



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

---

***ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΕΙΦΟΡΙΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΑΣΑΦΗ  
ΛΟΓΙΚΗ***

---

*Μεταπτυχιακή Εργασία*  
ΦΙΛΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ  
ΑΜ: 2016019021

**Τριμελής Επιτροπή** : Δρ. Ευάγγελος Γρηγορούδης  
Δρ. Βασίλειος Κουικόγλου  
Δρ. Σπύρος Παπαευθυμίου

Χανιά, Οκτώβριος 2019

## ***Πίνακας περιεχομένων***

Περίληψη .....	2
1 Εισαγωγή .....	3
2 Δείκτες, συνιστώσες και διαστάσεις ενεργειακής αειφορίας .....	6
2.1 Environment - Περιβάλλον.....	8
2.1.1 Air - Αέρας.....	8
2.1.2 Land&Water - Έδαφος και Νερό.....	9
2.2 Human System – Ανθρώπινο Σύστημα .....	10
2.2.1 Access - Πρόσβαση.....	10
2.2.2 Economy - Οικονομία .....	11
2.3 Health - Υγεία.....	11
2.4 Energy System – Σύστημα ενέργειας .....	11
2.4.1 Generation - Παραγωγή .....	12
2.4.2 Consumption - Κατανάλωση .....	12
2.4.3 Security - Ασφάλεια.....	13
3 Μεθοδολογία.....	15
3.1 Επισκόπηση .....	15
3.2 Εκθετική εξομάλυνση.....	16
3.3 Κανονικοποίηση .....	17
3.4 Έλλειψη τιμών – καταλογισμός.....	18
3.5 Ασαφοποίηση .....	20
3.6 Βάσεις κανόνων .....	21
3.7 Ασαφή συμπεράσματα και Αποσαφήνιση.....	24
3.8 Ανάλυση ευαισθησίας .....	25
4 Αποτελέσματα.....	26
5 Συμπεράσματα .....	34
6 Βιβλιογραφία .....	35

## Περίληψη

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η εκτίμηση της ενεργειακής αειφορίας ευρωπαϊκών χωρών. Για το σκοπό αυτό ορίστηκαν κριτήρια εθνικής ενεργειακής αειφορίας και αναζητήθηκαν ποσοτικοί δείκτες εκπλήρωσης αυτών των κριτηρίων από βάσεις δεδομένων διεθνών οργανισμών. Ακολούθησε η ομαδοποίηση των κριτηρίων και η σύνθεση των αντίστοιχων δεικτών σε σύνθετες μεταβλητές και, τελικά, σε ένα συνολικό μέτρο της ενεργειακής αειφορίας των χωρών. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε κατάταξη των χωρών ως προς την ενεργειακή τους αειφορία, από την πιο αειφόρο έως την λιγότερο αειφόρο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SAFE (Sustainability Analysis by Fuzzy Evaluation: Ανάλυση Αειφορίας με Ασαφή Λογική), το οποίο λαμβάνει υπόψη τρεις διαστάσεις που συσχετίζονται με την ενέργεια. Αυτές είναι οι Environment (Περιβάλλον), Human System (Ανθρώπινο Σύστημα) και Energy System (Ενεργειακό Σύστημα). Η κάθε διάσταση απαρτίζεται από συνιστώσες, οι οποίες είναι και αυτές σύνθετες μεταβλητές και κάθε μία περιλαμβάνει πολλούς βασικούς δείκτες, οι οποίοι αποτελούν τα πρωταρχικά δεδομένα. Ακολούθησε ανάλυση ευαισθησίας, η οποία έδειξε ποιοι βασικοί δείκτες επηρεάζουν την ενεργειακή αειφορία κάθε χώρας, κάθε περιοχής και κάθε οικονομικής ομάδας περισσότερο. Επίσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα προηγούμενων ερευνών της ενεργειακής αειφορίας, και διερεύνηση της συσχέτισης της ενεργειακής αειφορίας με άλλους δείκτες ευμάρειας. Τέλος έγινε μία συγκριτική παρουσίαση της εξέλιξης της ενεργειακής αειφορίας ευρωπαϊκών χωρών για τις χρονικές περιόδους 2000-2007, 2000-2012 και 2000-2014 με χρήση του ίδιου μοντέλου.

# 1 Εισαγωγή

Δεν θα ήταν δυνατή η πρόοδος του ανθρώπου χωρίς την εκμετάλλευση κάποιας μορφής ενέργειας, από την ανακάλυψη της φωτιάς έως τη βιομηχανική επανάσταση και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όμως το ενεργειακό σύστημα ασκεί πλέον τρομακτικές πιέσεις στο περιβάλλον λόγω της αυξημένης ζήτησης σε ενέργεια που έχει επιφέρει η πληθυσμιακή έκρηξη και η εξέλιξη της τεχνολογίας. Η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού σε συνδυασμό με την κατανάλωση της σύγχρονης κοινωνίας συνεπάγονται ραγδαία αύξηση στις απαιτήσεις για ενέργεια, απαιτήσεις οι οποίες ικανοποιούνται κυρίως με ορυκτά καύσιμα και δημιουργούν πιέσεις για συνεχώς νέες εξορύξεις. Όμως τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων, που αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας σήμερα, είναι πεπερασμένα και επομένως μη αιεφόρα. Πέραν όμως της προοπτικής να μείνει η ανθρωπότητα χωρίς καύσιμο, υπάρχει η προοπτική να μείνει η ανθρωπότητα χωρίς κατοικήσιμο πλανήτη. Τα ορυκτά καύσιμα είναι σε μεγάλο βαθμό υπαίτια για την κλιματική κρίση, την καταστροφή οικοσυστημάτων, την αλόγιστη αποψύλωση των δασών-πνευμόνων του πλανήτη, τους πρόωρους θανάτους από ρύπανση του αέρα. Είναι υψίστης σημασίας να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα με επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την άμεση απαγόρευση νέων εξορύξεων ώστε να επιτύχουμε την ενεργειακή αιεφορία. Πρώτα όμως είναι σημαντικό να δοθεί ορισμός στην ενεργειακή αιεφορία, μιας και δεν υπάρχει ένας κοινός και ακριβής ορισμός.

Αιεφόρος ανάπτυξη είναι η οικονομική ανάπτυξη που λαμβάνει υπόψη την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα, δηλαδή η ανάπτυξη που έχει σκοπό να καλύψει τις ανάγκες του σήμερα διασφαλίζοντας ότι οι μελλοντικές ανάγκες θα μπορούν επίσης να καλυφθούν. Προϋποθέτει κατανάλωση φυσικών πόρων με μικρότερο ρυθμό απ' ό,τι αυτοί μπορούν να ανανεώνονται, αλλιώς έχουμε υποβάθμιση. Η έννοια της αιεφόρου ανάπτυξης διαμορφώθηκε τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα, όταν άρχισε να γίνεται φανερό ότι η ανθρωπότητα αντιμετωπίζει σχεδόν ανυπέρβλητα προβλήματα και το μέλλον της θα ήταν αβέβαιο σε περίπτωση απραξίας. Όμως, οποιαδήποτε οντότητα υπό εξέταση, είτε αυτή είναι μια πολυεθνική εταιρία, είτε είναι χώρα, είτε είναι άνθρωπος, υπόκειται στους νόμους της θερμοδυναμικής, σύμφωνα με τους οποίους μετατρέπει ενέργεια και ύλη σε θερμότητα και απόβλητα τα οποία κατ' ανάγκην διοχετεύονται στο περιβάλλον. Κατά συνέπεια δεν μπορεί υπό καμία συνθήκη να είναι απόλυτα αιεφόρος, αλλά θα πρέπει να στοχεύει στη συνεχή αύξηση του δείκτη αιεφορίας του.

Αρκετές επιστημονικές μελέτες διερευνούν την έννοια της ενεργειακής αιεφορίας και την ορίζουν με βάση κάποιες από τις διαστάσεις της. Οι Grigoroudis et al. (2019) υπολόγισαν την ενεργειακή αιεφορία των χωρών σε παγκόσμιο επίπεδο, εξετάζοντας τις διαστάσεις Περιβάλλον, Ανθρώπινο σύστημα, Οικονομία, Ενεργειακό σύστημα και Ασφάλεια και δείκτες που περιγράφουν επί μέρους συνιστώσες. Η σύνθεση των δεικτών σε μέτρα συνολικής ενεργειακής επίδοσης και η κατάταξη των χωρών έγιναν με χρήση του μοντέλου SAFE, το οποίο περιγράφεται αργότερα.

Ο SEDI (Sustainable Energy Development Index) είναι ένας άλλος σύνθετος δείκτης, ο οποίος μετρά την ενεργειακή αιεφορία 62 αναπτυσσόμενων χωρών. Ο SEDI έχει πέντε βασικές διαστάσεις που χωρίζονται σε 11 δείκτες (Iddrisu and Hattacharyya, 2015):

1. Τεχνική διάσταση, που εκτιμά την ικανότητα των χωρών να ικανοποιούν τις ενεργειακές τους ανάγκες και είναι μέτρο των πόρων και των υποδομών τους.
2. Οικονομική διάσταση, που βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας, την τελική απόδοση της ενέργειας και την παραγωγική χρήση της ενέργειας.
3. Κοινωνική διάσταση, που μετρά την κατανάλωση πράσινης ενέργειας στις κατοικίες και την ανισότητα εισοδήματος στην κλίμακα Gini.
4. Περιβαλλοντική διάσταση, που εκτιμά τις επιπτώσεις του ενεργειακού τομέα στο περιβάλλον σε απόβλητα, ρύπανση, ένταση άνθρακα και απώλειες ενέργειας.
5. Θεσμική διάσταση, που μετρά την ενεργειακή ανεξαρτησία των χωρών.

Το World Energy Council (WEC 2017) ορίζει την ενεργειακή αειφορία 128 χωρών με τον δείκτη Energy Trilemma Index (ETI), ο οποίος περιλαμβάνει τις διαστάσεις Energy Security (ενεργειακή ασφάλεια), Energy Equity (ενεργειακή ισότητα) και Environmental Sustainability of Energy Systems (περιβαλλοντική αειφορία των ενεργειακών συστημάτων). Εξετάζει 72 βάσεις δεδομένων και τις συνθέτει σε 35 δείκτες. Δίνει σε κάθε χώρα και για κάθε διάσταση βαθμολογία τριών γραμμάτων που μπορούν να πάρουν τιμές A, B, C, D. Για παράδειγμα, μια χώρα βαθμολογείται με DDD όταν έχει ιδιαίτερα χαμηλές επιδόσεις σε όλες τις διαστάσεις.

Το RISE (Regulatory Indicators for Sustainable Energy) (Banerjee et al. 2017) είναι παγκόσμια πολιτική που αξιολογεί 111 χώρες παγκοσμίως με 27 βασικούς δείκτες που συγκεντρώνονται σε τρεις βασικούς πυλώνες, την πρόσβαση στην ενέργεια, την απόδοση της ενέργειας και την ανανεώσιμη ενέργεια, με σκοπό να βοηθήσει τις κυβερνήσεις στη νομοθεσία και θεσμοθέτηση αναγκαίων μέτρων για την ενεργειακή αειφορία.

Ο δείκτης Energy Architecture Performance Index (WEF 2017) είναι ένας σύνθετος δείκτης που αξιολογεί 127 χώρες με 18 βασικούς δείκτες όπως οι εκπομπές σε CO<sub>2</sub>, η ποιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος κλπ., που ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές ομάδες, την οικονομική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική αειφορία και την πρόσβαση σε ασφαλή ενέργεια.

Στην παρούσα εργασία έγινε εφαρμογή του μοντέλου SAFE, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά από τους Phillis and Andriantiatsaholiniana (2001) και περαιτέρω από τους Phillis et al. (2011). Το μοντέλο, με χρήση των αρχών της ασαφούς λογικής, έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται ποσοτικές και ποιοτικές εισόδους και να αναλύει ασαφείς, πολύπλοκες και όχι απαραίτητα καλά ορισμένες έννοιες. Η παρούσα προσέγγιση είναι συνέχεια της εφαρμογής του μοντέλου SAFE από τους Grigoroudis et al. (2019) και διαφοροποιείται στα εξής σημεία:

- 1) επικεντρώνεται στις Ευρωπαϊκές χώρες, αντλώντας πιο πρόσφατα δεδομένα από περισσότερες πηγές
- 2) εξαιρεί δείκτες για τους οποίους δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα, προτείνει ορισμένους νέους δείκτες και νέες μεθοδολογίες μέτρησης κάποιων από αυτούς,
- 3) χρησιμοποιεί περισσότερες μετρήσεις που αφορούν τον ενεργειακό τομέα (η προηγούμενη έκδοση είχε συχνά δείκτες από όλους τους παραγωγικούς τομείς γιατί μόνο τέτοια δεδομένα ήταν διαθέσιμα για τις περισσότερες χώρες του κόσμου)
- 4) και εστιάζεται σε χώρες που είναι συγκρίσιμες αφού έχουν όμοια γεωγραφικά χαρακτηριστικά, παρόμοιες κλιματικές συνθήκες και συγκρίσιμες

κοινωνικοοικονομικές συνθήκες.

Προτείνεται ένα σύστημα τριών διαστάσεων για την εκτίμηση της ολικής ενεργειακής αειφορίας μιας χώρας. Αυτές οι διαστάσεις προκύπτουν από σύνθεση συνιστωσών και αυτές με τη σειρά τους από σύνθεση βασικών δεικτών. Οι δείκτες συλλέχθηκαν με έρευνα σε βάσεις δεδομένων όπως η World Bank (Παγκόσμια Τράπεζα), η Eurostat και η βάση EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research) της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Στον τελικό υπολογισμό της ενεργειακής αειφορίας των 43 χωρών που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 25 δείκτες. Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι δείκτες, οι σύνθετες μεταβλητές, ο τύπος δείκτη, SB (smaller-is-best, προτιμάται ο μικρότερος), LB (larger-is-best, προτιμάται ο μεγαλύτερος) και NB (nominal-is-best, προτιμάμε κάποιο διάστημα τιμών), καθώς και οι τιμές κατωφλίου βάσει των οποίων έγινε κανονικοποίηση.

## 2 Δείκτες, συνιστώσες και διαστάσεις ενεργειακής αιφορίας

Η ενέργεια για να είναι αιεφόρος, πρέπει να είναι προσβάσιμη από όλους, οικονομικά προσιτή, φιλική προς το περιβάλλον και να έχει πλούσιο μείγμα, καθώς και να μην έχει μεγάλη εξάρτηση από εισαγωγές. Επίσης το ενεργειακό σύστημα πρέπει να παρέχει ασφάλεια και να μην υπόκειται σε διακοπές. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα μοντέλο που υπολογίζει και κατατάσσει τις χώρες έχοντας ως είσοδο 25 βασικούς δείκτες, οι οποίοι συγκεντρώνονται σε 8 συνιστώσες και αυτές με τις σειρά τους σε 3 διαστάσεις. Οι διαστάσεις αυτές δίνουν την συνολική ενεργειακή αιφορία των χωρών.

Οι τρεις διαστάσεις είναι: ENVI (Environment - περιβάλλον), HUMS (human system – ανθρώπινο σύστημα) και ENES (Energy system – ενεργειακό σύστημα). Οι διαστάσεις χωρίζονται σε συνιστώσες και αυτές με τη σειρά τους στους βασικούς δείκτες, που είναι τα πρωτογενή δεδομένα που επεξεργάζεται το μοντέλο SAFE.

**Πίνακας 1.** Σύνθετες μεταβλητές, δείκτες, τύπος δείκτη και παράμετροι κανονικοποίησης.

Διάσταση	Συνιστώσα	Βασικός δείκτης (δεδομένα, χρονική περίοδος)	Τύπος <sup>a</sup>	Κατώφλια ( $u$ , $\tau$ ) και/ή ( $T$ , $U$ )
Περιβάλλον	Αέρας	Εκπομπές CO <sub>2</sub> από ενέργεια (τόνοι κατά κεφαλήν CO <sub>2</sub> , 2000-2017)	SB	$T=4.7$ (στόχος EU <sup>b</sup> για το 2030) $U=11.41$ (97.5ο εκατοστημόριο <sup>c</sup> όλων των χωρών)
	Αέρας	Εκπομπές NO <sub>x</sub> από ενέργεια (kg CO <sub>2</sub> ισοδύναμου κατά κεφαλήν, 2000-2017)	SB	$T=4.3$ (ελάχιστη τιμή Σκανδιναβικών χωρών <sup>b</sup> ) $U=20.19$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Αέρας	Εκπομπές SO <sub>2</sub> από ενέργεια (kg κατά κεφαλήν, 2000-2017)	SB	$T=1.08$ (ελάχιστη τιμή Σκανδιναβικών χωρών) $U=78.13$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Αέρας	Συγκέντρωση PM <sub>2.5</sub> (μέσα ετήσια $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 2000-2017)	SB	$T=10$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $U=32.29$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Εδαφος-Νερό	Μεταβολή δασικής έκτασης (ετήσια τάση των δεδομένων δασικών εκτάσεων, % συνολικής έκτασης 2000-2017)	LB	Τάση δασικών εκτάσεων $u=0\%$ (αρνητική τάση είναι μη αιεφόρος) $\tau=0.23\%$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Εδαφος-Νερό	Παραγωγή αποβλήτων (τόνοι κατά κεφαλήν ετησίως 2000-2017)	SB	$T=0$ (ελάχιστο δυνατό) $U=237.6$ (μέγιστη τιμή EU14 <sup>b</sup> )
	Εδαφος-Νερό	Άντληση υδάτων (εκατομμύρια m <sup>3</sup> κατά κεφαλήν, 2000-2017)	SB	$T=0$ (ελάχιστο όλων των χωρών) $U=1107$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
Ανθρώπινο Σύστημα	Πρόσβαση	Πρόσβαση σε καθαρή οικιακή ενέργεια και τεχνολογίες (% του πληθυσμού, 2000-20017)	LB	$u=63.4\%$ (ελάχιστο όλων των χωρών) $\tau=100\%$ (μέγιστη δυνατή τιμή)

Διάσταση	Συνιστώσα	Βασικός δείκτης (δεδομένα, χρονική περίοδος)	Τύπος <sup>a</sup>	Κατώφλια ( $u$ , $\tau$ ) και/ή ( $T$ , $U$ )
	Πρόσβαση	Αδυναμία επαρκούς οικιακής θέρμανσης (% του πληθυσμού, 2000-2017)	SB	$T=0$ (ελάχιστο δυνατό) $U=36.2$ (μέγιστο όλων των χωρών)
	Πρόσβαση	Ποιότητα παροχής ηλεκτρισμού (βαθμός 1-7, 2000-2017)	LB	$u=1$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $\tau=7$ (μέγιστη δυνατή τιμή)
	Οικονομία	Ενεργειακή απόδοση της οικονομίας (MJ/\$2011 PPP GDP, 2000-2017)	SB	$T=3.75$ (μέσος όρος EU14) $U=11.5$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Οικονομία	Ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (σύγχρονη διεθνής \$PPP, 2000-2017)	LB	$u=8693.7$ (ελάχιστη τιμή EU) $\tau=53456.5$ (μέση τιμή Σκανδιναβικών χωρών)
	Οικονομία	Αγοραστική δύναμη για ενέργεια (MWh, 2000-2017)	LB	$u=43.98$ (ελάχιστη τιμή όλων των χωρών) $\tau=161.35$ (μέγιστη τιμή EU14)
Ενεργειακό Σύστημα	Υγεία	Θάνατοι από ρύπανση του αέρα (θάνατοι ετησίως ανά 100,000 πληθυσμού, 2000-2017)	SB	$T=0$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $U=110$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
	Παραγωγή	Ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα (% παραγόμενου ενεργειακού μείγματος, 2000-2017)	SB	$T=0\%$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $U=98.9\%$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
	Παραγωγή	Ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνικά εργοστάσια (% παραγόμενου ενεργειακού μείγματος, 2000-2017)	SB	$T=0\%$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $U=77.2\%$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
	Παραγωγή	Απώλειες πωλήσεων οφειλόμενες σε απώλειες ισχύος (% πωλήσεων επηρεαζόμενων εταιριών, 2000-2017)	SB	$T=0\%$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $U=5.45\%$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
	Παραγωγή	Επιφάνεια θερμικών ηλιακών συλλεκτών (% έκτασης κατά κεφαλήν, 2000-2017)	LB	$u=0.00$ (ελάχιστη τιμή όλων των χωρών) $\tau=0.88$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)
	Κατανάλωση	Κατανάλωση ενέργειας [MJ/2011 US\$ PPP (ισοτιμία αγοραστικής ισχύος δολαρίου Η.Π.Α. 2011), 2000-2017]	NB	$u=0$ (μηδενική τιμή είναι μη αειφόρος) $\tau=3535$ (μέσος όρος χωρών EU14) $T=3923$ (=125kWh, η μέση τιμή όλων των Ευρωπαϊκών χωρών, MacKay 2009) $U=9969$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Κατανάλωση	Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική κατανάλωση (MJ/2011 US\$ PPP, 2000-2017)	LB	$u=3.4$ (ελάχιστο όλων των χωρών) $\tau=77$ (μέγιστο όλων των χωρών)
	Κατανάλωση	Ένταση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της καταναλισκόμενης ενέργειας (ποσοστό % στη συνολική κατανάλωση, 2000-2017)	SB	$T=0.34$ (ελάχιστη τιμή όλων των χωρών) $U=3.27$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)



Διάσταση	Συνιστώσα	Βασικός δείκτης (δεδομένα, χρονική περίοδος)	Τύπος <sup>a</sup>	Κατώφλια ( $u$ , $\tau$ ) και/ή ( $T$ , $U$ )
	Ασφάλεια	Εξάντληση ενεργειακών πόρων (% ακαθάριστου εθνικού εισοδήματος, 2000-2017)	SB	$T=0.076$ (ελάχιστο χωρών EU14) $U=10.4$ (97.5ο εκατοστημόριο όλων των χωρών)
	Ασφάλεια	Ενεργειακό Μείγμα	SB	$T=0$ (ελάχιστη δυνατή τιμή) $U=3.793$ (97.5ο εκατοστημόριο των χωρών)
	Ασφάλεια	Ενεργειακή εξάρτηση από εισαγωγές (% τελικού μείγματος, 2000-2017)	SB	$T=0$ (πλήρης ανεξαρτησία από εισαγωγές) $U=98.4$ (μέγιστη τιμή όλων των χωρών)

<sup>a</sup> SB (smaller-is-better): όσο πιο μικρή τιμή τόσο καλύτερη  
LB (larger-is-better): όσο πιο μεγάλη τιμή τόσο καλύτερη  
NB (nominal-is-best): διάστημα ενδιάμεσων τιμών είναι καλύτερο.

<sup>b</sup> EU: τα 28 κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης  
EU14: Αυστρία, Βέλγιο, Δανία, Φιλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ιρλανδία, Ιταλία, Ολλανδία, Πορτογαλία, Ισπανία και Σουηδία (εξαιρείται το Λουξεμβούργο λόγω μικρού μεγέθους ώστε να μην επηρεάσει τη στατιστική εικόνα των ενεργειακών δεικτών της ομάδας),  
Σκανδιναβικές χώρες: Δανία, Φινλανδία, Νορβηγία και Σουηδία (εξαιρείται η Ισλανδία λόγω ειδικών κλιματικών συνθηκών που αλλάζουν τη στατιστική εικόνα των ενεργειακών δεικτών της ομάδας).

<sup>c</sup> Για μία συλλογή τιμών, το X-οστό εκατοστημόριο ή X% είναι η τιμή εκείνη που είναι μεγαλύτερη από το X% όλων των τιμών του δείγματος. Το 100% είναι η μέγιστη τιμή του δείγματος και το 0% η ελάχιστη.

## 2.1 Environment - Περιβάλλον

Είναι σημαντικό να οριστεί μια διάσταση που να περιγράφει τις επιπτώσεις που έχει ο τομέας της ενέργειας στο περιβάλλον. Η διάσταση Environment έχει δύο συνιστώσες, τους Air (Αέρας, Ατμόσφαιρα) και Land&Water (Εδαφος και Νερό), διότι σε αυτές εκφράζονται οι πιο σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις του ενεργειακού τομέα στο περιβάλλον. Οι συνιστώσες με τη σειρά τους έχουν για εισόδους κάποιους βασικούς δείκτες.

### 2.1.1 Air - Αέρας

**CO<sub>2</sub>** – Κατά κεφαλήν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τον ενεργειακό τομέα: Η ανθρωπογενής εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα, αυξάνεται ραγδαία από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης και πλέον, λόγω της πληθυσμιακής έκρηξης και της κατανάλωσης, με πρωτοφανείς ρυθμούς. Η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψύλωση των δασών είναι τα δύο κύρια αίτια του φαινομένου. Ο τομέας της ενέργειας είναι υπεύθυνος για τη μερίδα του λέοντος του ανθρωπογενούς CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευθεί το 2030 οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να είναι το πολύ 60% των συνολικών εκπομπών του 1990. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η κατ' αναλογία εκτίμηση του κατά κεφαλήν στόχου εκπομπών CO<sub>2</sub> για τον τομέα της ενέργειας. Ο σχετικός τύπος έχει ως εξής:

$$\text{τιμή-στόχος CO}_2 = 0.6 \frac{\left( \text{Ετήσιες εκπομπές CO}_2 \text{ ενεργειακού} \right)}{\left( \text{τομέα σε όλες τις χώρες το 1990} \right)} \frac{\left( \text{Εκτίμηση συνολικού} \right)}{\left( \text{πληθυσμού το 2030} \right)} = 4.7 \text{ τόννοι/κάτοικο}$$

(πηγή: EDGAR).

**NO<sub>x</sub>** – Κατά κεφαλήν εκπομπές σε οξείδια του αζώτου από τον ενεργειακό τομέα: Τα οξείδια του αζώτου είναι επικίνδυνα για το αναπνευστικό σύστημα. Επιπλέον αντιδρούν με τη βροχή ή την υγρασία και σχηματίζουν όξινη βροχή ή με την επίδραση του ηλιακού φωτός συμβάλλουν στη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους που επίσης προσβάλλει το αναπνευστικό σύστημα. Τα οξείδια του αζώτου είναι παράγωγα της καύσης ορυκτών καυσίμων και επομένως έχουν άμεση σχέση με τον τομέα της ενέργειας (πηγές: EDGAR, World Bank).

**SO<sub>2</sub>** – Κατά κεφαλήν εκπομπές διοξειδίου του θείου από τον ενεργειακό τομέα: Το διοξείδιο του θείου είναι παράγωγο της καύσης ορυκτών καυσίμων. Είναι ιδιαιτέρως τοξικό στην εισπνοή και μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το ατμοσφαιρικό SO<sub>2</sub> μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό των ματιών, πνευμονικό οίδημα και δύσπνοια, μεταξύ άλλων. Πέραν των προβλημάτων υγείας, το διοξείδιο του θείου συμβάλλει στη δημιουργία της όξινης βροχής και τον σχηματισμό ατμοσφαιρικών σωματιδίων (πηγές: EDGAR, World Bank).

**PM<sub>2.5</sub>** - Μέση ετήσια ατμοσφαιρική συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub>: Ο δείκτης αυτός αναφέρεται σε αιωρούμενα σωματίδια τα οποία παράγονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων από τους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών και της ενέργειας και τα οποία έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5 μικρόμετρα. Τα σωματίδια αυτά, λόγω του μικρού τους μεγέθους έχουν τη δυνατότητα να εισχωρούν βαθιά στους πνεύμονες και στην κυκλοφορία του αίματος, προκαλώντας σοβαρότατα προβλήματα υγείας, όπως κρίσεις άσθματος και βρογχίτιδα, καθώς και επιδεινώνουν ήδη υπάρχοντα καρδιακά και αναπνευστικά προβλήματα (πηγές: Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME, Eurostat).

### 2.1.2 Land&Water - Έδαφος και Νερό

**Forest** – Μεταβολή δασικής έκτασης: Ο τομέας της ενέργειας έχει σημαντικό μερίδιο ευθύνης στην αποψίλωση των δασών και στην απογύμνωση της γης. Τα βιοκαύσιμα, τα οποία κάποτε θεωρήθηκαν λανθασμένα ως λύση στην κλιματική αλλαγή, συμβάλλουν ακόμη περισσότερο στην αποψίλωση των δασών, διότι είναι καύσιμα χαμηλής αποδοτικότητας και απαιτούν καλλιεργήσιμη γη εις βάρος των δασών. Σε πολλές χώρες η βασική πηγή ενέργειας για οικιακή χρήση εξακολουθεί να είναι το ξύλο (πηγή: World Bank).

**Waste** – Κατά κεφαλήν παραγωγή αποβλήτων από τον ενεργειακό τομέα: Παραγωγή αποβλήτων στον τομέα της ενέργειας έχουμε κυρίως κατά την καύση άνθρακα και υδρογονανθράκων και την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Η καύση εκπέμπει τέφρα (fly ash και bottom ash), σωματίδια και οξείδια και δημιουργεί υπολείμματα καυστήρων (boiler slag). Η παραγωγή ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς οδηγεί στην παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την επικινδυνότητα και την ημιζωή τους. Για όλα τα απόβλητα έχουν θεσπιστεί διεθνείς κανονισμοί για την ασφαλή διάθεσή τους διότι επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου (πηγές: Eurostat, World Bank).

**Water** – Κατά κεφαλήν άντληση υδάτων από τον τομέα της ενέργειας: Ο ενεργειακός τομέας της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαιτεί επί του παρόντος περίπου 74 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> πόσιμου νερού για τη λειτουργία του. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού επιστρέφεται στο περιβάλλον, ενώ 3.8 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> γλυκών υδάτων καταναλώνονται. Η ζήτηση νερού από τον ενεργειακό τομέα αντιπροσωπεύει το 42% της συνολικής υδροληψίας της ΕΕ (5). Κάθε στάδιο του ενεργειακού κύκλου έχει τις δικές του απαιτήσεις σε νερό, ξεκινώντας από την εξόρυξη και την επεξεργασία ορυκτών πόρων, μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιόδους λειψυδρίας, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια καυσώνων, πολλοί ηλεκτρικοί σταθμοί αναγκάζονται να μειώσουν την παραγωγή τους, με αποτέλεσμα η παραγωγή να μην ανταποκρίνεται στη ζήτηση (πηγές: Eurostat, World Bank).

## **2.2 Human System – Ανθρώπινο Σύστημα**

Η διάσταση ανθρώπινο σύστημα εξετάζει την προσβασιμότητα στην ενέργεια, τις επιπτώσεις της στην υγεία σε μακροχρόνια βάση, καθώς και τις επιπτώσεις του ενεργειακού τομέα στην οικονομία μιας χώρας. Ένα αειφόρο ενεργειακό σύστημα οφείλει να είναι δίκαιο ως προς την προσβασιμότητά του και να ελαχιστοποιεί τις οποιεσδήποτε αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών.

### **2.2.1 Access - Πρόσβαση**

**Clean cooking** – Πρόσβαση πληθυσμού (%) σε καθαρή οικιακή ενέργεια και τεχνολογίες: Παγκοσμίως δύο στους πέντε ανθρώπους δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρά καύσιμα και τεχνολογίες καθαρού μαγειρέματος, όπως είναι το βιοαέριο, το υγροποιημένο ή μη φυσικό αέριο και η ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι είναι αναγκασμένοι να καίνε ξύλα και να χρησιμοποιούν παραδοσιακές εστίες μαγειρέματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση των νοικοκυριών που οφείλεται κυρίως σε καπνούς μαγειρέματος. Η ρύπανση αυτή συνολικά συνδέεται με 2.6 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Στην Ευρώπη η εικόνα είναι πολύ πιο αισιόδοξη, παρόλα αυτά όμως αρκετές χώρες έχουν πολύ χαμηλά ποσοστά πρόσβασης σε καθαρά καύσιμα και τεχνολογίες μαγειρέματος (6) (πηγή: World Bank).

**Population without warm home** – Αδυναμία επαρκούς οικιακής θέρμανσης: Ο δείκτης αυτός καταμετρά το ποσοστό του πληθυσμού μιας χώρας το οποίο αδυνατεί να διατηρήσει το σπίτι του επαρκώς ζεστό (πηγή: Eurostat).

**Electricity quality** – Ποιότητα παροχής ηλεκτρισμού: Η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας αφορά την τάση, τη συχνότητα και την κυματομορφή της. Η καλή ποιότητα ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται ως η σταθερή τάση τροφοδοσίας (εντός δηλαδή κάποιου προκαθορισμένου εύρους), η σταθερή συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος και ημιτονοειδής κυματομορφή. Μόνο υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να υφίσταται συμβατότητα μεταξύ εισόδου και εξόδου. Ο δείκτης αυτός μετρείται σε κλίμακα 1-7, όπου 1 αντιστοιχεί στην χειρότερη ποιότητα και 7 στην καλύτερη (πηγή: Govdata360, World Bank).

### 2.2.2 Economy - Οικονομία

Η οικονομία σχετίζεται με τη δυνατότητα μιας περιοχής να παράγει και να καταναλώνει αγαθά και υπηρεσίες και την ύπαρξη χρηματικής ρευστότητας. Όλα τα παραπάνω συσχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την ενέργεια. Καθοριστικοί οικονομικοί παράγοντες στην ενεργειακή αειφορία μιας χώρας είναι οι δείκτες που εξετάζονται παρακάτω.

**GDP energy intensity** – Ενεργειακή απόδοση της οικονομίας: Η ενεργειακή απόδοση ισούται με την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή μιας οικονομικής μονάδας, εδώ σε MJ/\$2011 PPP GDP. Χαμηλότερη τιμή αυτού του δείκτη δείχνει ότι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή μιας οικονομικής μονάδας. Τα τελευταία 30 χρόνια σημειώνεται σταθερή μείωση του δείκτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση (πηγή: World Bank).

**Losses from power outages** – Απώλειες πωλήσεων οφειλόμενες σε απώλειες ισχύος: Οι διακοπές στην παροχή ενέργειας και ιδιαίτερα του ηλεκτρικού ρεύματος, επιφέρουν σημαντικό κόστος στην οικονομική διαδικασία μιας περιοχής. Ο δείκτης αυτός μετρά τις μέσες απώλειες λόγω ηλεκτρικών διακοπών, ως ποσοστό των συνολικών ετήσιων πωλήσεων των άροχων ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν τις μέσες απώλειες για όλες τις επιχειρήσεις που ανέφεραν διακοπές (πηγή: World Bank).

**Electricity purchasing power** – Αγοραστική δύναμη για ηλεκτρισμό: Ορίζεται ως ο λόγος του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος μιας χώρας προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή είναι μέτρο του πόση ενέργεια μπορεί να αγοράσει ένας μέσος πολίτης μιας χώρας (πηγή: Eurostat).

**GDP** - Ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ): Το κατά κεφαλήν ΑΕΠ είναι ενδεικτικός παράγοντας της οικονομικής κατάστασης μιας χώρας. Το ΑΕΠ και η παραγωγή υψηλής ποιότητας ενέργειας καθώς και η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτήν των πολιτών σχετίζονται άμεσα (πηγή: Eurostat).

### 2.3 Health - Υγεία

Αναμφίβολα η χρήση της ενέργειας έχει σημαντικό αντίκτυπο στον τομέα της υγείας. Η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα αυτής που προέρχεται από υδρογονάνθρακες και άνθρακα, έχει πολλές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία. Ήδη έγινε αναφορά σε αυτές στη συνιστώσα του αέρα. Εδώ εξετάζεται ευθέως από τον δείκτη θνησιμότητας από την αέρια ρύπανση.

**Air pollution mortality** – Θάνατοι από ρύπανση του αέρα: Ο δείκτης αυτός εξετάζει ετήσιους θανάτους ανά 100,000 κατοίκους που έχουν προκληθεί από τη ρύπανση του οικιακού αέρα αλλά και τη ρύπανση της ατμόσφαιρας. Κύρια ευθύνη για τους θανάτους αυτούς φέρει η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, ειδικά η έλλειψη προσβασιμότητας σε καύσιμα και τεχνολογίες καθαρού μαγειρέματος (πηγή: Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME).

### 2.4 Energy System – Σύστημα ενέργειας

Το ενεργειακό σύστημα σύμφωνα με την IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) αναφέρεται σε όλα τα στοιχεία που σχετίζονται με την παραγωγή, μετατροπή,

μεταφορά και χρήση ενέργειας (7) και ο σκοπός του είναι να παρέχει ενέργεια στους καταναλωτές. Η αειφορία μιας χώρας σε σχέση με το ενεργειακό της σύστημα εξαρτάται από την αποδοτικότητα του δικτύου, το ενεργειακό μείγμα, και το ποσοστό ενέργειας που είναι αναγκασμένη να εισάγει. Σχετικές διαστάσεις είναι η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, καθώς και η ενεργειακή ασφάλεια.

## 2.4.1 Generation - Παραγωγή

**Fossil fuels** – Ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα: Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογονάνθρακες και άνθρακα είναι μη αειφόρος, με αρνητική επίδραση στο περιβάλλον προκαλώντας την καταστροφική αλλαγή του κλίματος μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου μεταξύ άλλων, στην υγεία του ανθρώπου λόγω επιβλαβών καυσαερίων, και στην ευημερία της κοινωνίας με διαμάχες και πολέμους για τον έλεγχο της πώλησης τους. Τα ορυκτά καύσιμα είναι απολύτως μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ο συγκεκριμένος δείκτης μετρά το ποσοστό πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας (πηγή: World Bank).

**Nuclear power** – Ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνικά. Η πυρηνική ενέργεια δεν αποδίδει άμεσα διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον και δεν ανήκει στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω του ότι χρειάζεται συγκεκριμένα ορυκτά για την παραγωγή της. Όμως, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, τα πυρηνικά εργοστάσια ενέχουν κινδύνους που μπορούν να θέσουν τις ζωές εκατοντάδων χιλιάδων κατοίκων, αν όχι παραπάνω, σε ρίσκο. Εκτός αυτού, τα πυρηνικά εργοστάσια παράγουν ραδιενεργά απόβλητα, κάποια εκ των οποίων είναι άκρως επικίνδυνα. Στην παρούσα εργασία τα πυρηνικά εργοστάσια δεν συγκαταλέγονται στις ΑΠΕ. Ο δείκτης αποτυπώνει το ποσοστό του ενεργειακού μείγματος που προέρχεται από πυρηνικά εργοστάσια (πηγή: World Bank).

**Solar collectors** – Επιφάνεια θερμικών ηλιακών συλλεκτών: Ο δείκτης αυτός μετρά τη συνολική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών θερμότητας που αντιστοιχεί σε κάθε πολίτη μιας χώρας (πηγή: Eurostat).

**Power system TD losses** – Απώλειες ισχύος στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού: Οι απώλειες σε ενέργεια που προκύπτουν κατά τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικού ρεύματος είναι ένα πολύ καλό μέτρο της συνολικής αποδοτικότητας του συγκεκριμένου ενεργειακού συστήματος. Ο δείκτης περιλαμβάνει απώλειες κατά τη μεταφορά μεταξύ πηγών προμήθειας και σημείων διανομής και κατά τη διανομή στους καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένης και της κλοπής, ενώ μετρείται σε ποσοστό της συνολικής παραγωγής (πηγή: World Bank).

## 2.4.2 Consumption - Κατανάλωση

**Energy per capita** – Κατανάλωση ενέργειας: Ο δείκτης αυτός μετρά την κατά κεφαλήν χρήση ενέργειας και αναφέρεται σε χρήση πρωτογενούς ενέργειας πριν τη μετατροπή της σε άλλα καύσιμα τελικής χρήσης. Σε δίκτυα υψηλής απόδοσης η χρήση θα είναι χαμηλότερη από αντίστοιχα δίκτυα χαμηλής απόδοσης, όμως μια χώρα μπορεί να έχει χαμηλή κατά κεφαλήν χρήση ενέργειας όταν οι πολίτες της είναι φτωχοί και δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις τιμές της αγοράς. Επομένως ο δείκτης αυτός πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή γιατί η ερμηνεία των τιμών του δεν είναι πάντα ξεκάθαρη (πηγή: World Bank).

**Renewables** – Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική κατανάλωση

ενέργειας: Η συμμετοχή ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα μιας χώρας είναι πλέον μεγαλύτερης σημασίας από ποτέ. Υψηλό μερίδιο ΑΠΕ συνεπάγεται λιγότερη ρύπανση, μικρότερη εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, και μικρότερη συμβολή στην κλιματική αλλαγή. Ο δείκτης μετρά το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας (πηγές: Eurostat, World Bank).

**GHG intensity** – Ένταση εκπομπών της καταναλισκόμενης ενέργειας: Ο δείκτης υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με τον τομέα της ενέργειας και της ακαθάριστης εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας. Εκφράζει το πόσοι τόνοι ισοδύναμου CO<sub>2</sub> των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τον τομέα της ενέργειας εκπέμπονται σε μια συγκεκριμένη οικονομία ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται. Ενδεικτικά, ο άνθρακας έχει διπλάσιο δείκτη έντασης εκπομπών σε σχέση με το φυσικό φυσικό αέριο. Η υψηλή ενεργειακή αειφορία απαιτεί χαμηλό δείκτη έντασης εκπομπών (πηγές: Eurostat, World Bank).

### 2.4.3 Security - Ασφάλεια

Κάθε ενεργειακό σύστημα για να είναι αειφόρο, πρέπει να είναι ασφαλές από απόψεως επάρκειας και αυτονομίας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου οι κυβερνήσεις λαμβάνουν μέτρα ελαχιστοποίησης της εξάρτησής τους από εισαγωγές ενέργειας, διασφάλισης επαρκών αποθεμάτων ενεργειακών πόρων και χρήσης όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποικιλίας ενεργειακών πόρων, φυσικά δοθεisών των δυνατοτήτων της χώρας.

**Stocks depletion** – Εξάντληση ενεργειακών πόρων: Ο δείκτης ορίζεται ως ο λόγος της αξίας των αποθεμάτων των ενεργειακών πόρων μιας χώρας προς τον εναπομείναντα χρόνο ζωής των ενεργειακών αυτών αποθεμάτων. Καλύπτει τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο (μη ανανεώσιμες πηγές) (πηγή: World Bank).

**Energy mix** – Ενεργειακό μείγμα: Το ενεργειακό μείγμα μιας χώρας μπορεί να έχει τις παρακάτω εισόδους: 1) άνθρακα, 2) φυσικό αέριο, 3) πυρηνική ενέργεια, 4) πετρέλαιο, 5) υδροηλεκτρική ενέργεια, 6) ανανεώσιμη ενέργεια. Οι χώρες στοχεύουν στο να έχουν ένα καλά διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο εγχώριων και εισαγόμενων καυσίμων και ενεργειακών πηγών, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή ασφάλεια, να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή ένταση και να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA, 2015) έχει υπολογίσει ένα σενάριο-γέφυρα (Bridge) για τη σταδιακή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ορυκτά καύσιμα, με στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους 2 βαθμούς Κελσίου, όπως προβλέπει η συμφωνία του Παρισιού (UNFCCC, 2016). Το σενάριο Bridge επικεντρώνεται σε πέντε μέτρα για την επίτευξη των στόχων που έχει θέσει:

1. Αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της βιομηχανίας, των κτιρίων και των μεταφορών.
2. Σταδιακή μείωση της λειτουργίας των λιγότερο αποδοτικών εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής από άνθρακα και απαγόρευση κατασκευής νέων εργοστασίων.
3. Αύξηση επενδύσεων σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τελικό στόχο τα 400 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030.
4. Σταδιακή κατάργηση των επιδοτήσεων ορυκτών καυσίμων έως το 2030.

5. Μείωση των εκπομπών μεθανίου που οφείλονται στην παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Το σενάριο Bridge ορίζει στόχους ενεργειακών εισόδων για το 2030,  $S^* = \{s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*, s_5^*, s_6^*\}$ , όπου  $i = 1, \dots, 6$  οι έξι πιθανές πηγές του ενεργειακού μείγματος. Το τρέχον ενεργειακό κλάσμα μιας ευρωπαϊκής χώρας συμβολίζεται ως  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ .

Η Ευρώπη, σύμφωνα με το Bridge, διαιρείται σε τρεις γεωγραφικές περιοχές: Ευρωπαϊκή Ένωση, Ευρασία και Ρωσία. Αφού ορισθεί το κατάλληλο σύνολο τιμών  $S^*$  και μετρηθούν τα αντίστοιχα μερίδια  $S$  για κάποια χώρα, στη συνέχεια υπολογίζονται:

α) το έλλειμμα εκπλήρωσης του στόχου αποφυγής ρυπογόνων ενεργειακών πηγών, σύμφωνα με τον τύπο

$$(\text{έλλειμμα}) = \max \left[ 1 - \frac{s_5 + s_6}{s_5^* + s_6^*}, 0 \right],$$

το οποίο έχει τιμή 0 αν η χώρα έχει καλύψει το προτεινόμενο μερίδιο καθαρής ενέργειας για την αντίστοιχη γεωγραφική περιοχή, ήτοι αν  $s_5 + s_6 \geq s_5^* + s_6^*$ ,

β) και η ανομοιογένεια του ενεργειακού μίγματος σε σχέση με το σενάριο Bridge, για την μέτρηση της οποίας χρησιμοποιείται το γνωστό από τη Θεωρία Πληροφοριών και τη Στατιστική μέτρο απόκλισης Kullback-Leibler,

$$D_{KL}(S||S^*) = \sum_{k=1}^6 s_k \ln \frac{s_k^*}{s_k}.$$

το οποίο είναι μη αρνητικό και μηδενίζεται τότε και μόνον όταν  $s_k = s_k^*$  για κάθε  $k = 1, 2, \dots, 6$ . Σημειώνεται ότι το αντίστροφο μέτρο  $D_{KL}(S^*||S)$  είναι επίσης μη αρνητικό αλλά επελέγη το πρώτο επειδή πειραματικά βρέθηκε ότι έχει μικρότερες τιμές.

Ο συνολικός δείκτης προκύπτει από τον συνδυασμό των προηγούμενων:

$$\text{Energy mix} = (\text{έλλειμμα}) \times D_{KL}(S||S^*)$$

Ο δείκτης αυτός δείχνει την απόσταση από τον στόχο, δηλαδή οι μικρότερες τιμές είναι καλύτερες. Μολονότι είναι υποκειμενικός, βασίζεται σε καλώς ορισμένα μέτρα και είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται ως δείκτης αειφορίας ενεργειακού μίγματος. (πηγή: World Bank).

**Import dependency** – Ενεργειακή εξάρτηση από εισαγωγές: Οι περισσότερες χώρες δεν έχουν πλήρη ενεργειακή ανεξαρτησία και αναγκάζονται να εισάγουν το έλλειμά τους. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως ο λόγος των καθαρών εισαγωγών προς την ακαθάριστη διαθέσιμη ενέργεια, δηλαδή

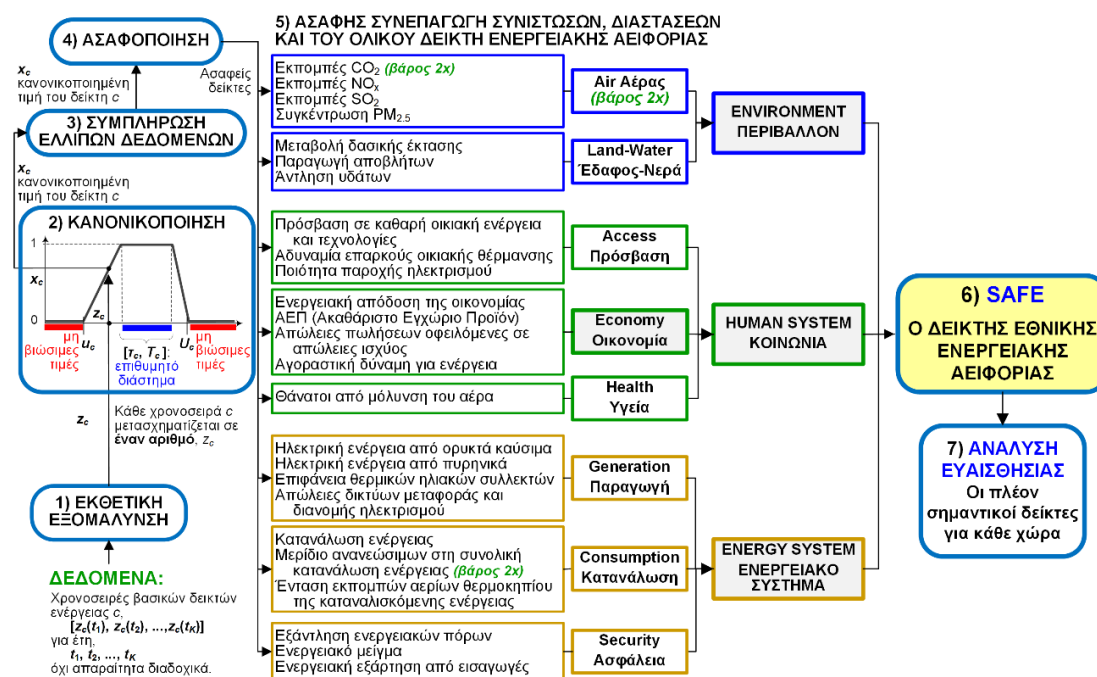
$$\text{Import dependency} = (\text{εισαγωγές} - \text{εξαγωγές}) / (\text{ακαθάριστη διαθέσιμη ενέργεια})$$

και μετρείται ως ποσοστό του τελικού ενεργειακού μίγματος της χώρας (πηγή: World Bank).

## 3 Μεθοδολογία

### 3.1 Επισκόπηση

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής αιφρορίας των χωρών υιοθετήσαμε το μοντέλο SAFE. Τα πρωταρχικά αρχεία δεδομένων συλλέχθηκαν με έρευνα στις βάσεις δεδομένων κυρίως της World Bank, της Eurostat και της βάσης εκπομπών Edgar v5. Εκεί συλλέχθηκαν τα αρχεία χρονοσειρών του κάθε δείκτη, από το 2000 έως το 2017, με ετήσιο βήμα. Εν συνεχεία και με εργαλείο την ασαφή λογική, ακολουθήθηκαν τα βήματα που συνοψίζονται στο Σχ. 1 και παρακάτω.



Σχ. 1. Στατιστική ανάλυση δεδομένων και μετασχηματισμοί δεδομένων, ιεραρχική ασαφής συνεπαγωγή και εκτίμηση της ενεργειακής αιφρορίας χωρών.

- Κάθε χρονοσειρά (για συγκεκριμένο δείκτη και χώρα) μετασχηματίζεται σε έναν μόνο αριθμό μέσω μίας διαδικασίας εκθετικής εξομάλυνσης.
- Οι εξομαλυνμένες τιμές κανονικοποιούνται με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα σε τιμές μη αιφρορές και τιμές μέγιστης αιφρορίας. Έτσι μετατρέπονται σε αδιάστατους αριθμούς από το 1 έως το 0 ώστε να μπορέσει να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους σε κοινή βάση.
- Πολλά αρχεία δεδομένων είχαν σοβαρές ελλείψεις ώστε κάποιοι δείκτες χωρών δεν είχαν καθόλου δεδομένα και δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός μίας κανονικοποιημένης τιμής. Αυτές οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν από τον μέσον όρο του ίδιου δείκτη σε παρόμοιες (υπό ορισμένη έννοια) χωρών. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως καταλογισμός (imputation), δοκιμάστηκε για γνωστούς δείκτες και διαπιστώθηκε ότι προσφέρει εκτιμήσεις με αρκετά καλή ακρίβεια.
- Οι κανονικοποιημένες είσοδοι μετατρέπονται σε ασαφείς δείκτες (λεκτικές περιγραφές) με τη βοήθεια ασαφούς λογικής.
- Με διαδικασία λογικής συνεπαγωγής πολλών σταδίων και χρήση ασαφών



κανόνων “if-then” πραγματοποιήθηκε διαδοχική σύνθεση των επί μέρους ασαφών δεικτών κάθε χώρας σε τελικές τιμές των συνιστωσών και διαστάσεων της ενεργειακής αιφορίας.

6. Ασαφής συναπεγωγή για τη σύνθεση των διαστάσεων στον ολικό δείκτη ενεργειακής αιφορίας SAFE.
7. Η συμβολή του κάθε δείκτη, ή κατηγορίας δεικτών, στην τελική ενεργειακή αιφορία χωρών, εκτιμήθηκε με ανάλυση ευαισθησίας και η οποία αποκαλύπτει ποιοι ενεργειακοί τομείς είναι οι πλέον σημαντικοί για κάθε χώρα με απώτερο στόχο την βελτίωση της ενεργειακής της αιφορίας.

## 3.2 Εκθετική εξομάλυνση

Οι δείκτες που απαρτίζουν την ενεργειακή αιφορία μιας χώρας είναι δυναμικοί και μεταβάλλονται με τον χρόνο. Η δυναμική συμπεριφορά τους αποτυπώνεται μέσω χρονοσειράς και όχι παίρνοντας μονάχα την πιο πρόσφατη τιμή τους. Για όλους τους δείκτες χρησιμοποιείται το επίπεδό τους εκτός από τον δείκτη της δασικής μεταβολής που χρησιμοποιείται η τάση επειδή έτσι καταδεικνύεται η κατεύθυνση του δείκτη που προοιωνίζεται και τη μελλοντική του εξέλιξη. Εκτός αυτού η πληροφορία που προσφέρουν οι χρονοσειρές είναι πλουσιότερη από την πιο πρόσφατη τιμή διότι όταν για κάποια χώρα υπάρχει έλλειψη δεδομένων, η πληθώρα δεδομένων κάποιας άλλης χώρας σχετικής ως προς κάποια κριτήρια μπορεί να φανεί ιδιαιτέρως χρήσιμη στη διαδικασία καταλογισμού (imputation). Τέλος, η ύπαρξη μίας εσφαλμένης μέτρησης εξομαλύνεται μέσα σε ένα σύνολο τιμών.

Η εκθετική εξομάλυνση είναι μια διαδικασία φιλτραρίσματος που κρίνεται απαραίτητη όταν γίνεται διαχείριση χρονοσειρών με μεγάλες αποκλίσεις και ακραίες τιμές. Μέσω αυτού του φιλτραρίσματος προκύπτουν το μέσο επίπεδο και η τάση του δείκτη. Το μοντέλο SAFE μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε το επίπεδο, είτε την τάση ενός δείκτη.

Έστω δείκτης  $c$  με χρονοσειρά δεδομένων  $z_c(t_1), z_c(t_2), \dots, z_c(t_K)$  για τα έτη  $t_1, t_2, \dots, t_K$ , όπου τα έτη δεν είναι απαραίτητα συνεχόμενα, λόγω πιθανής έλλειψης κάποιων δεδομένων και  $K$  το πλήθος των ετών. Το μοντέλο SAFE όπως εφαρμόζεται σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιεί δύο αλγόριθμους για την εξομάλυνση της χρονοσειράς.

1. Ο κλασικός αλγόριθμος Holt-Winters παράγει μια ακολουθία εκτιμήσεων επιπέδων και τάσεων  $L_k$  και  $T_k$  για  $k = 1, \dots, K$  (Gardner 1985). Σε περίπτωση που έχουμε μη συναπτά έτη, ο αλγόριθμος τροποποιείται για διαφορετικά χρονικά βήματα (Gardner 1985, error-correction Model 4-1). Η τροποποίηση χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους  $\alpha, \gamma \in [0, 1]$  και περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

α) Αρχικές τιμές  $L_0 = T_0 = T_1 = 0$ .

β) Για  $k = 1, 2, \dots, K$ :

Πρόβλεψη  $\hat{z}_k$  της τιμής  $z_c(t_k)$  κατά το έτος  $t_{k-1}$ :  $\hat{z}_k = L_{k-1} + T_{k-1}(t_k - t_{k-1})$

Σφάλμα  $e_k = z_c(t_k) - \hat{z}_k$

Ενημέρωση επιπέδου  $L_k = \hat{z}_k + \alpha e_k$

Ενημέρωση τάσης  $T_k = T_{k-1} + \gamma \alpha e_k$

Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων ( $\alpha, \gamma$ ) με αναζήτηση στο  $[0, 1]^2$  και επιλέγεται ο συνδυασμός ο οποίος ελαχιστοποιεί το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων,  $e_1^2 + \dots + e_K^2$ .

2. Ο παραπάνω αλγόριθμος υποθέτει άπειρο ιστορικό χρονοσειρών  $z_c$ . Σε περιπτώσεις μικρών συνόλων δεδομένων ή σποραδικών δεδομένων τα βήματα ενημέρωσης μεταβάλλονται ως εξής (Wright 1986):

$$L_k = L_{k-1} + \frac{e_k}{1 + \beta^{t_k - t_{k-1}} + \dots + \beta^{t_k - t_1}}$$

$$T_k = T_{k-1} + \frac{\frac{L_k - L_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} - T_{k-1}}{1 + \delta^{t_k - t_{k-1}} + \dots + \delta^{t_k - t_2}}$$

όπου, παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση τα  $\beta$  και  $\delta$  επιλέγονται ως το ζεύγος τιμών στο διάστημα  $[0, 1]$  για το οποίο ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων.

Για κάθε χρονοσειρά τρέχουμε την κλασική και την παραλλαγή πεπερασμένου ιστορικού της μεθόδου Holt-Winters. Η τελική ομαλοποιημένη τιμή  $z_c$  αντιστοιχεί στον αλγόριθμο με το μικρότερο άθροισμα τετραγωνικού σφάλματος. Κάθε δείκτης είναι ίσος με την πιο πρόσφατη τιμή της αντίστοιχης χρονοσειράς  $z_c = L_K$ , ενώ μόνο στην περίπτωση του Forest change (μεταβολή δασικής έκτασης) χρησιμοποιείται η πιο πρόσφατη τάση της χρονοσειράς,  $z_c = T_K$ , αντί του επιπέδου.

### 3.3 Κανονικοποίηση

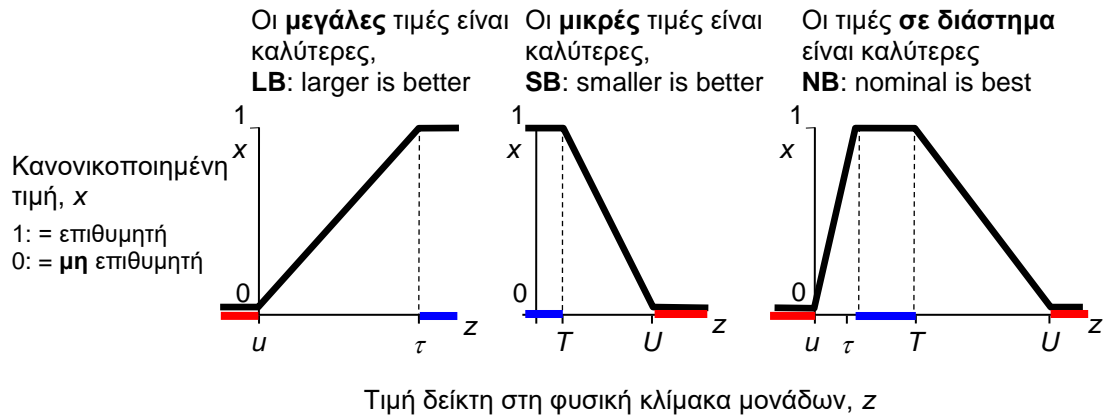
Το μοντέλο SAFE διαχειρίζεται μεγέθη διαφορετικών μονάδων με τιμές διαφορετικών τάξεων μεγέθους και τα συνδυάζει σε σύνθετες μεταβλητές. Αυτό επιτυγχάνεται καθιστώντας τους δείκτες συγκρίσιμους μεταξύ τους με κανονικοποίηση.

Οι τιμές κάποιων δεικτών είναι πιο αειφόρες όσο πιο μεγάλες είναι (larger-is-better, LB), ενώ για κάποιους δείκτες είναι προτιμότερο το αντίστροφο (smaller-is better, SB). Παράδειγμα δείκτη LB είναι το μερίδιο ανανεώσιμων πηγών στο τελικό μείγμα, ενώ παράδειγμα δείκτη SB είναι οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Υπάρχουν και δείκτες στους οποίους προτιμάται ενδιάμεση τιμή που ανήκει σε κάποιο διάστημα (nominal-is-best, NB). Η διαδικασία της κανονικοποίησης μετατρέπει τους ομαλοποιημένους δείκτες σε αδιάστατους αριθμούς-βαθμολογίες στο διάστημα  $[0, 1]$ , ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση της συμβολής τους στη συνολική ενεργειακή αειφορία. Η χαμηλότερη βαθμολογία 0 αντιστοιχεί σε τιμές του δείκτη που είναι απολύτως μη αειφόρες, ενώ η υψηλότερη βαθμολογία αντιστοιχεί στην απόλυτη αειφορία. Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστοιχούν σε διάφορες βαθμίδες αειφορίας.

Ανάλογα με τον τύπο του δείκτη γίνεται χρήση του ζεύγους κατωφλίων  $(u, \tau)$  για LB, του  $(T, U)$  για SB, και όλων  $(u, \tau, T, U)$  για NB, και τοποθετούνται οι τιμές του σε αειφόρες και μη αειφόρες περιοχές. Η κανονικοποίηση γίνεται ως εξής:

$$LB: x = \begin{cases} 0, & z \leq u \\ \frac{z-u}{\tau-u}, & u < z < \tau \\ 1, & \tau \leq z \end{cases} \quad SB: x = \begin{cases} 1, & z \leq T \\ \frac{U-z}{U-T}, & T < z < U \\ 0, & U \leq z \end{cases} \quad NB: x = \begin{cases} 0, & z \leq u \\ \frac{z-u}{\tau-u}, & u < z < \tau \\ 1, & \tau \leq z \leq T \\ \frac{U-z}{U-T}, & T < z < U \\ 0, & U \leq z \end{cases}$$

Οι τύποι αυτοί απεικονίζονται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



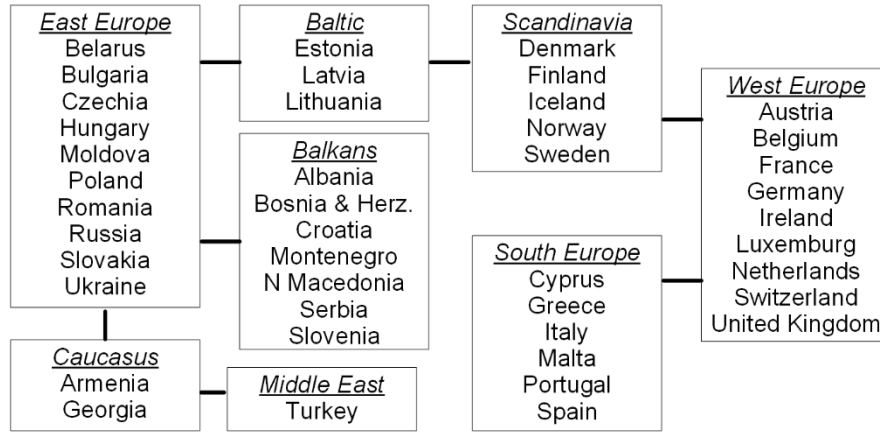
Σχ. 2. Κανονικοποίηση για τρεις τύπους δεικτών, LB, SB, NB.

### 3.4 Έλλειψη τιμών – καταλογισμός

Στην παρούσα εργασία έγινε συλλογή δεδομένων για 43 συνολικά χώρες της Ευρώπης. Κάποιες χώρες παραλείφθηκαν στο σύνολό τους διότι η εύρεση δεδομένων για αυτές ήταν αδύνατη (π.χ. Μονακό). Περιλαμβάνονται στην ανάλυση και οι Ρωσία, Τουρκία, Αρμενία και Γεωργία λόγω γειτνίασης και για σύγκριση.

Για κάποιες από τις 43 χώρες διαπιστώθηκε πλήρης έλλειψη κάποιων δεδομένων. Συνολικά αυτές οι ελλείψεις αποτελούν το 6.6% των συνολικών δεικτών (1.65 για κάθε χώρα κατά μέσον όρο). Για την κάλυψη αυτών των κενών ακολουθήθηκε μια διαδικασία καταλογισμού τιμών (imputation) και ανάθεσης. Κάθε δείκτης που λείπει για μία χώρα συμπληρώνεται από τον μέσο όρο του ίδιου δείκτη από χώρες-δωρητές που εμφανίζουν γεωγραφικές και οικονομικές ομοιότητες με τη χώρα της οποίας τα δεδομένα είναι ελλιπή.

Ο βαθμός της γεω-οικονομικής ομοιότητας μεταξύ χωρών  $i$  και  $j$  εκφράζεται με μια συμμετρική συνάρτηση  $s_{ij} = s_{ji}$ , η οποία μπορεί να πάρει τιμές 0, 1, ή 2, όπου το 0 εκφράζει μηδενική ομοιότητα, το 1 εκφράζει μέτρια ομοιότητα και το 2 σημαντική ομοιότητα. Στην εικόνα χώρες με ισχυρή μεταξύ τους ομοιότητα τοποθετούνται στο ίδιο πλαίσιο, ενώ χώρες με μέτρια ομοιότητα είναι ενωμένες με ευθεία γραμμή.



Σχ. 3. Χώρες που έχουν γεωοικονομική ομοιότητα: μεγάλη (στο ίδιο πλαίσιο) και μέση (με διασύνδεση).

Ένα δεύτερο κριτήριο επιλογής χωρών-δωρητών είναι η ομοιότητα δεικτών. Ορίζουμε την απόσταση δύο χωρών σε σχέση με οποιαδήποτε συνιστώσα της ενεργειακής αειφορίας. Για δυο χώρες  $i, j$  και συνιστώσας  $g$  ορίζεται η απόσταση  $d_{ij}$  με συμβολή όλων των δεικτών της συνιστώσας  $g$  για την οποία υπάρχουν δεδομένα και για τις δύο χώρες  $i, j$ . Έστω  $C_{ijg}$  οι δείκτες αυτοί και  $N_{ijg}$  το πλήθος τους. Τότε:

$$d_{ijg} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum_{\sigma \in C_{ijg}} (x_{\sigma i} - x_{\sigma j})^2}{N_{ijg}}}, & N_{ijg} > 0, \\ 1, & N_{ijg} = 0 \end{cases}$$

όπου  $x_{\sigma i}$  και  $x_{\sigma j}$  οι κανονικοποιημένες τιμές του δείκτη  $\sigma$  των χωρών  $i, j$ . Σε περιπτώσεις όπου  $N_{ijg} = 0$  τότε ορίζουμε  $d_{ijg} = 1$ , η οποία είναι η μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να λάβει η απόσταση.

Ο αλγόριθμος καταλογισμού που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ίδιος με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε από τους Grigoroudis et al. (2019) και είναι παραλλαγή του αλγόριθμου που αναπτύχθηκε από τους Phillis et al. (2011).

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους  $r_i$  και  $R_i$  με  $0 \leq r_i < R_i \leq 1$  για κάθε χώρα  $i$  της οποίας λείπει τουλάχιστον ένας δείκτης. Ο αλγόριθμος ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Έστω  $c$  ο δείκτης που λείπει από χώρα  $i$ . Υποθέτουμε ότι ανήκει στη συνιστώσα αειφορίας  $g$ .
2. Υπολογίζεται η απόσταση  $d_{ijg}$  για όλες τις παρόμοιες χώρες  $j \neq i$  για τις οποίες ο δείκτης  $c$  είναι γνωστός. Σχηματίζουμε το σύνολο  $J = \{j : s_{ij} = 2 \text{ and } d_{ijg} < r_i\}$ . Εάν το σύνολο δεν είναι κενό τότε πηγαίνει στο βήμα 7. Αλλιώς πηγαίνει στο βήμα 3.
3. Επανάλαβε το βήμα 2 για μέτρια όμοιες χώρες. Εάν  $J = \{j : s_{ij} = 1 \text{ and } d_{ijg} < r_i\}$  μη κενό σύνολο πηγαίνει στο βήμα 7. Αλλιώς πηγαίνει στο βήμα 4.
4. Επανάλαβε το βήμα 2 εφαρμόζοντας τη συνθήκη  $d_{ijg} < R_i$ . Εάν το  $J$  είναι μη κενό σύνολο πηγαίνει στο βήμα 7. Αλλιώς πηγαίνει στο βήμα 5.

5. Επανάλαβε το βήμα 2 για μέτρια όμοιες χώρες εφαρμόζοντας τη συνθήκη  $d_{ijg} < R_i$ . Εάν το  $J$  είναι μη κενό σύνολο πήγαινε στο βήμα 7, αλλιώς πήγαινε στο βήμα 6.
6. Υπολόγισε το  $d_{ijg}$  για όλες τις χώρες  $j \neq i$  για τις οποίες ο δείκτης  $c$  είναι γνωστός, ανεξαρτήτου γεωοικονομικής ομοιότητας. Σύλλεξε αυτούς με την ελάχιστη απόσταση,  $J = \{j : d_{ijg} \leq d_{ij'g} \ \forall j' \neq j\}$ .
7. Καταλογίζεται τιμή του δείκτη  $c$  για τη χώρα  $i$  ο μέσος όρος των  $x_{jc}$  για όλα τα  $j \in J$ .

Οι παράμετροι καταλογισμού επιλέγονται από διάταξη δυο διαστάσεων με ξεχωριστή έρευνα για κάθε χώρα. Όλα τα στοιχεία  $(r, R)$  με  $r < R$  δοκιμάζονται με τον παραπάνω αλγόριθμο με παράλειψη του βήματος 1, όπου ο  $c$  σαρώνει όλους τους διαθέσιμους δείκτες της χώρας  $i$ . Σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα, εκτός από μια τιμή που εξαιρείται, στον υπολογισμό της τιμής που εξαιρέθηκε. Τα αντίστοιχα σφάλματα υπολογίζονται και το ζεύγος  $(r_i, R_i)$  που επιλέγεται είναι αυτό με το μικρότερο.

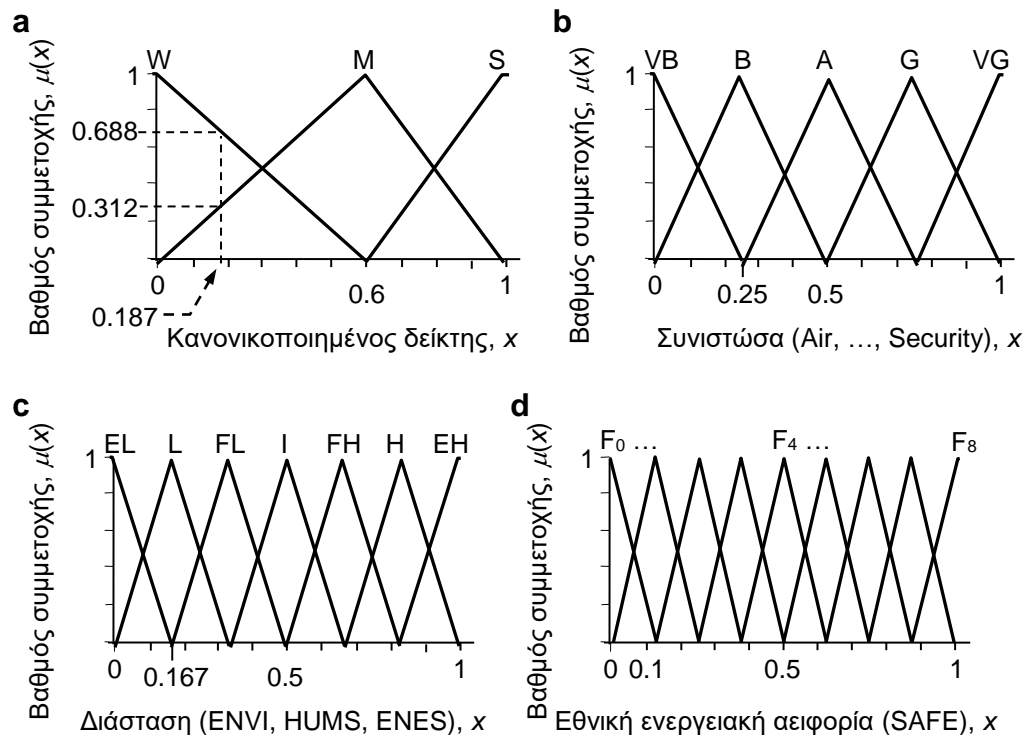
### 3.5 Ασαφοποίηση

Οι κανονικοποιημένες τιμές των δεικτών αντιστοιχίζονται σε ασαφή σύνολα που αντιπροσωπεύουν τρία διακριτά επίπεδα ενεργειακής αιφορίας, τα Weak (W) – αδύναμο, Medium (M) – μεσαίο και Strong (S) – δυνατό. Κάθε επίπεδο ορίζεται ως ασαφές υποσύνολο του διαστήματος  $[0,1]$ , το οποίο χωρίζεται σε διαστήματα τέτοια ώστε κάθε κανονικοποιημένη τιμή να μπορεί να ανήκει σε ένα ή περισσότερα ασαφή σύνολα, με κάποιο βαθμό συμμετοχής (membership grade).

Για παράδειγμα, στην Ελλάδα οι ανανεώσιμες πηγές παρέχουν το 17.2% της ενεργειακής κατανάλωσης. Η τιμή αυτή προκύπτει με εκθετική εξομάλυνση της χρονοσειράς ετήσιων ποσοστών από το 2000 έως το 2017. Το 17.2% κανονικοποιείται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ακραίων τιμών 3.41% (στο οποίο αντιστοιχεί το ελάχιστο 0) και 77.03% (μέγιστο 1) και γίνεται  $x = 0.187$ . Στο Σχ. 4a, βλέπουμε ότι το 0.187 είναι W με βαθμό συμμετοχής  $\mu_W(0.187) = (0.6 - 0.187)/(0.6 - 0) = 0.688$ , M με βαθμό  $\mu_M(0.187) = (0.187 - 0)/(0.6 - 0) = 0.312$  και S με βαθμό  $\mu_S(0.187) = 0$ . Η αντιστοιχία ενός αριθμού σε βαθμούς συμμετοχής σε ασαφή σύνολα λέγεται ασαφοποίηση (fuzzification).

Οι σύνθετες μεταβλητές περιγράφονται από πέντε έως οκτώ ασαφή σύνολα, ενώ ο αριθμός των ασαφών συνόλων αυξάνεται σε κάθε ομαδοποίηση. Έτσι, οι δείκτες περιγράφονται από τρία ασαφή σύνολα, όπως διατυπώθηκαν παραπάνω, οι συνιστώσες (Air, Land & Water, κ.ο.κ.) από πέντε ασαφή σύνολα Very Bad (VB) – πολύ κακό, Bad (B) – κακό, Average (A) – μέτριο, Good (G) – καλό και Very Good (VG) – πολύ καλό. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί ο δείκτης θνησιμότητα από ατμοσφαιρική ρύπανση, διότι είναι ο μοναδικός δείκτης της συνιστώσας Health, με αποτέλεσμα δείκτης και συνιστώσα να ταυτίζονται και να περιγράφεται και αυτός με τα πέντε ασαφή σύνολα. Οι διαστάσεις (Environment, Human System και Energy System) περιγράφονται από επτά ασαφή σύνολα Extremely Low (EL) – ιδιαιτέρως χαμηλό, Low (L) – χαμηλό, Fairly Low (FL) – κάπως χαμηλό, Intermediate (I) – μεσαίο, Fairly High (FH) – κάπως υψηλό, High (H) – υψηλό και Extremely High (EH) – ιδιαιτέρως υψηλό. Τέλος, η

εθνική αειφορία περιγράφεται από εννέα ασαφή σύνολα  $F_0, F_1, \dots, F_8$ . Τα ασαφή σύνολα και οι αντίστοιχες συναρτήσεις (βαθμοί) συμμετοχής φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Σχ. 4).



Σχ.4. Ασαφή σύνολα και αντίστοιχοι βαθμοί συμμετοχής.

### 3.6 Βάσεις κανόνων

Η σύνθεση δεικτών, συνιστωσών και διαστάσεων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια βάση κανόνων της μορφής

*If* (είσοδος-συνθήκη), *Then* (έξοδος-συνέπεια)

Το ακόλουθο παράδειγμα παρουσιάζει κανόνες από το χαμηλότερο στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας του μοντέλου:

*If* Forest είναι W και Waste είναι S και Water use είναι S τότε Land & Water είναι G

*If* ENVI είναι EL και HUMS είναι FH και ENES είναι H τότε Overall energy sustainability is  $F_4$

Το πλήθος των κανόνων *if, then* αυξάνεται γεωμετρικά με το πλήθος των εισόδων. Στο δεύτερο παράδειγμα έχουμε επτά μεταβλητές εισόδου και τρία ασαφή σύνολα ανά μεταβλητή, τότε το σύνολο των κανόνων που καλύπτει όλες τις εισόδους είναι στο πλήθος  $3^7=2187$ . Για να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις σε υπολογιστική μνήμη εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι η κάθε συνιστώσα, διάσταση και τελική τιμή αειφορίας (οι έξοδοι δηλαδή) είναι αύξουσα συνάρτηση των εισόδων της. Συνεπώς μπορούμε να λάβουμε υπόψη ανάλογους κανόνες. Αυτό γίνεται με ανάθεση ακεραίων αριθμών στα ασαφή σύνολα της εικόνας, με 0 για το χαμηλότερο ασαφές σύνολο, 1 για το αμέσως υψηλότερο, κ.ο.κ., δηλαδή:

$W = 0, M = 1, S = 2$  για τους δείκτες.

$VB = 0, B = 1, A = 2, G = 3, VG = 4$  για τις συνιστώσες.

$EL = 0, L = 1, FL = 2, I = 3, FH = 4, H = 5, EH = 6$  για τις διαστάσεις και

$F_q = q, q = 0, 1, \dots, 8$  για τον συνολικό δείκτη της ενεργειακής αειφορίας.

Για να πάρουμε κανόνες που ικανοποιούν την συνθήκη μονοτονικότητας πρέπει να ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα:

1. Ανάθεση βάρους  $w_i$  σε κάθε είσοδο, σχετικά με τις υπόλοιπες εισόδους του κανόνα. Για παράδειγμα το CO<sub>2</sub> θεωρήθηκε διπλάσιας σημαντικότητας από τις υπόλοιπες εισόδους του Air, λόγω της αυξημένης του συμβολής στην κλιματική αλλαγή.
2. Υπολογίζουμε το άθροισμα με βάρη των ασαφών συνόλων εισόδου,  $\sigma = w_1(\text{εισοδος 1}) + w_2(\text{εισοδος 2}) + \dots$ , το οποίο αποτελεί κριτήριο καθορισμού του ασαφούς συνόλου εξόδου.
3. Με βάση κάποια αύξουσα συνάρτηση αναθέτουμε το άθροισμα  $\sigma$  σε κατάλληλο ασαφές σύνολο εξόδου.

Για παράδειγμα,

Εάν ENVI είναι FL και HUMS είναι H και ENES είναι I τότε θα είναι  $\sigma = FL + H + I = 2 + 5 + 3 = 10$  και ο συνολικός δείκτης της ενεργειακής αειφορίας είναι ο  $F_4$ .

Η μικρότερη τιμή που μπορεί να λάβει ο αριθμός  $\sigma$  είναι 0 και αυτό συμβαίνει όταν όλες οι εισοδοί είναι  $EL=0$ . Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο  $F_0$ . Η υψηλότερη τιμή που μπορεί να πάρει είναι 18, που συμβαίνει όταν  $\sigma = EH + EH + EH = 3 \times 6 = 18$  και αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο  $F_8$ . Η τιμή  $F_4$  αντιστοιχεί σε μέτρια συνολική αειφορία. Επομένως κάθε  $\sigma \in [0, 18]$  έχει μία αντίστοιχη ακέραια τιμή  $q \in [0, 8]$  και από αυτήν υπολογίζεται το ασαφές σύνολο της ενεργειακής αειφορίας που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο συνδυασμό εισόδων. Εδώ χρησιμοποιούμε τον τύπο

$$\text{SAFE} = \text{Συνολική ενεργειακή αειφορία} = \begin{cases} F_0 & \sigma = 0, 1, 2 \\ F_1 & \sigma = 3, 4 \\ F_2 & \sigma = 5, 6 \\ F_3 & \sigma = 7, 8 \\ F_4 & \sigma = 9, 10 \\ F_5 & \sigma = 11, 12 \\ F_6 & \sigma = 13, 14 \\ F_7 & \sigma = 15, 16 \\ F_8 & \sigma = 17, 18 \end{cases}$$

Για τη διάσταση ENVI, ισχύει  $\sigma = 2(\text{Air}) + (\text{Land \& Water})$ , διότι δίνουμε βάρος 2 στο ασαφές σύνολο εισόδου Air. Η μέγιστη τιμή είναι  $\sigma = 12$ .

$$\text{Για τις διαστάσεις ENVI} = \begin{cases} 0(EL) & \sigma = 0,1 \\ 1(L) & \sigma = 2,3 \\ 2(FL) & \sigma = 4,5 \\ 3(I) & \sigma = 6,7 \\ 4(FH) & \sigma = 8,9 \\ 5(H) & \sigma = 10,11 \\ 6(EH) & \sigma = 12 \end{cases},$$

Οι υπόλοιπες βάσεις κανόνων δίνονται από τους τύπους:

$$\text{HUMS και ENES} = \begin{cases} 0(EL) & \sigma = 0,1,2 \\ 1(L) & \sigma = 3 \\ 2(FL) & \sigma = 4,5 \\ 3(I) & \sigma = 6,7 \\ 4(FH) & \sigma = 8,9 \\ 5(H) & \sigma = 10,11 \\ 6(EH) & \sigma = 12 \end{cases},$$

όπου  $\sigma = (\text{Access}) + (\text{Health}) + (\text{Economy})$  για το ασαφές σύνολο HUMS, ενώ για το ENES είναι  $\sigma = (\text{Generation}) + (\text{Consumption}) + (\text{Security})$ . Όλες οι συνιστώσες έχουν μοναδιαίο βάρος και περιγράφονται από την ίδια βάση κανόνων. Εν συνεχεία, έχουμε:

$$\text{Air} = \begin{cases} 0(VB) & \sigma = 0,1,2 \\ 1(B) & \sigma = 3,4 \\ 2(A) & \sigma = 5,6 \\ 3(G) & \sigma = 7,8 \\ 4(VG) & \sigma = 9,10 \end{cases},$$

όπου  $\sigma = 2\text{CO}_2 + \text{NO}_x + \text{SO}_2 + \text{PM}_{2.5}$ . Ο δείκτης  $\text{CO}_2$  έχει βάρος  $w=2$  λόγω της τεράστιας συμβολής του  $\text{CO}_2$  στο φαινόμενο του θερμοκηπίου που οδηγεί στην κλιματική αλλαγή. Ακολουθούν 3 σύνθετοι δείκτες:

$$\text{Access, Security, Land \& Water} = \begin{cases} 0(VB) & \sigma = 0,1 \\ 1(B) & \sigma = 2 \\ 2(A) & \sigma = 3 \\ 3(G) & \sigma = 4,5 \\ 4(VG) & \sigma = 6 \end{cases},$$

όπου για Access έχουμε

$$\sigma = (\text{Clean Cooking}) + (\text{Population without warm home}) + (\text{Electricity quality})$$

για Security

$$\sigma = (\text{Stocks depletion}) + (\text{Energy mix}) + (\text{Import dependency})$$

για τον δείκτη Land&Water



$$\sigma = (\text{Forest}) + (\text{Waste}) + (\text{Water use}).$$

Τέλος, έχουμε

$$\text{Economy, Generation, Consumption} = \begin{cases} 0 \text{ (VB)} & \sigma = 0,1 \\ 1 \text{ (B)} & \sigma = 2,3 \\ 2 \text{ (A)} & \sigma = 4,5, \\ 3 \text{ (G)} & \sigma = 6,7 \\ 4 \text{ (VG)} & \sigma = 8 \end{cases}$$

όπου η συνιστώσα Economy έχει τέσσερις εισόδους και

$$\sigma = (\text{GDP energy intensity}) + (\text{GDP per capita}) + (\text{Loss from power outages}) \\ + (\text{Electricity purchasing power}),$$

η Generation επίσης τέσσερις εισόδους,

$$\sigma = (\text{Fossil fuels}) + (\text{Nuclear power}) + (\text{Solar collectors}) + (\text{Power system TD losses}),$$

ενώ η Consumption έχει μόνο τρεις εισόδους, εκ των οποίων η μία με βάρος  $w = 2$ , οπότε το άθροισμα

$$\sigma = (\text{Energy per capita}) + 2(\text{Renewables}) + (\text{GHG Intensity}),$$

έχει ίδια μέγιστη τιμή,  $\sigma_{\max} = 8$ , και ίδια βάση κανόνων με τις συνιστώσες Economy και Generation.

### 3.7 Ασαφή συμπεράσματα και Αποσαφήνιση

Έστω βάση κανόνων με εισόδους  $i = 1, 2, \dots, n$  και έξοδο 0. Ένας κανόνας  $j$  έχει τη μορφή:

*if (είσοδος 1 είναι  $L_{1,j}$ ) και ... και (είσοδος  $n$  είναι  $L_{n,j}$ ), then (έξοδος 0 είναι  $L_{0,j}$ )*

όπου  $L_{i,j}$  το ασαφές σύνολο εισόδων  $i$  στον κανόνα  $j$  και  $L_{0,j}$  το αντίστοιχο ασαφές σύνολο εξόδου. Ο βαθμός συμμετοχής της εξόδου είναι ίσος με το γινόμενο όλων των εισόδων  $\mu_{0,j} = \mu_{1,j} \mu_{2,j} \dots \mu_{n,j}$ , όπου  $\mu_{i,j}$  ο βαθμός συμμετοχής της εισόδου  $i$  του ασαφούς συνόλου  $L_{i,j}$ . Εάν παραπάνω από ένας κανόνας έχουν το ίδιο ασαφές σύνολο εξόδου  $L_{0,j} = L$ , τότε ο συνολικός βαθμός συμμετοχής της εξόδου στο  $L$  μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα των μεμονωμένων βαθμών συμμετοχής, ως εξής:

$$\mu_{0,L} = \sum_{j:L_{0,j}=L} \mu_{0,j} = \sum_{j:L_{0,j}=L} \prod_{i=1}^n \mu_{i,j}$$

Αν η έξοδος χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως είσοδος σε κάποια βάση κανόνων τότε η διαδικασία ασαφών συμπερασμάτων επαναλαμβάνεται.

Με τη λεγόμενη διαδικασία αποσαφήνισης (defuzzification) υπολογίζεται μία αριθμητική τιμή για το  $x_0$ :

$$x_0 = \frac{\sum_{\substack{\text{όλα τα σύνολα } L \\ \text{στης εξόδου}}} y_L \mu_{0,L}}{\sum_{\substack{\text{όλα τα σύνολα } L \\ \text{στης εξόδου}}} \mu_{0,L}}.$$

### 3.8 Ανάλυση ευαισθησίας

Οι δείκτες ενεργειακής αειφορίας και οι σύνθετες μεταβλητές της περιέχουν σημαντικές για τους αποφασίζοντες των χωρών πληροφορίες, επειδή αποκαλύπτεται μέσω των δεικτών σε ποιους τομείς μπορεί να υπάρξει βελτίωση. Όμως δεν είναι όλοι οι δείκτες ισότιμοι σε σχέση με τη συνολική τους συμβολή στην τελική ενεργειακή αειφορία. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό εργαλείο στη συστηματική μελέτη των αποτελεσμάτων που μπορεί να έχουν μικρές διαταραχές στις σύνθετες μεταβλητές. Επομένως και τα δύο είδη πληροφοριών αυτών είναι αναγκαία για τη λήψη μέτρων, σε επίπεδο χώρας αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο για τη βελτίωση των δεικτών της ενεργειακής αειφορίας.

Η ενεργειακή αειφορία γράφεται ως συνάρτηση  $\text{SAFE}(x_1, \dots, x_{25})$ , όπου  $x_c$  η κανονικοποιημένη τιμή του δείκτη  $c$ . Για την ανάλυση ευαισθησίας εισάγουμε μικρές διαταραχές  $\varepsilon$  στις μεταβλητές εισόδου και υπολογίζουμε την αύξηση στις αντίστοιχες εξόδους, διότι η  $\text{SAFE}$  είναι αύξουσα συνάρτηση. Ο ρυθμός βελτίωσης της ολικής αειφορίας σε σχέση με τον δείκτη  $c$  δίνεται από τη διαφορά πρώτης τάξεως

$$\Delta_c = \text{SAFE}(x_1, \dots, x_c + \varepsilon, \dots) - \text{SAFE}(x_1, \dots, x_c, \dots)$$

Η κατάταξη των δεικτών γίνεται με κριτήριο το

$$S_c = \Delta_c(1 - x_c)$$

και όχι μόνο το  $\Delta_c$  (Phillis et al., 2011). Αυτό, διότι το  $\Delta_c$  τείνει να ευνοεί συνιστώσες και διαστάσεις με λιγότερες εισόδους, ενώ αγνοεί το κόστος βελτίωσης του δείκτη  $c$ , που είναι ανάλογο του  $x_c$ . Το  $(1 - x_c)$  εκφράζει την απόσταση του δείκτη  $c$  από την αειφόρο του τιμή και αποτελεί μέτρο της ευκολίας της βελτίωσης του δείκτη. Η ευαισθησία  $S_c$  παρέχει πληροφορία για το  $(1 - x_c)$  και ταυτόχρονα για την επίδραση  $\Delta_c$ .

Εάν μια χώρα έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει ταυτόχρονα δύο δείκτες της ενεργειακής αειφορίας τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορά δεύτερης τάξεως

$$\Delta_{cv} = \text{SAFE}(x_1, \dots, x_c + \varepsilon, \dots, x_v + \varepsilon, \dots) - \text{SAFE}(x_1, \dots, x_c, \dots, x_v, \dots)$$

και το κριτήριο γίνεται

$$S_{cv} = \Delta_{cv}(1 - x_c)(1 - x_v).$$

Η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να επεκταθεί και για διαφορές υψηλότερης τάξης, εάν μπορούν οι ανάλογοι δείκτες να βελτιωθούν ταυτόχρονα.

## 4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 2 δείχνει την κατάταξη ευρωπαϊκών χωρών σύμφωνα με την ολική ενεργειακή αιφορία τους για τα έτη 2000-2017. Έχουν συμπεριληφθεί σε αυτές και η Ρωσία, Τουρκία, Αρμενία και Γεωργία λόγω γειτνίασης και για σύγκριση.

Οι κορυφαίες θέσεις καταλαμβάνονται από Σκανδιναβικές χώρες κυρίως, με πρώτη την Ισλανδία και στη συνέχεια την Ελβετία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία. Ακολουθεί η Αυστρία, η Γαλλία και στη συνέχεια η Δανία. Στη 13<sup>η</sup> θέση βρίσκεται το Ηνωμένο Βασίλειο. Χώρες με μέτρια ενεργειακή αιφορία είναι η Ιταλία, η Λετονία, η Σλοβακία και η Γερμανία, ενώ οι πιο αδύναμες χώρες είναι η Ουκρανία, η Ρωσία, η Βοσνία και η Σερβία, με τελευταία τη Βουλγαρία, η οποία είναι η λιγότερο ενεργειακά αιεφόρος χώρα της Ευρώπης τα έτη αυτά, σύμφωνα με το μοντέλο SAFE.

**Πίνακας 2.** Κατάταξη χωρών, ολική αιφορία, διαστάσεις και σημαντικότεροι δείκτες κάθε χώρας (δεδομένα για το διάστημα 2000–2017)

	Country	SAFE	ENES	HUMS	ENVI	Most influential indicator	Most influential pair of indicators
1	Iceland	0.7489	0.784	0.727	0.734	GDP energy intensity	GDP energy intensity, Energy per capita
2	Switzerland	0.7333	0.499	0.848	0.815	Nuclear power	Nuclear power, Solar collectors
3	Norway	0.7232	0.549	0.880	0.749	Energy per capita	Solar collectors, Energy per capita
4	Sweden	0.6937	0.580	0.848	0.673	Waste	Forest, Waste
5	Austria	0.6888	0.602	0.818	0.660	Renewables	Forest, Renewables
6	France	0.6806	0.445	0.790	0.828	Renewables	Nuclear power, Renewables
7	Denmark	0.6548	0.587	0.810	0.598	CO2	CO2, Renewables
8	Ireland	0.6089	0.413	0.853	0.607	CO2	CO2, Renewables
9	Portugal	0.5998	0.473	0.606	0.775	Air pollution mortality	Forest, Air pollution mortality
10	United Kingdom	0.5906	0.401	0.776	0.645	CO2	CO2, Renewables
11	Spain	0.5884	0.420	0.665	0.734	Renewables	Solar collectors, Renewables
12	Croatia	0.5777	0.459	0.531	0.791	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Solar collectors
13	Lithuania	0.5730	0.419	0.527	0.831	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Power system TD losses
14	Netherlands	0.5713	0.460	0.817	0.497	CO2	CO2, Renewables
15	Italy	0.5686	0.447	0.615	0.701	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Solar collectors
16	Latvia	0.5481	0.497	0.497	0.729	Waste	Forest, Waste
17	Slovakia	0.5411	0.449	0.605	0.638	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Solar collectors
18	Germany	0.5330	0.486	0.693	0.494	CO2	CO2, Forest
19	Luxembourg	0.5269	0.357	0.847	0.495	CO2	CO2, Renewables
20	Slovenia	0.5152	0.471	0.667	0.491	CO2	CO2, Waste
21	Belgium	0.5127	0.420	0.686	0.511	CO2	CO2, Renewables

Country	SAFE	ENES	HUMS	ENVI	Most influential indicator	Most influential pair of indicators
22 Romania	0.5090	0.429	0.425	0.754	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Solar collectors
23 Finland	0.5004	0.483	0.779	0.323	CO2	CO2, Solar collectors
24 Albania	0.4910	0.488	0.338	0.712	Air pollution mortality	Forest, Air pollution mortality
25 Cyprus	0.4861	0.327	0.604	0.621	Air pollution mortality	Energy mix, Import dependency
26 Malta	0.4640	0.192	0.679	0.606	Energy mix	Energy mix, Import dependency
27 Hungary	0.4639	0.370	0.502	0.607	Renewables	Waste, Renewables
28 Turkey	0.4586	0.350	0.451	0.659	Air pollution mortality	PM2.5, Renewables
29 Czechia	0.4385	0.460	0.605	0.349	CO2	CO2, Air pollution mortality
30 Poland	0.4035	0.400	0.514	0.410	Air pollution mortality	Waste, Renewables
31 Greece	0.3940	0.405	0.460	0.439	Renewables	Renewables, GHG intensity
32 Belarus	0.3935	0.302	0.429	0.568	Air pollution mortality	Waste, Air pollution mortality
33 Georgia	0.3897	0.476	0.195	0.628	Air pollution mortality	Forest, Air pollution mortality
34 Armenia	0.3794	0.339	0.415	0.508	PM2.5	PM2.5, Waste
35 Moldova	0.3685	0.291	0.282	0.667	Waste	Waste, Population without warm home
36 Estonia	0.3680	0.559	0.648	0.015	NOx	NOx, SO2
37 North Macedonia	0.3557	0.338	0.226	0.627	Air pollution mortality	Clean cooking, Air pollution mortality
38 Montenegro	0.3320	0.448	0.323	0.364	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Solar collectors
39 Ukraine	0.3101	0.349	0.231	0.497	Air pollution mortality	Air pollution mortality, Renewables
40 Russia	0.2864	0.330	0.437	0.247	Air pollution mortality	CO2, Forest
41 Bosnia and Herzegovina	0.2768	0.451	0.177	0.371	Air pollution mortality	Clean cooking, Air pollution mortality
42 Serbia	0.2603	0.371	0.236	0.337	Air pollution mortality	Air pollution mortality, GHG intensity
43 Bulgaria	0.2390	0.393	0.209	0.285	Air pollution mortality	Waste, Air pollution mortality

Στον Πίνακα 2 επίσης καταγράφονται οι δείκτες που ήταν οι πιο καθοριστικοί στην ενεργειακή αειφορία κάθε χώρας, δηλαδή είχαν τις υψηλότερες τιμές στην ανάλυση ευαισθησίας πρώτου και δευτέρου βαθμού,  $S_c$  και  $S_{cv}$ . Αυτές υπολογίζονται εισάγοντας στους δείκτες  $c$  ή σε ζεύγη δεικτών  $(c, v)$  διαταραχή  $\varepsilon = 0.01$  και στη συνέχεια τρέχοντας το μοντέλο. Στον πίνακα φαίνεται πως η τιμή  $S_c$  δεν συμφωνεί σε όλες τις περιπτώσεις με την πρώτη τιμή του ζεύγους  $S_{cv}$  λόγω μη γραμμικότητας του μοντέλου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Τουρκίας ο πιο σημαντικός δείκτης είναι ο Air pollution mortality, ενώ όταν υπολογίζεται η ανάλυση ευαισθησίας δεύτερου βαθμού, οι πιο σημαντικοί δείκτες είναι οι PM2.5 και Renewables.

**Πίνακας 3.** Ενεργειακή αειφορία ανά περιοχή και ανά οικονομική ομάδα. Στις Σκανδιναβικές χώρες συμπεριλαμβάνεται και η Ισλανδία.

Regions		SAFE	ENES	HUMS	ENVI
Bk	Balkans	0.401	0.432	0.357	0.527
Bt	Baltic	0.496	0.492	0.557	0.525
EE	East Europe	0.395	0.377	0.424	0.502
Sc	Scandinavia	0.664	0.597	0.809	0.616
SE	South Europe	0.517	0.377	0.605	0.646
WE	West Europe	0.605	0.454	0.792	0.617
CT	Caucasus and Turkey	0.409	0.388	0.353	0.599
EU28 European Union		0.530	0.443	0.646	0.575
EU14 EU members until 2004		0.584	0.478	0.726	0.603
Income groups					
HO	High income OECD	0.567	0.481	0.692	0.588
HN	High income non OECD	0.530	0.345	0.647	0.666
UM	Upper middle income	0.364	0.393	0.322	0.505
LM	Lower middle income	0.339	0.320	0.257	0.582

Ο Πίνακας 3 αποτυπώνει την ολική ενεργειακή αειφορία ανά περιοχή και ανά οικονομική ομάδα. Η Σκανδιναβία και η δυτική Ευρώπη έχουν τις υψηλότερες τιμές ανά περιοχή γενικά, όμως η νότια Ευρώπη έχει υψηλότερο δείκτη ENVI (περιβάλλον) από τη Σκανδιναβία, η οποία είναι τρίτη. Η περιοχή με τις χαμηλότερες επιδόσεις συνολικά είναι η ανατολική Ευρώπη, η οποία βρίσκεται στην τελευταία θέση και στον δείκτη περιβάλλον. Οι χώρες High income (υψηλού εισοδήματος) OECD είναι οι πιο αειφόρες ενεργειακά, ενώ οι Lower middle income (χαμηλού μεσαίου εισοδήματος) έχουν την χαμηλότερη συνολική ενεργειακή αειφορία, όπως επίσης και την πιο χαμηλή τιμή της διάστασης του περιβάλλοντος.

**Πίνακας 4.** Πιθανότητες (%) ώστε ένας δείκτης να είναι μεταξύ των 3 πλέον σημαντικών δεικτών για τη βελτίωση της αειφορίας μίας χώρας. Οι πιθανότητες υπολογίζονται ως μέσοι όροι ανά γεωγραφική περιοχή και οικονομική ομάδα. Οι συντομογραφίες είναι όπως του Πίνακα 3.

Δείκτης	Bk	Bt	EE	Sc	SE	WE	CT	EU28	EU14	HO	HN	UM	LM	43 χώρες
CO <sub>2</sub>	14	33	40	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>78</b>		54	62	64	25	8		42
NO <sub>x</sub>		33		20	20			11	8	8	25			7
SO <sub>2</sub>	14	33	10					7		4		17		7
PM2.5	29						67					33		9
Forest		33		20	20	22	<b>100</b>	14	23	16		25		16
Waste	14	33	80	20	20		67	25	8	24		42	<b>100</b>	30
Water use														
Clean cooking	43											25		7
Population without warm home				10									50	2
Electricity quality	14										8			2
GDP energy intensity				20	20					4				2

43												
Δείκτης	Bk	Bt	EE	Sc	SE	WE	CT	EU28	EU14	HO	HN	UM LM χώρες
GDP per capita												
Loss from power outages												
Electricity Purchasing Power												
Air pollution mortality	<b>100</b>	<b>67</b>	<b>100</b>	60	60	<b>78</b>	67	<b>79</b>	69	<b>80</b>	<b>75</b>	<b>92</b> <b>100</b> <b>84</b>
Fossil fuels												
Nuclear power					22		4	8	8			5
Solar collectors		33	10	20	20	22		18	23	20	8	14
Power system TD losses	14										8	2
Energy per capita				20	20					4		2
Renewables	29	33	50	40	40	<b>78</b>		68	<b>85</b>	60	<b>75</b>	25 50 51
GHG intensity	29							11	15	8	25	8 9
Stocks depletion												
Energy mix							7				50	5
Import dependency							4				25	2

Στον Πίνακα 4 συνοψίζονται οι ποσοστιαίες πιθανότητες ενός δείκτη να είναι από τους τρεις πιο σημαντικούς για κάθε γεωγραφική περιοχή και οικονομική ομάδα. Τα στατιστικά στοιχεία λαμβάνονται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας πρώτης τάξης. Οι δείκτες που έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στην ενεργειακή αιεφορία των Ευρωπαϊκών χωρών είναι ο CO<sub>2</sub>, Forest, Waste, Air pollution mortality και Renewables. Οι περιοχές χωρών με τις υψηλότερες τιμές ενεργειακής αιεφορίας, η Σκανδιναβία και η Δυτική Ευρώπη, φαίνεται ότι επηρεάζονται περισσότερο από το CO<sub>2</sub> και τον Mortality, ενώ περιοχές με τη χαμηλότερη τιμή αιεφορίας, δηλαδή η Ανατολική Ευρώπη και οι χαμηλού μεσαίου εισοδήματος χώρες επηρεάζονται περισσότερο από τους δείκτες Waste και Mortality.

**Πίνακας 5.** Κορυφαίες 10 χώρες σε διάφορα συστήματα μέτρησης της ενεργειακής αιεφορίας.

SAFE (παρούσα έκδοση για την Ευρώπη)	SAFE (προηγούμενη έκδοση παγκόσμια)	SEDI (παγκόσμια)	ETI 2017 (παγκόσμια)	RISE (παγκόσμια)	EAPI (παγκόσμια)
Iceland	Denmark	Iran	Denmark	Denmark	Switzerland
Switzerland	Sweden	Argentina	Sweden	USA	Norway
Norway	Norway	Libya	Switzerland	Canada	Sweden
Sweden	Switzerland	Algeria	Netherlands	Netherlands	Denmark
Austria	New Zealand	Venezuela	United Kingdom	Germany	France
France	United Kingdom	Jordan	Germany	United Kingdom	Austria
Denmark	Austria	Congo	Norway	Romania	Spain
Ireland	Finland	Gabon	France	Italy	Colombia
Portugal	Portugal	Ecuador	New Zealand	Czechia	New Zealand
United Kingdom	Spain	Malaysia	Slovenia	France	Uruguay
Αριθμός κοινών χωρών	7	0	6	3	6

Στον Πίνακα 5 γίνεται σύγκριση μεταξύ αποτελεσμάτων διαφόρων συστημάτων υπολογισμού της ενεργειακής αειφορίας. Όλες οι μέθοδοι πλην της παρούσης εξετάζουν χώρες σε παγκόσμιο επίπεδο.

Δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και του SEDI (Sustainable Energy Development Index), κυρίως επειδή ο SEDI συγκεντρώνεται σε 62 χώρες με λιγότερο αναπτυγμένες οικονομίες και έτσι δεν υπάρχει επαρκής επικάλυψη ώστε να συγκριθούν οι δύο μελέτες. Διαπιστώνουμε ικανοποιητική επικάλυψη με το ETI και υπάρχει συμφωνία σε 6 χώρες από τις 10 πρώτες. Υπάρχει μικρή συσχέτιση με τα αποτελέσματα του RISE, με μονάχα τρεις κοινές χώρες. Ο δείκτης EAPI βρίσκεται σε μεγαλύτερη συμφωνία με τον δείκτη SAFE της παρούσας εργασίας επειδή και τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούν παρεμφερείς δείκτες. Η μεγαλύτερη συσχέτιση στις δέκα πρώτες χώρες υπάρχει ανάμεσα στα δύο μοντέλα SAFE, με επτά χώρες στις δέκα κοινές. Ενδεχομένως εάν τα παραπάνω συστήματα μέτρησης περιελάμβαναν μόνο ευρωπαϊκές χώρες να διαπιστώναμε μεγαλύτερη συμφωνία με τα δικά μας αποτελέσματα και ειδικά στις περιπτώσεις SAFE, ETI, RISE και EAPI.

**Πίνακας 6.** Συντελεστές συσχέτισης ορισμένων δεικτών ανάπτυξης με την ενεργειακή αειφορία και διαστάσεις της

	Χώρα	SAFE <sup>α</sup>	ENES <sup>α</sup>	HUMS <sup>α</sup>	ENVI <sup>α</sup>	ΑΕΠ <sup>β</sup>	Πτυχιούχοι <sup>γ</sup>	Ελευθερίες <sup>δ</sup>
1	Albania	0.491	0.488	0.338	0.712	0.491	12.9	68
2	Armenia	0.379	0.339	0.415	0.508	0.379	24.4	45
3	Austria	0.689	0.602	0.818	0.660	0.689	14.2	95
4	Belarus	0.394	0.302	0.429	0.568	0.394		20
5	Belgium	0.513	0.420	0.686	0.511	0.513	34.7	95
6	Bosnia & Herz.	0.277	0.451	0.177	0.371	0.277	8.4	55
7	Bulgaria	0.239	0.393	0.209	0.285	0.239	24.7	80
8	Croatia	0.578	0.459	0.531	0.791	0.578		87
9	Cyprus	0.486	0.327	0.604	0.621	0.486	26.6	94
10	Czechia	0.439	0.460	0.605	0.349	0.439	20.9	94
11	Denmark	0.655	0.587	0.810	0.598	0.655	31.0	97
12	Estonia	0.368	0.559	0.648	0.015	0.368		94
13	Finland	0.500	0.483	0.779	0.323	0.500	24.3	100
14	France	0.681	0.445	0.790	0.828	0.681	18.0	90
15	Georgia	0.390	0.476	0.195	0.628	0.390	34.0	64
16	Germany	0.533	0.486	0.693	0.494	0.533	25.6	95
17	Greece	0.394	0.405	0.460	0.439	0.394	20.1	84
18	Hungary	0.464	0.370	0.502	0.607	0.464	20.4	76
19	Iceland	0.749	0.784	0.727	0.734	0.749		97
20	Ireland	0.609	0.413	0.853	0.607	0.609	31.2	96
21	Italy	0.569	0.447	0.615	0.701	0.569		89
22	Latvia	0.548	0.497	0.497	0.729	0.548	29.3	87
23	Lithuania	0.573	0.419	0.527	0.831	0.573	34.5	91
24	Luxembourg	0.527	0.357	0.847	0.495	0.527		98
25	Malta	0.464	0.192	0.679	0.606	0.464	13.5	96
26	Moldova	0.369	0.291	0.282	0.667	0.369	19.4	62

	Χώρα	SAFE <sup>α</sup>	ENES <sup>α</sup>	HUMS <sup>α</sup>	ENVI <sup>α</sup>	ΑΕΠ <sup>β</sup>	Πτυχιούχοι <sup>γ</sup>	Ελευθερίες <sup>δ</sup>
27	Montenegro	0.332	0.448	0.323	0.364	0.332		69
28	Netherlands	0.571	0.460	0.817	0.497	0.571	29.4	99
29	N. Macedonia	0.356	0.338	0.226	0.627	0.356		57
30	Norway	0.723	0.549	0.880	0.749	0.723	28.1	100
31	Poland	0.404	0.400	0.514	0.410	0.404	24.9	89
32	Portugal	0.600	0.473	0.606	0.775	0.600	19.2	97
33	Romania	0.509	0.429	0.425	0.754	0.509	13.0	84
34	Russia	0.286	0.330	0.437	0.247	0.286	2.1	20
35	Serbia	0.260	0.371	0.236	0.337	0.260	14.9	76
36	Slovakia	0.541	0.449	0.605	0.638	0.541	20.7	89
37	Slovenia	0.515	0.471	0.667	0.491	0.515	20.7	92
38	Spain	0.588	0.420	0.665	0.734	0.588	20.9	94
39	Sweden	0.694	0.580	0.848	0.673	0.694	23.9	100
40	Switzerland	0.733	0.499	0.848	0.815	0.733	36.9	96
41	Turkey	0.459	0.350	0.451	0.659	0.459		38
42	Ukraine	0.310	0.349	0.231	0.497	0.310		61
43	UK	0.591	0.401	0.776	0.645	0.591	33.9	95
		<b>SAFE<sup>α</sup></b>	<b>ENES<sup>α</sup></b>	<b>HUMS<sup>α</sup></b>	<b>ENVI<sup>α</sup></b>	<b>ΑΕΠ<sup>β</sup></b>	<b>Πτυχιούχοι<sup>γ</sup></b>	<b>Ελευθερίες<sup>δ</sup></b>
<b>Σ. συσχέτισης με SAFE:</b>			0.588	0.830	0.686	0.674	0.433	0.633
<b>Συντ. συσχέτισης με ENES:</b>				0.409	0.132	0.322	0.257	0.467
<b>Συντελεστής συσχέτισης με HUMS:</b>					0.249	0.868	0.381	0.685
<b>Συντελεστής συσχέτισης με ENVI:</b>						0.155	0.306	0.201

<sup>α</sup>Αποτελέσματα μοντέλου με δεδομένα δεικτών 2000-2017.

<sup>β</sup>Κατά κεφαλήν ΑΕΠ το 2017 σε διεθνή δολάρια αγοραστικής ισοτιμίας, PPP (Πηγή: World Bank, δείκτης NY.GDP.PCAP.PP.CD).

<sup>γ</sup>Ποσοστό πληθυσμού που είχαν πτυχίο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης στην καταγραφή του 2017 ή στου πλέον πρόσφατου προηγούμενου έτους. Κενά έχουν οι χώρες με μη διαθέσιμες μετρήσεις. (Πηγή: World Bank, δείκτης SE.TER.CUAT.BA.ZS).

<sup>δ</sup>Freedom in the World 2017: Άθροισμα από 0 έως 100 των επιδόσεων κάθε χώρας σε 25 δείκτες πολιτικών δικαιωμάτων και ατομικών ελευθεριών (Πηγή: Freedom House, [https://freedomhouse.org/sites/default/files/Aggregate Category and Subcategory Scores FIW2003-2018.xlsx](https://freedomhouse.org/sites/default/files/Aggregate%20Category%20and%20Subcategory%20Scores%20FIW2003-2018.xlsx)).

Στον Πίνακα 6 έχουμε συγκεντρώσει μαζί με τον δείκτη SAFE και των συγκεντρωτικών διαστάσεων του, τρεις δείκτες ευμάρειας των Ευρωπαϊκών χωρών. Αυτοί είναι το ΑΕΠ (GDP) σε διεθνή δολάρια αγοραστικής ισοτιμίας PPP, το ποσοστό πτυχιούχων τριτοβάθμιας εκπαίδευσης του πληθυσμού μιας χώρας στην καταγραφή του 2017 ή αργότερα και οι ελευθερίες μιας χώρας ως άθροισμα 0-100 σε 25 δείκτες πολιτικών δικαιωμάτων. Στον ίδιο πίνακα καταγράφονται και οι συσχετίσεις των τριών νέων δεικτών με τον SAFE και τις διαστάσεις του. Οι συσχετίσεις είναι όλες θετικές, ενώ οι ισχυρότερες συσχετίσεις είναι μεταξύ:

HUMS και ΑΕΠ,  $R=0.868$ , πολύ ισχυρή συσχέτιση

SAFE και HUMS,  $R=0.830$ , πολύ ισχυρή συσχέτιση

SAFE και ΑΕΠ,  $R=0.674$ , ισχυρή συσχέτιση.

Οι ασθενέστερες συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ των δεικτών:

ENES και ENVI,  $R=0.132$ , πολύ ασθενής συσχέτιση



ENVI και ΑΕΠ,  $R=0.155$ , πολύ ασθενής συσχέτιση

ENVI και Ελευθερία,  $R=0.201$ , ασθενής συσχέτιση.

Φαίνεται επίσης ότι από τους τρεις δείκτες ευμάρειας των χωρών, ο λιγότερο καθοριστικός στην ενεργειακή αιεφορία είναι ο αριθμός των πτυχιούχων, ( $R=0.433$ , μέτρια συσχέτιση), ενώ η Ελευθερία έχει μεγαλύτερη συσχέτιση με τον SAFE ( $R=0.633$ , ισχυρή συσχέτιση).

**Πίνακας 7.** Εξέλιξη της κατάταξης χωρών 2007, 2012 και 2017. Μεγαλύτερη άνοδος και μεγαλύτερη πτώση σε σχέση με το 2007.

	Κατατάξεις: 2007SAFE	2012SAFE	2017SAFE
1	Norway 0.762	Sweden 0.752	Iceland 0.749
2	Iceland 0.755	Iceland 0.741	Switzerland 0.733
3	Sweden 0.728	Switzerland 0.720	Norway 0.723
4	Switzerland 0.710	Norway 0.716	Sweden 0.694
5	France 0.682	Austria 0.685	Austria 0.689
6	Austria 0.661	France 0.659	France 0.681
7	Spain 0.623	Denmark 0.641	Denmark 0.655
8	UK 0.598	Ireland 0.595	Ireland 0.609
9	Ireland 0.595	Portugal 0.594	Portugal 0.600
10	Portugal 0.593	Latvia 0.588	UK 0.591
11	Denmark 0.586	Netherlands 0.586	Spain 0.588
12	Netherlands 0.573	Spain 0.586	Croatia 0.578
13	Latvia 0.562	UK 0.569	Lithuania 0.573
14	Lithuania 0.550	Lithuania 0.554	Netherlands 0.571
15	Finland 0.548	Croatia 0.554	Italy 0.569
16	Germany 0.547	Italy 0.554	Latvia 0.548
17	Italy 0.543	Germany 0.547	Slovakia 0.541
18	Slovenia 0.517	Finland 0.541	Germany 0.533
19	Belgium 0.516	Slovakia 0.532	Luxembourg 0.527
20	Croatia 0.510	Belgium 0.523	Slovenia 0.515
21	Luxembourg 0.509	Slovenia 0.522	Belgium 0.513
22	Albania 0.496	Luxembourg 0.502	Romania 0.509
23	Turkey 0.467	Hungary 0.492	Finland 0.500
24	Hungary 0.464	Romania 0.490	Albania 0.491
25	Slovakia 0.460	Albania 0.483	Cyprus 0.486
26	Georgia 0.458	Cyprus 0.481	Malta 0.464
27	Montenegro 0.423	Turkey 0.458	Hungary 0.464
28	Armenia 0.422	Georgia 0.453	Turkey 0.459
29	Moldova 0.416	Moldova 0.446	Czechia 0.439
30	Greece 0.411	Poland 0.422	Poland 0.404
31	Cyprus 0.409	Czechia 0.421	Greece 0.394
32	Romania 0.408	Greece 0.416	Belarus 0.394
33	Czechia 0.396	Armenia 0.414	Georgia 0.390
34	N. Macedonia 0.395	Malta 0.399	Armenia 0.379
35	Malta 0.388	Belarus 0.395	Moldova 0.369
36	Belarus 0.379	N. Macedonia 0.359	Estonia 0.368
37	Poland 0.364	Estonia 0.351	N. Macedonia 0.356
38	Estonia 0.356	Ukraine 0.327	Montenegro 0.332
39	Bosnia & Herz. 0.352	Montenegro 0.318	Ukraine 0.310
40	Ukraine 0.343	Russia 0.315	Russia 0.286

	<b>Κατατάξεις: 2007SAFE</b>	<b>2012SAFE</b>	<b>2017SAFE</b>
41	Serbia0.331	Bosnia & Herz.0.277	Bosnia & Herz.0.277
42	Russia0.299	Serbia0.253	Serbia0.260
43	Bulgaria0.234	Bulgaria0.215	Bulgaria0.239
<hr/>			
Μεγαλύτερη άνοδος από 2007:			
		Ρουμανία +8, Πολωνία +7, Σλοβακία +6	Ρουμανία 10, Σλοβακία +2, Κροατία +8
<hr/>			
Μεγαλύτερη πτώση από 2007:			
		Μαυροβούνιο –12, Αρμενία, Ισπανία, Ην. Βασίλειο –5	Μαυροβούνιο –11, Φινλανδία 8, Αρμενία, Μολδαβία –6

Ο Πίνακας 7 «φωτογραφίζει» την εξέλιξη του δείκτη SAFE των Ευρωπαϊκών χωρών για τις χρονιές 2000-2007, 2000-2012 και 2000-2017 και επισημαίνει ποιες χώρες είχαν τη μεγαλύτερη άνοδο και τη μεγαλύτερη πτώση από το 2007. Η Ρουμανία συγκαταλέγεται ανάμεσα στις χώρες που αύξησαν την ενεργειακή τους αιφορία, ανεβαίνοντας 8 θέσεις ως το 2012 και άλλες 10 έως το 2017. Η Σλοβακία επίσης σημείωσε μεγάλη άνοδο, με +6 θέσεις ως το 2012, ενώ η Κροατία βελτίωσε την ολική ενεργειακή της αιφορία κατά 8 θέσεις ως το 2017. Σε αντιδιαστολή, το Μαυροβούνιο σημείωσε και στα δύο διαστήματα μεγάλη πτώση, με –12 θέσεις στο διάστημα 2007-2012 και ακόμη –11 έως το 2017. Επίσης μεγάλη πτώση σημείωσε και η Φινλανδία, η οποία είχε πολύ χαμηλή επίδοση στη διάσταση ENVI=0.323, το οποίο οφείλεται πιθανότατα στην κακή τιμή του δείκτη εκπομπών CO<sub>2</sub>.

## 5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία ορίσαμε την ενεργειακή αειφορία με βάση τις σύνθετες μεταβλητές της. Έγινε έρευνα και συλλογή δεδομένων των βασικών δεικτών της αειφορίας και με αυτά τα πρωτογενή δεδομένα έγινε υπολογισμός της συνολικής ενεργειακής αειφορίας 43 Ευρωπαϊκών χωρών και κατάταξή τους. Αυτός ο υπολογισμός έγινε με χρήση του μοντέλου SAFE, το οποίο χρησιμοποιεί ασαφή λογική για την εύρεση της αειφορίας και τον ορισμό της στο διάστημα  $[0, 1]$ . Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι οι πιο καθοριστικοί δείκτες για την ενεργειακή αειφορία, είναι οι CO<sub>2</sub>, Forest, Waste, Air pollution mortality, Renewables. Επίσης έδειξε ότι χώρες με χαμηλό ΑΕΠ είχαν μεγαλύτερη συμβολή του HUMS και επομένως του Air pollution mortality, στην ολική ενεργειακή αειφορία, ενώ όλες οι χώρες επηρεάζονται από τον ENVI και συνεπώς από τους δείκτες CO<sub>2</sub>, Forest και Waste.

Οι πιο υψηλόβαθμες χώρες βρέθηκαν να είναι η Ισλανδία, η Ελβετία, η Νορβηγία και η Σουηδία. Η Σκανδιναβία είναι σταθερά στην κορυφή ερευνών που έχουν να κάνουν με την αειφορία, οπότε το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο. Κάποια λιγότερο διαισθητικά αποτελέσματα ήταν, για παράδειγμα, η σχετικά χαμηλή βαθμολογία της Φινλανδίας (θέση 23).

Εν κατακλείδι, διαπιστώσαμε ότι παρόλο που υπάρχει ένας βαθμός υποκειμενικότητας στις βάσεις κανόνων και στις παραμέτρους που εισάγουμε στο μοντέλο SAFE για να υπολογίσουμε την ενεργειακή αειφορία, το μοντέλο είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί ανάλυση ευαισθησίας, πράγμα που άλλα μοντέλα δεν έχουν τη δυνατότητα να κάνουν. Εκτός αυτού, το SAFE βλέπει την ενεργειακή αειφορία μακροσκοπικά αλλά και μικροσκοπικά, υπολογίζοντάς την στο σύνολό της, αλλά και τις επί μέρους συνιστώσες και διαστάσεις τους.

## 6 Βιβλιογραφία

- Banerjee, S.G., Moreno, F.A., Sinton, J., Primiani, T., and Seong, J. (2017). *Regulatory indicators for sustainable energy* (No. 26099). The World Bank. Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/26099>.
- Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J.G.J., Vignati, E., Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries - 2019 Report, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-11100-9, doi:10.2760/687800, JRC117610.
- IEA (2015). *Energy and Climate Change: World Energy Outlook Special Report*. Available at: <https://webstore.iea.org/weo-2015-special-report-energy-and-climate-change>.
- Iddrisu, I. and Bhattacharyya, S.C. (2015). Sustainable energy development index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 513-530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.032>
- Grigoroudis, E., Kouikoglou, V. S., Phillis, Y. A., & Kanellos, F. D. (2019). Energy sustainability: a definition and assessment model. *Operational Research*. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00492-2>
- Phillis, Y.A., & Andriantiatsaholainaina, L. (2001). Sustainability: An ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, 37, 435-456. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00290-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00290-1)
- Phillis, Y. A., Grigoroudis, E., & Kouikoglou, V. S. (2011). Sustainability ranking and improvement of countries. *Ecological Economics*, 70(3), 542-553.
- UNFCCC (2016). Decisions adopted by the Conference of the Parties: Decision 1/CP.21. United Nations, Framework Convention on Climate Change. Available at: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- WEC (2017). *World Energy Trilemma Index 2017*. London: WEC.
- WEF (2017). *Global Energy Architecture Performance Index Report*. Geneva: WEF.
- Wright, D. J. (1986). Forecasting data published at irregular time intervals using an extension of Holt's method. *Management science*, 32(4), 499-510.
- (1) <https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/where-greenhouse-gases-come-from.php>
- (2) <https://www3.epa.gov/region1/airquality/pm-human-health.html>
- (3) <http://www.fao.org/forestry/13707-0e576ecd14f96f198d96c03149a6db0c0.pdf>
- (4) <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull35-4/35404682733.pdf>
- (5) [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc116125\\_factsheet\\_freshwater\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc116125_factsheet_freshwater_0.pdf)
- (6) <https://www.iea.org/sdg/cooking/>,

- <http://energyaccessplatform.org/index.php/focus-areas/clean-cooking>
- (7) [http://www.groscurth.de/uploads/media/NEMESS\\_energy\\_1995.pdf](http://www.groscurth.de/uploads/media/NEMESS_energy_1995.pdf)
- (8) [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft\\_publication\\_REF2016\\_v13.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf)
- (9) <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/rise---regulatory-indicators-for-sustainable-energy>