



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Αξιολόγηση ετοιμότητας Ευρωπαϊκών κρατών για την
ενεργειακή μετάβαση με χρήση Πολυκριτήριας Ανάλυσης
Αποφάσεων

Διπλωματική Εργασία

Αριστοτέλης Καρακατσάνης

Επιβλέπων

Επικ. Καθηγητής Ελευθέριος Σίσκος

Χανιά, 2024

Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Ελευθέριο Σίσκο για τη συνεχή καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Στέλιο Τσαφάρáκη και τον επίκουρο καθηγητή κ. Δημήτρη Ιψάκη για την συμμετοχή τους στην εξέταση αυτής της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Με την κλιματική αλλαγή να έχει πλέον σοβαρές επιπτώσεις στη ζωή στον πλανήτη, η αλλαγή του τρόπου διαχείρισης της ενέργειας αποτελεί μια πρόκληση που ο κόσμος πρέπει να αντιμετωπίσει συλλογικά. Κάθε χώρα πρέπει να λάβει μέτρα με στόχο την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την αξιοποίηση βιώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Η οικονομική ανάπτυξη, η ευαισθητοποίηση των πολιτών αλλά και τα θεσμικά πλαίσια είναι παράγοντες που μπορούν να διευκολύνουν ή να παρεμποδίσουν μια ενεργειακή μετάβαση σε μια χώρα. Για το λόγο αυτό, η διερεύνηση του κατά πόσο μια χώρα είναι έτοιμη να προχωρήσει σε μια τέτοια μετάβαση, απαιτεί την εξέταση πολλών παραγόντων.

Στην παρούσα έρευνα, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία πολυκριτήριας ανάλυσης για την αξιολόγηση της ετοιμότητας μιας χώρας για την ενεργειακή μετάβαση, χωρίζοντας το πρόβλημα σε τέσσερις διαστάσεις αξιολόγησης: κοινωνική, πολιτική, οικονομική και περιβαλλοντική. Συγκεκριμένα, 26 Ευρωπαϊκές χώρες βαθμολογούνται και κατατάσσονται με βάση το επίπεδο ετοιμότητάς τους για την ενεργειακή μετάβαση, με τη χρήση του αλγορίθμου πολυκριτήριας ανάλυσης UTASTAR.

Abstract

With climate change now having a serious impact on life on the planet, changing the way we manage energy is a challenge that the world must collectively address. Every country must take measures to increase energy efficiency and use sustainable energy sources, while reducing dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions. Economic development, public awareness and institutional frameworks are factors that can facilitate or hinder an energy transition in a country. For this reason, investigating whether a country is ready to make such a transition requires consideration of several factors.

In this research, a multi-criteria analysis methodology is presented to assess a country's readiness for energy transition by dividing the problem into four assessment dimensions: social, political, economic and environmental. Specifically, 26 European countries are scored and ranked based on their level of readiness for the energy transition using the UTASTAR multi-criteria analysis algorithm.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	6
1.2 Παρουσίαση του προβλήματος.....	6
2. Υφιστάμενη Κατάσταση.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	11
3. Περιγραφή του προβλήματος.....	12
3.1 Χώρες (Εναλλακτικές).....	13
3.2 Ανάλυση Κριτηρίων - Δεδομένα.....	13
4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων.....	19
4.1 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης Πολυκριτηρίου Προβλήματος.....	20
4.2 Μέθοδος UTA/UTASTAR.....	22
4.2.1 Η Μέθοδος UTA.....	22
4.2.2 Η Μέθοδος UTASTAR.....	27
4.3 Ανάλυση Ευστάθειας στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων.....	29
4.3.1 Έλεγχος Ευστάθειας.....	29
4.3.2 Δείκτες Ευστάθειας.....	31
5. Προτεινόμενη Μεθοδολογία.....	33
5.1 Καθορισμός ενός συνόλου εικονικών εναλλακτικών.....	33
5.2 Επίλυση.....	33
5.3 Έλεγχος Ευστάθειας – Δείκτης ARP.....	34
5.4 Εφαρμογή Μοντέλου.....	34
6. Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Αποτελέσματα.....	34
6.1 Κατασκευή και κατάταξη εικονικών χωρών – Φάση 1η.....	35
6.2 Εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR.....	35
6.3 Έλεγχος Ευστάθειας.....	36
6.4 Φάση 2η – 19 Εικονικές Χώρες.....	38
6.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR.....	38
6.4.2 Φάση 2η - Έλεγχος Ευστάθειας.....	39
6.5 Εφαρμογή σε Πραγματικά Δεδομένα.....	39
7. Συμπεράσματα και προοπτικές για το μέλλον.....	40
Βιβλιογραφία.....	44

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε μακροπρόθεσμες μεταβολές στις θερμοκρασίες και τα μοτίβα του καιρού. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να προκαλούνται φυσικά, λόγω μεταβολών στην επιφάνεια του ηλίου είτε λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας, ωστόσο τα τελευταία 200 χρόνια οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι η κύρια αιτία έντασης του φαινομένου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων που έχει ως αποτέλεσμα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία "παγιδεύουν" την θερμότητα του ηλίου, αυξάνοντας τις θερμοκρασίες. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μόνο μια από τις συνέπειες του φαινομένου. Καθώς η γη είναι ένα σύστημα όπου όλα συνδέονται, μια μεταβολή μπορεί να έχει πολλές επιπτώσεις. Οδηγούμαστε συνεπώς σε προβλήματα όπως ισχυρές ξηρασίες, λειψυδρία, καταστροφικές πυρκαγιές, αύξηση της στάθμης των ωκεανών, λιώσιμο των πάγων, καταστροφικές καταιγίδες, και μείωση της βιοποικιλότητας[1].

Τα φαινόμενα αυτά έφεραν στο προσκήνιο την έννοια της βιωσιμότητας. Η βιωσιμότητα ορίζεται με πολλούς τρόπους. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, βιωσιμότητα ορίζεται ως "Η κάλυψη των αναγκών του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες". Παρόλο που η έννοια είναι συνδεδεμένη με το περιβαλλοντικό κίνημα, η βιωσιμότητα έχει και κοινωνικές-οικονομικές διαστάσεις[2]. Τα τελευταία χρόνια τα κράτη έχουν αναγνωρίσει πως η κλιματική αλλαγή είναι μια πραγματική απειλή για τον άνθρωπο και τον πλανήτη και θέτουν κανονισμούς και συνθήκες με στόχο τη βιώσιμη ανάπτυξη[5].

Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να αξιολογήσουμε τα Ευρωπαϊκά κράτη σχετικά με την ετοιμότητά τους να μετατρέψουν τα ενεργειακά τους συστήματα και να επιτύχουν στόχους βιώσιμης ανάπτυξης στον τομέα της ενέργειας. Μια αξιολόγηση τέτοιας φύσεως, μας δίνει τη δυνατότητα καταγραφής της προόδου κάθε κράτους σε διαφορετικούς τομείς, αλλά μας βοηθάει και στην επισήμανση συγκεκριμένων περιοχών που ενδεχομένως χρήζουν βελτίωσης.

1.2 Παρουσίαση του προβλήματος

Ο βαθμός στον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν στρατηγικές για την βελτίωση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων, εξαρτάται από την παρουσία των ιδανικών συνθηκών που υποδεικνύουν την "ετοιμότητα" για ενεργειακή μετάβαση. Η ετοιμότητα μιας χώρας αξιολογείται με βάση την παρουσία ενός οικοσυστήματος παραγόντων για αποτελεσματική μετάβαση. Η ετοιμότητα καθορίζεται κυρίως από την αδράνεια του παρόντος ενεργειακού συστήματος της χώρας, την πολιτική σταθερότητα και τη διαθεσιμότητα κεφαλαίου ώστε να υποστηρίξει την ενεργειακή μετάβαση. Με τον ίδιο τρόπο, πρέπει να υπάρχει ευελιξία στα ρυθμιστικά πλαίσια ώστε να ενσωματώνονται αποτελεσματικά νέες τεχνολογίες και επιχειρηματικά μοντέλα, ενώ παράλληλα να καταργούνται σταδιακά οι παλαιές υποδομές. Μία αποτελεσματική ενεργειακή μετάβαση βασίζεται επίσης στη δεκτικότητα των αγορών μιας χώρας, στο κατά πόσο είναι επενδυτικά ελκυστική και στην παρουσία ενός δυναμικού περιβάλλοντος καινοτομίας. Πάνω απ' όλα, η ενεργειακή μετάβαση έχει κοινωνικές προεκτάσεις, και η συμμετοχή των πολιτών είναι καθοριστική για το μέλλον των ενεργειακών συστημάτων[6].

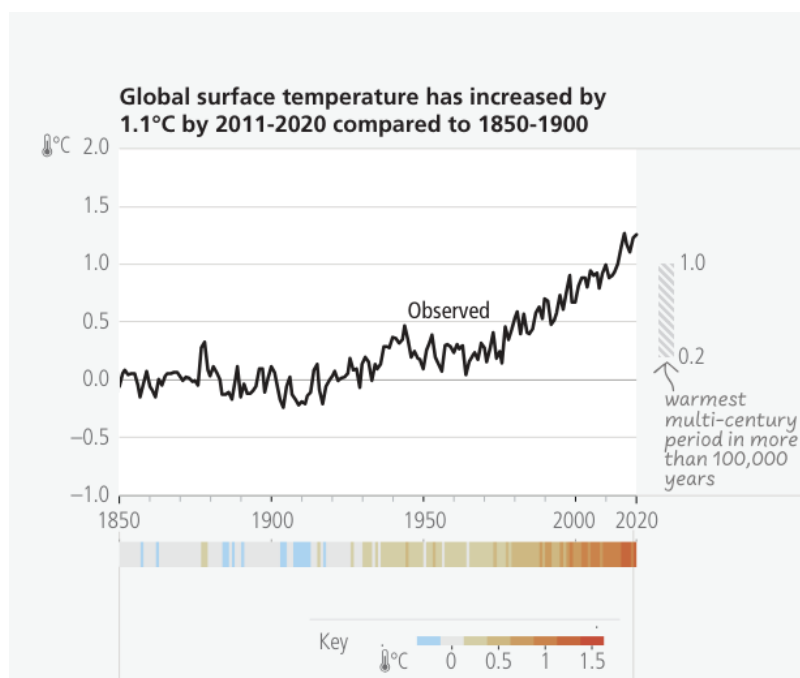
Το πρόβλημα που επιλύεται είναι η βαθμολόγηση και έπειτα η κατάταξη των Ευρωπαϊκών κρατών με βάση την ετοιμότητά τους να μεταβούν σε βιώσιμη ενέργεια. Πρόκειται για ένα πολυδιάστατο πρόβλημα με πολλούς παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων. Τα κριτήρια αξιολόγησης επιλέγονται έτσι ώστε να μην είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους και χωρίζονται σε τέσσερις πυλώνες: κοινωνικά, πολιτικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά.

2. Υφιστάμενη Κατάσταση

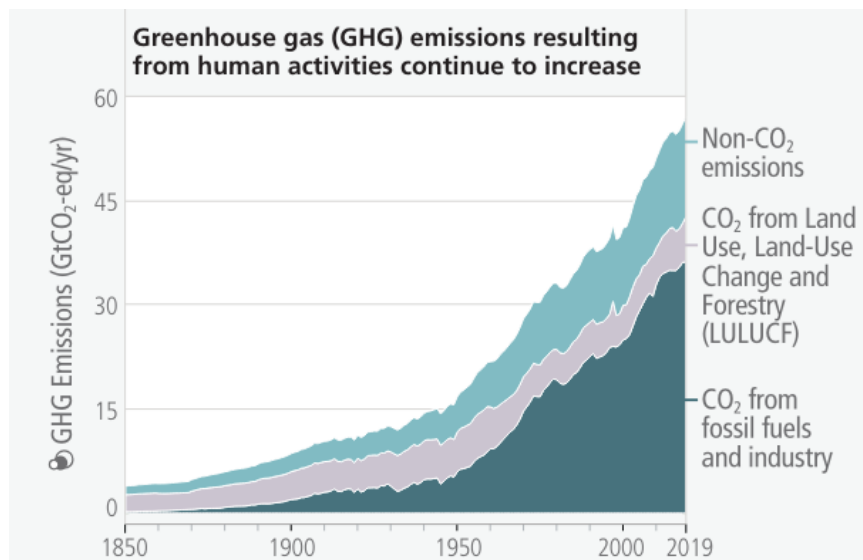
2.1 Εισαγωγή

Το 1988, παρατηρήθηκε μια ανοδική τάση στη μέση θερμοκρασία της γης, η οποία δεν αποδόθηκε στη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος, αλλά στη συσσώρευση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων "αερίων του θερμοκηπίου" στην ατμόσφαιρα[24]. Τα χρόνια που ακολούθησαν, άρχισαν να γίνονται περισσότερες μελέτες επάνω στη συμπεριφορά του κλίματος, εμφανίστηκε η έννοια της κλιματικής αλλαγής και να επισημαίνονται οι καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να επιφέρει. Την ίδια χρονιά, ιδρύθηκε από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC). Η IPCC, διεξάγει έρευνες και επιστημονικές μελέτες επάνω στις κλιματικές αλλαγές, με στόχο να προσφέρει πληροφορίες στις κυβερνήσεις, ώστε να αναπτύσσουν και να θεσπίζουν πολιτικές για την προστασία του κλίματος. Επίσης δημοσιεύει ετησίως εκθέσεις συνοψίζοντας τη γνώση για τις αιτίες της κλιματικής αλλαγής, τις συνέπειες και τις προσαρμογές που μπορούν να γίνουν για την άμβλυνσή της[25].

Η IPCC ορίζει την κλιματική αλλαγή ως "μία μεταβολή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί από τις μεταβολές στη μέση τιμή και/ή τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του, η οποία επιμένει για παρατεταμένο χρονικό διάστημα" [IPCC,2018]. Οι ανθρωπίνες δραστηριότητες, κυρίως μέσω εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, εντείνουν το φαινόμενο, με την μέση θερμοκρασία της γης να έχει αυξηθεί κατά 1.1°C την περίοδο 2011-2020 σε σχέση με την περίοδο 1850-1900 (Εικόνες 1,2). Οι εκπομπές έχουν συνεχίσει να αυξάνονται με κύριες αιτίες αυτών να είναι η μη βιώσιμη χρήση της ενέργειας, η εκμετάλλευση των δασών και τα μοτίβα παραγωγής και κατανάλωσης αγαθών[26].



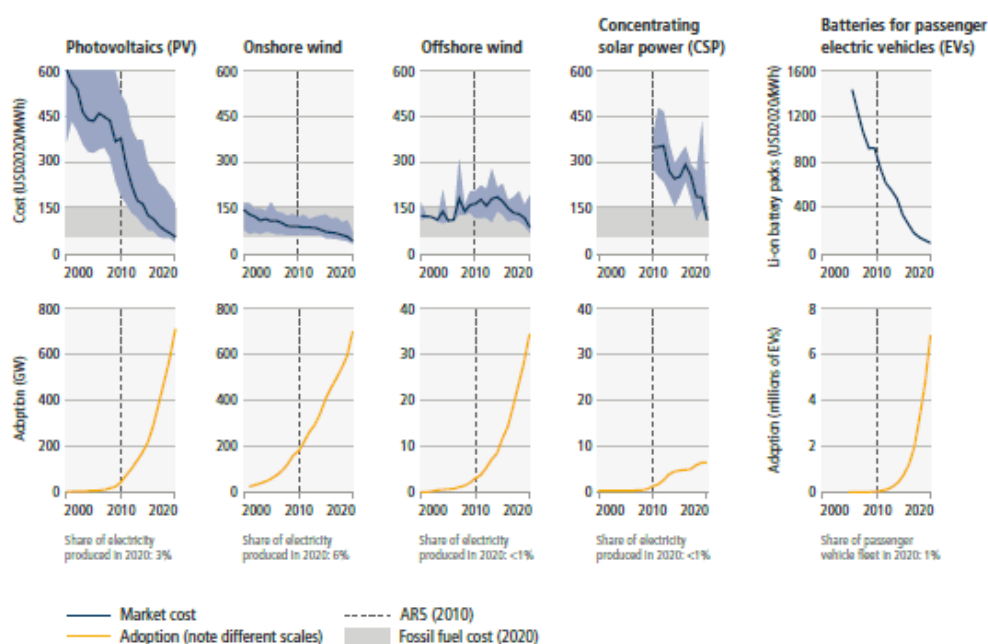
Εικόνα 1 – Αύξηση μέσης θερμοκρασίας κατά την περίοδο 1850-1900 (IPCC)



Εικόνα 2 – Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες κατά την περίοδο 1850-1900 (IPCC)

Κυβερνήσεις και οργανισμοί συνεχίζουν να θέτουν κανόνες και να λαμβάνουν μέτρα για την καταπολέμηση του φαινομένου. Ο στόχος που τίθεται είναι η ελάττωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και αυτό γίνεται με την σταδιακή αποδέσμευση της βιομηχανίας από την κύρια αιτία εκπομπών, τα ορυκτά καύσιμα, και την στροφή σε καθαρή και βιώσιμη ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Μια ενεργειακή μετάβαση σε βιώσιμη ενέργεια ήδη λαμβάνει χώρα στον πλανήτη σε πρώιμο στάδιο. Καταλυτικός παράγοντας της μετάβασης αυτής είναι η αύξηση της ανταγωνιστικότητας της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας, με τα κόστη των μονάδων των φωτοβολταϊκών, των αιολικών, και των μπαταριών ιόντων λιθίου να έχουν μειωθεί δραματικά κατά την περίοδο 2010-2019(Εικόνα 3)[27].

The unit costs of some forms of renewable energy and of batteries for passenger EVs have fallen, and their use continues to rise.



Εικόνα 3 – Κόστος, Υιοθέτηση φωτοβολταϊκών, αιολικών και μπαταριών ιόντων λιθίου κατά την περίοδο 2000-2020 (IPCC)

Αναφορικά με τα ρυθμιστικά πλαίσια, το 1994 ξεκίνησε να ισχύει η σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC). Ήταν το πρώτο διεθνές μέτρο που θεσπίστηκε και κύριος στόχος του είναι "η σταθεροποίηση του επιπέδου των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, σε επίπεδο που θα αποτρέψει επικίνδυνες ανθρωπογενείς παρεμβολές στο κλίμα". Εφαρμόζεται επιβάλλοντας στα 198 συμβαλλόμενα μέρη (αρ. το 2022) την υποχρέωση να θεσπίζουν εθνικά προγράμματα για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και να υποβάλλουν τακτικές εκθέσεις[28].

Πρωτόκολλο του Κγγοτο

Το πρωτόκολλο του Κγγοτο, είναι μια διεθνής συνθήκη που θεσπίστηκε το 1997 ως επέκταση της UNFCCC. Βασίζεται στις αρχές της αρχικής σύμβασης, ωστόσο δεσμεύει μόνο τις ανεπτυγμένες χώρες, βαραινόντάς τις περισσότερο, υπό την αρχή ότι εκείνες έχουν μεγαλύτερη ευθύνη και αντίστοιχες δυνατότητες, αναγνωρίζοντας ότι είναι υπεύθυνες για τα υψηλά ποσοστά στα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου[29].

Συμφωνία των Παρισίων

Η συμφωνία των Παρισίων, είναι μια διεθνής συνθήκη που υιοθετήθηκε από 196 μέρη, στις 12 Δεκεμβρίου του 2015 στο Παρίσι της Γαλλίας. Σκοπός της είναι "ο περιορισμός της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από 2°C, σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα". Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, ηγέτες των κυβερνήσεων προειδοποιούν πως ο η αύξηση πρέπει να περιοριστεί κάτω του 1.5°C, καθώς αν αυτό το κατώφλι ξεπεραστεί, οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής θα είναι πολύ πιο σοβαρές, συμπεριλαμβάνοντας συχνότερες ξηρασίες, καύσωνες και καταστροφικές βροχοπτώσεις. Η εφαρμογή της συμφωνίας των Παρισίων απαιτεί οικονομικούς και κοινωνικούς μετασχηματισμούς και λειτουργεί με βάση έναν πενταετή κύκλο ολοένα και πιο φιλόδοξων δράσεων για το κλίμα, από κάθε κράτος. Η συμφωνία των Παρισίων αποτελεί ορόσημο στην πολυμερή διαδικασία για την κλιματική αλλαγή, διότι για πρώτη φορά μια δεσμευτική συμφωνία συγκεντρώνει όλα τα έθνη για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και την προσαρμογή στις επιπτώσεις της[5].

Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, εγκρίθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2020, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η οποία είναι μια δέσμη πρωτοβουλιών πολιτικής με απώτερο στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) έως το 2050. Μια από τις πρωτοβουλίες που περιλαμβάνει, είναι η δέσμη μέτρων Fit for 55, σύμφωνα με την οποία τα κράτη της ΕΕ δεσμεύονται να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Ο στόχος αυτός είναι νομικά δεσμευτικός και βασίζεται σε εκτίμηση επιπτώσεων που διενεργεί η Επιτροπή. Ακόμα, το σχέδιο περιλαμβάνει κάποιες στρατηγικές που στοχεύουν σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, όπως του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας, της αγροτικής παραγωγής και των τροφίμων, της ενέργειας, των μεταφορών, της βιομηχανίας και των κατασκευών. Κάποιες από αυτές είναι:

- Η στρατηγική της ΕΕ για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, η οποία περιλαμβάνει μέτρα για την καλύτερη συλλογή και κοινοποίηση δεδομένων και τη βελτίωση της προσβασιμότητας και της ανταλλαγής γνώσεων σχετικά με τις κλιματικές επιπτώσεις
- Η στρατηγική της ΕΕ για τη βιοποικιλότητα, η οποία έχει στόχο να συμβάλει στην ανάκαμψη της βιοποικιλότητας της Ευρώπης έως το 2030 με μέτρα όπως η επέκταση των προστατευόμενων χερσαίων και θαλάσσιων περιοχών στην Ευρώπη, η αποκατάσταση υποβαθμισμένων οικοσυστημάτων μέσω της μείωσης της χρήσης και της επικινδυνότητας των φυτοφαρμάκων, η αύξηση της χρηματοδότησης των δράσεων και η καλύτερη παρακολούθηση της προόδου

- Η στρατηγική "Farm to Fork", η οποία έχει στόχο να στρέψει το σημερινό σύστημα τροφίμων της ΕΕ προς ένα βιώσιμο πρότυπο. Έχει κύριους στόχους την εξασφάλιση επαρκών, οικονομικά προσιτών και θρεπτικών τροφίμων εντός των ορίων του πλανήτη, την στήριξη της βιώσιμης παραγωγής τροφίμων, την προώθηση της βιώσιμης κατανάλωσης τροφίμων και της υγιεινής διατροφής

Επίσης, στα πλαίσια της Πράσινης Συμφωνίας περιλαμβάνονται μέτρα στήριξης του ρόλου της βιομηχανίας ως καταλύτη καινοτομίας και ανάπτυξης, αλλά και σχέδια δράσης για την κυκλική οικονομία[30].



Πολλοί παράγοντες μπορούν να ωθήσουν μια ενεργειακή μετάβαση, δηλαδή την μετάβαση από μια κύρια πηγή ενέργειας σε μια άλλη. Αρχικά, είναι πιθανόν οι πόροι να αρχίσουν να περιορίζονται σε τοπική είτε σε παγκόσμια κλίμακα, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ορυκτών καυσίμων. Επιπρόσθετα, η εξάντληση των πόρων μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του κόστους, καθιστώντας άλλες επιλογές πιο ελκυστικές. Ακόμα, η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι συνέπειες αυτής, όπως επίσης συμβαίνει στην περίπτωση των ορυκτών καυσίμων, μπορούν να φτάσουν σε κρίσιμα επίπεδα, καθιστώντας μια ενεργειακή μετάβαση απαραίτητη. Τέλος, η εξέλιξη της τεχνολογίας και η αύξηση της αποδοτικότητας της ενέργειας ενδεχομένως να απαιτήσουν εναλλαγή της πηγής ενέργειας ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως (μετάβαση σε ηλεκτρισμό, ημιαγωγοί, κυψέλες καυσίμου, νανοτεχνολογία για αύξηση της αποδοτικότητας ή της αποθήκευσης ενέργειας).

Η κλιματική αλλαγή και η τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ο κύριος παράγοντας ώθησης της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης που λαμβάνει χώρα σήμερα. Ενώ η τοπική ρύπανση της ατμόσφαιρας στις πόλεις μπορεί να καταπολεμηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις με τεχνολογίες τερματικού σταθμού, αυτό δεν ισχύει για τις μαζικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τον τομέα της ενέργειας. Η επίτευξη των στόχων της συμφωνίας του Παρισιού και της Πράσινης Συμφωνίας, προϋποθέτει μηδενικές καθαρές εκπομπές CO₂ τα επόμενα 50 χρόνια. Η ενεργειακή μετάβαση λοιπόν απαιτεί σημαντική μείωση των εκπομπών, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι υπάρχει αρκετή ενέργεια για οικονομική ανάπτυξη. Σημαντικό ρόλο σε αυτό θα παίξει η μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα σε λύσεις χαμηλών εκπομπών, καθώς οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια αντιπροσωπεύουν τα δυο-τρίτα των αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως. Η μετάβαση αυτή θα υποβοηθηθεί από την εξέλιξη της τεχνολογίας, κυρίως στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας[3].

Βασικοί πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης είναι η αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μείγμα. Ο ηλεκτρισμός είναι ένας προτιμώμενος φορέας ενέργειας καθώς προσφέρει ευελιξία, αποδοτικότητα και αποτελεί καθαρή πηγή

ενέργειας όταν προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Συνεπώς για να επιτευχθούν οι στόχοι μείωσης των εκπομπών και ενεργειακής μετάβασης είναι απαραίτητη η μετατροπή σε λύσεις που κάνουν χρήση ηλεκτρισμού σε όλους τους τομείς, καθώς έτσι θα αυξηθεί ταυτόχρονα η ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και τα ποσοστά εκμετάλλευσης των ΑΠΕ[3].

Πολλές χώρες, τόσο υψηλών εκπομπών όσο και χαμηλότερων, σκοπεύουν να μετατρέψουν τα ενεργειακά τους συστήματα ώστε να εξασφαλίσουν αξιόπιστη, βιώσιμη και οικονομικά προσιτή παροχή ενέργειας, η οποία είναι απαραίτητη για την οικονομική- κοινωνική ανάπτυξη και την μείωση της φτώχειας. Κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση των κρατών ως προς την ικανότητά τους να πραγματοποιήσουν τις κατάλληλες αλλαγές και να πετύχουν τους κατάλληλους στόχους προς μια βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση. Επιπλέον, απαραίτητη κρίνεται η καταγραφή της σχετικής "προόδου" μεταξύ στόχων βιωσιμότητας και μεταξύ κρατών, βοηθώντας τους αποφασίζοντας και τις κυβερνήσεις να θέτουν προτεραιότητες και να ενημερώνονται καλύτερα.

2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί δείκτες έχουν ενταχθεί και δημοσιεύονται με σκοπό να καταγραφούν διαφορετικές πτυχές της ενεργειακής μετάβασης, αλλά και γενικότερα της βιώσιμης ανάπτυξης. Επίσης πραγματοποιούνται από τους ερευνητές όλο και περισσότερες μελέτες και έρευνες επάνω στο αντικείμενο της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης. Οι μέθοδοι Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) έχουν αναγνωριστεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη αποφάσεων και ιδιαίτερα στον τομέα της ενέργειας, που απαιτεί τη λήψη κριτηρίων τα οποία συχνά είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους. Εφαρμόζοντας μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης για την αξιολόγηση της βιώσιμης μετάβασης, δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν υπόψιν κοινωνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και περαιτέρω κριτήρια και δείκτες, αν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Το 2020, οι Νεοφύτου, Νίκας, Δούκας [4], εφαρμόζοντας μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης αξιολόγησαν και κατέταξαν 14 κράτη ως προς την ετοιμότητά τους να μεταβούν σε βιώσιμη ενέργεια. Στην έρευνα αυτή, τα κριτήρια χωρίστηκαν σε 4 πυλώνες αξιολόγησης: κοινωνικά, πολιτικά, οικονομικά και τεχνολογικά και με τη χρήση των μεθόδων Analytical Hierarchy Process (AHP) και PROMITHEE υπολογίστηκαν οι συντελεστές των βαρών των κριτηρίων και η τελική κατάταξη των χωρών.

Στην έρευνα των Tutak, Brodny, Siwiec, Ulewicz και Bindzar[31], διερευνάται το επίπεδο της βιώσιμης ενεργειακής ανάπτυξης των 27 χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και οι ομοιότητες που παρουσιάζουν λαμβάνοντας υπόψιν το οικονομικό και το δημογραφικό τους δυναμικό. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται ένα σύνολο δεικτών στο πεδίο της βιώσιμης ενέργειας, οι οποίοι ανήκουν σε 4 διαστάσεις: ενεργειακή, περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική. Έπειτα, με τη χρήση της μεθόδου πολυκριτήριας ανάλυσης TOPSIS και νευρωνικών δικτύων, τα 27 κράτη αξιολογούνται και κατατάσσονται με βάση τις επιδόσεις τους, λαμβάνοντας υπόψιν την οικονομία και το δημογραφικό δυναμικό, μέσω του ΑΕΠ και του πληθυσμού τους. Τέλος, στην έρευνα αναγνωρίζονται και ομαδοποιούνται παρόμοιες χώρες με βάση τα προφίλ τους στην βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη.

Στην έρευνα των Cucchiella, D'Adamo, Gastaldi, Koh και Rosa[32], χρησιμοποιώντας πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων αξιολογείται η πρόοδος των Ευρωπαϊκών χωρών προς στη βιωσιμότητα από περιβαλλοντική και ενεργειακή οπτική. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται 9 κριτήρια που ανήκουν στον τομέα της ενέργειας και του περιβάλλοντος. Έπειτα, λαμβάνονται πληροφορίες προτίμησης από 20 ειδικούς και με χρήση της μεθόδου AHP, υπολογίζονται οι βαρύτητες των κριτηρίων. Τέλος, υπολογίζεται για κάθε κριτήριο και για κάθε κράτος μια τελική βαθμολογία όπου οδηγεί και σε μια κατάταξη των κρατών της Ευρώπης με βάση την συνολική απόδοσή τους στην βιωσιμότητα, αλλά και ξεχωριστά στους τομείς της ενέργειας και του περιβάλλοντος.

Αναφορικά με τους δείκτες αξιολόγησης από το 2014 και έπειτα δημοσιεύεται ετησίως ο δείκτης Energy Transition Index (ETI), από το World Economic Forum[7], ο οποίος προσφέρει πληροφορίες σχετικά την αποδοτικότητα των ενεργειακών συστημάτων των κρατών και τα αξιολογεί ως προς την ετοιμότητά τους για ενεργειακή μετάβαση. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης διαχωρίζεται σε 3 διαστάσεις ενέργειας: ασφαλής, ισότιμη και βιώσιμη. Σύμφωνα με τον ETI, τα κράτη πρέπει να επικεντρώνονται στην παράλληλη ανάπτυξη και των 3 αυτών διαστάσεων, συστατικά των οποίων είναι η εφαρμογή κανονισμών-πολιτική δέσμευση για την πρόσβαση σε καθαρή και οικονομική ενέργεια για όλους, η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας με σκοπό την ανθεκτικότητα και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Ο δείκτης Sustainable Energy Development Index (SEDI)[8], επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της ενεργειακής βιωσιμότητας χωρίζοντάς την σε 5 διαστάσεις: τεχνολογική, οικονομική, κοινωνική, περιβαλλοντική και θεσμική. Προσφέρει πιο ολοκληρωμένη εικόνα από τον Energy Development Index (EDI) του IEA καθώς λαμβάνει επίσης οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Οι δείκτες Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE)[9], δημοσιεύονται ετησίως, αξιολογώντας 148 κράτη σε πυλώνες βιωσιμότητας όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ενεργειακή αποδοτικότητα, η πρόσβαση σε ηλεκτρισμό κ.α.

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, δημοσιεύεται ετησίως από τον ΟΗΕ μια αναφορά προόδου των Sustainable Development Goals (SDGs). Οι SDGs είναι 17 στόχοι που υιοθετήθηκαν το 2015 από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών και αφορούν την μελλοντική διεθνή ανάπτυξη. Η αναφορά Sustainable Development Report [10], καταγράφει την πρόοδο των κρατών στους στόχους αυτούς που καλύπτουν τομείς όπως η φτώχεια, η υγεία, οι κοινωνικές ανισότητες, η καινοτομία, η προστασία του περιβάλλοντος και η υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή αγαθών.

Σημαντική επίσης είναι και η στάση των πολιτών απέναντι στην κλιματική αλλαγή. Το 2023, έρευνα δημοσιεύτηκε από το Eurobarometer [11], όπου μέσω ερωτηματολογίου εξήχθησαν συμπεράσματα για το πόσο σοβαρό πρόβλημα θεωρούν οι ευρωπαίοι πολίτες την κλιματική αλλαγή, κατά πόσο οι ίδιοι θεωρούν πως έχουν ευθύνη για αυτήν, εάν αναλαμβάνουν δράση για την καταπολέμηση του φαινομένου, κατά πόσο συμφωνούν με το να δοθεί περισσότερη οικονομική ενίσχυση στην μετάβαση σε καθαρή ενέργεια κ.λπ.. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως 8 στους 10 ερωτηθέντες θεωρούν την κλιματική αλλαγή σοβαρό πρόβλημα, πάνω από τους μισούς θεωρούν πως οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία ευθύνονται για το φαινόμενο ενώ σχεδόν τα δύο τρίτα των ερωτηθέντων απάντησαν πως έχουν λάβει δράσει ατομικά για την καταπολέμηση του φαινομένου τους τελευταίους έξι μήνες.

Τέλος, σχεδόν 8 στους 10 ερωτηθέντες απάντησαν πως πρέπει να δοθεί δημόσια οικονομική ενίσχυση στην μετάβαση σε καθαρή ενέργεια.

Το 2022 πραγματοποιήθηκε έρευνα από την Meta σε συνεργασία με το Yale, αξιολογώντας την αντίληψη των πολιτών για την κλιματική αλλαγή για 200 κράτη μέσω του Climate Perceptions Index[12]. Κάθε χώρα έλαβε μια βαθμολογία μετά από ερωτηματολόγιο που χωρίστηκε σε 3 κατηγορίες ερωτήσεων: ενημέρωση, αντίληψη για το ρίσκο και ατομική δράση.

3. Περιγραφή του προβλήματος

Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να αξιολογηθεί ένα σύνολο κρατών ως προς την πρόοδο, αλλά και την ετοιμότητά τους για την ενεργειακή μετάβαση, λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και να συνδράμουν στην καταπολέμηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Η αντίληψη των πολιτών μιας χώρας, η οικονομική κατάσταση, η στάση της κυβέρνησης, η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι όλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την πρόοδο της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν 9 κριτήρια αξιολόγησης όπου ανήκουν σε 4 βασικούς πυλώνες: κοινωνικά, πολιτικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

3.1 Χώρες (Εναλλακτικές)

Επιλέχθηκαν 26 χώρες της Ευρώπης για να αξιολογηθούν ως προς την ετοιμότητα τους για την ενεργειακή μετάβαση (Πίνακας 1). Στο σύνολο αυτό βρίσκονται χώρες ενεργειακά αυτόνομες, που έχουν ήδη κάνει βήματα προς την βιωσιμότητα και την αξιοποίηση των ΑΠΕ, όπως η Γερμανία, η Σουηδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, αλλά και χώρες με χαμηλότερες επιδόσεις στην ενεργειακή διαχείριση και στην αξιοποίηση των ΑΠΕ, όπως η Σερβία, η Βοσνία & Ερζεγοβίνη και η Πολωνία.

Πίνακας 1 – Χώρες

Αλβανία	Ισπανία
Αυστρία	Ιταλία
Βόρεια Μακεδονία	Κροατία
Βέλγιο	Νορβηγία
Βοσνία & Ερζεγοβίνη	Ολλανδία
Βουλγαρία	Πολωνία
Γαλλία	Πορτογαλία
Γερμανία	Ρουμανία
Δανία	Σερβία
Ελβετία	Σλοβακία
Ελλάδα	Σουηδία
Ην. Βασίλειο	Τσεχία
Ιρλανδία	Φινλανδία

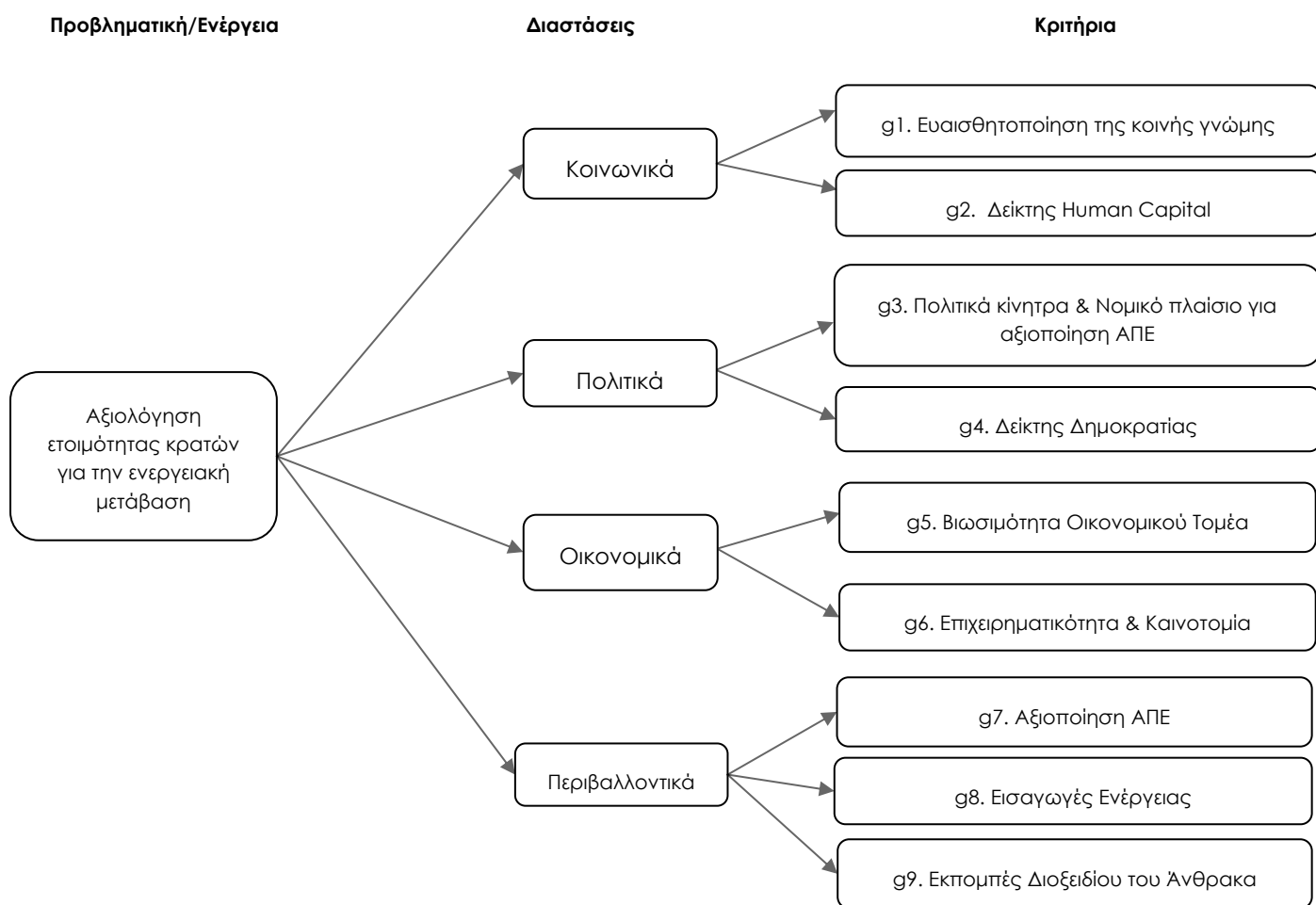
3.2 Ανάλυση Κριτηρίων - Δεδομένα

Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της ετοιμότητας των κρατών να μεταβούν σε βιώσιμη ενέργεια, κατασκευάζεται μια συνεπής οικογένεια κριτηρίων σύμφωνα με τη μεθοδολογία μοντελοποίησης του Roy[13]. Η επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων βασίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση κατά την οποία αντλήθηκε γνώση για την πολυδιάστατη φύση του προβλήματος αλλά και σε δείκτες που έχουν κατασκευαστεί για την παρακολούθηση διαφόρων τομέων ανάπτυξης, επιδιώκοντας να φτάσουμε σε μια ολιστική αξιολόγηση της ετοιμότητας για ενεργειακή μετάβαση. Επίσης, η επιλογή των κριτηρίων έγινε με βάση τη διαθεσιμότητα των δεδομένων σχετικά με το σύνολο των επιλεγθέντων χωρών αλλά και

την ημερομηνία δημοσίευσής τους, καθώς θεωρείται απαραίτητο να ληφθούν πρόσφατα δεδομένα και από παρόμοια χρονική περίοδο.

Για την παρούσα έρευνα, επιλέγονται κριτήρια από τέσσερις διαστάσεις αξιολόγησης: κοινωνικά, πολιτικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά. Ανάμεσα στα υποψήφια κριτήρια που εν τέλει δεν επιλέχθηκαν, υπήρχαν κριτήρια όπως η πρόσβαση σε ηλεκτρισμό, το οποίο αποτελεί κατάλληλο κριτήριο για μια τέτοια έρευνα, ωστόσο στην περίπτωση της Ευρώπης το ποσοστό πρόσβασης σε ηλεκτρισμό βρίσκεται στο 100%[], συνεπώς δεν θα προσέφερε κανένα χρήσιμο συμπέρασμα. Ακόμη ένα υποψήφιο κριτήριο, το οποίο τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε, ήταν η στάση των πολιτών απέναντι στην κλιματική αλλαγή από το Eurobarometer[11]. Ο λόγος αποκλεισμού του συγκεκριμένου κριτηρίου ήταν η περιορισμένη διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς δεν καλύπτονταν όλες οι χώρες από το σύνολο που έχει ληφθεί. Τέλος, ένα ακόμα υποψήφιο κριτήριο που δεν λήφθηκε εν τέλει ήταν το κριτήριο Carbon Lock-In, από την έρευνα των Νεοφύτου, Νίκας, Δούκας [4]. Στο συγκεκριμένο κριτήριο συνδυάζονται σε έναν μαθηματικό τύπο το ποσοστό εξάρτησης μιας χώρας από τα ορυκτά καύσιμα, αλλά και το κατά πόσο είναι μελλοντικά δεσμευμένα σε αυτά, λαμβάνοντας υπόψιν ένα μέσο χρονικό διάστημα λειτουργίας των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Αυτό το κριτήριο απορρίφθηκε λόγο της μη επάρκειας αλλά και της παλαιότητας των δεδομένων σχετικά με τις μονάδες παραγωγής ενέργειας κάθε χώρας.

Εν τέλει, επιλέγονται κριτήρια τα οποία τηρούν τις συνθήκες μονοτονίας, επάρκειας και μη πλεονασμού τα οποία χωρίζονται σε 4 διαστάσεις αξιολόγησης (Εικόνα 4). Οι περιγραφές των κριτηρίων καθώς και οι κλίμακες που προκύπτουν μετά την ανάλυση των δεδομένων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 4 – Κριτήρια αξιολόγησης

g1. Ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης

Δείχνει την ευαισθητοποίηση των πολιτών μιας χώρας για την κλιματική αλλαγή, την αντίληψη τους για τα ρίσκα και τις συνέπειες που σχετίζονται με αυτήν και κατά πόσο οι ίδιοι δρουν ατομικά για την περιορισμό του φαινομένου.

Πρόκειται για ένα ποσοτικό κριτήριο που εκφράζεται από τον Climate Perceptions Index[12], έναν δείκτη που προκύπτει από έρευνα που διεξήχθη από την Meta σε συνεργασία με το Yale, βαθμολογώντας και κατατάσσοντας 200 χώρες ως προς την ευαισθητοποίηση, αντίληψη για τις συνέπειες και τη δράση των πολιτών για την κλιματική αλλαγή. Προφανώς, η στάση και η ενημέρωση της κοινωνίας επάνω σε αυτό το ζήτημα είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τις αποφάσεις που λαμβάνονται από τα κράτη σχετικά με την ενεργειακή διαχείριση.

g2. Δείκτης Human Capital

Εκφράζεται από τον 5^ο πυλώνα (Vocational and Technical Skills) του Global Talent Competitiveness Index (GTCI)(2023)[14] και αξιολογεί μια χώρα ως προς την ποιότητα-ποσότητα του εργατικού δυναμικού, την διαθεσιμότητα εξειδικευμένων υπαλλήλων με γνώσεις που βρίσκονται σε ζήτηση, αλλά και γενικότερα την αποδοτικότητα των εργαζομένων στην χώρα αυτή. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν δυνητικά να επηρεάσουν την μετάβαση σε βιώσιμες πηγές ενέργειας, οπότε ο δείκτης αυτός είναι ένα κατάλληλο κριτήριο για την έρευνά μας.

Ο Global Talent Competitiveness Index δημοσιεύεται ετησίως από το πανεπιστήμιο INSEAD και είναι ένας δείκτης, ο οποίος χωρισμένος σε 6 πυλώνες αξιολόγησης, βαθμολογεί 134 χώρες σε διάφορους τομείς ανταγωνιστικότητας. Οι πυλώνες λαμβάνουν βάρη βασισμένα στην ανάπτυξη κάθε χώρας, καθώς επηρεάζουν τις διαφορετικές οικονομίες με διαφορετικό τρόπο[14].

g3. Πολιτικά κίνητρα & Νομικό πλαίσιο για αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, το κριτήριο αυτό δείχνει μεταξύ άλλων τα κίνητρα και τους κανονισμούς που υποστηρίζουν τις ΑΠΕ, το σχεδιασμό για επέκταση της εκμετάλλευσης των ΑΠΕ στο μέλλον, αλλά και γενικότερα την ενεργειακή αποδοτικότητα μιας χώρας μέσω δυο δεικτών RISE (2022)[9]. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται ο μέσος όρος των δυο δεικτών για ανανεώσιμες πηγές και αποδοτικότητα ενέργειας. (Πίνακας 2)

Οι δείκτες RISE δημοσιεύονται από τον οργανισμό World Bank και είναι ένα σύνολο ρυθμιστικών δεικτών για την βιώσιμη ενέργεια που αξιολογούν 140 χώρες σε πυλώνες όπως η πρόσβαση σε ηλεκτρισμό, η πρόσβαση σε καθαρά τρόφιμα, η ενεργειακή αποδοτικότητα και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας[9].

g4. Δείκτης Δημοκρατίας

Αξιολογεί την κατάσταση της δημοκρατίας σε μια χώρα βασιζόμενος σε ένα σύνολο υπό – δεικτών όπως: εκλογική διαδικασία και πλουραλισμός, λειτουργία της κυβέρνησης, πολιτική συμμετοχή, πολιτική κουλτούρα και πολιτικές ελευθερίες. Φυσικά, μια λειτουργική κυβέρνηση με κουλτούρα εξέλιξης και με ενεργούς πολίτες θα αναλάβει δράση ταχύτερα προς την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας.

Ο δείκτης δημοκρατίας δημοσιεύεται από το Economist Intelligence Unit και αξιολογεί την ποιότητα της δημοκρατίας σε 165 ανεξάρτητα κράτη. Οι χώρες βαθμολογούνται σε ένα εύρος δεικτών σε κλίμακα 0-10 και στο τέλος εξάγεται ο μέσος όρος αυτών[15].

Πίνακας 2 - Πολιτικά Κίνητρα & Νομικό Πλαίσιο για αξιοποίηση ΑΠΕ

Χώρες	Renewable Energy	Energy Efficiency	Πολιτικά κίνητρα & Νομικό Πλαίσιο για ΑΠΕ (Average)
Αλβανία	51	49	50
Αυστρία	81	84	82,5
Βόρεια Μακεδονία	44	53	48,5
Βέλγιο	84	78	81
Βοσνία & Ερζεγοβίνη	54	48	51
Βουλγαρία	80	69	74,5
Γαλλία	88	69	78,5
Γερμανία	92	83	87,5
Δανία	94	83	88,5
Ελβετία	87	73	80
Ελλάδα	83	65	74
Ην. Βασίλειο	92	82	87
Ιρλανδία	88	80	84
Ισπανία	81	83	82
Ιταλία	82	80	81
Κροατία	66	66	66
Νορβηγία	88	68	78
Ολλανδία	82	80	81
Πολωνία	54	55	54,5
Πορτογαλία	83	84	83,5
Ρουμανία	75	81	78
Σερβία	57	55	56
Σλοβακία	82	81	81,5
Σουηδία	73	64	68,5
Τσεχία	72	77	74,5
Φινλανδία	82	76	79

g5. Βιωσιμότητα Οικονομικού Τομέα

Αξιολογεί την οικονομική κατάσταση σε μια χώρα και εκφράζεται από τον δείκτη Market Sophistication του Global Innovation Index (2023)[16]. Ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψιν την κεφαλαιοποίηση της αγοράς σε μια χώρα, την κρατική χρηματοδότηση στον ιδιωτικό τομέα και σε νέες επιχειρήσεις, αλλά και τις επενδύσεις που λαμβάνουν χώρα.

Ο Global Innovation Index δημοσιεύεται ετησίως από τον World Intellectual Property Organization (WIPO), και αξιολογεί 132 κράτη σε διάφορους τομείς ανάπτυξης, οι οποίοι χωρίζονται σε 7 πυλώνες[16].

g6. Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία

Το κριτήριο αυτό αξιολογεί ένα κράτος μεταξύ άλλων ως προς τις επενδύσεις στην έρευνα και ανάπτυξη, την ευκολία εκκίνησης και άνθισης μιας επιχείρησης και την γενικότερη στάση ενός κράτους απέναντι σε καινοτόμες ιδέες και έργα. Εκφράζεται από τον μέσο όρο των 2 υπό-δεικτών του Global Innovation Index[16]: 1) Business Environment, 2) Research & Development(Πίνακας 4).

g7. Αξιοποίηση ΑΠΕ

Εκφράζει το ποσοστό από την ενέργεια που παράγει μια χώρα όπου προέρχεται από την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ είναι βασικός πυλώνας της ενεργειακής μετάβασης, συνεπώς το συγκεκριμένο κριτήριο μας δίνει εικόνα για την πρόοδο σε αυτό τον στόχο, αλλά και στον στόχο ελάττωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων, καθώς αύξηση του συνεπάγεται μείωση των υπολοίπων στο ενεργειακό μείγμα(Our World in Data)[17].

g8. Εισαγωγές ενέργειας

Ακόμη ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης καθώς μια χώρα που δεν είναι ενεργειακά αυτόνομη, έχει επιπλέον βήματα προς την ενεργειακή μετάβαση. Οι τιμή που θα λαμβάνει το κριτήριο εκφράζεται ως το ποσοστό της ζήτησης ενέργειας σε μια χώρα που καλύπτεται από εισαγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (Our World in Data)[18]. Στις περιπτώσεις που η χώρα δεν εισήγαγε ενέργεια είτε εξήγαγε, η τιμή ορίζεται ως μηδέν.

g9. Εκπομπές CO₂

Εκφράζει τις κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ για κάθε κράτος (IEA)[19]. Η σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη για μια βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση. Το CO₂ είναι το κυριότερο από τα αέρια αυτά και οι κατά κεφαλήν εκπομπές του ανά κράτος συμβάλουν στην ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ετοιμότητας για μια ενεργειακή μετάβαση.

Πίνακας 3 - Κλίμακες Κριτηρίων

Κριτήριο	Δείκτης	Κάτω Όριο	Άνω Όριο	Πηγή	Ημερομηνία
g1	Δείκτης [0-100]	0	100	Meta	2022
g2	Δείκτης [0-100]	0	100	INSEAD	2023
g3	Δείκτης [0-100]	0	100	World Bank	2022
g4	Δείκτης [0-10]	0	10	Economist Intelligence	2023
g5	Δείκτης [0-100]	0	100	WIPO	2023
g6	Δείκτης [0-100]	0	100	WIPO	2023
g7	% Ποσοστό	0	100	Our World in Data	2022
g8	% Ποσοστό	0	100	Our World in Data	2023
g9	tCO ₂ /Capita	0	8.6	IEA	2021

Πίνακας 4 - Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία

Χώρες	Business Environment	Research & Development	Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (Average)
Αλβανία	54	0	27
Αυστρία	66,9	56,3	61,6
Βόρεια Μακεδονία	29	3,6	16,3
Βέλγιο	58,9	61,6	60,25
Βοσνία & Ερζεγοβίνη	18,7	1,9	10,3
Βουλγαρία	33	11,3	22,15
Γαλλία	60,6	62,5	61,55
Γερμανία	64,6	69,6	67,1
Δανία	77,2	64,5	70,85
Ελβετία	83,8	71,8	77,8
Ελλάδα	31,3	23,1	27,2
Ην. Βασίλειο	56,5	71,3	63,9
Ιρλανδία	71,2	46,7	58,95
Ισπανία	42,4	43,3	42,85
Ιταλία	39,2	43,4	41,3
Κροατία	13,8	12,8	13,3
Νορβηγία	73,7	52,4	63,05
Ολλανδία	80,8	63	71,9
Πολωνία	19,9	23,7	21,8
Πορτογαλία	48,6	41,5	45,05
Ρουμανία	22,9	4,6	13,75
Σερβία	44,3	10,1	27,2
Σλοβακία	17,9	16,7	17,3
Σουηδία	54,8	74,4	64,6
Τσεχία	45,9	28,9	37,4
Φινλανδία	76,6	64,7	70,65

Οι τιμές των κριτηρίων για όλες τις εναλλακτικές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 – Τιμές Κριτηρίων

Χώρες	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
Αλβανία	50,5	49,1	50	6,28	25	27	100	11,6	1,4
Αυστρία	60,8	72,7	82,5	8,28	44,4	61,6	78	0,9	6,8
Βόρεια Μακεδονία	55,3	50,5	48,5	6,03	47,1	16,3	25,8	0	3,3
Βέλγιο	56,2	67,8	81	7,64	47,9	60,25	26,9	1,9	7,5
Βοσνία & Ερζεγοβίνη	56,1	50,5	51	5	47,9	10,3	33,5	0	6,3
Βουλγαρία	53,5	55,2	74,5	6,41	36,7	22,15	19,1	0	5,6
Γαλλία	64,4	63,5	78,5	8,07	60,7	61,55	24,3	0	4,3
Γερμανία	59,1	72,1	87,5	8,8	56,5	67,1	44,3	1,7	7,5
Δανία	56,2	71,6	88,5	9,28	52,8	70,85	81,4	7,8	4,7
Ελβετία	59,8	75,4	80	9,14	64,4	77,8	58,8	0	4
Ελλάδα	60,3	48,7	74	8,14	34,7	27,2	43,5	9,1	4,7
Ην. Βασίλειο	60,9	62,2	87	8,28	69,3	63,9	41,4	7,4	4,8
Ιρλανδία	59,5	64	84	9,19	37,9	58,95	38,8	9,3	6,7
Ισπανία	65,6	49,4	82	8,07	46	42,85	42,6	0	4,5
Ιταλία	62,8	62,4	81	7,69	44,3	41,3	35,8	16,4	5,2
Κροατία	59,4	55,1	66	6,5	38,8	13,3	63,8	10,2	3,9
Νορβηγία	48,3	72,1	78	9,81	47,5	63,05	98,7	0	6,7
Ολλανδία	50,4	63,4	81	9	55,6	71,9	40,3	0	7,7
Πολωνία	56,6	65	54,5	7,18	34,5	21,8	21,1	1,8	7,8
Πορτογαλία	68,5	56	83,5	7,75	43,4	45,05	59,6	18,6	3,4
Ρουμανία	54,8	57,5	78	6,45	32,8	13,75	43,1	0	3,7
Σερβία	54,8	58,1	56	6,33	43,7	27,2	29,3	0	6,5
Σλοβακία	56,9	63,9	81,5	7,07	33,5	17,3	21,9	0	5,6
Σουηδία	56,4	69,6	68,5	9,39	59,9	64,6	68,3	0	3,3
Τσεχία	43,4	69,2	74,5	7,97	30,4	37,4	12,9	0	8,6
Φινλανδία	53,7	73,3	79	9,3	58,7	70,65	53,4	2,3	6,5

4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων

Η αδυναμία των υπάρχοντων μοντέλων να αντιμετωπίσουν τα πολυδιάστατα πραγματικά προβλήματα των επιχειρήσεων, με χρήση ενός μόνο κριτηρίου, οδήγησε στην ανάπτυξη της Πολυκριτήριας Λήψης Αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Making). Τα πολυκριτήρια προβλήματα, λόγω της παρουσίας πολλαπλών και αντικρουόμενων μεταξύ των κριτηρίων αξιολόγησης των εναλλακτικών αποφάσεων, είναι προβλήματα με χαμηλό βαθμό δόμησης. Επομένως, το πλήθος των κριτηρίων και η πολυπλοκότητα των μεταξύ των σχέσεων, έχουν επίδραση στο σύστημα προτιμήσεων του αποφασίζοντα, το οποίο με τη σειρά του χαρακτηρίζεται, και αυτό, από χαμηλό βαθμό δόμησης. Κατά συνέπεια οι λαμβανόμενες αποφάσεις ανήκουν στις κατηγορίες είτε αδόμητων είτε ημιδομημένων αποφάσεων, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη για υποστήριξη του αποφασίζοντος μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων πολυκριτήριων μοντέλων [Ματσατσίνης].

Οι διαφορετικές προσεγγίσεις της διαδικασίας απόφασης δημιούργησαν δυο σχολές, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Η **πολυκριτήρια λήψη αποφάσεων (MultiCriteria Decision Making – MCDM)**, δέχεται την ύπαρξη ενός συστήματος αξιών που αντιπροσωπεύει τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων σε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών. Το σύστημα αξιών αφορά τη διαμόρφωση μιας συνάρτησης χρησιμότητας και των σχετικών βαρών των προτεραιοτήτων. Σύμφωνα με αυτήν οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα σε ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση ενός συστήματος αξιών, το οποίο ικανοποιεί ένα σύνολο συνθηκών, μέσα από το οποίο ο αποφασίζων θα οδηγηθεί στην επιλογή της σωστότερης λύσης. Οι βασικοί στόχοι της πολυκριτήριας λήψης αποφάσεων είναι:

- Να καθοριστούν οι συνθήκες που πρέπει να ισχύουν ώστε να υφίσταται το σύστημα αξιών.
- Να υποστηρίξει τον αποφασίζοντα ώστε να ανακαλύπτει μέσα από μια διαδικασία ένα σύστημα αξιών και να παίρνει τη σωστή απόφαση.

Η **πολυκριτήρια υποβοήθηση της λήψης αποφάσεων (MultiCriteria Decision Aid – MCDA)**, δεν σκοπεύει να υποδείξει αποφάσεις στον αποφασίζοντα καλύτερες από αυτές που αντιλαμβάνεται, αλλά να τον οδηγήσει στην επιλογή της μέσα από την σταδιακή κατανόηση και βελτίωση των ικανοτήτων και των γνώσεών του. Σύμφωνα με τον Roy (1990):

- Στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης εμπλέκονται κατά κανόνα περισσότεροι του ενός αποφασίζοντες με διαφορετικές απόψεις και πιστεύω.
- Στην περίπτωση που έχουμε μόνο έναν αποφασίζοντα, οι προτιμήσεις του έχουν κατά κανόνα ένα μεγάλο βαθμό ασάφειας με ασυνέπειες και συγκρούσεις.
- Οι εναλλακτικές επιλογές, τα κριτήρια, η αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών αλλά και οι προτιμήσεις των αποφασιζόντων καθορίζονται με αυθαίρετες ως επί το πλείστον διαδικασίες.

4.1 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης Πολυκριτήριου Προβλήματος

Ο Roy(1976; 1990) πρότεινε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την μοντελοποίηση των πολυκριτήριων προβλημάτων, αποτελούμενο από τα εξής διαδοχικά στάδια:

- Αντίληψη του αντικειμένου της απόφασης
- Καθορισμός μιας συνεπούς οικογένειας κριτηρίων
- Κατασκευή του μοντέλου ολικής προτίμησης (απόφασης ή συμπεριφοράς)
- Υποστήριξη της απόφασης

Κάθε απόφαση αναλύεται σε ένα πεπερασμένο ή συνεχές σύνολο εναλλακτικών επιλογών (αποφάσεων, ενεργειών, ...). Το σύνολο αυτό χαρακτηρίζεται από τον αποφασίζοντα από μια προβληματική. Τα είδη προβληματικών που μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα πρόβλημα ορίζονται από τον Roy(1985) ως εξής:

Προβληματική α: Αφορά την επιλογή μιας μόνο εναλλακτικής μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών.

Προβληματική β: Αφορά την ταξινόμηση(sorting) των εναλλακτικών επιλογών/ενεργειών ενός συνόλου σε ομάδες με συγκεκριμένες ιδιότητες.

Προβληματική γ: Αφορά την κατάταξη(ranking) των εναλλακτικών επιλογών/ενεργειών ενός συνόλου, από την πλέον προτιμώμενη προς την λιγότερο προτιμητέα.

Προβληματική δ: Αφορά την περιγραφή των εναλλακτικών επιλογών/δράσεων ενός συνόλου καθώς και των συνεπειών τους σε γλώσσα κατανοητή από τους αποφασίζοντες.

Συχνά τα προβλήματα είναι σύνθετα και δεν χαρακτηρίζονται μόνο από μια προβληματική. Είναι πιθανό αυτή να αλλάζει στα διάφορα στάδια λήψης μιας απόφασης.

Για τον καθορισμό της συνεπούς οικογένειας κριτηρίων, προτείνονται τα εξής βήματα (Roy, 1985):

1. Καθορισμός του συνόλου των εναλλακτικών επιλογών
2. Ανάλυση των επιπτώσεων κάθε εναλλακτικής επιλογής (ιδιότητες, χαρακτηριστικά)
3. Καθορισμός των αξόνων προτίμησης
4. Επιλογή των διαστάσεων
5. Καθορισμός της συνεπούς οικογένειας κριτηρίων

Στη συνέχεια ορίζεται ο πολυκριτήριο πίνακας, ο οποίος περιέχει τις εναλλακτικές επιλογές, τις οποίες ο αποφασίζων εκτιμά με την βοήθεια των κριτηρίων.

Τα κριτήρια κατασκευάζονται με τη βοήθεια ποσοτικών και ποιοτικών διαστάσεων-κλιμάκων που επιτρέπουν την εκτίμηση όλων των εναλλακτικών επιλογών-ενεργειών.

Σαν κριτήριο ορίζεται κάθε μονότονη μεταβλητή που υποδηλώνει τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Τα κριτήρια μπορεί να είναι είτε ποσοτικά (measurable criteria) και να εκφράζονται από μια συνεχή κλίμακα (χρόνος, θερμοκρασία,...), είτε ποιοτικά-διάταξης (ordinal criteria) για τη μοντελοποίηση των οποίων χρησιμοποιούνται κλίμακες διακριτών τιμών. Τα κριτήρια συμβολίζονται:

$$g_j(a_i), i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 1, 2, \dots, m$$

Ορίζουμε: $g: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{R}$ και $a \rightarrow g(a)$

Όπου: $g(a)$ είναι η εκτίμηση της εναλλακτικής επιλογής a του συνόλου A , πάνω στο κριτήριο g .

Η συνάρτηση αυτή οφείλει να πληροί την ιδιότητα της μονοτονίας σύμφωνα με την οποία, δεδομένων δύο εναλλακτικών επιλογών a και b του συνόλου A , θα πρέπει να ισχύουν:

Η a προτιμάται από την b όταν: $g(a) > g(b)$

Η a είναι ισοδύναμη με την b όταν: $g(a) = g(b)$

Το σύνολο των κριτηρίων τα οποία χρησιμοποιούνται στη λήψη μιας απόφασης, ονομάζεται **συνεπής οικογένεια κριτηρίων**, και πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Μονοτονίας ή συνέπειας (monotonicity or consistency): Να είναι μονότονα και συναφή με τις ατομικές προτιμήσεις. Τούτο σημαίνει ότι δοθέντων δυο εναλλακτικών επιλογών a και b , η a προτιμάται της b όταν ισχύει:
$$g_i(a) = g_j(b) \quad \forall i = j \text{ και } g_i(a) > g_j(b), \text{ τότε η εναλλακτική } a \text{ προτιμάται από την } b.$$
- Επάρκειας (exhaustiveness) στα πλαίσια της διαθέσιμης πληροφορίας. Εάν για ένα ζεύγος εναλλακτικών επιλογών a και b , ισχύει $g_i(a) = g_j(b) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$, τότε η εναλλακτική a είναι ισοδύναμη της b , δηλαδή δεν απουσιάζει κανένα κριτήριο απόφασης από το σύνολο χρησιμοποιούμενων κριτηρίων.
- Να μην είναι πλεοναστικά (non redundancy). Η αφαίρεση ενός κριτηρίου από το σύνολο των κριτηρίων απόφασης που χρησιμοποιούμε είναι ικανή να αναιρέσει μια από τις προηγούμενες δυο συνθήκες για κάποιο ζευγάρι εναλλακτικών επιλογών.

4.2 Μέθοδος UTA/UTASTAR

Στο παραδοσιακό μοντέλο συνθετικής προσέγγισης, το μοντέλο σύνθεσης των κριτηρίων είναι γνωστό εξ' αρχής, ενώ η ολική προτίμηση είναι άγνωστη. Αντιθέτως, η φιλοσοφία της αναλυτικής-συνθετικής προσέγγισης περιλαμβάνει την εξαγωγή μοντέλων προτίμησης από ολικές προτιμήσεις οι οποίες είναι γνωστές[2].

Η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση έχει σκοπό να αναλύσει την αποφασιστική συμπεριφορά και την αντίληψη του αποφασίζοντα. Χρησιμοποιούνται ειδικές, επαναληπτικές διαδικασίες όπου τα στοιχεία του προβλήματος και οι κρίσεις του αποφασίζοντα αναλύονται και στη συνέχεια συντίθεται ένα σύστημα αξιών. Ο στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η υποβοήθηση του αποφασίζοντα να βελτιώσει τις γνώσεις του σχετικά με την κατάσταση της απόφασης και τις προτιμήσεις του ώστε να ληφθεί η καλύτερη δυνατή απόφαση.

4.2.1 Η Μέθοδος UTA

Η μέθοδος UTA προτάθηκε από τους Jacques-Lagrange και Σίσκο, έχει σκοπό να αναπτύξει μια ή περισσότερες προσθετικές συναρτήσεις αξιών δεδομένου ενός συνόλου ταξινομημένων εναλλακτικών από τον αποφασίζοντα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού για να αναπτύξει αυτές τις συναρτήσεις, ώστε τα αποτελέσματα που θα ληφθούν να είναι όσο το δυνατόν πιο συνεπή με την αρχική κατάταξη.

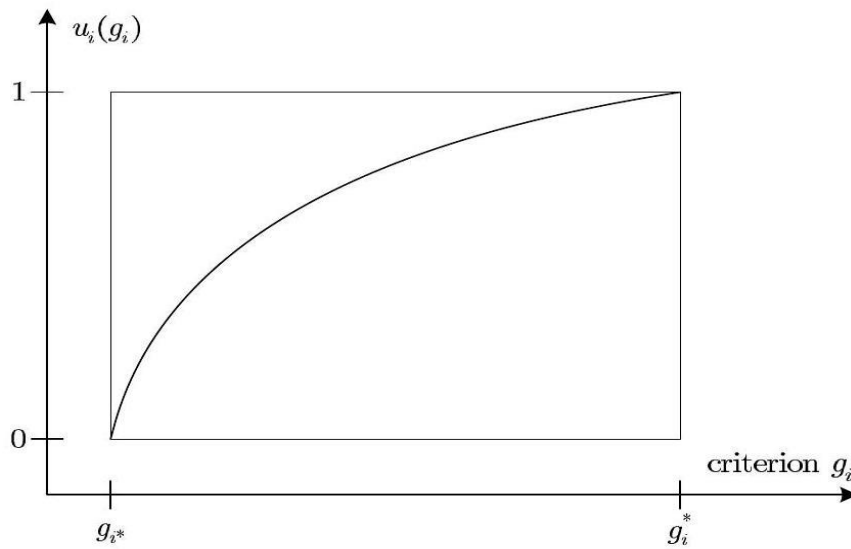
Έστω, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ το σύνολο αναφοράς των εναλλακτικών, οι οποίες εκτιμώνται από μια οικογένεια κριτηρίων $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$. Το μοντέλο σύνθεσης των κριτηρίων στη UTA θεωρείται ως μία προσθετική συνάρτηση αξίας της ακόλουθης μορφής:

$$u(\mathbf{g}) = \sum_{i=1}^n p_i u_i(g_i) \quad (1)$$

υπό τους περιορισμούς κανονικοποίησης:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i = 1 \\ u_i(g_i^*) = 0, u_i(g_i^*) = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

όπου u_i , $i = 1, 2, \dots, n$ είναι οι μερικές συναρτήσεις αξίας ή χρησιμότητας, κανονικοποιημένες στο διάστημα $[0, 1]$ και p_i είναι τα βάρη των u_i (Εικόνα 5).



Εικόνα 5 - Κανονικοποιημένη συνάρτηση μερικής χρησιμότητας

Τόσο η συνάρτηση αξίας της μερικής χρησιμότητας αλλά και της ολικής χρησιμότητας έχουν την ιδιότητα της μονοτονίας του κριτηρίου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της συνάρτησης ολικής αξίας ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες :

$$\begin{cases} u[\mathbf{g}(a)] > u[\mathbf{g}(b)] \Leftrightarrow a > b & \text{(προτίμηση)} \\ u[\mathbf{g}(a)] = u[\mathbf{g}(b)] \Leftrightarrow a \sim b & \text{(αδιαφορία)} \end{cases} \quad (3)$$

Η μέθοδος UTA, θεωρεί μια μορφή της συνάρτησης αξίας χωρίς βάρη, ισοδύναμη της μορφής που ορίζεται από τις σχέσεις (1) και (2), επακολούθως:

$$u(\mathbf{g}) = \sum_{i=1}^n u_i(g_i) \quad (4)$$

υπό τους περιορισμούς κανονικοποίησης:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n u_i(g_i^*) = 1 \\ u_i(g_i^*) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

Βέβαια, η ύπαρξη ενός τέτοιου μοντέλου προϋποθέτει την ανεξαρτησία προτιμήσεων των κριτηρίων του αποφασίζοντα, ενώ και άλλες συνθήκες για να ισχύει η προσθετική μορφή.

Ανάπτυξη του μοντέλου UTA

Στην βάση του προσθετικού μοντέλου (4)-(5), και λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες προτίμησης (3), η αξία κάθε εναλλακτικής $a \in A_R$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$u'[\mathbf{g}(a)] = \sum_{i=1}^n u_i[g_i(a)] + \sigma(a) \forall a \in A_R \quad (6)$$

Όπου $\sigma(a)$, είναι ένα πιθανό σφάλμα σχετικό με το $u'[\mathbf{g}(a)]$.

Επιπρόσθετα, για να υπολογιστεί η συνάρτηση αξίας μερικής χρησιμότητας σε μορφή τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων, οι Jacquet-Lagrange και Σίσκος προτείνουν την χρήση γραμμικής παρεμβολής. Για κάθε κριτήριο, το διάστημα $[g_i^*, g_i^*]$, χωρίζεται σε $(\alpha_i - 1)$ ίσα διαστήματα και συνεπώς το τελικό σημείο g_i^j κάθε υποδιαστήματος υπολογίζεται από την σχέση:

$$g_i^j = g_i^* + \frac{j-1}{\alpha_i-1} (g_i^* - g_i^*) \forall j = 1, 2, \dots, \alpha_i \quad (7)$$

Η μερική αξία μιας απόφασης υπολογίζεται με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής και έτσι, για $g_i(a) \in [g_i^j - g_i^{j+1}]$:

$$u_i[g_i(a)] = u_i(g_i^j) + \frac{g_i(a) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)] \quad (8)$$

Το σύνολο των εναλλακτικών $A_R = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ επίσης "επαναταξινομείται" με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η εναλλακτική a_1 να είναι πρώτη επιλογή (καλύτερη επιλογή) και η εναλλακτική a_m να είναι τελευταία (χειρότερη επιλογή). Δεδομένου ότι η ταξινόμηση αυτή έχει τη μορφή κατάταξης όπου για κάθε ζεύγος διαδοχικών εναλλακτικών ισχύει $\alpha_k > \alpha_k + 1$ (προτίμηση) είτε $\alpha_k \sim \alpha_k + 1$ (αδιάφορο). Συνεπώς, αν :

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = u'[\mathbf{g}(a_k)] - u'[\mathbf{g}(a_{k+1})] \quad (9)$$

Τότε ισχύει ένα από τα παρακάτω:

$$\begin{cases} \Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta & \text{αν } a_k \succ a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 & \text{αν } a_k \sim a_{k+1} \end{cases} \quad (10)$$

Όπου δ είναι ένας μικρός θετικός αριθμός έτσι ώστε να διαχωριστούν δυο διαδοχικές κλάσεις ισοδυναμίας του R .

Λαμβάνοντας υπόψιν την υπόθεση μονοτονίας στις προτιμήσεις, οι μερικές χρησιμότητες $u_i(g_i)$, πρέπει να ικανοποιούν τους παρακάτω περιορισμούς:

$$u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq s_i \quad \forall j = 1, 2, \dots, \alpha_i - 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Με το $s_i \geq 0$ να ορίζεται ως το κατώφλι αδιαφορίας για κάθε κριτήριο g_i .

Οι Jacquet-Lagrange και Σίσκος τονίζουν πως δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αυτά τα κατώφλια στο μοντέλο UTA ($s_i=0$), αλλά μπορούν να φανούν χρήσιμα για την αποφυγή φαινομένων όπως π.χ. $u_i(g_i^{j+1}) = u_i(g_i^j)$ όταν $g_i^{j+1} \succ g_i^j$.

Τέλος, οι μερικές χρησιμότητες υπολογίζονται με τη λύση του παρακάτω γραμμικού προβλήματος (LP), χρησιμοποιώντας τις (4), (5), (10), (11), ως περιορισμούς και ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\min] F = \sum_{a \in A_R} \sigma(a) \\ \text{subject to} \\ \left. \begin{array}{l} \Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \quad \text{if } a_k \succ a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \quad \text{if } a_k \sim a_{k+1} \end{array} \right\} \quad \forall k \\ u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq 0 \quad \forall i \text{ and } j \\ \sum_{i=1}^n u_i(g_i^*) = 1 \\ u_i(g_i^*) = 0, u_i(g_i^j) \geq 0, \sigma(a) \geq 0 \quad \forall a \in A_R, \forall i \text{ and } j \end{array} \right. \quad (12)$$

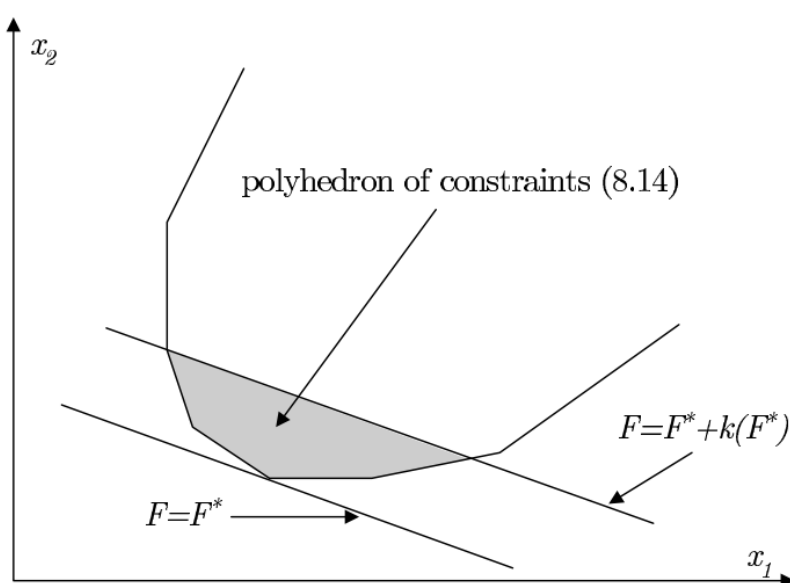
Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση ευστάθειας των αποτελεσμάτων του γ.π. (12), η οποία θεωρείται ως ένα πρόβλημα μεταβελτιστοποίησης. Οι Jacquet-Lagrange και Σίσκος τονίζουν, πως εάν η βέλτιστη λύση δώσει $F^*=0$, τότε το υπερπολύεδρο των αποδεκτών λύσεων για $u_i(g_i)$ δεν είναι κενό, αλλά υπάρχουν πολλές συναρτήσεις αξίας που είναι απόλυτα συνεπείς με την προδιάταξη R .

Ακόμα και στην περίπτωση που η βέλτιστη τιμή F^* είναι μη μηδενική, άλλες λύσεις, λιγότερο καλές για την F , μπορούν να βελτιώσουν άλλα κριτήρια βελτιστοποίησης όπως π.χ. τον συντελεστή συσχέτισης τ του Kendall.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6, ο χώρος που βρίσκονται οι λύσεις της μεταβελτιστοποίησης οριοθετείται από το υπερπολύεδρο:

$$\begin{cases} F \leq F^* + k(F^*) \\ \text{Όλοι οι περιορισμοί του γ.π. (12)} \end{cases} \quad (13)$$

Όπου $k(F^*)$ ένα μικρό θετικό κατώφλι που αποτελεί μικρό ποσοστό του F^* .



Εικόνα 6

Οι αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διερεύνηση του υπερπολύεδρου (13), είναι μέθοδοι branch and bound, όπως η reverse simplex, ή τεχνικές από την θεωρία γραφημάτων όπως η μέθοδος του Tarry, ή η μέθοδος των Manas και Nedoma.

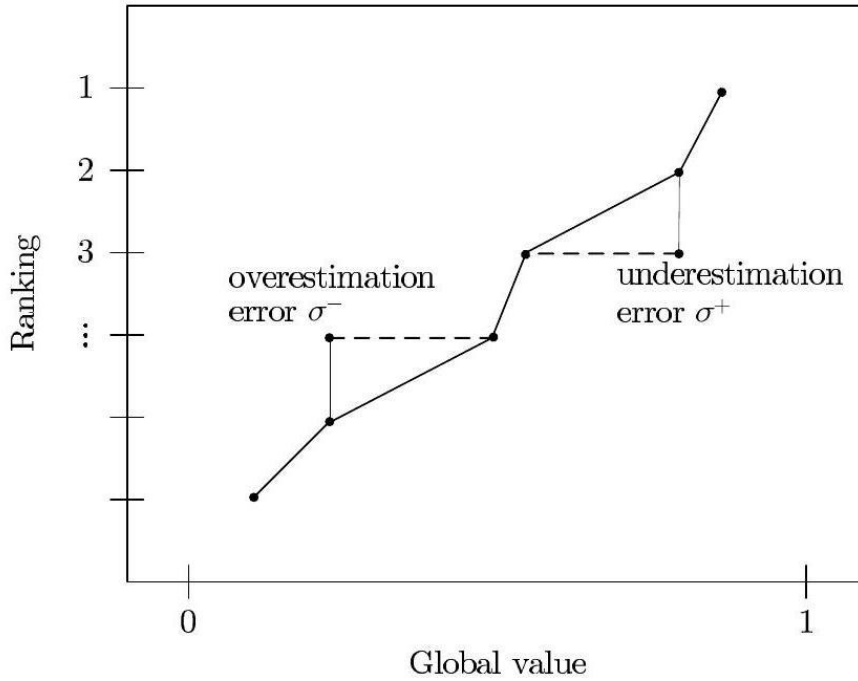
Οι Jacquet-Lagrange και Σίσκος, στην αρχική μορφή της μεθόδου UTA, προτείνουν την μερική διερεύνηση του υπερπολύεδρου (13), λύνοντας το εξής γ.π. :

$$\begin{cases} [\min]u_i(g_i^*) \text{ και } [\max]u_i(g_i^*) \\ \text{στο πολύεδρο(13)} \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Ως τελική λύση του προβλήματος θεωρείται η μέση τιμή των προηγούμενων γραμμικών προγραμμάτων. Σε περίπτωση αστάθειας, οι λύσεις παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα η τελική λύση να είναι λιγότερο αντιπροσωπευτική. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα δείχνουν την εσωτερική διακύμανση των βαρών κάθε κριτηρίου και συνεπώς μας δίνουν μια εικόνα της σημαντικότητας των κριτηρίων στο σύστημα προτίμησης των αποφασιζόντων.

4.2.2 Η Μέθοδος UTASTAR

Η μέθοδος UTASTAR προτάθηκε από τους Σίσκος-Γιαννακόπουλος και είναι μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθόδου UTA που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο αρχικό μοντέλο, για κάθε εναλλακτική επιλογή $a \in A_R$, εισάγεται και μια τιμή σφάλματος $\sigma(a)$, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί. Η συνάρτηση σφάλματος δεν είναι αρκετή για να ελαχιστοποιήσει εντελώς την διασπορά των σημείων γύρω από την μονότονη καμπύλη της Εικόνας 7. Το πρόβλημα αφορά σημεία που βρίσκονται δεξιά της καμπύλης και θα ήταν ιδανικό να αφαιρεθεί κάποια ποσότητα αξίας χωρίς να αυξηθούν οι υπόλοιπες αξίες.



Εικόνα 7

Στη μέθοδο UTASTAR, οι Σίσκος και Γιαννακόπουλος εισήγαγαν μια διπλή θετική συνάρτηση σφάλματος, με αποτέλεσμα η σχέση (6) να γίνεται:

$$u'[\mathbf{g}(a)] = \sum_{i=1}^n u_i[g_i(a)] - \sigma^+(a) + \sigma^-(a) \quad \forall a \in A_R \quad (15)$$

Όπου σ^+ και σ^- είναι τα σφάλματα υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, άλλη μια σημαντική τροποποίηση αφορά τους περιορισμούς μονοτονίας των κριτηρίων, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψιν μέσω του μετασχηματισμού των μεταβλητών:

$$w_{ij} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 1, 2, \dots, \alpha_i - 1 \quad (16)$$

Συνεπώς, οι συνθήκες μονοτονίας (11) μπορούν να αντικατασταθούν από τους μη αρνητικούς περιορισμούς για τις μεταβλητές w_{ij} (για $s_i = 0$).

Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος UTASTAR μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Η ολική χρησιμότητα των εναλλακτικών $u[\mathbf{g}(a_k)], k = 1, 2, \dots, m$ εκφράζεται αρχικά συναρτήσει των μερικών χρησιμοτήτων και στη συνέχεια συναρτήσει των μεταβλητών w_{ij} σύμφωνα με τον τύπο (16), μέσω των εξής σχέσεων:

$$\begin{cases} u_i(g_i^1) = 0 & \forall i = 1, 2, \dots, n \\ u_i(g_i^j) = \sum_{t=1}^{j-1} w_{it} & \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ and } j = 2, 3, \dots, \alpha_i - 1 \end{cases} \quad (17)$$

Βήμα 2: Εισάγονται δυο συναρτήσεις σφάλματος σ^+ και σ^- στο A_R , γράφοντας για κάθε ζεύγος διαδοχικών εναλλακτικών (ανάλογα με την προδιάταξη) τις αναλυτικές εκφράσεις:

$$\begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) &= u_i[\mathbf{g}_i(a_k)] - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) \\ &\quad - u_i[\mathbf{g}_i(a_{k+1})] + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1}) \end{aligned} \quad (18)$$

Βήμα 3: Επίλυση του γ.π. :

$$\left\{ \begin{array}{l} [min]z = \sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)] \\ \text{subject to} \\ \left. \begin{array}{l} \Delta(a_k, a_{k+1}) \geq \delta \quad \text{if } a_k \succ a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) = 0 \quad \text{if } a_k \sim a_{k+1} \end{array} \right\} \quad \forall k \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij} = 1 \\ w_{ij} \geq 0, \sigma^+(a_k) \geq 0, \sigma^-(a_k) \geq 0 \quad \forall i, j, \text{ and } k \end{array} \right. \quad (19)$$

Με το δ να είναι ένας μικρός θετικός αριθμός.

Βήμα 4: Ελέγχεται η ύπαρξη πολλαπλών βέλτιστων λύσεων ή ημιβέλτιστων λύσεων στο γ.π. (19) (έλεγχος ευστάθειας). Σε περίπτωση πολλαπλών λύσεων, υπολογίζεται η μέση τιμή ως η πιο αντιπροσωπευτική των (ημι)βέλτιστων λύσεων που μεγιστοποιούν/ελαχιστοποιούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις:

$$u_i(g_i^*) = \sum_{j=1}^{\alpha_i-1} w_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

Στο πολύεδρο των περιορισμών του γ.π. (19) οριοθετούμενο από τον νέο περιορισμό:

$$\sum_{k=1}^m [\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)] \leq z^* + \varepsilon \quad (21)$$

Όπου z^* είναι η βέλτιστη τιμή του γ.π. στο βήμα 3 και ε είναι ένας πολύ μικρός θετικός αριθμός.

Έχει πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση ανάμεσα στους αλγορίθμους UTA και UTASTAR μέσω πειραματικών δεδομένων και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η UTASTAR δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

4.3 Ανάλυση Ευστάθειας στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων

Η αποτελεσματικότητα και η ικανότητα ενός αναλυτικού πλαισίου υποστήριξης αποφάσεων να αντικατοπτρίσει με ακρίβεια τη διαδικασία λήψης απόφασης ενός αποφασίζοντα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την καταλληλότητα των διαθέσιμων πληροφοριών προτίμησης. Κατά τη διάρκεια εξαγωγής των προτιμήσεων, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα ο αποφασίζοντας να παρέχει πληροφορίες μέσω προσεκτικά δομημένων και εύκολα αντιληπτών πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο αναλυτής εξαγεί πληροφορία από τον αποφασίζοντα με αποδοτικό τρόπο, έτσι ώστε να κατασκευαστεί ένα εξατομικευμένο μοντέλο απόφασης και να εξακριβωθεί η ευστάθειά του (Kadzinski and Tervonen, 2013).

Ειδικά στην περίπτωση των μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων, αλλά και σε άλλες μεθόδους και τεχνικές που απαιτούν τη λήψη πληροφοριών προτίμησης μέσω συγκρίσεων των εναλλακτικών είτε των κριτηρίων κατά ζεύγη, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για έλεγχο της ευστάθειας. Την ανάγκη αυτή γεννά η ανακρίβεια που προκύπτει από τις δηλώσεις προτίμησης του αποφασίζοντα. Σε πολλές περιπτώσεις, το μοντέλο αξιολόγησης του αποφασίζοντα μπορεί να μην είναι μια μοναδική συνάρτηση αξίας αλλά ένα σύνολο συναρτήσεων, οι οποίες να είναι όλες συμβατές με τις δηλώσεις προτίμησης του αποφασίζοντα. Ένα άπειρο σύνολο συναρτήσεων, το οποίο θα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω από τον αναλυτή και στην περίπτωση που η ακρίβεια είναι πολύ χαμηλή, να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα[35].

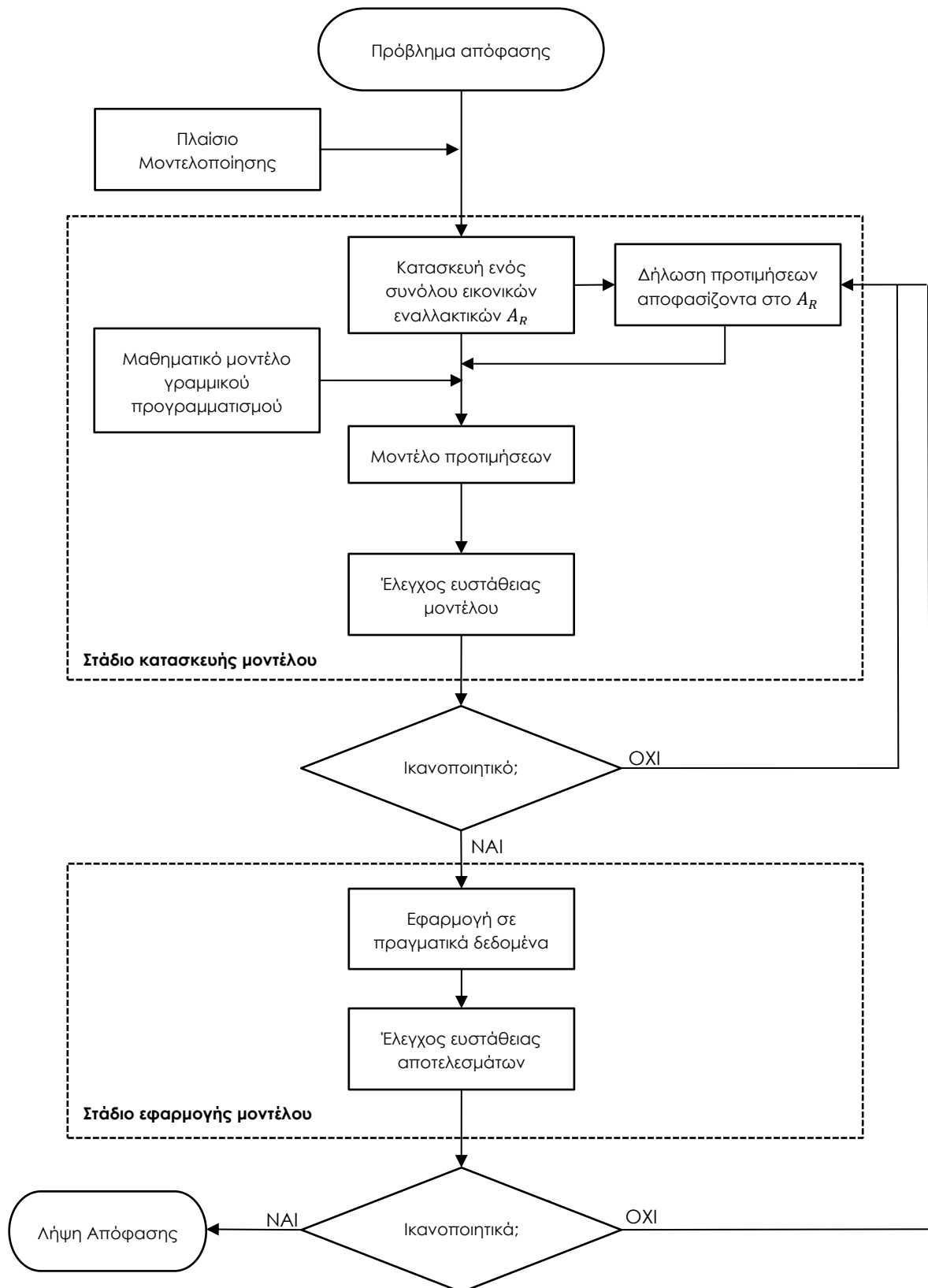
4.3.1 Έλεγχος Ευστάθειας

Οι Greco, Slowinski, Figueira, Mousseau[36], πρότειναν ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο, με την ονομασία "Robust Ordinal Regression"(ROR), το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί συνεργατικά με τις μεθόδους εξαγωγής προτιμήσεων με σκοπό να εξετάσει την ευστάθεια των αποτελεσμάτων. Το πλαίσιο αυτό βασίζεται στην αρχή ότι οι αποφάσεις εξάγονται λαμβάνοντας υπόψη και εφαρμόζοντας όλα τα μοντέλα προτίμησης που είναι συμβατά με τις πληροφορίες προτίμησης του αποφασίζοντα. Οι αποφάσεις αυτές αφορούν τις αναγκαίες και πιθανές συνέπειες για οποιεσδήποτε δυο εναλλακτικές $a_1, a_2 \in A$:

- Η αναγκαία σχέση προτίμησης ισχύει όταν το a_1 είναι τουλάχιστον όσο καλό όσο το a_2 για όλα τα συμβατά μοντέλα προτίμησης ή αλλιώς $u(a_1) \geq u(a_2)$ για όλες τις συμβατές συναρτήσεις αξίας.
- Η πιθανή σχέση προτίμησης ισχύει όταν το a_1 είναι τουλάχιστον όσο καλό όσο το a_2 , για τουλάχιστον ένα συμβατό μοντέλο προτίμησης, ή αλλιώς $u(a_1) \geq u(a_2)$ για τουλάχιστον μια συμβατή συνάρτηση αξίας.

Παρομοίως, η υποστήριξη αποφάσεων, όταν χρησιμοποιείται συνεργατικά με ένα πλαίσιο ανάλυσης ευστάθειας, απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ αναλυτή και αποφασίζοντα με έναν διαδραστικό τρόπο. Ως μέρος αυτής της αλληλεπίδρασης, ο αναλυτής προσπαθεί να αναπτύξει το μοντέλο απόφασης ρωτώντας ακριβείς ερωτήσεις τον αποφασίζοντα, με επαναλαμβανόμενο τρόπο, μέχρι να επιτευχθεί ένα επιθυμητό επίπεδο ευστάθειας.

Οι Siskos E., Kourousias, Siskos Y. [37], βασιζόμενοι στο επιχείρημα τους ότι ένα ευσταθές μοντέλο δεν μπορεί να εγγυηθεί ευσταθή αποτελέσματα, πρότειναν έναν αλγόριθμο ελέγχου ευστάθειας για την μέτρηση, την αξιολόγηση και τη βελτίωση της ευστάθειας τόσο του ανεπτυγμένου μοντέλου, όσο και των αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος αυτός επικεντρώνεται ξεχωριστά στις δυο διαφορετικές πτυχές της διαδικασίας υποστήριξης της απόφασης, προσφέροντας διάφορους δείκτες για την μέτρηση και την αξιολόγηση της ευστάθειας.



Εικόνα 8 – Αλγόριθμος ελέγχου ευστάθειας[37]

Η διαδικασία ελέγχου ευστάθειας ξεκινάει με την εξαγωγή του μοντέλου προτίμησης (μοντέλο προσθετικής αξίας ή συναρτήσεις προτίμησης PROMETHEE), το οποίο προκύπτει από τη δήλωση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα (κατάταξη εικονικών εναλλακτικών ή κατάταξη κριτηρίων αξιολόγησης). Στη συνέχεια, αξιολογείται η ευστάθεια του μοντέλου, με τη δυνατότητα διακοπής της διαδικασίας, αν τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Σε αυτή την περίπτωση, εισάγονται στον αλγόριθμο επιπλέον πληροφορίες προτίμησης από τον αποφασίζοντα. Εναλλακτικά, η διαδικασία περνάει στο επόμενο στάδιο, όπου το μοντέλο προτίμησης εφαρμόζεται, υπολογίζονται οι αξίες των εναλλακτικών και αξιολογείται η ευστάθεια των αποτελεσμάτων. Αν οι δείκτες ευστάθειας επαληθεύουν την επάρκεια των αποτελεσμάτων να υποστηρίξουν τη λήψη της απόφασης, ο αλγόριθμος τερματίζεται, αλλιώς η διαδικασία επιστρέφει στο στάδιο εξαγωγής πληροφοριών προτίμησης (Εικόνα 8).

4.3.2 Δείκτες Ευστάθειας

Οι δείκτες που σχετίζονται με τον έλεγχο ευστάθειας του μοντέλου απόφασης, επικεντρώνονται στην αποτελεσματικότητα του μοντέλου να παράγει ευσταθή και σαφή αποτελέσματα. Σκοπός αυτών των δεικτών είναι η κατασκευή ενός μοντέλου απόφασης που αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Επιπλέον, οι δείκτες αυτοί πρέπει να έχουν και πρακτική σημασία, χωρίς να επιβαρύνουν τον αναλυτή με μεγάλο φόρτος υπολογισμών όπου είναι βέβαιο ότι θα οδηγήσει σε αποτελέσματα χαμηλής ποιότητας. Η υπολογιστική διαδικασία μειώνεται, πετυχαίνοντας τους στόχους του αποφασίζοντα ξοδεύοντας λιγότερους πόρους.

Οι δείκτες ευστάθειας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες με βάση το στάδιο της διαδικασίας κατά το οποίο εφαρμόζονται[38]. Παρουσιάζονται δυο δείκτες οι οποίοι υπολογίζονται κατά το πρώτο στάδιο κατασκευής του μοντέλου απόφασης και τρεις δείκτες οι οποίοι υπολογίζονται στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας, αφού το μοντέλο έχει καθοριστεί ως ευσταθές και έχει εφαρμοστεί στα δεδομένα.

Η χρήση των δυο δεικτών της πρώτης κατηγορίας προϋποθέτει την εξαγωγή πολλαπλών συνόλων παραμέτρων προτίμησης. Ένας συνήθης τρόπος, όταν εφαρμόζονται τεχνικές τύπου UTA, είναι η εφαρμογή της τεχνικής γραμμικού προγραμματισμού max-min (βλ. βήμα 4 στο κεφ. 4.2.2). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, όλοι οι παράμετροι ή ένα υποσύνολό τους ελαχιστοποιούνται και μεγιστοποιούνται διαδοχικά, κάτω από ένα σύνολο περιορισμών και στη συνέχεια οπτικοποιούνται[37].

Δείκτης ARP (Average range of the preferential parameters)

Ο δείκτης ARP[38], όπως φανερώνει και το όνομά του, εκφράζει το εύρος που καλύπτει η μέση παράμετρος προτίμησης, λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες προτίμησης που εξήχθησαν από τον αποφασίζοντα. Ο υπολογισμός του ARP, απαιτεί πρώτα την εφαρμογή της τεχνικής min-max και ορίζεται ως εξής:

$$ARP = \frac{1}{S} \sum_i \sum_j [\max(u_i(g_i^j)) - \min(u_i(g_i^j))], \forall j = 1, \dots, a_{i-1}, i = 1, \dots, n \quad (22)$$

Όπου S είναι το σύνολο όλων των παραμέτρων $u_i(g_i^j)$ που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία min-max.

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές στην κλίμακα [0,1] και χαμηλότερες τιμές του δείχνουν αύξηση της ευστάθειας του μοντέλου. Ο ARP λαμβάνει την τιμή 0 όταν ένα μοναδικό μοντέλο προτίμησης αντικατοπτρίζει τις δηλώσεις προτίμησης του αποφασίζοντα.

Δείκτης ASI (Average Stability Index)

Ο δείκτης ASI είναι ένας δείκτης ευστάθειας που προτάθηκε από τους Σίσκο και Γρηγορούδη (2010) και εκφράζει τη μέση τιμή της κανονικοποιημένης τυπικής απόκλισης των παραμέτρων προτίμησης. Ο δείκτης ASI εκφράζεται ως εξής:

$$ASI = 1 - \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sqrt{\frac{R \sum_{r=1}^R p_{rs}^2 - (\sum_{r=1}^R p_{rs})^2}{R \sum_{r=1}^R p'_{rs}{}^2 - (\sum_{r=1}^R p'_{rs})^2}} \quad (23)$$

Όπου p'_{rs} είναι η πιθανή τιμή της r -εκτέλεσης της s -παραμέτρου προτίμησης που μεγιστοποιεί τη διακύμανση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου κατά της διαδικασία min-max. Ο δείκτης ASI κυμαίνεται στην κλίμακα $[0,1]$ και δίνει την τιμή 1 όταν επιτυγχάνεται τέλεια ευστάθεια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δείκτες που αξιολογούν την ευστάθεια των αποτελεσμάτων, καθώς ένα ευσταθές μοντέλο δεν εγγυάται πάντα ευσταθή αποτελέσματα. Παρομοίως, οι δείκτες αυτοί προϋποθέτουν την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών.

Δείκτες ARRI (Average range of the ranking & RARR (Ratio of the average range of the ranking))

Οι δείκτες ARRI και RARR συνδυάζονται με την εφαρμογή της τεχνικής Extreme Ranking Analysis (Kadziński). Υπολογίζοντας τον δείκτη ARRI, απεικονίζεται ο πιθανός αριθμός θέσεων που μπορεί να λάβει μια μέση εναλλακτική σε όλη την κατάταξη, ενώ ο δείκτης RARR αντικατοπτρίζει τον λόγο της εν λόγω απόκλισης σε σχέση με το σύνολο των υπό εξέταση εναλλακτικών. Οι βέλτιστες τιμές των δεικτών ARRI και RARR είναι 1 και 0% αντίστοιχα και υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$ARRI = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (|R_*(k) - R^*(k)| + 1) \quad (24)$$

$$RARR = \frac{ARRI - 1}{m - 1} \cdot 100\% \quad (25)$$

Όπου $R_*(k)$ και $R^*(k)$ είναι η χειρότερη και καλύτερη αντίστοιχα θέση στην κατάταξη, που μπορεί να λάβει η k εναλλακτική και m είναι ο αριθμός όλων των εναλλακτικών υπό εξέταση.

Δείκτης SPRI (Statistical Preference relations index)

Ο δείκτης SPRI προσφέρει έναν ολοκληρωμένο τρόπο να εξεταστεί η ευστάθεια των θέσεων κατάταξης που επιτυγχάνεται από το σύνολο των εναλλακτικών. Εφαρμόζεται σε συνεργασία με τεχνικές τυχαίες δειγματοληψίας, τον αλγόριθμο Manas-Nedoma (Manas and Nedoma) που εξάγει όλες τις κορυφές του πολυέδρου του μοντέλου, και γενικά μεθόδους που προσφέρουν στατιστικά επαρκή αριθμό συνόλων παραμέτρων προτίμησης εντός της αποδεκτής περιοχής. Ο SPRI υπολογίζει τις ξεχωριστές πιθανότητες κάθε εναλλακτική να λάβει μια συγκεκριμένη θέση στην τελική κατάταξη και σχηματίζει ένα μέτρο το οποίο δίνει ουσιαστική εικόνα για την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων.

Ο υπολογισμός της πιθανότητας μια εναλλακτική a_k να καταταχθεί στην θέση t υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_t^k = \frac{c_t^k}{R} \cdot 100\% \quad (26)$$

Όπου c_t^k είναι ο αριθμός των εκτελέσεων που τοποθετούν μια εναλλακτική a_k στην θέση $t, t = 1, 2, \dots, m$ και R είναι ο αριθμός όλων των εκτελέσεων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο δείκτης SPRI χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$SPRI = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^m P_t^k \quad (27)$$

Όταν ο SPRI φτάνει την βέλτιστη τιμή του 100%, κάθε εναλλακτική καταλαμβάνει μια θέση στην κατάταξη με πιθανότητα 100%. Με άλλα λόγια, προκύπτει η ίδια κατάταξη λαμβάνοντας υπόψη όλες τις εκτελέσεις παραμέτρων προτίμησης.

5. Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Το πλαίσιο αξιολόγησης που περιεγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, λόγω της πληθώρας και της ετερογένειας των κριτηρίων, προσδιορίζεται με μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης. Συγκεκριμένα, με τη χρήση του αλγορίθμου UTASTAR, εξάγονται προσθετικές συναρτήσεις χρησιμότητας από μια κατάταξη αρχικά σε ένα σύνολο εικονικών εναλλακτικών A_R , σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου ευστάθειας που περιεγράφηκε στην ενότητα 4.3. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού για να εξαγάγει αυτές τις συναρτήσεις, έτσι ώστε η κατάταξη που θα προκύψει να είναι όσο το δυνατόν πιο συνεπής με την κατάταξη των προτιμήσεων του αποφασίζοντα. Στη συνέχεια, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τα βάρη των κριτηρίων p_i , ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 10).

5.1 Κατασκευή ενός συνόλου εικονικών εναλλακτικών

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Siskos E., Kourousias, Siskos Y. [37], κατασκευάζεται ένα σύνολο από m εικονικές χώρες, των οποίων οι τιμές στα κριτήρια ορίζονται έτσι ώστε να μην έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους και να έχουν μερικές ακραίες τιμές. Επίσης οι τιμές των κριτηρίων είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών χωρών και καλύπτουν όλο το εύρος των κλιμάκων απόφασης. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να είναι εύκολο στον αποφασίζοντα να εκφράσει τις προτιμήσεις του στο σύνολο των εικονικών χωρών, με στόχο την κατασκευή ενός μοντέλου προτίμησης για να εφαρμοστεί στην κατάταξη των πραγματικών.

Στη συνέχεια, λαμβάνεται από τον αποφασίζοντα μια κατάταξη των εικονικών χωρών $A_R = (\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_m)$, όπου οι χώρες κατατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε η α_1 να είναι η προτιμότερη και η α_k να είναι η λιγότερο προτιμητέα εικονική χώρα. Για κάθε ζεύγος διαδοχικών εναλλακτικών (α_k, α_{k+1}) ισχύει είτε $\alpha_k \mathbf{II} \alpha_{k+1}$ (προτίμηση), είτε $\alpha_k \mathbf{A} \alpha_{k+1}$ (αδιαφορία προτίμησης). Με τη χρήση του αλγορίθμου UTASTAR επιλύεται το γραμμικό πρόβλημα (19), όπου δ είναι ένας μικρός θετικός αριθμός διακρίνοντας δυο διαδοχικές τάξεις προτίμησης, $\mathbf{g}_i(\alpha_k)$ είναι η βαθμολογία της χώρας k στο κριτήριο i και $u_i[\mathbf{g}_i(\alpha_k)]$ είναι η αντίστοιχη μερική χρησιμότητα.

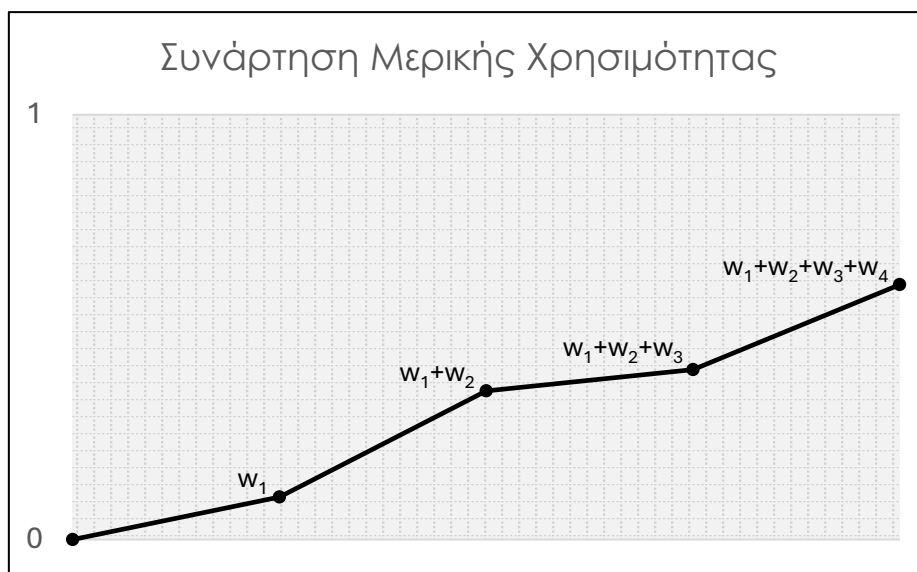
5.2 Επίλυση

Αν μετά την επίλυση του παραπάνω γραμμικού προβλήματος προκύψουν σφάλματα και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι μηδέν, αυτό σημαίνει ότι η κατάταξη των εικονικών χωρών δεν είναι συνεπής με το προσθετικό μοντέλο και έχει εσωτερικές συγκρούσεις. Σε αυτή την περίπτωση, το σύνολο εικονικών χωρών επαναταξινομείται από τον αποφασίζοντα, και το γραμμικό πρόβλημα λύνεται εκ νέου. Όταν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης φτάσει την τιμή μηδέν, υπολογίζονται τα βάρη των κριτηρίων.

Λόγω της ύπαρξης πολλαπλών λύσεων, χρησιμοποιείται τεχνική μετά-βελτιστοποίησης του γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό να καθοριστεί ένα σύστημα αποδεκτών βαρών. Αφού το γραμμικό πρόβλημα έχει μηδενική λύση, σημαίνει ότι υπάρχει τουλάχιστον μια συνάρτηση προσθετικής αξίας πλήρως συνεπής με την κατάταξη των εικονικών χωρών από τον αποφασίζοντα. Επιλύεται στη συνέχεια το αρχικό γραμμικό πρόβλημα, με σκοπό τον υπολογισμό ακραίων λύσεων και αφαιρώντας από αυτό τα σφάλματα, που πλέον έχουν μηδενιστεί, αντικαθιστώντας την αντικειμενική συνάρτηση με την ακόλουθη:

$$[max] \text{ ή } [min] \sum_{t=1}^{j-1} w_{it} \text{ για } i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 2, 3, 4, \dots, a_i - 1 \quad (28)$$

Από τον υπολογισμό μέγιστων και ελάχιστων τιμών, η μέση τιμή τους θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική και λαμβάνεται ως το τελικό αποτέλεσμα για τις τιμές των βαρών των κριτηρίων (Εικόνα 9).



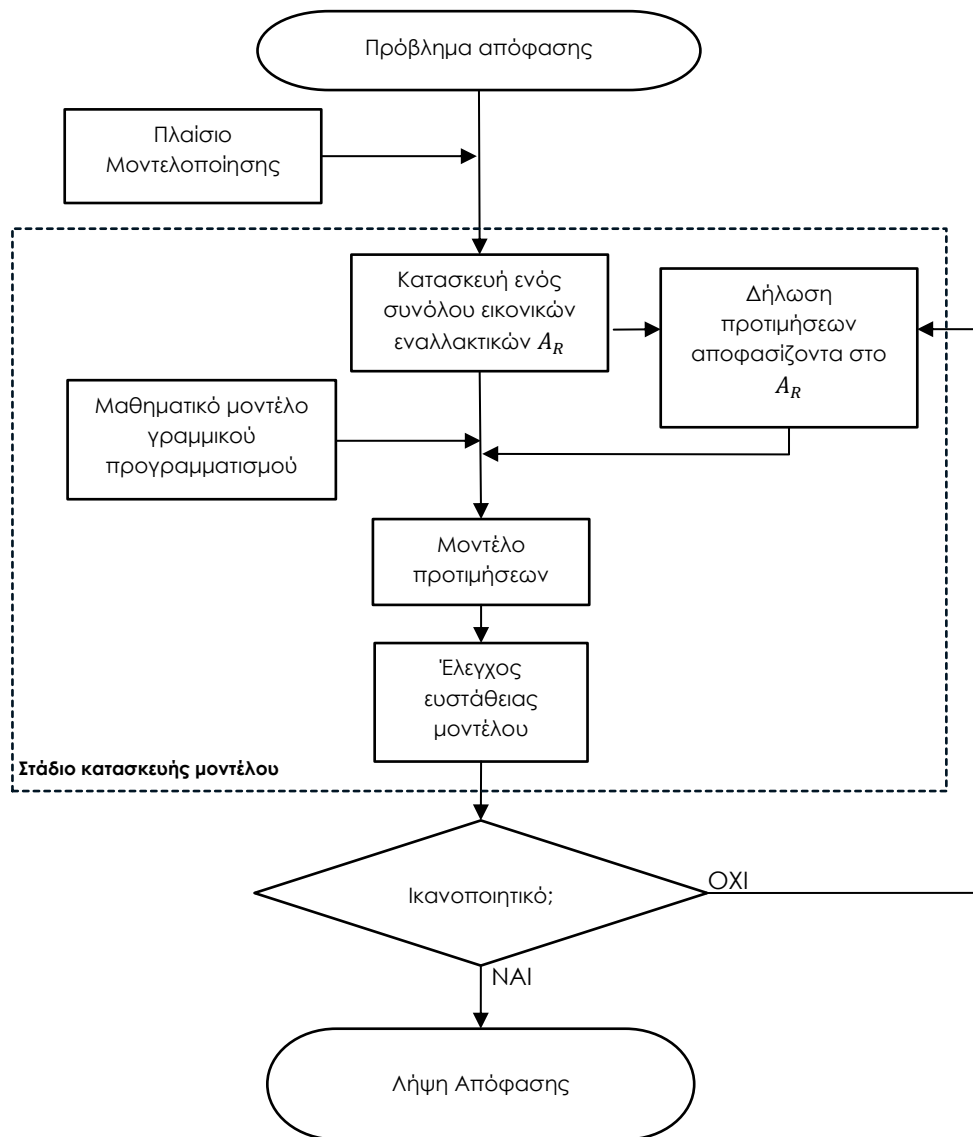
Εικόνα 9

5.3 Έλεγχος Ευστάθειας Μοντέλου

Στη συνέχεια αξιολογείται η ευστάθεια του μοντέλου που υπολογίστηκε, με βάση τον αλγόριθμο ελέγχου ευστάθειας. Στην παρούσα εργασία, για την αξιολόγηση της ευστάθειας του μοντέλου επιλέγεται ο υπολογισμός του δείκτη ARP. Τιμές του δείκτη που ξεπερνούν το 30-40% δείχνουν μεγάλη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων και συνεπώς αστάθεια του μοντέλου. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία δεν περνάει στο στάδιο εφαρμογής, αλλά βασισόμενη στον αλγόριθμο ελέγχου ευστάθειας, περνάει σε επόμενη φάση λήψης πληροφοριών προτίμησης από τον αποφασίζοντα. Κατά τη φάση αυτή, το αρχικό σύνολο εικονικών χώρων δεν αλλάζει, αλλά προστίθενται σε αυτό επιπλέον εναλλακτικές, τις οποίες ταξινομεί ο αποφασίζοντας, αυξάνοντας την ακρίβεια του μοντέλου. Σε κάθε επιπλέον φάση αναμένεται μείωση του δείκτη ARP και συνεπώς αύξηση της ευστάθειας. Όταν ο δείκτης φτάσει σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος περνάει στο στάδιο εφαρμογής του μοντέλου στα πραγματικά δεδομένα.

5.4 Εφαρμογή Μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας είναι η εφαρμογή του μοντέλου που κατασκευάστηκε στο σύνολο των πραγματικών χώρων ώστε να γίνει η αξιολόγηση. Έτσι, κάθε χώρα λαμβάνει μια βαθμολογία (ολική χρησιμότητα), που οδηγεί στην κατασκευή της τελικής κατάταξης.



Εικόνα 10

6. Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Αποτελέσματα

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία στα δεδομένα που συλλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν στα παραπάνω κεφάλαια. Η διαδικασία ξεκινάει κατασκευάζοντας τις εικονικές χώρες, όπως προβλέπεται από τη μέθοδο UTASTAR, και κατατάσσοντάς τις από τον αποφασίζοντα με βάση την προσωπική του οπτική για την ετοιμότητα για ενεργειακή μετάβαση. Για το σκοπό της παρούσας έρευνας, η κατάταξη των εικονικών χωρών γίνεται από τον επιβλέπων καθηγητή αυτής της εργασίας. Οι επιδόσεις των εικονικών χωρών στα κριτήρια είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών και ορίζονται αναλόγως.

6.1 Κατασκευή και κατάταξη εικονικών χωρών – Φάση 1η

Αρχικά κατασκευάζονται και ταξινομούνται 15 εικονικές χώρες ως ένα σύνολο αναφοράς σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία. Ορίζονται στρογγυλοποιημένες τιμές στα κριτήρια, αντιπροσωπευτικές των πραγματικών χωρών καθώς και μερικές ακραίες τιμές. Οι κλίμακες των κριτηρίων προσαρμόστηκαν για μεγαλύτερη ακρίβεια και για να μην υπάρχουν μεγάλες περιοχές της κλίμακας όπου κανένα κριτήριο δεν λαμβάνει κάποια τιμή. Οι χώρες αναφοράς με τα κριτήριά τους, μετά από την κατάταξή τους από τον αποφασίζον φαίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 – Κατάταξη των 15 εικονικών χωρών

Κατάταξη	Χώρες	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
1	C15	60	50	70	9	45	50	80	0	2
2	C9	55	60	70	9	55	50	50	0	4
3	C1	50	70	60	8	55	65	50	0	4
4	C5	55	60	70	9	45	50	50	2	2
5	C3	60	50	60	9	45	25	80	10	4
6	C2	50	50	80	7	35	50	80	0	6
7	C7	50	70	60	9	55	25	50	0	4
8	C12	50	50	80	9	45	50	50	7	6
9	C10	60	70	70	7	35	15	80	0	2
10	C8	55	50	60	9	55	25	25	2	4
11	C6	60	70	70	7	35	15	50	0	2
12	C11	50	70	80	8	35	50	50	7	6
13	C14	60	50	60	7	45	25	25	0	4
14	C13	60	70	60	8	35	15	25	2	2
15	C4	60	60	70	8	45	15	25	7	5

6.2 Εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος UTASTAR στα δεδομένα του Πίνακα 6, πρέπει να οριστούν οι τιμές των παραμέτρων α_i , $i = 1, 2, \dots, 9$, τα σημεία οριοθέτησης δηλαδή των τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων μερικής χρησιμότητας, καθώς και η τιμή δ , που εκφράζει το ελάχιστο επίπεδο προτίμησης μεταξύ δυο διαδοχικών τάξεων της κατάταξης. Αυτές οι παράμετροι ορίζονται ως εξής: $\alpha_i = 5$, για κάθε $i = 1, 2, \dots, 9$ και $\delta = 0.01$.

Συνεπώς, ο αριθμός των μεταβλητών w_{ij} του μοντέλου προσθετικής αξίας που αναπτύσσεται είναι $9 \times (5-1) = 36$.

Για την επίλυση των γραμμικών προγραμμάτων, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται με τη βοήθεια του λογισμικού LPSOLVE IDE. Πρώτα, ορίζεται ως αντικειμενική συνάρτηση το άθροισμα όλων των σφαλμάτων που βρίσκονται στις ανισότητες σύμφωνα με το (19). Ελαχιστοποιώντας αυτή τη συνάρτηση βεβαιωνόμαστε για την απουσία λογικών σφαλμάτων στην κατάταξη των χωρών αναφοράς. Αν η λύση του γραμμικού προβλήματος δεν έχει μηδενικό αποτέλεσμα, σημαίνει πως οι χώρες έχουν ταξινομηθεί με "μη λογικό" τρόπο και πως δεν υπάρχει μοντέλο προσθετικής αξίας που να μπορεί να υποστηρίξει αυτή την κατάταξη. Συνεπώς επανερχόμαστε στο προηγούμενο βήμα και επανεξετάζουμε τις χώρες αναφοράς μέχρι να μηδενιστούν τα σφάλματα.

Αφού όλα τα σφάλματα μηδενιστούν, προχωράμε στο επόμενο στάδιο προσδιορισμού των τιμών των παραμέτρων w_{ij} . Για να γίνει αυτό, οι παράμετροι w_{ij} μεγιστοποιούνται και ελαχιστοποιούνται στο παραπάνω μαθηματικό μοντέλο, χωρίς σφάλματα (διαδικασία min-max) υπολογίζοντας στη συνέχεια τις μέσες τιμές τους.

Για παράδειγμα, για να υπολογιστεί το εύρος των παραμέτρων που σχετίζονται με το πρώτο κριτήριο, μεγιστοποιούνται και ελαχιστοποιούνται οι ακόλουθες αντικειμενικές συναρτήσεις:

$$z_{11} = w_{11}$$

$$z_{12} = w_{11} + w_{12}$$

$$z_{13} = w_{11} + w_{12} + w_{13}$$

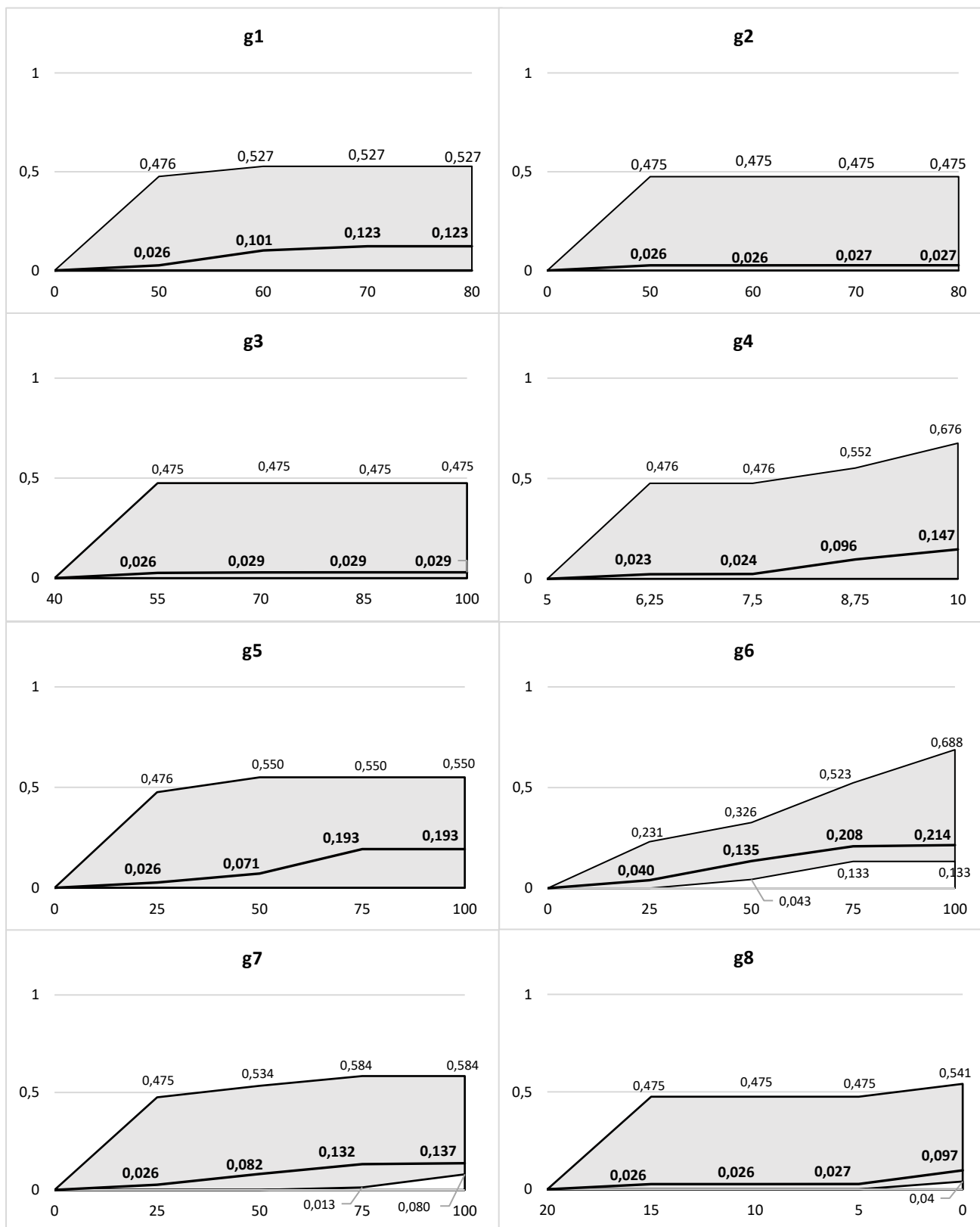
$$z_{14} = w_{11} + w_{12} + w_{13} + w_{14} = W_1$$

Όπου το W_1 αντιστοιχεί στο βάρος του πρώτου κριτηρίου. Μεγιστοποιώντας και ελαχιστοποιώντας αυτές τις συναρτήσεις για κάθε κριτήριο αντίστοιχα υπολογίζεται το εύρος απόκλισης των παραμέτρων w_{ij} , αλλά και τα τελικά βάρη λαμβάνοντας την μέση τιμή κάθε παραμέτρου w_{ij} .

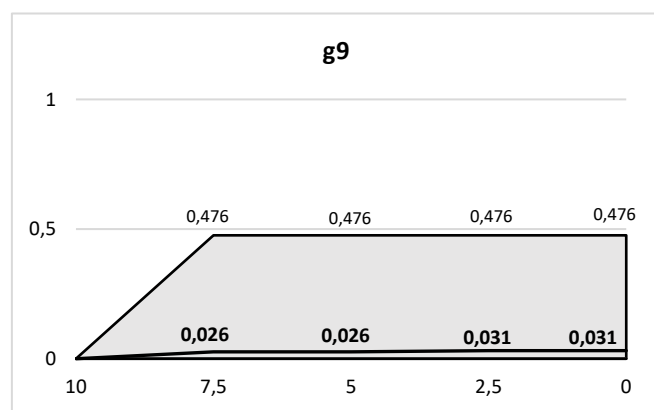
Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιούνται συνολικά 72 εκτελέσεις του γραμμικού προγράμματος (36 αντικειμ. συναρτήσεις max και min). Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μετά τον τελικό υπολογισμό των παραμέτρων w_{ij} , αλλά και των μερικών χρησιμότητων $u_i[g_i]$, συνοψίζονται στις Εικόνες 11-12.

6.3 Έλεγχος Ευστάθειας

Η 1^η φάση εφαρμογής της μεθόδου UTASTAR έδωσε αποτελέσματα χαμηλής ποιότητας σχετικά με την ευστάθειά τους. Δεν μπορεί να ληφθεί απόφαση προς την κατάταξη των πραγματικών χωρών σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης ARP λαμβάνει την τιμή 0.487, δηλαδή οι τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι προτίμησης καλύπτουν το 48,7% του συνολικού τους εύρους. Επιπρόσθετα, οι μέσες τιμές όλων των μεταβλητών τείνουν προς την ελάχιστή τους τιμή, γεγονός που δεν βοηθάει στην κατάλληλη διαφοροποίηση μεταξύ της σημαντικότητας των κριτηρίων. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο δεν προσφέρει επαρκή ευστάθεια σε αυτή τη φάση και συνεπώς επανερχόμαστε στο στάδιο κατασκευής του μοντέλου για να προσθέσουμε πληροφορίες προτίμησης.



Εικόνα 11



Εικόνα 12

6.4 Φάση 2^η – 19 Εικονικές Χώρες

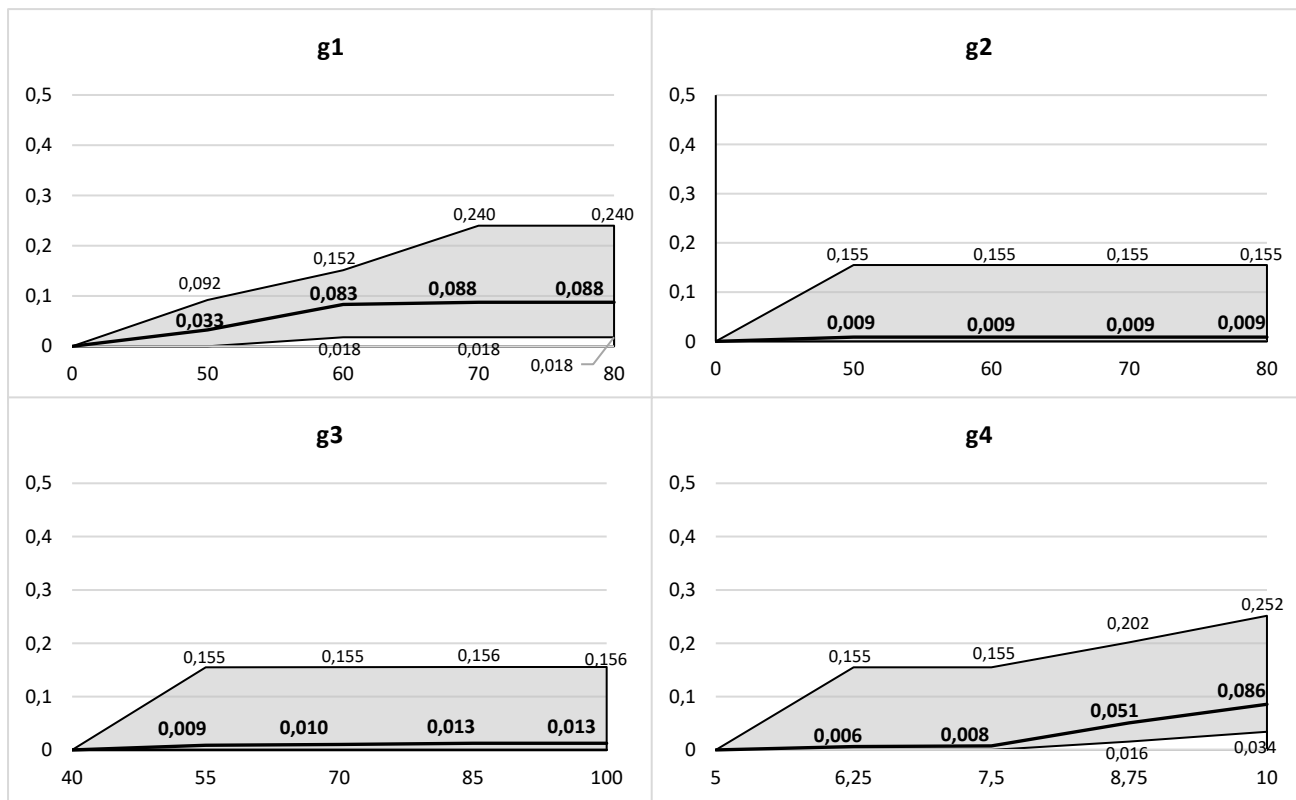
Βασιζόμενοι στην μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην 1^η φάση, κατασκευάζονται 4 ακόμα χώρες αναφοράς (C16 -C19), σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές που περιεγράφηκαν στην ενότητα 5.1. Στη συνέχεια, οι χώρες αυτές εισάγονται στην κατάταξη της 1^{ης} φάσης (Πίνακας 7). Τονίζεται πως οι θέσεις στην κατάταξη των 15 χωρών της 1^{ης} φάσης δεν μπορούν να αλλάξουν, καθώς αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη λογική ασυνέπεια του μοντέλου.

Πίνακας 7

Κατάταξη	Χώρες	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
1	C15	60	50	70	9	45	50	80	0	2
2	C9	55	60	70	9	55	50	50	0	4
3	C17	50	70	70	7	55	65	50	0	2
4	C1	50	70	60	8	55	65	50	0	4
5	C18	45	70	80	8	55	50	80	2	6
6	C5	55	60	70	9	45	50	50	2	2
7	C3	60	50	60	9	45	25	80	10	4
8	C2	50	50	80	7	35	50	80	0	6
9	C7	50	70	60	9	55	25	50	0	4
10	C16	50	50	80	8	45	25	80	2	4
11	C12	50	50	80	9	45	50	50	7	6
12	C10	60	70	70	7	35	15	80	0	2
13	C8	55	50	60	9	55	25	25	2	4
14	C6	60	70	70	7	35	15	50	0	2
15	C11	50	70	80	8	35	50	50	7	6
16	C14	60	50	60	7	45	25	25	0	4
17	C13	60	70	60	8	35	15	25	2	2
18	C4	60	60	70	8	45	15	25	7	5
19	C19	50	50	60	7	35	50	25	10	6

6.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR

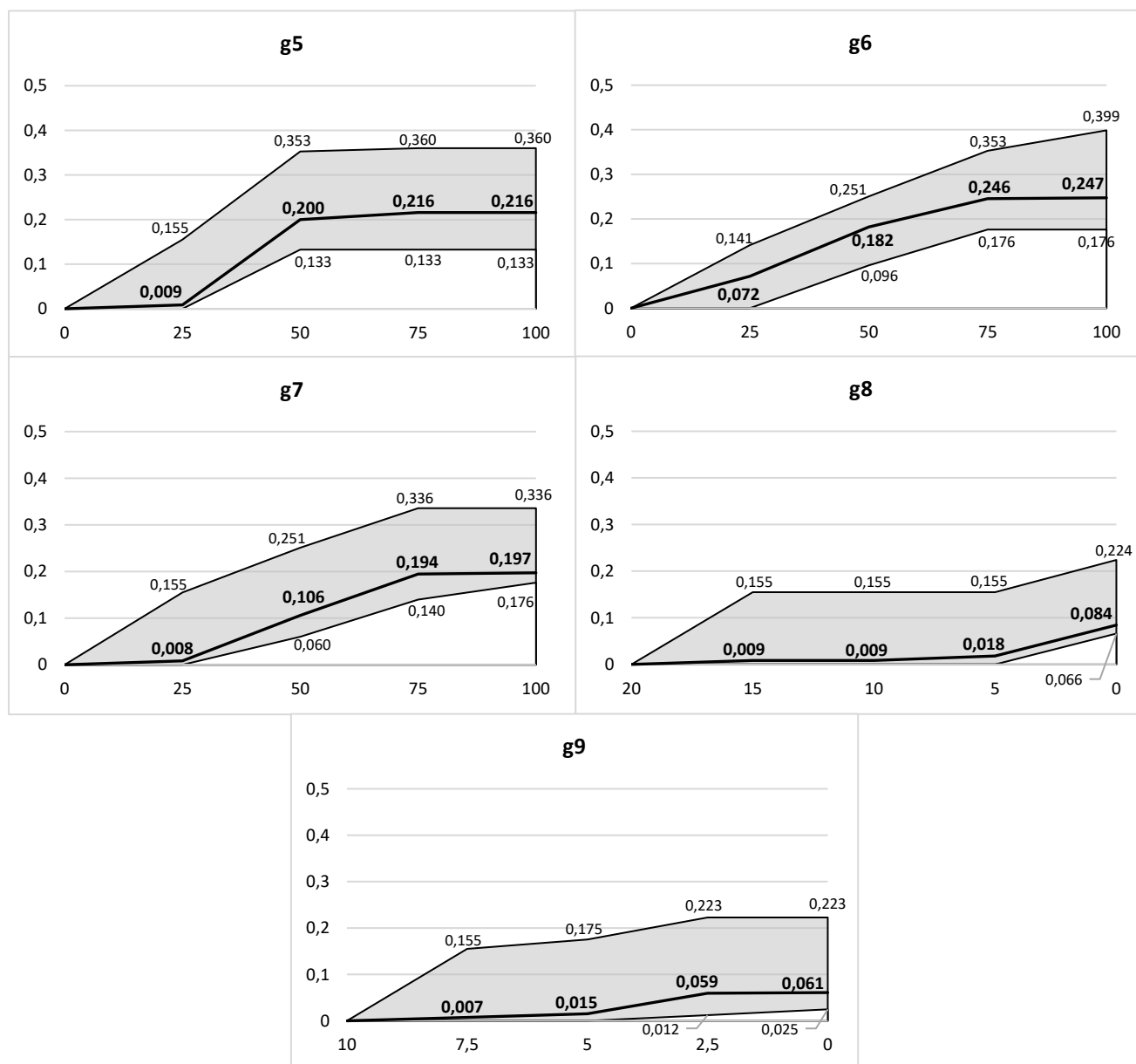
Με την προσθήκη των νέων δεδομένων, εξαγονται 18 νέες ανισότητες οι οποίες σχηματίζουν το γραμμικό πρόγραμμα της UTASTAR. Εφαρμόζονται οι ίδιοι περιορισμοί με την 1^η φάση και μηδενίζονται τα σφάλματα αντίστοιχα με τη βοήθεια του λογισμικού LPSOLVE IDE. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται οι 72 εκτελέσεις του γραμμικού προγράμματος σύμφωνα με τη διαδικασία min-max, ώστε να υπολογιστεί το εύρος των παραμέτρων προτίμησης w_{ij} , καθώς και τα βάρη των κριτηρίων W_i . Ομοίως με την 1^η φάση τα αποτελέσματα της 2^{ης} φάσης συνοψίζονται στις Εικόνες 13-14.



Εικόνα 13

6.4.2 2^η Φάση - Έλεγχος Ευστάθειας

Είναι φανερό τώρα από τα γραφήματα των συναρτήσεων αξίας, πως το εύρος τιμών των παραμέτρων προτίμησης έχει μειωθεί συγκριτικά με την 1^η φάση. Η βελτίωση των αποτελεσμάτων φαίνεται και στον δείκτη ARP, ο οποίος τώρα λαμβάνει την τιμή 0.173, δηλαδή μειώθηκε περίπου κατά 64.5%. Σε αυτό το σημείο, η ευστάθεια του μοντέλου θεωρείται ικανοποιητική, με τις τιμές των παραμέτρων να καταλαμβάνουν το 17.3% του συνολικού τους εύρους. Στο γράφημα της Εικόνας 16 φαίνονται τα βάρη όλων των κριτηρίων, καθώς και τα άνω και κάτω όριά τους. Στον Πίνακα 8 συνοψίζονται οι τιμές των βαρών κάθε κριτηρίου. Επομένως, οδηγούμαστε στο στάδιο εφαρμογής του μοντέλου στις πραγματικές χώρες.



Εικόνα 14

6.5 Εφαρμογή σε Πραγματικά Δεδομένα

Έχοντας σχηματίσει το αντιπροσωπευτικό μοντέλο, ως το μέσο προφίλ των βαρών της διαδικασίας *mini-max*, είμαστε σε θέση να το εφαρμόσουμε στα πραγματικά δεδομένα, υπολογίζοντας έτσι ένα σύνολο ολικών αξιών $u(g)$ για τις πραγματικές χώρες, φτάνοντας σε μια τελική κατάταξη (Πίνακας 9). Επίσης, η ετοιμότητα των ευρωπαϊκών χωρών για την ενεργειακή μετάβαση, απεικονίζεται στον χάρτη της Εικόνας 15. Οι χώρες ταξινομούνται σε κατηγορίες ετοιμότητας για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Τονίζεται πως για την ταξινόμηση αυτή δεν ακολουθήθηκε κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά οι χώρες κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με την ολική τους αξία.

7. Συμπεράσματα και προοπτικές για το μέλλον

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται ταυτόχρονα στην μελέτη δυο διαφορετικών ερευνητικών πεδίων. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κριτηρίων στο πεδίο της πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων, αλλά και στην ανάλυση της ετοιμότητας των Ευρωπαϊκών κρατών για στην ενεργειακή μετάβαση. Το μοντέλο που προκύπτει προσφέρει μια κατάταξη 26 χωρών, αξιοποιώντας κοινωνικούς, πολιτικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς δείκτες οι οποίοι θεωρούνται κύριοι παράγοντες της ενεργειακής μετάβασης.

Έχοντας λάβει υπόψιν όλα τα παραπάνω, η Σουηδία φαίνεται να έχει τις πιο ιδανικές συνθήκες για να μετατρέψει τα ενεργειακά της συστήματα, ακολουθούμενη πολύ κοντά από την Ελβετία, τη Δανία και τη Νορβηγία. Η ανάλυση φανερώνει πως οι χώρες της νότιας αλλά και της ανατολικής Ευρώπης είχαν χαμηλότερες επιδόσεις, καθώς βρίσκονται στις κατηγορίες της μέτριας-χαμηλής ετοιμότητας.

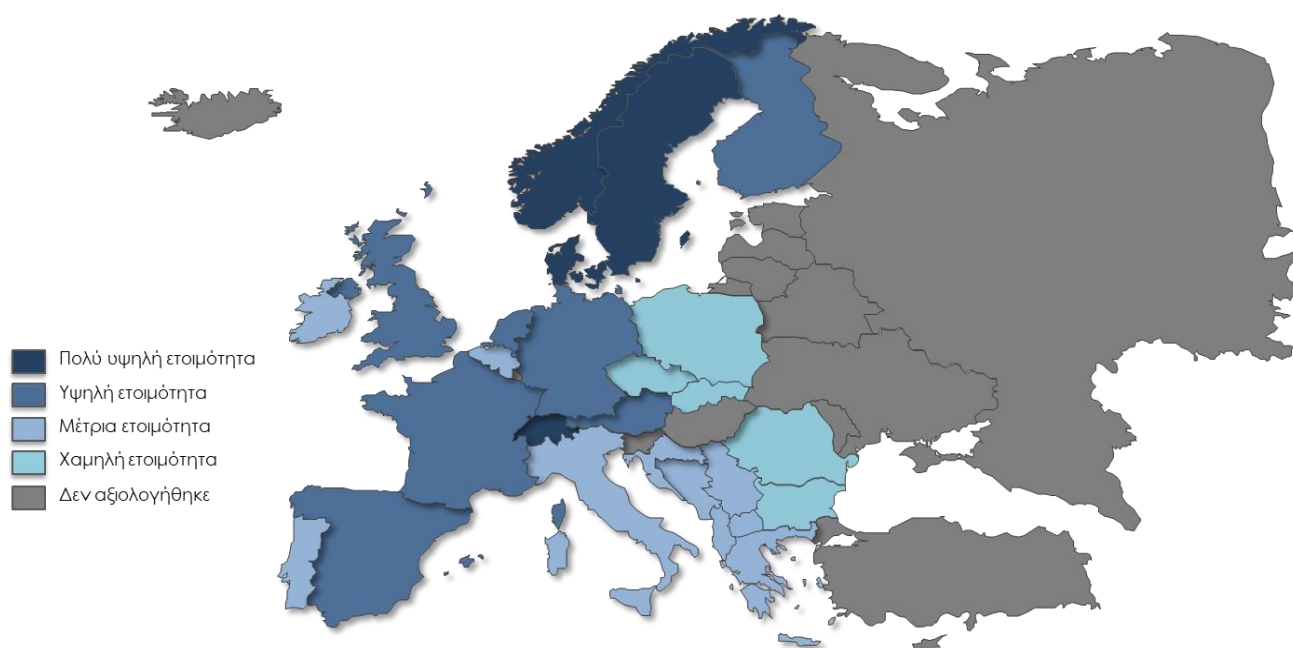
Πίνακας 9 – Κατάταξη των Ευρωπαϊκών χωρών βασισμένη στο μοντέλο που κατασκευάστηκε από τις 19 χώρες αναφοράς

Κατάταξη	Χώρα	Ολική Αξία	Κατάταξη	Χώρα	Ολική Αξία
1	Σουηδία	0,877	14	Ιρλανδία	0,559
2	Ελβετία	0,873	15	Ιταλία	0,490
3	Δανία	0,817	16	Κροατία	0,455
4	Νορβηγία	0,814	17	Βόρεια Μακεδονία	0,443
5	Αυστρία	0,784	18	Σερβία	0,434
6	Φινλανδία	0,761	19	Βοσνία	0,429
7	Γερμανία	0,734	20	Αλβανία	0,410
8	Ολλανδία	0,713	21	Ελλάδα	0,408
9	Ην. Βασίλειο	0,674	22	Ρουμανία	0,392
10	Γαλλία	0,671	23	Βουλγαρία	0,343
11	Ισπανία	0,638	24	Τσεχία	0,325
12	Πορτογαλία	0,620	25	Σλοβακία	0,324
13	Βέλγιο	0,572	26	Πολωνία	0,308

Από την άλλη, υψηλότερα ποσοστά παρουσιάζει η κεντρική-βόρεια Ευρώπη, με χώρες όπως η Αυστρία, η Φινλανδία και η Ολλανδία να βρίσκονται στις υψηλότερες θέσεις της κατάταξης. Αυτό οφείλεται κυρίως στα υψηλότερα ποσοστά αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις συγκεκριμένες χώρες, στην καλύτερη οικονομική τους κατάσταση, αλλά και σε καθαρά πολιτικά κριτήρια. Ωστόσο υπάρχουν και εξαιρέσεις, με χώρες όπως το Βέλγιο και η Ιταλία να βρίσκονται στην κατηγορία της μέτριας ετοιμότητας, καθώς έχουν χαμηλή επίδοση στο κριτήριο της αξιοποίησης ΑΠΕ, το οποίο είναι ένα κριτήριο με υψηλή βαρύτητα.

Πίνακας 8 – Βάρη Κριτηρίων

Κριτήριο	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	SUM
Βάρη	0.088	0.009	0.013	0.086	0.216	0.247	0.197	0.084	0.061	1



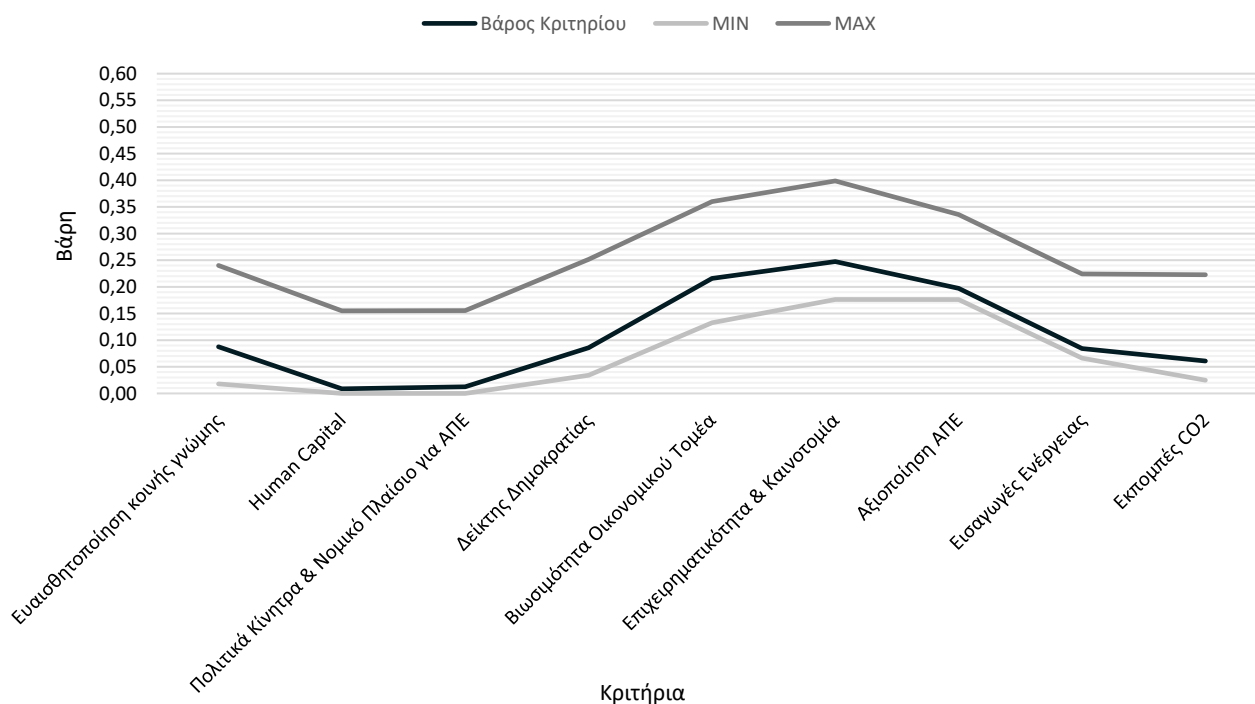
Εικόνα 15 – Αξιολόγηση ετοιμότητας Ευρωπαϊκών κρατών για την ενεργειακή μετάβαση

Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, η ετοιμότητα των Ευρωπαϊκών κρατών συνολικά για την ενεργειακή μετάβαση χαρακτηρίζεται ως μέτρια, με την μέση ολική αξία να λαμβάνει την τιμή 0.572. Για να επιτευχθούν οι στόχοι της συμφωνίας των Παρισίων και της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, οι χώρες μέτριας και χαμηλής ετοιμότητας θα πρέπει να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους σε κρίσιμα κριτήρια που θεωρούνται παράγοντες της ενεργειακής μετάβασης, αλλά και οι χώρες υψηλής ετοιμότητας να συνεχίσουν να βελτιώνονται.

Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, με καλό επίπεδο ευστάθειας και ολικές αξίες που λαμβάνουν τιμές σε όλο το εύρος της κλίμακας αξιολόγησης. Η χρησιμότητα του παρόντος μοντέλου, αλλά και οι προεκτάσεις του για μελλοντική έρευνα είναι οι εξής:

- Η διαδικασία αξιολόγησης της ετοιμότητας των Ευρωπαϊκών κρατών για ενεργειακή μετάβαση επιτρέπει σε κάθε αποφασίζοντα να εκφράζει τις προτιμήσεις του επάνω στα βάρη και τις συναρτήσεις αξιών, φτάνοντας σε εξατομικευμένες κατατάξεις χωρών. Με άλλα λόγια κάθε αποφασίζοντας έχει έλεγχο επάνω στο κάθε μοντέλο αξιολόγησης.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε διαφορετικά δεδομένα, που σημαίνει πως μια νέα αξιολόγηση ετοιμότητας μπορεί να πραγματοποιείται κάθε φορά που νέα δεδομένα είναι διαθέσιμα.
- Δίνεται η δυνατότητα σε έναν αποφασίζοντα να επιλέξει τις χώρες που επιθυμεί να συμπεριλάβει στη διαδικασία αξιολόγησης, καθώς και τα κριτήρια που επιθυμεί, αν αυτά είναι διαθέσιμα

Επίσης, πολύ σημαντικό ζήτημα που χρήζει μελλοντικής διερεύνησης είναι ο έλεγχος ευστάθειας των αποτελεσμάτων, για να ελεγχθεί αν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην τελική κατάταξη. Με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον δείκτες και τεχνικές που αναφέρθηκαν όπως η μέθοδος Extreme Ranking Analysis (Kadzinski), με στόχο την αξιολόγηση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 16 – Βάρη Κριτηρίων - Ευστάθεια

Στην παρούσα εργασία, περιγράφεται ένα διαδραστικό μοντέλο εξαγωγής προτιμήσεων από έναν αποφασίζοντα, συνδυάζοντας μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης και ελέγχου ευστάθειας, για την αξιολόγηση της ετοιμότητας των Ευρωπαϊκών κρατών για την ενεργειακή μετάβαση. Παρουσιάζονται ορισμένοι δείκτες και μια διαδικασία ελέγχου ευστάθειας, που δίνουν τη δυνατότητα στο μοντέλο να λαμβάνει υπόψιν:

- Την οπτική του αναλυτή, κατά το πρώτο στάδιο όπου εξετάζει εάν το μοντέλο απόφασης είναι αξιόπιστο
- Την οπτική του αποφασίζοντα, κατά το δεύτερο στάδιο όπου εξετάζει εάν τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι αποδεκτά

Το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει τη βάση ενός γενικότερου πλαισίου αξιολόγησης. Η πολυδιάστατη φύση του συγκεκριμένου πλαισίου μπορεί να αξιολογεί τις επιδόσεις και την πρόοδο κάθε χώρας ξεχωριστά, εντοπίζοντας περιοχές που χρήζουν βελτίωσης. Η ενσωμάτωση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να υποβοηθήσει ερευνητές στον τομέα της ενέργειας, στελέχη και ρυθμιστές κανονισμών και νομοθεσιών, να σχηματίσουν ένα δικό τους σύστημα αξιολόγησης, λαμβάνοντας εξατομικευμένα αποτελέσματα. Αποτελέσματα τέτοιου είδους μπορούν να έχουν ουσιαστικές επιπτώσεις, τόσο πολιτικές όσο και περιβαλλοντικές, επηρεάζοντας έτσι την ανάπτυξη πρωτοβουλιών και πολιτικών με στόχο την βιώσιμη ανάπτυξη.

Βιβλιογραφία

- [1] Ανακτήθηκε στις 5 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- [2]] Ανακτήθηκε στις 5 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.mcgill.ca/sustainability/files/sustainability/what-is-sustainability.pdf>
- [3] Dolf Gielen, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D. Bazilian, Nicholas Wagner, Ricardo Gorini, The role of renewable energy in the global energy transformation, Energy Strategy Reviews, Volume 24, 2019, Pages 38-50, ISSN 2211-467X,
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.00>
- [4] H. Neofytou, A. Nikas, H. Doukas, Sustainable energy transition readiness: A multicriteria assessment index, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 131, 2020, 109988, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109988>
- [5] Ανακτήθηκε στις 26 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα - <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [6] Harsh Vijay Singh, Roberto Bocca, Pedro Gomez, Steve Dahlke, Morgan Bazilian, The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system, Energy Strategy Reviews, Volume 26, 2019, 100382, ISSN 2211-467X,
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100382>.
- [7] Ανακτήθηκε στις 16 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2023/>
- [8] Insah Iddrisu, Subhes C. Bhattacharyya, Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 50, 2015, Pages 513-530, ISSN 1364-0321,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.032>
- [9] Ανακτήθηκε στις 28 Μαρτίου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://rise.esmap.org/downloads>
- [10] Ανακτήθηκε στις 6 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://dashboards.sdgindex.org/chapters>
- [11] Ανακτήθηκε στις 12 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2954>
- [12] Ανακτήθηκε στις Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.socialprogress.org/climate-perceptions-index>
- [13] Siskos, Yannis & Grigoroudis, Evangelos & Matsatsinis, Nikolaos & Figueira, José & Greco, Salvatore & Ehrogott, Matthias. (2005). UTA methods. 10.1007/0-387-23081-5_8
- [14] Ανακτήθηκε στις 23 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.insead.edu/global-talent-competitiveness-index>
- [15] Ανακτήθηκε στις 11 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://www.eiu.com/n/campaigns/democracy-index-2023/>

- [16] Ανακτήθηκε στις 16 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα: https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/
- [17] Ανακτήθηκε στις 19 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables?tab=table&time=2022>
- [18] Ανακτήθηκε στις 19 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-imports-share-demand?tab=table>
- [19] Ανακτήθηκε στις 19 Απριλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
- [20] Μασατσίνης, Ν. Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, 2η Έκδοση, 2022.
- [21] Matsatsinis, Nikolaos & Grigoroudis, Evangelos & Siskos, Eleftherios. (2018). Disaggregation Approach to Value Elicitation. 10.1007/978-3-319-65052-4_13.
- [22] Siskos, Eleftherios & Kourousias, Giannis & Siskos, Yannis. (2022). Bipolar Multicriteria Aggregation-Disaggregation Robustness Approach: Theory and Application on European e-Government Benchmarking. 10.1007/978-981-16-7414-3_7.
- [23] Eleftherios Siskos, Dimitris Askounis, John Psarras, Multicriteria decision support for global e-government evaluation, Omega, Volume 46, 2014, Pages 51-63, ISSN 0305-0483, <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.02.001>.
- [24] Butler, C.D. Climate Change, Health and Existential Risks to Civilization: A Comprehensive Review (1989–2013). Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 15, 2266. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102266>
- [25] Ανακτήθηκε στις 2 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://www.ipcc.ch/about/>
- [26] Ανακτήθηκε στις 2 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [27] Ανακτήθηκε στις 2 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/figures/summary-for-policymakers/figure-spm-3/>
- [28] Ανακτήθηκε στις 3 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://unfccc.int/about-us/about-the-secretariat>
- [29] Ανακτήθηκε στις 3 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: https://unfccc.int/kyoto_protocol
- [30] Ανακτήθηκε στις 3 Ιουλίου 2024 από την ιστοσελίδα: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/#what>
- [31] Tutak, M.; Brodny, J.; Siwiec, D.; Ulewicz, R.; Bindzár, P. Studying the Level of Sustainable Energy Development of the European Union Countries and Their Similarity Based on the Economic and Demographic Potential. Energies 2020, 13, 6643. <https://doi.org/10.3390/en13246643>

[32] Federica Cucchiella, Idiano D'Adamo, Massimo Gastaldi, SC Lenny Koh, Paolo Rosa, A comparison of environmental and energetic performance of European countries: A sustainability index, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78, 2017, Pages 401-413, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.077>.

[33] Ανακτήθηκε στις 6 Μαΐου 2024 από την ιστοσελίδα:
<https://dashboards.sdgindex.org/map/indicators/population-with-access-to-electricity>

[34] Miłosz Kadziński, Tommi Tervonen, Robust multi-criteria ranking with additive value models and holistic pair-wise preference statements, *European Journal of Operational Research*, Volume 228, Issue 1, 2013, Pages 169-180, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.022>.

[35] Siskos, Eleftherios & Desbordes, Antoine & Burgherr, Peter & McKenna, Russell. (2024). Integrated Assessment of a Robust Choquet Integral Preference Model for Efficient Multicriteria Decision Support. 10.2139/ssrn.4725307.

[36]. Greco, S., Słowiński, R., Figueira, J., Mousseau, V. (2010). Robust ordinal regression, Chapter 8 in: M. Ehrgott, S. Greco, and J. Figueira (eds.), *Trends in multiple criteria decision analysis*, Springer, Berlin.

[37] Siskos, Eleftherios & Kourousias, Giannis & Siskos, Yannis. (2022). Bipolar Multicriteria Aggregation-Disaggregation Robustness Approach: Theory and Application on European e-Government Benchmarking. 10.1007/978-981-16-7414-3_7.

[38] Matsatsinis, Nikolaos & Grigoroudis, Evangelos & Siskos, Eleftherios. (2018). Disaggregation Approach to Value Elicitation. 10.1007/978-3-319-65052-4_13.