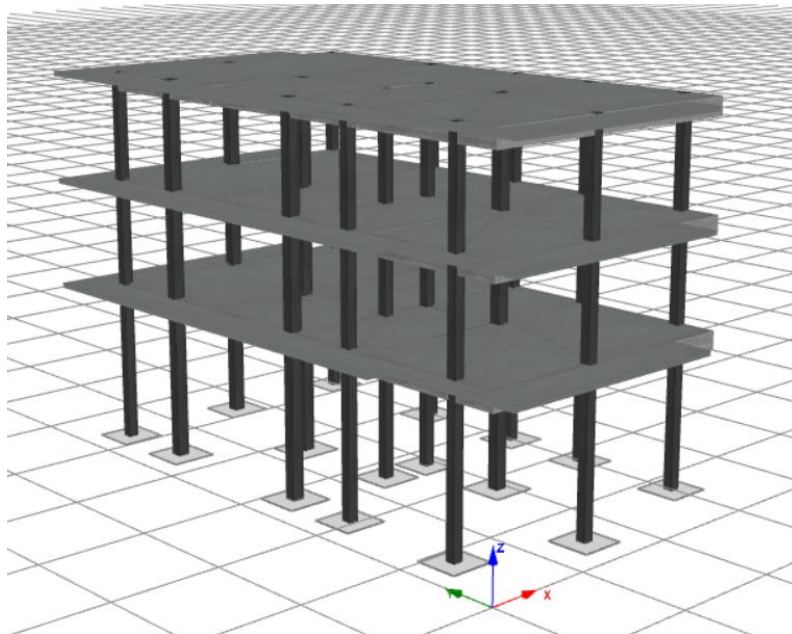
Οι εξωτερικές επικολήσεις ελασμάτων FRP σε δομικά στοιχεία κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχουν αναδειχθεί ως μια διαδεδομένη πρακτική στην ενίσχυση ή επισκευή υφιστάμενων κατασκευών. Για την συγκεκριμένη μέθοδο ενίσχυσης έγινε εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο 4.1.

Στο εν λόγω κτίριο το οποίο μελετάται στη μελέτη περίπτωσης έγινε χρήση FRP της εταιρείας MAPEI και συγκεκριμένα το μοντέλο MapeWrapCUNI-AX 300 από 1 μέχρι 2 στρώσεις ανάλογα την ενίσχυση που χρειαζόταν κάθε υποστύλωμα ή δοκός αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζονται η κάτοψη τυπικού ορόφου αλλά και η τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου μετά την ενίσχυση του με την χρήση των ινοπλισμένων ελασμάτων.



Σχήμα 6.1: Κάτοψη τυπικού ορόφου μετά την ενίσχυση με FRPs.

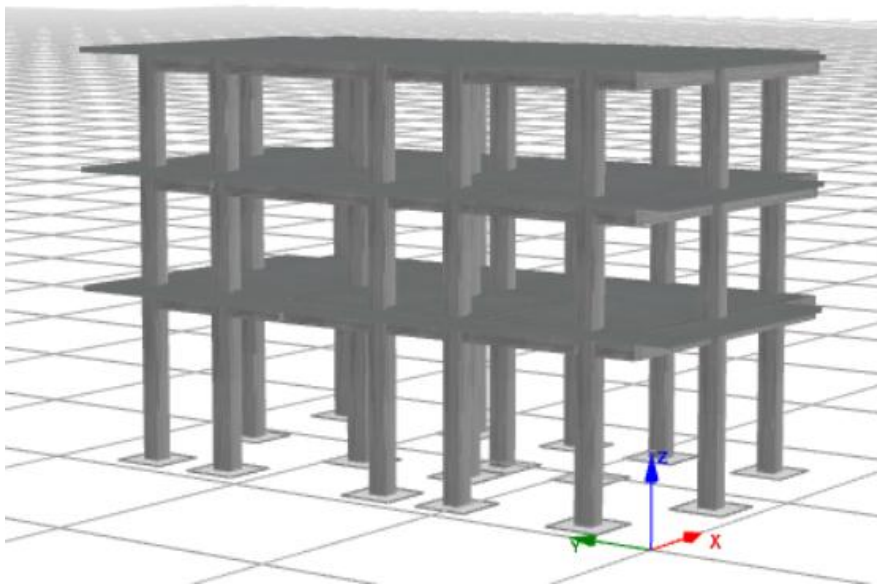


Σχήμα 6.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενίσχυσης κτιρίου με την χρήση FRPs.

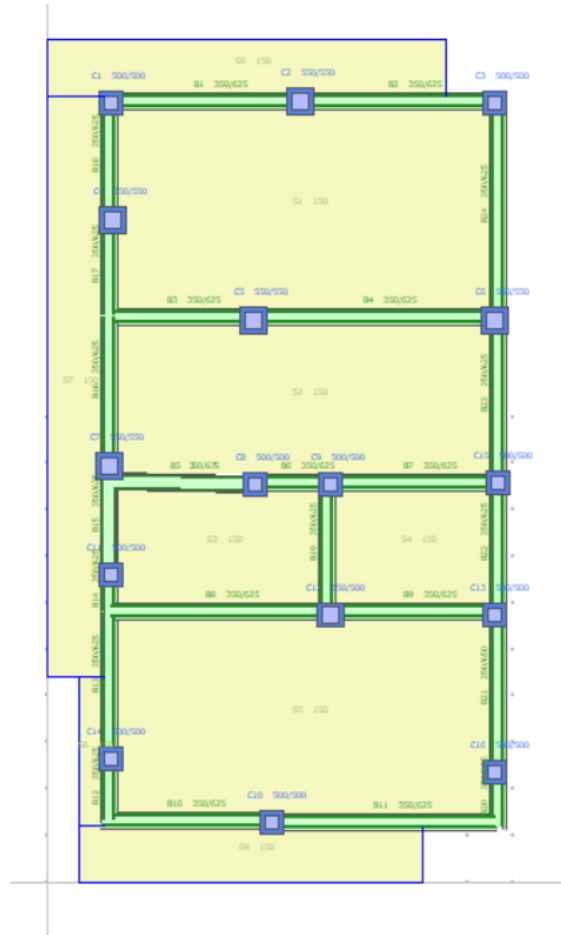
6.2.1. 2ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση Μανδρών

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 οι μανδύες είναι βοηθητικό μέσο για την ενίσχυση υποστυλωμάτων αλλά και των δοκών, καθώς βοηθούν στο να βελτιωθεί η αντοχή, η δυσκαμψία και η πλαστιμότητα των μελών. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με αύξηση της διατομής του υποστυλώματος με νέες στρώσεις σκυροδέματος και νέους οπλισμούς (νέους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς περιμετρικά), κατασκευάζοντας ένα μανδύα γύρω από το αρχικό στοιχείο.

Στα σχήματα 6.3 και 6.4 παρουσιάζεται η κάτοψη τυπικού ορόφου αλλά και η τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου αντίστοιχα μετά την ενίσχυση του με την χρήση μανδρών.



Σχήμα 6.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενίσχυσης κτιρίου με την χρήση μανδρών.

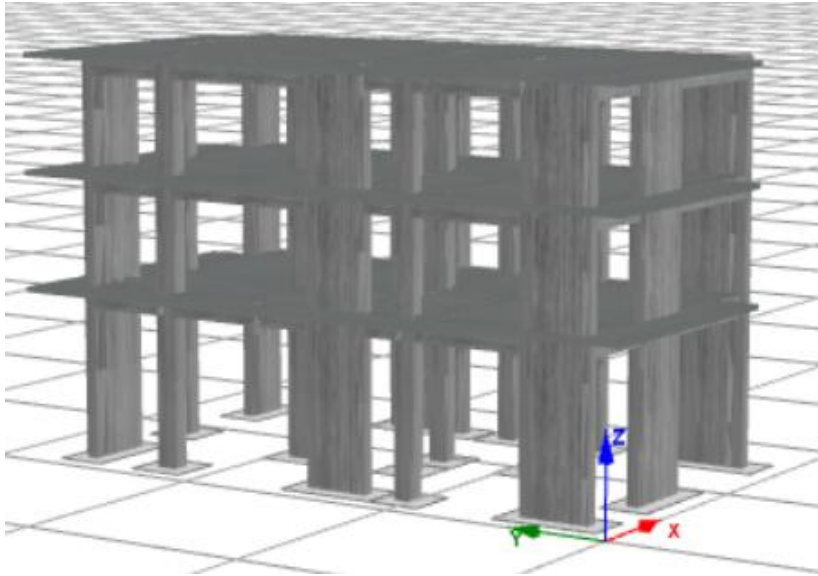


Σχήμα 6.4: Κάτοψη τυπικού ορόφου μετά την ενίσχυση με μανδύες.

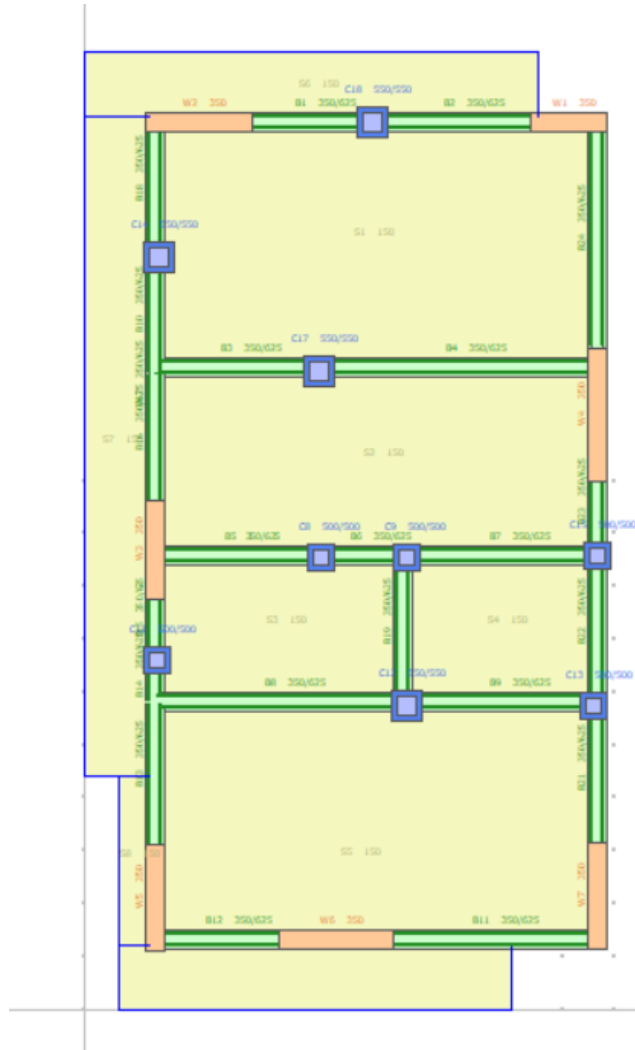
6.2.2. 3ος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση Μανδυών και Τοιχωμάτων.

Στον τρίτο τρόπο επιλέχτηκε να γίνει συνδυασμός δύο ήδη πετυχημένων μεθόδων ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν αυτούσιοι. Η χρήση τοιχωμάτων ως τρόπος ενίσχυσης ενός κτιρίου είναι από τους αποτελεσματικότερους, οπότε ο συνδυασμός του μαζί με μία άλλη εξίσου πετυχημένη μέθοδο ενίσχυσης, θα επιφέρει εκπληκτικά αποτελέσματα.

Όπως επίσης και στις δύο άλλες εναλλακτικές παρουσιάζονται η κάτοψη τυπικού ορόφου αλλά και η τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου μετά την ενίσχυση του με την χρήση μανδυών και τοιχωμάτων στο κτίριο.



Σχήμα 6.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση ενίσχυσης κτιρίου με την χρήση μανδύων και τοιχωμάτων



Σχήμα 6.6: Κάτοψη τυπικού ορόφου μετά την ενίσχυση με μανδύες και τοιχώματα.

6.3. Καθορισμός κριτηρίων για την αξιολόγηση των κατασκευών

Βασιζόμενοι στην βιβλιογραφία και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για να αξιολογηθεί ποιος τρόπος ενίσχυσης του κτιρίου είναι ο καταλληλότερος στο να επιλεγεί σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν αποδοθεί τα οποία έχουν οικονομικό, χρονικό, τεχνικό και περιβαλλοντικό χαρακτήρα κατά βάση, όπου εν συνεχεία θα γίνει αναλυτική αναφορά των κριτηρίων αυτών.

6.3.1. Στατικά Κριτήρια με τη μέθοδο Pushover

6.3.1.1. Τέμνουσα Βάσης

Γενικά η τέμνουσα βάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_b = m \lambda S_d(T_1, \zeta)$$

Όπου: $S_d(T_1, \zeta)$ = φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού για τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο

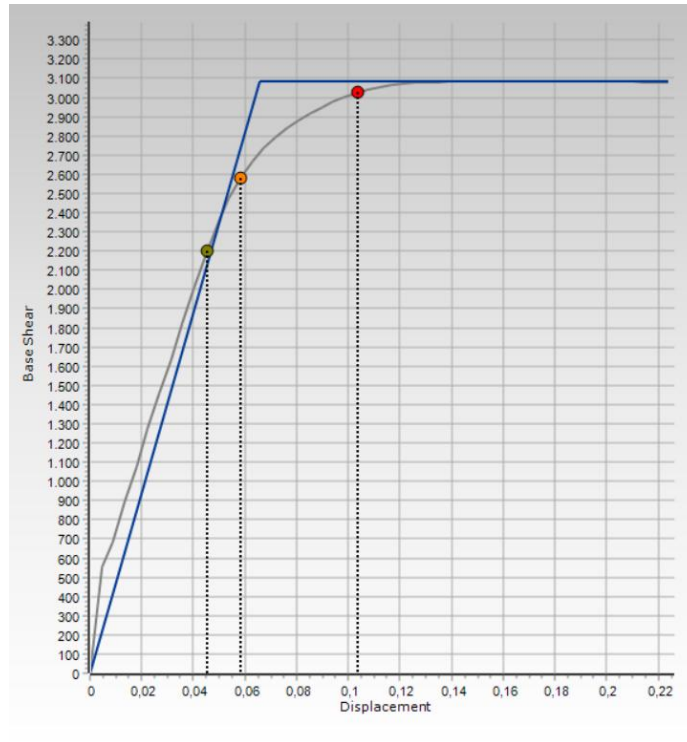
m = συνολική μάζα του κτιρίου από τη στάθμη θεμελίωσης ή την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου

$\lambda = 0.85$ εάν $T_1 \leq 2 \cdot T_C$ και το κτίριο έχει περισσότερους από δύο ορόφους 1.00 σε κάθε άλλη περίπτωση.

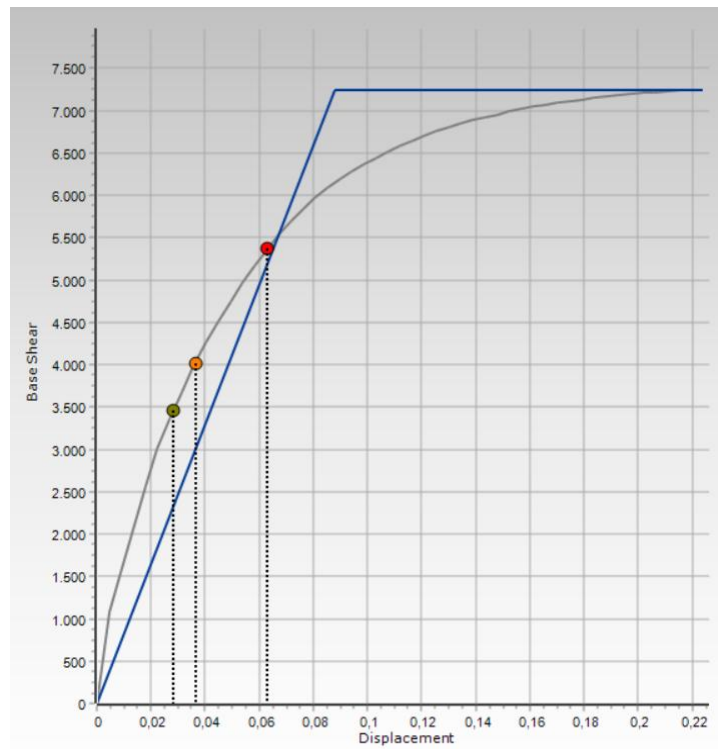
Ο συντελεστής λ χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη ότι η δρώσα ιδιομορφική μάζα της θεμελιώδους ιδιομορφής είναι μικρότερη κατά 15%, κατά μέσο όρο, από τη συνολική μάζα για κτίρια με τουλάχιστον τρεις ορόφους.

Μέσα από το στατικό πρόγραμμα Seisbuild εφόσον πραγματοποιήθηκε μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover) είναι εφικτό μέσω των διαγραμμάτων και τις καμπύλες ικανότητας που προκύπτουν για κάθε μια εναλλακτική ενίσχυσης που εφαρμόστηκε στο διατηρητέο κτίριο της μελέτης περίπτωσης για στάθμη επιτελεστικότητας (B) «Σημαντικές Βλάβες», να αποδοθεί μέσω αυτών η στοχευόμενη μετακίνηση και η αντίστοιχη τέμνουσα βάσης.

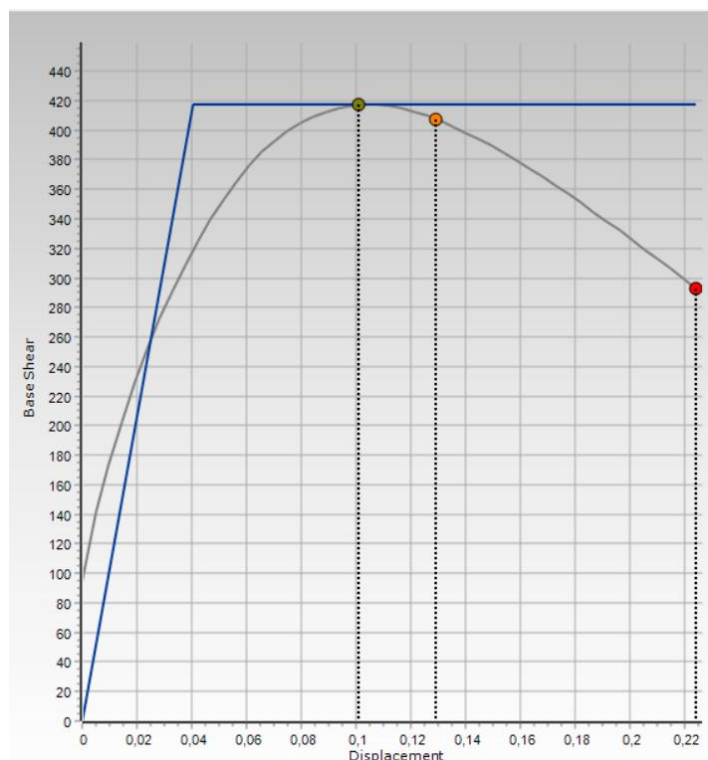
Πιο συγκεκριμένα στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει ενδιαφέρον η τέμνουσα βάσης κάθε εναλλακτικής, οι οποίες απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα για κάθε μία μονομερώς.



Σχήμα 6.7: Καμπύλη ικανότητας κτιρίου μετά την ενίσχυση με μανδύες.



Σχήμα 6.8: Καμπύλη ικανότητας κτιρίου μετά την ενίσχυση με μανδύες και τοιχώματα.



Σχήμα 6.9: Καμπύλη ικανότητας κτιρίου μετά την ενίσχυση μεFRPs.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα τέμνουσας βάσης για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης

A/A	Εναλλακτική Ενίσχυσης	Τέμνουσα Βάσης (kN)
1	Μανδύες	2.578,45
2	Μανδύες και τοιχώματα	4.419,57
3	FRPs	417,75

6.3.2. Χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης κτιρίου

Σε αυτή την υπό ενότητα θα αναλυθούν βήμα-βήμα οι εργασίες φάσεων ενίσχυσης των τριών τρόπων για το υφιστάμενο κτίριο. Κάθε ένας από τους τρόπους ενίσχυσης που θα παρατεθούν ευθύς αμέσως, πρόκειται να γίνουν από ειδικά εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο έχει χρόνια εμπειρία στην εκάστοτε ενίσχυση με την οποία θα ασχοληθεί.

Για το συγκεκριμένο έργο για κάθε μια εναλλακτική ενίσχυσης θα παρατεθεί μια λίστα εργασιών όπου πρέπει να διεκπεραιωθεί, στην οποία θα φαίνονται οι εργασίες, η χρονική διάρκεια και οι προαπαιτούμενες.

Πιο συγκεκριμένα θα γίνει αναφορά στις εξής κατηγοριοποιημένες εργασίες:

- Αρχικές εργασίες
- Εργασίες σκυροδέτησης/τοποθέτησης FRPs
- Οικοδομικές εργασίες
- Εργασίες αποπεράτωσης

Όμως επειδή οι τρεις εναλλακτικές ενίσχυσης του κτιρίου διαφοροποιούνται στις εργασίες μόνο στο κομμάτι της εγκατάστασης της εκάστοτε ενίσχυσης, θα γίνει αναλυτική αναφορά μόνο για την χρονική διάρκεια αυτών και όλες τις υπόλοιπες δηλαδή τις αρχικές εργασίες, τις οικοδομικές εργασίες και τις εργασίες αποπεράτωσης θα καταγραφθεί αθροιστικά ο χρόνος που χρειάζονται. Απλά θα παρατεθεί ευθύς αμέσως τι εργασίες περιλαμβάνει η κάθε μια κατηγορία.

- Αρχικές εργασίες:
 - Οργάνωση εργοταξίου (10 ημέρες)
 - Σήμανση έργου (1 ημέρα)
- Οικοδομικές εργασίες
 - Σοβάδες μέσα, σοβάδες με σκαλωσιά έξω (15 ημέρες)
 - Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας, σενάζ (10 ημέρες)
 - Ηλεκτρολογική εγκατάσταση (9 ημέρες)
 - Υδραυλικές εγκαταστάσεις (9 ημέρες)
- Εργασίες αποπεράτωσης
 - Τοποθέτηση πλακιδίων (5 ημέρες)
 - Τοποθέτηση πριζών (2 ημέρες)
 - Σπατουλάρισμα τοίχων (6 ημέρες)
 - Ελαιοχρωματισμοί τοίχων (8 ημέρες)
 - Τελειώματα (1 ημέρα)

Τέλος μέσω της χρήσης της CPM στο τέλος θα υπολογιστεί η χρονική διάρκεια των εργασιών της εκάστοτε ενίσχυσης. Με λίγα λόγια η μέθοδος CPM είναι η μακρύτερη διαδρομή στο

χρονοδιάγραμμα και ονομάζεται κρίσιμη. Το έργο καθορίζεται με βάση τη διάρκεια της κρίσιμης διαδρομής, υποθέτοντας ότι όλες οι δραστηριότητες παραμένουν εντός χρονικού προγραμματισμού. Βέβαια αυτό είναι αρκετά δύσκολο καθώς λόγω αβεβαιοτήτων και καταστάσεων μπορεί κάποια εργασία να παραταθεί χρονικά. Βασική αρχή της CPM είναι ότι πρέπει να ολοκληρωθεί μια δραστηριότητα πριν από την έναρξη διάδοσης της (Maylor, 2010).

6.3.2.1. Ενίσχυση κτιρίου με Μανδύες

Πίνακας 6.2: Περιγραφή εργασιακών φάσεων ενίσχυσης του κτιρίου με μανδύες.

A/A	Εργασίες	Χρονική Διάρκεια (Ημέρες)	Προαπαιτούμενες Εργασίες
1	Προετοιμασία Εργοταξίου	10	
2	Καθαίρεση υλικών	3	1
3	Καθαρισμός επιφανειών	2	2
4	Τοποθέτηση σιδήρων οπλισμού σε υποστυλώματα	3	3
5	Σκυροδέτηση υποστυλωμάτων	1	4
6	Τοποθέτηση σιδήρων οπλισμού σε δοκούς	4	3
7	Σκυροδέτηση δοκών	3	6
8	Οικοδομικές εργασίες	25	7 FS+12
9	Εργασίες αποπεράτωσης	20	8

Εφαρμόζοντας την μέθοδο CPM προέκυψε πως η διάρκεια της ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση μανδύων είναι ίση με 83 ημέρες.

6.3.2.2. Ενίσχυση κτιρίου με Μανδύες και Τοιχώματα

Πίνακας 6.3: Περιγραφή εργασιακών φάσεων ενίσχυσης του κτιρίου με μανδύες και τοιχώματα.

A/A	Εργασίες	Χρονική Διάρκεια (Ημέρες)	Προαπαιτούμενες Εργασίες
1	Προετοιμασία Εργοταξίου	10	
2	Καθαίρεση υλικών	5	1
3	Καθαρισμός επιφανειών	2	2
4	Καλούπωμα τοιχωμάτων και τοποθέτηση σιδήρων οπλισμού	3	3
5	Σκυροδέτηση τοιχωμάτων	3	4
6	Αφαίρεση ξυλότυπου	1	5
7	Τοποθέτηση σιδήρων οπλισμού σε υποστυλώματα	3	3
8	Σκυροδέτηση υποστυλωμάτων	1	7
9	Τοποθέτηση σιδήρων οπλισμού σε δοκούς	3	3
10	Σκυροδέτηση δοκών	3	9
11	Οικοδομικές εργασίες	25	10 FS+12
12	Εργασίες αποπεράτωσης	20	11

Εφαρμόζοντας την μέθοδο CPM προέκυψε πως η διάρκεια της ενίσχυσης του κτιρίου με τη χρήση μανδύων και τοιχωμάτων είναι ίση με 91 ημέρες.

6.3.2.3. Ενίσχυση κτιρίου με FRPs

Πίνακας 6.4: Περιγραφή εργασιών φάσεων ενίσχυσης του κτιρίου με FRPs.

A/A	Εργασίες	Χρονική Διάρκεια (Ημέρες)	Προαπαιτούμενες
1	Προετοιμασία Εργοταξίου	10	
2	Καθαίρεση υλικών	2	1
3	Καθαρισμός - Επιδιορθώσεις επιφανειών	2	2
4	Τοποθέτηση FRPs και ρητίνης	15	3
5	Οικοδομικές εργασίες	25	4
6	Εργασίες αποπεράτωσης	20	5

Εφαρμόζοντας την μέθοδο CPM προέκυψε πως η διάρκεια της ενίσχυσης του με τη χρήση FRPs είναι ίση με 74 ημέρες.

Εν κατακλείδι καταγράφεται ένας πίνακας ο οποίος παρουσιάζει συνολικά τον χρόνο που χρειάζεται η εναλλακτική για να ολοκληρωθεί.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα χρονικής αποκατάστασης και ενίσχυσης για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης

A/A	Εναλλακτική	Συνολικός Χρόνος (Ημέρες)
1	Με μανδύες	83
2	Με μανδύες και Τοιχώματα	91
3	Με FRPs	74

6.3.3. Κόστος κατασκευής

Σε αυτή την υποενότητα θα αποδοθεί στο κόστος των τριών εναλλακτικών ενίσχυσης του υφιστάμενου κτιρίου. Και οι τρεις ενισχύσεις έχουν κοινά κόστη καθώς όπως φαίνεται και στην υποενότητα 6.3.2, έχουν κοινές εργασίες οι οποίες θα καταγραφθούν ευθύς αμέσως και εν συνεχεία θα αναφερθούν μονομερώς τα κόστη της κάθε μίας ενίσχυσης. Πιο αναλυτικά τα κοινά κόστη υπολογίζονται ανα κατηγορία εργασιών ως εξής:

- Αρχικές εργασίες:
 - Οργάνωση εργοταξίου (σκαλωσιά, κάδος κλπ)
- Οικοδομικές εργασίες
 - Σοβάδες μέσα, σοβάδες με σκαλωσιά έξω (30.118,68 €/m²)
 - Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας, σενάζ (27.687,87 €/m²)
 - Ηλεκτρολογικές και Υδραυλικές εγκαταστάσεις (10.000 €)
- Εργασίες αποπεράτωσης
 - Τοποθέτηση πλακιδίων (3.810,24 €/m²)
 - Σπατουλάρισμα τοίχων (10.039,56 €/m²)
 - Ελαιοχρωματισμοί τοίχων (18.405,86 €/m²)

Πίνακας 6.6: Κοστολόγηση κοινών εργασιών

A/A	Εργασίες	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα	Τιμή μονάδος	Κόστος (€)
1	Σοβάδες μέσα, σοβάδες με σκαλωσιά έξω	m ²	1.673,26	18 €/m ²	30.118,68
2	Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας, σενάζ	m ²	572,3	48,38 €/m ²	27.687,87
3	Ηλεκτρολογικές και Υδραυλικές εγκαταστάσεις	TEM	1	-	10.000
4	Τοποθέτηση πλακιδίων	m ²	211,68	18 €/m ²	3.810,24
5	Σπατουλάρισμα τοίχων	m ²	1.673,26	6 €/m ²	10.039,56
6	Ελαιοχρωματισμοί τοίχων	m ²	1.673,26	11 €/m ²	18.405,86

Αναλυτικά, για την κάθε μία εναλλακτική ενίσχυσης του κτιρίου με μανδύες ή μανδύες και τοιχώματα θα υπολογιστεί για το συνολικό κόστος τους, το κόστος του σκυροδέματος, του οπλισμού που απαιτήθηκε για την ενίσχυση της κατασκευής και για την ενίσχυση με τα τοιχώματα υπολογίζεται επιπλέον το κόστος του ξυλότυπου, ενώ στην περίπτωση της ενίσχυσης με FRPs το κόστος του υλικού και της. Οι τιμές των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δεν είναι οι απόλυτες αλλά οι χαρακτηριστικές σύμφωνα με διερεύνηση που έγινε από την αγορά.

Πίνακας 6.7: Κοστολόγηση ενίσχυσης του κτιρίου με μανδύες

Κοστολόγηση Ενίσχυσης Κτιρίου με Μανδύες					
A/A	Εργασίες	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα	Τιμή μονάδος	Κόστος (€)
1	Οργάνωση εργοταξίου	Μήνας	1		1.451,66
2	Καθαίρεση στοιχείων κατασκευών	m ³	108,12	56 €/m ³	6.054,72
3	Σκυρόδεμα C25/30	m ³	115,09	145,00 €/m ³ *	16.687,41
4	Χάλυβας οπλισμού	kg	16.906,78	1,04 €/kg *	17.583,05
5	Οικοδομικές εργασίες				67.806,55
6	Εργασίες αποπεράτωσης	m ²			32.255,66
Συνολικό κόστος Ενίσχυσης					141.839,05

Πίνακας 6.8: Κοστολόγηση ενίσχυσης του κτιρίου με μανδύες και τοιχώματα

Κοστολόγηση Ενίσχυσης Κτιρίου με Μανδύες και Τοιχώματα					
A/A	Εργασίες	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα	Τιμή μονάδος	Κόστος (€)
1	Οργάνωση εργοταξίου	Μήνας	1		1.451,66
2	Καθαίρεση στοιχείων	m ³	149.92	56 €/m ³	8.395,52

	κατασκευών				
3	Σκυρόδεμα C25/30	m ³	140,89	145,00 €/m ³ *	20.429,76
4	Χάλυβας οπλισμού	kg	52.444,4	1,04 €/kg *	54.542,18
5	Ξυλότυπος	m ²	154,56	13,0 €/m ² *	2.009,28
6	Οικοδομικές εργασίες				67.806,55
7	Εργασίες αποπεράτωσης	m ²			32.255,66
Συνολικό κόστος Ενίσχυσης					186.890,61

Πίνακας 6.9: Κοστολόγηση ενίσχυσης του κτιρίου με FRPs

Κοστολόγηση Ενίσχυσης Κτιρίου με FRPs					
A/A	Εργασίες	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα	Τιμή μονάδος	Κόστος (€)
1	Οργάνωση εργοταξίου	Μήνας	1		1.451,66
2	Καθαίρεση στοιχείων κατασκευών	m ³	42,00	56 €/m ³	2.352,00
3	FRPs 300	m ²	3.271,90	10,36€/m ² *	33.896,88
4	Ρητίνη	kg	1.451,64	14,53€/kg *	21.092,33
5	Οικοδομικές εργασίες				67.806,55
6	Εργασίες αποπεράτωσης	m ²			32.255,66
Συνολικό κόστος Ενίσχυσης					158.855,05

* Στην τιμή μονάδος του σκυροδέματος εμπεριέχεται το υλικό, η αντλία και τα εργατικά, ενώ στην τιμή μονάδος του χάλυβα οπλισμού, του ξυλότυπου, του FRP και της ρητίνης συμπεριλαμβάνονται το υλικό και τα εργατικά έξοδα.

Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα κοστολόγησης για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης.

A/A	Ενίσχυση	Συνολικό Κόστος (€)
1	Με μανδύες	141.839,05
2	Με μανδύες και Τοιχώματα	186.890,61
3	Με FRPs	158.855,05

6.3.4. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα

Η συσσώρευση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα αυξάνεται συνεχώς μέχρι και σήμερα, έτσι εντείνονται και οι προσπάθειες της διεθνούς κοινότητας για το περιορισμό των εκπομπών του που οφείλονται στη καύση των ορυκτών καυσίμων. Ήδη ακραία κλιματικά φαινόμενα σε διάφορα μέρη του πλανήτη προκαλούν σημαντικές καταστροφές και αυξάνονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση όπως και αλλού οι φωνές που καλούν σε διαμόρφωση νέων πολιτικών για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών.

Υπολογίζεται ότι τα κτίρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταναλώνουν σήμερα περίπου το 40% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας σε αυτή και είναι υπεύθυνα για την έκλυση σημαντικών ποσοτήτων CO₂ στην ατμόσφαιρα, το 25 με 30% αφορά τις ανάγκες ενέργειας ενός κτιρίου και ένα ποσοστό 10% περίπου προέρχεται από τη διαδικασία και τα υλικά κατασκευής του.

Εστιάζοντας στον κομμάτι του 10%, παρατηρείτε παραγωγή CO₂ πριν καταστεί λειτουργικό το υλικό δηλαδή αφορά την εξόρυξη, σύνθεση, παραγωγή, μεταφορά και εγκατάσταση του και αφού σταματήσει να είναι, πιο συγκεκριμένα μέσω αυτού γίνεται αντιληπτό το πόσο σημαντικό είναι το κομμάτι της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης τους.

Σχετικά με το κομμάτι της παραγωγής των υλικών παρατηρείται πως το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του χάλυβα είναι μεγαλύτερο από του σκυροδέματος και πιο συγκεκριμένα το 6.6% των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως προέρχεται από τις χαλυβουργίες ενώ το 5% από την παραγωγή τσιμέντου για το σκυρόδεμα. Ενώ όσον αφορά το κομμάτι της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης, ο χάλυβας είναι ευκολότερο να ανακυκλωθεί καθώς μπορεί να διατηρεί τις ιδιότητες του και γι αυτό έχει επιτευχθεί να παράγεται δομικός χάλυβας με πάνω από 95% ανακυκλωμένο υλικό και στο τέλος της ζωής του να ανακυκλωθεί πλήρως. Σε αντίθεση με το σκυρόδεμα του οποίου το 75%

επαναχρησιμοποιείται ως υλικό χαμηλότερης ποιότητας από το αρχικό, ακολουθώντας τη λεγόμενη ανακύκλωση ανοιχτού βρόγχου (Open loop recycling – downcycle).

Γίνεται αντιληπτό ότι ο χάλυβας ως το πιο ανακυκλώσιμο και ευέλικτο υλικό κατασκευής, κατέχει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της βιωσιμότητας. Ειδικά με την πρόβλεψη ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια μέχρι το 2050 (8 δισ. περίπου το 2022). Κατά την λειτουργική ζωή των κατασκευών έχει ήδη μειωθεί η επιβάρυνση στο περιβάλλον, οπότε είναι πλέον αναγκαία η περαιτέρω μείωση των εκπομπών και κατά τις μη λειτουργικές φάσεις της αρχής και του τέλους, γι αυτό κρίνεται απαραίτητο αν είναι εφικτό να γίνεται χρήση ανακυκλώσιμων υλικών ή υλικών με χαμηλό αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Βιωσιμότητα και κατασκευές είναι δυο έννοιες αλληλένδετες οι οποίες οδηγούν στην ποιότητα του έργου. Τα πρότυπα αποτελούν αποτελεσματικά εργαλεία προς αυτήν την κατεύθυνση. Στον τομέα της κατασκευαστικής βιομηχανίας και των κτιριακών εγκαταστάσεων, η απαίτηση για βιώσιμα κτίρια (Sustainable buildings) και βιώσιμες κατασκευές (Sustainable Construction) εξελίσσεται με ταχύτερους ρυθμούς. Γι αυτό και στη συγκεκριμένη μελέτη θα προτιμήσουμε από τις τρεις εναλλακτικές ενίσχυσης του διατηρητέου κτιρίου και πιο συγκεκριμένα τη χρήση μανδύων, μανδύων και τοιχωμάτων αλλά και FRPs, την βιωσιμότερη λύση δηλαδή αυτή με το μικρότερο ποσοστό αποτυπώματος του διοξειδίου του άνθρακα.

Για να γίνει αυτό υπολογίστηκε από το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του άνθρακα των αντίστοιχων προμηθευτών των υλικών, συνυπολογίζοντας τον όγκο του σκυροδέματος, το βάρος του οπλισμού και των FRP, όπως και την μεταφορά τους, την θέση παραγωγής τους, τι οχήματα χρησιμοποιήθηκαν για την μεταφορά κλπ. Μετά το πέρας των αναλύσεων για κάθε μία εναλλακτική προέκυψε ένα αποτέλεσμα το οποίο αφορά με την παγκόσμια υπερθέρμανση (Global Warming). Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα για τις τρεις εναλλακτικές ενίσχυσης.

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα ανθρακικού αποτυπώματος για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης.

A/A	Εναλλακτική Ενίσχυσης	Αποτέλεσμα Αποτυπώματος Άνθρακα (ton CO ₂ e)
1	FRPs	7,22 x 10 ¹
2	Μανδύες και τοιχώματα	2,73 x 10 ⁶
3	Μανδύες	1,24 x 10 ⁴

6.3.5. Τεχνολογικές απαιτήσεις - Βαθμός αναγκαιότητας εξειδικευμένου προσωπικού

Για κάθε μια τεχνική διεργασία είναι απαραίτητο να υπάρχει εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό για να μπορέσει να φέρει εις πέρας την εκάστοτε εργασία και εν προκειμένω την ενίσχυση ενός κτιρίου, έχοντας την τεχνογνωσία για να επιτευχθεί με τον ορθό τρόπο για να μην υπάρχουν μετέπειτα αστοχίες λόγω έλλειψης γνώσης ή εμπειρίας, εντός του χρονικού προγραμματισμού που έχει τεθεί εξ αρχής αλλά ακόμα επιλέγοντας τα κατάλληλα υλικά τα οποία θα τοποθετηθούν με τον σωστό τρόπο για να υπάρχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα κάθε φορά. Ωστόσο κάποιες εργασίες έχουν μεγαλύτερη ανάγκη να γίνουν από εξειδικευμένα άτομα απ' ότι άλλες.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι προτεινόμενες εναλλακτικές ενίσχυσης του κτιρίου είναι η χρήση FRPs, μανδύων αλλά και συνδυασμό μανδύων με τοιχώματα. Μεγαλύτερη ανάγκη από τις τρεις εναλλακτικές σε προσωπικό με εμπειρία έχει η τοποθέτηση των FRPs καθώς είναι αστάθμητος παράγοντας για τη σωστή κι αποδοτική εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής, αλλιώς το κτίριο μετά την εφαρμογή δεν θα έχει καμία διαφορά με το μη ενισχυμένο κτίριο. Εν συνεχεία το μοντέλο με μανδύες και τοιχώματα χρήζουν εξίσου από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό, ώστε εντός του κτιρίου να γίνει συνδυασμός δύο τρόπων ενίσχυσης και να φέρουν μέσω της σύμπραξης το μέγιστο αποτέλεσμα, χωρίς να υπάρχουν προβλήματα κατά την διάρκεια των διεργασιών. Τέλος η ενίσχυση του κτιρίου με τη χρήση μανδύων αδιαμφισβήτητα έχει ανάγκη από άτομα με τεχνογνωσία για να φέρουν εις πέρας σωστά όλα τα βήματα, από το κομμάτι των καθαιρέσεων έως την σκυροδέτηση, απλά σε πολύ μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τις δύο άλλες εναλλακτικές.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μέσω ποιοτικής κλίμακας η ανάγκη της κάθε μίας εναλλακτικής από εξειδικευμένο προσωπικό για να τοποθετηθεί στο κτίριο της μελέτης περίπτωσης.

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα βαθμού αναγκαιότητας εξειδικευμένου προσωπικού για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης

A/A	Εναλλακτική Ενίσχυσης	Βαθμός αναγκαιότητας για εξειδικευμένο προσωπικό
1	FRPs	Υψηλός
2	Μανδύες και τοιχώματα	Μέσος
3	Μανδύες	Χαμηλός

6.3.6. Βαθμός Αρχιτεκτονικής επιρροής

Κάθε μία από τις εναλλακτικές ενίσχυσης που προτείνετε στο κεφάλαιο 6.2 της εργασίας για το κτίριο της μελέτης περίπτωσης επηρεάζει και διαμορφώνει το οίκημα διαφορετικά από τις υπόλοιπες, καθώς έχουν διαφορετικό τρόπο που τοποθετούνται σε αυτό αφού άλλες τεχνικές διεργασίες θέλει ο ένας τρόπος και άλλες κάποιος άλλος.

Πιο αναλυτικά η χρήση των FRPs είναι η μέθοδος ενίσχυσης που δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου την εικόνα του κτιρίου, ούτε εσωτερικά αλλά ούτε και εξωτερικά και αυτό συμβαίνει καθώς επί της ουσίας είναι μια μεμβράνη που προσκολλάται πάνω στο σημείο που θα ενισχυθεί χωρίς να χρειαστεί κάποια καθαίρεση ή προσθήκη. Από την άλλη η μέθοδος των μανδύων επηρεάζει το κτίριο σε μέτριο βαθμό αφού θα χρειαστεί να γίνουν εμφανής καθαίρεσεις στα σημεία όπου χρήζουν ανάγκη ενίσχυσης, όπου μετά θα προστεθεί επιπλέον οπλισμός αλλά και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τέλος η συνδυαστική μέθοδος μανδύων και τοιχωμάτων είναι αυτή που επηρεάζει το κτίριο περισσότερο απ όλες καθώς περιμετρικά του κτιρίου όπου έχει κριθεί αναγκαίο θα καθαιρεθούν κομμάτια του ήδη υπάρχοντος σκελετού και θα κατασκευαστούν τοιχώματα συνδυαστικά με τοποθέτηση μανδύων στα μέλη που το έχουν άμεση ανάγκη, ακριβώς όπως προαναφέρθηκε για τον τρόπο εγκατάστασης τους πρωτύτερα.

Οπότε στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μέσω ποιοτικής κλίμακας τον βαθμό κάθε μίας εναλλακτικής στην αρχιτεκτονική επιρροή όταν επρόκειτο να τοποθετηθεί η εν λόγω ενίσχυση στο κτίριο της μελέτης περίπτωσης.

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα βαθμός αρχιτεκτονικής επιρροής για καθεμία εναλλακτική ενίσχυσης

A/A	Εναλλακτική Ενίσχυσης	Βαθμός Αρχιτεκτονικής επιρροής
1	Μανδύες και τοιχώματα	Υψηλός
2	Μανδύες	Μέσος
3	FRPs	Χαμηλός

7. Πολύ-κριτήρια Αξιολόγηση των Εναλλακτικών

7.1. Μοντέλο Ολικής Προτίμησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η εφαρμογή της μεθόδου WAP και της TOPSIS στην μελέτη περίπτωσης για να παρθεί απόφαση σχετικά με το ποια εναλλακτική θα επιλεγεί, εφαρμόζοντας στην TOPSIS τα βάρη που θα προκύψουν από την WAP. Για να πραγματοποιηθεί αυτό το εγχείρημα χρησιμοποιείται η μεθοδολογία των μεθόδων σύμφωνα με τους ερευνητές Tsotsolas. et al.,(2019).

7.1.1. Η μέθοδος προτεραιότητας WAP

Η μέθοδος χρήσης σταθμίσεων μέσω προτεραιοτήτων WAP (Weights Assessment through Prioritizations) έχει αναπτυχθεί από τους Tsotsolas. et al., (2019), είναι μέθοδος υπολογισμού βαρών κριτηρίων που έχει να κάνει με την οπτική απεικόνιση της διαφοράς της σημαντικότητας των κριτηρίων, όπου είναι εφαρμογή της μεθόδου Robust Simos, η οποία εμπλουτίζει τις πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τον αποφασίζοντα.

Η ανάγκη για τη δημιουργία αυτής της μεθόδου προέκυψε εξαιτίας των εξής λόγων:

- Υπήρχε δυσκολία του αποφασίζοντα να προσδιορίσει τον δείκτη z
- Χρήση λευκών καρτών τόσο στη Simos όσο και στην Revised Simos
- Χαμηλή ευρωστία και ευστάθεια

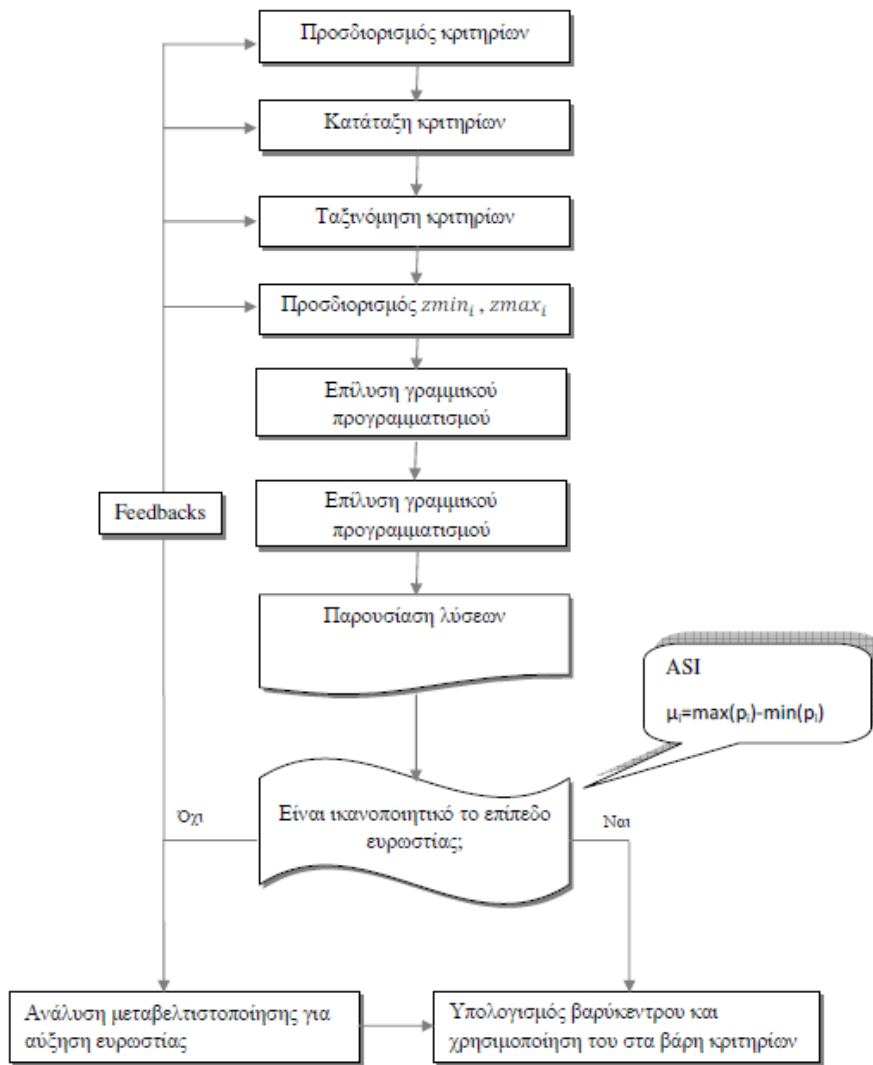
Η ιδέα της διαδικασίας της WAP θα αναλυθεί παρακάτω σε βήματα σύμφωνα με τους ερευνητές (Spyridakos. et al., 2022).

1. Ταξινομούνται τα χαρακτηριστικά και τα σύνολα τους κατά ζεύγη σύμφωνα με τη σημασία τους σε περιβαλλοντικά ζητήματα. Όπου με βάση τα χαρακτηριστικά χωρίζονται από τα σημαντικότερα στα λιγότερο σημαντικά και ταξινομούνται σε t κατηγορίες (ή αλλιώς κλάσεις με $t \leq n$).
2. Γίνεται χρήση των δεικτών z για κάθε ζεύγος διαδοχικών χαρακτηριστικών ή σύνολο χαρακτηριστικών αντίστοιχα σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{P_r}{P_{r+1}} = z_r, \text{ για } r = 1, \dots, t-1$$

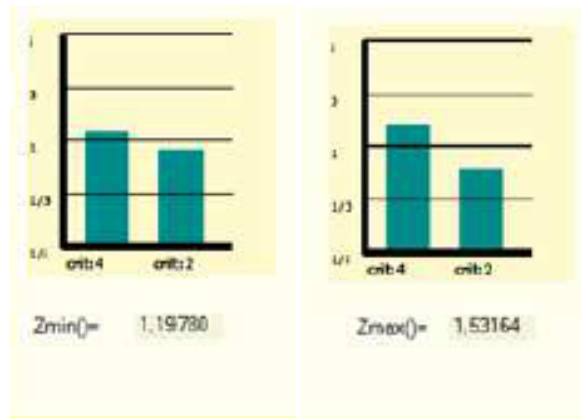
Όπου t είναι ο αριθμός των κλάσεων σχετικής σπουδαιότητας για τα κριτήρια $z \geq 1$.

Η μέθοδος WAP δεν έχει ανάγκη να προσδιοριστούν οι ακριβοί δείκτες z αλλά ένα εύρος $[z_{\min r}, z_{\max r}]$, όπου η τιμή z_r μπορεί να διαφέρει. Για δυο διαδοχικά χαρακτηριστικά ή σύνολα χαρακτηριστικών (π.χ.: g_r, g_{r+1}), η περιοχή $[z_{\min r}, z_{\max r}]$ προσδιορίζεται έτσι ώστε $z_{\min r} \leq z_r \leq z_{\max r}$.



Σχήμα 7.1: Βήματα μεθόδου WAP (Σκαμαγκούλη, 2018)

Για να βρεθεί ευκολότερα το εύρος αυτό, χρησιμοποιούνται οπτικές διαδραστικές τεχνικές. Ο αποφασίζων ταξινομεί τα “ n ” χαρακτηριστικά σε “ t ” τάξεις ($t \leq n$) προσδιορίζει τιμές για τους δείκτες $z_{\min r}$ και $z_{\max r}$ ($r = 1, 2, \dots, t-1$). Οι τιμές $z_{\min r}$ και $z_{\max r}$ υπολογίζονται αυτόματα και παρουσιάζονται με ράβδους και μοναδικές ετικέτες.



Σχήμα 7.2: Οπτική απεικόνιση διαφορών σημαντικότητας. (Tsotsolas. et al., 2016)

Αφού έχουν αποσαφηνιστεί τα $Z_{\min r}$ και $Z_{\max r}$ για όλα τα ζεύγη των διαδοχικών κατηγοριών, εκτιμούνται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των βαρών μέσω των τεχνικών LP. Πιο συγκεκριμένα τα προβλήματα βελτιστοποίησης $2n$, παρουσιάζονται για να βοηθήσουν στην κατανόηση της εκτίμησης των διανυσμάτων του βάρους για την μεγιστοποίηση και την ελαχιστοποίηση των βαρών των κριτηρίων:

$$\text{Min} p_i \text{ και } \text{Max} p_i, \text{ για } i=1,2,\dots,n$$

Υπόκεινται σε:

$$p_i - p_{i+1} = 0$$

Εάν το g_{i+1} ακολουθείται από g_i και g_{i+1} ή αν ανήκει σε κοινή κατηγορία σπουδαιότητας (r) με το g_i

$$\text{ή } p_i - p_{i+1} \geq Z_{\min r}, p_i - p_{i+1} \leq Z_{\max r}$$

Ενώ εάν το g_i ακολουθείται από g_{i+1} ή αν ανήκει στην σημαντικότερη κατηγορία σπουδαιότητας (r) με το g_{i+1} ή ανήκει στην κατηγορία ($r+1$)

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1,$$

$$p_1 \geq 0, p_2 \geq 0, \dots, p_n \geq 0$$

Μετά από τα αποτελέσματα των γραμμικών προγραμμάτων προσδιορίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των βαρών των κριτηρίων στις άπειρες λύσεις. Όπου η ευστάθεια των εκτιμώμενων άπειρων λύσεων υπολογίζεται μέσω της χρήσης δυο δεικτών:

1. Το εύρος μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών των βαρών των κριτηρίων για κάθε κριτήριο, καθώς υπολογίζονται για κάθε κορυφή του υπερ-πολυέδρου.

$$\mu_i = (\max(p_{ij}) - \min(p_{ij})), \text{ για } i=1,2,\dots,n \text{ και } j=1,2,\dots,m$$

Όπου:

- n είναι ο αριθμός των χαρακτηριστικών,
- m ο αριθμός των κορυφών του υπερ-πολύεδρου
- p_{ij} είναι το βάρος της ιδιότητας i της κορυφής j

2. Αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση των διαφορετικών λύσεων που αντιστοιχούν στις κορυφές υπερ-πολύεδρών

Όπου:

- η τιμή 1 αντιστοιχεί σε ένα ευσταθές προτεινόμενο μοντέλο.

Αυτός ο κανονικοποιημένος δείκτης ονομάζεται μέσος δείκτη ευστάθειας (Average Stability Index).

$$ASI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(m(\sum_{j=1}^m (p_i^j))^2) - (\sum_{j=1}^m p_i^j)^2}}{m\sqrt{(n-1)}}$$

Όπου:

- n είναι ο αριθμός των χαρακτηριστικών
- m ο αριθμός των κορυφών του υπερ-πολύεδρου

Τέλος για το σύνολο των διανυσμάτων βάρους $2n$, εκτιμάται το βαρύκεντρο. Εάν οι τιμές είναι αποδεκτές τότε υπολογίζονται τα βάρη μέσω διανύσματος. Αλλιώς μέσω των δυο κύριων δυνατοτήτων που παρέχει η προτεινόμενη προσέγγιση.

- Η πρώτη επικεντρώνεται στην ενημέρωση ή τροποποίηση συγκεκριμένων αρχικών προτιμήσεων, όπως οι τιμές του Z_{\min} και Z_{\max} ή στην κατάταξη των κριτηρίων
- Η δεύτερη αφορά την ανατροφοδότηση αξιοποιώντας αλλά εργαλεία για την ανάλυση ευστάθειας του υπερπολύεδρου λύσεων

7.1.2. Μέθοδος TOPSIS

Έχει ήδη προαναφερθεί στην εν λόγω διπλωματική εργασία η μέθοδος Topsis στο κεφάλαιο 3.4, οπότε στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε επιγραμματικά σε αυτή και στα πιο καίρια σημεία.

1. Κατασκευάζεται ο πίνακας αποφάσεων και προσδιορισμός του βάρους των κριτηρίων

Έστω $X = (x_{ij})$ ένας πίνακας αποφάσεων και $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ ένα διάνυσμα βάρους,

όπου $x_{ij} \in R$, $w_j \in R$ και $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$

Τα κριτήρια των συναρτήσεων μπορεί να είναι:

- Συναρτήσεις οφέλους
- Συναρτήσεις κόστους

2. Υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας αποφάσεων

Γίνεται μετατροπή της κλίμακας των επιμέρους κριτηρίων σε μία κλίμακα όπου είναι δυνατές οι συγκρίσεις μεταξύ αυτών. Η κανονικοποίηση γίνεται μέσω των συχνότερων μεθόδων υπολογισμού της κανονικοποιημένης τιμής n_{ij} και είναι οι ακόλουθες:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$$

$$n_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ αν } c_i \text{ είναι μια συνάρτηση οφέλους} \\ \frac{\max_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ αν } c_i \text{ είναι μια συνάρτηση οφέλους} \end{array} \right\}$$

Για $i=1, \dots, m$ και $j=1, \dots, n$.

3. Υπολογίζεται ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακα αποφάσεων

Η σταθμισμένη κανονικοποιημένη τιμή v_{ij} υπολογίζεται ως εξής:

$$v_{ij} = w_j n_{ij} \text{ όπου } i = 1, \dots, m \text{ και } j = 1, \dots, n$$

Όπου w_j το βάρος του κριτηρίου $\sum_{j=1}^n w_j = 1$

4. Προσδιορίζονται τα διανύσματα των θετικών και αρνητικών ιδανικών λύσεων

Η ιδανική θετική λύση είναι αυτή που μεγιστοποιεί τα κριτήρια οφέλους και ελαχιστοποιεί τα κριτήρια κόστους ενώ αντίθετα η αρνητική ιδανική λύση είναι αυτή που μεγιστοποιεί τα κριτήρια κόστους και ελαχιστοποιεί τα κριτήρια οφέλους.

Η θετική ιδανική λύση A^+ υπολογίζεται ως εξής:

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = ((\max_i v_{ij} \mid j \in I), (\min_i v_{ij} \mid j \in I))$$

Η αρνητική ιδανική λύση A^- υπολογίζεται ως εξής:

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = ((\min_i v_{ij} \mid j \in I), (\max_i v_{ij} \mid j \in I))$$

Όπου:

- I συνδέεται με τα κριτήρια οφέλους
- J με τα κριτήρια κόστους
- $i=1, \dots, m$ και $j=1, \dots, n$

5. Υπολογίζονται οι αποστάσεις

Η απόσταση κάθε εναλλακτικής από τη θετική ιδανική λύση υπολογίζεται ως εξής:

$$d_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^p \right)^{1/p}, i = 1, 2, \dots, m.$$

Η απόσταση κάθε εναλλακτικής από την αρνητική ιδανική λύση υπολογίζεται ως εξής:

$$d_i^- = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^p \right)^{1/p}, i = 1, 2, \dots, m.$$

Όπου $p \geq 1$. Για $p=2$ έχουμε την πιο σύνηθες Ευκλείδεια παράμετρο:

$$d_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right)^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m.$$

$$d_i^- = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right)^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m.$$

6. Υπολογίζεται η σχετική εγγύτητα στη θετική ιδανική λύση

Η σχετική εγγύτητα υπολογίζεται ως:

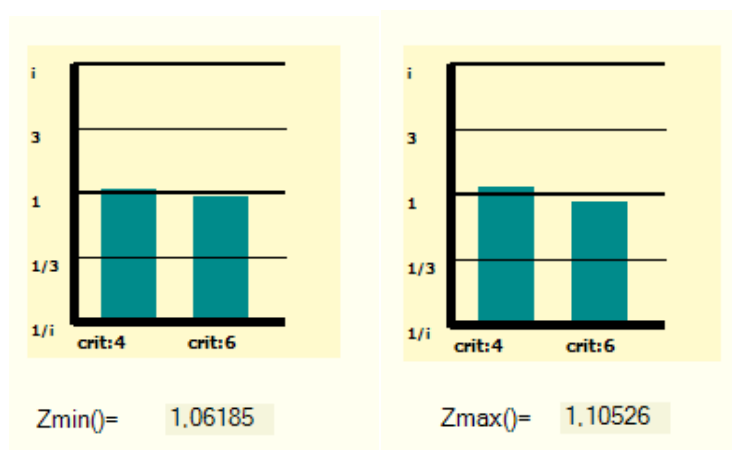
$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

Όπου $0 \leq R_i \leq 1$, για $i = 1, 2, \dots, m$.

7. Γίνεται κατάταξη της σειράς προτίμησης ή επιλέγεται η εναλλακτική που είναι πιο κοντά στο 1. Όπου το σύνολο των εναλλακτικών ταξινομείται κατά βάση με τη φθίνουσα σειρά της τιμής του R_i .

7.1.3. Αξιολόγηση των Εναλλακτικών

Χρησιμοποιήθηκε για μέθοδος υπολογισμού η μέθοδος WAP, για να υπολογιστούν τα βάρη των κριτηρίων και μέσω του αντίστοιχου προγράμματος έγινε η κατάταξη τους. Όπου ο αποφασίζων κατατάσσει τα κριτήρια σε φθίνουσα σειρά, δηλαδή από το σημαντικότερο στο λιγότερο σημαντικό κριτήριο, σύμφωνα με τον δικό του γνώμονα και στη συνέχεια προσδιορίζονται οπτικά οι αποστάσεις για τα Z_{min} και Z_{max} μεταξύ των κριτηρίων. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7.3) βλέπουμε το Z_{min} και το Z_{max} μεταξύ της τέταρτης και της πέμπτης κατηγορίας.



Σχήμα 7.3: Αξιολόγηση των Z_{min} και Z_{max} μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κατηγορίας.

Στον πίνακα 7.1 αναφέρεται η μονάδα μέτρησης του κάθε κριτηρίου και ο χαρακτηρισμός τους ως $C1, C2, \dots$ κλπ χάριν συντομίας.

Πίνακας 7.1: Ονομασία κριτηρίων για συντομία.

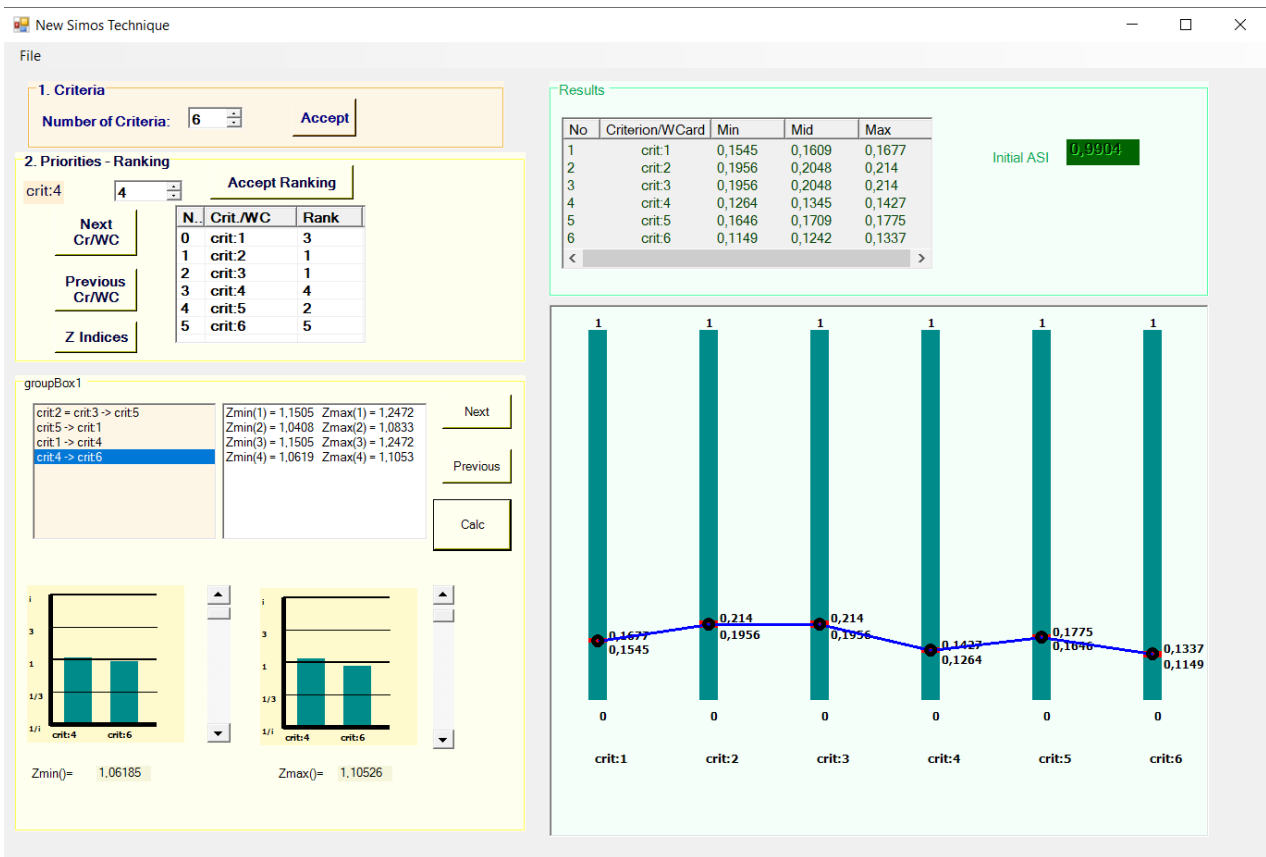
A/A	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης
C1	Τέμνουσα Βάσης	kN
C2	Χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης κτιρίου	Ημέρες
C3	Κόστος κατασκευής	€
C4	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα	ton CO ₂ e
C5	Τεχνολογικές απαιτήσεις-Βαθμός αναγκαιότητας εξειδίκευσης προσωπικού	Ποιοτικά
C6	Βαθμός Αρχιτεκτονικής επιρροής	Ποιοτικά

Ο Πίνακας 7.2 απεικονίζει τα ευρήματα των σχετικών αξιολογήσεων σπουδαιότητας των ειδικών καθώς και τα βάρη των κλάσεων που υπολογίζονται από τη γραμμική λύση του προγράμματος.

Πίνακας 7.2: Εκτίμηση βαρών και ανάλυση ευρωστίας.

Κατηγορία	Κριτήρια	[Zmin, Zmax]	P _i	μ _i
1	C2,C3	[1,1505, 1,2472]	0,2048	0,0184
2	C5	[1,0408, 1,0833]	0,1709	0,0129
3	C1	[1,1505, 1,2472]	0,1609	0,0132
4	C4	[1,0619, 1,1053]	0,1345	0,0163
5	C6		0,1242	0,0188
Μέσος δείκτης σταθερότητας (ASI)				0,9904

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα δεδομένα που παρέχονται από την μέθοδο WAP και το αντίστοιχο λογισμικό μετά την εισαγωγή των δεδομένων.



Σχήμα 7.4: Διεπαφή του λογισμικού της μεθόδου WAP

Μέσω της χρήσης του excel και συμπεριλαμβανομένου των αποτελεσμάτων των βαρών που προέκυψαν από το πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση TOPSIS με βάση τον πολυκριτηριακό πίνακα, ώστε να προκύψει η τελική αξιολόγηση για τις έξι εναλλακτικές της μελέτης περίπτωσης. Στους πίνακες που θα παρατεθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής TOPSIS μετά την κατάταξη κάθε μίας εναλλακτικής και μετά τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων με τη μέθοδο WAP όπως έχει προαναφέρει ήδη.

Πίνακας 7.3: Δεδομένα προβλήματος – Πολυκριτηριακός πίνακας προβλήματος απόφασης

Εναλλακτικές	Κριτήρια					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Μανδύες	2.578,45	83	141.839,05	$1,24 \times 10^4$	1	2
FRP	417,75	74	158.855,05	$7,22 \times 10^1$	3	1
Μανδύες και τοιχώματα	4.419,57	91	186.890,61	$2,73 \times 10^6$	2	3

Πίνακας 7.4: Κανονικοποιημένος Πολυκριτήριος Πίνακας

Εναλλακτικές	Κριτήρια					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Μανδύες	0,502	0,578	0,501	0,005	0,267	0,535
FRP	0,081	0,515	0,561	0,001	0,802	0,267
Μανδύες και τοιχώματα	0,861	0,633	0,660	1,00	0,535	0,802

Πίνακας 7.5: Βάρη Κριτηρίων

A/A	Βάρη Κριτηρίων
C1	0,1609
C2	0,2048
C3	0,2048
C4	0,1345
C5	0,1709
C6	0,1242

Πίνακας 7.6: Υπολογισμός του σταθμισμένου κανονικοποιημένου πολυκριτήριου πίνακα

Εναλλακτικές	Κριτήρια					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Μανδύες	0,081	0,118	0,102	0,001	0,046	0,066
FRP	0,013	0,105	0,115	0,001	0,137	0,033
Μανδύες και τοιχώματα	0,138	0,129	0,135	0,134	0,091	0,099

Πίνακας 7.7: Προσδιορισμός θετικής & αρνητικής ιδεατής λύσης

Λύση	Κριτήρια					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Θετική Ιδεατή	0,138	0,105	0,102	0,001	0,137	0,099
Αρνητική Ιδεατή	0,013	0,129	0,135	0,134	0,046	0,033

Πίνακας 7.8: Υπολογισμός απόστασης από την θετική ιδεατή λύση

Εναλλακτικές	Κριτήρια						Απόσταση από θετική ιδεατή
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
Μανδύες	0,00325	0,00017	0,00000	0,00000	0,00828	0,00109	0,01279
FRP	0,01562	0,00000	0,00017	0,00000	0,00000	0,00436	0,02015
Μανδύες και τοιχώματα	0,00000	0,00058	0,00109	0,01769	0,00212	0,00000	0,02148

Πίνακας 7.9: Υπολογισμός απόστασης από την αρνητική ιδεατή λύση

Εναλλακτικές	Κριτήρια						Απόσταση από αρνητική ιδεατή
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
Μανδύες	0,00462	0,00012	0,00109	0,01769	0,00000	0,00109	0,02461
FRP	0,00000	0,00058	0,00004	0,01769	0,00828	0,00000	0,02659
Μανδύες και τοιχώματα	0,01562	0,00000	0,00000	0,00000	0,00205	0,00436	0,02203

Πίνακας 7.10: Υπολογισμός σχετικής εγγύτητας και κατάταξη εναλλακτικών

Εναλλακτικές	Σχετική Εγγύτητα	Κατάταξη
Μανδύες	0,658	1
FRP	0,569	2
Μανδύες και τοιχώματα	0,506	3

8. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση της ενίσχυσης και αποκατάστασης ενός κτιρίου τριών επιπέδων στην περιοχή της Αττικής, μέσω της χρήσης του στατικού προγράμματος Seisbuild. Πιο συγκεκριμένα προτάθηκαν τρεις διαφορετικές εναλλακτικές ενίσχυσης όπως η περίπτωση χρήσης μανδύων, FRPs και ο συνδυασμός μανδύων με τοιχώματα. Στη συνέχεια, μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου TOPSIS, αλλά και της εκτίμησης των βαρών με την μέθοδο WAP των έξι κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη, θα αξιολογηθούν και θα παίξουν καταλυτικό ρόλο στο να επιλεγεί ορθά η καλύτερη εναλλακτική. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της βέλτιστης ενίσχυσης είναι η τέμνουσα βάσης, ο χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης κτιρίου, το κόστος κατασκευής, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα, οι τεχνολογικές απαιτήσεις-βαθμός αναγκαιότητας εξειδίκευσης προσωπικού και τέλος ο βαθμός αρχιτεκτονικής επιρροής. Πιο συγκεκριμένα για το κάθε κριτήριο μονομερώς θα διατυπωθεί η σύγκριση μεταξύ των τριών εναλλακτικών σε σχέση με αυτό.

1. Τέμνουσα Βάσης

Μετά τον σχεδιασμό της κάθε μίας εναλλακτικής ενίσχυσης στο στατικό πρόγραμμα Seisbuild παρατηρήθηκε ότι το κτίριο το οποίο ενισχύεται με FRPs παρουσιάζει την μικρότερη αντοχή, το κτίριο που ενισχύεται με μανδύες παρουσιάζει μεγαλύτερη, ενώ το κτίριο με συνδυαστική ενίσχυση μανδύων και τοιχωμάτων παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντοχή η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις άλλες δυο περιπτώσεις, το οποίο δικαιολογείται από την παρουσία των τοιχωμάτων.

2. Χρόνος αποκατάστασης και ενίσχυσης

Ο χρόνος ενίσχυσης μίας κατασκευής είναι από τα πιο σημαντικούς παράγοντες που βοηθούν στο να επιλεγεί η εναλλακτική. Μικρότερο χρόνο χρειάζεται η ενίσχυση με FRP, μετά οι μανδύες και τον μεγαλύτερο χρόνο τον χρειάζεται η συνδυαστική εναλλακτική.

3. Κόστος ενίσχυσης

Το κόστος είναι εξίσου σημαντικό κριτήριο με το χρόνο ενίσχυσης του κτιρίου. Παρατηρείται με βάσει τους πίνακες του κεφαλαίου 5.6.3. πως μικρότερο κόστος έχει η χρήση μανδύων μετά των FRPs και μέγιστο κόστος ενίσχυσης κατασκευής έχει η χρήση μανδύων με τοιχώματα.

4. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα άνθρακα

Στις μέρες μας το αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή των υλικών, έτσι ώστε να βοηθήσει στο να περιοριστεί το φαινόμενο αυτό. Κατά φθίνουσα σειρά πρώτα

είναι η ενίσχυση με μανδύες, ύστερα με τη χρήση FRPs και τελευταία η επιλογή της χρήσης μανδυών και τοιχωμάτων.

5. Τεχνολογικές απαιτήσεις-βαθμός αναγκαιότητας εξειδίκευσης προσωπικού

Ένα ακόμα κριτήριο είναι το κατά πόσο η κάθε μία εναλλακτική χρήζει να τοποθετηθεί από εξειδικευμένο προσωπικό έτσι ώστε να γίνει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, όσο το δυνατόν πιο σωστά, με λιγότερο χρόνο και χωρίς απώλειες. Περισσότερη ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό έχει η χρήση FRPs για την ενίσχυση του κτιρίου λόγω της ιδιαιτερότητας του υλικού, μετά η χρήση μανδυών και τοιχωμάτων εξαιτίας του συνδυασμού. Τέλος αδιαμφισβήτητα η επιλογή ενίσχυσης με μανδύες έχει ανάγκη από άτομα με τεχνογνωσία απλά είναι λιγότερο αναγκαίο συγκριτικά με τις άλλες δύο εναλλακτικές.

6. Βαθμός αρχιτεκτονικής επιρροής

Τελευταίος παράγοντας που θα κρίνει το ποια εναλλακτική θα επιλεγεί τελικά είναι ο βαθμός της αρχιτεκτονικής επιρροής, το οποίο σημαίνει απλοϊκά το πόσο επηρεάζει την αρχική μορφή του κτιρίου η επέμβαση της κάθε μίας. Κατά αύξουσα σειρά επηρεάζει πιο πολύ το υφιστάμενο κτίριο η χρήση μανδυών με τοιχώματα, μετά οι μανδύες και λιγότερο απ' όλες η χρήση FRPs.

Στο κεφάλαιο 6.1.3. έγινε ταξινόμηση των κριτηρίων από το πιο σημαντικό στο λιγότερο σημαντικό:

- Στην 1η θέση επιλέχθηκαν τα κριτήρια 2,3
- Στην 2η θέση επιλέχθηκε το κριτήριο 5
- Στην 3η θέση επιλέχθηκε το κριτήριο 1
- Στην 4η θέση επιλέχθηκε το κριτήριο 4
- Στην 5η θέση επιλέχθηκε το κριτήριο 6

Τέλος η εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS συνδυασμένη με την μέθοδο WAP η οποία βοηθά στο να υπολογιστούν τα βάρη των κριτηρίων έχει ως αποτέλεσμα:

- Η εναλλακτική της χρήσης μανδυών να έρχεται πρώτη στη κατάταξη.
- Η εναλλακτική όπου χρησιμοποιούνται FRPs έρχεται δεύτερη στη κατάταξη.
- Η εναλλακτική της χρήσης μανδυών και τοιχωμάτων έρχεται τρίτη στη κατάταξη.

9. Βιβλιογραφία

Αναφορές:

1. Belton, S. & Stewart, T.S. (2002). Multiple Criteria Decision Analysis - An Integrated Approach. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
2. Brans, J.P., Mareschal, B. & Vincke, P., PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis, In: Brans J.P. (Ed.). Operational Research 84, North-Holland, Amsterdam (1984): 477–90.
3. Charnes, A.C. (1961). Management models and industrial applications of linear programming. New York: Wiley.
4. Chen, Y., Kilgour, D.M. & Hipel, K.W. (2008). Screening in multiple criteria decision analysis. Decision Support Systems, Vol 45, No 2, 278-290.
5. Churchman, C.W., Ackoff, R.L. and Arnoff, E.L. (1957). Introduction to Operations Research, New York: Wiley.
6. Culakova, M., Vilcekova, S., Katunska, J., & Kridlova Burdova, E., Multi-Criteria Analysis of Material Selection in Order to Reduce of Environmental Impacts. Chemical Engineering Transactions 35 (2013): 379–84. <https://doi.org/10.3303/CET1335063>.
7. De Montis, A., De Toro, B., Droste-Franke, B., Omann, I., & Stagl, S. (2005). Assessing the quality of different MCDA methods, In book: Alternatives for Environmental Valuation, Publisher: Routledge, Editors: Getzner, Michael and Spash, Clive L. and Stagl, Sigrid, pp.99-133.
8. Fishburn, P. (1965). Independence in utility theory with whole product sets. Operations Research, 13, p. 28-45.
9. Fishburn, P.C. (1968). ‘Utility theory’, Management Science, 14: 335–78.
10. Fishburn, P.C. (1970). Utility Theory for Decision Making, New York: John Wiley and Sons.
11. Fishburn, P.C. (1978). A survey of multiattribute/multiple criteria evaluation theories, in S. Zionts (ed.) Multiple Criteria Problem Solving, Berlin: Springer: 181–224.
12. Greco, S., Ehrgott, M. & Figueira, J.R. (2016). Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys, Vol 1 & 2, Second Edition, New York: Springer. DOI: 978-1-4939-3094-4
13. H.S. Shih, H.J. Shyr, E.S. Lee, (2007). An extension of TOPSIS for group decision making, Elsevier, Mathematical and Computer Modelling 45, 801–813.
14. Hashemi, Hajiagha, Zavadskas, Mahdiraji. (2016) Applied Mathematical Modelling, Volume 40, Issue 2, 1554-1564

15. Hwang, C.L., Lai, Y.J., Liu, T.Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research*. 20: 889–899. doi:10.1016/0305-0548(93)90109-v.
16. Hwang, C.L., Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag
17. Ishizaka, A. & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. West Sussex: Wiley.
18. Kim, G., Park, C.S., Yoon, K.P. (1997.) Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement, *International Journal of Production Economics* 50. 23–33.
19. Koopmans, T. (1951). *Activity Analysis of Production and Allocation*. New York: John Willey and sons. MCDA Method Selection Tool. (2019, February 20). <http://mcda.it/>
20. Maylor, H., 2010. *Project management*, 4. ed. ed. Financial Times Prentice Hall, Harlow London
21. Pardalos, P.S. (1995). *Advances in multicriteria analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
22. Pareto, V. (1986). *Cours d' Economie Politique*. Lausanne.
23. Roy, B. (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE). *Revue Informatique et Recherche Operationnelle* 8, 57-75
24. Roy, B. (1985). *Methodologie Multicritere d' Aide a la Decision*. Paris: Economica.
25. Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, *Theory and Decision*, 31, 49-73.
26. Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Nonconvex Optimization and its Applications*, Vol 12, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
27. Roy, B. and Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la decision: Méthodes et cas*, Economica, Collection Gestion; Paris.
28. Saaty, T.L., P.C. Rogers, and R. Pell. 'Portfolio Selection through Hierarchies'. *The Journal of Portfolio Management* Spring (1980): 16–21.
29. Saaty, Th.L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the Principal Eigenvector necessary? *European Journal of Operational Research* 145: 85-91
30. Silva, S.M., & Almeida, M.G., (2013) Using MCDA to Select Refurbishment Solutions to Improve Buildings IEQ. MULTICOMP - Artes Gráficas, Lda., <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/26196>.

31. Spyridakos, A., Alexakis, D. E., Vryzidis, I., Tsotsolas, N., Varelidis, G., & Kagiaras, E. (2022). Waste Classification of Spent Refractory Materials to Achieve Sustainable Development Goals Exploiting Multiple Criteria Decision Aiding Approach. *Applied Sciences*, 12(6), Article 6.
32. Triantaphyllou, E. (2000). *Multi Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer Science + Business Media Dordrecht. Doi: 10.1007/978-1-4757-3157- 6
33. Tsotsolas, N., Spyridakos, A., Siskos, E., & Salmon, I. (2019). Criteria weights assessment through prioritizations (WAP) using linear programming techniques and visualizations. *Operational Research*, 19(1), 135–150.
34. Tsotsolas, Np, Spyridakos, A., Siskos, E., & Salmon, I., (2016). *Operational Research*, Springer
35. Vilutiene, T., Kumetaitis, G., Kiaulakis, A., & Kalibatas, D. (2020). Assessing the Sustainability of Alternative Structural Solutions of a Building: A Case Study. *Buildings*, 10(2), 36. doi:10.3390/buildings10020036
36. Von Neumann, J. M. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. New Jersey: Princeton.
37. Wallnau, K. (1998). Risk/Misfit, Software Engineering Institute, THE 99 SOFTWARE ENGINEERING SYMPOSIUM, Carnegie Mellon University, http://www.sei.cmu.edu/cbs/cbs_slides/99symposium/056pr.pdf
38. Watrobski, J.J. (2018). Generalised framework for multi-criteria method selection. *Omega, The International Journal of Management Science*.
39. Yoon, K. (1987). A reconciliation among discrete compromise situations. *Journal of Operational Research Society*. 38. 277–286. doi:10.1057/jors.1987.44.
40. Zanakis, S.H., Solomon, A., Wishart, N., & Dublisch, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of selection methods, *European Journal of Operational Research* 107. 507–529.
41. Zorounidis C., Doumpos M. & Pardalos P.M., (2010), *Handbook Of Financial Engineering*
42. Δούμπος, Μ. & Ζοπουνίδης, Κ. (2004). *Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων – Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις και Εφαρμογές*. Χανιά: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
43. Δούμπος, Μ., (2000). *Πολυκριτήριες μέθοδοι ταξινόμησης και εφαρμογές στη χρηματοοικονομική διοίκηση*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Κρήτη.
44. Δρίτσος, Σ. Η. (2005). *Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών απο Οπλισμένο Σκυρόδεμα (3η Αναθεωρημένη εκδ.)*. Πάτρα
45. Λίτσος, Θ. (2012). *Αναλυτική διερεύνηση της ενίσχυσης υφιστάμενου πλαισίου Ω/Σ με εμφανούμενα τοιχώματα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.

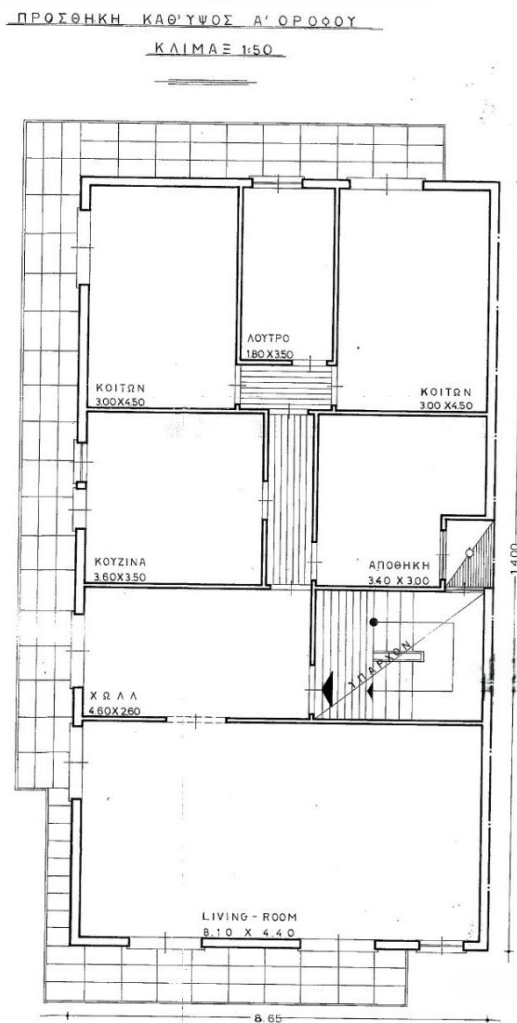
46. ΟΑΣΠ, (2005). Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια.
47. Σίσκος, Ι. (2008). Μοντέλα αποφάσεων. Αθήνα: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
48. Σκαμαγκούλη, Α. (2018), Πολυκριτηριακή προσέγγιση σε πρόβλημα ανάθεσης σε θέσεις εργασίας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα
49. Σπανός, Σ. (2004) Αναλυτική Μελέτη Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
50. Σπυράκος, Κ. (2004). Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος.
51. Στρεπελιάς, Η. (2012), Διδακτορική διατριβή: Ενίσχυση υφιστάμενων πλαισιακών κατασκευών με εμφάνωση από Ω/Σ – πειραματική και αναλυτική διερεύνηση.

Ιστοσελίδες διαδικτύου:

1. <http://episkeves2.civil.upatras.gr>
2. <https://monosimacon.blogspot.com>
3. <https://em4c.gr/portfolio/dimos-iliou>

Παράρτημα Α

Στο Παράρτημα Α θα παρουσιαστούν τα αρχιτεκτονικά σχέδια της οικοδομικής άδειας του κτιρίου της μελέτης περίπτωσης που ήταν δυνατόν να υπάρχουν στην κατοχή μας, το οποίο ενισχύθηκε με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

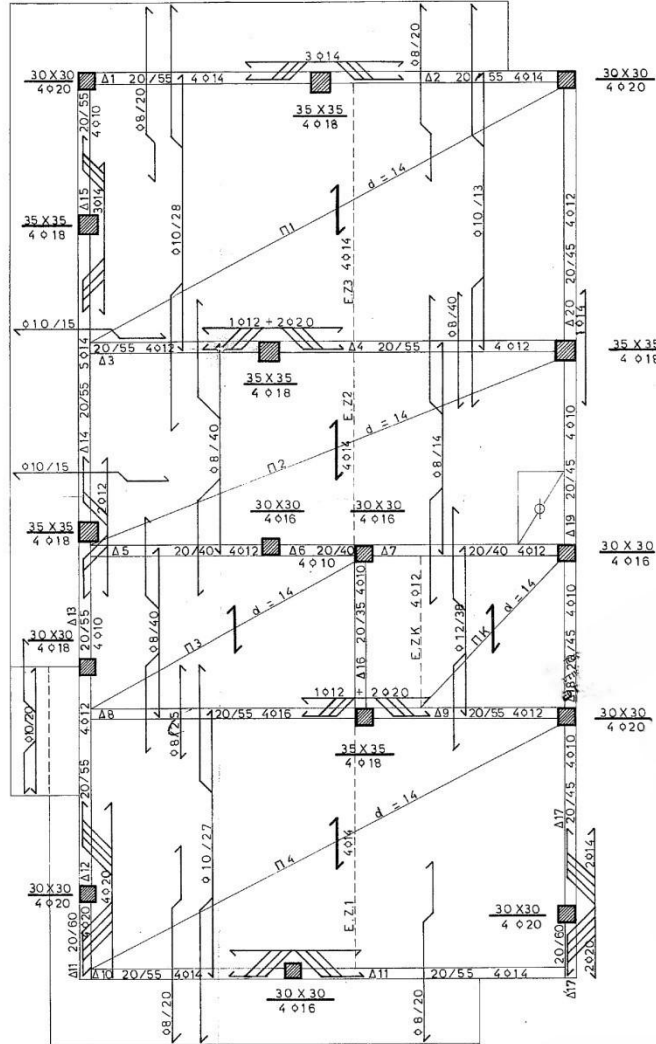


Σχήμα 1: Κάτοψη τυπικού ορόφου

ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ

ΞΥΛΟΥΤΥΠΟΣ Α ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΡΟΦΟΥ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΙΣΟΓΕΙΟΥ

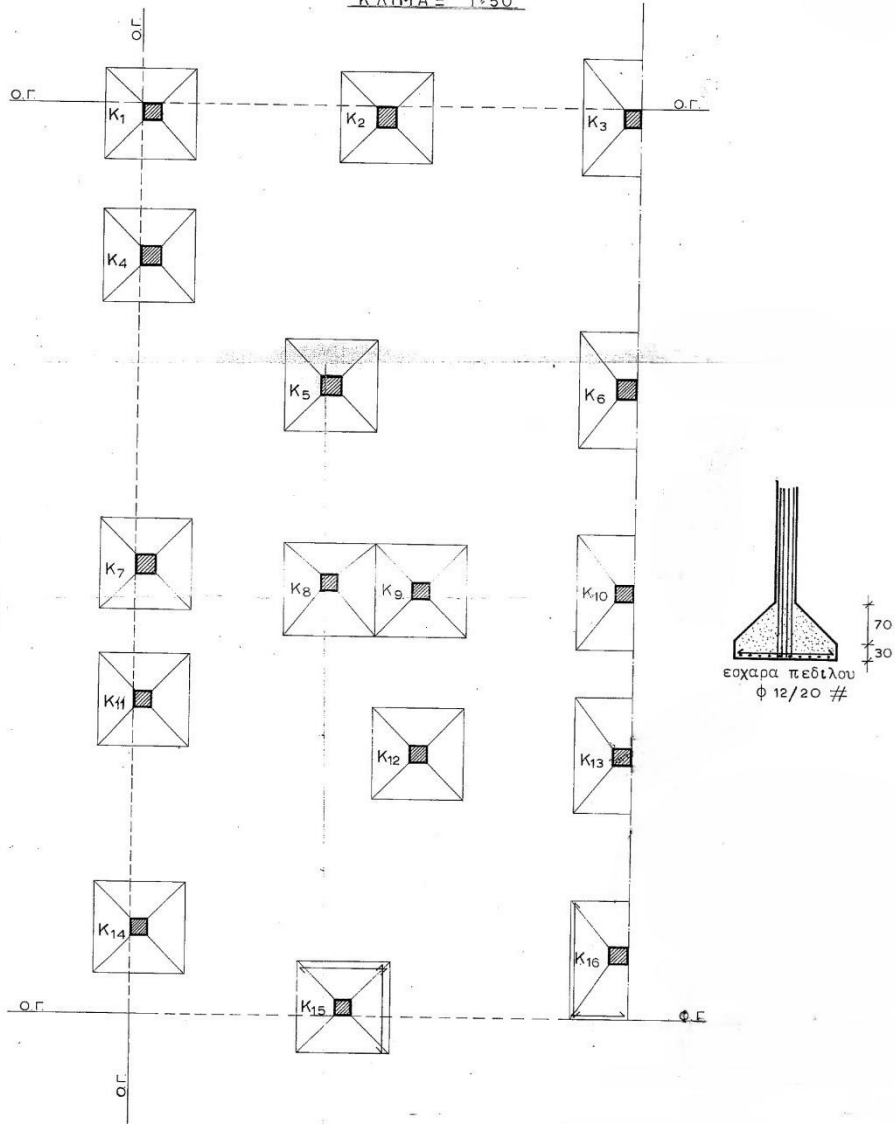
ΚΛΙΜΑΞ 1:50



Σχήμα 2: Ξυλότυπος τυπικού ορόφου

ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ
ΚΑΤΟΨΙΣ ΠΕΔΙΛΩΝ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ

ΚΛΙΜΑΞ 1:50



Σχήμα 3: Κάτοψη πέδινων