



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Τροποποίηση και βελτιστοποίηση της
πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE TRI-B για
την ταξινόμηση επενδύσεων ενεργειακής
αποδοτικότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΗΛΙΑΝΑΣ ΧΑΤΖΗΑΝΤΩΝΙΟΥ

Επιβλέπων: Χρυσόστομος Δούκας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Αθήνα, Νοέμβριος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης

Τροποποίηση και βελτιστοποίηση της
πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE TRI-B για
την ταξινόμηση επενδύσεων ενεργειακής
αποδοτικότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΗΛΙΑΝΑΣ ΧΑΤΖΗΑΝΤΩΝΙΟΥ

Επιβλέπων: Χρυσόστομος Δούκας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3η Νοεμβρίου 2021.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Χρυσόστομος Δούκας
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτρης Ασκούνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

(Υπογραφή)

.....

ΗΛΙΑΝΑ ΧΑΤΖΗΑΝΤΩΝΙΟΥ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2021 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων
Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης

Copyright ©–All rights reserved Ηλιάνα Χατζηαντωνίου, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε ένα σύνολο ανθρώπων, που με την πολύτιμη στήριξή τους με συντρόφευσαν στο όμορφο αυτό ταξίδι των σπουδών μου.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χρυσόστομο Δούκα, που με έφερε σε επαφή με το τόσο επίκαιρο θέμα της διπλωματικής μου και με εμπιστεύτηκε στο να συμβάλω με τον τρόπο μου σε ένα σημαντικό έργο. Διέθεσε πολύτιμο χρόνο στο να συζητήσει μαζί μου τις εναλλακτικές και τελικά να με κατευθύνει. Αντίστοιχα ευχαριστώ και τον κύριο Δημήτρη Ασκούνη με τον οποίο είχα επίσης κάνει μια πολύ εποικοδομητική συζήτηση κατά την αναζήτηση θέματος για τη διπλωματική μου εργασία αλλά και τον κύριο Ιωάννη Ψαρρά για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή. Φυσικά ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει και στον Φίλιππο Μέξη, που με καθοδήγησε και με συμβούλεψε στα διάφορα στάδια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Πάντα πρόθυμος να βοηθήσει και να με κατευθύνει όταν αυτό χρειαζόταν. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να πω ένα ευχαριστώ και σε διάφορα άλλα μέλη του εργαστηρίου των συστημάτων αποφάσεων, που μπορεί να μην είχαμε άμεση επαφή αλλά με τον τρόπο τους συνέβαλλαν στην απόφασή μου να επιλέξω μια διπλωματική που σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων. Τα μαθήματα και εργασίες είναι πολύ ενδιαφέροντα ενώ παράλληλα υπήρχε πάντα διάθεση για συνεργασία και βοήθεια.

Βέβαια δεν θα μπορούσα να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι ήταν πάντα εκεί για εμένα όταν τους χρειαζόμουν. Υποστηρικτικοί και με κατανόηση πίστεψαν σε εμένα και με έκαναν να πιστεύω και éγω περισσότερο στον εαυτό μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων, ELECTRE TRI-B στην αξιολόγηση επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας. Γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου μοντελοποίησης του προβλήματος απόφασης και τεκμηριώνεται η επιλογή την συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Ο αρχικός κώδικας υλοποίησης της μεθόδου στη γλώσσα προγραμματισμού Python (ο οποίος συντάχθηκε αρχικά από άλλο προγραμματιστή), τροποποιήθηκε και βελτιστοποιήθηκε, ώστε να είναι λειτουργικός και τα αποτελέσματα ορθολογικά. Εφαρμόστηκαν δειγματοληπτικοί έλεγχοι, με εικονικά-τεχνητά δεδομένα για την τεκμηρίωση της ορθής λειτουργίας της μεθόδου. Ταυτόχρονα, υπήρξε συμβολή σε διάφορες φάσεις του project, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε πρακτικό.

Η ανάγκη για την εφαρμογή της ELECTRE TRI-B προήλθε στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon 2020, και πιο συγκεκριμένα της ανάπτυξης της εφαρμογής Triple-A, η οποία έχει ως σκοπό να γεφυρώσει το χάσμα που υπάρχει στη χρηματοδότηση των επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας. Πρόκειται για μία εφαρμογή τριών σταδίων: Αρχικά γίνεται η αξιολόγηση (Assess), έπεται το στάδιο της συμφωνίας (Agree) και τελευταίο ακολουθεί το στάδιο της ανάθεσης (Assign). Πιο συγκεκριμένα, το στάδιο της συμφωνίας (Agree) υλοποιείται με το αντίστοιχο εργαλείο (Agree Tool), το οποίο δέχεται ως είσοδο από το χρήστη και από το στάδιο της ανάθεσης κάποιες τιμές και ουσιαστικά εφαρμόζει την πολυκριτηριακή μέθοδο ELECTRE TRI-B στο υποψήφιο επενδυτικό έργο. Το αποτέλεσμα είναι η ταξινόμηση της επένδυσης σε μία από τις τρεις διαθέσιμες κατηγορίες, Rejected, Reserved, Triple-A.

Λέξεις Κλειδιά

Ενεργειακή Απόδοτικότητα, Χάσμα Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy efficiency gap), Επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων, Μοντελοποίηση προτιμήσεων, Οικογένεια κριτηρίων, ELECTRE, ELECTRE TRI-B, Triple-A Agree Tool

Abstract

The present diploma thesis examines the application of a multicriteria decision analysis methodology (MCDA), namely ELECTRE TRI-B, on assessing energy efficiency related investments. A thorough description of the modelling of the decision problem is present along with a detailed documentation of the reasons that forced the choice of this particular MCDA method. The initial Python code provided that implements ELECTRE TRI-B was modified and optimized, in order to be functional and to provide rational results. Also sample checks were performed with artificial data in order to monitor the functionality of the method. At the same time there was active involvement on different phases of the project, both on theoretical and on practical level.

The need to implement ELECTRE TRI-B was derived in the frameworks of the Horizon 2020 program and more specifically the deployment of the Triple-A application, which aims to bridge the gap that exists in financing energy efficiency investments. This application consists of three discrete but interconnected parts. Everything begins with the Assess part, Agree part follows and the last one is the Assign part. Of the aforementioned parts, the Agree part is implemented with the respective Agree Tool, which takes as an input data from both the user and the Assess part and applies the MCDA method ELECTRE TRI-B on the candidate investment project. The final result is the classification of the to-be-carried out investment in one of the three predefined and ordered categories. Those categories are Rejected, Reserved or Triple-A.

Keywords

Energy Efficiency, Energy Efficiency Gap, Energy Efficiency Investments, Multicriteria Decision Analysis, Preference Modelling, Criteria, ELECTRE, ELECTRE TRI-B, Triple-A Agree Tool

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	9
1 Εισαγωγή	11
1.1 Σκοπός της διπλωματικής	11
1.1.1 Οργάνωση του τόμου	12
2 Η ενεργειακή αποδοτικότητα	15
2.1 Εισαγωγή στην ενεργειακή αποδοτικότητα	15
2.1.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα και εξοικονόμηση ενέργειας	15
2.1.2 Τα πολλαπλά οφέλη της ενεργειακής αποδοτικότητας	16
2.1.3 Περιοχές βελτίωσης	18
2.2 Η ενεργειακή αποδοτικότητα σε διάφορους τομείς	19
2.2.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα στη βιομηχανία	19
2.2.2 Ενεργειακή αποδοτικότητα στον οικιακό τομέα	22
2.2.3 Ενεργειακά αποδοτικά κτίρια	24
2.2.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα στις μεταφορές	26
2.3 Παγκόσμιες και ευρωπαϊκές τάσεις και συμφωνίες για την ενεργειακή αποδοτικότητα.	27
3 Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι	31
3.1 Εισαγωγή στις βασικές έννοιες	31
3.1.1 Η μοντελοποίηση του προβλήματος της απόφασης	32
3.2 Τα συναρτησιακά μοντέλα	35
3.3 Τα σχεσιακά μοντέλα	36
3.3.1 Βασικά στοιχεία των μεθόδων ELECTRE	37

3.4	Αναλυτική-Συνθετική προσέγγιση	39
4	Η μέθοδος ELECTRE TRI-B	43
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία	43
4.2	Περιγραφή της μεθόδου	44
4.2.1	Οι εξελίξεις της μεθόδου	50
4.3	Εφαρμογές της ELECTRE TRI-B σε προβλήματα αποφάσεων	51
4.3.1	Οι εφαρμογές σε προβλήματα ενέργειας και ενεργειακής αποδοτικότητας	52
5	Η ELECTRE TRI-B στην ταξινόμηση επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας	53
5.1	Η επιλογή της μεθόδου για το Agree tool	53
5.2	Η μοντελοποίηση του προβλήματος	54
5.3	Οι βελτιστοποιήσεις στον κώδικα	58
5.4	Περιγραφή λειτουργίας Agree	61
6	Επίλογος	67
6.1	Σύνοψη εξαγόμενων συμπερασμάτων	67
6.2	Περιθώρια βελτίωσης	68
	Βιβλιογραφία	70
	Γλωσσάριο	79

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Energy consumption by sector, EU, 2019 (Πηγή: [1])	20
2.2	Final energy consumption in the residential sector by use,EU,2019 (Πηγή: [2])	23
3.1	Types of MCDA problematics (Πηγή: [3])	33
3.2	Aggregation-Disaggregation Approach (Πηγή: [4])	40
3.3	Robustness Analysis In Preference Disaggregation Approaches (Πηγή: [5]) .	41
4.1	Categories and Profiles (Πηγή: [3])	45
5.1	Triple-A Sectors (Πηγή: [6])	62
5.2	Agree First Screen (Πηγή: [6])	63
5.3	Agree Second Screen (Πηγή: [6])	64
5.4	Triple-A Result (Πηγή: [6])	65
5.5	Reserved Result (Πηγή: [6])	65
5.6	Rejected Result (Πηγή: [6])	65

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής

Η μειωμένη ροή επενδύσεων στην ενεργειακή αποδοτικότητα είναι ένα σύγχρονο πρόβλημα, που δεν αποτελεί παρά μία από τις εκφάνσεις του ενεργειακού χάσματος (energy efficiency gap). Μίας και η ενεργειακή αποδοτικότητα πρωταγωνιστεί στις ενεργειακές στρατηγικές, είτε αυτές αφορούν τον περιορισμό τις κλιματικής αλλαγής, είτε την προώθηση της ανταγωνιστικότητας μέσω της βιώσιμης ανάπτυξης, είναι σημαντικό να γίνουν προσπάθειες για την άμβλυνση του προβλήματος.

Το έργο Triple-A που χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα “Ορίζοντας 2020” (“Horizon 2020”) έχει ως σκοπό να αυξήσει τη ροή κεφαλαίου στην ενεργειακή αποδοτικότητα, κάνοντας τις επενδύσεις πιο διαφανείς, προβλέψιμες και ελκυστικές [7]. Πιο συγκεκριμένα, το κενό που επιδιώκει να καλύψει αφορά τη φάση ανάπτυξης, το πρώιμο εκείνο στάδιο, κατά το οποίο υπάρχουν αφενός πολλές ιδέες έργων και αφετέρου διαθέσιμο κεφάλαιο, αλλά τελικά τα έργα (projects), δεν χρηματοδοτούνται ποτέ. Μία εξήγηση για το παραπάνω φαινόμενο είναι η εξής: Από την πλευρά τους εκείνοι που έχουν την ιδέα για ένα έργο ενεργειακής αποδοτικότητας επικεντρώνονται περισσότερο στο να ποσοτικοποιήσουν τις τιμές εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ δεν έχουν τη γνώση να παρουσιάσουν ένα ελκυστικό σχήμα χρηματοδότησης στους επενδυτές [8]. Οι ιδιωτικοί επενδυτές με τη σειρά τους δεν έχουν επαρκείς γνώσεις σε ό,τι αφορά την υλοποίηση του έργου, ενώ οι τράπεζες συχνά επιλέγουν να χρηματοδοτούν έργα δίνοντας μεγαλύτερη βάση στην πιστοληπτική ικανότητα παρά στα κριτήρια ενεργειακής αποδοτικότητας. Επίσης τροχοπέδη αποτελούν τα φαινόμενα κατά τα οποία επιλέγονται για χρηματοδότηση έργα που παρουσιάζονται ως ενεργειακά αποδοτικά, ενώ δεν είναι στην πραγματικότητα (greenwashing). Το Triple-A έρχεται να γεφυρώσει αυτό το χάσμα, διαχωρίζοντας τις επενδύσεις που είναι επαρκώς ενεργειακά αποδοτικές και μπορούν να ανταποκριθούν στις οικονομικές δεσμεύσεις τους από τις υπόλοιπες.

Η διαδικασία χωρίζεται σε τρία διακριτά, αλλά αλληλοσυνδεόμενα, στάδια. Το πρώτο είναι το στάδιο της Αξιολόγησης (Assess), κατά το οποίο ελέγχεται η συμβατότητα του έργου με τα όρια που έχουν τεθεί από το σύστημα ταξινόμησης της ΕΕ για τις βιώσιμες οικονομικές δραστηριότητες (EU Taxonomy). Ακολουθεί ο εσωτερικός υπολογισμός μιας τιμής

ρίσκου. Στο επόμενο στάδιο, αυτό της Συμφωνίας (Agree) το έργο κατηγοριοποιείται είτε ως Triple-A, είτε ως Reserved, είτε ως Rejected, με βάση κάποια κριτήρια. Η όλη διαδικασία υλοποιείται με την εφαρμογή της ELECTRE TRI-B, μιας πολυκριτηριακής μεθόδου ανάλυσης αποφάσεων. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο είναι αυτό της Ανάθεσης (Assign), όπου τα έργα που έχουν χαρακτηριστεί ως Triple-A στο δεύτερο στάδιο, αντιστοιχίζονται με πιθανά σχέδια χρηματοδότησης.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής μελετήθηκε και βελτιστοποιήθηκε ο κώδικας υλοποίησης της πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE TRI-B που είχε αναπτυχθεί από άλλο προγραμματιστή στη γλώσσα προγραμματισμού Python για το δεύτερο στάδιο, αυτό της Συμφωνίας (Agree). Γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου μοντελοποίησης του προβλήματος απόφασης και τεκμηριώνεται η επιλογή την συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Επίσης παρουσιάζονται σημεία βελτίωσης που μπορούν να ενσωματωθούν μελλοντικά στην υπάρχουσα λύση. Τέλος, υπήρξε συμβολή στα θεωρητικά παραδοτέα του project καθόλη τη διάρκεια ενασχόλησης με την παρούσα διπλωματική εργασία.

1.1.1 Οργάνωση του τόμου

Η παρούσα διπλωματική έχει την εξής δομή:

Κεφάλαιο 1ο

Το παρόν κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και διαρθρώνεται η δομή του υπόλοιπου τόμου.

Κεφάλαιο 2ο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής αναφορά στην έννοια της ενεργειακής αποδοτικότητας. Δίνεται απάντηση σε ερωτήματα όπως το τι σημαίνει ο όρος και γιατί είναι μείζονος σημασίας για τη σημερινή κοινωνία, παρουσιάζοντας τα πολλάπλά του οφέλη. Γίνεται επίσης μία αναφορά στις περιοχές που μπορούν να βελτιωθούν δραστικά, όπως είναι το χάσμα ενεργειακής απόδοσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι τομείς οι οποίοι ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας (βιομηχανία, κτίρια, μεταφορές) και γίνεται μια αναφορά στους τρόπους με τους οποίους μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτεροι στόχοι ενεργειακής αποδοτικότητας σε αυτούς. Τέλος γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις παγκόσμιες και ευρωπαϊκές τάσεις και συμφωνίες που αφορούν την ενεργειακή αποδοτικότητα. Ουσιαστικά σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται μια εικόνα των εννοιών που πλαισιώνουν την εφαρμογή της ELECTRE TRI-B στο έργο Triple-A.

Κεφάλαιο 3ο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο πεδίο της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. Παρουσιάζονται βασικές έννοιες, όπως είναι οι διαθέσιμες κατηγορίες ενός προβλήματος απόφασης, τα κριτήρια και η συνεπής οικογένεια κριτηρίων, τα ψευδοκριτήρια και η μοντελοποίηση του προβλήματος απόφασης. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά των τριών βασι-

κών “σχολών”, που δεν είναι άλλες από τη θεωρία των σχέσεων υπεροχής, της πολυκριτηριακής ανάλυσης χρησιμότητας και της αναλυτικής συνθετικής προσέγγισης.

Κεφάλαιο 4ο

Το 4ο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην περιγραφή της πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE TRI-B. Γίνεται ανάλυση του αλγορίθμου της μεθοδολογίας, ενώ παρουσιάζονται και οι τελευταίες εξελίξεις στο πεδίο της. Τελος γίνεται μια αναφορά πρώτα στα γενικά πεδία εφαρμογής της και στη συνέχεια στις περιπτώσεις που αφορούν προβλήματα απόφασης ενεργειακού περιεχομένου και, πιο συγκεκριμένα ενεργειακής αποδοτικότητας.

Κεφάλαιο 5ο

Στο 5ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του “πυρήνα” αυτής της διπλωματικής. Αρχικά γίνεται αναλυτική αναφορά στους λόγους που τεκμηριώσαν την επιλογή της ELECTRE TRI-B. Κατόπιν, περιγράφεται η μοντελοποίηση του προβλήματος της απόφασης και οι βελτιστοποιήσεις που υλοποιήθηκαν στον κώδικα της μεθοδολογίας. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η λειτουργία του Agree εργαλείου του Triple-A, και έτσι ο αναγνώστης προβαίνει στη σύνδεση των όσων περιγράφηκαν στο 2ο κεφάλαιο, με την πολυκριτηριακή μεθοδολογία και τελικά με την εφαρμογή στο εργαλείο Agree.

Κεφάλαιο 6ο

Αυτό το κεφάλαιο προορίζεται για τη σύνοψη των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και για την παρουσίαση των περιθωρίων βελτίωσης που αναγνωρίστηκαν, καθώς και των μελλοντικών επεκτάσεων.

Κεφάλαιο 2

Η ενεργειακή αποδοτικότητα

2.1 Εισαγωγή στην ενεργειακή αποδοτικότητα

Με τον όρο ενεργειακή αποδοτικότητα (energy efficiency) αναφερόμαστε στη χρήση λιγότερης ενέργειας για την πραγματοποίηση της ίδιας διαδικασίας, ή εναλλακτικά στη χρήση της ίδιας ενέργειας για την πραγματοποίηση περισσότερων διαδικασιών. Η μαθηματική διατύπωση του όρου είναι η εξής:

$$\text{Energy Efficiency} = \frac{\text{Energy out}}{\text{Energy in}} \quad (2.1)$$

Σύμφωνα και με τον παραπάνω ορισμό, ο στόχος είναι από κάθε μονάδα ενέργειας που αγοράζουμε (Energy in), να εκμεταλλευόμαστε το μέγιστο δυνατό (Energy out) [9]. Η ελάττωση, δηλαδή, των ενεργειακών μονάδων εισαγωγής που απαιτούνται για την επιθυμητή έξοδο αυξάνει την αποδοτικότητα. Οπουδήποτε χρησιμοποιείται ενέργεια, υπάρχει η δυνατότητα για αύξηση της αποδοτικότητας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής λύσης ενεργειακής αποδοτικότητας είναι οι LED λαμπτήρες φωτισμού, οι οποίοι χρησιμοποιούν σημαντικά λιγότερη ενέργεια για να παράγουν την ίδια ποσότητα φωτός σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως.

2.1.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα και εξοικονόμηση ενέργειας

Υπάρχει συχνά μία σύγχυση ανάμεσα στις έννοιες Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Διατήρηση Ενέργειας. Διατήρηση Ενέργειας (Energy Conservation) επιτυγχάνουμε, όταν χρησιμοποιούμε λιγότερη ενέργεια, προσαρμόζοντας τη συμπεριφορά μας. Ο στόχος είναι δηλαδή η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, περιορίζοντας τα αγαθά και τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούμε [10]. Όταν, για παράδειγμα, επιλέγουμε τις σκάλες αντί για το ασανσέρ, μετακινούμαστε με τα μέσα μαζικής μεταφοράς αντί για το προσωπικό μας αυτοκίνητο, σβήνουμε τα φώτα όταν δεν είμαστε στο δωμάτιο και απενεργοποιούμε τις ηλεκτρικές συσκευές αντί να τις αφήνουμε σε αναμονή, αυτές είναι περιπτώσεις κατά τις οποίες οι αλλαγές στη συμπεριφορά μας έχουν αντίκτυπο στην ενεργειακή κατανάλωση.

Βέβαια, οι δύο έννοιες, αν και ορίζονται με διαφορετικό τρόπο και δεν πρέπει να τις

συγγέουμε, ουσιαστικά οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, που δεν είναι άλλο από την μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

2.1.2 Τα πολλαπλά οφέλη της ενεργειακής αποδοτικότητας

Τα οφέλη της ενεργειακής απόδοσης είναι σημαντικά και εκτείνονται σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Πρακτορείο Ενέργειας (International Energy Agency), ο θετικός αντίκτυπος της δεν περιορίζεται στο βασικό, αλλά προφανές, πλεονέκτημα της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, κάποια από τα βασικότερα οφέλη είναι τα εξής [11]:

1. Εξοικονόμηση Ενέργειας: Ένα πλεονέκτημα που προκύπτει από τον ορισμό της αποδοτικότητας. Εφόσον για την ίδια διαδικασία χρησιμοποιούμε λιγότερη ενέργεια, εξοικονομούμε.
2. Ενεργειακή Ασφάλεια: Με τον όρο Ενεργειακή Ασφάλεια (Energy Security) αναφερόμαστε στην ακώλυτη πρόσβαση σε αξιόπιστες πηγές ενέργειας σε προσιτές τιμές, για την πραγματοποίηση όλου του φάσματος των δραστηριοτήτων που είναι απαραίτητες (θέρμανση, μεταφορές, παραγωγή κλπ). Η ενεργειακή αποδοτικότητα μειώνει τις ανάγκες για ενέργεια και, συνεπώς, αυτή η εξασθένιση της ζήτησης μειώνει τις εθνικές και τοπικές ανάγκες για εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, όπως πετρελαίου, φυσικού αερίου και γαιανθράκων. Έτσι, η εξάρτηση από τους εξωτερικούς προμηθευτές και την ιδιαίτερα κοστοβόρο διαδικασία της εισαγωγής πόρων φθίνει. Βέβαια, από την άλλη, οι μειωμένες ανάγκες για ενέργεια δίνουν τη δυνατότητα στους παρόχους-εξαγωγείς καυσίμων να αυξήσουν τις εξαγωγές τους [12].
3. Μειωμένες τιμές ενέργειας: Η μείωση στη ζήτηση ενέργειας, ως αποτέλεσμα των μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας, μπορεί να οδηγήσει σε άμεση μείωση των τιμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι τιμές καυσίμων των οχημάτων. Στα οχήματα εφαρμόζονται μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας σε μεγάλη κλίμακα, συνεπώς υπάρχει γενικευμένη μειωμένη ζήτηση και αναπόφευκτα οι τιμές μειώνονται. Ακόμα, οι βελτιστοποιήσεις αποδοτικότητας που επιτυγχάνουν οι πάροχοι ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση των λειτουργικών εξόδων των τελευταίων και την αύξηση του περιθωρίου κέρδους τους, επιτρέποντάς τους να προχωρήσουν και για αυτό το λόγο σε μείωση τιμών [13].
4. Ενεργειακή Προσβασιμότητα: Ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, συνεχίζει να μην έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χρήση μέσω ενεργειακής αποδοτικότητας, τόσο στην πλευρά της προσφοράς, όσο και στην πλευρά της ζήτησης, μπορεί να βοηθήσει στην ευρεία διάθεση της ενέργειας. Παραδείγματος χάριν, για τις αραιοκατοικημένες περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το ενεργειακό δίκτυο, τα μειωμένα λειτουργικά κόστη των παρόχων ενέργειας που προκύπτουν από την υιοθέτηση μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας, σε συνδιασμό με την ελάττωση των τιμών στις τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας που χρησιμοποιούν

οι καταναλωτές και βέβαια με τη μείωση του κόστους κατανάλωσης που προκύπτει από τις μειωμένες ανάγκες για ενέργεια λόγω της αποδοτικότητας, μπορούν να δώσουν λύση στο πρόβλημα της οικουμενικής πρόσβασης[14].

5. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου: Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας συνεπάγεται ελαττωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου(GHG), είτε άμεσων που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, είτε έμμεσων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο περιορισμός των εκπομπών βλαβερών αερίων συμβάλλει στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη που αυτή συνεπάγεται [15].
6. Ελάττωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης: Οι δραστηριότητες που συνδέονται τόσο με την παραγωγή όσο και με την κατανάλωση ενέργειας αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες ρύπανσης του αέρα. Η χρήση οικιακών συσκευών ενεργειακής αποδοτικότητας, σε συνδιασμό με τις κτιριακές μετασκευές που προάγουν την αποδοτικότητα, μειώνουν σημαντικά τις ανάγκες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αντίστοιχες βελτιώσεις στους βιομηχανικούς χώρους συνδράμουν στις ελαττωμένες ανάγκες παραγωγής ενέργειας. Συνεπώς, παράγεται, και άρα καταναλώνεται, λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα την μείωση των ρυπογόνων αερίων και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.
7. Υγεία και Ευεξία: Η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και η συνακόλουθη μείωση της μόλυνσης του αέρα βελτιώνει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Εκτός από τη βελτίωση στους εξωτερικούς χώρους, αισθητά είναι και τα πλεονεκτήματα στους εσωτερικούς χώρους. Οι μετασκευές ενεργειακής αποδοτικότητας τόσο στα κτίρια κατοικιών (residential buildings), όσο και στα εμπορικά κτίρια(commercial buildings) αυξάνουν την ευεξία των ατόμων που τα χρησιμοποιούν (λιγότερα αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακές ασθένειες, αλλεργίες). Τα μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας, όπως είναι η βελτίωση της μόνωσης, της θέρμανσης και του εξαερισμού, βελτιώνουν σημαντικά και την ποιότητα του αέρα. Θετικό αντίκτυπο διακρίνουμε βέβαια και στην ψυχική υγεία των ανθρώπων. Χρησιμοποιώντας λύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, τα νοικοκυριά έχουν ανάγκη από λιγότερη ενέργεια και συνεπώς μειώνονται τα έξοδα τους για τις βασικές υπηρεσίες ενέργειας (θέρμανση, ψύξη, φωτισμός, λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών), οπότε συνδιαστικά και με άλλα μέτρα (οικονομικούς μηχανισμούς στήριξης, κοινωνική αλληλεγγύη) οδηγούμαστε στην καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας [16].
8. Αυξημένη Παραγωγικότητα: Αποδοτικότητα σημαίνει πως χρησιμοποιούμε την ίδια ενέργεια για την πραγματοποίηση περισσότερων διαδικασιών. Έχουμε δηλαδή μία αύξηση των μονάδων παραγωγής ανά μονάδα ενέργειας. Το κόστος που εξοικονομούμε μπορεί να επενδυθεί, ώστε να βελτιωθεί η λειτουργία και η αξιοπιστία των διαδικασιών, με αποτέλεσμα να μειωθεί ο χρόνος εκτός λειτουργίας του εξοπλισμού (downtime) και οι βλάβες, και συνεπώς να αυξηθεί η παραγωγικότητα [17].

9. Οικονομικά Οφέλη: Η αποδοτική χρήση της ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε λιγότερη ενέργεια και άρα να μειώνουμε τις δαπάνες που απαιτούνται για διαδικασίες όπως η θέρμανση, η ψύξη, ο φωτισμός, οι μετακινήσεις, η λειτουργία του βιομηχανικού εξοπλισμού και άλλες καθημερινές δραστηριότητες. Συνεπώς, οδηγούμαστε στην απελευθέρωση χρηματικών πόρων για τα νοικοκυριά, τις επιχειρήσεις και τις κυβερνήσεις. Ακόμα, δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας στον κλάδο ενεργειακών υπηρεσιών (ESCOs, Energy Service Companies) για την υλοποίηση έργων ενεργειακής αποδοτικότητας [18].
10. Δημόσιοι Προϋπολογισμοί: Οι κυβερνήσεις μπορούν να ωφεληθούν ποικιλοτρόπως εφαρμόζοντας μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας. Καταρχάς, μείωση της απαραίτητης ενέργειας συνεπάγεται μείωση των δαπανών που απαιτούνται για τους λογαριασμούς ενέργειας. Είναι δυνατή επίσης η αύξηση του εισόδηματός τους με την επιβολή φόρου επί των πωλήσεων προϊόντων και υπηρεσιών ενεργειακής αποδοτικότητας και φόρου ακινήτων στα ενεργειακά αποδοτικά μετασκευασμένα κτίρια. Ακόμα οι μείωση τιμών, που πιθανώς συνεπάγεται η υιοθέτηση μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας, απαλλάσει τις κυβερνήσεις από τις δαπάνες για επιδοτήσεις ενέργειας [19].
11. Αξία Ιδιοκτησίας: Φαίνεται πως, τόσο τα άτομα όσο και οι επιχειρήσεις είναι πρόθυμοι να διαθέσουν υψηλότερα ποσά, είτε για την αγορά, είτε για την ενοικίαση ιδιοκτησίας με βελτιστοποιημένη ενεργειακή απόδοση. Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, σε συνδιασμό με τη μείωση των λειτουργικών δαπανών που αυτή αποφέρει, ελκύουν τους αγοραστές/ενοικιαστές [20].

2.1.3 Περιοχές βελτίωσης

Η υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών λύσεων προσφέρει πολλαπλά οφέλη, για αυτό και εξάλλου πρόκειται για μία από τις κύριες στρατηγικές που ακολουθούνται για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την σταθεροποίηση της ενεργειακής ασφάλειας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν μερικά σημεία στα οποία χρειάζεται να δοθεί προσοχή.

Το πρώτο από αυτά δεν είναι άλλο από το "φαινόμενο αναπήδησης" (rebound effect). Χρησιμοποιώντας την ενέργεια πιο αποδοτικά σημαίνει πως για την ίδια διαδικασία χρειαζόμαστε λιγότερη ενέργεια και συνεπώς λιγότερους οικονομικούς πόρους. Αυτή η εξοικονόμηση, μπορεί να οδηγήσει σε μία αύξηση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας είτε για την ίδια διαδικασία (direct rebound effects), είτε για κάποια άλλη (indirect rebound effects) [21]. Δύναται μάλιστα η αύξηση αυτή να είναι τόσο μεγάλη που τελικά να οδηγηθούμε σε μηδενική εξοικονόμηση ενέργειας, ένα φαινόμενο γνωστό ως "backfire".

Το δεύτερο είναι το λεγόμενο ενεργειακό χάσμα (energy efficiency gap). Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές λύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, ωστόσο η εκμετάλλευσή τους δεν είναι η μέγιστη δυνατή και άρα το επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας είναι μικρότερο από το θεωρητικά αναμενόμενο. Παρατηρείται δηλαδή, μια συστηματική μη εκμετάλλευση των φαινομενικά ελκυστικών επενδυτικών επιλογών στην ενεργειακή απόδοση. Βέβαια, οι τεχνολογίες που

προωθούν την ενεργειακή αποδοτικότητα, είναι σχετικά “νέες” χρονικά και η ευρεία διάδοση νέων τεχνολογιών είναι συνήθως μία διαδικασία που εξελίσσεται σταδιακά. Συνεπώς το πρόβλημα ανάγεται στο να προσδιορίσουμε τις αιτίες που καθυστερούν τη διάδοση των τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης [22]. Οι αστοχίες της αγοράς (market failures), το φαινόμενο κατά το οποίο τα άτομα επιλέγουν ορθά με βάση το ατομικό τους συμφέρον, αλλά η επιλογές τους δεν οδηγούν στα βέλτιστα αποτελέσματα για το σύνολο, ευθύνονται σε μεγάλο ποσοστό για αυτό το ενεργειακό παράδοξο (energy paradox). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αστοχίας είναι προβλήματα που συνδέονται με τη διαθεσιμότητα της υπάρχουσας πληροφορίας, όπως αναλυτικά περιγράφουν οι Stavins και Jaffe [22]. Μία άλλη ομάδα αστοχίας είναι οι περιβαλλοντικές εξωτερικές επιδράσεις ή εξωτερικότητες (environmental externalities), οι οποίες δεν συνδέονται άμεσα με το χάσμα, αλλά και εκείνες με τη σειρά τους, όπως και η παραπάνω κατηγορία, συνήθως δικαιολογούν την εφαρμογή πολιτικών. Τέλος η αβεβαιότητα (π.χ. μελλοντικές τιμές ενέργειας, μη αναστρέψιμη επένδυση) είναι επίσης ένας από τις αιτίες του χάσματος που δεν αποτελεί αστοχία της αγοράς (non-market failures) [22].

Ειδικά για το ενεργειακό χάσμα, υπάρχει ιδιαίτερη μέριμνα για την άμβλυνσή του. Η διαφορά ανάμεσα στο πραγματικό και το βέλτιστο επίπεδο κατανάλωσης πρέπει να γεφυρωθεί στα πλαίσια της παγκόσμιας στρατηγικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Σε αυτή την κατεύθυνση θεσπίζονται ολοένα και περισσότερα και πιο αποδοτικά μέτρα και πολιτικές, που έχουν ως στόχο τη βέλτιστη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Η προώθηση σχημάτων χρηματοδότησης επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας είναι από τα πιο σημαντικά.

2.2 Η ενεργειακή αποδοτικότητα σε διάφορους τομείς

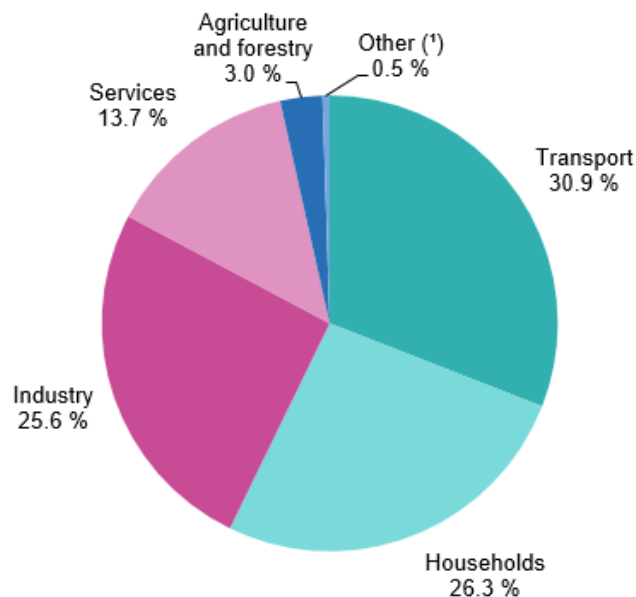
Η κάλυψη των απαιτήσεων της καθημερινότητας των σύγχρονων κοινωνιών επιτάσσει την κατανάλωση μεγάλων ενεργειακών ποσοτήτων. Χαρακτηριστικά, το 2019, σύμφωνα με δεδομένα της (Eurostat), της στατιστικής υπηρεσίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας διαμορφώθηκε όπως παρακάτω στο Σχήμα 2.1 ([1]).

Οι τομείς που ευθύνονται για τη μεγαλύτερη κατανάλωση είναι η βιομηχανία (industry), οι μεταφορές (transport) και οι οικιακές δραστηριότητες (households). Παρόμοια είναι και η παγκόσμια εικόνα, με τους ίδιους τομείς να πρωτοστατούν στην κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς η ανάγκη για την εφαρμογή λύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας στους παραπάνω τομείς είναι πολύ μεγάλη. Σε αυτή την κατεύθυνση, έχουν θεσπιστεί διάφορα μέτρα και πολιτικές, που στοχεύουν στην πρόωθηση της ενεργειακής απόδοσης, τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.2.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα στη βιομηχανία

Η βιομηχανία είναι ένας από τους τομείς που καταναλώνουν συστηματικά ενέργεια. Πρόκειται μάλιστα για τον τομέα που έρχεται δεύτερος στη συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ευρώπη, μετά τον κλάδο των μεταφορών. Η αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητάς του αποτελεί αντικείμενο συνεχούς μελέτης και βελτίωσης και δύναται να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ο Tanaka, [23] παρουσιάζει τις πολιτικές αποδοτικότητας στη βιομηχανία που

Final energy consumption by sector, EU, 2019
(% of total, based on tonnes of oil equivalent)



(*) International aviation and maritime bunkers are excluded from category Transport.

Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_s)

eurostat 

Σχήμα 2.1: Energy consumption by sector, EU, 2019 (Πηγή: [1])

εφαρμόζονται σε διάφορες χώρες. Κάνει λόγο για τρεις κατηγορίες πολιτικών. Στην πρώτη υπάγονται κανονισμοί που ρυθμίζουν την αποδοτικότητα του βιομηχανικού εξοπλισμού, προτάσεις για τη μετατροπή των παραγωγικών διεργασιών (processes) σε νέες που προωθούν την ενεργειακή αποδοτικότητα, την εγκατάσταση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (energy management systems) και τις διαπραγματευόμενες συμφωνίες (negotiated agreements). Στη δεύτερη κατηγορία, αυτή των οικονομικών πολιτικών, υπάγονται οι ενεργειακοί φόροι, οι φορολογικές διαφοροποιήσεις ή απαλλαγές, κίνητρα όπως δάνεια, επιδοτήσεις και εκπτώσεις, εμπορικό σύστημα εκπομπών (cap and trade scheme) και έλεγχος στα τιμολόγια ενέργειας. Στην τρίτη και τελευταία κατηγορία ανήκουν οι ενεργειακοί έλεγχοι (energy audits), η συνεργασία και οι συμπράξεις βιομηχανίας και κυβερνήσεων, οι συμβουλευτικές υπηρεσίες και η κατάρτιση ατόμων στη βιομηχανία σχετικά με την αποδοτικότητα.

Πιο συγκεκριμένα, εμβαδύνοντας σε κάποια από τα παραπάνω στοιχεία:

- Αποδοτικότητα του βιομηχανικού εξοπλισμού: Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται πρέπει να υπακούει στα πρότυπα ενεργειακής αποδοτικότητας (energy efficiency standards). Σε αυτή την κατεύθυνση τα ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, MEPS (Minimum Energy Performance Standards, καθορίζουν τα κατώτερα όρια ενεργειακής απόδοσης

που πρέπει να πληρούν τα είδη του βιομηχανικού εξοπλισμού. Μηχανήματα που δεν συμβιβάζονται με τα πρότυπα δεν μπορούν να κυκλοφορούν στην αγορά και να χρησιμοποιούνται. Επίσης ο εξοπλισμός πρέπει να συντηρείται στους προκαθορισμένους χρόνους που ορίζονται από τον κατασκευαστή του, και βέβαια παλιά μηχανήματα πρέπει να αποσύρονται και να αντικαθίστανται με νέα, τα οποία είναι ενεργειακά αποδοτικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ηλεκτρικοί κινητήρες (electric motors), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το 60 % της συνολικής παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης και συνεπώς πρέπει να υπάρχει μέριμνα σε ό,τι αφορά την αποδοτικότητά τους [24]. Οι υπάρχοντες πρέπει να απενεργοποιούνται, όταν δεν χρησιμοποιούνται (υπάρχουν λύσεις σε πρόβλήματα που δύναται να προκαλέσει η απενεργοποίησή τους), να ευθυγραμμίζονται με τις αντλίες και να έχουν το κατάλληλο μέγεθος (να μην είναι μεγαλύτεροι από όσο χρειάζεται), ενώ βέβαια συντηρούνται κατάλληλα. Σημαντικό είναι σε κάθε περίπτωση να χρησιμοποιείται ο αποδοτικότερος κινητήρας.

- **Μετατροπή των παραγωγικών διαδικασιών:** Οι διαδικασίες παραγωγής χρησιμοποιούν ενέργεια, αλλά συχνά χωρίς να εκμεταλλεύονται στο μέγιστο τις δυνατότητες αποδοτικότητας. Μελετώντας εξονυχιστικά την παραγωγική διαδικασία μιας βιομηχανίας, μπορεί να προκύψουν ευκαιρίες βελτίωσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εκμετάλλευση της θερμότητας που εκλύεται ως υπό-προϊόν κατά την παραγωγική διαδικασία (excess heat) για χρήση σε άλλες διαδικασίες (excess heat recovery) [25].
- **Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Ενεργειακοί Έλεγχοι:** Οι βιομηχανικές διαδικασίες στην πλειοψηφία τους δεν λειτουργούν με τη βέλτιστη αποδοτικότητα. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβαίνει για διάφορους λόγους, όπως το ανθρώπινο λάθος, οι τεχνολογικές εξελίξεις και τα νέα επιστημονικά δεδομένα. Επομένως είναι φυσικό να υπάρχουν αστοχίες που κοστίζουν σε αποδοτικότητα, όπως σπατάλη ενέργειας και καταναλώσεις μεγαλύτερες από αυτές που απαιτούνται. Ένα Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System/EnMS) εντοπίζει περιοχές που μπορούν να βελτιωθούν, ώστε να η ενέργεια να χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά και εφαρμόζει σημεία ελέγχου για την άμεση διόρθωση των αστοχιών. Ενεργειακός Έλεγχος (energy audit) είναι η διαδικασία παρακολούθησης των διεργασιών και των ροών ενέργειας μίας βιομηχανίας. Διεξάγεται μια εξονυχιστική ανάλυση των συστημάτων, που έχει ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό των προβληματικών περιοχών και των σημείων που πρέπει να διορθωθούν. Ο ενεργειακός έλεγχος συχνά προηγείται ή/και συνδιάζεται με τη διαδικασία ανάπτυξης ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας.
- **Ενεργειακοί Φόροι:** Πρόκειται για μία οικονομική πολιτική που εφαρμόζεται αρκετά συχνά. Φόροι επιβάλλονται στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και ηλεκτρικής ενέργειας και με αυτό τον τρόπο η τελική τιμή κατανάλωσης αυξάνεται. Συνεπώς, η χρήση της ίδιας ποσότητας ενέργειας μεταφράζεται αυτόματα σε αύξηση των εξόδων της βιομηχανίας. Η στροφή λοιπόν προς τις λύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας ενθαρρύνεται, εφόσον λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια σημαίνει και λιγότερες φορολογικές δαπάνες. Με

παρόμοια λογική λειτουργεί και ο φόρος άνθρακα (carbon tax). Στην περίπτωση αυτή φορολογούνται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι λύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για μία συγκεκριμένη διαδικασία. Λιγότερη ενέργεια συνεπάγεται μειωμένες εκπομπές και άρα λιγότερα φορολογικά έξοδα.

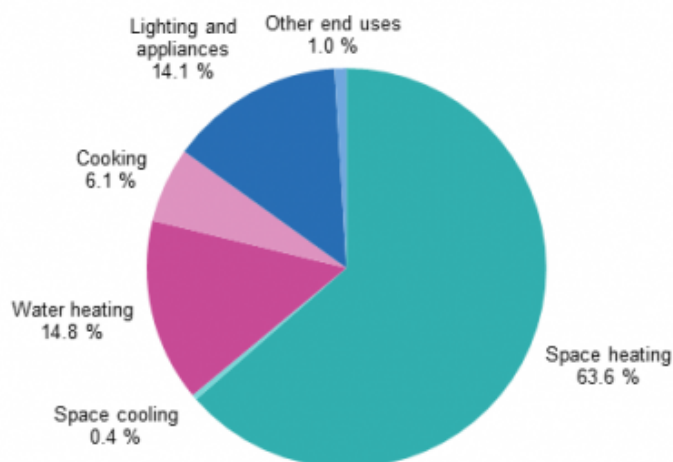
- Φορολογικές απαλλαγές για ενεργειακή αποδοτικότητα: Θα μπορούσε ίσως να χαρακτηριστεί το αντίστροφο των ενεργειακών φόρων. Σε αυτή την περίπτωση ενθαρρύνεται η στροφή προς την ενεργειακή αποδοτικότητα με τη μείωση των βιομηχανικών δαπανών που προέρχεται από φορολογικές ελαφρύνσεις. Ένας εναλλακτικός ορισμός θα μπορούσε να είναι ο εξής που ορίζει τη φορολογική ελάφρυνση ενεργειακής αποδοτικότητας (energy efficiency tax relief) ως το μέσο που παρέχει, ειδική φορολογική μεταχείριση για την αγορά ενεργειακά αποδοτικών προϊόντων και τεχνολογιών [26].
- Σύστημα ανώτατου ορίου και εμπορίου (caps and trade system): Οι κυβερνήσεις εκδίδουν άδειες που επιτρέπουν σε ορισμένες βιομηχανίες ένα ανώτατο όριο (cap) εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση που το ξεπεράσουν φορολογούνται, ενώ, εάν δεν το εξαντλήσουν, μπορούν να το κρατήσουν για μελλοντική χρήση ή να το πουλήσουν σε άλλες βιομηχανίες (trade). Καθώς τα ανώτατα όρια τείνουν να γίνονται όλο και μικρότερα, η ροπή αυτή οδηγεί τις βιομηχανίες να στραφούν σε λύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, ώστε να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και άρα και τις εκπομπές τους. Έτσι, αφενός λειτουργούν με περιβαλλοντική συνείδηση και αφετέρου δεν είναι εξαρτημένες από τις διακυμάνσεις στις τιμές των αδειών που βρίσκονται σε πώληση (οι οποίες είναι πολύ πιθανό να αυξηθούν σημαντικά).

Όλα τα παραπάνω σημεία είναι ενδεικτικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί ενεργειακή αποδοτικότητα στη βιομηχανία, είτε με πρακτικές μεθόδους στον εξοπλισμό και τις διαδικασίες, είτε έμμεσα μέσω της εφαρμογής πολιτικών, οι οποίες προωθούν την στροφή στην αποδοτικότητα. Σαφώς η λίστα δεν είναι εξαντλητική και βέβαια εκτός από πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν και αδυναμίες-αστοχίες.

2.2.2 Ενεργειακή αποδοτικότητα στον οικιακό τομέα

Οι οικιακές δραστηριότητες πρωταγωνιστούν με τη σειρά τους στην κατανάλωση ενέργειας. Πράγματι, για το 2019, το 26.3 % της συνολικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε για δραστηριότητες που σχετίζονται με τα νοικοκυριά (residential sector). Πιο αναλυτικά, η επιμέρους κατανομή διαμορφώθηκε όπως παρακάτω στο Σχήμα 2.2 για το 2019.

Η θέρμανση των χώρων και του νερού, η λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών και ο φωτισμός φαίνεται πως είναι οι κύριες περιοχές κατανάλωσης. Και στον οικιακό τομέα, όπως και στη βιομηχανία η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να βελτιωθεί με διάφορους τρόπους. Οι ρυθμιστικές πολιτικές που εφαρμόζουν στις τεχνολογίες που υπάρχουν στην αγορά, τα οικονομικά κίνητρα και η επαρκής πληροφόρηση είναι κάποιοι από αυτούς. Πιο αναλυτικά κάποια ενδεικτικά παραδείγματα είναι τα εξής:

Final energy consumption in the residential sector by use, EU, 2019

Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

eurostat 

Σχήμα 2.2: Final energy consumption in the residential sector by use, EU, 2019 (Πηγή: [2])

■ Ρυθμιστικές πολιτικές:

- Χρήση ενεργειακά αποδοτικών οικιακών ηλεκτρικών συσκευών: Συσκευές που δεν ακολουθούν τα ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης (MEPS) που έχουν θεσπιστεί στην κατηγορία τους, δεν πρέπει να μπορούν να κυκλοφορήσουν στην αγορά. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η οδηγία για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού (ecodesign) [27]. Έτσι οι παραγωγοί ή/και οι διακινητές συσκευών δεσμεύονται νομοθετικά, με αποτέλεσμα οι καταναλωτές να μην έχουν την επιλογή να αγοράσουν τα λιγότερο αποδοτικά προϊόντα.
- Εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (RES Installations): Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) χαρακτηρίζονται εκείνες που δεν μπορούν να εξαντληθούν, όπως ο ήλιος, ο αέρας και η βιομάζα. Αντίθετα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και οι γαιάνθρακες έχουν περιορισμένα αποθέματα και κάποια στιγμή θα καταναλωθούν στο σύνολό τους. Αν και στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει απόλυτη σύγκλιση με τον ορισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας, η χρήση συστημάτων ΑΠΕ μειώνει την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και όλων των βλαβερών συνεπειών που αυτή συνεπάγεται. Το πιο χαρακτηριστικό ίσως παράδειγμα εγκατάστασης ΑΠΕ είναι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες.

■ Πολιτικές Πληροφόρησης:

- Σήμανση με ενεργειακές ετικέτες: Οι καταναλωτές πλέον μπορούν εύκολα να αναγνωρίσουν πόσο ενεργειακά αποδοτική είναι μία συσκευή, εφόσον συμβουλευτούν την ένδειξη της ενεργειακής κλίμακας που αυτή φέρει. Οι διαθέσιμες ετικέτες είναι τα γράμματα A,B,C,D,E,F,G, με το A να δηλώνει τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση και το G την ελάχιστη. Το σύστημα αξιολόγησης (A-G) εφαρμόζεται και για την κατηγοριοποίηση των λαμπτήρων φωτισμού, με τους LED να έχουν τη βέλτιστη απόδοση, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που είναι οι πλέον λιγότερο αποδοτικοί. Βέβαια υπάρχουν και άλλα αντίστοιχα προγράμματα πληροφοριακού χαρακτήρα.
- Ενεργειακοί Έλεγχοι: Ενεργειακές αξιολογήσεις (energy audits) διεξάγονται και στις κατοικίες, ώστε να γίνει μία λεπτομερής χαρτογράφηση των ροών ενέργειας και να εντοπιστούν οι προβληματικές περιοχές. Ακολουθούν οι προτάσεις το ειδικού για τη μείωση των απωλειών και τις βελτιστοποιήσεις ενεργειακής αποδοτικότητας που μπορούν να εφαρμοστούν. Οι προτάσεις αυτές μπορεί να αφορούν φυσικά και αλλαγές στην συμπεριφορά των ανθρώπων που χρησιμοποιούν τις κατοικίες, όπως για παράδειγμα οδηγίες για τους βαθμούς στους οποίους πρέπει να ρυθμίζεται ο θερμοστάτης.

■ Οικονομικά κίνητρα και πολιτικές:

- Η συγκεκριμένη κατηγορία είναι από τις πιο αποτελεσματικές. Συχνά το κόστος που σχετίζεται με κάποια ενέργεια βελτίωσης την ενεργειακής αποδοτικότητας είναι μεγάλο. Γίνονται συνεπώς προσπάθειες, ώστε το οικονομικό εμπόδιο να ξεπεραστεί. Οι μειώσεις στους φόρους και οι προνομιακές τιμές στους λογαριασμούς ενέργειας στοχεύουν στην οικονομική ελαφρυνση των νοικοκυριών που αποφασίζουν να επενδύσουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Ακόμα υπάρχουν προγράμματα που προσφέρουν επιδοτήσεις, καθώς και σε κάποιες περιπτώσεις προνομιακές τιμές επιτοκίων σε δάνεια που λαμβάνονται για τον παραπάνω σκοπό.

Και σε αυτή τη περίπτωση αναφέρθηκαν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα και η λίστα δεν είναι σε καμία περίπτωση πλήρης και εξαντλητική.

2.2.3 Ενεργειακά αποδοτικά κτίρια

Η ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτίρια μπορεί να επιτευχθεί είτε με τις στοχευμένες ανακαινίσεις στα ήδη υπάρχοντα κτίρια (renovated buildings), είτε με τον ειδικό σχεδιασμό των νέων κτιρίων (construction of new buildings). Είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα είδη κτιρίων, βιομηχανικά, οικιακά ή εμπορικά και αυξάνεται σε δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια. Σε ορισμένες περιπτώσεις καθορίζονται επίσης ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης για τα κτίρια.

Τα δημοφιλή Πράσινα ή Βιώσιμα κτίρια (Green Buildings or Sustainable Buildings), έχουν ως μία από τις θεμελιώδεις αρχές τους την αποδοτική χρήση ενέργειας σε όλο το κύκλο ζωής

τους. Αυτό σημαίνει πως κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία τους η ενέργεια που καταναλώνουν μειώνεται σημαντικά.

Κάποιοι από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα στα κτίρια κατά το σχεδιασμό των κτιρίων είναι οι εξής παρακάτω [28]:

- **Μελέτη θέσης και προσανατολισμού:** Τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας που κατασκευάζεται το κτίριο πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Παραδείγματος χάριν πρέπει να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο το κτίριο εκτίθεται στον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας και που υπάρχει σκιά, ώστε να μεγιστοποιηθεί η απορρόφηση θερμότητας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και να ελαχιστοποιηθεί κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Βέβαια ιδανικό είναι εάν υπάρχει η δυνατότητα να επιλέγεται εξ αρχής μία τοποθεσία που προσφέρει οφέλη, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη δέντρων σε τέτοια απόσταση που αφενός δεν οδηγούν σε υπερβολική σκίαση και αφετέρου μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς τις απώλειες ενέργειας.
- **Βελτιώσεις στη μόνωση:** Τόσο οι τοίχοι, όσο και τα παράθυρα και οι οροφές πρέπει να έχουν το κατάλληλο πάχος μόνωσης, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες θερμότητας που υπάρχουν ως αποτέλεσμα της ύπαρξης θερμικών γεφυρών και της υψηλής διαπερατότητας του αέρα. Τα υλικά βέβαια που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι φιλικά προς το περιβάλλον.
- **Σχεδιασμός των παραθύρων:** Το μέγεθος των παραθύρων προσαρμόζεται ανάλογα με την τοποθεσία τους. Παράθυρα που βρίσκονται στη νότια πλευρά του κτιρίου πρέπει να έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια, ενώ εκείνα που βρίσκονται στη βόρεια πλευρά μικρότερη, ώστε να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη ενέργειας και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες.

Μεγάλα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας βέβαια μπορούμε να έχουμε και από την χρήση ενός αποδοτικού συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού, το ευρύτερα γνωστό HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Οι στοχευμένες μετασκευές του συστήματος, που προσανατολίζονται κυρίως στην αναβάθμιση των μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων από τα οποία αυτό αποτελείται και στην προσθήκη σημείων ελέγχου διάφορων παραμέτρων, αυξάνουν το βαθμό αποδοτικότητας. Οι αποδοτικές επιλογές στο φωτισμό, είναι αντίστοιχα εξίσου μεγάλης σημασίας. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως πρέπει να αντικαθιστούνται με λαμπτήρες νέας τεχνολογίας LED. Επίσης η χρήση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας BEMS (Building Energy Management System), μπορεί με τη σειρά της να βοηθήσει στην αποδοτική χρήση της ενέργειας. Οι αυτοματισμοί που παρέχει, σύμφωνα με τα δεδομένα που λαμβάνει από τους εγκατεστημένους αισθητήρες μειώνουν τις σπατάλες στη χρήση. Παραδείγματος χάριν το σύστημα HVAC, όπως και ο φωτισμός των δωματίων ρυθμίζονται ανάλογα με την παρουσία ή τη μη παρουσία ανθρώπων στο χώρο.

Φυσικά καθώς τις περισσότερες φορές οι παραπάνω επιλογές συνδέονται με ένα αρκετά υψηλό κόστος σχεδιασμού και υλοποίησης, παρέχονται συγκεκριμένα κίνητρα και εφαρμόζονται κάποιες πολιτικές από τις κυβερνήσεις για την υλοποίησή τους. Τα προγράμματα προώθησης

της αποδοτικότητας στα κτίρια και η έκδοση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης που ενημερώνουν τους υποψήφιους αγοραστές/ενοικιαστές για την ενεργειακή κατάσταση των κτιρίων δρουν προς αυτή την κατεύθυνση. Βέβαια δεν θα μπορούσαν να μην υπάρχουν προγράμματα χρηματοδότησης για τις παραπάνω επενδύσεις.

Τα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενέργειας (nearly zero-energy buildings NZEB) και τα κτίρια μηδενικής ενέργειας (zero-energy buildings ZEB), τα οποία χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή απόδοση, αποτελούν τον επόμενο στόχο.

2.2.4 Ενεργειακή αποδοτικότητα στις μεταφορές

Ο κλάδος των μεταφορών είναι αυτός με το μεγαλύτερο ποσοστό τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, το 30.9 % σχετίζεται με δραστηριότητες του τομέα. Στις ευρωπαϊκές χώρες, τα επιβατηγά αυτοκίνητα και οι μεταφορές εμπορευμάτων με φορτηγά ευθύνονται για τη μεγαλύτερη κατανάλωση με τα εναέρια και θαλάσσια μέσα να ακολουθούν με σημαντικά λιγότερη συμβολή [29]. Φυσικά, και σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να βελτιωθεί, οι οποίοι ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

■ Ρυθμιστικές Πολιτικές:

- Βελτιστοποιήσεις στις μηχανές κίνησης και στο σχεδιασμό των οχημάτων: Για κάθε μέσο μεταφοράς, είτε πρόκειται για αυτοκίνητο, είτε για φορτηγό, τρένο ή αεροπλάνο πρέπει να επιλέγονται οι πλέον ενεργειακά αποδοτικές μηχανές. Παραδείγματος χάριν οι ηλεκτρικές μηχανές των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν καλύτερη απόδοση καυσίμου από τις μηχανές εσωτερικής καύσης των συμβατικών οχημάτων. Επίσης στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής οχημάτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι που αυξάνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα τους, όπως το μέγεθος.
- Σχεδιασμός και υλοποίηση πλάνου στις δημόσιες μεταφορές: Η επανεξέταση των διαδρομών που ακολουθούνται από τη δημόσια συγκοινωνία, είναι πιθανό να οδηγήσει σε βελτιώσεις στην αποδοτικότητα. Διαδρομές στις οποίες η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι περιορισμένη ή δεν διανύονται άσκοπες αποστάσεις πρέπει να επιλέγονται. Ειδικά για τον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών η μελέτη και βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος των μεταφορών σε συνδυασμό με την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικής οδήγησης, επιτρέπει την εύρεση βέλτιστων τιμών για την ταχύτητα και τις ώρες αναχώρησης του τρένου έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας [30].
- Ώθηση προς τη χρήση δημόσιας συγκοινωνίας ή άλλων βιώσιμων επιλογών: Πρόκειται για έναν έμμεσο τρόπο με τον οποίο η ενέργεια στις μεταφορές θα μπορεί να χρησιμοποιείται συνολικά πιο αποδοτικά. Χρησιμοποιώντας εναλλακτικούς τρόπους, όπως το μετρό, τα λεωφορεία ή το ποδήλατο και το περπάτημα, ουσιαστικά κάνουμε τη δουλειά που χρειάζεται, εν προκειμένω τη μεταφορά μας από ένα σημείο Α

σε ένα σημείο B, μειώνοντας την συνολική κατανάλωση ενέργειας. Η αλλαγή αυτή (modal swift) μπορεί να προωθηθεί με την ανάπτυξη, βελτίωση και επέκταση των υποδομών της δημόσιας συγκοινωνίας.

■ Πολιτικές Πληροφόρησης:

- Ετικέτες στα αυτοκίνητα: Οι ετικέτες παρέχουν πληροφορίες στους υποψήφιους αγοραστές σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι εξασφαλίζεται διαφάνεια και οι καταναλωτές ενημερώνονται επίσημα για τα χαρακτηριστικά του οχήματος και συνεπώς μπορούν να λάβουν σωστές αποφάσεις. Επίσης οι κατασκευαστές, μιας και υποχρεώνονται να παρουσιάσουν επίσημα τα στοιχεία, οδηγούνται στην παραγωγή ολοένα και πιο αποδοτικών οχημάτων.
- Ενημέρωση για την οικολογική οδήγηση: Η οικολογική οδήγηση (Eco-Driving) είναι η οδηγική συμπεριφορά που συνδέεται με την ενεργειακά αποδοτική χρήση των οχημάτων. Ακολουθώντας κάποιες συνήθειες στην οδήγηση, μπορούμε να μειώσουμε την κατανάλωση καυσίμου. Παραδείγματος χάριν η αλλαγή της σχέσης μετάδοσης στο κιβώτιο ταχυτήτων την κατάλληλη στιγμή, όπως και η ομαλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις ή το σβήσιμο του κινητήρα στις στάσεις είναι κάποιες καλές πρακτικές.

■ Οικονομικές Πολιτικές:

- Επιβολή φόρων: Οι φορολογικές υποχρεώσεις που συνδέονται με τη χρήση των οχημάτων είναι ένας από τους τρόπους με τους οποίους γίνεται προσπάθεια για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η αγορά οχημάτων που δεν είναι και τα πλέον αποδοτικά μπορεί να συνοδεύεται με την υποχρέωση για την επιβολή μεγαλύτερης φορολογίας. Αντίθετα στα πιο αποδοτικά η φορολογία μπορεί να είναι μειωμένη.
- Επιδοτήσεις αγοράς: Ενισχύσεις με τη μορφή επιδοτήσεων παρέχονται για την αγορά ενεργειακά αποδοτικών οχημάτων, όπως παραδείγματος χάριν τα ηλεκτρικά οχήματα.

Φαίνεται πως η πλειοψηφία των μέτρων σχετίζονται με τα επιβατηγά οχήματα, ωστόσο υπάρχουν περιθώρια και τρόποι βελτίωσης και σε άλλα μέσα μεταφοράς. Για μία ακόμη φορά παρουσιάστηκαν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα και η λίστα δεν είναι εξαντλητική.

2.3 Παγκόσμιες και ευρωπαϊκές τάσεις και συμφωνίες για την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα οφέλη της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι πολλά και εκτείνονται σε διάφορους τομείς. Βέβαια η επίτευξη ενεργειακής ασφάλειας, ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής και

η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας φαίνεται πως αποτελούν βασικές προτεραιότητες, με αποτέλεσμα οι κυβερνήσεις να στρέφουν έντονα το ενδιαφέρον τους προς την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Διάφορες πρωτοβουλίες έχουν τεθεί σε ισχύ, είτε με τη μορφή συνθηκών, είτε με τη μορφή οδηγιών σε παγκόσμιο ή πιο περιορισμένο επίπεδο.

Η συμφωνία του Παρισιού είναι μία διεθνής συνθήκη που επικεντρώνεται στην κλιματική αλλαγή. Ο στόχος της είναι ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη κάτω από 2 (κατά προτίμηση κάτω από 1.5) βαθμούς της κλίμακας Κελσίου και η επίτευξη του εξαρτάται από τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο η Στρατηγική Europe 2020 (Strategy Europe 2020) που δημοσιεύθηκε το 2010 έθεσε τρεις προτεραιότητες [31]:

1. Έξυπνη Ανάπτυξη: Ανάπτυξη της οικονομίας βασιζόμενη στη γνώση και στην καινοτομία.
2. Βιώσιμη Ανάπτυξη: Προώθηση μίας πιο πράσινης και ανταγωνιστικής οικονομίας, η οποία εκμεταλλεύεται αποδοτικά τους πόρους της.
3. Ανάπτυξη Χωρίς Αποκλεισμούς: Υιοθέτηση μιας οικονομίας, υψηλής απασχόλησης που επιτυγχάνει κοινωνική και εδαφική συνοχή.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτέλεσε μαζί με άλλους έναν από τους κύριους στόχους της παραπάνω στρατηγικής. Η οδηγία 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή αποδοτικότητα θέσπισε το στόχο για εξοικονόμηση 20% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας της Ένωσης έως το 2020, ενώ η οδηγία 2018/2002 σχετικά με την τροποποίηση της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση επικαιροποίησε ορισμένες ειδικές διατάξεις και πρόσθεσε νέα στοιχεία. Ειδικά θέσπισε το στόχο για βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην ένωση κατά 32.5% έως το 2030. Επίσης συγκεκριμένα για τα κτίρια και τις κτιριακές μονάδες η οδηγία 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και η οδηγία 2018/844 για την τροποποίηση της οδηγίας 2010/31/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και της οδηγίας 2012/27/ΕΕ για την ενεργειακή απόδοση αποσκοπούν στην εξασφάλιση της ύπαρξης ενεργειακά αποδοτικών κτηρίων σε κάθε κράτος μέλος, ως το 2050. Ακόμα και η στρατηγική για την ενεργειακή ένωση του 2015 θέτει την ενεργειακή αποδοτικότητα ως ένα από τους βασικούς πυλώνες της.

Είναι λοιπόν φανερό πως η ενεργειακή απόδοση βρίσκεται στο επίκεντρο των ενεργειακών πολιτικών. Το χάσμα, ωστόσο που υπάρχει όπως έχει αναλυτικά περιγραφεί και παραπάνω δημιουργεί κάποιες ανησυχίες, όσο αναφορά την τελική επίτευξη των στόχων. Οι επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα δεν είναι τόσο διαδεδομένες, εξαιτίας ενός συνόλου εμποδίων όπως η μη επαρκής πληροφόρηση και η έλλειψη δεδομένων. Η κατακερματισμένη μορφή της αγοράς και η σύνδεση τέτοιων επενδύσεων με μεγάλο ρίσκο δρουν επίσης ανασταλτικά στις διαδικασίες χρηματοδότησης [32]. Η ομάδα χρηματοπιστωτικών ιδρυμάτων ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency Financial Institutions Group - EEFIG) δημιουργήθηκε με σκοπό να προτείνει λύσεις και πολιτικές που θα άρουν τα παραπάνω εμπόδια. Επιπλέον και άλλα προγράμματα, μπορούν να προσφέρουν χρηματοδότηση σε πρωτοβουλίες που θα ενισχύσουν

τις επενδύσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό του “Ορίζοντα 2020” (“Horizon 2020”), του προγράμματος για την έρευνα και την καινοτομία, το οποίο βοήθησε στην επίτευξη των κλιματικών στόχων.

Κεφάλαιο 3

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι

3.1 Εισαγωγή στις βασικές έννοιες

Η λήψη αποφάσεων είναι μία εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία, η οποία έχει απασχολήσει την ανθρωπότητα από την αρχαιότητα έως σήμερα. Ιστορικά έχουν υπάρξει διάφορες προσπάθειες προσέγγισης των προβλημάτων απόφασης, εφόσον η έννοια της απόφασης είναι απόλυτα συνδεδεμένη με όλες τις εκφάνσεις της ζωής. Διάφορες θεωρίες [33] από το πεδίο των μαθηματικών, των οικονομικών, της διοίκησης και άλλων επιστημών συνέβαλλαν στη διαμόρφωση μιας οικογένειας μεθόδων ευρύτερα γνωστών ως πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων (MCDA - Multiple Criteria Decision Analysis ή MCDM - Multiple Criteria Decision Making). Η πολυκριτηριακή υποστήριξη αποφάσεων ανήκει στο ευρύτερο πλαίσιο της επιχειρησιακής έρευνας και αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως μία συνισταμένη των “επιδόσεων” του σε επιμέρους χαρακτηριστικά, λαμβάνοντας έτσι υπόψιν την πολυδιάστατη φύση του. Η επεξεργασία αυτών των χαρακτηριστικών ή αλλιώς κριτηρίων είναι μείζονος σημασίας για τον τελικό στόχο που δεν είναι άλλος από την λήψη της τελικής απόφασης. Φυσικά ο πυρήνας της πολυκριτήριας προσέγγισης είναι η παροχή βοήθειας κατά την απόφαση, συνεπώς δεν υπάρχει απόκλιση από τη γενική φιλοσοφία της διαδικασίας της απόφασης. Ο Σίσκος [34] εξετάζει το ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα σε αυτή τη διαδικασία. Κάθε ένα άτομο που με τον ένα ή τον άλλο τρόπο έχει συμμετοχή, αποτελεί έναν εμπλεκόμενο φορέα. Ο αποφασίζων είναι ο φορέας ο οποίος ενδιαφέρεται να καταλήξει σε μία απόφαση. Σύχνα πρόκειται για ένα άτομο, αλλά αρκετές φορές ένας αποφασίζων μπορεί να αποτελείται από πολλά άτομα που συνιστούν μία ομάδα, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση ενός συμβουλίου. Ο αναλυτής με τη σειρά του είναι ο φορέας εκείνος ο οποίος αναλαμβάνει να κατασκευάσει το μαθηματικοποιημένο μοντέλο της απόφασης. Στη ροή συχνά εμπλέκεται και ένας μεσολαβητής, ο οποίος λειτουργεί ως δίαυλος επικοινωνίας, ανάμεσα στον αποφασίζων και τον αναλυτή. Βέβαια ο αποφασίζων είναι εκείνος που θα λάβει την τελική απόφαση, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα που θα εξάγει το μοντέλο του αναλυτή, ενώ οι υπόλοιποι φορείς δρουν επικουρικά.

3.1.1 Η μοντελοποίηση του προβλήματος της απόφασης

Ο Bernard Roy εισήγαγε μια μεθοδολογία, κατά την οποία το έργο της μοντελοποίησης που αναλαμβάνει ο αναλυτής, χωρίζεται σε τέσσερα στάδια.

■ Αντικείμενο της απόφασης:

Σε αυτό το στάδιο καθορίζεται αυστηρά το σύνολο A των εναλλακτικών δράσεων, το οποίο μπορεί να είναι είτε συνεχές, είτε διακριτό. Επίσης επιλέγεται μία εκ των τεσσάρων διαθέσιμων προβληματικών για τη διαχείριση της απόφασης, όπως φαίνεται παρακάτω και στο Σχήμα 3.1:

- Επιλογή - Choice (Προβληματική Α): Επιλογή μίας μοναδικής εναλλακτικής από το σύνολο A των δράσεων.
- Ταξινόμηση - Sorting (Προβληματική Β): Ταξινόμηση των δράσεων του συνόλου A σε καλά ορισμένες κατηγορίες, οι οποίες είναι διατεταγμένες σύμφωνα με τις προτιμήσεις του αποφασίζοντος.
- Κατάταξη - Ranking (Προβληματική Γ): Κατάταξη των εναλλακτικών του συνόλου A , από την καλύτερη στη χειρότερη.
- Περιγραφή - Description (Προβληματική Δ): Περιγραφή των δράσεων του συνόλου A που βασίζεται στην απόδοση τους στα διάφορα κριτήρια.

Ένα παράδειγμα που εμπίπτει στην προβληματική α, θα μπορούσε να είναι η επιλογή για την αγορά ενός καινούριου αυτοκινήτου. Η ταξινόμηση των μετοχών σε κατηγορίες αφορά την προβληματική β, ενώ η κατάταξη των πανεπιστημίων είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα προβληματικής γ. Η προβληματική δ της περιγραφής ταιριάζει στις περιπτώσεις στις οποίες θέλουμε να έρθουμε σε μία πρώτη επαφή με τις διαθέσιμες εναλλακτικές.

■ Συνεπής οικογένεια κριτηρίων:

Η λήψη της απόφασης στην πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων βασίζεται στη συμπεριφορά των εναλλακτικών σε διαφορετικές επιπτώσεις. Κάθε μία εξ αυτών των επιπτώσεων μπορεί να αντιστοιχιστεί σε ένα κριτήριο. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης πολλών κριτηρίων κατά την ανάλυση σε αντίθεση με την μονοκριτήρια προσέγγιση είναι πολλά και σχετίζονται κυρίως με το ότι μπορούμε να ενσωματώσουμε στην ανάλυσή μας, διάφορες εκφάνσεις του προβλήματος. Συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε ως κριτήριο, ένα εργαλείο για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των εναλλακτικών [35]. Μαθηματικά, ένα κριτήριο μοντελοποιείται από μία πραγματική μονότονη συνάρτηση ως εξής:

$$g : A \rightarrow R/a \rightarrow g(a)$$

Από το σύνολο A των εναλλακτικών, έστω $A = a, b, \dots, n$, κάθε εναλλακτική a αντι-στοιχίζεται μέσω της συνάρτησης του κριτηρίου σε ένα πραγματικό αριθμό $g(a)$, που

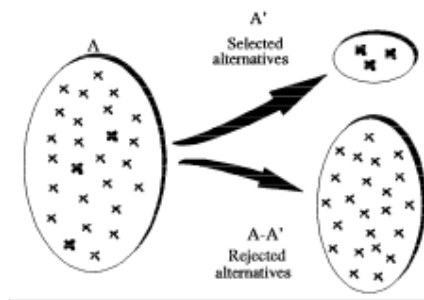


Figure 1. Choice problematic.

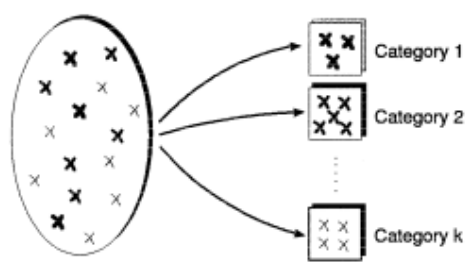


Figure 2. Sorting problematic.

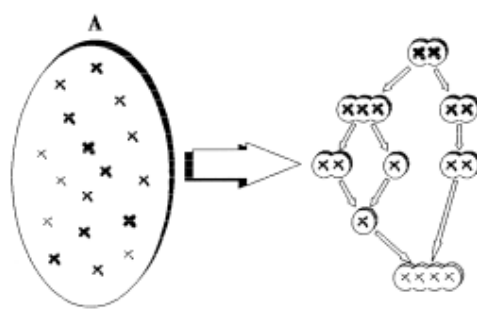


Figure 3. Ranking problematic.

Σχήμα 3.1: Types of MCDA problematics (Πηγή: [3])

αποτελεί την επίδοση της εναλλακτικής στο συγκεκριμένο κριτήριο. Ως συνεπή οικογένεια κριτηρίων ορίζουμε το σύνολο των κριτηρίων, $F = g_0, g_1, g_2, \dots, g_m$, τα οποία έχουν τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες [34]:

- Μονοτονία: Έστω a και b δύο εναλλακτικές του συνόλου A . Εάν ισχύει το εξής: $\forall i \neq j, g_i(a) = g_i(b)$ και για $i = j, g_i(a) > g_i(b)$, τότε αυτό σημαίνει πως η εναλλακτική a προτιμάται της b .
- Επάρκεια: Εάν δύο εναλλακτικές έχουν την ίδια επίδοση σε όλα τα κριτήρια, δηλαδή ισχύει $g_i(a) = g_i(b)$ για κάθε $g_i \in F$, αυτό σημαίνει πως η εναλλακτική a είναι αδιάφορη της b .
- Μη πλεονασμός: Η διαγραφή ενός εκ των υπάρχοντων κριτηρίων τα οποία απα-

τίζουν το σύνολο F έχει ως αποτέλεσμα να παραβιάζεται μία από τις παραπάνω ιδιότητες της μονοτονίας ή του πλεονασμού.

Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις τύπους κριτηρίων, ανάλογα με με την κλίμακα την οποία χρησιμοποιούν σύμφωνα με τον Vincke [4]. Τα ποσοτικά κριτήρια (measurable criteria) τα οποία επιτρέπουν τη σύγκριση διαστημάτων της κλίμακας αξιολόγησης, τα τακτικά κριτήρια (ordinal criteria), γνωστά και ως ποιοτικά κριτήρια, στα οποία η κλίμακα αξιολόγησης είναι διακριτή και δεν επιτρέπει η σύγκριση διαστημάτων στο εσωτερικό της είναι δύο από αυτά. Ακολουθούν τα πιθανολογικά κριτήρια (probabilistic criteria) τα οποία τα χρησιμοποιούμε στις περιπτώσεις που έχουμε να διαχειριστούμε αβεβαιότητα και τα ασαφή κριτήρια (fuzzy criteria), όπου οι επιδόσεις αντιστοιχίζονται σε διαστήματα της κλίμακας αξιολόγησης αντί για μία συγκεκριμένη τιμή.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί και η περίπτωση των ψευδοκριτηρίων (pseudocriteria). Ονομάζουμε ψευδοκριτήριο, μία συνάρτηση κριτηρίου η οποία συνδιάζεται με δύο τύπους κατώφλιων. Τα κατώφλια αυτά είναι με τη σειρά τους συναρτήσεις και διακρίνονται στα κατώφλια αδιαφορίας q (indifference thresholds) και τα κατώφλια προτίμησης p (preference thresholds). Τα ψευδοκριτήρια χρησιμοποιούνται πολύ συχνά από τις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης, ώστε το μοντέλο να μπορέσει να διαχειριστεί καταστάσεις αβεβαιότητας ή/και ανακρίβειας ή/και μη ακριβούς προσδιορισμού (imprecision, uncertainty and inaccurate determination) όπως θα δούμε και παρακάτω. Ο Roy αναφέρεται στις τέσσερις κυριότερες πηγές των παραπάνω προβλημάτων [36]. Ξεκινά με τη διαπίστωση πως για την μοντελοποίηση του προβλήματος απόφασης, κάνουμε χρήση απλοποιημένων “χαρτών” (maps που αντιστοιχούν στις πολύπλοκες περιοχές (territories) του προβλήματος. Ο αναλυτής είναι αναγκασμένος να προβεί σε πολλές τροποποιήσεις και βέβαια τελικά οι “χάρτες” δεν ταυτίζονται με τις περιοχές (map is not the territory). Συνεχίζει παραθέτοντας το γεγονός πως οι εναλλακτικές δεν είναι απόλυτα καθορισμένες όταν πραγματοποιείται η μελέτη και δεν μπορούμε να κάνουμε μία απόλυτα ασφαλή πρόβλεψη (the future is not a present to come). Επίσης για τις ανάγκες της μοντελοποίησης χρησιμοποιούμε δεδομένα μετρήσεων, οι μετρήσεις όμως αυτές δεν είναι δυνατόν να βρίσκονται σε απόλυτη ταύτιση με τις πραγματικές τιμές των δεδομένων (the data are not the result of an exact measurement). Τέλος στη διαδικασία της μοντελοποίησης συχνά υπεισέρχονται περιοχές ασάφειας, με βασικότερη το ότι κατά τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων, ο αποφασίζων δεν έχει καταλήξει σε μία δομημένη επιλογή.

■ Μοντέλο ολικής προτίμησης:

Στο τρίτο αυτό στάδιο, εφόσον έχουμε καταλήξει στην προβληματική και τη συνεπή οικογένεια κριτηρίων, πρέπει να επιλέξουμε τον επίσημο τρόπο με τον οποίο θα συγκρίνουμε τις εναλλακτικές λαμβάνοντας υπόψιν τα κριτήρια που καθορίσαμε [37]. Σε αυτή την κατεύθυνση μπορούμε να διακρίνουμε δύο μεγάλα ρεύματα τα σχεσιακά και τα συναρτησιακά. Οι αναλυτικές-συνθετικές μέθοδοι μπορούν επίσης να ενταχθούν στις

βασικές κατηγορίες. Οι παραπάνω προσεγγίσεις με κατάλληλη προσαρμογή μπορούν να διαχειριστούν και προβλήματα υπό αβεβαιότητα.

■ Υποστήριξη της απόφασης:

Πρόκειται για ένα επικουρικό στάδιο, κατά το οποίο ο αναλυτής συνεργάζεται με τον αποφασίζων με ή χωρίς τη συνδρομή του μεσολαβητή, ώστε να απαντηθούν ερωτήματα που θα δημιουργηθούν. Πολύ σπάνια η λύση που προκύπτει από το μοντέλο ολικής προτίμησης ως αποτέλεσμα της πολυκριτήριας ανάλυσης υιοθετείται χωρίς καμία επιπλέον ενέργεια. [38]

3.2 Τα συναρτησιακά μοντέλα

Τα συναρτησιακά μοντέλα βασίζονται όπως προκύπτει και από την ονομασία τους, στη σύνθεση μίας συνάρτησης αξίας (value function). Διάφορες γνωστές τεχνικές ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, με χαρακτηριστικά παραδείγματα να αποτελούν οι εξής:

- **MAVT ή MAUT:** Στη σύνθεση μίας συνάρτησης αξίας στην περίπτωση που μελετάμε προβλήματα υπό βεβαιότητα (certainty) και στη σύνθεση μιας συνάρτησης χρησιμότητας (utility function) στην περίπτωση που μελετάμε προβλήματα υπό αβεβαιότητα/ρίσκο [39]. Η πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (Multiattribute Utility Theory-MAUT) αντιστοιχεί στην δεύτερη περίπτωση, ενώ η πολυκριτήρια θεωρία αξίας (Multiattribute Value Theory-MAVT) αντιστοιχεί στην πρώτη.

Έστω λοιπόν ότι εξετάζουμε ένα πρόβλημα υπό βεβαιότητα, τότε η μοντελοποίηση των προτιμήσεων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση αξίας, ο ρόλος της οποίας είναι η σύνθεση του συνόλου των διαθέσιμων m κριτηρίων $F = g_1, g_2, \dots, g_m$ σε ένα μόνο κριτήριο g για κάθε εναλλακτική. Πιο αναλυτικά, παραδείγματος χάριν για την εναλλακτική a [40]:

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

με $f[g(a)] \in \mathbb{R}$.

Εφόσον πρόκειται για μία νέα συνάρτηση κριτηρίου, συμπεριλαμβάνει από τον ορισμό της την ιδιότητα της μονοτονίας και άρα για δύο εναλλακτικές a, b ισχύουν τα εξής παρακάτω:

→ $f[g(a)] > f[g(b)] \equiv a$ προτιμάται της b

→ $f[g(a)] = f[g(b)] \equiv a$ αδιάφορη της b

Υπάρχουν διάφορες συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις αξίας, για την επίλυση της τρίτης προβληματικής, αυτήν της κατάταξης. Η πιο χαρακτηριστική είναι αυτή της γραμμικής συνάρτησης αξίας. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

Για κάθε μία εναλλακτική, υπολογίζουμε το άθροισμα των σταθμισμένων επιδόσεων της σε κάθε ένα εκ των κριτηρίων. Έστω w_1, w_2, \dots, w_m τα βάρη τα οποία αντιστοιχούν στα κριτήρια g_1, g_2, \dots, g_m , τότε για τις εναλλακτικές a, b έχουμε:

$$f[g(a)] = \sum_{i=1}^n w_i * g_i(a) = w_1 * g_1(a) + w_2 * g_2(a) + \dots + w_m * g_m(a)$$

$$f[g(b)] = \sum_{i=1}^n w_i * g_i(b) = w_1 * g_1(b) + w_2 * g_2(b) + \dots + w_m * g_m(b)$$

Σε κάθε περίπτωση προχωρούμε σε κατάταξη του συνόλου των εναλλακτικών, με βάση τις τιμές της συνάρτησης αξίας. Διάφορες άλλες συναρτήσεις και μέθοδοι εύρεσης συναρτήσεων αξίας έχουν προταθεί. Ένα ακόμα παραδείγμα είναι η προσθετική συνάρτηση αξίας, η οποία βασίζεται στις περιθώριες συναρτήσεις αξίας, ο οποίες προκύπτουν με διάφορους τρόπους κατασκευής (άμεσος τρόπος, (UTASTAR)).

- Analytical Hierarchy Process - AHP:

Η διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας (Analytical Hierarchy Process - AHP) κατατάσσεται με τη σειρά της στις συναρτησιακές μεθόδους, εφόσον η τελική κατάταξη των εναλλακτικών προκύπτει από τη σύνθεση με μία συνάρτηση αξίας (π.χ. γραμμική όπας και παραπάνω). Προηγούνται φυσικά τα βήματα της μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό των βαρών των κριτηρίων (weighting) και των επιδόσεων των εναλλακτικών ανά κριτήριο (scoring)[41].

- Άλλες μέθοδοι:

Αξίζει να αναφερθεί πως υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες που έχουν βασιστεί στη μοντελοποίηση των προτιμήσεων μέσω συναρτήσεων αξίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι αυτά των VICOR, TOPSIS, MACBETH.

Στο σημείο αυτό πρέπει να προστεθεί πως τα συναρτησιακά μοντέλα είναι κυρίως αντισταθμιστικά, δηλαδή δηλαδή η “άσχημη” επίδοση σε ένα κριτήριο μπορεί να καλυφθεί από μία “εξαιρετική” επίδοση σε ένα άλλο κριτήριο. Οι συντελεστές των κριτηρίων μπορούν να θεωρηθούν ποσοστά υποκατάστασης (trade offs), μεταξύ των κριτηρίων.

3.3 Τα σχεσιακά μοντέλα

Οι μέθοδοι υπεροχής αποτελούν το σχεσιακό ρεύμα της μοντελοποίησης προτιμήσεων, βάση του οποίου είναι οι διμερείς συγκρίσεις (binary relations). Οι ακόλουθες έννοιες είναι πολύ σημαντικές για την κατανόηση των συγκεκριμένων μεθόδων [37].

- Διμερής σχέση (Binary Relation):

Σε ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων $A = a, b, \dots, n$ η διμερής σχέση P επί του συνόλου αυτού, ορίζεται ως ένα υποσύνολο του καρτεσιανού γινομένου $A \times A$, που είναι ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγαριών (a, b) , τέτοιο ώστε a, b ανήκει στο $A : R \subseteq A \times A$.

- Δομές Προτίμησης και Αδιαφορίας (Preference and Indifference Structures):

Οι δομές $\langle P, I \rangle$, αποτελούνται από δύο διμερείς σχέσεις, τις P, I . Η σχέση P χρησιμοποιείται για να εκφράσει πως για δύο εναλλακτικές a, b του συνόλου A , η εναλλακτική a , προτιμάται της εναλλακτικής b . Η σχέση I χρησιμοποιείται για να δηλώσει την αδιαφορία ή μη προτίμηση μεταξύ των a, b . Η συγκεκριμένη δομή, μπορεί να επεκταθεί με διάφορους τρόπους, ώστε να συμπεριλάβει επιπλέον καταστάσεις προτίμησης-αδιαφορίας, όταν οι διαχωριστικές γραμμές μεταξύ P, I δεν είναι τόσο ξεκάθαρες.

- Εκτεταμένες Δομές:

Πρόκειται για την επέκταση των $\langle P, I \rangle$ δομών. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνουμε υπόψιν μας και την περίπτωση της “αδύναμης προτίμησης” (weak preference). Πρόκειται για τη διμερή σχέση Q , που αντιπροσωπεύει το στάδιο μεταξύ αδιαφορίας και προτίμησης. Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να γενικευτεί, ώστε να συμπεριληφθούν πολλές ενδιάμεσες καταστάσεις. Η επέκταση συμπεριλαμβάνει επίσης και την κατάσταση της αδυναμίας σύγκρισης (incomparability) R , για τις περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι εφικτό ή θα ήταν λάθος να χρησιμοποιήσουμε τις έννοιες της προτίμησης ή της αδιαφορίας. Καταλήγουμε λοιπόν στην κλασσική εκδοχή των εκτεταμένων δομών $\langle P, Q, I, R \rangle$.

Υπάρχουν αρκετές πολυκριτήριες μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στις διμερείς συγκρίσεις για να εξάγουν αποτελέσματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι οικογένειες μεθόδων ELECTRE και PROMETHEE. Οι δύο αυτές οικογένειες μεθόδων έχουν πολλά κοινά στοιχεία.

3.3.1 Βασικά στοιχεία των μεθόδων ELECTRE

Οι μέθοδοι ELECTRE ανήκουν στο ευρύτερο πεδίο της ευρωπαϊκής σχολής της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων. Η πρώτη μέθοδος που έμεινε γνωστή ως ELECTRE I επινοήθηκε το 1965 από τον Bernard Roy, ως μία νέα μέθοδος με την οποία θα δινόταν λύση στους περιορισμούς μιας άλλης μεθόδου, της MARSHAN, που χρησιμοποιούνταν ως τότε για τη διαχείριση προβλημάτων απόφασης από τη συμβουλευτική εταιρεία SEMA. Το ακρωνύμιο ELECTRE προέρχεται από τα αρχικά της γαλλικής φράσης ELimination Et Choix Traduisant la REalité, που σε ευθεία απόδοση στα ελληνικά σημαίνει “εξάλειψη και επιλογή που εκφράζουν την πραγματικότητα”[42].

Οι διμερείς σχέσεις υπεροχής (binary outranking relationship) αποτελούν τον πυρήνα των συγκεκριμένων μεθόδων. Ως σύμβολό τους χρησιμοποιείται το S , η σημασία του οποίου είναι “τουλάχιστον τόσο καλό, όσο” (at least as good as). Γενικά μπορούμε να πούμε πως $S = P \cup Q \cup I$. Παραδείγματος χάριν για δύο εναλλακτικές a, b του συνόλου A μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις καταστάσεις με βάση τον τρόπο χρήσης της σχέσης S [42]:

1. aSb και όχι $bSa \rightarrow aPb$ (a προτιμάται της b)
2. bSa και όχι $aSb \rightarrow bPa$ (b προτιμάται της a)

3. aSb και $bSa \rightarrow aIb = bIa$ (a είναι αδιάφορη της b , b είναι αδιάφορη της a)
4. όχι aSb και όχι $bSa \rightarrow aRb$ (a, b μη συγκρίσιμες)

Η κατασκευή της παραπάνω διμερούς σχέσης υπεροχής S , μπορεί να δομηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την μέθοδο την οποία χρησιμοποιούμε, αλλά βασίζεται κατά κόρον στο σχηματισμό και τη σύνθεση δεικτών συμφωνίας και μη ασυμφωνίας. Η συμφωνία (concordance) αποτελεί ένα δείκτη-μετρήσιμο του “μεγέθους στο οποίο” η εναλλακτική a προτιμάται της εναλλακτικής b , για να ισχύει δηλαδή χρειάζεται η πλειονότητα των κριτηρίων να βρίσκονται σε αρμονία τον ισχυρισμό προτίμησης. Η μη ασυμφωνία (non discordance), είναι με τη σειρά της ένας δείκτης-μετρήσιμο, του κατά πόσο όταν ισχύει η συνθήκη της συμφωνίας, κάποιο ή κάποια από τα κριτήρια τα οποία δεν εναρμονίζονται με τον ισχυρισμό προτίμησης, αντιτίθενται πολύ έντονα σε αυτόν. Συνεπώς οποιαδήποτε τέτοια ισχυρή αντίθεση μπορεί να υποβιβάσει την προτίμηση. Την κατασκευή των διμερών σχέσεων βάση των κατά περίπτωση κανόνων, ακολουθεί η χμετάλλευση της, ώστε να καταλήξουμε στα επιθυμητά συμπεράσματα. Φυσικά και το στάδιο αυτό βασίζεται στους κανόνες της συγκεκριμένης μεθόδου που έχουμε επιλέξει.

Στην όλη διαδικασία και ανεξάρτητα με το ποια από τις μεθόδους της οικογένειας ακολουθεί ο αναλυτής, χρειάζεται να αποφανθεί για τα βάρη των κριτηρίων (importance coefficients, τα οποία ουσιαστικά ρυθμίζουν την “ισχύ” του κάθε κριτηρίου κατά την κατασκευή του δείκτη συμφωνίας και κατ’ επέκταση της σχέσης υπεροχής. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί, με σκοπό να βοηθήσουν στον προσδιορισμό των βαρών. Κάποιες από τις πιο γνωστές είναι οι εξής παρακάτω:

- Άμεση εκτίμηση: Ο αποφασίζων καλείται από τον αναλυτή να αξιολογήσει τα κριτήρια ως προς τη σημαντικότητά τους σε μία κοινή κλίμακα. Έπειτα κανονικοποιεί το αποτέλεσμα στη μονάδα, για κάθε κριτήριο διαιρώντας την τιμή του με το άθροισμα που προκύπτει από όλες τις αξιολογήσεις [43].
- Διαδικασία Simos: Η τεχνική Simos ή αλλιώς μέθοδος των καρτών, χρησιμοποιεί δύο είδη καρτών, αυτές που αντιστοιχούν σε καθένα από τα κριτήρια και τις λευκές κάρτες. Συνεπώς αν έχουμε m κριτήρια, ο αποφασίζων θα λάβει m κάρτες, μία για το κάθε κριτήριο και θα πρέπει να τις κατατάξει με αύξουσα σειρά. Πρώτη επιλέγεται η κάρτα που αντιστοιχεί στο λιγότερο σημαντικό κριτήριο και τελευταία αυτή που αντιστοιχεί στο πιο σημαντικό σύμφωνα πάντα με τις προτιμήσεις του αποφασίζων. Αν κάποια κριτήρια έχουν την ίδια σημαντικότητα δημιουργούν μία ομάδα. Οι λευκές κάρτες εισάγονται στη διαδικασία στο επόμενο στάδιο, όπου πρέπει να καθοριστεί κατά πόσο διαφέρουν τα διαδοχικά κριτήρια της παραπάνω κατάταξης. Όσο περισσότερες οι λευκές κάρτες, τόσο μεγαλύτερη η διαφορά. Ακολουθεί ο υπολογισμός των κανονικοποιημένων και των τελικών βαρών που αποδίδονται στα κριτήρια. Ορισμένες αδυναμίες της κλασικής μεθόδου οδήγησαν στην αναθεωρημένη έκδοσή της (Revised Simos) από τους Figueira και Roy [44].

- Η μέθοδος AHP: Η μεθοδολογία AHP (Analytical Hierarchy Process) που βασίζεται στις διμερείς συγκρίσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον προσδιορισμό των συντελεστών σημαντικότητας (βάρη) των κριτηρίων. Στην αρχή δημιουργείται ένας πίνακας δύο διαστάσεων, στις γραμμές και τις στήλες του οποίου τοποθετούνται τα κριτήρια. Στις αντίστοιχες θέσεις, σημειώνεται η σχετική σημασία των κριτηρίων (1=ίση σημαντικότητα, 3=μέτρια σημαντικότητα, 5=δυνατή σημαντικότητα, 7=πολυ ισχυρή σημαντικότητα, 9=μέγιστη σπουδαιότητα με τις ενδιάμεσες τιμές 2,4,6,8 να μπορούν και εκείνες να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις συμβιβασμού). Παραδείγματος χάριν αν το κριτήριο g_i είναι ισχυρά πιο σημαντικό από το κριτήριο g_j , σε αυτή την περίπτωση η θέση $[i,j] = 7$ και $[j,i] = 1/7$. Ακολουθεί ο προσδιορισμός του αθροίσματος ανά στήλη, για την κανονικοποίηση του πίνακα (διαιρούμε την τιμή κάθε θέσης του πίνακα με το άθροισμα της στήλης στην οποία ανήκει) και ο υπολογισμός του αθροίσματος του κανονικοποιημένου πίνακα ανά γραμμή. Το βάρος του κάθε κριτηρίου προκύπτει ως το πηλίκο του κανονικοποιημένου αθροίσματος ανά γραμμή δια το πλήθος των κριτηρίων.

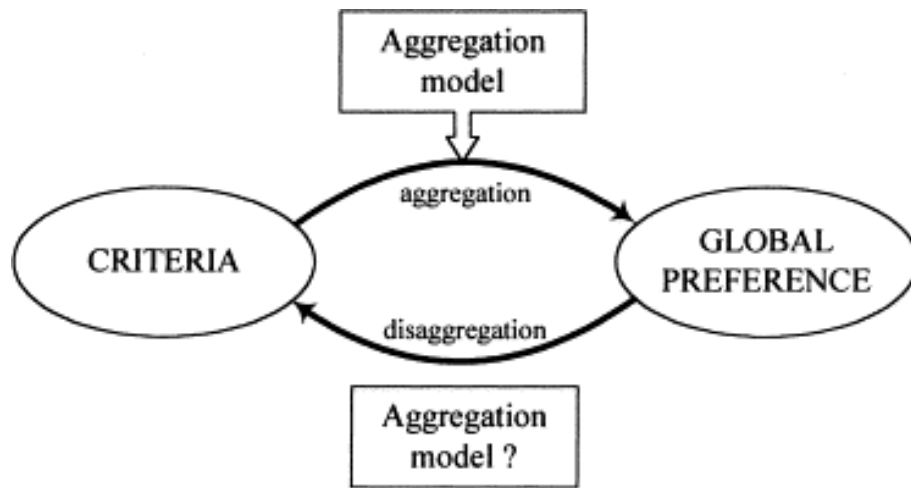
Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως η οικογένεια των μεθόδων ELECTRE αποτελείται από μη αντισταθμιστικά μοντέλα, δηλαδή η “άσχημη” επίδοση σε ένα κριτήριο δεν μπορεί να καλυφθεί από μία “εξαιρετική” επίδοση σε ένα άλλο κριτήριο. Επίσης η ύπαρξη τουλάχιστον τριών κριτηρίων στα οποία αξιολογούνται οι εναλλακτικές είναι απαραίτητη, με τη βέλτιστη επίδοση να επιτυγχάνεται για και εώς 13 κριτήρια [42]. Στο σύνολο τους οι μέθοδοι ELECTRE από την πρώτη τους εμφάνιση με τη μέθοδο ELECTRE I έχουν εξελιχθεί και υπάρχουν “απόγονοι” που προσανατολίζονται σε κάθε μία εκ των τριών βασικών προβληματικών που έχουν αναφερθεί και παραπάνω (επιλογή, ταξινόμηση, κατάταξη). Πιο συγκεκριμένα:

- Επιλογή: ELECTRE I, ELECTRE IS
- Ταξινόμηση: ELECTRE TRI-B, ELECTRE TRI-C, ELECTRE TRI-nC
- Κατάταξη: ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV

3.4 Αναλυτική-Συνθετική προσέγγιση

Τόσο τα σχεσιακά, όσο και τα συναρτησιακά μοντέλα για τα οποία έγινε λόγος παραπάνω, ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία, αυτή της αναλυτικής προσέγγισης (aggregation paradigm). Γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη διαδικασία που θα ακολουθήσουμε για τη σύνθεση των κριτηρίων και μέσω αυτής καταλήγουμε στο μοντέλο ολικής προτίμησης. Όλες οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν είναι καθορισμένες (π.χ. βάρη, κατώφλια κριτηρίων, συναρτήσεις αξίας ή διμερείς σχέσεις υπεροχής). Αντίθετα η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση (aggregation-disaggregation approach) στοχεύει στον προσδιορισμό των παραμέτρων, μέσα από μια διαδικασία αλληλεπίδρασης με τον αποφασίζων. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο προτίμησης είναι πιο συμβατό με τον τρόπο με τον οποίο ο αποφασίζων θέλει να διαχειριστεί το πρόβλημα της απόφασης [4].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:

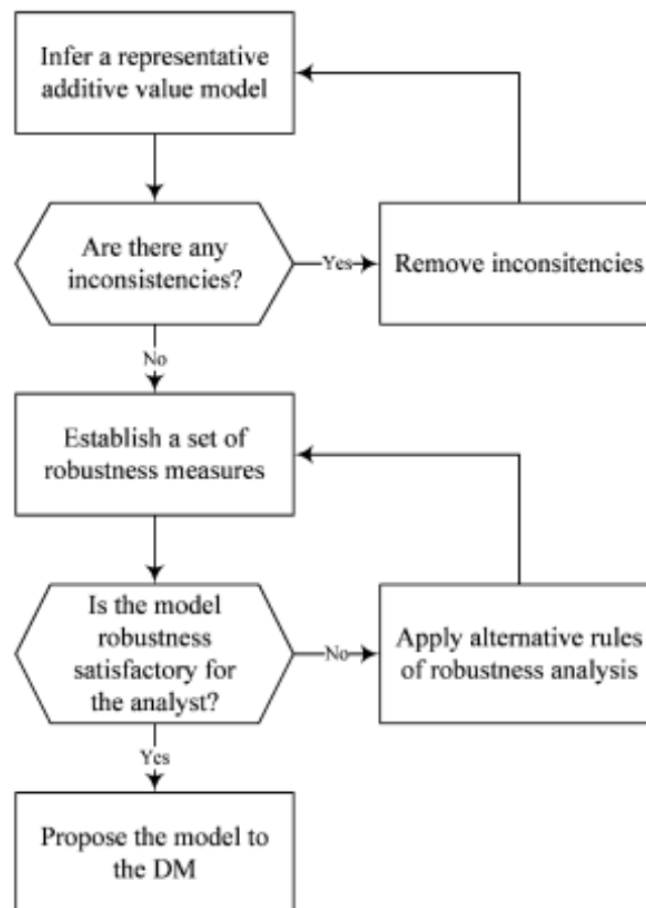


Σχήμα 3.2: Aggregation-Disaggregation Approach (Πηγή: [4])

Για να καταλήξουμε στο επιθυμητό μοντέλο που τελικά θα “ενσωματώσει” τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα, με την αναλυτική προσέγγιση, συνήθως χρησιμοποιούμε ένα υποσύνολο των εναλλακτικών, έστω $A_1 \subset A$ που το ονομάζουμε σύνολο αναφοράς. Τα πιο γνωστά ίσως παράδειγματα είναι οι μέθοδοι UTA (UTilité Additive) και τη βελτιωμένη εκδοχή της UTASTAR, οι οποίες κάνουν χρήση ειδικών τύπων μαθηματικού προγραμματισμού, πάνω στο σύνολο αναφοράς το οποίο ο αποφασίζων έχει διατάξει, για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων αξίας.

Συνήθως ακολουθεί μια ανάλυση ευστάθειας (robustness analysis), ώστε να αξιολογηθεί ο βαθμός στον οποίο το μοντέλο που προέκυψε βρίσκεται σε αντιστοιχία με τις προτιμήσεις του αποφασίζων. Ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο είναι το εξής παρακάτω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3[5]:

Η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση αν και αποτελεί μόνη της ένα τρόπο για την εξαγωγή του μοντέλου ολικής προτίμησης, όπως και τα σχεσιακά και συναρτησιακά μοντέλα μπορεί να εφαρμοστεί ως μεθοδολογία και στις άλλες μεθόδους. Παραδείγματος χάριν οι Mousseau και Slowinski χρησιμοποιούν τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού για το συμπερασμό (inferencing) των παραμέτρων της μεθόδου ELECTRE TRI-B.



Σχήμα 3.3: Robustness Analysis In Preference Disaggregation Approaches (Πηγή: [5])

Κεφάλαιο 4

Η μέθοδος ELECTRE TRI-B

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η μέθοδος ELECTRE TRI αποτελεί την “πρόταση” της οικογένειας ELECTRE για την προβληματική της ταξινόμησης(β) των εναλλακτικών. Μέχρι περίπου τα τέλη της δεκαετίας του 1970, οι εξελίξεις στις μεθόδους ELECTRE σχετίζονταν κατά κόρον με τις προβληματικές της επιλογής(α) και της κατάταξης(γ). Η διαδικασία τριχοτόμησης (trichotomy procedure) και η ELECTRE A προετοίμασαν το έδαφος για την ανάπτυξη της ELECTRE TRI. Η πρώτη αναφορά στη μεθοδολογία της ELECTRE-TRI έγινε το 1992, από τον Wei στη διδακτορική του διατριβή [42].

Έχουν υπάρξει διάφορες τροποποιήσεις της κλασσικής μεθόδου, ELECTRE TRI την οποία ως εξής θα ονομάζουμε ELECTRE TRI-B, για λόγους συνέπειας. Στη βιβλιογραφία γίνονται αναφορές και για άλλες μεθόδους απογόνους της ELECTRE TRI, όπως η ELECTRE TRI-nB, ELECTRE TRI-C και ELECTRE TRI-nC στις οποίες θα γίνει μία συνοπτική αναφορά παρακάτω.

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η χρήση τριών ειδών κατωφλίων, τα κατώφλια αδιαφορίας τα οποία δομούν τα ψευδοκριτήρια και τα κατώφλια veto τα οποία χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ασυμφωνίας. Πιο συγκεκριμένα ο συσχετισμός μεταξύ των εκτεταμένων δομών προτίμησης P,Q,I) και των κατωφλίων αδιαφορίας $q \geq 0$ (indifference thresholds) και κατωφλίων προτίμησης $p \geq 0$ (preference thresholds) προκύπτει έστω για δύο εναλλακτικές a, b , υπό την υπόθεση πως g είναι μία συνάρτηση κριτηρίου με αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης, ως εξής:

$$\begin{cases} |g(a) - g(b)| \leq q \implies aIb \text{ αδιαφορία(indifference)} \\ q < g(a) - g(b) \leq p \implies aQb \text{ ασθενής προτίμηση(weak preference)} \\ g(a) - g(b) \geq p \implies aPb \text{ προτίμηση(preference)} \end{cases}$$

Αξίζει να σημειωθεί πως τιμές κατωφλίων αδιαφορίας, προτίμησης και veto αντιστοιχίζονται σε κάθε ένα από τα κριτήρια της συνεπούς οικογένειας που έχει επιλεγεί για τη μοντελοποίηση του προβλήματος. Δηλαδή εάν $F = g_1, g_2, \dots, g_m$ τότε μπορούμε να ορίσουμε για

το προφίλ b_h το σύνολο των κατωφλίων αδιαφορίας $Q = q_1, q_2, \dots, q_m$, το σύνολο των κατωφλίων προτίμησης $P = p_1, p_2, \dots, p_m$ και το σύνολο των κατωφλίων veto $V = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$. Γενικά ισχύει το εξής: Επίσης ισχύει πως:

$$\forall g_j \in F \implies \nu_j(a) \geq p_j(a) \geq q_j(a) \geq 0$$

Η αδιαφορία δηλώνεται με την απόλυτη τιμή της διαφοράς των επιδόσεων των εναλλακτικών στο κριτήριο g να είναι μικρότερη από την ποσότητα q . Ισχύει $|g(a) - g(b)| \leq q \equiv -q \leq g(a) - g(b) \leq q$, άρα είτε $g(a)$ λίγο μεγαλύτερη από τη $g(b)$, είτε $g(b)$ λίγο μεγαλύτερη από τη $g(a)$, η διαφορά αυτή επιλέγουμε να μην υποδηλώνει κάποια προτίμηση. Την ασθενή προτίμηση της εναλλακτικής a επί της εναλλακτικής b υποδηλώνει διαφορά $g(a) - g(b)$ που δεν υπερβαίνει την τιμή p . Τέλος σαφή προτίμηση έχουμε όταν $g(a) - g(b)$ είναι μεγαλύτερη από την τιμή p . Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η χρήση των κατωφλίων είναι ένας τρόπος διαχείρισης της αβεβαιότητας, της ανακρίβειας και του μη ακριβούς προσδιορισμού που προκύπτει από τη φύση της μοντελοποίησης των προβλημάτων απόφασης. Στην ειδική περίπτωση που $q = p = 0$ τότε το ψευδοκριτήριο g , μετατρέπεται σε πραγματικό κριτήριο. Τα κατώφλια p, q είναι το κλειδί για τη δημιουργία των δεικτών συμφωνίας που συμμετέχουν στον υπολογισμό της σχέσης υπεροχής στη μέθοδο ELECTRE TRI-B.

Τα κατώφλια veto με τη σειρά τους είναι το κλειδί αντίστοιχα για τη δημιουργία των δεικτών ασυμφωνίας που και εκείνοι συμμετέχουν στο σχηματισμό της σχέσης υπεροχής. Ουσιαστικά εκφράζουν τη “δύναμη” ενός κριτηρίου να καταρρίψει τον ισχυρισμό ότι μία εναλλακτική υπερέχει μιας δεύτερης και ενισχύει έτσι το μη αντισταθμιστικό χαρακτήρα της μεθόδου.

4.2 Περιγραφή της μεθόδου

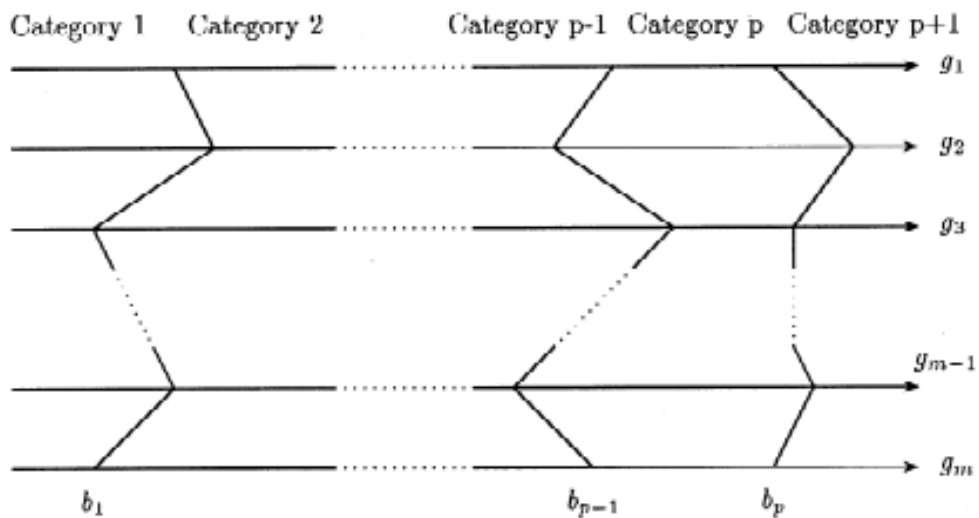
Ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία της μεθόδου ELECTRE TRI-B είναι πως οι διμερείς συγκρίσεις δεν γίνονται μεταξύ των διαθέσιμων εναλλακτικών, όπως συνήθως συμβαίνει με τις άλλες μεθόδους της οικογένειας ELECTRE. Στην περίπτωση αυτή για τις συγκρίσεις χρησιμοποιούνται προφίλ (profiles) τα οποία είναι καθορισμένα εκ των προτέρων, διατεταγμένα από το “χειρότερο” προς το “καλύτερο” και αποτελούν τα όρια των διατεταγμένων κατηγοριών της ταξινόμησης. Αυτά τα προφίλ, μπορούν να θεωρηθούν ως “ειδικές” εναλλακτικές. Σε αυτό το σημείο θα ορίσουμε όλα τα απαραίτητα σύνολα που θα μας χρησιμεύσουν, κατά την περιγραφή της μεθόδου. Έστω λοιπόν τα εξής σύνολα, στην περίπτωση που έχουμε n εναλλακτικές, m κριτήρια και $p + 1$ κατηγορίες ταξινόμησης:

- Το σύνολο των διαθέσιμων εναλλακτικών: $A = a, b, \dots, n$
- Το σύνολο των προφίλ: $B = b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$
- Το σύνολο των κατηγοριών ταξινόμησης: $C = c_0, c_1, c_2, \dots, c_{p+1}$
- Το σύνολο των κριτηρίων: $F = g_1, g_2, \dots, g_m$
- Το σύνολο των δεικτών των κριτηρίων $I = 1, 2, \dots, m$

- Το σύνολο των κατωφλίων προτίμησης για κάθε προφίλ (Έστω για το b_h): $P = p_1, p_2, \dots, p_m$
- Το σύνολο των κατωφλίων αδιαφορίας για κάθε προφίλ (Έστω για το b_h): $Q = q_1, q_2, \dots, q_m$
- Το σύνολο των κατωφλίων veto για κάθε προφίλ (Έστω για το b_h): $V = \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$
- Το σύνολο των συντελεστών σημαντικότητας (βάρη) των κριτηρίων: $W = w_1, w_2, \dots, w_m$

Βλέπουμε πως p προφίλ ταξινόμησης, ορίζουν $p + 1$ κατηγορίες. Στην περίπτωση λοιπόν που θέλουμε να ορίσουμε τρεις κατηγορίες, τότε θέτουμε $p = 1$. Συνεπώς οι κατηγορίες σχηματίζονται ως εξής:

- c_0 : Έχει ως άνω όριο το προφίλ b_0 .
- c_1 : Έχει ως κάτω όριο το προφίλ b_0 και ως άνω όριο το προφίλ b_1 .
- c_2 : Έχει ως κάτω όριο το προφίλ b_1 .



Σχήμα 4.1: Categories and Profiles (Πηγή: [3])

Έστω πως θέλουμε να συγκρίνουμε τις n εναλλακτικές με τα διαθέσιμα προφίλ. Για κάθε μία από αυτές ακολουθούμε τη μεθοδολογία της ELECTRE TRI-B που βασίζεται σε δύο διαδοχικά βήματα [45] όπως περιγράφεται παρακάτω. Για το παράδειγμα μας θα χρησιμοποιούμε την εναλλακτική a και το προφίλ b_h :

- Κατασκευή της σχέσης υπεροχής S : Μέσω της σχέσης υπεροχής S λαμβάνουμε πληροφορίες για τη σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών και διαδοχικών προφίλ. Το στάδιο αυτό, πιο αναλυτικά μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα διακριτά βήματα:

- Υπολογισμός των μερικών δεικτών συμφωνίας (partial concordance indices) $c_j(a, b_h)$ και $c_j(b_h, a)$ για κάθε ένα εκ των διαθέσιμων κριτηρίων.
- Υπολογισμός των ολικών δεικτών συμφωνίας (overall concordance indices) $c(a, b_h)$, $c(b_h, a)$ στο σύνολο των κριτηρίων.
- Υπολογισμός των μερικών δεικτών ασυμφωνίας (partial discordance indices) $d_j(a, b_h)$ και $d_j(b_h, a)$ για κάθε ένα εκ των διαθέσιμων κριτηρίων.
- Υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας (ή πιστότητας) (credibility indices) $\sigma(a, b_h)$, $\sigma(b_h, a)$ στο σύνολο των κριτηρίων. Ο δείκτης αξιοπιστίας αποτελεί την ασαφή σχέση υπεροχής (fuzzy outranking relationship).
- Καθορισμός της τιμής του λ διαχωριστικού επιπέδου (λ -cut) για τον υπολογισμό της τελικής σαφούς σχέσης υπεροχής (crisp outranking relationship).

■ Εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής: Στο στάδιο αυτό επιλέγουμε μία διαδικασία ανάθεσης, είτε την αισιόδοξη, είτε την απαισιόδοξη, ώστε να ταξινομήσουμε την εναλλακτική a σε μία εκ των διαθέσιμων κατηγοριών.

Η κατασκευή της σχέσης υπεροχής

Όπως έχει προαναφερθεί η κατασκευή της σχέσης υπεροχής, προκύπτει μέσω των δεικτών συμφωνίας και των δεικτών ασυμφωνίας. Για κάθε μία εναλλακτική και για κάθε ένα προφίλ, προχωράμε στους παρακάτω υπολογισμούς.

Οι μερικοί δείκτες συμφωνίας:

Υπολογίζουμε, για κάθε κριτήριο, τόσο το μερικό δείκτη συμφωνίας $c_j(a, b_h)$ που μας παρέχει μια ενημέρωση για το βαθμό στον οποίο η εναλλακτική a “είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο” το προφίλ b_h σε ό,τι αφορά το κριτήριο g_j , όσο και το δείκτη συμφωνίας $c_j(b_h, a)$ που μας παρέχει μια ενημέρωση για το βαθμό στον οποίο το προφίλ b_h “είναι τουλάχιστον τόσο καλό” όσο η εναλλακτική a σε ό,τι αφορά το κριτήριο g_j [45]. Η ελάχιστη τιμή ενός δείκτη συμφωνίας είναι το 0, που δηλώνει μηδενική συμφωνία με την αντίστοιχη παραπάνω δήλωση, ενώ η μέγιστη είναι το 1 που δηλώνει απόλυτη ταύτιση με τον αντίστοιχο παραπάνω ισχυρισμό. Φυσικά υπάρχουν και οι ενδιάμεσες τιμές. Οι υπολογισμοί διαφέρουν ανάλογα με το αν η κατεύθυνση προτίμησης του g_j κριτηρίου είναι αύξουσα ή φθίνουσα. Αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης, σημαίνει πως όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εναλλακτικής στο κριτήριο, η προτίμηση του αποφασίζοντος αυξάνεται, ενώ η φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης σημαίνει πως η προτίμηση του αποφασίζοντος αυξάνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή της εναλλακτικής στο κριτήριο.

- Αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης:

$$c_j(a, b_h) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(a) \leq g_j(b_h) - p_j(b_h) \\ \frac{g_j(a) - g_j(b_h) + p_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}, & \text{if } g_j(a) \leq g_j(b_h) - q_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(a) > g_j(b_h) - q_j(b_h) \end{cases}$$

και

$$c_j(b_h, a) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b_h) \leq g_j(a) - p_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) - g_j(a) + p_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}, & \text{if } g_j(b_h) \leq g_j(a) - q_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) > g_j(a) - q_j(b_h) \end{cases}$$

- Φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης:

$$c_j(a, b_h) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b_h) \leq g_j(a) - p_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) - g_j(a) + p_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}, & \text{if } g_j(b_h) \leq g_j(a) - q_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) > g_j(a) - q_j(b_h) \end{cases}$$

και

$$c_j(b_h, a) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(a) \leq g_j(b_h) - p_j(b_h) \\ \frac{g_j(a) - g_j(b_h) + p_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}, & \text{if } g_j(a) \leq g_j(b_h) - q_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(a) > g_j(b_h) - q_j(b_h) \end{cases}$$

Παρατηρούμε πως ο τύπος που δίνει το $c_j(a, b_h)$ στην αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης, ταυτίζεται με τον τύπο που δίνει το $c_j(b_h, a)$ στην φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης. Αντίστοιχη παρατήρηση γίνεται για τα $c_j(b_h, a)$ στην αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης και $c_j(a, b_h)$ στην φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης.

Οι ολικοί δείκτες συμφωνίας:

Υπόλογίζουμε τον ολικό δείκτη συμφωνίας $c(a, b_h)$ ως το σταθμισμένο άθροισμα των μερικών δεικτών συμφωνίας ανά κριτήριο. Η στάθμιση προκύπτει καθώς καθένας εκ των μερικών δεικτών συμφωνίας $c_j(a, b_h)$ πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή σημαντικότητας που έχει αποδοθεί στο κριτήριο g_j . Με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει και ο ολικός δείκτης συμφωνίας $c(b_h, a)$ [45]. Οι ολικοί δείκτες συμφωνίας αποτελούν μία έκφραση του σε ποιο βαθμό το σύνολο των κριτηρίων συμφωνούν με τον ισχυρισμό “η εναλλακτική a υπερέχει του προφίλ b_h ” ή “το προφίλ b_h υπερέχει της εναλλακτικής a ”. Μαθηματικά ο υπολογισμός προκύπτει ως εξής:

$$c(a, b_h) = \frac{\sum_{j \in I} w_j c_j(a, b_h)}{\sum_{j \in I} w_j}$$

$$c(b_h, a) = \frac{\sum_{j \in I} w_j c_j(b_h, a)}{\sum_{j \in I} w_j}$$

Οι μερικοί δείκτες ασυμφωνίας:

Υπολογίζουμε, για κάθε κριτήριο, τόσο το μερικό δείκτη ασυμφωνίας $d_j(a, b_h)$ που μας παρέχει μια ενημέρωση για το βαθμό στον οποίο το κριτήριο j είναι αντίθετο στη συμφωνία

της υπόθεσης $c(a, b_h)$, όσο και το μερικό δείκτη ασυμφωνίας $d_j(a, b_h)$ που μας παρέχει μια ενημέρωση για το βαθμό στον οποίο το κριτήριο g_j είναι αντίθετο στη συμφωνία της υπόθεσης $c(a, b_h)$. Για τους παραπάνω υπολογισμούς χρησιμοποιούμε τα κατώφλια veto. Οι τιμές των μερικών δεικτών ασυμφωνίας κυμαίνονται από 0 έως 1. Τιμή που ισούται με 0, δηλώνει πως το κριτήριο j , δεν προβάλλει αντίθεση στον ισχυρισμό υπεροχής, ενώ τιμή που ισούται με 1, δηλώνει πως το κριτήριο j , αντιτίθεται ισχυρά. Φυσικά υπάρχουν και οι ενδιάμεσες τιμές. Οι υπολογισμοί διαφέρουν ανάλογα με το αν η κατεύθυνση προτίμησης του g_j κριτηρίου είναι αύξουσα ή φθίνουσα.

- Αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης:

$$d_j(a, b_h) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) < p_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) - g_j(a) - p_j(b_h)}{\nu_j(b_h) - p_j(b_h)}, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) < \nu_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) \geq \nu_j(b_h) \end{cases}$$

και

$$d_j(b_h, a) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(a) - g_j(b_h) \leq p_j(b_h) \\ \frac{g_j(a) - g_j(b_h) - p_j(b_h)}{\nu_j(b_h) - p_j(b_h)}, & \text{if } g_j(a) - g_j(b_h) \leq \nu_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) > \nu_j(b_h) \end{cases}$$

- Φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης:

$$d_j(a, b_h) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(a) - g_j(b_h) \leq p_j(b_h) \\ \frac{g_j(a) - g_j(b_h) - p_j(b_h)}{\nu_j(b_h) - p_j(b_h)}, & \text{if } g_j(a) - g_j(b_h) \leq \nu_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) > \nu_j(b_h) \end{cases}$$

και

$$d_j(a, b_h) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) < p_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) - g_j(a) - p_j(b_h)}{\nu_j(b_h) - p_j(b_h)}, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) < \nu_j(b_h) \\ 1, & \text{if } g_j(b_h) - g_j(a) \geq \nu_j(b_h) \end{cases}$$

Συνεπώς όπως φαίνεται και παραπάνω, ένας εναλλακτικός ορισμός του κατωφλίου veto θα μπορούσε να ήταν πως είναι η ελάχιστη διαφορά μεταξύ εναλλακτικής a και προφίλ b_h , η οποία καταρρίπτει τον ισχυρισμό της υπεροχής της a επί της b_h (αντίστοιχα για την περίπτωση της υπεροχής b_h , a είναι η ελάχιστη διαφορά μεταξύ προφίλ b_h και εναλλακτικής a η οποία καταρρίπτει τον ισχυρισμό της υπεροχής).

Βαθμός αξιοπιστίας της σχέσης υπεροχής:

Τον υπολογισμό των μερικών δεικτών συμφωνίας, των ολικών δεικτών συμφωνίας και των μερικών δεικτών ασυμφωνίας ακολουθεί η εύρεση του βαθμού αξιοπιστίας. Ουσιαστικά η πληροφορία που εξάγουμε με αυτό το μετρήσιμο, είναι το πόσο αποδυναμώνουν οι δείκτες ασυμφωνίας με την ολική ή μερική επιβολή veto τους ολικούς δείκτες συμφωνίας. Ισχύει πως [45]:

$$\sigma(a, b_h) = c(a, b_h) \prod_{j \in \bar{I}} \frac{1 - d_j(a, b_h)}{1 - c(a, b_h)}$$

$$\bar{I} = j \in I / d_j(a, b_h) > c(a, b_h)$$

$$\sigma(b_h, a) = c(b_h, a) \prod_{j \in \bar{I}} \frac{1 - d_j(b_h, a)}{1 - c(b_h, a)}$$

$$\bar{I} = j \in I / d_j(b_h, a) > c(b_h, a)$$

Από τη μορφή των εξισώσεων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις [45]:

→ Όταν για όλα τα κριτήρια ισχύει πως $d_j(a, b_h) \leq c(a, b_h)$ τότε ο δείκτης πιστότητας, ισούται με τον ολικό δείκτη συμφωνίας.

→ Όταν έστω και για ένα κριτήριο ισχύει πως ο δείκτης ασυμφωνίας, ισούται με τη μονάδα, τότε ο βαθμός αξιοπιστίας μηδενίζεται και αυτός με τη σειρά του.

→ Στις ενδιάμεσες περιπτώσεις $d_j(a, b_h) > c(a, b_h)$ (ή $d_j(b_h, a) > c(b_h, a)$) ο βαθμός πιστότητας αποδυναμώνεται.

Ο σχηματισμός της σχέσης υπεροχής:

Ο βαθμός πιστότητας αποτελεί την ασαφή σχέση υπεροχής. Τελικός στόχος είναι όμως η κατασκευή μίας καλά ορισμένης σχέσης υπεροχής S . Για το σκοπό αυτό ορίζουμε έναν πραγματικό αριθμό, το τέμνον επίπεδο, $\lambda \in \mathbb{R}$, με $\lambda \in [0,1]$ τέτοιο ώστε:

$$\sigma(a, b_h) \geq \lambda \implies aSb_h$$

Οι τιμές που λαμβάνει η παράμετρος λ είναι συνήθως από 0.5 έως 1 ($\lambda \in [0.5, 1]$), με την επιλογή να επαφίεται στον αναλυτή ανάλογα με την ελαστικότητα που ο αποφασίζων επιθυμεί να έχει το μοντέλο προτίμησης. Έχουν οριστεί δύο διαδικασίες ανάθεσης (assignment procedures): η αισιόδοξη (optimistic) και η απαισιόδοξη (pessimistic).

Η εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής

Πρόκειται για τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούμε τη σχέση υπεροχής που έχει εξαχθεί στη σύγκριση των εναλλακτικών με τα προφίλ, έτσι ώστε να προκύψει η τελική κατάταξη. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις:

- Απαισιόδοξη διαδικασία:

Συγκρίνουμε την υπό εξέταση εναλλακτική, έστω a , διαδοχικά με όλα τα προφίλ, ξεκινώντας από το “καλύτερο” έστω b_p και συνεχίζοντας με το b_{p-1} και ούτω καθεξής. Ο έλεγχος που πραγματοποιούμε με κάθε σύγκριση είναι αν η σχέση υπεροχής έχει ισχύ ($aSb_h, h \in \{0, p\}$). Η αλληλουχία συγκρίσεων διακόπτεται με το που βρεθεί το πρώτο προφίλ h , για το οποίο ικανοποιείται η σχέση υπεροχής aSb_h . Η εναλλακτική τότε ταξινομείται στην κατηγορία που έχει ως κατώτερο προφίλ το b_h , δηλαδή την c_{h+1} .

- Αισιόδοξη διαδικασία:

Συγκρίνουμε την υπό εξέταση εναλλακτική, έστω a , διαδοχικά με όλα τα προφίλ, ξεκινώντας από το “χειρότερο” έστω b_0 και συνεχίζοντας με το επόμενο b_1 και ούτω καθεξής. Ο έλεγχος που πραγματοποιούμε με κάθε σύγκριση είναι αν η σχέση υπεροχής έχει ισχύ ($aSb_h, b_hSa, h \in \{0, p\}$). Η αλληλουχία συγκρίσεων διακόπτεται με το που βρεθεί το πρώτο προφίλ h , για το οποίο ικανοποιείται η σχέση υπεροχής b_hSa αλλά όχι η aSb_h , ισχύει δηλαδή b_hPa (σχέση προτίμησης). Η εναλλακτική τότε ταξινομείται στην κατηγορία που έχει ως ανώτερο προφίλ το b_h , δηλαδή την c_h .

4.2.1 Οι εξελίξεις της μεθόδου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέθοδος ELECTRE TRI-B είναι η μέθοδος της οικογένειας ELECTRE που εφαρμόζεται σε προβλήματα ταξινόμησης. Με την πάροδο του χρόνου προέκυψαν κάποιες παραλλαγές της, με στόχο να βελτιστοποιήσουν την ταξινόμηση των εναλλακτικών. Η ELECTRE TRI-B έχει ως βάση της συγκρίσεων τα διαχωριστικά προφίλ (limiting profiles), τα οποία αποτελούν τα όρια των κατηγοριών και η εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής γίνεται είτε με την αισιόδοξη, είτε με την απαισιόδοξη διαδικασία. Συνοπτικά για τις τρεις κυριότερες παραλλαγές της, ισχύουν τα εξής:

- ELECTRE TRI-nB

Στην ELECTRE TRI-nB, αντί τα διαχωριστικά προφίλ να είναι μοναδικά, πλέον κάθε διαχωριστικό προφίλ αποτελείται από ένα σύνολο τιμών. Με αυτό τον τρόπο οι κατηγορίες είναι καλύτερα ορισμένες και τα αποτελέσματα της μεθόδου πιο συμβατά με το προτιμησιακό μοντέλο του αποφασίζοντα, το οποίο με τη σειρά του ορίζεται με πιο εύκολο τρόπο. Πράγματι η επιλογή μόνο ενός κατώτερου και ενός ανώτερου προφίλ που ορίσουν την κάθε κατηγορία, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, ενώ αντίθετα ο αποφασίζων μπορεί με μεγαλύτερη άνεση να δώσει περισσότερες τιμές [46]. Η ELECTRE TRI-B δεν είναι παρά η μέθοδος ELECTRE TRI-nB για $n=1$.

- ELECTRE TRI-C

Στην ELECTRE TRI-C η έννοια των διαχωριστικών προφίλ καταργείται και πλέον κάθε κατηγορία αντιπροσωπεύεται από μια δράση “αναφοράς” (reference action) ή αλλιώς κεντρικό προφίλ (central profile). Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση συνδιαστικά δύο διαδικασιών ανάθεσης, του αύξοντα κανόνα (ascending rule) και του φθίνοντα κανόνα (descending rule) [47].

- ELECTRE TRI-nC

Στην ELECTRE TRI-nC η έννοια των διαχωριστικών προφίλ καταργείται και πλέον κάθε κατηγορία αντιπροσωπεύεται από n δράσεις “αναφοράς” (reference actions) ή αλλιώς κεντρικά προφίλ (central profiles). Αποτελεί μία γενίκευση της ELECTRE TRI-C, η οποία προκύπτει από την ELECTRE TRI-nC για $n=1$.

4.3 Εφαρμογές της ELECTRE TRI-B σε προβλήματα αποφάσεων

Η ELECTRE TRI-B ως η βασική εκπρόσωπος της γαλλικής σχολής και της ευρύτερης οικογένειας των μεθόδων ELECTRE στο χειρισμό περιπτώσεων ταξινόμησης έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχημένα σε μία μεγάλη ποικιλία προβλημάτων. Σύμφωνα με τους Govindan και Jepsen [48] η μέθοδος έχει επιτυχημένα εφαρμοστεί σε προβλήματα διαχείρισης κινδύνου στο πεδίο των χρηματοοικονομικών και της διαχείρισης της γης, όπως και στη διαχείριση ενέργειας και επιχειρησιακών αποφάσεων. Στην βιβλιογραφική τους ανασκόπηση για την οικογένεια ELECTRE [48] οι παραπάνω συγγραφείς παρουσιάζουν χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της ELECTRE TRI. Οι βασικότεροι τομείς ενδιαφέροντος είναι επιγραμματικά:

- Η διαχείριση ανθρωπίνων πόρων
- Η διαχείριση ενέργειας
- Ο κατασκευαστικός κλάδος
- Συστήματα εφοδιασμού/Εφοδιαστική αλυσίδα
- Διαχείριση χαρτοφυλακίου και επενδύσεων
- Γεωργία
- Στρατηγικές διαχείρισης συστημάτων άρδρευσης
- Γεωλογία και χαρτογραφία

Κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της ELECTRE TRI είναι επίσης τα εξής: Η ταξινόμηση αξιόπιστου λογισμικού σε μία εκ των έξι διαθέσιμων κατηγοριών [49],

η κατηγοριοποίηση των ιταλικών αεροδρομίων με βάση την οριακή και συνολική τους ενεργοποίηση ως αντίδραση στην οικονομική κρίση και τη δυνατότητα τους να κερδοφορούν με την οργάνωση εγκαταστάσεων και υπηρεσιών που διαφέρουν από τις κλασικές [50], η ταξινόμηση χαρτοφυλακίου στη Βραζιλία με τη βοήθεια λογισμικού που υλοποιεί την μέθοδο [51], η συντήρηση υποστήριξης δικτύων διανομής νερού - οι περιοχές του δικτύου ύδρευσης ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες με βάση την προτεραιότητα συντήρησης [52]. Επίσης η μέθοδος εφαρμόστηκε για την ταξινόμηση αντικειμένων με βάση τη διατηρησιμότητα [53], για την ομαδοποίηση κινδύνων σε μία φαρμακευτική αλυσίδα εφοδιασμού [54], όπως και για τις επενδύσεις σε νέες τεχνολογικές υποδομές [55]. Φυσικά η λίστα δεν είναι εξαντλητική, ωστόσο αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του ευρέως φάσματος εφαρμογής της μεθόδου.

4.3.1 Οι εφαρμογές σε προβλήματα ενέργειας και ενεργειακής αποδοτικότητας

Η ELECTRE TRI-B έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα απόφασης που σχετίζονται γενικά με την ενέργεια και πιο ειδικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Κάποια παραδείγματα είναι τα εξής παρακάτω:

- Η χρήση της μεθόδου για την ταξινόμηση των οικοπέδων που προκύπτουν από ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), ως κατάλληλα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε ένα δήμο στα νοτιοανατολικά της Ισπανίας [56]. Επίσης ξανά σε ένα πεδίο σχετιζόμενο με τα φωτοβολταϊκά, είναι η εφαρμογή της μεθόδου για την ταξινόμηση των βέλτιστων τοποθεσιών για τα φωτοβολταϊκά ηλιακά αγροκτήματα, παραθέτοντας και μια σύγκριση με τη μέθοδο TOPSIS [57].
- Η αξιολόγηση της βιώσιμότητας που προκύπτει από την ταξινόμηση σε προκαθορισμένες κατηγορίες μέσω της μεθόδου TRI [58].
- Η ταξινόμηση βιώσιμων τεχνολογιών ενέργειας σε τρεις κατηγορίες (υψηλή προτεραιότητα, χαμηλή προτεραιότητα, μη προτινόμενη) με βάση έξι κριτήρια αξιολόγησης για πέντε αναπτυσσόμενες χώρες σύμφωνα με τις οδηγίες του Πρωτόκολλου του Κιότο για το μηχανισμό καθαρής ανάπτυξης (clean development mechanism) [59].
- Ο καθορισμός προτεραιοτήτων για το μετριασμό των αερίων του θερμοκηπίου και η υλοποίηση ενός σχεδίου δράσης [60].
- Η ταξινόμηση της ενεργειακής απόδοσης των σχολικών κτιρίων σε τέσσερις κατηγορίες (Χαμηλή, Μέτρια, Καλή, Πολύ Καλή) με βάση έξι κριτήρια [61].
- Η ταξινόμηση πρωτοβουλιών ενεργειακής αποδοτικότητας σε τέσσερις κατηγορίες (“Για απόρριψη-Όχι”, “Για εφαρμογή-Ναι”, “Ίσως ναι”, “Ίσως όχι”) [62].

Κεφάλαιο 5

Η ELECTRE TRI-B στην ταξινόμηση επενδύσεων ενεργειακής αποδοτικότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του εργαλείου Agree, που είναι ένα από τα τρία “συστατικά” της Triple-A μεθοδολογίας (Assess-Agree-Assign) καθώς και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του. Όπως πιο αναλυτικά αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο το Triple-A project έχει ως σκοπό να αυξήσει τη ροή κεφαλαίου στις επενδύσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, διαχωρίζοντας τις επενδύσεις που είναι επαρκώς ενεργειακά αποδοτικές και μπορούν να ανταποκριθούν στις οικονομικές δεσμεύσεις τους, από το σύνολο των υπόλοιπων επενδύσεων. Στο στάδιο Agree οι επενδυτικές προτάσεις ενεργειακής αποδοτικότητας που έχουν “προαχθεί” από το προηγούμενο στάδιο Assess, πρέπει να ταξινομηθούν σε μία εκ τριών διαθέσιμων κατηγοριών. Η επένδυση τελικά κατηγοριοποιείται, είτε ως Rejected, είτε ως Reserved, είτε ως Triple-A λαμβάνοντας υπόψιν τις διάφορες παραμέτρους οι οποίες δίνονται ως είσοδος στο εργαλείο.

5.1 Η επιλογή της μεθόδου για το Agree tool

Το κύριο λοιπόν πρόβλημα το οποίο είχε να αντιμετωπίσει το εργαλείο Agree είναι η ταξινόμηση της εισόδου που λάμβανει από το προηγούμενο στάδιο σε μία εκ τριών προκαθορισμένων κατηγοριών. Εφόσον είναι φανερό πως πρόκειται για ένα πρόβλημα απόφασης, το οποίο μάλιστα υπάγεται στην προβληματική β, της ταξινόμησης, η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων θεωρήθηκε η βέλτιστη μέθοδος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Αρχικά η μέθοδος ELECTRE TRI-B υπήρξε η βασική υποψήφια για το χειρισμό του προβλήματος, επιλογή που τελικά επικυρώθηκε από την παρακάτω ανάλυση που παραθέτει τα πολλαπλά πλεονεκτήματά της. Ακολουθούν κάποιες από τις πιο γνωστές μέθοδοι-ανταγωνιστές της TRI ως προς την ταξινόμηση. Η πρώτη είναι η μέθοδος UTADIS που ανήκει στην κατηγορία της ανάλυσης-σύνθεσης, η Flowsort που είναι μια παραλλαγή της PROMETHEE και φυσικά οι “απόγονοι” της ELECTRE TRI-B που δεν είναι άλλες από τις ELECTRE TRI-nB, ELE-

CTRE TRI-C, ELECTRE TRI-nC. Τα στοιχεία που οδήγησαν στην συγκεκριμένη επιλογή είναι λοιπόν τα εξής:

- Η μέθοδος μπορεί να διαχειριστεί έως ένα βαθμό την “ατελή φύση της γνώσης” (imperfect nature of knowledge). Μπορούμε να διαχειριστούμε την ανακρίβεια, το μη ακριβή προσδιορισμό και την αβεβαιότητα (imprecision, ill-determination, uncertainty) με τη χρήση των ψευδοκριτηρίων, όπως αναλυτικά έχει αναφερθεί και παραπάνω.
- Οι συγκρίσεις που απαιτούνται για τη δημιουργία της σχέσης υπεροχής γίνονται μεταξύ της υπό εξέταση εναλλακτικής και των διαχωριστικών προφίλ, και όχι μεταξύ των εναλλακτικών όπως συμβαίνει σε άλλες μεθόδους που βασίζονται στις σχέσεις υπεροχής. Με αυτό τον τρόπο η προσθήκη παραδείγματος χάριν μίας επιπλέον εναλλακτικής, δεν επηρεάζει τα υπάρχοντα αποτελέσματα.
- Η μέθοδος είναι μη αντισταθμιστική. Η εξαιρετική επίδοση δηλαδή σε ένα κριτήριο, δεν μπορεί να “αποζημιώσει” για την κακή επίδοση σε ένα άλλο κριτήριο. Έτσι αποφεύουμε την ταξινόμηση μια εναλλακτικής που αποδίδει πολύ καλά σε ένα κριτήριο, αλλά άσχημα σε ένα άλλο, σε μία “υψηλή” κατηγορία. Βέβαια τα κατώφλια προτίμησης και αδιαφορίας μπορούμε να πούμε πως επιτρέπουν ένα είδος αντιστάθμισης, αλλά τα κατώφλια veto με τη σειρά τους δρουν με ισχυρό τρόπο στη ολική διατήρηση του μη αντισταθμιστικού χαρακτήρα. Αντίθετα η μέθοδος UTADIS, κάνοντας χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας έχει αντισταθμιστικό χαρακτήρα. Επίσης η μέθοδος Flowsort δεν χρησιμοποιείται εύκολα με κατώφλια veto [63].
- Η σχέση μη συγκρισιμότητας (incomparability) μπορεί να μοντελοποιηθεί από την ELECTRE TRI-B. Οι περιπτώσεις στις οποίες ο αποφασίζων δεν μπορεί, δε θέλει ή δεν ξέρει πως να συγκρίνει εναλλακτικές δεν είναι πρόβλημα. Στην UTADIS όμως για παράδειγμα οι εναλλακτικές θα υπάγονται είτε σε σχέση προτίμησης, είτε σε σχέση αδιαφορίας [64].
- Δεν είναι υποχρεωτικά μεταβατική, επομένως μπορούμε να μοντελοποιήσουμε και περιπτώσεις που δεν υπάγονται απαραίτητα στο μεταβατικό κανόνα.
- Σε σχέση με τις παραλλαγές της οικογένειας TRI, η ELECTRE TRI-B είναι αυτή που έχει εφαρμοστεί τις περισσότερες φορές και για την οποία έχουν αναπτυχθεί εργαλεία βοήθειας (IRIS, Electre Tri Assistant). Οι υπόλοιποι “απόγονοι” είναι σχετικά νέοι και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχο βαθμό.

5.2 Η μοντελοποίηση του προβλήματος

Όπως και σε κάθε πρόβλημα απόφασης, έτσι και σε αυτό ακολουθήσαμε τα βήματα που αναγράφονται στο Κεφάλαιο 2 για την πλήρη μοντελοποίηση του προβλήματος. Η προβληματική είναι αυτή της ταξινόμησης και για το μοντέλο ολικής προτίμησης, επιλέχθηκε η μέθοδος

ELECTRE TRI-B. Η συνεπής οικογένεια κριτηρίων επιλέχθηκε να αποτελείται από τα εξής τέσσερα κριτήρια:

Οικονομικός δείκτης: Το πρώτο κριτήριο επιλέχθηκε να είναι κάποιος δείκτης που σχετίζεται με την απόδοση της εναλλακτικής σε οικονομικό επίπεδο. Μιας και σκοπός είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών επενδύσεων, φυσικά και ένα τουλάχιστον κριτήριο έπρεπε να είναι σε αυτή την κατεύθυνση. Η επιλογή μπορεί να γίνει από το χρήστη, μεταξύ των τριών παρακάτω δεικτών:

- Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value - NPV):

Ο συγκεκριμένος δείκτης αξιολογεί την κερδοφορία μιας επένδυσης, υπό το πρίσμα του ότι η σημερινή αξία μίας χρηματικής μονάδας στο μέλλον διαφέρει από τη σημερινή της αξία. Υπολογίζουμε ουσιαστικά την τωρινή αξία, μιας μελλοντικής ροής. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

$$-N_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A}{(1+i)^t}$$

Όπου, N_0 το αρχικό κόστος της επένδυσης, A = ταμειακές εισροές - ταμειακές εκροές, i το προεξοφλητικό επιτόκιο, n ο αναμενόμενος χρόνος ζωής της επένδυσης.

Γενικά η τάση είναι να προτιμάμε επενδύσεις που έχουν θετική καθαρή παρούσα αξία και να αποφεύγουμε εκείνες με αρνητικές τιμές. Με λίγα λόγια τιμές $NPV > 0$ δηλώνουν κερδοφορία, ενώ τιμές $NPV < 0$ ζημία. Συνεπώς καταλαβαίνουμε πως η καθαρή παρούσα αξία είναι ένα κριτήριο προς μεγιστοποίηση maximization criterion, εφόσον οι μεγαλύτερες τιμές αποτελούν ένδειξη μεγαλύτερης κερδοφορίας και άρα η προτίμηση του αποφασίζοντος μεγαλώνει προς αυτή την κατεύθυνση [65].

- Περίοδος Αποπληρωμής με έκπτωση (Discounted Payback Period - DPP):

Πρόκειται για έναν ακόμη οικονομικό δείκτη που αξιολογεί την κερδοφορία μιας επένδυσης. Και σε αυτή την περίπτωση οι μελλοντικές ταμειακές ροές ανάγονται στο σήμερα, ώστε να λάβουμε υπόψιν τη “χρονική αξία του χρήματος” (time value of money). Με αυτό το δείκτη ουσιαστικά λαμβάνουμε πληροφόρηση για τον αριθμό των ετών, τα οποία χρειάζονται ώστε να αποπληρώσουμε την αρχική δαπάνη της επένδυσης. Πρόκειται συνεπώς για ένα κριτήριο προς ελαχιστοποίηση (minimization criterion), εφόσον φυσικά μικρότερη περίοδος απόσβεσης είναι περισσότερο θεμιτή και άρα η προτίμηση του αποφασίζοντος μεγαλώνει προς αυτή την κατεύθυνση, όσο δηλαδή ο δείκτης DPP μειώνεται.

- Εσωτερικό ποσοστό απόδοσης (Internal Rate of Return - IRR):

Όπως και οι δύο παραπάνω δείκτες, έτσι και το εσωτερικό ποσοστό απόδοσης είναι με τη σειρά του ένας οικονομικός δείκτης αξιολόγησης της κερδοφορίας. Ισούται ουσιαστικά με την τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου για την οποία η καθαρή παρούσα αξία μηδενίζεται. Γενικά όσο μεγαλύτερος ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ή εσωτερικό

ποσοστό απόδοσης, τόσο πιο ελκυστική είναι μία επένδυση. Συνεπώς πρόκειται για ένα κριτήριο προς μεγιστοποίηση (maximization criterion), εφόσον οι μεγαλύτερες τιμές αποτελούν ένδειξη μεγαλύτερης κερδοφορίας και άρα η προτίμηση του αποφασίζοντος μεγαλώνει προς αυτή την κατεύθυνση.

Avoidance Cost:

Η αποδοτικότητα κόστους (“Avoidance Cost” ή Cost Effectiveness) ορίζεται για τις ανάγκες του project ως το πηλίκο του κόστους (αρχικό ποσό) της επένδυσης διά τη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής της. Οι μονάδα μέτρησης του λοιπόν είναι ευρά ανά κιλοβατώρα. Όσο μικρότερος είναι αυτός ο δείκτης, τόσο πιο ελκυστική είναι μία επένδυση, μιας και κάτι τέτοιο συνεπάγεται σχετικά μικρό κόστος επένδυσης ή σχετικά μεγάλα ποσά εξοικονόμησης. Το κριτήριο αυτό λοιπόν είναι ένα κριτήριο προς ελαχιστοποίηση.

Συνολικό Ρίσκο Aggregated Risk

Το συνολικό ρίσκο προκύπτει από το στάδιο της Αξιολόγησης (Assess) της μεθοδολογίας Triple-A και έρχεται ως είσοδος στη μέθοδο ELECTRE TRI-B. Είναι ο μέσος όρος πέντε ξεχωριστών κατηγοριών ρίσκου που υπολογίζονται στο πρώτο στάδιο, κατά το οποίο δίνονται απαντήσεις σε κάποιες ερωτήσεις, ανάλογα βέβαια με την κατηγορία της υπό εξέταση επένδυσης. Τα είδη του ρίσκου είναι τα εξής:

- Χρηματοοικονομικό Ρίσκο (Financial Risk)
- Ρίσκο Συμπεριφοράς (Behavioral Risk)
- Ρίσκο που σχετίζεται με την αγορά ενέργειας και ρυθμιστικό ρίσκο (Energy Market and Regulatory Risk)
- Οικονομικό Ρίσκο (Economical Risk)
- Τεχνολογικό, σχεδιαστικό και λειτουργικό ρίσκο (Technological, Planning and Operational Risk)

Το αθροιστικό ρίσκο λοιπόν ενσωματώνει σε μία τιμή τους διαφορετικούς τύπους κινδύνου που σχετίζονται με μία επένδυση ενεργειακής αποδοτικότητας. Εννοείται και σε αυτή την περίπτωση πως γίνεται λόγος για ένα κριτήριο προς ελαχιστοποίηση. Όταν μία επένδυση συνδέεται με μικρότερη τιμή ρίσκου, η προτίμηση του αποφασίζοντος προς αυτή αυξάνεται.

Δείκτης βιώσιμης ανάπτυξης - SDG

Ο δείκτης βιώσιμης ανάπτυξης (Sustainable Development Goal index) είναι το κριτήριο που αξιολογεί τη συνεισφορά της επένδυσης σε οτιδήποτε σχετίζεται με τη βιωσιμότητα τόσο στην οικονομία όσο και στην κοινωνία αλλά και το περιβάλλον. Ο συγκεκριμένος δείκτης εξαρτάται από τον τομέα της επένδυσης και τη χώρα εφαρμογής της και αποτελεί μία ένδειξη για την επίδοση της επένδυσης στους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, όπως αυτοί έχουν επίσημα οριστεί από τα Ηνωμένα Έθνη. Έγινε λοιπόν μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης η

οποία βασίζεται σε στατιστικούς δείκτες (statistical indices) οι οποίοι παρέχονται από την επίσημη ιστοσελίδα της ευρωπαϊκής στατιστικής υπηρεσίας [66]. Πρόκειται για ένα κριτήριο προς μεγιστοποίηση, καθώς υψηλότερη απόδοση στη συνολική βιωσιμότητα συνδέεται με πιο ελκυστικές επενδύσεις στη σημερινή εποχή.

Τα παραπάνω τέσσερα κριτήρια επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση του προβλήματος, ώστε να δομήσουν τη ζητούμενη συνεπή οικογένεια. Η ταξινόμηση με τη σειρά της επιλέχθηκε να γίνει μεταξύ τριών διατεταγμένων κατηγοριών. Η πρώτη και “χειρότερη” ονομάστηκε Rejected, η δεύτερη και “ενδιάμεση” ονομάστηκε Reserved και η τρίτη και “καλύτερη” πήρε το όνομα Triple-A. Συνεπώς για να μοντελοποιήσουμε τρεις κατηγορίες, χρειαζόμαστε δύο διαχωριστικά προφίλ, τα οποία θα λαμβάνουν τιμές σε καθένα εκ των τεσσάρων κριτηρίων. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω τελικά έχουμε:

- Τέσσερα κριτήρια g_0, g_1, g_2, g_3 με:
 - g_0 : Financial Criterion
 - g_1 : Avoidance Cost Criterion
 - g_2 : Risk Criterion
 - g_3 : SDG Criterion

- Τα κανονικοποιημένα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε κριτήριο w_0, w_1, w_2, w_3

- Δύο διαχωριστικά προφίλ b_0, b_1 , τα οποία λαμβάνουν τιμές και στα τέσσερα κριτήρια, οπότε καταλήγουμε σε δύο διανύσματα:
 - $b_0 = \{g_0(b_0), g_1(b_0), g_2(b_0), g_3(b_0)\}$
 - $b_1 = \{g_0(b_1), g_1(b_1), g_2(b_1), g_3(b_1)\}$

- Τρεις διατεταγμένες κατηγορίες που οριοθετούνται από τα διαχωριστικά προφίλ, η “καλύτερη” C_0 με ανώτερο όριο το b_0 , η “μεσαία” C_1 με κατώτερο όριο το b_0 και ανώτερο όριο το b_1 και η “χειρότερη” C_2 με κατώτερο όριο το b_1 . Η ονομαστική αντιστοίχιση είναι η εξής:
 - C_0 : Rejected
 - C_1 : Reserved
 - C_2 : Triple-A

- Δύο διανύσματα κατωφλίων αδιαφορίας, ένα που να αντιστοιχεί στο προφίλ b_0 και να παίρνει τιμές για κάθε κριτήριο και ένα που να αντιστοιχεί στο b_1 και να παίρνει επίσης τιμές για κάθε ένα από τα κριτήρια:
 - $q_{b_0} = \{q_0(b_0), q_1(b_0), q_2(b_0), q_3(b_0)\}$
 - $q_{b_1} = \{q_0(b_1), q_1(b_1), q_2(b_1), q_3(b_1)\}$

- Δυο διανύσματα κατωφλίων προτίμησης, ένα που να αντιστοιχεί στο προφίλ b_0 και να παίρνει τιμές για κάθε κριτήριο και ένα που να αντιστοιχεί στο b_1 και να παίρνει επίσης τιμές για κάθε ένα από τα κριτήρια:

$$\rightarrow p_{b_0} = \{p_0(b_0), p_1(b_0), p_2(b_0), p_3(b_0)\}$$

$$\rightarrow p_{b_1} = \{p_0(b_1), p_1(b_1), p_2(b_1), p_3(b_1)\}$$

- Δυο διανύσματα κατωφλίων veto, ένα που να αντιστοιχεί στο προφίλ b_0 και να παίρνει τιμές για κάθε κριτήριο και ένα που να αντιστοιχεί στο b_1 και να παίρνει επίσης τιμές για κάθε ένα από τα κριτήρια:

$$\rightarrow \nu_{b_0} = \{\nu_0(b_0), \nu_1(b_0), \nu_2(b_0), \nu_3(b_0)\}$$

$$\rightarrow \nu_{b_1} = \{\nu_0(b_1), \nu_1(b_1), \nu_2(b_1), \nu_3(b_1)\}$$

- Το διάνυσμα της υπό αξιολόγησης εναλλακτικής, έστω a που αποτελείται από τις τιμές που δίνονται ως 'αποδόσεις' της σε κάθε ένα από τα τέσσερα κριτήρια.

Από όλα τα παραπάνω στοιχεία ο κώδικας της ELECTRE TRI-B δέχεται ως είσοδο τις εξής παραμέτρους:

1. Επιλογή του οικονομικού δείκτη που τελικά θα χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο. Η επιλογή γίνεται μεταξύ των NPV, DPP, IRR.
2. Τα βάρη (συντελεστές σημαντικότητας) που αντιστοιχούν σε κάθε κριτήριο. Η κλίμακα επιλογής είναι: Πολύ Χαμηλό - 1 (Very Low), Χαμηλό - 2 (Low), Μέτριο - 3 (Medium), Υψηλό - 4 (High), Πολύ υψηλό - 5 (Very High). Έπειτα τα βάρη αυτά κανονικοποιούνται, ώστε να αθροίζονται στη μονάδα.

Τα προφίλ έχουν οριστεί εσωτερικά, αναλογά φυσικά και με την κατηγορία στην οποία ανήκει η υποψήφια επένδυση, έπειτα από συζητήσεις με διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη (Stakeholders). Θα ακολουθήσει μια συνοπτική αλλά λεπτομερής ανάλυση που αφορά τη συνολική end-to-end λειτουργία του εργαλείου Triple-A.

5.3 Οι βελτιστοποιήσεις στον κώδικα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, ένα μεγάλο κομμάτι υπήρξε η διόρθωση και βελτιστοποίηση του κώδικα υλοποίησης της πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE-TRI-B, η αρχική έκδοση του οποίου διαμορφώθηκε από άλλο προγραμματιστή. Η βασική δομή υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python και συγκεκριμένα την έκδοση Python 3.7.7. Εφόσον

στα πρώιμα στάδια υλοποίησης του έργου δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα από υπάρχουσες επενδύσεις, οι έλεγχοι και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με εικονικά δεδομένα, βάση της πληροφόρησης για το όρια των διαχωριστικών προφίλ.

Ο πρώτος βασικός έλεγχος έδειξε πως η μέθοδος εμφάνιζε συνεχώς ως αποτέλεσμα Triple-A, ακόμα και σε περιπτώσεις στις οποίες ήταν εμφανές πως αυτό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει, όπως παραδείγματος χάριν όταν θέταμε σε όλα τα κριτήρια τιμές που ήταν χειρότερες από τα όρια του κατώτερου διαχωριστικού προφίλ.

Με μία πρώτη ανάλυση τα θέματα που εντοπίστηκαν και διορθώθηκαν είναι τα εξής:

■ Εφαρμογή λανθασμένων συγκρίσεων:

Γίνονταν συγκρίσεις της εισόδου για ένα κριτήριο, όχι με το αντίστοιχο κριτήριο που αντιστοιχούσε στο συγκεκριμένο προφίλ, αλλά με κάποιο άλλο. Παραδείγματος χάριν ανάμεσα στην είσοδο του χρήστη για το κριτήριο DPP και την τιμή του χαμηλότερου διαχωριστικού προφίλ για το κριτήριο του Avoidance Cost.

■ Διόρθωση της σειράς των προφίλ:

Στην περίπτωση που έχουμε κριτήρια προς ελαχιστοποίηση τότε ως “χαμηλότερο” διαχωριστικό προφίλ θέτουμε αυτό με τη μεγαλύτερη τιμή και ως “υψηλότερο” διαχωριστικό προφίλ αυτό με τη μικρότερη, όταν χρησιμοποιούμε τις σχέσεις που προορίζονται για φθίνουσα κατεύθυνση προτίμησης, κάτι το οποίο δεν είχε ληφθεί υπόψιν. Αυτό είναι κατά την άποψή μου το σωστό να γίνεται, εφόσον οι κατηγορίες σύμφωνα με την ELECTRE TRI-B πρέπει να είναι διατεταγμένες, και συνεπώς και η σειρά με την οποία γίνονται οι συγκρίσεις πρέπει να “υπακούει” σε αντίστοιχους κανόνες. Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις που προορίζονται για την αύξουσα κατεύθυνση προτίμησης, αφού πρώτα αλλάξουμε το πρόσημο στην απόδοση της εναλλακτικής στο κριτήριο, αλλά και στις επιδόσεις των προφίλ σε αυτό.

■ Επιλογή της απαισιόδοξης διαδικασίας εκμετάλλευσης της σχέσης υπεροχής:

Επιλέχτηκε η απαισιόδοξη (pessimistic) διαδικασία ανάθεσης, έναντι της αισιόδοξης (optimistic) που ήταν η αρχική προσέγγιση. Η ενέργεια αυτή έγινε για τους τρεις παρακάτω λόγους:

- Με αυτό το τρόπο ακόμα και στις περιπτώσεις που καταλήγουμε σε σχέση μη συγκρισιμότητας (incomparability - R), η υπό εξέταση εναλλακτική δεν ταξινομείται στην καλύτερη διαθέσιμη κατηγορία όπως συμβαίνει με την αισιόδοξη διαδικασία ανάθεσης, αλλά στη χειρότερη. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, ταιριάζει πιο πολύ στις αξιολογήσεις επενδυτικών έργων, όπου μια συγκρατημένη πολιτική πιθανώς να είναι περισσότερο ασφαλής, ιδιαίτερα στα πρώτα αναγνωριστικά στάδια.

- Η επιλογή προσέγγισης συνδέεται άμεσα και με τη τιμή που θέτουμε για το λ τέμνον επίπεδο (λ - cutting level). Πράγματι η απαισιόδοξη προσέγγιση ονομάζεται και συνδυαστική (conjunctive) καθώς στην περίπτωση που $\lambda=1$, τότε μία εναλλακτική μπορεί να ταξινομηθεί σε μία κατηγορία εάν για κάθε κριτήριο οι “επιδόσεις” της είναι “καλύτερες” από αυτές που αντιστοιχούν στο κατώτερο διαχωριστικό προφίλ της κατηγορίας αυτής. Είναι δηλαδή σαν να υλοποιούμε μία πράξη AND μεταξύ των κριτηρίων. Βέβαια όσο ελαττώνεται η τιμή του λ , ο συζευκτικός χαρακτήρας φθίνει. Βέβαια η τιμή $\lambda=0.75$ δεν σημαίνει πως κάθε φορά που σε τρία από τα κριτήρια οι “επιδόσεις” της εξεταζόμενης εναλλακτικής είναι “καλύτερες” από αυτές που αντιστοιχούν στο κατώτερο διαχωριστικό προφίλ μίας κατηγορίας, θα ταξινομείται σε αυτή. Τα κατώφλια veto θα επιτρέψουν ή δε θα επιτρέψουν αυτή την ταξινόμηση. Ακόμα δηλαδή και σε περιπτώσεις που δεν έχουμε να διαχειριστούμε τη μη δυνατή σύγκριση, επιλέγουμε να ταξινομούμε με φειδώ στις “καλύτερες” κατηγορίες, ενισχύοντας το χαρακτήρα της συγκρατημένης πολιτικής.
- Στη βιβλιογραφία γίνεται εκτεταμένη αναφορά στην απαισιόδοξη διαδικασία, η οποία χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο σε σχέση με την αισιόδοξη. Τόσο οι εφαρμογές της μεθόδου, όσο και οι διαδικασίες συμπερασμού και τα βοηθητικά εργαλεία για τα οποία γίνεται αναφορά στη βιβλιογραφία, αφορούν στην πλειονότητα τους την απαισιόδοξη ELECTRE TRI-B. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι πολύ βοηθητικό για μελλοντικές βελτιώσεις της μεθόδου.

■ Ανάθεση τιμών στα κατώφλια συμφωνίας, ασυμφωνίας και veto:

Όλα τα κατώφλια (αδιαφορίας, προτίμησης, veto) είχαν λάβει ως τιμή τους το μηδέν. Έτσι αφενός δεν γινόταν εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρουν για μία πιο έγκυρη σύγκριση, η οποία διαχειρίζεται περιπτώσεις αβεβαιότητας, ανακρίβειας και μη ακριβούς προσδιορισμού και αφετέρου δεν οδηγούμαστε στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, όταν τα κατώφλια $veto=0$, αυτό έχει ως αποτέλεσμα οποιαδήποτε μη θεμιτή διαφορά ανάμεσα στην εναλλακτική που εξετάζουμε και το αντίστοιχο προφίλ, να θέτει τον αντίστοιχο μερικό δείκτη ασυμφωνίας ίσο με τη μονάδα. Εάν μιλάμε για περιπτώσεις στις οποίες η κατεύθυνση προτίμησης είναι αύξουσα το πρόβλημα εντοπίζεται όταν η επίδοση της εναλλακτικής είναι μικρότερη από την επίδοση του προφίλ σε κάποιο κριτήριο, ενώ όταν η κατεύθυνση προτίμησης είναι φθίνουσα το πρόβλημα είναι όταν η επίδοση της εναλλακτικής είναι μικρότερη από την επίδοση του προφίλ σε κάποιο κριτήριο. Το αποτέλεσμα είναι ακόμα και αμελητέες διαφορές να μηδενίζουν το βαθμό αξιοπιστίας (degree of credibility) και να καταλήγουμε πολύ συχνά σε σχέση ασυγκρισσιμότητας (incomparability). Η ανάθεση τιμών στα κατώφλια είναι βέβαια πολύ χρήσιμη ανέξαρτητα με τον τύπο εκμετάλλευσης της σχέσης υπεροχής που επιλέγουμε, μιας και μπορούμε να ορίσουμε την ελαστικότητα που επιθυμούμε να έχει το προτιμησιακό μοντέλο του αποφασίζοντος. Οι τιμές που επιλέχθηκαν τελικά σχετίζονται με τις τιμές των αντίστοιχων προφίλ με τον εξής τρόπο:

→ Κατώφλια αδιαφορίας q : Ορίζονται ως το 0.05 της τιμής που έχει το αντίστοιχο προφίλ σε κάθε κριτήριο.

→ Κατώφλια προτίμησης p : Ορίζονται ως το 0.1 της τιμής που έχει το αντίστοιχο προφίλ σε κάθε κριτήριο.

→ Κατώφλια veto v : Ορίζονται ως το 0.5 της τιμής που έχει το αντίστοιχο προφίλ σε κάθε κριτήριο.

Η ιδέα για το συγκεκριμένο τρόπο ανάθεσης προήλθε από την εργασία των Mousseau και Slowinski [3], οι οποίοι θέτουν αντίστοιχα τις αυθαίρετες τιμές για τα κατώφλια προτίμησης και αδιαφορίας. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση δεν γίνεται λόγος για τα κατώφλια veto, αλλά γενικεύοντας τα παραπάνω και φυσικά λαμβάνοντας υπόψιν τον περιορισμό που ορίζει πως τα κατώφλια veto είναι μεγαλύτερα από τα κατώφλια προτίμησης και αδιαφορίας, ορίστηκαν αντίστοιχα και αυτά.

5.4 Περιγραφή λειτουργίας Agree

Όπως επισημάνθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, η λειτουργική μέθοδος ELECTRE TRI-B ενσωματώθηκε στο εργαλείο Agree του Triple-A. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του, ώστε να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο “δένουν” όλα τα συστατικά μεταξύ τους.

Είσοδοι από το στάδιο της Αξιολόγησης (Assess)

Σε αυτό το στάδιο ο χρήστης δίνει κάποιες βασικές πληροφορίες, όπως το όνομα του προς αξιολόγηση έργου, τη χώρα, την περιοχή, κάποια στοιχεία επικοινωνίας και μία σύντομη περιγραφή. Οι χώρες ενδιαφέροντος είναι η Βουλγαρία, η Τσεχία, η Γερμανία, η Ελλάδα, η Ιταλία, η Λιθουανία, η Ισπανία και η Ολλανδία. Επίσης επιλέγει τον τομέα στον οποίο υπάγεται το έργο. Οι επιλογές είναι οι εξής παρακάτω όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1:

→ Κτίρια (Buildings)

→ Τομέας Παραγωγής και Κατασκευών (Manufacturing)

→ Μεταφορές (Transportation)

→ Περιφερειακά Ενεργειακά Δίκτυα (District Energy Networks)

→ Φωτισμός Εξωτερικών Χώρων (Outdoor Lighting)

Τα κτίρια είναι μία ειδική περίπτωση, καθώς σε αυτά μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ οικιακών και μη οικιακών κτιρίων (residential and non-residential), αλλά και μεταξύ έξι διαφορετικών κατηγοριών, με τη δυνατότητα πολλαπλής επιλογής. Αυτές είναι: Οι μετασκευές κτιρίων (building envelope retrofits), οι μετασκευές στα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVACR retrofits), οι μετασκευές στις συσκευές φωτισμού (lighting appliances retrofits), οι μετασκευές αυτόματου ελέγχου (automatic control retrofits), οι εγκαταστάσεις



Σχήμα 5.1: Triple-A Sectors (Πηγή: [6])

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (RES installations) και οι κατασκευές νέων κτιρίων (new buildings construction). Ακολουθεί η επιλογή του υποτομέα - subsector (για τους άλλους τομείς εκτός των κτιρίων) και το βήμα στο οποίο παρουσιάζονται οι κανόνες που έχει θεσπίσει η ευρωπαϊκή ταξονομία (Taxonomy) και ο χρήστης πρέπει να απαντήσει αν το έργο συμμορφώνεται με τις σχετικές υποδείξεις (Taxonomy compliant). Ακολουθεί μία σειρά ερωτήσεων βάσει των οποίων υπολογίζεται το συνολικό ρίσκο της υποψήφιας επένδυσης (οικονομικό ρίσκο, ρίσκο συμπεριφοράς, ρίσκο που σχετίζεται με την αγορά ενέργειας και ρυθμιστικό ρίσκο, τεχνολογικό σχεδιαστικό και λειτουργικό ρίσκο).

Το στάδιο Agree

Στο στάδιο αυτό ο χρήστης πρέπει να δώσει κάποια βασικά μεγέθη που αφορούν την επένδυση και μέσω των οποίων θα υπολογιστούν εσωτερικά από το εργαλείο τα μεγέθη που αποτελούν τις επιδόσεις της εναλλακτικής, τα κριτήρια δηλαδή που χρησιμοποιούνται για τις συγκρίσεις στη μέθοδο ELECTRE TRI-B.

Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης συμπληρώνει τις τιμές της ετήσιας εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας σε kWh (Annual electricity savings), φυσικού αερίου (Annual natural gas savings) και εξοικονόμησης ενέργειας από άλλα καύσιμα (Annual other fuel savings) τις οποίες θα επιφέρει η υλοποίηση του προς εξέταση έργου. Προαιρετικά ο χρήστης μπορεί να συμπληρώσει και την ετήσια χρηματική εξοικονόμηση σε ευρώ (Monetary Savings). Ακόμα πρέπει να δοθούν οι πληροφορίες για το συνολικό κόστος της επένδυσης (Total Investment Cost) σε ευρώ, τα ετήσια λειτουργικά έξοδα (Annual operating cost) καθώς και για την ετήσια τιμή των εναλλακτικών καυσίμων Annual Other fuel price). Επίσης συμπληρώνεται η εκτιμώμενη ετήσια μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα σε τόνους (Annual Expected Reduction of CO₂ emissions).

Οι τιμές καυσίμων (ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου) ανά χώρα εισάγονται αυτόματα στο εργαλείο από τη βάση δεδομένων της ευρωπαϊκής στατιστικής υπηρεσίας. Οπότε με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων πλέον μπορούν να υπολογιστούν εσωτερικά οι χρηματοροές που προκύπτουν από την εξοικονόμηση ενέργειας και είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας (NPV), του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR), της περιόδου αποπληρωμής με έκπτωση (DPP), καθώς και του Avoidance Cost. Το συνολικό ρίσκο όπως έχει ήδη αναφερθεί “έρχεται” από το στάδιο της αξιολόγησης (Assess), ενώ ο δείκτης βιωσιμότητας υπολογίζεται και εκείνος με τη σειρά του εσωτερικά από το εργαλείο,

The screenshot displays the 'Agree' first screen of a software application. At the top left, there is a navigation link 'Home > Agree'. The main heading is 'Please Provide the Following Information'. Below this, there is a 'Project name:' label and a dropdown menu with the text 'Please Select a Project'. The form is divided into three main sections: 'Savings', 'Costs', and 'Project Visibility'. The 'Savings' section includes four input fields for 'Annual electricity savings (kWh/year)', 'Annual natural gas savings (kWh/year)', 'Annual other fuel savings (kWh/year)', and 'Annual Monetary Savings €/ year(optional)'. The 'Costs' section includes three input fields for 'Total investment cost (€)', 'Annual operating cost (€/year)', and 'Annual Other fuel price (€/kWh)'. Below the 'Costs' section is a 'CO₂' section with one input field for 'Annual Expected reduction of CO₂ emissions (tonnes/year)'. The 'Project Visibility' section contains a radio button interface for selecting whether the project should be visible by other users, with options for 'Private Project' and 'Public Project'. A 'Submit' button is located at the bottom right of the form.

Σχήμα 5.2: Agree First Screen (Πηγή: [6])

βάση της συνολικής εισόδου που έχει δώσει ο χρήστης.

Στο επόμενο στάδιο, ο χρήστης επιλέγει με ποιο από τα τρία διαθέσιμα οικονομικά κριτήρια (NPV, DPP, IRR) επιθυμεί να πραγματοποιήσει την ανάλυση και αποφαινεται για τη σημαντικότητα (βάρος) για καθένα από τα τέσσερα διαθέσιμα κριτήρια. Συγκεκριμένα η επιλογή των βαρών πραγματοποιείται με τη χρήση γλωσσικών μεταβλητών οι οποίες αποδίδονται με την παρακάτω κλίμακα: Πολύ Χαμηλή (Very Low), Χαμηλή (Low), Μέτρια (Medium), Υψηλή (High) και Πολύ Υψηλή (Very High), όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Ως προκαθορισμένη επιλογή εμφανίζεται η πολύ υψηλή σημαντικότητα σε όλα τα κριτήρια.

Home > Agree Input > Weights

Criteria Selection for Project Evaluation

Please select the **Financial Indicator** to be used for benchmarking:

- Net Present Value
- Discounted Payback Period
- Internal Rate of Return

Please select the **Criteria Weights** according to the importance of each criterion:

Financial Indicator Weight:
Very High ▼

Avoidance Cost Weight:
Very High ▼

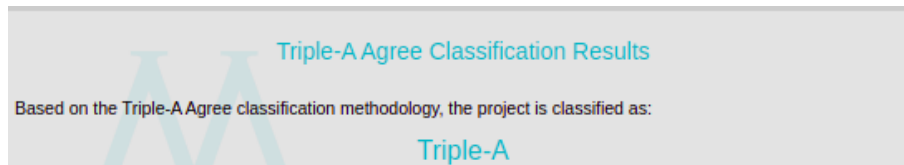
Aggregated Risk Weight:
Very High ▼

SDG Weight:
Very High ▼

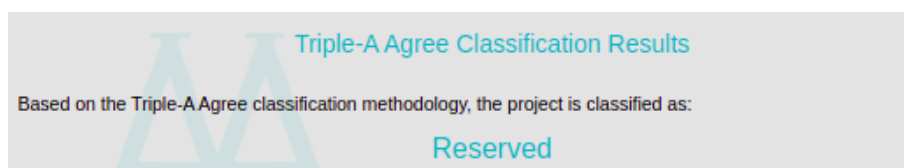
Submit

Σχήμα 5.3: Agree Second Screen (Πηγή: [6])

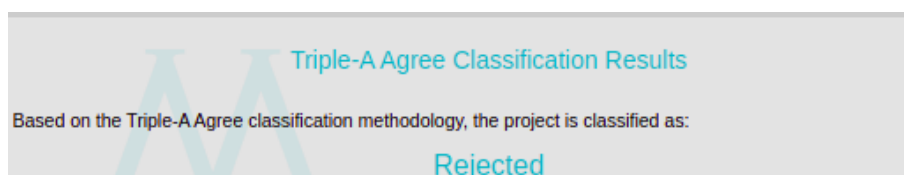
Με τη συμπλήρωση των παραπάνω στο χρήστη εμφανίζεται η επόμενη οθόνη, στην οποία παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης, το οποίο είναι: Rejected, Reserved ή Triple-A:



Σχήμα 5.4: Triple-A Result (Πηγή: [6])



Σχήμα 5.5: Reserved Result (Πηγή: [6])



Σχήμα 5.6: Rejected Result (Πηγή: [6])

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Σύνοψη εξαγόμενων συμπερασμάτων

Μετά από τις μετατροπές και τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν, η μέθοδος φαίνεται να είναι λειτουργική και ταξινομεί ορθολογικά τις υποψήφιες εναλλακτικές. Φυσικά δεν ταυτίζεται πλήρως με το προτιμησιακό μοντέλο του αποφασίζοντα, ο οποίος στην περίπτωση μας αποτελείται από διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη. Οι αρχικοί έλεγχοι έγιναν με εικονικά δεδομένα, εφόσον δεδομένα από πραγματικά έργα δεν υπήρχαν διαθέσιμα στα πρώιμα στάδια της υλοποίησης. Αργότερα προστέθηκαν δεδομένα πραγματικών έργων στο εργαλείο, και τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης και της μεθόδου επαληθεύτηκαν από τα ενδιαφερόμενα μέρη, αποδεικνύοντας έτσι και πρακτικά τη λειτουργικότητα της μεθόδου.

Φυσικά παραλλαγές που αφορούν είτε τα κατώφλια αδιαφορίας, προτίμησης και veto, είτε το λ-τέμνον επίπεδο διαφοροποιούν σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα η τιμή του λ, στην τρέχουσα υλοποίηση έχει τεθεί ίση με 0.75, όπως συνέβει και σε πολλές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία. Μείωση της τιμής του συνδιαζόμενου με την απαισιόδοξη διαδικασία εκμετάλευσης της σχέσης υπεροχής, προσδίδει μεγαλύτερη ελαστικότητα στην ταξινόμηση, δηλαδή οι εναλλακτικές θα ταξινομούνται πιο συχνά σε “καλύτερη” κατηγορία. Το αντίθετο συμβαίνει με μία αύξηση της τιμής του λ, τότε όλο και πιο δύσκολα μια εναλλακτική θα ταξινομείται σε καλύτερη κατηγορία. Ειδικά για την περίπτωση που $\lambda=1$, αυτό θα συμβαίνει αν και μόνο αν η επίδοση της εναλλακτικής σε όλα τα κριτήρια είναι μεγαλύτερη ή ίση με το κατώτερο προφίλ της “καλύτερης” κατηγορίας.

Σε ό,τι αφορά τα βάρη, ουσιαστικά έχουν συμμετοχή μόνο στον υπολογισμό του συνολικού δείκτη συμφωνίας και συνεπώς μπορούν σε κάποιο βαθμό να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Παραδείγματος χάριν για μία εναλλακτική a η οποία στα κριτήρια DPP, Avoidance Cost, SDG έχει απόδοση που υπάγεται στην μεσαία κατηγορία Reserved, ενώ στο ρίσκο έχει απόδοση που υπάγεται στην χαμηλότερη κατηγορία Rejected, αν θέσουμε τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας σε όλα τα κριτήρια, τότε αυτή ταξινομείται ως Reserved. Στην περίπτωση όμως που θέσουμε πολύ χαμηλό συντελεστή στα κριτήρια Reserved και πολύ υψηλό συντελεστή στο κριτήριο Rejected, τότε η εναλλακτική ταξινομείται ως Rejected.

6.2 Περιθώρια βελτίωσης

Η μέθοδος ELECTRE TRI-B όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3, χρειάζεται τον ορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων για να λειτουργήσει. Αυτές είναι οι επιδόσεις των διαχωριστικών προφίλ στα προκαθορισμένα κριτήρια, τα κατώφλια αδιαφορίας, προτίμησης και veto για κάθε προφίλ, οι συντελεστές σημαντικότητας (βάρος) για κάθε κριτήριο καθώς και η τιμή για το λ-τέμνον επίπεδο που θα καθορίσει τη δημιουργία της σαφούς σχέσης υπεροχής.

Στην υλοποίηση της πολυκριτηριακής μεθόδου που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία, οι επιδόσεις των διαχωριστικών προφίλ προέκυψαν έπειτα από αλληλεπίδραση μέσω ερωτηματολογίων με τα διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη και λαμβάνοντας υπόψιν δεδομένα από αντίστοιχα έργα στον τομέα της ενεργειακής αποδοτικότητας. Τα κατώφλια λαμβάνουν τιμές που σχετίζονται ποσοτικά με τα αντίστοιχα διαχωριστικά προφίλ σε κάθε κριτήριο, οι συντελεστές βαρύτητας τίθενται ως είσοδος στο εργαλείο από το χρήστη, ενώ η τιμή του λ-τέμνον επιπέδου ορίστηκε ίση με 0.75. Με τον τρόπο αυτό η μέθοδος είναι λειτουργική και τα αποτελέσματα ορθολογικά, ωστόσο δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση με το προτιμησιακό μοντέλο του αποφασίζοντος. Στην περίπτωση μας ο αποφασίζων αποτελείται από διάφορα ενδιαφερόμενα μέρη. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στον ιστότοπο του Triple-A [67] μεταξύ άλλων αυτοί είναι: οι χρηματοδοτικοί φορείς (financing bodies), οι εταιρείες που αναλαμβάνουν την υλοποίηση έργων ενεργειακής αποδοτικότητας, οι υπεύθυνοι και τα ινστιτούτα χάραξης και συντήρησης πολιτικών ενεργειακής αποδοτικότητας, αλλά και ερευνητές και ακαδημαϊκοί σε τεχνοοικονομικούς τομείς. Στα πρώιμα στάδια του έργου, η απόλυτη ταύτιση δεν ήταν σε μεγάλο βαθμό εφικτή, ωστόσο με την αυξανόμενη συμμετοχή των διάφορων ενδιαφερόμενων μερών που εμπλέκονται ολοένα και περισσότερο ενεργά στη διαδικασία και τον έλεγχο του εργαλείου, η μέθοδος βελτιστοποιήθηκε ξανά, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει το προτιμησιακό μοντέλο του αποφασίζοντος. Η παραπάνω εργασία δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, ωστόσο στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις πρακτικές που μπορούν να ακολουθηθούν σε αυτή την κατεύθυνση.

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί προς αυτή την κατεύθυνση. Η πιο χαρακτηριστική είναι ίσως η εργασία των Mousseau, Slowinski [3], όπου προτίνουν μία μεθοδολογία για το συμπερασμό των παραμέτρων (inference of parameters), που απαιτεί η ELECTRE TRI-B, μέσω παραδειγμάτων ανάθεσης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται για την περίπτωση που χρησιμοποιείται η απαισιόδοξη διαδικασία εκμετάλλευσης της σχέσης υπεροχής και δεν συμπεριλαμβάνει το συμπερασμό των κατωφλίων veto. Τα κατώφλια veto μπορούν να προσδιοριστούν σε μεταγενέστερο στάδιο, είτε με άμεση ανάθεση, είτε με κάποιο άλλο είδος συμπερασμού [68]. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία είναι πολύ δύσκολο να δοθούν ακριβείς τιμές στις παραμέτρους απευθείας από τον αποφασίζων, ο οποίος μπορεί να μην είναι σίγουρος, να έχει πλήρη άγνοια, να μην θέλει να αναλάβει την ευθύνη ή να υπάρχει κάποια ασυμφωνία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών που απαρτίζουν την οντότητα του αποφασίζοντα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ακολουθεί τη βασική δομή της αναλυτικής-συνθετικής προσέγγισης που συνοπτικά περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Εφόσον το εργαλείο έχει πλέον περάσει τα αρχικά στάδια, και δέχεται και δεδομένα από πραγματικά έργα, όταν συγκεντρω-

θούν αρκετά δεδομένα κάποια στιγμή θα μπορούσε να γίνει η εργασία του συμπερασμού ως εξής: Από το σύνολο των εναλλακτικών, έστω A επιλέγεται ένα υποσύνολο τους έστω το A_1 . Τα ενδιαφερόμενα μέρη (ή έστω ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα αυτών) συγκεντρώνονται και αποφασίζουν ομόφωνα για την κατηγορία που θεωρούν σωστό να ταξινομείται κάθε μία από τις εναλλακτικές που ανήκουν στο A_1 . Είναι φυσικό να υπάρχουν συγκρούσεις σε μία τέτοια προσέγγιση, οπότε μία λύση θα μπορούσε να είναι να οριστεί με ψηφοφορία ένας “ειδικός” που θα εκτελέσει τα χρέη του “μοναδικού” αποφασίζοντα και να ακολουθήσει ένας έλεγχος συμφωνίας από τους υπολοίπους. Στο υποσύνολο A_1 λοιπόν εφαρμόζεται μία μορφή παλινδρόμησης, ώστε να οδηγηθούμε στο συμπερασμό των παραμέτρων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει είναι πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο για να είναι αντιπροσωπευτικό απαιτείται το σύνολο A_1 να είναι σχετικά “μεγάλο”, οι εναλλακτικές του να ταξινομούνται ισομερώς στις διαθέσιμες κατηγορίες και για κάθε κατηγορία να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποικιλία. Τελικά προκύπτει ένα μοντέλο M_p , το οποίο είτε γίνεται αποδεκτό, εάν είναι συμβατό με τις προτιμήσεις του αποφασίζων, είτε δεν γίνεται αποδεκτό. Η αποδοχή ή η μη αποδοχή του μοντέλου σχετίζεται με το κατά πόσο αυτό καταφέρνει να ταξινομήσει στις ίδιες κατηγορίες τις εναλλακτικές με τον αποφασίζοντα. Εάν δεν υπάρξει συμβατότητα ο αποφασίζων με τη βοήθεια του αναλυτή βρίσκουν την εναλλακτική που αποκλίνει και είτε αλλάζουν την ταξινόμηση της και επανεκκινούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, είτε την εξαιρούν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι πολύ βοηθητικός και βασίζεται στο γεγονός ότι είναι συνήθως πιο εύκολο για τον αποφασίζοντα να δίνει παραδείγματα ταξινόμησης, παρα να αποφαινεται ρητά για τις τιμές των παραμέτρων. Για το πρόβλημα του συμπερασμού των παραμέτρων με την παραπάνω μεθοδολογία αναπτύχθηκε μάλιστα και λογισμικό το ELECTRE TRI Software version 2.0a.

Η παραπάνω προσέγγιση οδηγεί στο συμπερασμό όλων των παραμέτρων (global inference) εκτός των κατωφλίων veto . Αντίστοιχα η μεθοδολογία που προτείνουν οι Doumpos, Marinakis, Marinaki, Zopounidis [69], είναι μια εξελικτική προσέγγιση, ο αλγόριθμος της οποίας οδηγεί στο συμπερασμό όλων των παραμέτρων της ELECTRE TRI-B τόσο για τη απαισιόδοξη, όσο και για την αισιόδοξη διαδικασία εκμετάλλευσης της σχέσης υπεροχής. Βέβαια υπάρχουν και διάφορες μελέτες στη βιβλιογραφία για το μερικό συμπερασμό παραμέτρων, όπως η εργασία του Ramezani [70], ο οποίος κάνοντας χρήση μη γραμμικού προγραμματισμού και ευρυστικής συμπεραίνει τις τιμές των διαχωριστικών προφίλ μέσω παραδειγμάτων ανάθεσης. Αντίστοιχα οι Mousseau, Figueira, Naux [71] χρησιμοποιούν παραδείγματα ανάθεσης για το μερικό συμπερασμό, μόνο των συντελεστών σημαντικότητας των κριτηρίων, έχοντας ως δεδομένες όλες τις άλλες παραμέτρους.

Βιβλιογραφία

- [1] Eurostat. Final energy consumption by sector,EU,2019, 2019. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/c/cc/Final_energy_consumption_by_sector_EU_2019.png.
- [2] Eurostat. Final energy consumption in the residential sector by use,EU,2019, 2019. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/8/8c/Final_energy_consumption_in_the_residential_sector_by_use%2C_EU%2C_2019_F2.png.
- [3] Mousseau, V and Slowinski, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. *Journal of Global Optimization*, 12:157–174, 1998. <https://doi.org/10.1023/A:1008210427517>.
- [4] Eric Jacquet-Lagrèze and Yannis Siskos. Preference disaggregation: 20 years of MCDA experience. *European Journal of Operational Research*, 130:233–245, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00035-7).
- [5] Yannis Siskos and Evangelos Grigoroudis and Nikolaos F. Matsatsinis. New Trends in Aggregation-Disaggregation Approaches. In: *Zopounidis, C., Pardalos, P.M. (eds.) Handbook of Multicriteria Analysis*, pp:189–214. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92828-7_6.
- [6] Triple-A Assess. <https://toolbox.aaa-h2020.eu/>. (accessed: 30.10.2021).
- [7] Triple-A. <https://www.aaa-h2020.eu/>. (accessed: 19.09.2021).
- [8] Triple-A. Final Standardised Triple-A Tools, March 2021. <https://www.aaa-h2020.eu/sites/default/files/reports/D4.2%20Final%20Standardised%20Triple-A%20Tools.pdf>.
- [9] Horace Herring. Energy efficiency—a critical view. *Energy*, 31(1):10–20, 2006. 10.1016/j.energy.2004.04.055.
- [10] Matt Croucher. Potential problems and limitations of energy conservation and energy efficiency. *Energy Policy*, 39(10):5795–5799, 2011. 10.1016/j.enpol.2011.07.011.
- [11] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).

- [12] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Energy Security. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/energy-security>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [13] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Energy Prices. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/energy-prices>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [14] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Energy Access. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/energy-access>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [15] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Emission Savings. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/emissions-savings>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [16] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Health and Wellbeing. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/health-and-wellbeing>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [17] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Productivity. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/productivity>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [18] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Economic Benefits. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/economic-benefits-2>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [19] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Public Budgets. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/public-budgets>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [20] International Energy Agency. Multiple Benefits of Energy Efficiency-Asset Values. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency/asset-values>, March 2019. (accessed: 18.07.2021).
- [21] Steve Sorrell and John Dimitropoulos. The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65(3):636–649, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.013>.
- [22] Adam B. Jaffe and Robert N. Stavins. The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy Policy*, 22(10):804–810, 1994. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90138-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90138-4).
- [23] Kanako Tanaka. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy Policy*, 39(10):6532–6550, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.058>.

- [24] Steven Fawkes and Kit Oung and David Thorpe. *Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement: An Introduction for Policy Makers*. 2016. 978-93130-8104.
- [25] Sarah Broberg Viklund and Maria T. Johansson. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. *Energy Conversion and Management*, 77:369–379, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052>.
- [26] Lisa Ryan, Emilie Jessula, Vida Rozite. The European experience with tax relief for energy efficient equipment in industry – all bad or just second best ? https://www.ecee.org/library/conference_proceedings/ecee_industrial_summer_study/2012/6-the-role-of-financing-to-improve-industrial-efficiency-global-perspective/the-european-experience-with-tax-relief-for-energy-efficient-equipment-in-industry-all-bad-or-just-second-best/.
- [27] Council of European Union. DIRECTIVE 2009/125/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125from=EN>. (accessed: 28.08.2021).
- [28] Constantin Ionescu and Tudor Baracu and Gabriela-Elena Vlad and Horia Necula and Adrian Badea. The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:243–253, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062>.
- [29] Odyssee-Mure. "ENERGY EFFICIENCY TRENDS IN TRANSPORT IN EU COUNTRIES". <https://www.odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/transport-efficiency-trends.html>. (accessed: 18.09.2021).
- [30] Brenna, Morris and Bucci, Vittorio and Falvo, Maria Carmen and Foadelli, Federica and Ruvio, Alessandro and Sulligoi, Giorgio and Vicenzutti, Andrea. A Review on Energy Efficiency in Three Transportation Sectors: Railways, Electrical Vehicles and Marine. *Energies*, 13(9), 2020. 10.3390/en13092378.
- [31] European Commission. Europe 2020, a strategy for smart sustainable and inclusive growth. <https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20EN%20BARROSO%20%20%20007%20-%20Europe%202020%20-%20EN%20version.pdf>, March 2010. (accessed: 23.08.2021).
- [32] De-risking investments. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/financing/de-risking-investments_en. (accessed: 19.09.2021).
- [33] Murat Köksalan and Jyrki Wallenius and Stanley Zionts. An Early History of Multiple Criteria Decision Making. In: *Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp:3–17. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_1.

- [34] Γιάννης Σίσκος. *Μοντέλα Αποφάσεων - Μεθοδολογία Επιχειρησιακής Έρευνας, Θεωρία Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Εφαρμογές σε Επιχειρήσεις και Οργανισμούς*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008. Κεφάλαιο 3, σελ. 74-76.
- [35] Bernard Roy. Paradigms and Challenges. *In: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp:19–39, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_2.
- [36] Denis Bouyssou. Modelling Inaccurate Determination, Uncertainty, Imprecision Using Multiple Criteria. *In: Lockett A.G., Islei G. (eds) Improving Decision Making in Organisations*, pp:78–87, 1989. https://doi.org/10.1007/978-3-642-49298-3_8.
- [37] Stefano Moretti and Meltem Öztürk and Alexis Tsoukiàs. Preference Modelling. *In: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp:43–95, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_3.
- [38] Γιάννης Σίσκος. *Μοντέλα Αποφάσεων - Μεθοδολογία Επιχειρησιακής Έρευνας, Θεωρία Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Εφαρμογές σε Επιχειρήσεις και Οργανισμούς*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008. Κεφάλαιο 3, σελ. 82-83.
- [39] James S. Dyer. Multiattribute Utility Theory (MAUT). *In: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp:285–314, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_8.
- [40] Γιάννης Σίσκος. *Μοντέλα Αποφάσεων - Μεθοδολογία Επιχειρησιακής Έρευνας, Θεωρία Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Εφαρμογές σε Επιχειρήσεις και Οργανισμούς*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008. Κεφάλαιο 6, σελ. 160-163.
- [41] Marco Cinelli and Stuart R. Coles and Kerry Kirwan. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46:138–148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>.
- [42] José Rui Figueira and Vincent Mousseau and Bernard Roy. ELECTRE Methods. *In: Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds) Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp:155–185, 2016. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5.
- [43] Γιάννης Σίσκος. *Μοντέλα Αποφάσεων - Μεθοδολογία Επιχειρησιακής Έρευνας, Θεωρία Πολυκριτήριας Ανάλυσης, Εφαρμογές σε Επιχειρήσεις και Οργανισμούς*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008. Κεφάλαιο 7, σελ. 250-252.
- [44] José Figueira and Bernard Roy. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *European Journal of Operational Research*, παγες 317–326, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8).
- [45] V. Mousseau and R. Slowinski and P. Zielniewicz. "ELECTRE TRI 2.0a METHODOLOGICAL GUIDE AND USER'S MANUAL".

- <https://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/mous3docl99.pdf>. (accessed: 17.10.2021).
- [46] Eduardo Fernández and José Rui Figueira and Jorge Navarro and Bernard Roy. ELECTRE TRI-nB: A new multiple criteria ordinal classification method. *European Journal of Operational Research*, 263:214–224, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.048>.
- [47] Denis Bouyssou and Thierry Marchant. On the relations between ELECTRE TRI-B and ELECTRE TRI-C and on a new variant of ELECTRE TRI-B. *European Journal of Operational Research*, 242:201–211, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.057>.
- [48] Kannan Govindan and Martin Brandt Jepsen. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250:1–29, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>.
- [49] Ju, Gang and Wang, Huaimin and Mao, Xiaoguang. Using ELECTRE TRI Outranking Method to Evaluate Trustworthy Software. In: Xie B., Branke J., Sadjadjadi S.M., Zhang D., Zhou X. (eds) *Autonomic and Trusted Computing*, pp:219–227. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16576-4_16.
- [50] Norese, Maria Franca and Carbone, Vincenzo. An application of ELECTRE tri to support innovation. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 21, 2014. 10.1002/mcda.1508.
- [51] Fabio Reginaldo. Portfolio Management in Brazil and a Proposal for Evaluation and Balancing of Portfolio Projects with ELECTRE TRI and IRIS. *Procedia Computer Science*, 55:1265–1274, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.137>.
- [52] Flavio Trojan and Danielle Costa Morais. "USING ELECTRE TRI TO SUPPORT MAINTENANCE OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS". <https://www.scielo.br/j/pope/a/vMcs5Pm4dxt3wKTF3FWDztx/?format=pdflang=en>. (accessed: 17.10.2021).
- [53] Certa, Antonella and Enea, Mario. ELECTRE TRI to classify items with respect to maintainability criterion. *XIX Summer School "Francesco Turco" - Industrial Mechanical Plants*, 2014. http://www.summerschool-aidi.it/edition-2015/images/ancona2014/sessione7/certa_enea.pdf.
- [54] Elamrani, Aida and Benabbou, Loubna and Berrado, Abdelaziz. A model for classification of outsourcing related organizational risks in a pharmaceutical supply chain. *2016 11th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA)*, pp:1–6, 2016. 10.1109/SITA.2016.7772318.

- [55] Neto, João and Machado, Maria and Gomes, Luiz and Caldeira, André and Sallum, Frederico. Investments in a New Technological Infrastructure: Decision Making Using the ELECTRE-TRI Methodology. *Procedia Computer Science*, 122:194–199, 2017. 10.1016/j.procs.2017.11.360.
- [56] Juan M. Sánchez-Lozano and Carlos Henggeler Antunes and M. Socorro García-Cascales and Luis C. Dias. GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. *Renewable Energy*, 66:478–494, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.038>.
- [57] J.M. Sánchez-Lozano and M.S. García-Cascales and M.T. Lamata. Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. Case study in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 127:387–398, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.005>.
- [58] Luis C. Dias. Chapter 12 - Sustainability assessment using the ELECTRE TRI multicriteria sorting method. *In: Methods in Sustainability Science*, pp:197–214, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00018-0>.
- [59] Karakosta, Charikleia and Doukas, H. and Psarras, John. A Decision Support Approach for the Sustainable Transfer of Energy Technologies under the Kyoto Protocol. *American Journal of Applied Sciences*, 5:1720–1729, 2008. 10.3844/ajasp.2008.1720.1729.
- [60] Georgopoulou, Elena and Sarafidis, Y. and Mirasgedis, Sebastian and Zaimi, S and Lalas, Dimitri. A multicriteria decision-aid approach in defining national priorities for greenhouse emissions reduction in the energy sector. *European Journal of Operational Research*, 146:199–215, 2003. 10.1016/S0377-2217(02)00250-3.
- [61] Hermano Bernardo and Adélio Gaspar and Carlos Henggeler Antunes. An application of a multi-criteria decision support system to assess energy performance of school buildings. *Energy Procedia*, 122:667–672, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.367>.
- [62] Luís Pires Neves and António Gomes Martins and Carlos Henggeler Antunes and Luís Cândido Dias. A multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency. *Energy Policy*, 36:2351–2363, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.032>.
- [63] Nemery, Philippe and Lamboray, Claude. FLOWSORT: A flow-based sorting method with limiting or central profiles. *TOP: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*, 16:90–113, 2008. 10.1007/s11750-007-0036-x.
- [64] Andrej Bregar. Decision support on the basis of utility models with discordance-related preferential information: investigation of risk aversion properties. *Journal of Decision Systems*, 27:236–247, 2018. 10.1080/12460125.2018.1468170.

- [65] Jason Fernando. Net Present Value (NPV) - Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>. (accessed: 18.09.2021).
- [66] Eurostat. SDG INDICATORS: GOAL BY GOAL. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/sdi/indicators>, March 2019. (accessed: 28.10.2021).
- [67] Triple-A Stakeholders. <https://www.aaa-h2020.eu/about>. (accessed: 30.10.2021).
- [68] Luis C. Dias and Vincent Mousseau. Inferring Electre's veto-related parameters from outranking examples. *European Journal of Operational Research*, 170:172–191, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.044>.
- [69] M. Doumpos and Y. Marinakis and M. Marinaki and C. Zopounidis. An evolutionary approach to construction of outranking models for multicriteria classification: The case of the ELECTRE TRI method. *European Journal of Operational Research*, 199:496–505, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.035>.
- [70] Reza Ramezani. Estimation of the profiles in posteriori ELECTRE TRI: A mathematical programming model. *Computers Industrial Engineering*, 128:47–59, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.034>.
- [71] . Mousseau and J. Figueira and J.-Ph. Naux. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research*, 130:263–275, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00041-2).

Γλωσσάριο

Ελληνικός όρος

αισιόδοξη διαδικασία ανάθεσης
αναλυτική προσέγγιση
αναλυτική συνθετική προσέγγιση
αντισταθμιστικό μοντέλο
απαισιόδοξη διαδικασία ανάθεσης
αστοχίες της αγοράς
δείκτης αξιοπιστίας
διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας
διαπραγματευόμενες συμφωνίες
διατήρηση της ενέργειας
διαχωριστικά προφίλ
διμερής σχέση
διμερείς σχέσεις υπεροχής
δομή αδιαφορίας
δομή προτίμησης
εμπορικό σύστημα εκπομπών
ενεργειακή αποδοτικότητα
ενεργειακό παράδοξο
ενεργειακοί έλεγχοι
χάσμα ενεργειακής αποδοτικότητας
εξωτερικότητες
εσωτερικό ποσοστό απόδοσης
καθαρή παρούσα αξία
κατάταξη
κατώφλια αδιαφορίας
κατώφλια προτίμησης
κατώφλια βέτο
λ-τέμνον επίπεδο
μη ασυμφωνία
μη συγκρισιμότητα
οικιακός τομέας

Αγγλικός όρος

optimistic assignment procedure
aggregation approach
aggregation disaggregation approach
compensatory model
pessimistic assignment procedure
market failures
credibility index
analytical hierarchy process, AHP
negotiated agreements
energy conservation
limiting profiles
binary relationship
binary outranking relationships
indifference structure
preference structure
cap and trade scheme
energy efficiency
energy paradox
energy audits
energy efficiency gap
externalities
internal rate of return, IRR
net present value, NPV
ranking
indifference thresholds
preference thresholds
veto thresholds
cutting level
non discordance
incomparability
residential sector

περίοδος αποπληρωμής με έκπτωση	discounted payback period, DPP
πιθανολογικά κριτήρια	probabilistic criteria
πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων	multiple criteria decision analysis, MCDA
πολυκριτήρια θεωρία αξίας	multiattribute value theory, MAVT
πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας	multiattribute utility theory, MAUT
ποσοστά υποκατάστασης	trade offs
πόσοτικά κριτήρια	measurable criteria
πρότυπα ενεργειακής αποδοτικότητας	energy efficiency standards
στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης	sustainable development goals
συμφωνία	concordance
συνδετική προσέγγιση	conjunctive procedure
συνεπής οικογένεια κριτηρίων	consistent family of criteria
σύστημα διαχείρισης ενέργειας	energy management system
τακτικά κριτήρια	ordinal criteria
ταξινόμηση	sorting
φαινόμενο αναπήδησης	rebound effect
φόρος άνθρακα	carbon tax
ψευδοκριτήρια	pseudocriteria

