



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Μεταπτυχιακό πρόγραμμα "Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων"

Τίτλος

Sustainability assessment of electricity generation sources

**Αξιολόγηση αειφορίας ενεργειακών πηγών ηλεκτρικής
ενέργειας**

Διπλωματική που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης.

Βασίλειος Παπαγεωργίου

A.M. 2021019010

Επιβλέποντες καθηγητές

Βασίλειος Κουϊκόγλου, Πολυτεχνείο Κρήτης

Βασίλειος Μανουσίουδάκης, Πανεπιστήμιο Καλιφόρνιας Λος Άντζελες (UCLA)

Αύγουστος 2023

Copyright © 2023, Παπαγεωργίου Βασίλειος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Βασίλειος Κουϊκόγλου, καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δρ. Βασίλειος Μανουσιουδάκης, καθηγητής, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of California, Los Angeles (UCLA)

Δρ. Ευστράτιος Ιωαννίδης, αναπληρωτής καθηγητής, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Περίληψη

Η ενέργεια αποτελεί έναν σημαντικό μοχλό για την ανθρώπινη ανάπτυξη αλλά η παραγωγή και η κατανάλωση της συνδέονται με την περιβαλλοντική ρύπανση καθώς και με την υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια από τις πιο βασικές πηγές ενέργειας παγκοσμίως και η κατανάλωσή της αυξάνεται ραγδαία σύμφωνα με την τάση του εξηλεκτρισμού και της αυτοματοποίησης. Σε αυτή την διατριβή αναλύουμε διάφορες περιβαλλοντικές και ανθρώπινες πτυχές της αειφορίας για διαφορετικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως υδροηλεκτρική ενέργεια, ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα κλπ. Ορίζουμε δείκτες αειφορίας και συλλέγουμε δεδομένα για κάθε πηγή ενέργειας. Οι δείκτες συνδυάζονται στον συνολικό δείκτη αειφορίας χρησιμοποιώντας ασαφή λογική. Παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ πηγών ενέργειας από άποψη βιωσιμότητας. Η ανάλυση ευαισθησίας αποκαλύπτει τους σημαντικότερους δείκτες που επηρεάζουν την βιωσιμότητα κάθε πηγής.

Abstract

Energy is an important driver of human development, but its generation and use are associated with environmental pollution and degradation of natural resources. Electricity is one the main components of global energy use. Its consumption is growing rapidly according to the trend of global electrification and automation. In this thesis we analyze various environmental and human aspects of sustainability for different sources of electric energy, such as hydro power, fossil and nuclear fuels and so on. We define indicators pertaining to these sustainability aspects and collect data for each energy source. The indicators are combined into an overall sustainability index using fuzzy logic. A comparison of the energy sources in terms of sustainability is presented. A sensitivity analysis reveals the most important indicators affecting the sustainability of each source.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	6
2	Ασαφής λογική	9
2.1	Ιστορική αναδρομή	9
2.2	Ασαφή σύνολα	10
2.3	Συνάρτηση συμμετοχής.....	11
2.4	Λεκτικές μεταβλητές.....	11
2.5	Αποσαφήνιση	12
3	Δείκτες ενεργειακής αειφορίας.....	14
3.1	Περιβάλλον	14
3.1.1	Νερό	15
3.1.2	Αέρας	15
3.1.3	Έδαφος.....	16
3.2	Άνθρωπος.....	16
3.2.1	Τεχνολογία	16
3.2.2	Οικονομία	17
3.2.3	Κοινωνία	17
3.3	Σύνοψη δεικτών	18
4	Μεθοδολογία	22
4.1	Επισκόπηση μοντέλου.....	22
4.2	Κανονικοποίηση δεδομένων	22
4.3	Ασαφοποίηση	23
4.4	Βάσεις κανόνων	25
4.5	Ασαφή συμπέρασμα και αποσαφήνιση.....	28
4.6	Ανάλυση ευαισθησίας.....	30
5	Αποτελέσματα	32
6	Συμπεράσματα.....	37
7	Παράρτημα Α	41
8	Βιβλιογραφία	45

1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας η περιβαλλοντική κρίση και η ενεργειακή κρίση αποτελούν δύο στενά συνδεδεμένες προκλήσεις που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών κρίσεων έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικονομία και την ανθρώπινη ευημερία. Οι επιπτώσεις της περιβαλλοντικής κρίσης είναι ευρέως αναγνωρισμένες και περιλαμβάνουν την αλλαγή του κλίματος, την υπερθέρμανση του πλανήτη, τη μείωση της βιοποικιλότητας, τη ρύπανση του αέρα και των υδάτων, και την εξάντληση των φυσικών πόρων.

Η ενεργειακή κρίση από την άλλη αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου υπάρχει έλλειψη ή ανεπάρκεια ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μιας κοινωνίας. Οι προκλήσεις μιας ενεργειακής κρίσης είναι σύνθετο φαινόμενο και εξαρτώνται από παράγοντες όπως την μείωση φυσικών πόρων, τις φυσικές καταστροφές, καθώς και γεωπολιτικές διαμάχες για την πρόσβαση σε ενεργειακούς πόρους. Οι ενεργειακές κρίσεις συνήθίζεται να έχουν σοβαρές και πολυδιάστατες επιπτώσεις, ανάλογα με την διάρκεια μιας κρίσης. Για παράδειγμα μπορεί να δημιουργήσουν αύξηση των τιμών ενέργειας και των καυσίμων, τον περιορισμό της παραγωγής και την αστάθεια της οικονομίας. Επίσης η έλλειψη ενέργειας μπορεί να προκαλέσει αναταραχές στην διαθεσιμότητα βασικών αγαθών όπως τρόφιμα και πόσιμο νερό, θέρμανση, και άλλα είδη πρώτης ανάγκης. Επιπλέον η επιδείνωση του προβλήματος της ενεργειακής κρίσης μπορεί να προκαλέσει αυξημένη εξάντληση των φυσικών πόρων.

Παρατηρώντας την ιστορική πορεία, η ενεργειακή κρίση αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κατά την εξέλιξη των κοινωνιών, ωστόσο στην εποχή μας η ενεργειακή κρίση είναι σημαντικά πιο περίπλοκη και πιο διαδεδομένη σε σύγκρισή με αντίστοιχα φαινόμενα του παρελθόντος. Την δεκαετία του 1970 η ενεργειακή κρίση αφορούσε κυρίως την μείωση εξάρτησης εισαγωγής πετρελαίου, καθώς αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες παρουσίαζαν αυξημένη ζήτηση. Η αιτία που οδήγησε σε αυτή την κατάσταση συνδέεται με πολιτικές συγκρούσεις, περιορισμένη πρόσβαση σε φυσικούς πόρους και διάφορα γεωπολιτικά συμφέροντα. Αποτέλεσμα της κρίσης ήταν η άνοδος των τιμών και ακολούθως η δημιουργία πληθωρισμού, όπως συμβαίνει και στις μέρες μας. Σε αντίθεση η ενεργειακή κρίση στις μέρες μας έχει πολλές διαστάσεις, καθώς επηρεάζεται περισσότερο από θέματα βιωσιμότητας, κλιματικής αλλαγής καθώς και την εξάντληση των φυσικών πόρων.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τις τελευταίες δεκαετίες η αύξηση του πληθυσμού καθώς και η τάση του δυτικού τρόπου διαβίωσης με πρότυπα την υπερκατανάλωση, οδήγησαν σε υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Τα φαινόμενα της υπερκατανάλωσης έχουν ως επίπτωση την ανεπάρκεια των φυσικών πόρων για να υποστηρίξουν την αυξανόμενη ζήτηση. Η παγκόσμια κοινότητα βρίσκεται αντιμέτωπη με μια σοβαρή περιβαλλοντική κρίση, η οποία οφείλεται, μεταξύ άλλων, στη χρήση ορυκτών καυσίμων ως κύρια πηγή ενέργειας. Η καύση ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο λιγνίτης, συσχετίζεται άμεσα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όπως

το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα αέρια που επιδρούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση τις θερμοκρασίας του πλανήτη. Σύμφωνα με το International Energy Agency (2022) η αύξηση της θερμοκρασίας κατά μέσο όρο 3.5°C είναι ένα από τα δυσοίωνα σενάρια που προβλέπονται μακροχρόνια. Για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής κρίσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, έχουν τεθεί στόχοι και περιορισμοί που επιβάλλονται σε διάφορους τομείς της κοινωνίας. Βάσει των μακροπρόθεσμων στόχων που έχουν ανακοινώσει οι κυβερνήσεις είναι δυνητικά εφικτή η επίτευξη του σεναρίου μηδενικών εκπομπών άνθρακα για την παραγωγή ενέργειας έως το 2050. Το σενάριο έχει ως στόχο να σταθεροποιήσει την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας στους 1.5°C και να διασφαλίσει παγκόσμια πρόσβαση σε καινοτόμες, μη ρυπογόνες μορφές ενέργειας έως το 2030 (IEA, 2022). Οι πρόσφατες πολιτικές που εφαρμόζονται στις μεγάλες αγορές ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των επενδύσεων σε καθαρές ενεργειακές πηγές έως το 2030. Η επενδυτική αύξηση προσδιορίζεται με ποσοστό 50% σε σχέση με την τρέχουσα κατάσταση (IEA, 2022).

Η εξασφάλιση βιώσιμης παραγωγής ενέργειας απαιτεί από τις χώρες να υιοθετήσουν νέες πολιτικές και τεχνολογίες που είναι φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν βελτιωμένο βαθμό απόδοσης. Το βέλτιστο ενεργειακό μείγμα πρέπει να επιδιώκει την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την εξασφάλιση της ενεργειακής ασφάλειας.

Ωστόσο, η υψηλή τιμή της ενέργειας και οι οικονομικές πιέσεις δημιουργούν προκλήσεις στην προσβασιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας για ευάλωτες κοινότητες. Εκτιμάται ότι περίπου 100 εκατομμύρια άνθρωποι θα χρησιμοποιήσουν παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως η βιομάζα για βασικές ανάγκες όπως το μαγείρεμα (IEA, 2022). Ένας σημαντικός στόχος είναι η διασφάλιση προσιτής και αξιόπιστης βιώσιμης ενέργειας για όλους. Το πλήρες περιβαλλοντικό αποτύπωμα λαμβάνει υπόψη του τον κύκλο ζωής της ενέργειας, από την εξόρυξη και επεξεργασία έως τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές, την διάθεση αποβλήτων και την ανακύκλωση. Πιο αναλυτικά, το πλήρες περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι ένας όρος που αναφέρεται στο συνολικό αντίκτυπο ενός προϊόντος, μιας υπηρεσίας ή μιας δραστηριότητας στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής του. Καταγράφει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τη χρήση πόρων, την ενέργεια που καταναλώνεται, την παραγωγή αποβλήτων και την ανακύκλωση. Ένας καθοριστικός παράγοντας στον υπολογισμό του πλήρους περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι ο κύκλος ζωής της ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνονται υπόψη όλα τα στάδια που συνδέονται με την παραγωγή και τη χρήση ενέργειας για την παραγωγή ενός προϊόντος ή την παροχή μιας υπηρεσίας. Αυτά τα στάδια μπορεί να περιλαμβάνουν την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη μεταφορά, την επεξεργασία, την κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή, τη μεταφορά του τελικού προϊόντος ή την παροχή της υπηρεσίας και τη διάθεση των αποβλήτων.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής έρευνας είναι η αξιολόγηση αειφορίας τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή, πυρηνική ενέργεια καθώς και ορυκτά καύσιμα όπως άνθρακας, φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα. Η αξιολόγηση βασίζεται στη χρήση δεικτών οι οποίοι περιγράφουν κάποια ειδικά χαρακτηριστικά και επιπτώσεις κάθε τεχνολογίας, για παράδειγμα οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, η ασφάλεια, η αποδοτικότητα, το κόστος κλπ. Κάποιοι δείκτες

συνδυάζονται σε πιο σύνθετες μεταβλητές όπως αέρας, νερό, ασφάλεια, οικονομία και αυτοί συνδυάζονται περαιτέρω σε πιο σύνθετους δείκτες και στον τελικό δείκτη αιεφορίας κάθε τεχνολογίας. Ο συνδυασμός δεικτών γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψη τους βαθμούς σημαντικότητας κάθε δείκτη σε σχέση με τους άλλους με τους οποίους συνδυάζεται. Ο συνδυασμός δεικτών x_i σε σύνθετες μεταβλητές μπορεί να γίνει με διάφορα μοντέλα όπως γραμμικοί συνδυασμοί $\sum w_i x_i$ με βάρη w_i , πολλαπλασιαστικά μοντέλα $\prod x_i^{w_i}$, κ.ο.κ. Στην εργασία αυτή η σύνθεση γίνεται με την λεγόμενη ασαφή λογική που συνοψίζεται σε επόμενη παράγραφο.

Χρησιμοποιώντας υποσύνολα διακριτών και καθορισμένων δεικτών, προκύπτουν σύνθετοι δείκτες καθένας από τους οποίους περιγράφει κάποια γενικότερη επίπτωση ή συνεισφορά της ενεργειακής πηγής. Παραδείγματα σύνθετων δεικτών είναι:

- **Αέρας:** Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και αερίων ρύπων είναι από τις πιο βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την βιωσιμότητα σύμφωνα με την τάση για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής κρίσης.
- **Πόροι:** Η εξάντληση πόρων και η χρησιμοποίηση της γης με σκοπό την παραγωγή ενέργειας συντελούν στην υποβάθμιση του εδάφους είτε με αλλαγή της βιοποικιλότητας είτε με μείωση καλλιεργήσιμης έκτασης.
- **Νερό:** Η κατανάλωση νερού είναι ιδιαίτερα επιβαρυντική σε περιοχές με σημαντική λειψυδρία, καθώς είναι μη βιώσιμη η άντληση μεγάλων ποσών νερού έμμεσα και άμεσα για την κατασκευή και την παραγωγική διαδικασία ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Υγεία:** Η διαδικασία παραγωγής ενέργειας και η δημιουργία τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας, έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Σε αυτές τις επιπτώσεις περιλαμβάνονται άμεσα τα εργατικά ατυχήματα και έμμεσα οι ασθένειες που σχετίζονται με την έκθεση σε επιβλαβείς ουσίες. Ένας δεύτερος δείκτης που επηρεάζεται σημαντικά από τους παράγοντες αυτούς, είναι η κοινωνική αποδοχή της εκάστοτε τεχνολογίας, καθώς οι πολίτες εκφράζουν τις ανησυχίες τους σχετικά με τους ανθρώπινους κινδύνους και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- **Τεχνολογία:** Στην τεχνολογική επίπτωση περιλαμβάνεται η απόδοση της τεχνολογίας ως το ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την ωφέλιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον για την διαμόρφωση της τεχνολογικής συνιστώσας συμμετέχει ο δείκτης συντελεστής χωρητικότητας, όπου είναι ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο προς την θεωρητική μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου.
- **Οικονομία:** Στην οικονομική συνιστώσα μίας ενεργειακής πηγής περιλαμβάνονται το μέσο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την διάρκεια ζωής της μονάδας παραγωγής καθώς και όλα τα επιπλέον κόστη λειτουργίας αλλά και οι θέσεις εργασίας που δημιουργεί η εκάστοτε τεχνολογία.

2 Ασαφής λογική

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια συλλογιστική προσέγγιση που ασχολείται με την αντιμετώπιση της ασαφούς πληροφορίας και της αβεβαιότητας. Σε αντίθεση με την κλασική λογική, που βασίζεται σε ακριβή και απόλυτα ορισμένα στοιχεία, η ασαφής λογική αποδέχεται την ιδέα ότι οι έννοιες και οι δηλώσεις μπορεί να είναι ασαφείς και να παρουσιάζουν διάφορα επίπεδα αληθοφάνειας. Η ασαφής λογική βασίζεται στην έννοια της μερικής αλήθειας, όπου μια πρόταση περιέχει έναν βαθμό αλήθειας από 0 έως 1. Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε μια απολύτως ψευδή πρόταση, ενώ η τιμή 1 αντιπροσωπεύει μια απολύτως αληθή πρόταση. Αντίθετα, στη δίτιμη Αριστοτέλεια λογική, μια πρόταση μπορεί να είναι είτε ψευδής είτε αληθής. Η έννοια της ασαφούς λογικής προέκυψε από την παρατήρηση ότι ο τρόπος σκέψης και συμπερασμού των ανθρώπων βασίζεται περισσότερο σε ποιοτικά κριτήρια αντίληψης παρά σε ακριβείς αναλύσεις βασισμένες σε ακριβή δεδομένα (Μαστοροκώστας, 2016). Η ανθρώπινη γνώση και αντίληψη συχνά εκφράζονται με όρους όπως "υψηλός", "χαμηλός", "κοντά", "μακριά", που αποτελούν ασαφείς έννοιες. Η ασαφής λογική προσφέρει ένα πλαίσιο για την αντιμετώπιση αυτής της ασαφούς πληροφορίας, επιτρέποντας την αποτύπωση της αβεβαιότητας και της αληθοφάνειας στη συλλογιστική διαδικασία.

Ακολουθούν οι βασικές αρχές της ασαφούς λογικής:

- i. Μία λογική πρόταση μπορεί να έχει ενδιάμεσες διαβαθμίσεις αλήθειας από (πλήρως) ψευδής έως (πλήρως) αληθής.
- ii. Οι γνωστές συναρτήσεις και τα μαθηματικά συστήματα ορίζονται με λογικές συνεπαγωγές της μορφής "αν ... τότε ...". Παραδείγματα: "αν οι δείκτες μίας τεχνολογίας δεν είναι καλοί, τότε η τεχνολογία δεν είναι αειφόρος", "αν $x = 2$ τότε $f(x) = 4$ ". Όταν η υπόθεση "αν..." ή η συνέπεια "τότε..." δεν είναι γνωστές με βεβαιότητα, τότε τέτοιες συνεπαγωγές μπορούν να αναπαρασταθούν με ασαφείς μεταβλητές και ασαφείς κανόνες.
- iii. Στην ασαφή λογική κάθε ακριβής (γνωστή) κατάσταση θεωρείται ως οριακή περίπτωση μιας προσεγγιστικής (μερικώς γνωστής) κατάστασης.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ασαφής λογική αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο των μαθηματικών και της τεχνητής νοημοσύνης που ασχολείται με την αναπαράσταση και την επεξεργασία πληροφορίας που είναι ασαφής ή αβέβαιη. Η ανάπτυξη αυτής της λογικής έχει ένα ενδιαφέρον ιστορικό που εκτείνεται σε δεκαετίες, καθώς οι ερευνητές προσπαθούσαν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις της αβεβαιότητας και της ασάφειας στην αναπαράσταση γνώσης και της αναλογικής σκέψης.

Οι αρχαίους Έλληνες φιλόσοφοι όπως ο Ηράκλειτος, ο Πυθαγόρας και ο Αριστοτέλης εισήγαγαν τις έννοιες της λογικής ως επιστήμη τον 4^ο αιώνα π.Χ.. Ο Αριστοτέλης ανέπτυξε την δυαδική λογική, σύμφωνα με την οποία μια κατάσταση μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής παίρνοντας τιμές 1 και 0 αντίστοιχα. Η Αριστοτελική λογική έγινε ευρέως αποδεκτή στην επιστήμη με

αποτέλεσμα να επικρατήσει στην λεγόμενη δυτική σκέψη έως τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Επικράτησε κυρίως για την απλότητα της και φαινομενικά έδειχνε την αλήθεια (Μπαρτζώκα, 2021). Ωστόσο περιορισμοί της δυαδικής λογικής στην αναπαράσταση και αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και της ασάφειας οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων. Την δεκαετία 1920 ο Πολωνός φιλόσοφος Jan Lukasiewicz εισήγαγε για πρώτη φορά την θεωρία της τρί-τιμης λογικής που επέτρεπε την ύπαρξη ενδιάμεσων τιμών μεταξύ αληθούς και ψευδούς. Αργότερα το 1937 ο αμερικανο-βρετανός φιλόσοφος και φυσικός Max Black πρότεινε την έννοια της συνάρτησης συμμετοχής (membership function) η οποία αποτελεί μια μαθηματική αναπαράσταση του βαθμού ασάφειας ή αλήθειας μιας πρότασης. Ωστόσο, η πραγματική πρόοδος στον τομέα έγινε κατά τη δεκαετία του 1960, όταν ο μαθηματικός Lotfi Zadeh καθηγητής του πανεπιστημίου Berkeley της California, δημοσίευσε το 1965 την εργασία με τίτλο 'Fuzzy Sets' στην οποία εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια του ασαφούς συνόλου και τον όρο fuzzy. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αντιδράσεις της επιστημονικής κοινότητας απέναντι στη θεωρία του Zadeh δεν ήταν θετικές (Μπαρτζώκα, 2021). Αρχικά θεωρήθηκε ότι αντιτίθεται στις βασικές επιστημονικές αρχές καθώς υποστηρίχτηκε η θεωρία των πιθανοτήτων με την οποία θα μπορούσε να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπιζε η ασαφής λογική με ακριβέστερο τρόπο (Μπαρτζώκα, 2021).

Σημαντικό ορόσημο στην εξέλιξη και επικράτηση της ασαφούς λογικής συνέβαλε ο Βρετανός μηχανικός Mamdani το 1974 που για πρώτη φορά εισήγαγε την επιστημονική έρευνα στην βιομηχανία, κατασκεύασε ένα σύστημα ασαφούς ελέγχου για την λειτουργία μίας ατμομηχανής (Μαστοροκώστας, 2016). Στη μέθοδο Mamdani, οι ασαφείς κανόνες αναπαρίστανται ως "αν είναι αληθής η συνθήκη (= είσοδος) τότε είναι αληθές και το συμπέρασμα (= έξοδος)" ή απλούστερα "αν-τότε" κανόνες, όπου οι αντιστοιχίες γίνονται μεταξύ εισόδων και εξόδων. Οι ασαφείς κανόνες χρησιμοποιούν ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής για να αξιολογήσουν τη σημασιολογική συμπεριφορά των μεταβλητών που μπορεί να συμμετέχουν στην είσοδο και στην έξοδο.

Με την πάροδο του χρόνου η μέθοδος ασαφούς λογικής απέκτησε ευρεία αποδοχή και εφαρμογή σε διάφορους τομείς, για παράδειγμα στον τομέα του ελέγχου η ασαφής λογική επιτρέπει την ανάπτυξη ελεγκτών που μπορούν να λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα και την ασάφεια στα δεδομένα εισόδου. Επίσης, στην τεχνητή νοημοσύνη, η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη συστημάτων αναγνώρισης προτύπων και συστημάτων συμπερασμού που μπορούν να αντιμετωπίζουν την ασάφεια στα δεδομένα εισόδου και να παράγουν αποτελέσματα με βάση την ασαφή γνώση.

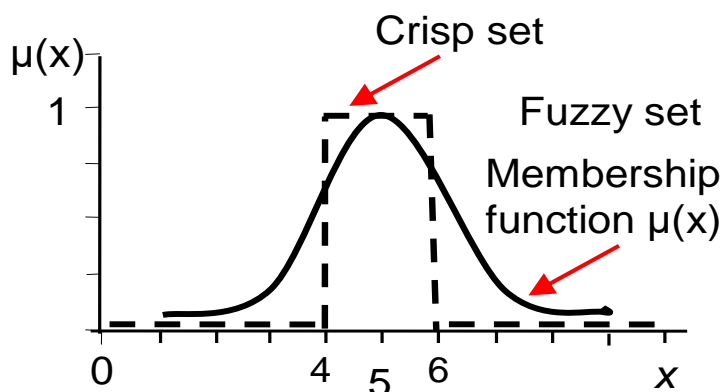
2.2 Ασαφή σύνολα

Τα ασαφή σύνολα είναι μια μέθοδος αναπαράστασης και επεξεργασίας των δεδομένων που επιτρέπει την αναγνώριση της ασάφειας και της αβεβαιότητας στις πληροφορίες. Σε ένα ασαφές σύνολο, ένα στοιχείο μπορεί να ανήκει σε αυτό με έναν βαθμό συμμετοχής από το μηδέν έως το ένα. Οι ασαφείς αυτοί βαθμοί αντιπροσωπεύουν την κατανομή της συμμετοχής του στοιχείου στο ασαφές σύνολο. Η ασαφής αναπαράσταση επιτρέπει την περιγραφή συνόλων που δεν είναι απόλυτα καθορισμένα και διακρίνονται από ασάφεια και αβεβαιότητα. Αυτή η προσέγγιση

επιτρέπει την αντιμετώπιση πραγμάτων και φαινομένων που δεν μπορούν να περιγράφουν με ακρίβεια και απόλυτη σαφήνεια.

2.3 Συνάρτηση συμμετοχής

Η συνάρτηση συμμετοχής, γνωστή και ως συνάρτηση ασάφειας, είναι μια μαθηματική συνάρτηση που αντιστοιχίζει ένα στοιχείο στον βαθμό της συμμετοχής του σε ένα ασαφές σύνολο. Αυτή η συνάρτηση καθορίζει πώς το στοιχείο ανήκει στο ασαφές σύνολο, δίνοντας τιμές ανάμεσα στο μηδέν και το ένα. Συνήθως, η συνάρτηση συμμετοχής περιγράφεται από μια μορφή γραφικής καμπύλης, όπως τύπου τριγωνοειδής, ο τετραγωνικός, Gauss κ.α., ανάλογα με την κατάσταση. Πιο αναλυτικά θα μπορούσε να οριστεί η συνάρτηση συμμετοχής ως μια καμπύλη η οποία καθορίζει τον βαθμό στον οποίο κάθε σημείο του πεδίου ορισμού διαθέτει μια συγκεκριμένη ιδιότητα και ορίζεται στο διάστημα $[0,1]$.

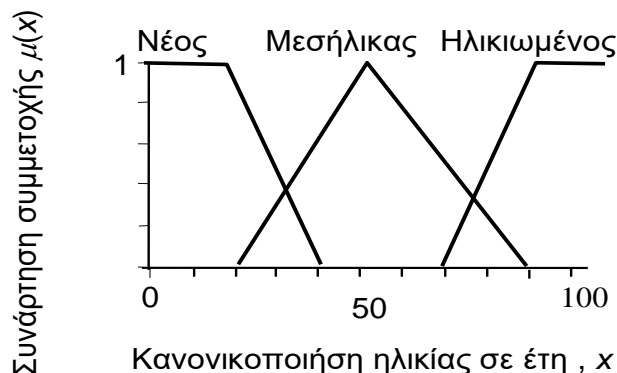


Σχήμα 1: Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφούς λογικής και κλασικής λογικής. Ένα κλασικό σύνολο αριθμών "κοντά στο 5" είναι το διάστημα $[4, 6]$ όπου όλοι οι αριθμοί ανήκουν ισότιμα στο εν λόγω σύνολο (crisp set) και οι αριθμοί εκτός του διαστήματος $[4, 6]$ δεν ανήκουν καθόλου. Στο ασαφές σύνολο όλοι οι αριθμοί στο $(-\infty, \infty)$ θεωρούνται ότι είναι κοντά στο 5, αλλά καθένας με διαφορετικό βαθμό (membership grade) από 0 έως 1.

2.4 Λεκτικές μεταβλητές

Οι λεκτικές ή γλωσσικές μεταβλητές (linguistic variables) αποτελούν μια τεχνική στην ασαφή λογική που χρησιμοποιείται για την περιγραφή **μετρήσιμων μεγεθών** χρησιμοποιώντας λέξεις που αντιστοιχούν σε μία συλλογή διαφορετικών ασαφών συνόλων που καλύπτουν πλήρως τις δυνατές καταστάσεις του μετρήσιμου μεγέθους. Η αντιστοίχιση αυτή λέγεται ασαφοποίηση (fuzzification). Για παράδειγμα, η λέξη ηλικία είναι μια γλωσσική μεταβλητή και για να προσδιοριστεί δίνουμε γλωσσικές τιμές. Θεωρώντας ότι προσδιορίζει την ηλικία των ανθρώπων παίρνει γλωσσικές τιμές: "Νέος", "Μεσήλικας", "Γέρος". Η περιγραφή του δείκτη ηλικία παίρνει

τιμές στο διάστημα από $[0, +\infty)$ που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές ηλικίες των ανθρώπων, οι τιμές της συνάρτησης συμμετοχής αντιστοιχούν σε διάστημα από 0 έως 1. Μία συγκεκριμένη ηλικιακή τιμή, όπως πχ. 30, μπορεί να ανήκει σε διαφορετικά ασαφή σύνολα με αντίστοιχους βαθμούς συμμετοχής. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το προηγούμενο παράδειγμα.



Σχήμα 2: Διάγραμμα συνάρτησης συμμετοχής για τον δείκτη ηλικία.

2.5 Αποσαφήνιση

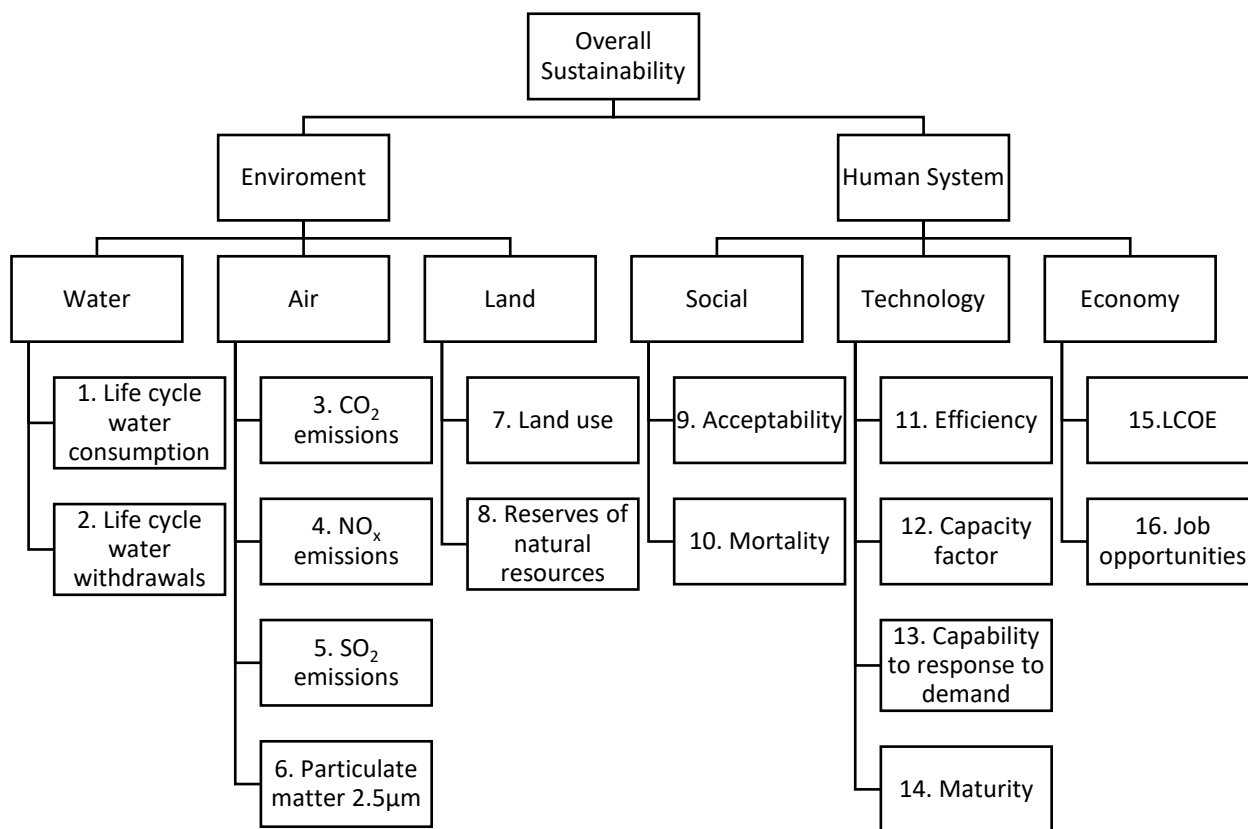
Η αποσαφήνιση αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία μετατρέπουμε ένα ή περισσότερα ασαφή σύνολα που περιγράφουν ένα μέγεθος σε μία αριθμητική τιμή, με στόχο την απομάκρυνση της ασάφειας και την παραγωγή μιας σαφούς περιγραφής. Όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία με την αγγλική ορολογία, defuzzification είναι η μετατροπή του αποτελέσματος της συνάθροισης σε ακριβή (crisp) τιμή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αποσαφήνισης που χρησιμοποιούνται στην ασαφή λογική. Ορισμένες από τις πιο κοινές συνοψίζονται παρακάτω:

- **Κέντρο Βάρους (Center of Gravity):**
Η συνάρτηση κέντρου βάρους υπολογίζει τη θέση του κέντρου βάρους της ασαφούς καμπύλης. Η απόφαση της σαφούς τιμής βασίζεται στη θέση αυτού του κέντρου βάρους.
- **Μέγιστη Υπερεκτίμηση (Maximum Membership):**
Η συνάρτηση μέγιστης υπερεκτίμησης επιλέγει την τιμή με τη μεγαλύτερη ασάφεια ως τη σαφή τιμή. Αυτό σημαίνει ότι επιλέγεται η τιμή που έχει τη μέγιστη συμμετοχή στην ασαφή καμπύλη.
- **Μέση Τιμή (Mean Value):**
Η συνάρτηση μέσης τιμής υπολογίζει τη μέση τιμή της ασαφούς καμπύλης και τη χρησιμοποιεί ως τη σαφή τιμή. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του κέντρου μάζας της ασαφούς καμπύλης.
- **Αποσαφήνιση Ύψους (Height Defuzzification):**
Ορίζεται το κέντρο βάρους για κάθε ασαφές σύνολο ως μία από τις τιμές x η οποία έχει μέγιστο βαθμό συμμετοχής στο σύνολο αυτό. Ακολουθώντας υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των κέντρων βάρους.

Στην εργασία αυτή εφαρμόζεται η τελευταία μέθοδος.

3 Δείκτες ενεργειακής αιεφορίας

Ο ορισμός των δεικτών υλοποιήθηκε με την ακόλουθη ιεραρχία όπου από τους 16 δείκτες αρχικού επιπέδου συνοψίζονται σε 6 σύνθετους δείκτες όπου με την σειρά τους προκύπτουν δύο δείκτες μεγαλύτερης συνθετότητας. Η περιβαλλοντική επίπτωση και η ανθρώπινη επίπτωση με τιμές που προκύπτουν εξαρτώμενες από το δέντρο ιεραρχίας εξαγάγουν την ολική αιεφορία του συστήματος, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα του Σχ. 3.



Σχήμα 3: Ιεραρχία δεικτών και συνιστωστών της αιεφορίας ενεργειακών πηγών.

3.1 Περιβάλλον

Με τον όρο Περιβάλλον αναφέρουμε τον συνολικό δείκτη που αποτελείται από τρία στοιχεία νερό, αέρας και έδαφος. Κάθε στοιχείο επηρεάζει και υποβαθμίζει άμεσα το περιβάλλον με τις σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις. Τα στοιχεία αναλύονται σε επί μέρους δείκτες παρακάτω.

3.1.1 Νερό

Η υποβάθμιση και κατανάλωση των υδάτινων πόρων εξαρτάται άμεσα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς χρησιμοποιείται τόσο στην κατασκευή όσο και για την λειτουργία των μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στον γενικό δείκτη νερό εντάσσονται δύο επί μέρους δείκτες ανά τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: η ποσότητα του νερού που μετατρέπεται από νερό σε άλλο στοιχείο (Κατανάλωση κύκλου ζωής, Life cycle water consumption) και το νερό που χρησιμοποιείται και επιστρέφει στο περιβάλλον (Αναλήψεις κύκλου ζωής, Life cycle water withdrawals). Στην πρώτη περίπτωση, consumption, δεν επιστρέφει στο περιβάλλον, ένα παράδειγμα του δείκτη consumption είναι η ποσότητα υγρού στοιχείου που δεσμεύεται για την δημιουργία παραγωγικών μέσων. Οι εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικού σταθμού καταναλώνει σημαντικό ποσοστό νερού για την δημιουργία σκυροδέματος. Στον δείκτη withdrawals γίνεται χρησιμοποίηση του νερού με αποτέλεσμα να επιστρέφει στο περιβάλλον, παραδείγματος χάρι χρησιμοποιείται για την ψύξη των μονάδων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες επιστρέφοντας στο οικοσύστημα, με αρνητικό αποτύπωμα την θέρμανση των υδάτων και την μεταβολή του τοπικού οικοσυστήματος (Meldrum *et al.*, 2013).

3.1.2 Αέρας

Ο γενικός δείκτης του αέρα σχετίζεται με τα αέρια του θερμοκηπίου και την ποιότητα του αέρα. Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι τα αέρια που απορροφούν και εκπέμπουν ενέργεια ακτινοβολίας μέσα στο εύρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, προκαλώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι σημαντικότεροι δείκτες που συμβάλουν στο φαινόμενο είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ το οποίο παράγεται από κάθε είδους καύση με αποτέλεσμα την συσσώρευση στην ατμόσφαιρα και ενδυνάμωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει οριστεί η μείωση κατά 40% των GHG εκπομπών από το 1990 (IEA, 2021). Τα οξείδια του αζώτου NO_x όπως αναφέρεται το αέριο μείγμα μονοξείδιο του αζώτου NO και διοξείδιο του αζώτου NO₂. Τα συγκεκριμένα αέρια παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης καυσίμων, όπως οι υδρογονάνθρακες, κυρίως μέσω της αντίδρασης μεταξύ άζωτου και οξυγόνου. Η παρουσία οξειδίων του αζώτου στον αέρα, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες έχει σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο Περιβάλλον. Από την πλευρά της ανθρώπινης υγείας, τα οξείδια του αζώτου συνδέονται με την ανάπτυξη ασθματικών προβλημάτων και αναπνευστικών προβλημάτων. Στο περιβάλλον, οι υψηλές θερμοκρασίες σχετίζονται άμεσα με τον σχηματισμό των NO_x και οι επιδράσεις των οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα συμβάλουν στην καταστροφή της οζονόσφαιρας. Ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι το διοξείδιο του θείου SO₂ με σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον όπως την επιρροή στην καταλληλότητα των οικοτόπων για τις φυτικές κοινότητες, καθώς και στην εξέλιξη του ζωικού βασιλείου. Σημαντική συνεισφορά έχει το διοξείδιο του θείου στην επιδείνωση της όξινης βροχής και των σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Η αντιμετώπιση του φαινομένου της όξινης βροχής από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ, είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση 33% στις εκπομπές μεταξύ 1983 και 2002 (Gebeshuber, 2019). Τέλος σημαντική συνεισφορά στην υποβάθμιση του αέρα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια μεγέθους 2.5μm, με σημαντική επίπτωση στον ανθρώπινο οργανισμό καθώς μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Έρευνες έχουν

συσχετίζει περιοχές με υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων προκαλώντας επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού (Chen *et al.*, 2010). Ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλει στις εκπομπές CO₂ είναι οι μονάδες παραγωγής από βιοκαύσιμα. Τα βιοκαύσιμα ως οργανικά προϊόντα κατά την καύση τους παράγουν ίσες ποσότητες CO₂ με τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο το συγκριτικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα είναι η διαδικασία δημιουργίας της πρώτης ύλης που είναι εφικτό να μετατραπεί σε μειονέκτημα ανάλογα με τις διαδικασίες παραγωγής μεταφοράς και κατανάλωσης. Συμπερασματικά το τελικό περιβαλλοντικό όφελος κυμαίνεται μεταξύ μεγάλου έως μηδαμινού ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής και διανομής του βιοκαύσιμου.

3.1.3 Έδαφος

Η παραγωγή ενέργειας απαιτεί σημαντικά ποσά δέσμευσης εδάφους όπως την δημιουργία εγκαταστάσεων, την διαμόρφωση οδικών δικτύων και την δημιουργία των συστημάτων. Όλες οι προαναφερθείσες διαδικασίες καταναλώνουν ορυκτούς πόρους με μεγαλύτερο ποσοστό οι τεχνολογίες παραγωγής από ορυκτά καύσιμα. Για την ποσοτικοποίηση και τον προσδιορισμό του συγκεκριμένου δείκτη συνδυάστηκαν οι αναγνωριζόμενοι διαθέσιμοι πόροι προς την κατανάλωση ενέργειας ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας (Our World in Data, 2022).

3.2 Άνθρωπος

Ο ανθρώπινος παράγοντας ως σύνθετος δείκτης περιέχει περισσότερα που συνδέονται άμεσα και καθορίζουν την ευημερία της ανθρωπότητας. Δείκτες χαμηλότερης σύνθεσης είναι η τεχνολογία, η οικονομία και η κοινωνική ένταξη όπου με την σειρά τους δημιουργούνται από πρωτογενείς δείκτες σύμφωνα με το δέντρο ιεραρχίας όπου αναλύονται στην συνέχεια.

3.2.1 Τεχνολογία

Ο δείκτης τεχνολογία αξιολογεί τεχνικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών συστημάτων. Ένα τέτοιο είναι η απόδοση του συστήματος παραγωγής ενέργειας που ορίζεται ως ο λόγος ωφέλιμης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την συνολική προσφερόμενη ενέργεια στο σύστημα με τιμές δεικτών από τον IEA (IEA, 2011). Επιπλέον συντελεστής δυναμικότητας είναι ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μια δεδομένη χρονική περίοδο προς τη θεωρητική μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (Office of Nuclear Energy, 2021). Ακόμα ένας δείκτης που συμβάλλει στην διαμόρφωση της συνιστώσας τεχνολογίας, είναι η ικανότητα του συστήματος να ανταπεξέρχεται στο εύρος των διακυμάνσεων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθώς και στις ανάγκες της ζήτησης (Maxim, 2014). Τέλος η τεχνολογική ωριμότητα αποκαλύπτει το στάδιο ανάπτυξης της εκάστοτε πηγής, είναι ένας ποιοτικός δείκτης που αποκαλύπτει το στάδιο τεχνολογικής εξέλιξης της εκάστοτε τεχνολογίας. Οι όροι "χαμηλή τεχνολογική ωριμότητα" και "υψηλή τεχνολογική ωριμότητα" αναφέρονται σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της τεχνολογίας. Η χαμηλή τεχνολογική ωριμότητα αναφέρεται σε μια τεχνολογία που βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, πιθανώς ακόμη σε φάση έρευνας και ανάπτυξης. Σε αυτό το στάδιο, η τεχνολογία μπορεί να μην έχει ακόμη επιτύχει πλήρως τους

στόχους της, να έχει περιορισμένη απόδοση, να αντιμετωπίζει τεχνικά προβλήματα ή να μην έχει εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή τεχνολογική ωριμότητα αναφέρεται σε μια τεχνολογία που έχει περάσει από αρκετά στάδια ανάπτυξης και έχει επιτύχει υψηλό επίπεδο ωριμότητας. Σε αυτό το στάδιο, η τεχνολογία έχει αντιμετωπίσει πολλά από τα αρχικά τεχνικά προβλήματα, έχει επιτύχει αξιόπιστη λειτουργία, έχει υποστεί βελτιώσεις και αναβαθμίσεις που την καθιστούν αξιόπιστη, αποδοτική και συμβατή με τις απαιτήσεις των χρηστών (Manirambona, Talai and Kimutai, 2022).

Για την αξιολόγηση του δείκτη χρησιμοποιήθηκαν λεκτικές μεταβλητές. Το εύρος αυτών αποτελείται από 5 λεκτικές διαβαθμίσεις "very low, low, medium, high, very high" με την χαμηλότερη συνεισφορά να βρίσκεται στο "very low" που αντιπροσωπεύει χαμηλή τεχνολογική ωριμότητα. Στην βέλτιστη τιμή βρίσκεται το "very high" όπου αντιπροσωπεύει τεχνολογίες με την μέγιστη τεχνολογική ωριμότητα (Doukas, Andreas and Psarras, 2007).

3.2.2 Οικονομία

Ο οικονομικός σύνθετος δείκτης έχει σημαντική συνεισφορά στην επιρροή της ολικής αιφορίας καθώς στις μέρες μας υπάρχει ανάγκη για πρόσβαση σε καθαρή ενέργεια για όλους. Για την αξιολόγηση του δείκτη συνυπολογίζονται οι τιμές του σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Ο δείκτης αυτός είναι συνδεδεμένος με τον προσδιορισμό εκτιμώμενης κερδοφορίας μιας ενεργειακής επένδυσης καθώς είναι ο λόγος του συνολικού κόστους προς την συνολική παραγωγή κατά την διάρκεια ζωής της (IEA, 2020). Ακόμα ένας δείκτης που συμβάλει στην οικονομία είναι οι ευκαιρίες εργασίας κατά την διάρκεια ζωής της πηγής ενέργειας (Czako, 2020). Σύμφωνα με τον διεθνή οργανισμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (IRENA, 2020) η παγκόσμια απασχόληση στον ενεργειακό τομέα έφτασε σχεδόν τα 58 εκατομμύρια το 2017, περίπου οι μισές από αυτές ήταν σε θέσεις εργασίας στις βιομηχανίες ορυκτών καυσίμων.

3.2.3 Κοινωνία

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη στην αξιολόγηση της ολικής αιφορίας, καθώς επιτρέπει την κατανόηση των κοινωνικών επιπτώσεων και προβλημάτων που συνδέονται με τη χρήση διάφορων πηγών παραγωγής ενέργειας. Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε αυτό το πεδίο τα τελευταία χρόνια, με περισσότερες από 1000 μελέτες που έχουν δημοσιευτεί σχετικά με την κοινωνική αποδοχή. Για την εκτίμηση του δείκτη κοινωνικής αποδοχής, έχουν χρησιμοποιηθεί τα αποτελέσματα από τρεις μεγάλες παγκόσμιες έρευνες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν. Η έρευνα του Maxim (2014), ανέλυσε την κοινωνική αποδοχή των διαφόρων πηγών παραγωγής ενέργειας και τις συνδέσεις τους με τις κοινωνικές προτεραιότητες.

Ακόμα ένας δείκτης με κοινωνικό αντίκτυπο είναι η υπαιτιότητα σε φαινόμενα θνησιμότητας καθώς και η συχνότητα ατυχημάτων. Τα ποσοστά θανάτων υπολογίζονται με βάση τους θανάτους από εργατικά ατυχήματα καθώς συμβάλει ενεργά στην σύνθεση του δείκτη η ατμοσφαιρική ρύπανση (Our World in Data, 2021).

Η συλλογή και ανάλυση αυτών των δεδομένων συμβάλλει στην αξιολόγηση της κοινωνικής αποδοχής των πηγών παραγωγής ενέργειας και μας επιτρέπει να κατανοήσουμε ποιες πηγές

ενέργειας έχουν υψηλή κοινωνική αποδοχή και ποιες αντιμετωπίζουν αντιδράσεις από το κοινό. Αυτή η πληροφορία είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μας βοηθά να επιλέξουμε τις κατάλληλες πρακτικές και τις τεχνολογίες που θα έχουν μεγαλύτερη αποδοχή από το κοινό και θα ελαχιστοποιήσουν τις κοινωνικές αντιδράσεις.

3.3 Σύνοψη δεικτών

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ονόματα, οι περιγραφές, οι μονάδες, τα κατώφλια τιμών και οι τύποι των βασικών δεικτών του μοντέλου. Ως τύπος των βασικών δεικτών αναφέρεται η βέλτιστη περιοχή του εκάστοτε δείκτη που παρουσιάζει την μέγιστη αιφορία, για παράδειγμα υπάρχουν δείκτες που παρουσιάζουν υψηλή αιφορία για μεγάλες τιμές (LB, Larger is Better) και άλλοι δείκτες που έχουν υψηλή αιφορία για μικρές τιμές (SB, Smaller is Better). Στην συνέχεια για τον ορισμό του εύρους των τιμών χρησιμοποιούνται κατώφλια τιμών αιφορίας με την τιμή B (best) να είναι το όριο των τιμών για τις οποίες ο δείκτης θεωρείται απολύτως αιφόρος και την τιμή W (Worst) που είναι το όριο μίας άλλης περιοχής τιμών που θεωρούνται απολύτως μη βιώσιμες. Για δείκτες LB που οι μεγάλες τιμές είναι πιο αιφόρες ισχύει ότι $B > W$, ενώ για δείκτες SB έχουμε $B < W$.

Τα κατώφλια τιμών σε κάθε δείκτη προκύπτουν από τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές. Για παράδειγμα σε δείκτες τύπου Larger is Better η τιμή Best προέκυψε ως η μέγιστη τιμή από όλες τις πηγές ενέργειας και αντίστοιχα το κατώφλι με τιμή Weak είναι η ελάχιστη τιμή. Αντίστροφα για δείκτες τύπου Small is Better η τιμή Best προέκυψε ως η ελάχιστη τιμή από όλες τις πηγές ενέργειας και αντίστοιχα το κατώφλι με τιμή Weak είναι η μέγιστη τιμή.

Πίνακας 1: Δείκτες αιφορίας πηγών ενέργειας

Δείκτης	Περιγραφή	Μονάδες	Κατώφλια	Επεξήγηση	Τύπος
1. Life cycle water consumption	Η κατανάλωση νερού σε κύκλους ζωής. Αναφέρεται το ποσό του νερού που καταναλώνεται και δεν επιστρέφει στην φύση. Μικρότερες τιμές προσφέρουν μεγαλύτερη βιωσιμότητα του δείκτη.	liters/MWh	B=0 W=11000	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
2. Life cycle water withdrawal	Ο όρος withdrawal αναφέρεται στην αφαίρεση νερού από υδάτινους πόρους είτε υπόγειους, είτε επιγειαίους, με αποτέλεσμα μετά την επεξεργασία του να επιστρέφει στην φύση σε μορφή κατάλληλη να επαναχρησιμοποιηθεί. Μικρότερες τιμές μεταφράζονται σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα του δείκτη.	liters/MWh	B=0 W=21000	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
3. CO ₂ emissions	Είναι το κύριο αέριο του θερμοκηπίου που σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας και έχει άμεση επίπτωση με το φαινόμενο της αύξησης της	gCO ₂ /kWh	B=4 W=1050	B= Best minimum sector value for this indicator.	SB

Δείκτης	Περιγραφή	Μονάδες	Κατώφλια	Επεξήγηση	Τύπος
	θερμοκρασίας του πλανήτη. Μικρότερες τιμές εκπομπών μεταφράζονται σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα του δείκτη.			W=Worst maximum sector value for this indicator.	
4. NO _x emissions	Οι καύσεις ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων εκπέμπουν οξείδια του αζώτου. Μικρότερες τιμές εκπομπών μεταφράζονται σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα του δείκτη.	NO _x /kWh	B=0 W=0.37	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
5. SO ₂ emissions	SO ₂ είναι υποπροϊόν της καύσης ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θειούχες ενώσεις. Είναι ένας σημαντικός ατμοσφαιρικός ρύπος. Μικρότερες τιμές εκπομπών μεταφράζονται σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα του δείκτη.	SO ₂ /kWh	B=0 W=0.79	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
6. Particulate Matter 2.5	Τα μικρά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2.5 μm προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων και έχουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Μικρότερες τιμές πού τείνουν στο μηδέν μεταφράζονται σε αυξημένο βαθμό βιωσιμότητας.	μm	B=0 W=35	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
7. Land use	Χρησιμοποιούμενη έκταση εδάφους. Μεγάλες τιμές του δείκτη Land use μας δείχνουν λιγότερο αποτελεσματική χρήση της Γης και προκύπτει μικρότερος βαθμός βιωσιμότητας.	m ² /MWh	W=1527 B=0.3	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
8. Reserves/Consumption	Αποθέματα ορυκτών πόρων συσχετίζονται με την κατανάλωση πόρων ανά παραγόμενη ενέργεια και προκύπτουν αποθέματα πόρων μεταφρασμένα σε ποσά ενέργειας. Μεγαλύτερες τιμές του δείκτη μεταφράζονται σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα.	kWh	B=9·10 ¹² W=2·10 ¹²	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst minimum sector value for this indicator.	LB
9. Acceptability	Κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας χωρίζεται σε τρεις διαβαθμίσεις. Μεγαλύτερη αποδοχή σημαίνει καλύτερη προσφορά στην ολική βιωσιμότητα.	Λεκτικά καθορισμένος δείκτης	B=High W=Low	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst minimum sector value for this indicator.	LB
10. Mortality & accidents	Τα ποσοστά θανάτων από πηγές ενέργειας μετρούνται ως ο αριθμός	Θανάτου/TWh	B=0.02 W=32.7	B= Best minimum	SB

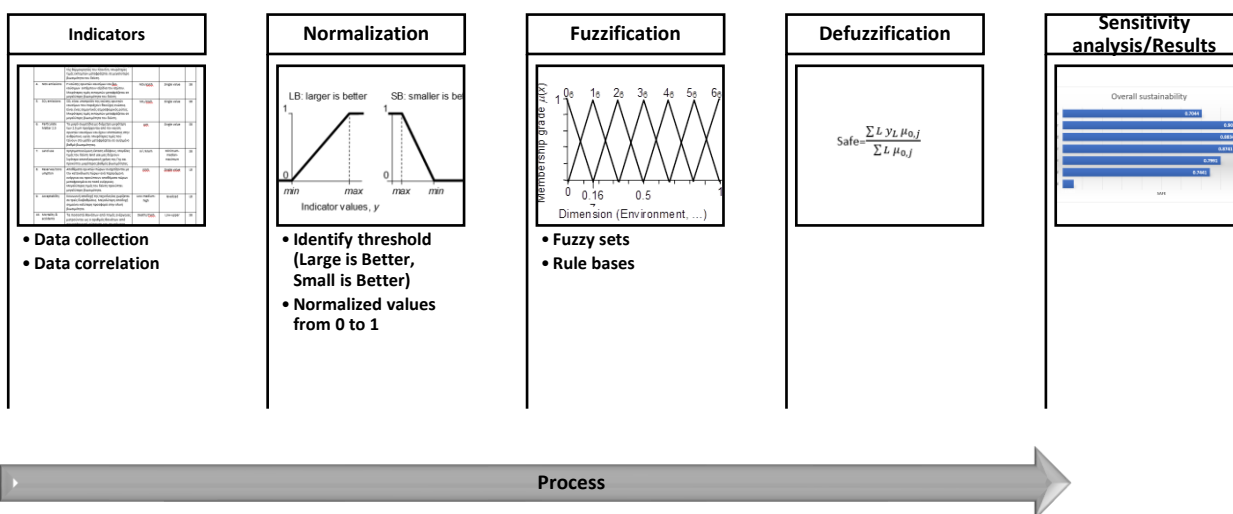
Δείκτης	Περιγραφή	Μονάδες	Κατώφλια	Επεξήγηση	Τύπος
	θανάτων από ατμοσφαιρική ρύπανση και ατυχήματα ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας. Μικρότερες τιμές προσφέρουν θετική προσφορά στην ολική βιωσιμότητα.			sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	
11. Efficiency	Απόδοση συστήματος είναι ο λόγος παραγόμενης ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας προς την προσφερόμενη ενέργεια. Μεγαλύτερες τιμές του δείκτη προσφέρουν θετική προσφορά στην ολική βιωσιμότητα.	Ποσοστό	B=90 W=11	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst minimum sector value for this indicator.	LB
12. Capacity Factor	Συντελεστής καθαρής χωρητικότητας είναι ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μια δεδομένη χρονική περίοδο προς τη θεωρητική μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Μεγαλύτερες τιμές του δείκτη προσφέρουν θετική προσφορά στην ολική βιωσιμότητα.	Ποσοστό	B=90 W=25	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst minimum sector value for this indicator.	LB
13. Capability to response to demand	Ικανότητα ανταπόκρισης, καθορίζει την ικανότητα του πόσο γρήγορα ή πόσο αργά μπορεί να ανταποκριθεί η τεχνολογία στη μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η άμεση ανταπόκριση προσφέρει θετικά στοιχεία βιωσιμότητας της τεχνολογίας.	Λεκτικά καθορισμένος δείκτης	B=Rapid W=Slow	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst minimum sector value for this indicator.	LB
14. Technology maturity	Τεχνολογική ωριμότητα αποκαλύπτει το στάδιο ανάπτυξης της εκάστοτε τεχνολογίας. Δείκτης με τρεις διαβαθμίσεις. Οι μικρότερες τιμές είναι οι βέλτιστες.	Λεκτικά καθορισμένος δείκτης	B=Very Low W=Very High	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
15. LCOE	Levelized Cost of Electricity είναι το πηλίκο του συνολικού κόστους προς την συνολική παραγωγή. Μικρότερες τιμές καθορίζουν μεγαλύτερη θετική προσφορά στην τεχνολογία.	USD/MWh	B=51 W=134	B= Best minimum sector value for this indicator. W=Worst maximum sector value for this indicator.	SB
16. Job opportunities	Ο δείκτης Ευκαιρίες Εργασίας συσχετίζεται με τον αριθμό των θέσεων εργασίας που δημιουργεί η εκάστοτε οντότητα. Μεγαλύτερες τιμές έχουν θετικό αντίκτυπο στην	Θέσεις εργασίας το χρόνο/MW	B=20.4 W=2.5	B= Best maximum sector value for this indicator. W=Worst	LB

Δείκτης	Περιγραφή	Μονάδες	Κατώφλια	Επεξήγηση	Τύπος
	ολική αειφορία, προσφέρουν βελτίωση στην οικονομία και μείωση της ανεργίας.			minimum sector value for this indicator.	

4 Μεθοδολογία

4.1 Επισκόπηση μοντέλου

Η χρήση ασαφούς λογικής χρησιμοποιείται εκτενώς για την περιγραφή καταστάσεων που σχετίζονται με την ποσοτικοποίηση της πληροφορίας περιγράφοντας την λεκτικά. Η ασαφή λογική είναι μια επέκταση της κλασικής Αριστοτέλειας λογικής όπου μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής με κάποιο βαθμό αλήθειας και όχι αυστηρά αληθής ή ψευδής. Η ιδέα αυτή αποτέλεσε επανάσταση στην θεωρία της λογικής καθώς επέκτεινε τα όρια ενός μοντέλου αληθούς - ψευδούς ή 0 - 1 που κυριαρχούσε για 2500 χρόνια. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιούμε για την αξιολόγηση της ενεργειακής βιωσιμότητας των πηγών είναι το μοντέλο SAFE χρησιμοποιώντας δείκτες εισροών μεταφρασμένους σε μοντέλα ασαφούς λογικής όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Τα δεδομένα για κάθε ενεργειακή πηγή βρίσκονται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4: Βήματα του μοντέλου: συλλογή δεδομένων, κανονικοποίηση, ασαφοποίηση, αποσαφήνιση, ανάλυση ευαισθησίας.

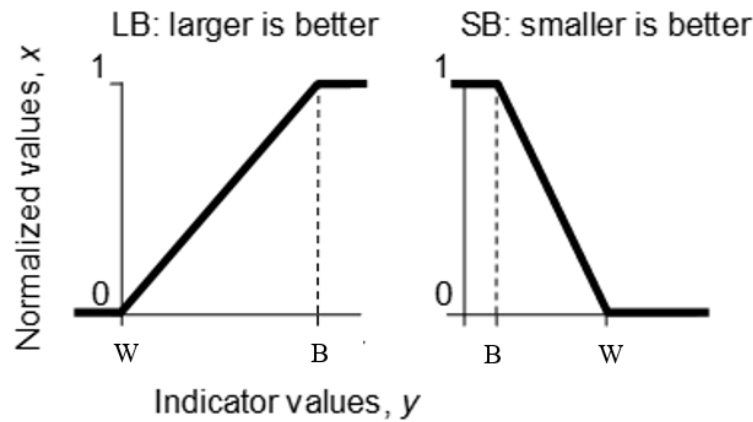
4.2 Κανονικοποίηση δεδομένων

Για την σύγκριση δεικτών με διαφορετικές μονάδες που συμβάλουν στην ολική αιφορία χρησιμοποιούμε την μέθοδο της κανονικοποίησης, μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ πλήρως βιώσιμων τιμών και μη βιώσιμων τιμών σε αδιάστατο εύρος τιμών που κυμαίνονται μεταξύ μηδέν έως ένα. Με τιμές 1 αντιπροσωπεύονται οι δείκτες με πλήρης βιώσιμη αξία και με τιμές 0 οι μη βιώσιμοι δείκτες, όλες οι ενδιάμεσες τιμές δεικτών κανονικοποιούνται με γραμμική παρεμβολή. Η κανονικοποίηση χωρίζεται σε κατώφλια τιμών όπου ανάλογα με τον δείκτη

καθορίζονται σε κατηγορίες. Δείκτες όπως η απόδοση έχουν υψηλή αειφορία για μεγάλες τιμές του δείκτη (LB) αντίστοιχα δείκτες όπως οι εκπομπές CO₂ έχουν υψηλή αειφορία για μικρές τιμές του δείκτη (SB) (Grigoroudis *et al.*, 2021). Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Χαρακτηριστικά μια τιμή δείκτη y κανονικοποιείται σε κλίμακα $[0, 1]$ με βάση τα κατώφλια B και W του Πίνακα 1 σε μία τιμή x σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$LB: x = \begin{cases} 0, y \leq W \\ \frac{y-W}{B-W}, W < y < B \\ 1, y \geq B \end{cases} \quad SB: x = \begin{cases} 1, y \leq B \\ \frac{y-W}{B-W}, B < y < W \\ 0, y \geq W \end{cases}$$

Η γραφική αναπαράσταση των σχέσεων απεικονίζεται στο Σχ. 5 όπου τα κατώφλια U και S κάθε δείκτη καθορίζονται από πρότυπα ή ευρέως αποδεκτές αρχές. Σε αρκετές περιπτώσεις όταν δεν είναι διαθέσιμα καθορίζονται από την κοινή λογική.



Σχήμα 5: Κανονικοποίηση για δείκτες τύπου LB και SB. Οι τιμές W και B αντιπροσωπεύουν κατώφλια που χωρίζουν το πεδίο τιμών σε περιοχές αειφορίας και μη βιωσιμότητας.

Μετά την κανονικοποίηση, όλοι οι δείκτες έχουν τιμές x στο διάστημα $[0, 1]$. Το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή του διαστήματος $[0, 1]$ σε υποσύνολα που περιγράφονται από λεκτικές μεταβλητές και ασαφή σύνολα.

4.3 Ασαφοποίηση

Στην πράξη όλες οι μετρήσεις μεγεθών περιέχουν κάποιο βαθμό ασάφειας, ελλιπή γνώση ή και σφάλματα. Παραδείγματα είναι οι ενδείξεις μετρητικών οργάνων, όπου η ένδειξη είναι μια συγκεκριμένη σαφής τιμή που παρουσιάζεται κατά την μέτρηση, ωστόσο περιέχει μια ασάφεια ως προς το σφάλμα του οργάνου και της πειραματικής μέτρησης. Η μετατροπή των αριθμητικών τιμών σε ασαφή σύνολα και ενδιάμεσους βαθμούς συμμετοχής είναι γνωστή ως ασαφοποίηση. Η

βαθμονόμηση των κανονικοποιημένων τιμών διαχωρίστηκε σε τρία διαφορετικά επίπεδα ενεργειακής βιωσιμότητας. Η ασαφής λογική επιτρέπει εναλλακτικούς τύπους συνάρτησης όπως τραπεζοειδής, τριγωνική, σιγμοειδής κ.α., ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής. Σε κάθε δείκτη x αποδίδουμε βαθμούς συμμετοχής σε τρία ασαφή σύνολα που συμβολίζουμε 0_2 , 1_2 και 2_2 και περιγράφονται στο Σχ. 4a. Ο δείκτης 2_2 περιγράφει το μέγιστο από τα σύνολα αυτά. Το σύνολο 0_2 περιλαμβάνει τη χαμηλότερη τιμή αιφορίας 0 και με μικρότερη συμμετοχή άλλες χαμηλές τιμές αιφορίας από 0 έως 0.6. Το σύνολο 1_2 έχει ενδιάμεσες τιμές από 0 έως 1 με κορυφή στο 0.6 και το 2_2 αντιστοιχεί στις μέγιστες τιμές αιφορίας από 0.6 έως 1 με κορύφωση στην 1. Για παράδειγμα ο δείκτης efficiency για την πηγή ηλιακής ενέργειας έχει 15% απόδοση με κανονικοποιημένη τιμή 0.1875 (Σχ. 6a), τότε η τιμή αυτή ανήκει S

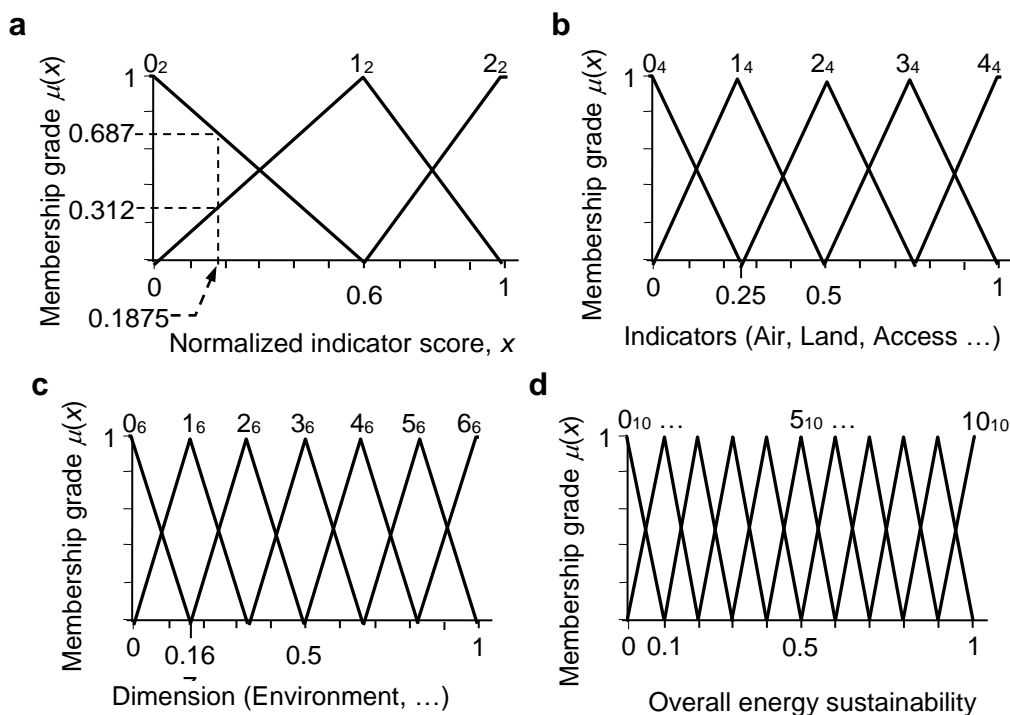
στο σύνολο 0_2 με συνάρτηση συμμετοχής $\mu_0(0.1875)=(0.1875-0.6)/(0-0.6)=0.6875$,

στο σύνολο 1_2 με βαθμό συμμετοχής $\mu_1(0.1875)=(0.1875-0)/(0.6-0)=0.3125$

και στο σύνολο 2_2 με βαθμός συμμετοχής $\mu_2(0.1875)=0$.

Για συντομία τις συναρτήσεις συμμετοχής των συνόλων i_2 τις συμβολίζουμε μ_i αντί μ_{i2} .

Πιο σύνθετες μεταβλητές περιγράφονται με περισσότερα ασαφή σύνολα. Για τις συνιστώσες Νερό, Αέρας, Έδαφος, Κοινωνία, Τεχνολογία, Οικονομία χρησιμοποιούμε 5 ασαφή σύνολα από 0_4 έως 4_4 (Σχ. 6b) και για τις διαστάσεις Περιβάλλον και Άνθρωπος χρησιμοποιούμε 7 ασαφή σύνολα από 0_6 έως 6_6 (Σχ. 6c). Τέλος ο συνολικός δείκτης ενεργειακής αιφορίας SAFE χρησιμοποιεί 11 ασαφή σύνολα 0_{10} , 1_{10} , ..., 10_{10} (Σχ. 6d).



Σχήμα 6: Συναρτήσεις συμμετοχής για διάφορα ασαφή σύνολα απλών και σύνθετων δεικτών.

4.4 Βάσεις κανόνων

Η χρήση ασαφών κανόνων για την συγκέντρωση στοιχείων σε σύνθετες μεταβλητές είναι αναγκαία. Τα ακόλουθα παραδείγματα περιέχουν όλα τα επίπεδα ιεραρχίας για την σαφή επεξήγηση του μοντέλου.

Κανόνας 1: Αν η κατανάλωση νερού είναι 0_2 και η αφαίρεση νερού από υδάτινους πόρους είναι 2_2 τότε ο δείκτης Νερό θα είναι 2_4

Κανόνας 2: Αν ο Αέρας είναι 4_4 , το Έδαφος είναι 2_4 και το Νερό είναι 2_4 τότε το περιβάλλον θα είναι 4_6

Κανόνας 3: Αν το περιβάλλον είναι 2_6 και ο Άνθρωπος έχει τιμή 4_6 τότε η ολική ενεργειακή αειφορία θα είναι 5_{10}

Παρατηρείται πως ο κανόνας 3 περιέχει 2 μεταβλητές εισόδου και κάθε μεταβλητή προκύπτει από 5 ασαφή σύνολα με αποτέλεσμα η δυνατότητα συσχέτισης να περιλαμβάνει $5^2=25$ κανόνες για την περιγραφή όλων των δυνατών συνδυασμών των δύο εισόδων από τις οποίες προκύπτει ως έξοδος η ολική αειφορία. Με στόχο την απλοποίηση του μοντέλου ακολουθήσαμε τη μέθοδο δημιουργίας βάσεων κανόνων που αναπτύχθηκε στο βιβλίο Phillis and Kouikoglou (2009) και συνοψίζεται στη συνέχεια:

1. Ορισμός της βαρύτητας σημαντικότητας w_i του εκάστοτε δείκτη σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες με βαθμό συνεισφοράς στην επιρροή της τιμής εξόδου.
2. Υπολογισμός του σταθμισμένου αθροίσματος βαρών και ασαφών συνόλων π.χ.

$$\sigma = w_1 (\text{ασαφές σύνολο εισόδου 1}) + w_2 (\text{ασαφές σύνολο εισόδου 2}) + \dots$$

3. **Όσο μεγαλύτερα είναι τα επίπεδα αειφορίας των εισόδων, τόσο μεγαλύτερο είναι το σ και τόσο μεγαλύτερη είναι η αειφορία της εξόδου.** Μπορεί επομένως να οριστεί μία αντιστοιχία κάθε τιμής σ με κάποιο ασαφές σύνολο της εξόδου χρησιμοποιώντας μία **αύξουσα συνάρτηση**.
4. Συνεπώς, κάθε ασαφές σύνολο της εξόδου αντιστοιχεί σε μία ή περισσότερες **διαδοχικές τιμές σ** . Συνεπώς αρκεί να αποθηκεύεται η μέγιστη τιμή του σ που αντιστοιχεί σε κάθε ασαφές σύνολο.

Σύμφωνα με το παράδειγμα ο Κανόνας 3 που παρουσιάστηκε πιο πάνω έχει $\sigma = 2+4=6$. Επειδή οι εισοδοί περιγράφονται με ασαφή σύνολα $0_6, 1_6, \dots, 6_6$, η χαμηλότερη τιμή σ που μπορεί να προκύψει είναι $0+0=0$ και η μεγαλύτερη είναι $6+6=12$. Ο Κανόνας 3 με $\sigma=6$ έχει μία **ενδιάμεση τιμή 6/12**. Η έξοδος (Συνολική αειφορία) έχει ασαφή σύνολα $0_{10}, 1_{10}, \dots, 10_{10}$. Συνεπώς αποδίδεται σε αυτή την περίπτωση στην έξοδο το ασαφές σύνολο 5_{10} που είναι επίσης ενδιάμεσο. Με όμοιους συλλογισμούς συμπληρώνονται οι αντιστοιχίες των τιμών σ με ασαφή σύνολα. Οι αντιστοιχίες αυτές πρέπει να προσαρμοστούν με ορθό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό δεικτών εισόδου, τον τύπο των εισόδων αναφορικά με τα ασαφή σύνολα και τέλος το πλήθος ασαφών συνόλων που περιγράφουν την έξοδο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχέση διαβάθμισης των τιμών του σ από την μετατροπή κάθε ασαφούς συνόλου.

$$\text{Συνολική αειφορία (Overall sustainability)} = \begin{cases} 0_{10} & \sigma = 0,1 \\ 1_{10} & \sigma = 2 \\ 2_{10} & \sigma = 3 \\ 3_{10} & \sigma = 4 \\ 4_{10} & \sigma = 5 \\ 5_{10} & \sigma = 6 \\ 6_{10} & \sigma = 7 \\ 7_{10} & \sigma = 8,9 \\ 8_{10} & \sigma = 10 \\ 9_{10} & \sigma = 11 \\ 10_{10} & \sigma = 12 \end{cases}$$

Η βαρύτητα συμμετοχής είναι ισόποση για τις δυο συνιστώσες που συμβάλουν στην δημιουργία της συνολικής αειφορίας

$$\text{Ανθρώπινος παράγοντας (Human system)} = \begin{cases} 0_6 & \sigma = 0,1 \\ 1_6 & \sigma = 2,3 \\ 2_6 & \sigma = 4,5 \\ 3_6 & \sigma = 6,7 \\ 4_6 & \sigma = 8,9 \\ 5_6 & \sigma = 10,11 \\ 6_6 & \sigma = 12 \end{cases}$$

Για την σύνθεση του Ανθρώπινου παράγοντα συμβάλουν οι συνιστώσες Τεχνολογία, Κοινωνία και Οικονομία με ίσο βαθμό συνεισφοράς.

$$\text{Περιβάλλον (Environment)} = \begin{cases} 0_6 & \sigma = 0,1,2 \\ 1_6 & \sigma = 3,4 \\ 2_6 & \sigma = 5,6 \\ 3_6 & \sigma = 7,8,9 \\ 4_6 & \sigma = 10,11,12 \\ 5_6 & \sigma = 14 \\ 6_6 & \sigma = 16 \end{cases}$$

Η διάσταση Περιβάλλον περιλαμβάνει εισόδους όπως νερό και έδαφος με ίση συνεισφορά ενώ η συνιστώσα Αέρας έχει διπλάσιο βάρος καθώς σύμφωνα με την βιβλιογραφία συμβάλει σημαντικά στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

$$\text{Αέρας (Air)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1,2 \\ 1_4 & \sigma = 3,4 \\ 2_4 & \sigma = 5,6 \\ 3_4 & \sigma = 7,8 \\ 4_4 & \sigma = 9,10 \end{cases}$$

Η συνιστώσα Αέρας σχηματίζεται από συμμετοχή δεικτών όπως οξείδια του θείου, μικρόσωματίδια, οξείδια του αζώτου και με διπλάσια βαρύτητα σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες συμβάλει ο δείκτης διοξείδιο του άνθρακα.

$$\text{Νερό (Water)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 2 \\ 2_4 & \sigma = 3 \\ 3_4 & \sigma = 4,5 \\ 4_4 & \sigma = 6 \end{cases}$$

Για την συνιστώσα Νερό που διαμορφώνεται από δύο δείκτες, με τον δείκτη κατανάλωση νερού να συμβάλει με μεγαλύτερη βαρύτητα καθώς σε αυτή την περίπτωση έχουμε πλήρη εξάντληση του πόρου με αποτέλεσμα να μην επιστρέφει στο περιβάλλον.

$$\text{Έδαφος (Land)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 2 \\ 2_4 & \sigma = 3 \\ 3_4 & \sigma = 4,5 \\ 4_4 & \sigma = 6 \end{cases}$$

Η συνιστώσα έδαφος, με εισόδους τα αποθέματα ορυκτών πόρων έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με την δεύτερη είσοδο την χρησιμοποιούμενη έκταση γης.

$$\text{Κοινωνία (Social)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 2 \\ 2_4 & \sigma = 3 \\ 3_4 & \sigma = 4,5 \\ 4_4 & \sigma = 6 \end{cases}$$

Η συνιστώσα κοινωνία αποτελείται από κοινωνική αποδοχή καθώς και την θνησιμότητα. Η δεύτερη συνιστώσα συμβάλει με μεγαλύτερο βαθμό και αντικατοπτρίζει την συχνότητα ατυχημάτων.

$$\text{Οικονομία (Economy)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 2 \\ 2_4 & \sigma = 3 \\ 3_4 & \sigma = 4,5 \\ 4_4 & \sigma = 6 \end{cases}$$

Η συνιστώσα οικονομία έχει δύο εισόδους, τον δείκτη ευκαιρίες εργασίας και με μεγαλύτερη συμμετοχή τον δείκτη σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

$$\text{Τεχνολογία (Technology)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 3 \\ 2_4 & \sigma = 4,5 \\ 3_4 & \sigma = 6,7 \\ 4_4 & \sigma = 8 \end{cases}$$

Η τελευταία συνιστώσα είναι η τεχνολογία με τέσσερις εισόδους όπου συμβάλουν ισόποσα.

4.5 Ασαφή συμπέρασμα και αποσαφήνιση

Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής σε πραγματικά προβλήματα επιτρέπει την προσομοίωση μιας σύνθετης πραγματικής κατάστασης που προσδιορίζεται με κάποιο βαθμό αβεβαιότητας. Με την διαδικασία αποσαφήνισης το τελικό ασαφές αποτέλεσμα μετατρέπεται σε μία συγκεκριμένη, σαφή τιμή. Τα δύο αυτά βήματα περιγράφονται παρακάτω.

Θεωρούμε μια βάση κανόνων με εισόδους $i=1, 2, \dots, n$ και έξοδο 0. Έστω κανόνας j :

αν η είσοδος 1 είναι $L_{1,j}$ και ... και η είσοδος n είναι $L_{n,j}$ **τότε** η έξοδος 0 είναι $L_{0,j}$.

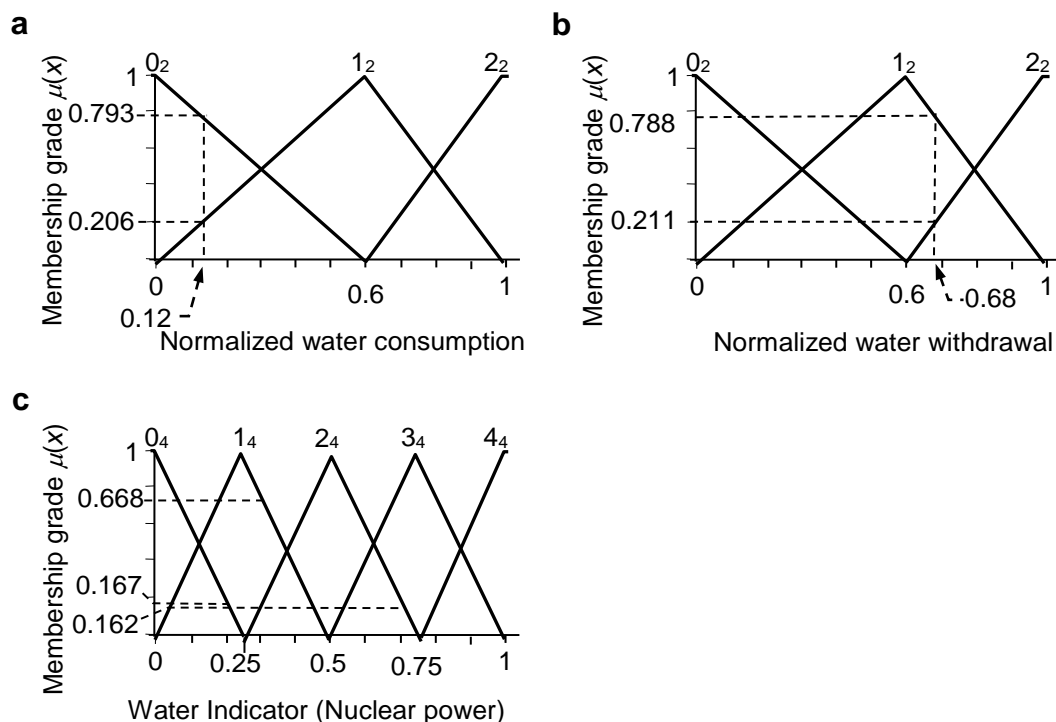
όπου $L_{i,j}$ είναι το ασαφές σύνολο εισόδου i στον κανόνα j και το $L_{0,j}$ είναι το αντίστοιχο ασαφές σύνολο της εξόδου. Ο βαθμός συμμετοχής στην έξοδο ισούται με το γινόμενο όλων των εισόδων

$$\mu_{0,j} = \mu_{1,j} \cdot \mu_{2,j} \cdot \dots \cdot \mu_{n,j}$$

όπου $\mu_{i,j}$ ο βαθμός συμμετοχής της εισόδου i στο ασαφές σύνολο $L_{i,j}$.

Για παράδειγμα ο σύνθετος δείκτης Νερό για την πυρηνική ενέργεια προκύπτει ως εξής:

- Η κατανάλωση νερού έχει κανονικοποιημένη τιμή 0.12. Στο σύνολο 0_2 έχει βαθμό συμμετοχής 0.793, στο σύνολο 1_2 έχει 0.206 και στο 2_2 έχει βαθμό συμμετοχής 0 (Σχ. 7a).
- Ο δείκτης αφαίρεση νερού από υδάτινους πόρους έχει κανονικοποιημένη τιμή 0.68. Για το σύνολο 0_2 ο βαθμός συμμετοχής είναι 0, για το σύνολο 1_2 0.211 και για 2_2 0.788 (Σχ. 7b).



Σχήμα 7: Συναρτήσεις συμμετοχής για τα ασαφή σύνολα δεικτών water consumption, water withdrawal και σύνθετου δείκτη water για την πηγή πυρηνικής ενέργειας.

Σύμφωνα με την εξίσωση της προηγούμενης παραγράφου,

$$\text{Νερό (Water)} = \begin{cases} 0_4 & \sigma = 0,1 \\ 1_4 & \sigma = 2 \\ 2_4 & \sigma = 3 \\ 3_4 & \sigma = 4,5 \\ 4_4 & \sigma = 6 \end{cases}$$

Η βάση κανόνων για το νερό αντιστοιχεί σε $3^2 = 9$ κανόνες. Επειδή οι δύο είσοδοι ανήκουν μόνο σε δύο ασαφή σύνολα, ενεργοποιούνται μόνο $2^2 = 4$ κανόνες

- α) Αν η κατανάλωση είναι 0_2 με βαθμό συμμετοχής 0.793 και η αφαίρεση 1_2 με βαθμό 0.211 τότε το Νερό είναι ($\sigma = 0+1 = 1 \Rightarrow$ από την εξίσωση) **0_4 με βαθμό συμμετοχής $0.793 \times 0.211 = 0.167$**
- β) Αν η κατανάλωση είναι 0_2 με βαθμό συμμετοχής 0.793 και η αφαίρεση 2_2 με βαθμό 0.788 τότε το Νερό είναι ($\sigma = 0+2 = 2 \Rightarrow$ από την εξίσωση) **1_4 με βαθμό συμμετοχής $0.793 \times 0.788 = 0.625$**
- γ) Αν η κατανάλωση είναι 1_2 με βαθμό συμμετοχής 0.206 και η αφαίρεση 1_2 με βαθμό 0.211 τότε το Νερό είναι ($\sigma = 1+1 = 2 \Rightarrow$ από την εξίσωση) **1_4 με βαθμό συμμετοχής $0.206 \times 0.211 = 0.043$**
- δ) Αν η κατανάλωση είναι 1_2 με βαθμό συμμετοχής 0.206 και η αφαίρεση 2_2 με βαθμό 0.788 τότε το Νερό είναι ($\sigma = 1+2 = 3 \Rightarrow$ από την εξίσωση) **2_4 με βαθμό συμμετοχής $0.206 \times 0.788 = 0.162$**

Σε μία βάση κανόνων συμβαίνει πολλοί διαφορετικοί κανόνες να αποδίδουν στην έξοδο το ίδιο ασαφές σύνολο. Στο ανωτέρω παράδειγμα οι κανόνες β και γ δίνουν έξοδο που ανήκει στο σύνολο **14**. Γενικότερα, όταν αρκετοί κανόνες αποδίδουν στην έξοδο το ίδιο ασαφές σύνολο L τότε ο συνολικός βαθμός συμμετοχής L υπολογίζεται από το άθροισμα των ατομικών βαθμών συμμετοχής

$$\mu_{0,j} = \sum_{j:L_{0,j}=L} \mu_{0,j}$$

Για το προηγούμενο παράδειγμα, το Νερό για την πυρηνική ενέργεια ανήκει στα ασαφή σύνολα

0_4 με βαθμό συμμετοχής $\mu_0(\text{Νερό}) = \mathbf{0.167}$

1_4 με βαθμό συμμετοχής $\mu_1(\text{Νερό}) = 0.625 + 0.043 = \mathbf{0.668}$

2_4 με βαθμό συμμετοχής $\mu_2(\text{Νερό}) = \mathbf{0.162}$

και στα 3_4 και 4_4 με βαθμούς $\mu_3(\text{Νερό}) = \mu_4(\text{Νερό}) = \mathbf{0}$

Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχ. 7c.

Αν η έξοδος της βάσης κανόνων χρησιμοποιείται ως είσοδος σε επόμενα στάδια ασαφούς λογικής, όπως συμβαίνει με το Νερό, τότε κάθε επόμενο στάδιο έχει δική του βάση κανόνων και επαναλαμβάνονται όλα τα ανωτέρω βήματα με τον ίδιο τρόπο όπως στο παράδειγμα.

Η τελική βάση κανόνων αφορά τον συνολικό δείκτη SAFE και τον εντάσσει στα ασαφή σύνολα $0_{10}, 1_{10}, 2_{10}, \dots, 10_{10}$ με κάποιους βαθμούς συμμετοχής. Η τιμή του SAFE υπολογίζεται χρησιμοποιώντας αποσαφήνιση ύψους και τις τιμές κορυφών:

$$\text{Safe} = \frac{\sum_L y_L \mu_{0,j}}{\sum_L \mu_{0,j}}$$

όπου y_L είναι η τιμή αειφορίας με το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής στο L. Για τα ασαφή σύνολα $0_{10}, 1_{10}, 2_{10}, \dots, 10_{10}$ έχουμε $y_0=0, y_1=0.1, y_2=0.2, \dots, y_{10}=1$.

4.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Με τον όρο ανάλυση ευαισθησίας εννοούμε τον υπολογισμό της μεταβολής που θα επιφέρει στην τιμή κάποιας συνάρτησης ή στην έξοδο ενός συστήματος η μεταβολή της τιμής μίας παραμέτρου κάθε φορά, με στόχο την διερεύνηση του βαθμού επίδρασης κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση μας ο δείκτης εκτίμησης ολικής αειφορίας έχει συνολική πληροφορία για τους επί μέρους δείκτες. Η συγκεκριμένη πληροφορία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για περεταίρω ανάλυση και βελτίωση του συστήματος καθώς όπως αναφέραμε προηγουμένως δεν έχουν όλες οι βάσεις κανόνων ίδια συνεισφορά στην είσοδο με την έξοδο. Υπάρχουν δείκτες που με μία βελτίωση θα αύξαναν περισσότερο την ολική αειφορία από όσο άλλοι δείκτες με την ίδια βελτίωση. Στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας είναι να αποκαλύψει τους δείκτες που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την εκάστοτε τεχνολογία με μικρές μεταβολές στις τιμές τους. Επομένως είναι σημαντικό για τους υπεύθυνους λήψεων αποφάσεων να γνωρίζουν και τους δύο τύπους πληροφοριών σχετικά με την λήψη αποφάσεων.

Έστω $\text{Safe}(x_1, \dots, x_c, \dots)$ η συνάρτηση ενεργειακής βιωσιμότητας, όπου x_c είναι η κανονικοποιημένη τιμή του δείκτη c. Η ανάλυση ευαισθησίας εφαρμόζεται με την εισαγωγή διαταραχής δ στις μεταβλητές εισόδου και διερεύνηση της τιμής εξόδου. Η επακόλουθη αύξηση της συνολικής αειφορίας του συστήματος εξαρτάται από τον δείκτη c όπου δίνεται από την διαφορά D_c :

$$D_c = \text{Safe}(x_1, \dots, x_c + \delta, \dots) - \text{Safe}(x_1, \dots, x_c, \dots)$$

για εύρος τιμών $0 < x_c < x_c + \delta < 1$. Για την λήψη αποφάσεων θα χρειαστεί μια συνάρτηση που προσδιορίζει την απόκριση του αποτελέσματος με την μεταβολή του δ . Η βελτίωση δεικτών έχει κάποιο κόστος. Το κόστος αναβάθμισης ενός δείκτη είναι αύξουσα συνάρτηση του x_c και μάλιστα έχει μεγάλη αύξηση όταν κάποιος δείκτης με υψηλή αειφορία $x_c \approx 1$ παρά όταν προσπαθεί να βελτιώσει δείκτες με χαμηλή αειφορία $x_c \approx 0$. Μία τέτοια συνάρτηση που προτάθηκε από τους Grigoroudis et al. (2021) και Phillis and Kouikoglou (2009) έχει μορφή

$$K_c(x_c) = a_c - b \ln(1 - x_c)$$

όπου a_c και b κατάλληλες παράμετροι ώστε η $K_c(x_c)$ να είναι καλή προσέγγιση του πραγματικού κόστους διατήρησης του δείκτη c στην τιμή x_c . Στις δημοσιεύσεις εκείνες αποδείχθηκε ότι όταν το συνολικό κόστος βελτίωσης είναι πεπερασμένο, τότε η μέγιστη αύξηση της αειφορίας επιτυγχάνεται βελτιώνοντας **πρώτα** δείκτες που εμφανίζουν **αυξημένες** τιμές S_c :

$$S_c = D_c (1 - x_c)$$

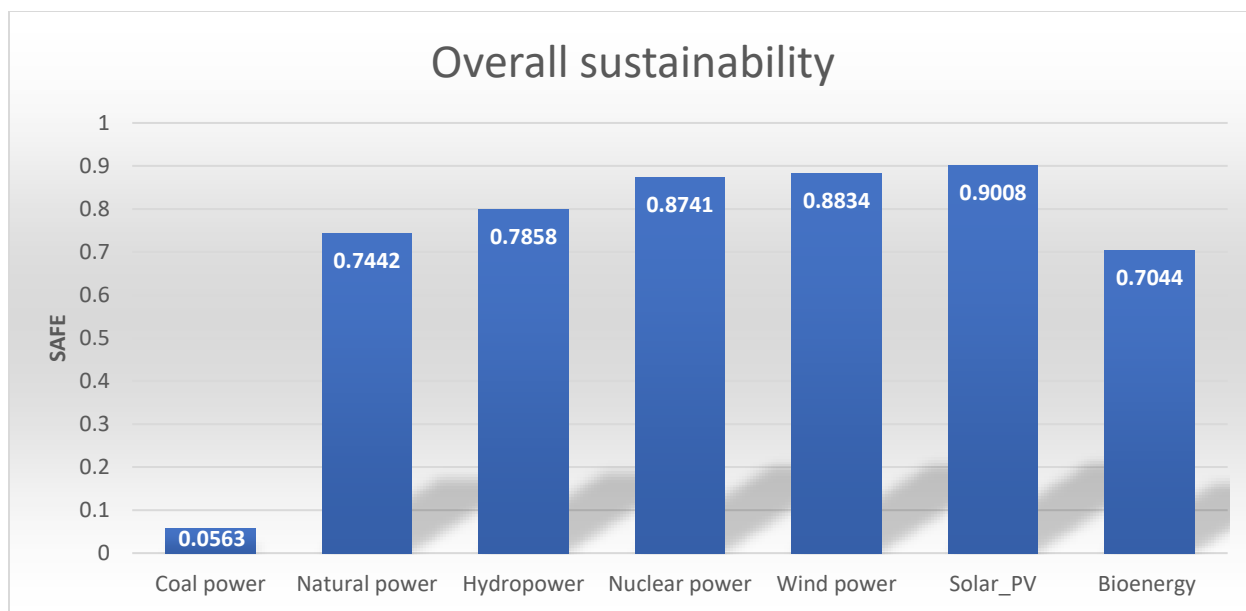
Η διαφορά $(1 - x_c)$ είναι η απόσταση του c από την περιοχή ασφαλείας και επίσης ένα μέτρο αξιολόγησης για την βελτίωση του δείκτη, για παράδειγμα όσο το $x_c < 1$ και $D_c > 0$, η ποσότητα θα είναι θετική και αναμένεται να αυξηθεί όσο το x_c τείνει στο μηδέν.

5 Αποτελέσματα

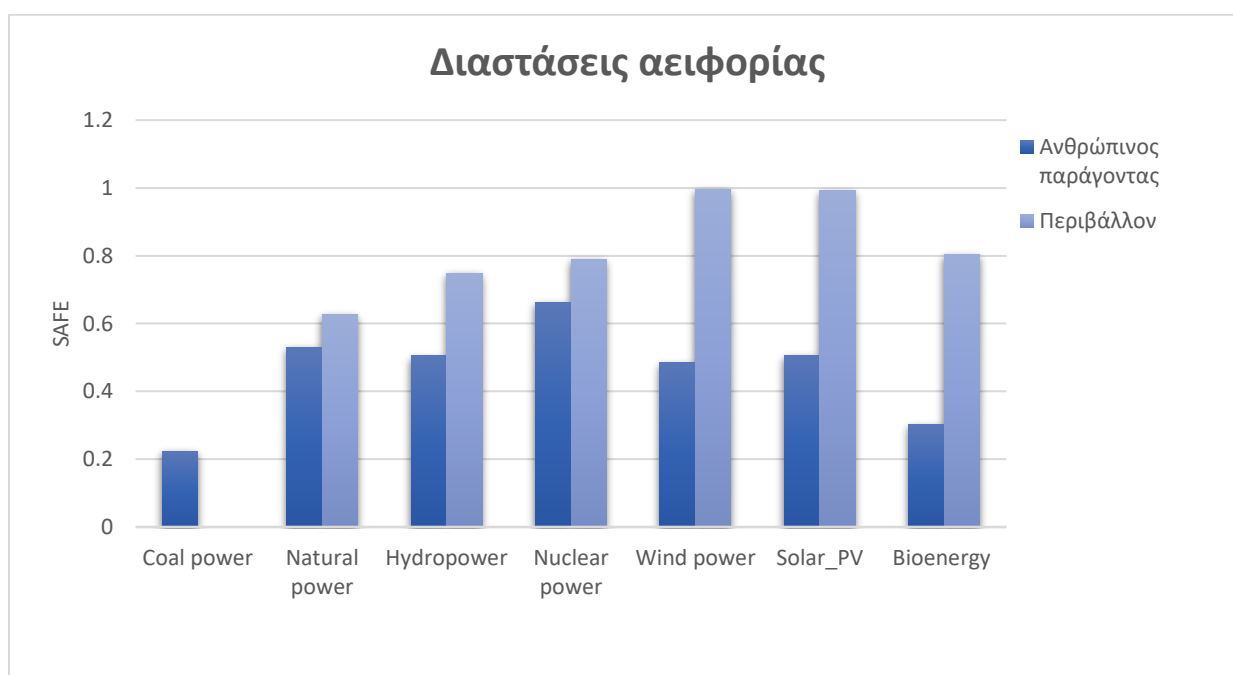
Στον Πίνακα 2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της συνολικής ενεργειακής αειφορίας κάθε πηγής ενέργειας όπως προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου SAFE που έχει αναπτυχθεί από τους (Kouloumpis, Kouikoglou and Phillis, 2008) και Phillis and Kouikoglou (2009). Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως υπάρχουν δείκτες που δεν προσδιορίζονται από μια τιμή, αλλά από εύρος τιμών με ελάχιστη και μέγιστη τιμή. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2 αντιπροσωπεύουν δείκτες με την ελάχιστη τιμή. Αναλύοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως οι ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή και αιολική ενέργεια παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αειφορία, με την ηλιακή ενέργεια να υπερισχύει. Τα ορυκτά καύσιμα και συγκεκριμένα η παραγωγή από πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει υψηλό βαθμό αειφορίας, βρίσκεται στην τρίτη θέση και ακολουθεί η αιολική ενέργεια. Στην συνέχεια η υδροηλεκτρική ενέργεια λαμβάνει την τέταρτη θέση και ακολουθεί με μικρή διαφορά η παραγωγή ενέργειας από φυσικό αέριο. Χαμηλότερα στην κλίμακα παρουσιάζονται τα βιοκαύσιμα. Τέλος, αναμένοντας η παραγωγή ενέργειας από άνθρακα να βρίσκεται αρκετά χαμηλά στην αξιολόγηση καθώς είναι αρκετά επιρρεπής στις εκπομπές ρύπων, ωστόσο ιδιαίτερη εντύπωση παρουσίασε το χάσμα μεταξύ των υπόλοιπων πηγών, με την τιμή της να τείνει προς το μηδέν.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα ανάλυσης SAFE για την χειρότερη τιμή του εύρους τιμών κάθε δείκτη.

Ενεργειακές πηγές	Συνολική αειφορία	Ανθρώπινος παράγοντας	Περιβάλλον
Coal power	0.0563	0.2237	0
Natural gas power	0.7442	0.5305	0.6284
Hydropower	0.7858	0.5054	0.7242
Nuclear power	0.8741	0.662	0.7899
Wind power	0.8834	0.4842	0.9967
Solar_PV	0.9008	0.5066	0.9933
Bioenergy	0.7044	0.3023	0.8036



Σχήμα 8: Διάγραμμα αποτελεσμάτων ολικής αειφορίας για ελάχιστες τιμές δεικτών.



Σχήμα 9: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κύριων διαστάσεων που διαμορφώνουν την ολική αειφορία

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου SAFE με τις ελάχιστες τιμές εύρους. Σε κάθε πηγή ενέργειας αναφέρονται οι κρίσιμότεροι δείκτες για την βελτιστοποίηση της ολικής αειφορίας.

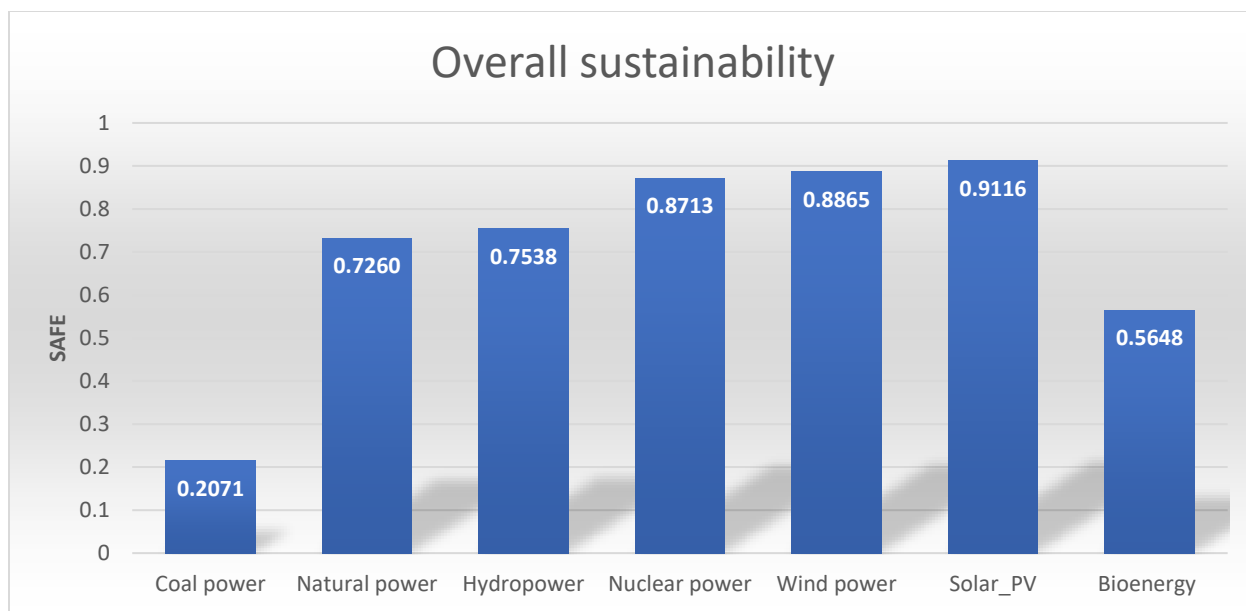
Πίνακας 3: Κρίσιμοι δείκτες προς βελτίωση

Ενεργειακές πηγές	Κρισιμότεροι δείκτες βελτιστοποίησης			
Coal power	Mortality	LCOE	Reserves of natural resources	Water withdrawal
Natural gas power	Reserves of natural resources	Job opportunities	CO2	LCOE
Hydropower	Water consumption	LCOE	Water withdrawal	Capacity factor
Nuclear power	Reserves of natural resources	Maturity	Capability to response to demand	Efficiency
Wind power	Capability to response to demand	Capacity factor	Job opportunities	Efficiency
Solar_PV	Efficiency	Capacity factor	Capability to response to demand	Maturity
Bioenergy	LCOE	Water consumption	Acceptability	Maturity

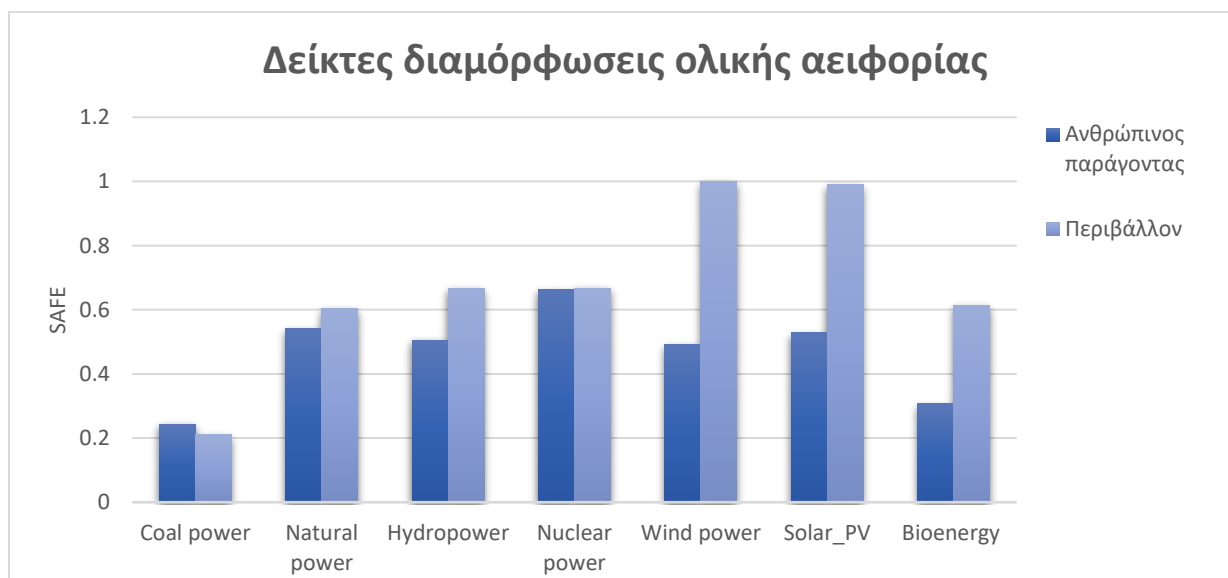
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4 αντιπροσωπεύουν δείκτες με το μέγιστο εύρος τιμών. Αναλύοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως οι ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή και αιολική ενέργεια εξακολουθούν να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αιφορία, με την ηλιακή ενέργεια να υπερσχύει. Τα ορυκτά καύσιμα και συγκεκριμένα η παραγωγή από πυρηνική ενέργεια παρουσιάζει υψηλό βαθμό αιφορίας και βρίσκεται στην τρίτη θέση με την αιολική ενέργεια να ακολουθεί. Στην συνέχεια η υδροηλεκτρική ενέργεια λαμβάνει την τέταρτη θέση και ακολουθεί με μικρή διαφορά η παραγωγή ενέργειας από φυσικό αέριο.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ανάλυσης SAFE για την πλέον αιφόρα τιμή του εύρους τιμών κάθε δείκτη.

Ενεργειακές πηγές	Συνολική αιφορία	Ανθρώπινος παράγοντας	Περιβάλλον
Coal power	0.2071	0.2323	0.2104
Natural gas power	0.7260	0.5318	0.6029
Hydropower	0.7538	0.5054	0.6663
Nuclear power	0.8713	0.6618	0.6667
Wind power	0.8865	0.4915	1.0000
Solar_PV	0.9116	0.5288	0.9899
Bioenergy	0.5648	0.3064	0.6133



Σχήμα 10: Διάγραμμα αποτελεσμάτων ολικής αειφορίας για μέγιστες τιμές δεικτών.



Σχήμα 11: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κύριων διαστάσεων που διαμορφώνουν την ολική αειφορία

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου SAFE με τις μέγιστες τιμές εύρους. Σε κάθε πηγή ενέργειας αναφέρονται οι κρίσιμότεροι δείκτες για την βελτιστοποίηση της ολικής αειφορίας.

Πίνακας 5: Κρίσιμοι δείκτες προς βελτίωση

Ενεργειακές πηγές	Κρισιμότεροι δείκτες βελτιστοποίησης			
Coal power	Reserves of natural resources	LCOE	Mortality	Water consumption
Natural gas power	Reserves of natural resources	Job opportunities	CO ₂	LCOE
Hydropower	Water withdrawal	LCOE	Capacity factor	Capability to response to demand
Nuclear power	Maturity	Capability to response to demand	Efficiency	Reserves of natural resources
Wind power	Capability to response to demand	Capacity factor	Efficiency	Job opportunities
Solar_PV	Efficiency	Capacity factor	Capability to response to demand	Maturity
Bioenergy	LCOE	Acceptability	Water withdrawal	Maturity

6 Συμπεράσματα

Σκοπός της μελέτης ήταν να προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση για την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ασαφή λογική.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5 παρατηρείται η διατήρηση της σειράς κατάταξης των πηγών, χρησιμοποιώντας τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές για δείκτες που προσδιορίζονται με εύρος τιμών. Ωστόσο παρατηρείται μεταβολή της μεταξύ τους σχετικής διαφοράς, για παράδειγμα σε ορισμένες τεχνολογίες βελτιώθηκε η τιμή της αειφορίας για μεγάλες τιμές του εύρους τιμών και σε κάποιες μειώθηκε. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρουσιάζει τη διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών και την επιρροή τους ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας παραγωγής ενέργειας, την κλίμακα απόδοση και την τεχνολογική ωριμότητα της εκάστοτε τεχνολογίας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι ανεξάντλητες στον πλανήτη μας παρουσιάζουν μέγιστη αειφορία με την ηλιακή ενέργεια να βρίσκεται στην πρώτη θέση και με μικρή διαφορά να ακολουθεί η αιολική ενέργεια. Στην τρίτη θέση ακολουθεί η πυρηνική ενέργεια με την υψηλότερη τιμή από τα ορυκτά καύσιμα, ακολουθώντας η υδροηλεκτρική ενέργεια και το φυσικό αέριο με μικρή διαφορά μεταξύ τους. Στην έκτη θέση βρίσκεται η βιοενέργεια, παρουσιάζοντας ραγδαία μείωση στην ολική της αειφορία για δείκτες με μέγιστο εύρος τιμών. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά οφείλεται στην δέσμευση μεγάλης έκτασης γης για μεγάλες παραγωγές ενέργειας καθώς και στο υψηλό κόστος κατασκευής και διαχείρισης. Τέλος στην 7 θέση βρίσκεται η παραγωγή ενέργειας από άνθρακα καθώς έκπληξη προκαλεί η μεγάλη διαφορά του αποτελέσματος μεταξύ χαμηλών και υψηλών τιμών για δείκτες με εύρος τιμών.

Η ανάλυση ευαισθησίας αναδεικνύει τους δείκτες που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις εκάστοτε τεχνολογίες με μικρές μεταβολές στις τιμές τους.

Με βάση τον Πίνακα 3, παρατηρείται ότι για όλα τα ορυκτά καύσιμα, ο κοινός κρίσιμος δείκτης που προτείνεται να βελτιωθεί είναι τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων που αναγνωρίζονται και είναι διαθέσιμα στον πλανήτη κατά την τρέχουσα χρονική περίοδο. Σε σύγκριση μεταξύ του Πίνακα 3 και του 5 για τα ορυκτά καύσιμα, ο δείκτης ενεργειακών αποθεμάτων συνεχίζει να χρήζει βελτίωση με την διαφορά στην πυρηνική ενέργεια να περνά στην δεύτερη θέση για μεγάλες τιμές. Σχετικά με τον άνθρακα, προτείνονται βελτιώσεις σε δύο δείκτες. Ο πρώτος δείκτης είναι το σταθμισμένο κόστος, που αναφέρεται στο κόστος που συνδέεται με την παραγωγή και τη χρήση άνθρακα. Η βελτίωση αυτού του δείκτη είναι απαραίτητη για τη μείωση των οικονομικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τον άνθρακα. Ο δεύτερος δείκτης που προτείνεται για βελτίωση είναι η θνησιμότητα. Η θνησιμότητα αναφέρεται στον ανθρώπινο παράγοντα και την υγεία που συνδέεται με την παραγωγή και τη χρήση άνθρακα. Η μείωση της θνησιμότητας αποτελεί σημαντικό στόχο για τη βελτίωση της υγείας και της ποιότητας ζωής. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας προτείνει και τη βελτίωση του δείκτη κατανάλωσης νερού για ελάχιστες τιμές εύρους και την αφαίρεση νερού από υδάτινους πόρους για μέγιστες τιμές εύρους. Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της βιώσιμης χρήσης των υδάτινων πόρων και της προστασίας τους.

Η τεχνολογία παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο ανήκει στα ορυκτά καύσιμα και όπως αναφέρθηκε προτείνεται από την ανάλυση ευαισθησίας ο δείκτης ενεργειακών αποθεμάτων για την βελτιστοποίηση της πηγής. Επιπλέον, άλλοι σημαντικοί δείκτες που προτείνονται για βελτίωση είναι οι ευκαιρίες εργασίας που προκύπτουν από τη χρήση του φυσικού αερίου ως πηγή ενέργειας, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από την παραγωγή και χρήση του φυσικού αερίου, καθώς και το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται με την παραγωγή ενέργειας από αυτήν την πηγή. Η βελτίωση αυτών των δεικτών συμβάλλει στην επίτευξη μιας πιο αποδοτικής, αειφόρου και οικονομικά βιώσιμης χρήσης του φυσικού αερίου ως πηγή ενέργειας. Οι ευκαιρίες εργασίας αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης του φυσικού αερίου, καθώς η ανάπτυξη και λειτουργία των σχετικών υποδομών δημιουργούν θέσεις εργασίας σε διάφορους τομείς, όπως η εξόρυξη, η μεταφορά και η παραγωγή ενέργειας. Επομένως, η βελτίωση του δείκτη ευκαιριών εργασίας συμβάλλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας και την προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης. Όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η μείωσή τους είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η παραγωγή ενέργειας από φυσικό αέριο συνήθως συνοδεύεται από χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα. Η βελτίωση του δείκτη εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα συμβάλλει στη μείωση του ανθρώπινου αποτυπώματος και την προστασία του περιβάλλοντος.

Για την υδροηλεκτρική ενέργεια, είναι γνωστό ότι απαιτούνται μεγάλα ποσά υδάτινων πόρων για την παραγωγή ενέργειας. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας, προτείνονται διάφοροι δείκτες που έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στην τεχνολογία.

Ο πρώτος δείκτης είναι η κατανάλωση και η χρήση νερού, που αναφέρεται στην ποσότητα υδάτινων πόρων που απαιτούνται για την παραγωγή ενέργειας μέσω της υδροηλεκτρικής τεχνολογίας. Η βελτίωση αυτών των δεικτών είναι σημαντική για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων και τη μείωση του αντίκτυπου στο περιβάλλον. Ένας άλλος σημαντικός δείκτης είναι το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αναφέρεται στο κόστος που συνδέεται με την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτίωση αυτού του δείκτη είναι σημαντική για τη μείωση των οικονομικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της τεχνολογίας υδροηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ο συντελεστής χωρητικότητας αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό δείκτη που προτείνεται προς βελτίωση για την υδροηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο δείκτης αναφέρεται στην ικανότητα των υδροηλεκτρικών συστημάτων να παράγουν και να διαθέτουν ενέργεια στη ζήτηση. Η βελτίωση του συντελεστή χωρητικότητας συνεπάγεται στην αύξηση της αξιοπιστίας και της ευελιξίας των υδροηλεκτρικών συστημάτων, προσφέροντας αποδοτικότερη ανταπόκριση στην ζήτηση ενέργειας.

Τέλος, η ικανότητα ανταπόκρισης στη ζήτηση αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό δείκτη προς βελτίωση για την υδροηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο δείκτης αναφέρεται στην ικανότητα των υδροηλεκτρικών συστημάτων να προσαρμόζονται στην μεταβαλλόμενη ζήτηση ενέργειας και να εξασφαλίζουν την απαραίτητη παραγωγή. Η βελτίωση αυτού του δείκτη συμβάλλει στη διασφάλιση της ευελιξίας και της αποδοτικότητας των υδροηλεκτρικών συστημάτων, επιτρέποντας την αποτελεσματική ανταπόκριση στις ανάγκες της αγοράς ενέργειας. Οι προτεινόμενοι δείκτες κατανάλωσης και χρήσης νερού, σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής

ενέργειας, συντελεστή χωρητικότητας και ικανότητας ανταπόκρισης στη ζήτηση αποτελούν κρίσιμους δείκτες που προτείνονται για βελτίωση στον τομέα της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχής βελτίωση αυτών των δεικτών συμβάλλει στην αειφορία και την αποδοτική χρήση των υδάτινων πόρων, ενώ ενισχύει την αξιοπιστία, την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα των υδροηλεκτρικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Με βάση αυτήν την ανάλυση ευαισθησίας, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τους προκλητικούς παράγοντες που επηρεάζουν την υδροηλεκτρική ενέργεια και να προτείνουμε μέτρα βελτίωσης που θα οδηγήσουν σε βιώσιμη και αποτελεσματική παραγωγή ενέργειας από αυτήν την πηγή.

Η ανάλυση ευαισθησίας για την πηγή πυρηνικής ενέργειας προτείνει την βελτίωση των ακόλουθων δεικτών με σημαντικότερη συνεισφορά τα διαθέσιμα αποθέματα στον πλανήτη για μη αειφόρες τιμές και η τεχνολογική ωριμότητα για αειφόρες τιμές. Επιπλέον η ικανότητα να ανταπεξέρχεται στην ζήτηση και ο βαθμός απόδοσης είναι οι δείκτες που προτείνονται προς βελτίωση.

Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι οι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, αντιμετωπίζουν παρόμοια ζητήματα. Αυτά περιλαμβάνουν την ικανότητά τους να ανταπεξέρχονται στη ζήτηση, τη χαμηλή απόδοση, τον συντελεστή χωρητικότητας και την τεχνολογική ωριμότητα της κάθε τεχνολογίας. Το μοντέλο προτείνει τη βελτίωσή τους με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας αυτών των ενεργειακών πηγών. Είναι φανερό οι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον της ενεργειακής παραγωγής. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε, αυτές οι πηγές ενέργειας αντιμετωπίζουν ορισμένα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοσή τους. Ένα από τα κύρια ζητήματα είναι η ικανότητά τους να ανταπεξέρχονται στη ζήτηση. Καθώς η αιολική και η ηλιακή ενέργεια εξαρτώνται από τις φυσικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η ηλιοφάνεια, η διαθεσιμότητα ενέργειας από αυτές τις πηγές μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Επομένως, είναι σημαντικό να βελτιωθεί η ικανότητά τους να παρέχουν σταθερή και αξιόπιστη ενέργεια που να ικανοποιεί τη ζήτηση του πληθυσμού.

Βάσει των δεδομένων που παρέχονται στον Πίνακα 3 και τον Πίνακα 5, παρατηρείται ότι όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιμετωπίζουν δυσκολία στο να ανταποκριθούν στην μεταβαλλόμενη ζήτηση και στον συντελεστή χωρητικότητας. Αυτό συμβαίνει διότι η παραγωγή ενέργειας από αυτές τις πηγές εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και δεν είναι σταθερή. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η ανάλυση ευαισθησίας προτείνει τη βελτίωση δύο κύριων δεικτών: τον δείκτη ικανότητας ανταπόκρισης και τον συντελεστή χωρητικότητας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και αιολική ενέργεια.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύει τη σημασία της ανάλυσης ευαισθησίας για τις πηγές πυρηνικής, αιολικής και ηλιακής ενέργειας καθώς προσδιορίστηκαν με την μεγαλύτερη αειφόρα από το μοντέλο SAFE. Επίσης, αναδεικνύει τα ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και προτείνει τη βελτίωση στους τομείς της ικανότητας ανταπόκρισης στη ζήτηση, της απόδοσης, του συντελεστή χωρητικότητας και της τεχνολογικής ωριμότητας.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η παρούσα διπλωματική εργασία ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα. Υπάρχει η δυνατότητα εμπλουτισμού και αξιολόγησης περισσότερων νεοεισερχόμενων παραγωγών ενέργειας, όπως η παραγωγή ενέργειας από υδρογόνο, γεωθερμία καθώς και εναλλακτικές τεχνολογίες των ίδιων πηγών όπως για παράδειγμα τα συστήματα ηλιοστατών με ηλιακό πύργο (solar power tower). Επιπλέον το μοντέλο χρήζει βελτίωση σχετικά με τα δεδομένα για την πηγή ενέργειας από βιοκαύσιμα, όπως ο εμπλουτισμός με φαινόμενα που συμπεριλαμβάνουν την επίπτωση στο περιβάλλον από την συγκομιδή και η καύση οργανικών προϊόντων που αναλύονται στην έρευνα των Choi and Manousiouthakis (2020). Επιπρόσθετα για την περεταίρω βελτίωση του μοντέλου προτείνεται η προσθήκη δεικτών που σχετίζονται με την διαχείριση των αποβλήτων της εκάστοτε τεχνολογίας. Τέλος υπογραμμίζει την ανάγκη για στρατηγική προώθησης και υποστήριξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από πλευράς κυβερνήσεων, επιχειρήσεων και κοινωνίας.

7 Παράρτημα Α

Στους πίνακες πού ακολουθούν παρουσιάζονται τα δεδομένα από κάθε δείκτη πού χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της ολικής αειφορίας. Για δείκτες με εύρος τιμών, έχουν ταξινομηθεί οι τιμές τους σε min και max που αντιπροσωπεύουν την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του διαστήματος.

Πίνακας 6 : Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη Κατανάλωσης νερού.

Ενεργειακές πηγές	Life cycle water consumption (liters/MWh)	
	min	max
Coal power	260	1323
Natural gas power	3	945
Hydropower	340	3400
Nuclear power	20	3024
Wind power	0	360
Solar_PV	1	378
Bioenergy	140	11000

Πίνακας 7 : Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη Αφαίρεσης νερού από υδάτινους πόρους.

Ενεργειακές πηγές	Life cycle water withdrawal (liters/MWh)	
	min	max
Coal power	1340	1512
Natural gas power	20	1134
Hydropower	610	13000
Nuclear power	112	4347
Wind power	0	360
Solar_PV	1	378
Bioenergy	270	21000

Πίνακας 8 : Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

Ενεργειακές πηγές	CO ₂ emissions (gCO ₂ /kWh)	
	min	max
Coal power	820	1050
Natural gas power	441	658
Hydropower	4	74
Nuclear power	5	20
Wind power	11	16
Solar_PV	20	50
Bioenergy	120	180

Πίνακας 9: Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τους δείκτες Εκπομπές διοξειδίου του θείου, Νιτρικά οξείδια, Σωματίδια διαμέτρου 1.5μm

Ενεργειακές πηγές	NO _x emissions (gNO _x /kWh)	SO ₂ emissions (gSO ₂ /kWh)	Particulate Matter 2.5 μm (mgr/kWh)
Coal power	0.37	0.79	35
Natural gas power	0.05	0.001	2
Hydropower	0	0	0
Nuclear power	0	0	0
Wind power	0	0	0
Solar_PV	0	0	0
Bioenergy	0.005	0.001	0.004

Πίνακας 10: Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη Δέσμευση εδάφους.

Ενεργειακές πηγές	Land use of energy sources per unit of electricity (m ² /MWh)	
	min	max
Coal power	10	56
Natural gas power	0.3	5
Hydropower	10	18
Nuclear power	0.3	1
Wind power	8.4	247
Solar_PV	10	35
Bioenergy	27.77	1527.35

Πίνακας 11: Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τους δείκτες κατανάλωση πόρων, Σταθμισμένο κόστος, Ευκαιρίες εργασίας.

Ενεργειακές πηγές	Reserves/Consumption	LCOE (USD/MWh)	Job opportunities
Coal power	2.11429E+15	102.582	17.3
Natural gas power	9.02413E+14	81.58269231	2.51
Hydropower	9.99E+20	108.4682759	11.3
Nuclear power	3.0739E+14	51.294	19.1
Wind power	9.99E+20	93.89863636	8.5
Solar_PV	9.99E+20	98.92482143	20.4
Bioenergy	2.03636E+12	134.035	19.9

Πίνακας 12 : Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τους δείκτες Προσβασιμότητα,Τεχνολογική ωριμότητα, Δυνατότητα ανταπόκρισης στην ζήτηση.

Ενεργειακές πηγές	Acceptability	Technology maturity	Ability to respond to demand
Coal power	Low	low	slow
Natural gas power	Medium	very high	rapid
Hydropower	High	medium	unable
Nuclear power	Low	medium	slow
Wind power	High	high	unable
Solar_PV	High	medium	unable
Bioenergy	Medium	very low	slow

Πίνακας 13: Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη συντελεστής χωρητικότητας.

Ενεργειακές πηγές	Capacity factor (%)	
	min	max
Coal power	40	60
Natural gas power	40	60
Hydropower	40	50
Nuclear power	80	90
Wind power	30	40
Solar_PV	15	25
Bioenergy	30	40

Πίνακας 14: Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη απόδοση

Ενεργειακές πηγές	Efficiency (%)	
	min	max
Coal power	33	48
Natural gas power	50	62
Hydropower	80	90
Nuclear power	11	11
Wind power	30	45
Solar_PV	15	25
Bioenergy	25	35

Πίνακας 15 : Δεδομένα ενεργειακών πηγών για τον δείκτη ατυχημάτων

Ενεργειακές πηγές	Mortality & accidents
Coal power	24.62
Natural gas power	2.82
Hydropower	1.3
Nuclear power	0.03
Wind power	0.04
Solar_PV	0.02
Bioenergy	4.63

8 Βιβλιογραφία

Chen, R. *et al.* (2010) ‘Ambient air pollution and hospital admission in Shanghai, China’, *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), pp. 234–240. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.002>.

Choi, S.H. and Manousiouthakis, V.I. (2020) ‘On the carbon cycle impact of combustion of harvested plant biomass vs. fossil carbon resources’, *Computers & Chemical Engineering*, 140, p. 106942. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106942>.

Czako, V. (2020) *Employment in the Energy Sector Status Report 2020*. Available at: <https://doi.org/10.2760/95180>.

Doukas, H.C., Andreas, B.M. and Psarras, J.E. (2007) ‘Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables’, *European Journal of Operational Research*, 182(2), pp. 844–855. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.037>.

Gebeshuber (2019) ‘Acid Rain’, *Encyclopedia* [Preprint]. Available at: <https://encyclopedia.pub/entry/90>.

Grigoroudis, E. *et al.* (2021) ‘Energy sustainability: a definition and assessment model’, *Operational Research*, 21(3), pp. 1845–1885. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00492-2>.

IEA (2011) *World Energy Outlook 2011*. Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2011>.

IEA (ed.) (2012) *World energy outlook 2012*. Paris (World Energy Outlook, 2012).

IEA (2020) ‘Levelised Cost of Electricity Calculator’. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator>.

IEA (2021) *Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer*,. Paris. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>.

IEA (2022) *World Energy Outlook 2022*. IEA, Paris, France. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

Kouloumpis, V.D., Kouikoglou, V.S. and Phillis, Y.A. (2008) ‘Sustainability Assessment of Nations and Related Decision Making Using Fuzzy Logic’, *IEEE Systems Journal*, 2(2), pp. 224–236. Available at: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2008.925256>.

Manirambona, E., Talai, S.M. and Kimutai, S.K. (2022) ‘Sustainability evaluation of power generation technologies using Multi-Criteria Decision Making: The Kenyan case’, *Energy Reports*, 8, pp. 14901–14914. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.055>.

Mastorokostas, P. and Μαστοροκόστας, Π. (2016) ‘Εισαγωγή στην ασαφή λογική – ασαφή σύνολα – συναρτήσεις συμμετοχής’. Available at: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/5958>.

Maxim, A. (2014) ‘Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis’, *Energy Policy*, 65, pp. 284–297. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.059>.

Meldrum, J. *et al.* (2013) ‘Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates’, *Environmental Research Letters*, 8(1), p. 015031. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015031>.

Office of Nuclear Energy (2021) ‘Nuclear Power is the Most Reliable Energy Source and It’s Not Even Close’. Available at: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-power-most-reliable-energy-source-and-its-not-even-close>.

Our World in Data (2021) ‘Death rates per unit of electricity production’. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh>.

Our World in Data (2022) *How does the land use of different electricity sources compare?*, *Our World in Data*. Available at: <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>.

Phillis YA and Kouikoglou VS (2009) ‘Fuzzy measurement of sustainability’, *Nova Science Publishers* [Preprint].

Μπαρτζώκα, Δ. (2021) ‘Η Ιστορική εξέλιξη της ασαφούς λογικής από τον Ηράκλειτο και τον Αριστοτέλη στον Επίκουρο και τον Zadeh. Πως θεμελιώθηκε και καταξιώθηκε στο πέρασμα των αιώνων και πόσο έχει επηρεάσει τον κόσμο της επιστήμης και της τεχνολογίας’. Available at: <https://apothesis.eap.gr/archive/item/75087>.